

39

## DERA Rohstoffinformationen



**Edelgase –  
Versorgung wirklich kritisch?**

## Impressum

Herausgeber: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der  
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)  
Wilhelmstraße 25–30  
13593 Berlin  
Tel.: +49 30 36993 226  
Fax: +49 30 36993 100  
dera@bgr.de  
www.deutsche-rohstoffagentur.de

Autoren: Dr. Harald Elsner  
  
mit einem Fachbeitrag von:  
Maren Liedtke (Risikobewertung)

sowie einem Fachbeitrag von Jürgen Messner  
und fachlicher Unterstützung von Dr. Martin Blumenberg  
sowie Jan Warstat/NASCO Energie und Rohstoff AG

Kontakt: BGR/DERA  
Dr. Harald Elsner  
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
Stilleweg 2  
30655 Hannover  
mineralische-rohstoffe@bgr.de

Layout: Jolante Duba/BGR

Datenstand: Oktober 2018

ISBN 978-3-943566-54-3 (PDF)

Zitierhinweis: Elsner, H. (2018): Edalgase – Versorgung wirklich kritisch? –  
DERA Rohstoffinformationen 39: 196 S., Berlin.

Titelbilder: Jolante Duba/BGR  
Pslawinski/Wikipedia

Hannover, 2018



## **DERA Rohstoffinformationen**

Edelgase –  
Versorgung wirklich kritisch?



## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>11</b>
<b>Danksagung und Rückmeldung</b>	<b>13</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>14</b>
<b>2 Edelgase</b>	<b>15</b>
2.1 Eigenschaften	16
2.2 Vorkommen und Genese	18
<b>3 Gewinnung und Verwendung</b>	<b>23</b>
3.1 Gewinnung und Aufbereitung	23
3.1.1 Helium	23
3.1.2 Neon	24
3.1.3 Argon	26
3.1.4 Krypton	26
3.1.5 Xenon	27
3.2 Verwendung	27
3.2.1 Helium	29
3.2.2 Neon	42
3.2.3 Argon	43
3.2.4 Krypton	45
3.2.5 Xenon	47
3.2.6 Radon	48
3.3 Toxizität	49
3.3.1 Radon	49
3.4 Recycling	52
3.5 Substitution	53
3.6 Chemische Anforderungen an Edelgase	55
3.7 Anforderungen an Heliumvorkommen	65
<b>4 Nachfrage</b>	<b>66</b>
4.1 Helium	66
4.2 Neon	68
4.3 Argon	68
4.4 Krypton	70
4.5 Xenon	71
<b>5 Angebot</b>	<b>73</b>
5.1 Helium	73
5.2 Neon	80
5.3 Argon	84

5.4	Krypton	86
5.5	Xenon	90
5.6	Projekte (Helium)	92
<b>6</b>	<b>Bilanz von Angebot und Nachfrage</b>	<b>96</b>
6.1	Helium	96
6.2	Neon	97
6.3	Argon	98
6.4	Krypton	99
6.5	Xenon	99
<b>7</b>	<b>Preisentwicklung</b>	<b>101</b>
7.1	Helium	101
7.2	Neon	102
7.3	Argon	102
7.4	Krypton	103
7.5	Xenon	103
<b>8</b>	<b>Angebot und Nachfrage nach Edelgasen in Deutschland</b>	<b>106</b>
8.1	Vorkommen und Gewinnung	106
8.2	Import und Export	108
8.3	Verbrauch	119
<b>Anhang</b>		<b>131</b>
	Länderprofile	131
	Indikatoren und Risikobewertung	191
	Glossar	195

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Die Edelgase Helium (He), Neon (Ne), Argon (Ar), Krypton (Kr) und Xenon (Xe) in Gasentladungsröhren.	13
Abb. 2:	Sir William Ramsay (1852 – 1916), schottischer Chemiker, der 1904 für die Entdeckung der Edelgase den Nobelpreis für Chemie erhielt.	15
Abb. 3:	Prinzip der Aufreinigung von CO <sub>2</sub> und dabei Abtrennung von Helium am Standort Doe Canyon/Colorado.	24
Abb. 4:	Prinzip der fraktionierenden Destillation mithilfe einer Rektifikationskolonne.	25
Abb. 5:	Carl Paul Gottfried von Linde (1842 – 1934), deutscher Ingenieur und Gründer der heutigen Linde AG, der 1895 das Prinzip der Luftverflüssigung entwickelte.	26
Abb. 6:	Mit Edelgasen gefüllte Leuchtröhren, die das jeweilige chemische Zeichen des Edelgases formen.	28
Abb. 7:	Typischer MRT in einem Krankenhaus in Taiwan.	29
Abb. 8:	Zeppelin NT über Friedrichshafen am Bodensee.	30
Abb. 9:	Wolfram-Inertgas-Schweißen in einer Schutzgasatmosphäre aus Argon oder Helium eignet sich zum Schweißen von allen Metallen und Legierungen, bei denen Qualität wichtiger ist als Schweißgeschwindigkeit.	32
Abb. 10:	Blick in einen Teilabschnitt des Tunnels des Großen Hadronen-Speicherrings LHC, für dessen Funktion eine ständige Tiefkühlung der Magnete mittels flüssigem Helium notwendig ist.	36
Abb. 11:	Mit flüssigem Helium tiefgekühlter Starkfeldmagnetscheider zur Abtrennung von eisenhaltigen Mineralen aus Kaolin.	38
Abb. 12:	Verbrauch von Helium nach Verwendungsbereichen in den USA im Jahr 2015.	40
Abb. 13:	Vergleich der weltweiten Verbräuche von Helium nach Verwendungsbereichen im Jahr 2015.	41
Abb. 14:	Leuchtreklame mittels Neonröhren an einem Restaurant in Lustenau/Österreich.	42
Abb. 15:	Schweißen von Edelstahl nach dem Wolfram-Inertgas-Schweißen geschieht meist in einer Schutzgasatmosphäre aus Argon oder seltener Helium.	43
Abb.16:	Herstellung einer CrMoWVNbN-Edelstahllegierung in einem Konverter mittels Argon-Sauerstoff-Entkohlungsverfahren.	44
Abb. 17:	Im Jahr 2010 wurden nacheinander jede Nacht jeweils 50 der insgesamt 6.379 Fenster des Empire State Buildings in New York ausgebaut, die Glaszwischenräume mit einer Metallfolie beschichtet, dann mit einem Gasgemisch aus Luft, Argon und Krypton gefüllt und abschließend wieder eingebaut.	46
Abb. 18:	4.000 Watt-Hochdruckxenonstrahler von Osram beleuchten nachts die Niagara-Wasserfälle zwischen Kanada und den USA.	47
Abb. 19:	Radonkonzentration in der Bodenluft in Deutschland.	51
Abb. 20:	Helium wird heute fast nur noch in der Standardqualität 5.0 (99,999 % He) angeboten.	55
Abb. 21:	Heliumanlage von IACX Energy auf dem Harley-Dome-Erdgasfeld mit Ø 7,0 % He in Utah.	65
Abb. 22:	Verteilung der weltweiten Nachfrage nach Neon im Jahr 2017.	68
Abb. 23:	Weltstahlproduktion in Mio. t.	69
Abb. 24:	Weltweite Umsätze der Halbleiterindustrie in Mrd. US\$.	69

Abb. 25: Verteilung der weltweiten Nachfrage nach Krypton im Jahr 2017.	71
Abb. 26: Verteilung der weltweiten Nachfrage nach Xenon im Jahr 2017.	72
Abb. 27: ISO-Kühlcontainer zum Transport von flüssigem Helium im Werk Unterschleißheim der Linde AG.	73
Abb. 28: Wichtige weltweite Handelsströme von Helium im Jahr 2017.	75
Abb. 29: Mit 450 l flüssigem Helium gefüllte Transportbehälter im Werk Unterschleißheim der Linde AG.	75
Abb. 30: Entwicklung der weltweiten Heliumkapazitäten (nur Reihelium) seit dem Jahr 2000.	77
Abb. 31: Übersichtskarte der weltweiten Standorte von Heliumanlagen.	78
Abb. 32: Entwicklung der weltweiten Heliumproduktion seit dem Jahr 2000.	80
Abb. 33: Übersichtskarte der weltweiten Standorte von Aufreinigungsanlagen für Rohneon.	83
Abb. 34: Argon wird in Deutschland von mehreren Unternehmen, hier der Linde AG, angeboten.	84
Abb. 35: Reinkrypton wird in Deutschland u. a. von der Linde AG in ihrem Werk in Unterschleißheim produziert.	87
Abb. 36: Übersichtskarte der weltweiten Standorte von Aufreinigungsanlagen für Rohkrypton und Rohxenon.	91
Abb. 37: Übersichtskarte der gegenwärtigen weltweiten LNG-Anlagen aus IGU (2017).	95
Abb. 38: Helium: Angebot und vermutete Nachfrage seit dem Jahr 2000.	96
Abb. 39: Rohneon: Angebot und Nachfrage seit dem Jahr 2000, inkl. Prognose der weiteren Entwicklung.	98
Abb. 40: Krypton: Angebot und Nachfrage seit dem Jahr 2000, inkl. Prognose der weiteren Entwicklung.	99
Abb. 41: Xenon: Angebot und Nachfrage seit dem Jahr 2000, inkl. Prognose der weiteren Entwicklung.	100
Abb. 42: Xenon – das wertvollste und kritischste Edelgas.	100
Abb. 43: Preisentwicklung für Roh- und Reihelium seit dem Jahr 1995.	101
Abb. 44: Preisentwicklung und -vorhersage für Reinneon (Großhandelspreise) in US\$/l seit dem Jahr 1998.	103
Abb. 45: Preisentwicklung und -vorhersage für Krypton (Großhandelspreise) in US\$/l seit dem Jahr 1998.	104
Abb. 46: Preisentwicklung und -vorhersage für Xenon (Großhandelspreise) in US\$/l seit dem Jahr 1998.	104
Abb. 47: Gaschromatograph im Arbeitsbereich „Geochemie der Energierohstoffe und Gasmonitoring“ der BGR mit verschiedenen Gasanschlüssen oberhalb des Geräts.	120
Abb. 48: Die Aufreinigungsanlage für Krypton und Xenon in Panzhuhua, Sichuan Provinz, der Hunan Xianggang Messer.	139
Abb. 49: Die Luftzerlegungsanlage in Leuna produziert neben Sauerstoff, Stickstoff und Argon auch Rohneon, Rohkrypton/Rohxenon sowie Helium.	142
Abb. 50: Übersichtskarte von Standorten von Luftzerlegungsanlagen (LZA) mit Argonproduktion in Deutschland.	145
Abb. 51: Übersichtskarte von Standorten von Luftzerlegungsanlagen (LZA) mit Produktion von Rohkrypton und Rohxenon in Deutschland.	147



Abb. 52: Blick auf einen Teil der Aufreinigungsanlage für Rohkrypton und Rohxenon im Werk Unterschleißheim der Linde AG.	148
Abb.53: In den riesigen LNG-Anlagen der Qatargas in Ras Laffan, Katar, wurde im Jahr 2017 knapp ein Viertel des weltweit produzierten Heliums gewonnen.	160
Abb. 54: Satellitenbild des Cliffsides-Heliumspeicherfelds nordwestlich Amarillo, Texas, USA.	179
Abb. 55: Produktion und Speicherung von Helium in den USA.	180
Abb. 56: Entwicklung des Absatzes von Reinhelium (Grade-A) in den USA.	181
Abb. 57: Die Crude Helium Enrichment Unit (CHEU) auf dem Cliffsides-Speicherfeld nordwestlich Amarillo, Texas, USA, aus dem All.	182
Abb. 58: Übersichtskarte wichtiger heliumführender Erdgasfelder sowie der derzeitigen Anlagen zur Gewinnung, zum Transport und zur Speicherung von Helium in den USA.	185

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Auswahl wichtiger atomarer und physikalischer Parameter der Edelgase.	17
Tab. 2:	Häufigkeiten der Edelgase und von Wasserstoff.	19
Tab.3:	Zusammensetzung von trockener Luft.	20
Tab. 4:	Natürliche Radionuklide, die zu Edelgasen zerfallen.	22
Tab. 5:	Bildung von Edelgasen seit Entstehung der Erde vor 4,5 Mrd. Jahren.	22
Tab. 6:	Garantierte Qualitäten von Helium für verschiedene Verwendungen bzw. in verschiedenen Reinheitsgraden.	56
Tab. 7:	Garantierte Qualitäten von Argon für verschiedene Verwendungen bzw. in verschiedenen Reinheitsgraden.	59
Tab. 8:	Garantierte Qualitäten von Neon für verschiedene Verwendungen bzw. in verschiedenen Reinheitsgraden.	62
Tab. 9:	Garantierte Qualitäten von Krypton für verschiedene Verwendungen bzw. in verschiedenen Reinheitsgraden.	63
Tab. 10:	Garantierte Qualitäten von Xenon für verschiedene Verwendungen bzw. in verschiedenen Reinheitsgraden.	64
Tab. 11:	Absolute weltweite Nachfrage nach Helium (in Mio. m <sup>3</sup> ) und weltweites Nachfragewachstum nach Helium (in %/a) nach Analysen US-amerikanischer Experten.	67
Tab. 12:	Kenndaten der bisherigen weltweiten Produktion von Helium, soweit bekannt.	76
Tab. 13:	Weltproduktion von Helium (in Mio. m <sup>3</sup> ) seit dem Jahr 2000.	78
Tab. 14:	Standorte von Luftzerlegungsanlagen mit Rohneonkapazitäten sowie von Aufreinigungsanlagen für Rohneon.	82
Tab. 15:	Anzahl von Standorten mit Luftzerlegungsanlagen mit Argonkapazitäten in einzelnen Ländern, soweit bekannt.	85
Tab. 16:	Standorte von Luftzerlegungsanlagen mit Rohkrypton-/ bzw. Rohxenonkapazitäten verschiedenener Anreicherungsstufen sowie von Aufreinigungsanlagen.	88
Tab. 17:	Vergleichende Auflistung der bekannten Heliumprojekte bzw. geplanten Heliumanlagen.	94
Tab. 18:	Deutsche Importe von Helium zwischen 2010 und 2017.	109
Tab. 19:	Deutsche Importe von Argon zwischen 2010 und 2017.	110
Tab. 20:	Deutsche Importe von Neon, Krypton und Xenon zwischen 2010 und 2017.	111
Tab. 21:	Deutsche Exporte von Helium zwischen 2010 und 2017.	112
Tab. 22:	Deutsche Exporte von Argon zwischen 2010 und 2017 .	115
Tab. 23:	Deutsche Exporte von Neon, Krypton und Xenon zwischen 2010 und 2017.	117
Tab. 24:	Gesamtmenge der weltweiten Importe von Helium aus Algerien bzw. Frankreich.	134
Tab. 25:	Gesamtmenge der weltweiten Importe von Helium aus Australien.	136
Tab. 26:	Produktion von Argon in Deutschland.	144
Tab. 27:	Edelgasgehalte und jährliche Heliumschüttung französischer Thermalwässer zu Beginn des 20. Jahrhunderts.	149
Tab. 28:	Gesamtmenge der weltweiten Importe von Helium aus Kanada.	156
Tab. 29:	Heliumgehalte von Erdgasfeldern in Kasachstan.	157
Tab. 30:	Produktion von Helium in Katar.	160

Tab. 31: Gesamtmenge der weltweiten Importe von Helium aus Katar, Saudi-Arabien und den Vereinigten Arabischen Emiraten (VAE).	161
Tab. 32: Produktion von Helium in Polen seit 1989.	163
Tab. 33: Produktion von Helium in Orenburg, Russland, seit dem Jahr 2000.	166
Tab. 34: Liste der aktiven, gestundeten und geplanten Heliumanlagen in den USA, soweit bekannt.	183
Tab. 35: Übersicht über die bedeutendsten US-amerikanischen Erdgasfelder mit erhöhten Heliumgehalten.	186
Tab. 36: Argonproduktionskapazitäten in den USA, gegliedert nach Unternehmen	187
Tab. 37: Indikatoren und Risikobewertung für Helium und Xenon.	193



## Zusammenfassung

Zur chemischen Gruppe der Edelgase gehören die Elemente Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon und Radon.

Alle Edelgase sind monoatomar, farblos, geruchlos, nicht brennbar, bei Raumtemperatur gasförmig und chemisch inert. Nur Xenon geht natürliche Verbindungen mit Halogeniden ein. Helium und Neon sind leichter als Luft. Radon ist radioaktiv.

Helium bildet sich durch den radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium in der Erdkruste fortwährend neu und kann sich in strukturellen Fallen, ähnlich Erdgas, anreichern. Es bildet sich ständig mehr Helium neu, als in die Atmosphäre entweicht. Argon stammt aus dem radioaktiven Zerfall von Kalium und ist in der Luft sehr stark angereichert (0,934 Vol.-%). Obwohl im Sonnensystem sehr häufig, gehört Neon auf der Erde zu den seltensten nichtradioaktiven Elementen. Es ist in der Erdatmosphäre in etwa so häufig zu finden wie Platin in der Erdkruste. Krypton und Xenon sind sowohl im Weltall wie auf der Erde noch deutlich seltener.

Helium wird fast ausschließlich bei der Verflüssigung von Erdgas (LNG) sowie der Denitrifikation von Erdgas gewonnen. Die Aufreinigung von Kohlendioxidnaturgas und die Gewinnung in Luftzerlegungsanlagen (LZA) spielen nur eine untergeordnete Rolle. Argon, Neon, Krypton und Xenon werden ausschließlich in Luftzerlegungsanlagen gewonnen, davon Argon in sehr großem Umfang in mehr als 950 Anlagen weltweit. Fast alle Anwendungen von Edelgasen erfordern eine hohe Reinheit, so dass diese vor ihrer Verwendung aufgereinigt werden müssen. Von Neon, Krypton und Xenon gibt es jeweils ca. 20 Aufreinigungsanlagen weltweit und diese mit wenigen Ausnahmen vor allem in China, Russland, in der Ukraine und in den USA. In Deutschland betreiben die Linde AG und die Air Liquide Deutschland GmbH je eine Aufreinigungsanlage für Rohkrypton/Rohxenon, die Linde AG auch eine Aufreinigungsanlage für Rohneon.

Helium wird in großen Mengen in der Gesundheitstechnik (MRTs), aber auch als Traggas/Ballongas, in der Raumfahrtindustrie, für die Metallhärtung, in der Halbleiterindustrie, in der Analytik (Gaschromatographie u. a.), beim Schutzgasschweißen, in der Metallbeschichtung, für die Lecksuche, zum technischen Tauchen, in der Herstellung von Bildschirmen und optischen Glasfasern, in der Lasertechnik, in Großforschungseinrichtungen zur Kühlung von supraleitenden Magneten, aber auch in zahlreichen anderen Verwendungen, wie der Befüllung von Gasspeichern für Airbags, eingesetzt.

Im Jahr 2017 waren in Algerien, Australien, China, Deutschland, Indien, Kanada, Katar, Polen, Russland, der Ukraine und in den USA insgesamt 49 Heliumanlagen in Betrieb. Bei einer verfügbaren Gesamtkapazität von ca. 252 Mio. m<sup>3</sup> Reinhelium wurden ca. 165 Mio. m<sup>3</sup> Reinhelium produziert, davon 55,3 % in den USA und davon wiederum rund ein Drittel aus dem Cliffside-Heliumspeicherfeld in Texas. 23,2 % der Heliumproduktion stammten aus Katar, 10,6 % aus Algerien und jeweils 2 – 4 % aus Kanada, Polen, Australien und Russland. Die anderen Produktionsländer haben keine Bedeutung. Über viele Jahrzehnte, zwischen 1917 und 1994, waren die USA fast ausschließlich der einzige westliche Heliumproduzent. Seit dem Jahr 1995 beginnt mit der Aufnahme der Heliumproduktion in Algerien und mit zunehmender Heliumentnahme aus dem Cliffside-Speicherfeld der US-amerikanische Einfluss auf dem Weltheliummarkt zu schwinden. Ausgehend von den USA, verbreitet sich daher die Meinung in der Fachöffentlichkeit, dass die weltweite Heliumversorgung gefährdet sei. Auch die EU hat im Jahr 2017 Helium als kritischen Rohstoff eingestuft. In mehreren Ländern, besonders in Russland, gibt es jedoch teils sehr große Heliumprojekte und auch das weltweite Heliumpotenzial ist bei weitem nicht ausgeschöpft. Mittel- und langfristig ist daher eine Verknappung des weltweiten Heliumangebots nicht zu erwarten – von kurzfristigen geopolitisch begründeten Verknappungen, wie im Jahr 2017 während der „Katarkrise“, abgesehen.

Drei Viertel des weltweit verwendeten Neons wird in der Lasertechnik benötigt. Die Befüllung von Leuchtröhren mit Neon für Reklamezwecke hat dagegen kaum noch Bedeutung. Nur in wenigen Ländern, China, Deutschland, Frankreich, den Niederlanden, Russland, der Ukraine und in den USA, wird Rohneon in großen Luftzerlegungsanlagen produziert bzw. arbeiten Aufreinigungsanlagen. Im Jahr 2017

sollen weltweit rund 720 Mio. l (= 720.000 m<sup>3</sup>) Rohneon, entsprechend ca. 360 Mio. l Reinneon produziert worden sein. Das Angebot soll die Nachfrage überschreiten. Da der Weltneonmarkt jedoch sehr klein und intransparent ist, ist eine Überprüfung und damit Bewertung der wenigen publizierten Daten zum Angebot von und zur Nachfrage nach Neon nicht möglich.

Argon findet Verwendung in sehr großen Mengen in der Herstellung und Veredelung von Stahl sowie als Schutzgas beim Schweißen, in geringeren Mengen auch als Gas in der Lasertechnik, als Füllgas in der Isolierglasproduktion, in der Analytik und in zahlreichen anderen Verwendungsbereichen. Generell ist Argon in vielen Anwendungen günstiges Substitut für Helium. Von den internationalen Gasunternehmen wird Argon aufgrund seiner Häufigkeit in der Luft, seiner weiten Anwendung und den zahlreichen Großabnehmern (Stahlhütten, metallverarbeitende Betriebe) nicht als typisches Edelgas, sondern, ähnlich Sauerstoff und Stickstoff, als normales technisches Gas betrachtet. Mindestens 950 Luftzerlegungsanlagen in aller Welt produzierten im Jahr 2017 geschätzt über 9 Mrd. m<sup>3</sup> Argon. Trotz steigender Nachfrage ist Argon ein ubiquitärer Rohstoff und Verknappungen sind stets nur regionaler und kurzfristiger Art.

Krypton hat nur zwei große Verwendungsbereiche, die Befüllung von Isolierglasscheiben zur Wärmedämmung sowie von Leuchtmitteln zur Erhöhung der Leuchtstärke. Krypton wird aus technischen Gründen stets zusammen mit Xenon gewonnen und ist in der Luft rund zehnmal so häufig. Im Jahr 2017 gab es über 100 Luftzerlegungsanlagen in zahlreichen Ländern, die Rohkrypton/Rohxenon produzierten, aber nur rund 20 Standorte, an denen Rohkrypton/Rohxenon zu Reinkrypton/Reinxenon aufgereinigt werden konnte. Das weltweite Angebot soll im Jahr 2017 bei rund 130 Mio. l (= 130.000 m<sup>3</sup>) Krypton, die Nachfrage jedoch bei nur ca. 111 Mio. l gelegen haben. Seit vielen Jahren ist die Versorgungslage für Krypton unkritisch, was auch für die kommenden Jahre vorhergesagt werden kann.

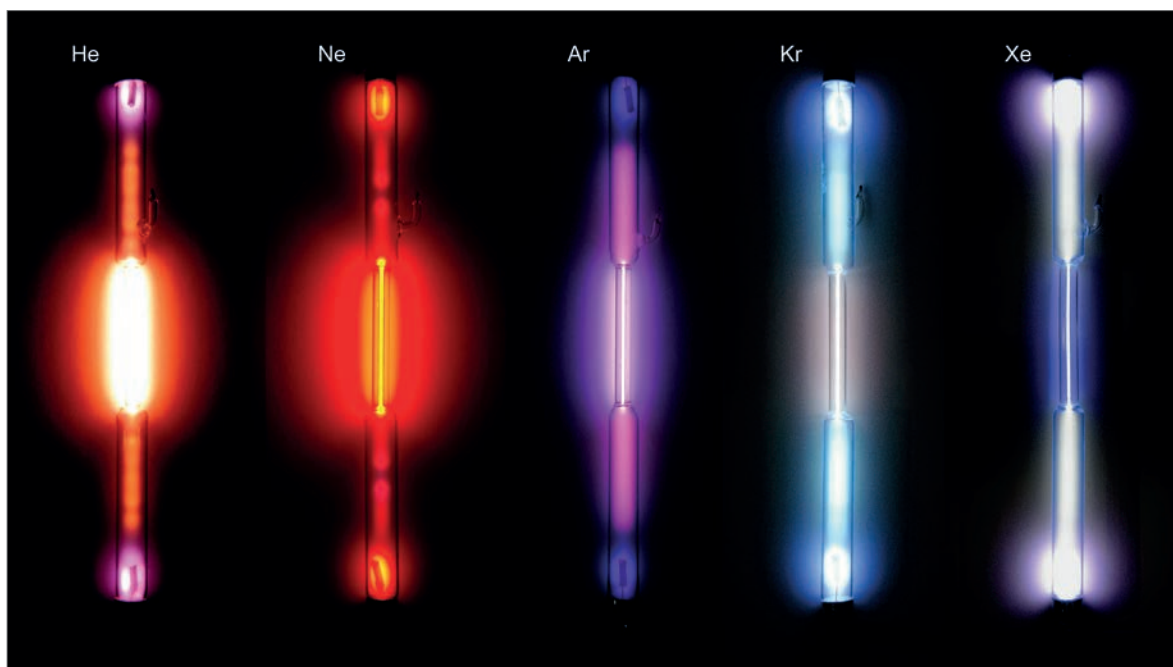
Im Gegensatz zu Krypton ist Xenon rund zehnmal so selten, hat aber wesentlich mehr und immer wieder neu hinzukommende Verwendungsbereiche. Derzeit wird der größte Teil des weltweit produzierten Xenons, geschätzte 12,2 Mio. l (= 12.200 m<sup>3</sup>) im Jahr 2017, für die Befüllung von extrem leuchtstarken Leuchtmitteln (Xenon-Scheinwerfer), für Laser in der Halbleiterindustrie, in der Grundlagenforschung, als Narkosemittel sowie als Antriebsmittel für Satelliten und interstellare Sonden eingesetzt. Die weltweite Versorgungslage mit Xenon war in den letzten Jahrzehnten immer wieder kritisch, so dass es zu großen Preisschwankungen kam. Xenon ist mit weitem Abstand das teuerste Edelgas und gegenwärtig einhundertmal so teuer wie Krypton und Neon, über eintausendmal so teuer wie Helium und zwanzigtausendmal so teuer wie Argon. Für die nächsten Jahre wird erneut eine Verdoppelung des Xenonpreises vorhergesagt, da die absehbare Nachfrage bei einer Umsetzung bereits angekündigter Satellitenbaupläne das Angebot von Xenon auf dem Weltmarkt deutlich übersteigen würde. In Deutschland wird daran geforscht, zumindest langfristig Xenon durch Iod als Satellitenantriebsmittel zu substituieren.

## Danksagung und Rückmeldung

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) dankt allen edelgasproduzierenden und -nutzenden Unternehmen, die in persönlichen Gesprächen und Telefonaten für diese Studie Informationen über ihre Produktion, Verbräuche und die Verwendung von Edelgasen in ihren Unternehmen zur Verfügung stellten. Experten von zahlreichen Unternehmen überarbeiteten freundlicherweise die ihre Tätigkeit betreffenden Kapitel bzw. Teilkapitel. Zudem stellten Industrieverbände statistische Informationen sowie Unternehmen und Privatpersonen zahlreiche Fotos zur Illustration dieser Studie zur Verfügung.

Fehler sind gerade in der Beschreibung des zum Teil sehr intransparenten Marktes der Edelgase nicht auszuschließen. Kundige Leser werden daher gebeten, ihnen aufgefallene Fehler in dieser Studie dem Autor zu melden.

Vielen Dank!



**Abb. 1:** Die Edelgase Helium (He), Neon (Ne), Argon (Ar), Krypton (Kr) und Xenon (Xe) in Gasentladungsröhren. Alle Edelgase leuchten, wenn sie elektrisch angeregt werden, wodurch sich wichtige Verwendungsbereiche ergeben. Foto: Heinrich Pniok ([www.pse-mendelejew.de](http://www.pse-mendelejew.de)), Lizenz FAL (<http://artlibre.org/licence/lal/de>).

*„As with all rare gas shortages that I have experienced over the last 40 years,  
what goes up must come down.”*

*Richard Betzendahl, Betzendahl Gas Consultants LLC,  
über den weltweiten Neonmarkt im September 2015.*

## 1 Einführung

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), eine Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), berät zusammen mit der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) die Bundesregierung und die deutschen Unternehmen u. a. zur Verfügbarkeit und zu möglichen Preis- und Lieferrisiken bei der Versorgung mit mineralischen Rohstoffen.

Im Rahmen dieser Aufgaben hat die BGR bzw. die DERA deutsche Unternehmen bereits durch die Ausrichtung von zahlreichen Industrieworkshops bzw. Herausgabe von Studien, u. a. zu Seltenen Erden, Zirkon, Antimon, Wolfram, Zinn, Zink, Platingruppenmetallen, Bismut, Lithium, Tantal und Kobalt sowie Quarzrohstoffen, Salzen, Feldspat, Kaolin, Fluss- und Schwerspat in Deutschland beraten.

Außerhalb dieser Studien liegen nur wenige aktuelle Informationen zu einigen der o. g. Rohstoffe vor und auch zu den Edelgasen gibt es keine zusammenfassende, jüngere und vor allem deutschsprachige Veröffentlichung.

Zwar enthält das MINERALS YEARBOOK des United States Geological Survey (USGS) seit 1933 – mit Unterbrechung im zweiten Weltkrieg – ein Kapitel über den „strategischen Rohstoff“ Helium, doch ist die weltweite Datenlage zu Helium und besonders zu den anderen Edelgasen (mit Ausnahme von Radon) ansonsten sehr schlecht. Zudem ist das Kapitel Helium im USGS MINERALS YEARBOOK aufgrund der historischen Entwicklung der weltweiten Heliumproduktion, die über Jahrzehnte vollständig von den USA dominiert war, sehr auf die USA zentriert.

Im Zuge der Erstellung dieser Studie wurde daher versucht, unabhängige, d. h. nicht-US-amerikanische Publikationen zu Helium und den anderen Edelgasen zur Auswertung heranzuziehen, was sich jedoch als praktisch unmöglich erwies. Letztendlich konnten aber doch noch zwei unabhängige Studien zu Helium und Argon eines kommerziellen Anbieters gefunden werden, die vergleichende Betrachtungen zulassen.

Als Fachzeitschrift wurde das Magazin GASWORLD bzw. sein Online-Archiv ausgewertet, wobei sich

herausstellte, dass die dort publizierten Expertenanalysen zum Angebot und zur Nachfrage von Helium ebenfalls vollständig von den Daten im USGS MINERALS YEARBOOK beeinflusst sind. Erfreulicherweise gibt es jedoch in Form des US-amerikanischen Consultingbüros BETZENDAHL GAS CONSULTANTS, LCC zumindest einen Experten für Neon, Krypton und Xenon, der unabhängig ist und den weltweiten Markt dieser Edelgase beobachtet.

Mit den aus den o. g. Quellen extrahierten Hintergrundinformationen, zusätzlichen im Internet verfügbaren Daten sowie Informationen von deutschen Marktteilnehmern gelang es letztendlich, einen aktuellen Überblick über die Rohstoffwirtschaft der Edelgase zusammenzustellen. Im Vergleich zu den Datenmengen, die zum Beispiel über Basis- oder Edelmetalle vorliegen, bleiben allerdings zahlreiche Fragen weiterhin offen.

Bezüglich des weltweiten Verbrauchs der Edelgase gibt es keine zuverlässigen Daten, aber selbst zu den selteneren Edelgasen Neon, Krypton und Xenon gute Schätzungen. Zu Helium, dem wirtschaftlich bedeutendsten Edelgas, wird vereinfacht angenommen, dass in den meisten Jahren die weltweite Nachfrage wohl ungefähr dem Angebot entspricht. Diese Annahme ist sicherlich kritisch zu hinterfragen.

Die internationalen Gasunternehmen publizieren keine Förderzahlen. Die weltweit produzierten Mengen an Neon, Argon, Krypton und Xenon sind daher nicht bekannt, doch liegen zumindest Schätzungen vor. Die vom USGS publizierten Fördermengen an Helium sind möglicherweise für die USA nicht ganz vollständig und für den Rest der Welt fehlerbehaftet. Zu Russland und Polen konnten die richtigen Produktionsdaten und zu den anderen Produktionsländern außerhalb der USA teils recht zuverlässige Handelsdaten recherchiert werden, von denen sich die dortige Heliumproduktion gut ableiten lässt.

Die Datenlage zu den zukünftigen Heliumprojekten wiederum ist ausgezeichnet. Ob diese allerdings zeitlich wie geplant umgesetzt werden, wird allein die Zukunft zeigen.

Zusammenfassend lassen sich zu den Edelgasen, anders als zu den meisten anderen mineralischen Rohstoffen, keine belastbaren Aussagen



zur zukünftigen Angebots-/Nachfrageentwicklung auf dem Weltmarkt ableiten. Dennoch soll dieser aktuelle Überblick der deutschen Industrie helfen, die rohstoffwirtschaftlichen Zusammenhänge bei den Edelgasen – größtenteils unverzichtbaren Industriegasen – besser zu verstehen und sich damit für oder auch gegen einen möglichen zukünftigen (verstärkten) Einsatz von Edelgasen zu entscheiden.

## 2 Edelgase

Die Gruppe der Edelgase bildet die (ehemals) VIII. Hauptgruppe bzw. (neuerdings) 18. Gruppe im Periodensystem der Elemente. Der Name „Edelgas“ kommt daher, dass diese Elemente der 18. Gruppe des Periodensystems, analog zu den Edelmetallen, sehr reaktionsträge (inert) und zudem – zumindest auf der Erde – selten sind.

Zu den Edelgasen gehören die chemischen Elemente:

1. **Helium** (Elementsymbol He, 1. Periode, Ordnungszahl 2), nach dem altgriechischen ἥλιος hélios (deutsch „Sonne“), da es erstmals 1868 in der Chromosphäre der Sonne nachgewiesen wurde.
2. **Neon** (Elementsymbol Ne, 2. Periode, Ordnungszahl 10), nach dem griechischen νέος neos (deutsch „neu“), da es 1898 als neues Gas in Rohargon entdeckt wurde.
3. **Argon** (Elementsymbol Ar, 3. Periode, Ordnungszahl 18), nach dem griechischen ἀργό argó (deutsch „träge“), da es 1895 als neues, reaktionsträges Gas in der Luft entdeckt wurde.
4. **Krypton** (Elementsymbol Kr, 4. Periode, Ordnungszahl 36), nach dem altgriechischen κρυπτός kryptós (deutsch „verborgen“), da es 1896 erst nach dem fast völligen Verdampfen von Rohargon in Form von Spektrallinien nachgewiesen werden konnte.
5. **Xenon** (Elementsymbol Xe, 5. Periode, Ordnungszahl 54), nach dem altgriechischen ξένος xénos (deutsch „fremd“), da es 1898 als bis dahin fremdes Element aus Rohkrypton fraktioniert werden konnte.
6. **Radon** (Elementsymbol Rn, 6. Periode, Ordnungszahl 86), von den lateinischen Wörtern

radius (deutsch „Strahl“), wegen seiner Radioaktivität, und emanation (deutsch „Ausfluss“), entdeckt 1900 bei der Untersuchung des Elements Radium und seiner Zerfallteilchen sowie möglicherweise

7. Oganesson (Elementsymbol Og, 7. Periode, Ordnungszahl 118), künstlich erzeugt 2006, anerkannt 2015, benannt nach dem russischen Mitentdecker des Elements Juri Z. Oganjesjan. Oganesson besitzt eine Halbwertszeit von 0,89 ms, ist möglicherweise reaktiv, bei Raumtemperatur nicht gasförmig und daher auch kein Edelgas. Da dieses künstliche Element keinerlei wirtschaftliche Bedeutung besitzt, soll es im Folgenden nicht weiter betrachtet werden.

Die vier Edelgase Neon, Argon, Krypton und Xenon wurden zwischen 1894 und 1898 von dem schottischen Chemiker SIR WILLIAM RAMSAY (1852 – 1916) (Abb. 2) entdeckt und von diesem 1895 auch erstmalig Helium isoliert, wofür er 1904 den Nobelpreis für Chemie erhielt.

Die internationale Gasindustrie bezeichnet als Edelgase nur die Elemente Neon, Krypton und Xenon. Helium wird stets gesondert betrachtet und Argon stellt wie Sauerstoff und Stickstoff für die Industrie ein technisches Gas dar.



**Abb. 2:** Sir William Ramsay (1852 – 1916), schottischer Chemiker, der 1904 für die Entdeckung der Edelgase den Nobelpreis für Chemie erhielt, Foto: Wikipedia.

## 2.1 Eigenschaften

Einheitliches Hauptmerkmal aller Edelgase ist, dass die Energieniveaus ihrer Atome abgeschlossen, d. h. vollständig mit Elektronen aufgefüllt sind. Dies führt dazu, dass Edelgase nur unter extremen Bedingungen chemische Reaktionen eingehen. Edelgase bilden auch miteinander keine Moleküle, sondern sind einatomig.

Trotz dieses Aufbaus der Edelgasatome sind die Edelgase mit einer höheren Atommasse (Tab. 1) nicht völlig unreaktiv und können aufgrund von Van-der-Waals-Kräften einige Verbindungen bilden. Die größte Vielfalt an Verbindungen ist vom Xenon und nicht vom Radon bekannt, da bei letzterem die starke Radioaktivität und kurze Halbwertszeit die Bildung von Verbindungen und auch deren Untersuchung erschweren. Neon gilt hingegen als das am wenigsten reaktionsbereite Edelgas.

Das einzige Element, das in der Lage ist, direkt mit Xenon, Radon und unter bestimmten Bedingungen auch mit Krypton zu reagieren, ist Fluor. Während das bei der erzwungenen Reaktion von Krypton und Fluor gebildete ätzende und giftige Krypton(II)-Fluorid ( $\text{KrF}_2$ ) thermodynamisch instabil und daher nur bei tiefen Temperaturen synthetisierbar ist, sind die Xenon- und auch Radonfluoride auch bei Raumtemperatur stabil. Die erste künstlich hergestellte Edelgasverbindung war 1962 das sehr instabile Xenonhexafluoroplatinat ( $\text{XePtF}_6$ ). Xenon(II)-Fluorid ( $\text{XeF}_2$ ) ist stabiler und die einzige Edelgasverbindung, die in geringen Mengen auch technisch genutzt wird (s. Kap. 3.2.5). Andere Elemente reagieren nicht mit Edelgasen, dennoch sind verschiedene weitere Verbindungen bekannt, die durch Reaktionen der Fluoride zugänglich sind.

Alle Edelgase sind bei Raumtemperatur gasförmig. Sie sind farb- und geruchlos sowie nicht brennbar. Sie kondensieren und erstarren erst bei sehr niedrigen Temperaturen, wobei die Schmelz- und Siedepunkte umso höher liegen, je größer die Atommasse ist. Der Siedepunkt von Helium ( $^4\text{He}$ ) liegt mit 4,224 K ( $-268,926\text{ °C}$ ) nur knapp über dem absoluten Nullpunkt (0 K bzw.  $-273,15\text{ °C}$ ), das schwerste Edelgas Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) siedet dagegen bei 211,9 K ( $-61,25\text{ °C}$ ).

Auch die Dichten der Edelgase korrelieren mit der Atommasse. Helium ist nach Wasserstoff das Gas mit der geringsten Dichte. Als einziges weiteres Edelgas hat Neon eine geringere Dichte als Luft, während Argon, Krypton, Xenon und Radon dichter sind. Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) ist mit einer Dichte von  $9,73\text{ g/cm}^3$  unter Normalbedingungen (1.013,25 hPa und  $0\text{ °C}$ ) eines der dichtesten Gase überhaupt. Wasserstoff, Helium und Neon besitzen aufgrund ihrer geringeren Dichte als Luft einen statischen Auftrieb und eignen sich daher als Traggas (s. Kap. 3.2), wobei Neon jedoch aufgrund seines hohen Preises nicht für diesen Verwendungsbereich zum Einsatz kommt. Die Auftriebe in der Luft betragen bei Normalbedingungen (s. o.)  $1,203\text{ kg/m}^3$  Wasserstoff bzw.  $1,1145\text{ kg/m}^3$  Helium.

Helium besitzt die Besonderheit, dass es als einziges Element unter Atmosphärendruck und auch deutlich darüber nicht erstarrt. Stattdessen geht es bei 2,17 K ( $-270,98\text{ °C}$ ) in einen speziellen Aggregatzustand, die Suprafluidität, über (sog. „Helium II“). In diesem verliert die Flüssigkeit ihre innere Reibung und kann so beispielsweise über höhere Gefäßwände kriechen („Onnes-Effekt“). Erst bei Drücken über 25,316 bar erstarrt Helium bei 0,775 K ( $-272,375\text{ °C}$ ). Diese Temperaturen und Drücke gelten nur für das häufigste Isotop  $^4\text{He}$ , das seltenere, leichtere, ebenfalls stabile Isotop  $^3\text{He}$  besitzt dagegen deutlich andere Eigenschaften (vgl. Tab. 1). Es wird erst bei Temperaturen unter 0,0026 K ( $-273,1474\text{ °C}$ ) suprafluid. Auch die Schmelz- und Siedepunkte von  $^3\text{He}$  liegen bei anderen Temperaturen und Drücken.

Neben Wasserstoff und Neon ist Helium das einzige Gas, das sich beim Entspannen bei Standardtemperaturen erwärmt. Die schweren Edelgase (Argon, Krypton, Xenon) sind auch bei Raumtemperaturen, jedoch nur unter sehr hohen Drücken fest. Auch im unteren Erdmantel sollten sie deshalb aufgrund der dort herrschenden hohen Drücke in fester Form vorliegen.

Sowohl in fester als auch flüssiger Form luminesziert Radon aufgrund seiner Radioaktivität. Auch die Zerfallsprodukte von Radon sind radioaktiv. Von Radon sind 35 Isotope bekannt, die alle instabil sind. Das langlebige Isotop  $^{222}\text{Rn}$  hat eine Halbwertszeit von 3,824 Tagen. Die kurzlebigen Radonisotope besitzen dagegen eine Halbwertszeit von weniger als einer Millisekunde.

Tab. 1: Auswahl wichtiger atomarer und physikalischer Parameter der Edelgase, zusammengestellt nach Wikipedia, YONGCHANG et al. (1996), OZIMA & PODOSEK (2002) und Gasdatenblätter Messer Schweiz AG (Anm.: die Parameter unterscheiden sich leicht je nach Quelle).

	Helium	Neon	Argon	Krypton	Xenon	Radon
Symbol	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn
Ordnungszahl	2	10	18	36	54	86
Atommasse	4,002602 u	20,1797 u	39,948 u	83,798 u	131,293 u	222 u
Atomradius	28 pm (0,28 Å)	58 pm (0,58 Å)	106 pm (1,06 Å)	116 pm (1,16 Å)	140 pm (1,40 Å)	150 pm (1,50 Å)
Schmelzpunkt bei 1.013 hPa	<sup>3</sup> He @ 29,315 bar: 0,319 K (-272,831 °C) <sup>4</sup> He @ 25,316 bar: 0,775 (-272,375 °C)	27,09 K (-246,06 °C)	84,0 K (-189,2 °C)	116,2 K (-157,0 °C)	161,4 K (-111,8 °C)	ca. 202 K (ca. -71 °C)
Siedepunkt bei 1.013 hPa (1,013 bar)	<sup>3</sup> He: 3,1905 K (-269,995 °C) <sup>4</sup> He: 4,224 K (-268,926 °C)	27,09 K (-246,06 °C)	87,295 K (-185,855 °C)	119,75 K (-153,36 °C)	165,03 K (-108,12 °C)	211,9 K (-61,3 °C)
Gasdichte bei 0 °C, 1.013 hPa (1,013 bar)	<sup>3</sup> He: 0,13448 kg/m <sup>3</sup> <sup>4</sup> He: 0,17847 kg/m <sup>3</sup>	0,8999 kg/m <sup>3</sup>	1,7839 kg/m <sup>3</sup>	3,7493 kg/m <sup>3</sup>	5,8971 kg/m <sup>3</sup>	9,73 g/cm <sup>3</sup>
Gasdichte bei 15 °C, 1.000 hPa (1 bar)	<sup>4</sup> He: 0,1673 kg/m <sup>3</sup>	0,8420 kg/m <sup>3</sup>	1,6689 kg/m <sup>3</sup>	3,506 kg/m <sup>3</sup>	5,514 kg/m <sup>3</sup>	
Dichteverhältnis zu Luft bei 0 °C, 1.013 hPa (1,013 bar)	0,1381	0,6965	1,3807	2,9019	4,5643	7,5310
Flüssigdichte	0,125 kg/l	1,2060 kg/l	1,394 kg/l	2,413 kg/l	2,939 kg/l	
Spezifische Wärmeleitfähigkeit bei 25 °C, 1.000 hPa (1 bar)	0,1567 W/(m*K)	0,0491 W/(m*K)	0,01792 W/(m*K)	0,00949 W/(m*K)	0,00569 W/(m*K)	0,00364 W/(m*K)
Spezifische Wärmekapazität bei 25 °C	5.192,6 J/(kg*K)	1.030 J/(kg*K)	520,3 J/(kg*K)	2.481 J/(kg*K)	1.583 J/(kg*K)	

Unter Normalbedingungen (1.013 hPa, 0 °C) entsprechen (Beispiel <sup>4</sup>Helium):

- 5,60318 m<sup>3</sup> Helium gasförmig = 1,0 kg Helium flüssig = 8,0 l Helium flüssig
- 1,0 m<sup>3</sup> Helium gasförmig = 0,17847 kg Helium flüssig = 1,42776 l Helium flüssig
- 0,70040 m<sup>3</sup> Helium gasförmig = 0,125 kg Helium flüssig = 1,0 l Helium flüssig

## 2.2 Vorkommen und Genese

**Helium** bzw. sein häufigstes Isotop  $^4\text{He}$  (s. Tab. 2) bildet sich vorrangig durch den radioaktiven Zerfall von Uran (U) und Thorium (Th) in granitischen Gesteinen, aber auch von U- bzw. Th-haltigen Mineralen in Sedimentgesteinen (z. B. enthält Pechblende aus Joachimsthal  $0,11 \text{ cm}^3 \text{ He/g Mineral}$ ) und migriert vom Entstehungsort entlang tieferreichender steilstehender Störungen und/oder vulkanischer Intrusionen in hangende Schichten. Nur wo diese durch mächtige abdichtende Gesteinslagen, meistens Salzhorizonte, Anhydritgesteine oder Ölschiefer, von hangenden permeablen Gesteinen bzw. der Erdoberfläche getrennt sind, verbleibt das Helium in der Erdkruste und reichert sich an. Zusätzlich sind auch randlich abdichtende Gesteine bzw. Strukturen notwendig, um die sehr leichten und kleinen Heliumatome am Entweichen zu hindern (Anm.: He-Atome besitzen einen Durchmesser von 56 pm (Pikometer,  $10^{-12} \text{ m}$ ), dagegen  $\text{CO}_2$ -Moleküle von 232 pm,  $\text{N}_2$ -Moleküle von 316 pm und  $\text{CH}_4$ -Moleküle von 414 pm). Da auch Anreicherungen anderer natürlicher Gase ähnliche strukturelle Fallen erfordern, findet sich Helium häufig in über geologisch lange Zeiträume zum Hangenden und zu den Seiten hin abgeschlossenen natürlichen Gaslagerstätten. Bei diesen natürlichen Gasen handelt es sich um typische methanreiche („Erdgas“), häufiger aber um kohlendioxid- oder stickstoffreiche Gase.

In den USA (vgl. Anhang: USA), wo praktisch alle Gase routinemäßig auf ihre Heliumführung untersucht werden bzw. in Forschungsprogrammen untersucht wurden, enthält mehr als die Hälfte aller Gasvorkommen  $< 0,1 \%$  He. Nur 17,6 % aller Gase führen  $> 0,3 \%$  He und einige Gase sogar deutlich mehr. Die großen Erdgasvorkommen mit wirtschaftlich interessanten Heliumgehalten ( $> 0,3 \%$ ) sind dabei auf den mittleren Westen der USA (Texas, Kansas, Oklahoma) konzentriert. Die häufig sehr stickstoffreichen Gasvorkommen mit deutlich höheren Heliumgehalten (bis 9,8 %) sind dagegen kleiner und liegen in anderen Bundesstaaten (Colorado, New Mexico, Utah, Arizona). Sie sind erst seit einigen Jahren aufgrund der gestiegenen Heliumpreise wirtschaftlich interessant geworden.

Wird das sich bildende Helium nicht in strukturellen Fallen in der Erdkruste gefangen und erreicht die Erdoberfläche, entweicht es von dort unge-

hindert in die Atmosphäre und von dort ebenfalls ungehindert in das Weltall.

Bei Annahme einer gleichmäßigen Verteilung von Uran und Thorium können sich in magmatischen Gesteinen  $13 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3$  Helium pro Gramm Gestein pro Jahr bilden (YONGCHANG et al. 1996). Pro Kubikmeter magmatisches Gestein entspricht dies rund  $360 \text{ cm}^3$  Helium je einer Million Jahre (vgl. Tab. 5). Auf ähnliche Weise errechneten BALLENTINE & LOLLAR (2002) den Gesteinsbedarf und die geologischen Zeiträume, die notwendig waren, um den geschätzten Heliuminhalt (ca. 13,8 Mrd.  $\text{m}^3$ ) des größten US-amerikanischen Erdgasfeldes Hugoton-Panhandle (vgl. Anhang: USA) zu generieren. Sie kamen auf  $202.000 \text{ km}^3$  Erdkruste über einen Zeitraum von 300 Mio. Jahren oder  $114.500 \text{ km}^3$  Erdkruste über einen Zeitraum von 530 Mio. Jahren.

Entsprechend seiner Genese finden sich erhöhte Heliumgehalte auch in

- Thermalwässern, die Kontakt zu tiefliegenden magmatischen Gesteinen haben (vgl. Anhang: Deutschland bzw. Frankreich)
- Grubenwettern von Steinkohlebergwerken (vgl. Anhang: Deutschland)
- Riftzonen, sowohl ozeanisch als auch kontinental (vgl. Anhang: Tansania)

Das wesentlich seltenere, wirtschaftlich jedoch ebenfalls interessante zweite Heliumisotop  $^3\text{He}$  (s. Tab. 2), entsteht durch Zerfall des Wasserstoffisotops  $^3\text{H}$  (Tritium) mit einer Halbwertszeit von 12,32 Jahren. Alles natürlich vorkommende  $^3\text{He}$  stammt aus dem Erdmantel und geht zeitlich vermutlich auf die Bildung der Erde bzw. die Trennung von Erdkern, Erdmantel und Erdkruste zurück. Auf  $^3\text{He}$  soll in dieser Studie nur sehr untergeordnet eingegangen werden.

$^3\text{He}/^4\text{He}$ -Isotopenverhältnisse sind Indikatoren für die Herkunft natürlicher Gase. Das Verhältnis in unserer Atmosphäre wird durch die Ausgasung der Erdkruste, solare Winde sowie den Eintritt interplanetarer Gase in die Erdatmosphäre beeinflusst und liegt bei  $^3\text{He}/^4\text{He} = 1,399 \pm 0,014 \cdot 10^{-6}$  (Untergrenze der Atmosphäre) (YONGCHANG et al. 1996). Im Mantel liegt das  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Isotopenverhältnis dagegen bei  $(1,1 - 1,4) \cdot 10^{-5}$ .

Tab. 2: Häufigkeiten der Edelgase und von Wasserstoff, nach Ozima & Podosek (2002), Wikipedia und [www.periodensystem-online.de](http://www.periodensystem-online.de).

	Universum	Universum (Atome pro 10 <sup>6</sup> Atome von Si)	Rang im Universum	Sonnensystem (Atome relativ zu Si, Si = 1*10 <sup>6</sup> )	Erdatmosphäre <sup>1)</sup> (Volumen in ppm)	Erdkruste Clarke-Wert (Masse in ppm)	Stabile Isotope (Natürliche Häufigkeit)
H <sub>2</sub>	74,989 %	2,79*10 <sup>10</sup> ( <sup>1</sup> H)	1.	3,18*10 <sup>10</sup>	<sup>1)</sup>	1.500 – 29.000 (0,15 – 2,9 %)	<sup>1</sup> H: 99,9885 % <sup>2</sup> H: 0,0115 %
He	23,01 %	2,72*10 <sup>9</sup> ( <sup>4</sup> He)	2.	2,21*10 <sup>9</sup>	5,24	0,008 – 0,01	<sup>3</sup> He: 0,000138 % <sup>4</sup> He: 99,999862 %
Ne	1,298 g/kg	3,20*10 <sup>6</sup> ( <sup>20</sup> Ne)	5.	3,44*10 <sup>6</sup>	18,18	0,005	<sup>20</sup> Ne: 90,48 % <sup>21</sup> Ne: 0,27 % <sup>22</sup> Ne: 9,25 %
Ar	170,3 mg/kg	8,50*10 <sup>4</sup> ( <sup>36</sup> Ar)	11.	1,172*10 <sup>5</sup>	9.340 (0,934 %)	3,5 – 4	<sup>36</sup> Ar: 0,3364 % <sup>38</sup> Ar: 0,0632 % <sup>40</sup> Ar: 99,6004 %
Kr	247,242 µg/kg	25,7 ( <sup>84</sup> Kr)	30.	46,8	1,14	(1 – 2)*10 <sup>-4</sup>	<sup>78</sup> Kr: 0,347 % <sup>80</sup> Kr: 2,257 % <sup>82</sup> Kr: 11,52 % <sup>83</sup> Kr: 11,48 % <sup>84</sup> Kr: 57,00 % <sup>86</sup> Kr: 17,40 %
Xe	9,106 µg/kg	1,24 ( <sup>132</sup> Xe)	35.	5,38	0,087	3*10 <sup>-5</sup>	<sup>124</sup> Xe: 0,095 % <sup>126</sup> Xe: 0,088 % <sup>128</sup> Xe: 1,919 % <sup>129</sup> Xe: 26,44 % <sup>130</sup> Xe: 4,077 % <sup>131</sup> Xe: 21,22 % <sup>132</sup> Xe: 26,89 % <sup>134</sup> Xe: 10,430 % <sup>136</sup> Xe: 8,857 %
Rn					4,6*10 <sup>-13</sup>	7*10 <sup>-12</sup> – 4*10 <sup>-13</sup>	5 natürliche, jedoch instabile Isotope

<sup>1)</sup> Trockene, wasserdampffreie Luft außerhalb von aktiven Vulkanen und Atomkraftwerken

Zusammenfassend stellt Helium ein Gemisch aus  $^4\text{He}$  und  $^3\text{He}$  dar und bildet sich genetisch als:

- 1) Radiogenes Helium ( $^4\text{He}$ ) durch  $\alpha$ -Zerfall von U und Th (vgl. Tab. 4) in der Erdkruste. Aus einem Gramm Thorium entstehen 24.600 Atome  $^4\text{He}/\text{s}$ , aus einem Gramm Uran dagegen 103.000 Atome  $^4\text{He}/\text{s}$  (SEARS 2015).
- 2) Helium aus dem Erdmantel ( $^3\text{He}$ ). Die Schätzung der derzeitigen  $^3\text{He}$ -Ausgasung aus dem Mantel liegt bei rund 1.000 mol/a, entsprechend ca. 4 Atomen/cm<sup>2</sup>/s. In den Maaren der Ostefel wurde sogar eine  $^3\text{He}$ -Ausgasung von 7.400 Atomen/cm<sup>2</sup>/s gemessen (OZIMA & PODOSEK 2002).
- 3) Atmosphärisches Helium (vgl. Tab. 3) durch Ausgasung von  $^4\text{He}$  und  $^3\text{He}$  aus der Erdkruste in einer Menge von rund 190 g/s bzw. 16,4 t/d (CLARKE & CLARE 2012).

Jährlich entstehen im Mantel und in der Erdkruste  $1.125 \cdot 10^{30}$  Atome He, von denen jedoch nur  $7 \cdot 10^{30}$  Atome He in die Atmosphäre entweichen (SEARS 2015). Die Heliummengen in der Erdkruste wachsen also ständig an.

Auch **Argon** in der Erdkruste stammt aus drei verschiedene Quellen:

- 1) Radiogenes  $^{40}\text{Ar}$  aus dem radioaktiven Zerfall von  $^{40}\text{K}$  in kaliumführenden Gesteinen.  $^{40}\text{K}$  macht zwar nur 0,0117 % des natürlichen Kaliums aus und zerfällt zu 89,28 % in  $^{40}\text{Ca}$ . Die restlichen 10,72 % zerfallen jedoch mit einer Halbwertszeit von 1,28 Mrd. Jahren zu  $^{40}\text{Ar}$  (vgl. Tab. 2).
- 2) Argon aus dem Erdmantel, das durch tiefreichende Störungen und/oder entlang von vulkanischen Gängen in die Erdkruste gelangt ist. Das  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Isotopenverhältnis des Mantels ist sehr viel höher als das der Atmosphäre und liegt im oberen Mantel bei bis zu 10.000, im unteren Mantel bei ca. 400.
- 3) Atmosphärisches Argon aus dem Einschluss von Niederschlagswässern zur Zeit der Sedimentation. Dieses Argon besitzt ein charakteristisches  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Isotopenverhältnis von 295,5.

Sammelt sich Argon nicht ebenfalls mit anderen Gasen in strukturellen Fallen in der Erdkruste, migriert es an die Erdoberfläche und reichert sich im Gegensatz zu Helium in der Erdatmosphäre an.

**Tab. 3: Zusammensetzung von trockener Luft, nach OZIMAR & PODOSEK (2002).**

Gas	Molekulargewicht ( <sup>12</sup> C = 12)	Volumenanteil	gesamte Atmosphäre
trockene Luft <sup>1)</sup>	28,9644	100 %	$3,961 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$
N <sub>2</sub>	28,0134	78,084 % ± 0,004 %	$3,093 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$
O <sub>2</sub>	31,9988	20,948 % ± 0,002 %	$8,298 \cdot 10^{17} \text{ m}^3$
Ar	39,9481	0,934 % ± 0,01 %	$3,700 \cdot 10^{16} \text{ m}^3$
CO <sub>2</sub>	44,0099	0,0405 % <sup>2)</sup>	$1,604 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$
Ne	20,1798	$(1,818 \pm 0,004) \cdot 10^{-3} \text{ %}$ (= 18,18 ppm)	$7,202 \cdot 10^{13} \text{ m}^3$
He	4,0026	$(5,24 \pm 0,05) \cdot 10^{-4} \text{ %}$ (= 5,24 ppm)	$2,076 \cdot 10^{13} \text{ m}^3$
CH <sub>4</sub>	16,04	$1,87 \cdot 10^{-4} \text{ %}$ <sup>2)</sup> (= 1,87 ppm)	$7,407 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$
Kr	83,7982	$(1,14 \pm 0,01) \cdot 10^{-4} \text{ %}$ (= 1,14 ppm)	$4,516 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$
N <sub>2</sub> O	44,013	$3,30 \cdot 10^{-5} \text{ %}$ <sup>1)</sup> (= 0,33 ppm)	$1,307 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$
Xe	131,2936	$(8,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-6} \text{ %}$ (= 87 ppb)	$3,446 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$
CO	28,010	$(5 - 12) \cdot 10^{-6} \text{ %}$ (= 5 - 12 ppb)	$1,98 - 4,75 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$
Rn	226,0254	$4,6 \cdot 10^{-18} \text{ %}$	$0,1822 \text{ m}^3$

± = natürliche Schwankungen in der Erdatmosphäre

<sup>1)</sup> Der Anteil von Wasserdampf in der Luft schwankt regional sehr stark und liegt im Mittel bei 1,3 %

<sup>2)</sup> Mittelwert im Jahr 2017

Dort ist es gegenwärtig das mit weitem Abstand häufigste Edelgas (vgl. Tab. 2).

**Neon** ist zwar im Universum deutlich häufiger als Argon, auf der Erde sowohl in der Erdkruste als auch in der Atmosphäre jedoch wesentlich seltener (vgl. Tab. 2). Das Isotop  $^{20}\text{Ne}$  entsteht im Zuge des sog. Kohlenstoffbrennens bei der Fusion von  $^{13}\text{C}$  und  $^{12}\text{C}$ . Die beiden anderen stabilen Neonisotope  $^{21}\text{Ne}$  und  $^{22}\text{Ne}$  (s. Tab. 2) werden dagegen vorwiegend in Roten Riesensternen aus  $^{20}\text{Ne}$  gebildet. Auf der Erde gehört Neon zu den seltensten nichtradioaktiven Elementen und ist in der Atmosphäre in etwa so häufig zu finden wie Platin in der Erdkruste. Neon geht keinerlei chemische Verbindungen ein (vgl. Kap. 1) und kommt auch nur monoatomar vor. Es besitzt einen geringen Durchmesser (116 pm, s. o.) und ist damit flüchtig. Das während der Entstehung der Erde vorhanden gewesene Neon ist bereits größtenteils in das Weltall entwichen und mit der Zeit wird auch der derzeitige Neongehalt weiter abnehmen. Natürliches neues Neon ( $^{22}\text{Ne}$ ) entsteht auf der Erde in geringen Mengen derzeit noch beim Zerfall des radioaktiven Isotops  $^{22}\text{Na}$ , das eine Halbwertszeit von 2,603 Jahren besitzt. Zudem werden  $^{21}\text{Ne}$  bzw. noch seltener  $^{22}\text{Ne}$  durch  $\alpha$ -Strahleneinwirkung (aus dem Zerfall von U und Th) auf  $^{18}\text{O}$  bzw.  $^{19}\text{F}$  neu gebildet. Beim radioaktiven Zerfall von U und Th kommt allerdings nur rund ein produziertes Nuklid  $^{21}\text{Ne}$  auf eine Million produzierte Nuklide  $^4\text{He}$ .

Die schweren, nicht-radioaktiven Edelgase **Krypton** und **Xenon** stammen ebenfalls vorwiegend aus dem Bildungsbeginn der Erde, haben jedoch wegen ihrer hohen Dichte und ihres großen Atomdurchmessers die Erdatmosphäre noch nicht verlassen. Weiterhin neu gebildet werden auf der Erde zudem die Isotope  $^{128}\text{Xe}$  bzw.  $^{130}\text{Xe}$  und zwar beim Zerfall von  $^{128}\text{Te}$  bzw.  $^{130}\text{Te}$ , die 31,74 % bzw. 34,08 % des natürlichen Tellurs ausmachen und mit einer Halbwertszeit von rund einer Trilliarde Jahren zerfallen. Das Isotop  $^{82}\text{Kr}$  wiederum entsteht beim Zerfall des Isotops  $^{82}\text{Se}$ , das 8,82 % des natürlichen Selens ausmacht und eine Halbwertszeit von 97 Trillionen Jahren besitzt (vgl. Tab. 4).

Völlig anders als mit den anderen Edelgasen verhält es sich mit dem radioaktiven Radon (Rn), das sich durch Zerfall von Radium (Ra) ständig neu bildet.

Das langlebigste und mit fast 100 % häufigste der 34 bekannten Radium-Isotope ist  $^{226}\text{Ra}$ . Es entsteht praktisch ausschließlich als Zerfallsprodukt von  $^{238}\text{U}$ . Auf 2,78 Mio. Atome  $^{238}\text{U}$  liegt allerdings nur ein Atom  $^{226}\text{Ra}$  vor. Eine Tonne Natururan mit einem  $^{238}\text{U}$ -Anteil von rund 99,2 % enthält somit nur 353 mg Radium. Daneben existieren in der Natur aus den Zerfallsreihen von  $^{232}\text{Th}$  und  $^{235}\text{U}$  noch drei weitere Radiumisotope:  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  und  $^{223}\text{Ra}$ , die aber nur in Spuren auftreten. So enthält eine Tonne des Minerals Thorit ( $\text{ThO}_2$ ) nur 0,36 mg  $^{228}\text{Ra}$  ([www.periodensystem-online.de](http://www.periodensystem-online.de)).

Das häufigste und eines von insgesamt nur drei natürlichen Radonisotopen ist  $^{222}\text{Rn}$  („Radon“). Es entsteht bei einer Halbwertszeit von 1.602 Jahren aus dem häufigsten Isotop des Radiums  $^{226}\text{Ra}$ , besitzt selbst eine Halbwertszeit von 3,8235 Tagen und zerfällt weiter über  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$  und  $^{210}\text{Po}$  zum letztendlich stabilen  $^{206}\text{Pb}$ .

Das Radonisotop  $^{220}\text{Rn}$  („Thoron“) entsteht bei einer Halbwertszeit von 3,6319 Tagen aus dem Radiumisotop  $^{224}\text{Ra}$ , besitzt selbst eine Halbwertszeit von 55,6 Sekunden und zerfällt dabei zu  $^{216}\text{Po}$  und dann weiter über  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$  und  $^{208}\text{Tl}/^{212}\text{Po}$  zum stabilen  $^{208}\text{Pb}$ .

Das dritte natürliche Radonisotop ist  $^{219}\text{Rn}$  („Actinon“). Es entsteht mit einer Halbwertszeit von 11,453 Tagen aus dem Radiumisotop  $^{223}\text{Ra}$  und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 3,96 Sekunden weiter zu  $^{215}\text{Po}$ ,  $^{211}\text{Pb}$ ,  $^{211}\text{Bi}$  und  $^{207}\text{Tl}$  zum stabilen  $^{207}\text{Pb}$ . Auch zahlreiche andere der bekannten 35 Radonisotope entstammen dem Zerfall von Radiumisotopen. Sie kommen jedoch nicht natürlich vor und zerfallen sehr schnell selbst wieder weiter zu Polonium- oder Francium-Isotopen (SEXTRO 1994).

In der gesamten Erdatmosphäre existieren gleichzeitig nur rund  $0,2\text{ m}^3$  natürlich entstandenen Radons (vgl. Tab. 3). Auch in bodennaher Luft, selbst in Gebieten mit emittierendem Untergrund, tritt Radon in Gehalten von nur etwa 1.000 Atomen pro Liter Bodenluft, d. h. im ppt-Bereich, auf. Bildet sich das Gas jedoch durch radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium bzw. Radium ständig neu und kann nicht entweichen, z. B. aus unzureichend bewetterten Untertagebergwerken, unterirdischen Wasserstollen, Höhlen, Brunnen oder auch aus Kellern, besteht eine erhöhte Gefahr der radioaktiven Kontamination – diese allerdings

Tab. 4: Natürliche Radionuklide, die zu Edelgasen zerfallen (OZIMAR &amp; PODOSEK 2002).

Mutter	Halbwertszeit in Mrd. Jahren	Zerfall	Edelgastochter	Anzahl der Edelgasatome
$^{238}\text{U}$	4,468	$\alpha$	$^4\text{He}$	8
$^{235}\text{U}$	0,8038	$\alpha$	$^4\text{He}$	7
$^{232}\text{Th}$	14,01	$\alpha$	$^4\text{He}$	6
$^{40}\text{K}$	1,251	$\beta$	$^{40}\text{Ar}$	0,1048
$^{82}\text{Se}$	$97 \cdot 10^{18}$	$\beta\beta$	$^{82}\text{Kr}$	1
$^{129}\text{I}$	0,0157	$\beta$	$^{129}\text{Xe}$	1
$^{126}\text{Te}$	$(0,7 - 2,9) \cdot 10^{21}$	$\beta\beta$	$^{126}\text{Xe}$	1
$^{130}\text{Te}$	$(0,7 - 2,9) \cdot 10^{21}$	$\beta\beta$	$^{130}\text{Xe}$	1
$^{238}\text{U}$	4,468	Kernspaltung	$^{86}\text{Kr}$ $^{136}\text{Xe}$	
$^{244}\text{Pu}$	0,082	Kernspaltung	$^{86}\text{Kr}$ , $^{136}\text{Xe}$	

Tab. 5: Bildung von Edelgasen seit Entstehung der Erde vor 4,5 Mrd. Jahren (OZIMAR &amp; PODOSEK 2002).

Edelgas-Isotop	aus der Kruste	aus dem Mantel	Anmerkung
$^4\text{He}$	$5,6 \cdot 10^{16} \text{ m}^3$	$9,2 \cdot 10^{16} \text{ m}^3$	aus U-Zerfall
$^4\text{He}$	$2,0 \cdot 10^{16} \text{ m}^3$	$4,5 \cdot 10^{16} \text{ m}^3$	aus Th-Zerfall
$^{23}\text{Ne}$	$1,9 \cdot 10^9 \text{ m}^3$	$3,2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$	aus $^{18}\text{O}$ ( $\alpha$ , n)
$^{22}\text{Ne}$	$3,6 \cdot 10^8 \text{ m}^3$	$1,6 \cdot 10^7 \text{ m}^3$	aus $^{19}\text{F}$ ( $\alpha$ , n)
$^{38}\text{Ar}$	$2,1 \cdot 10^7 \text{ m}^3$	$3,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	aus $^{35}\text{Cl}$ ( $\alpha$ , p)
$^{40}\text{Ar}$	$5,0 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$		aus $^{40}\text{K}$ -Zerfall
$^{86}\text{Kr}$	$2,9 \cdot 10^7 \text{ m}^3$	$5,5 \cdot 10^7 \text{ m}^3$	aus $^{238}\text{U}$ -Spaltung
$^{136}\text{Xe}$	$1,8 \cdot 10^8 \text{ m}^3$	$3,3 \cdot 10^8 \text{ m}^3$	aus $^{238}\text{U}$ -Spaltung

vor allem durch die sich bildenden radioaktiven Schwermetalle Polonium sowie untergeordnet Blei und Bismut, zu denen Radon ständig weiter zerfällt (vgl. Kap. 3.3).

Granite, Rhyolithe, Pegmatite, vulkanische Eruptivgesteine (Bims, Pyroklastite), karbonatische Schwarzschiefer, Kohlen, hydrothermale Vererzungen, z. B. von Flussspat, geklüftete und zersicherte Gesteine sowie trockene, durchlässige Böden begünstigen erhöhte bzw. hohe Radonkonzentrationen. Gleiches gilt für Schwermineral-, Glaukonit-, Bauxit-, Apatit-, Phosphat- oder Uran-/Thoriumreiche Gesteine und entsprechende Bergbauhalden.

Sedimentäre Ablagerungen (v. a. marine oder fluviatile Sande und Kiese) und Sedimentgesteine (nicht karbonatische Tonsteine, Quarzite, Kalksteine), tonige Böden sowie feuchte Böden emittieren wenig Radon bzw. halten Radon zurück.

Metamorphe Gesteine (Gneise, Schiefer u. a.), Sandsteine sowie Mergelgesteine besitzen ein sehr unterschiedliches Radonpotenzial und bedürfen der Einzelfalluntersuchung (SSK 1992, SCHUMANN et al. 1994).



### 3 Gewinnung und Verwendung

#### 3.1 Gewinnung und Aufbereitung

##### 3.1.1 Helium

Helium ( $^4\text{He}$ ) wird gewonnen

- a) bei der Verflüssigung von Erdgas zu Flüssigerdgas („*liquified natural gas*“ = LNG) in LNG-Anlagen, derzeit in Algerien, Australien und Katar. Hierbei wird – stark vereinfacht dargestellt – das Rohgas durch verschiedenste Methoden wie Temperaturwechsel-Adsorption (engl.: „*temperature-swing adsorption*“ = TSA) oder kryogene fraktionierende Destillation („Rektifikation“) von allen unerwünschten Bestandteilen, wie  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Hg, He, Ne, Ar und den schweren Kohlenwasserstoffen befreit. Das verbleibende, mit 98 %  $\text{CH}_4$  fast reine Methan, wird unterhalb seiner Siedetemperatur von  $-162\text{ °C}$  heruntergekühlt und damit zu einem versand- bzw. verkaufsfähigen Produkt verflüssigt. Aus dem verbleibenden Restgas (engl.: „*tail gas*“) werden auch dessen Bestandteile durch das Prinzip der Druckwechsel-Adsorption (engl.: „*pressure swing adsorption*“ = PSA) oder der kryogenen Destillation nacheinander und voneinander getrennt, wobei unterhalb  $-246,06\text{ °C}$ , der Siedetemperatur von Neon, nur noch Helium als Gas zurückbleibt und als letztes abgezogen wird. In zahlreichen Prozessschritten können so Heliumreinheiten von 99,999 % He erreicht werden. Zumeist wird das Helium dann auch noch verflüssigt, da es so wesentlich leichter – in Spezialbehältern – über große Entfernungen transportier- und vermarktbar ist (vgl. Kap. 5.1).
- b) bei der Denitrifikation von Erdgas, derzeit z. B. in den USA, Russland und Polen. Um die in einigen Erdgaslagerstätten zu hohen Gehalte an nicht-brennbarem Stickstoff zu reduzieren (und zugleich, bzw. in China und Indien sogar vorrangig, als weitere Verkaufsprodukte Stickstoff und Helium zu gewinnen) werden Stickstoff und Helium durch Druckwechsel-Adsorption oder bei tiefen Temperaturen durch kryogene fraktionierende Destillation abgetrennt. Vor allem in den USA fällt dabei in einigen älteren Heliumanlagen zuerst Rohhelium @ 60 – 80 %

He an, das anschließend in anderen Anlagen noch zu Reinhelium @ 99,995 % He aufgereinigt werden muss. Im Einzelnen gibt es dazu zahlreiche Varianten und Patente. Im Vergleich dazu bietet seit einigen Jahren das Membrantrennverfahren über Gaspermeation eine Alternative, bei der keine Phasenumwandlung des Gases erfolgt. Dieses Membrantrennverfahren beruht auf der Selektivität verschiedener Membranmaterialien in Bezug auf das Diffusionsverhalten bestimmter Gasmoleküle. Einen aktuellen Überblick zu den derzeitigen Prozesstechnologien zur Abtrennung von Helium aus natürlichen Gasen mit umfangreichem Literaturverzeichnis gibt EPCM (2017). In den USA und Kanada werden aufgrund der stark gestiegenen Heliumpreise seit einigen Jahren auch heliumreiche Stickstoffgase gefördert und auf ähnliche technische Weise vorrangig auf Helium hin aufbereitet.

- c) bei der Reinigung von Kohlendioxidnaturgas. Kohlendioxid wird in den USA beim Fracking eingesetzt, so dass sich der Gasproduzent Air Products and Chemicals, Inc. entschloss, ein sehr  $\text{CO}_2$ -reiches Naturgas aufzubereiten und dabei Helium als Verkaufsprodukt zu gewinnen. Im Jahr 2015 wurde die weltweit erste Heliumanlage auf  $\text{CO}_2$ -Gasbasis am Standort Doe Canyon/Colorado eingeweiht (s. Abb. 3)
- d) aus der Stickstoff-Fraktion bei der Luftzerlegung (s. Kap. 3.1.2), derzeit z. B. in Leuna in Sachsen-Anhalt, in der Ukraine und in China. Hierbei fällt Helium als Nebenprodukt der Neongewinnung an, wobei es mit bis zu 24 % Anteil in der Rohneon-Helium-Fraktion enthalten ist. Aus dieser wird es gewonnen, indem das Gasgemisch auf 180 bar verdichtet und anschließend schrittweise auf  $-220\text{ °C}$  abgekühlt wird. Beim abschließenden Entspannen auf 25 bar kondensiert das Neon, während das Helium gasförmig bleibt und abgetrennt werden kann. Da die Helium- und Neongehalte in der Luft sehr gering sind (vgl. Tab. 3) ist diese Form der Heliumgewinnung sehr aufwändig und teuer und auch die dadurch gewonnene Heliummenge im Vergleich zu den anderen Heliumgewinnungsverfahren a) bzw. b) sehr gering ( $1,4\text{ m}^3\text{ He/h}$  in einer mittelgroßen Luftzerlegungsanlage mit einer Kapazität von  $2.000\text{ t O}_2/\text{d}$ ).

Im Gegensatz zum  $^4\text{He}$ , das mit 99,999862 % im natürlichen Helium weit überwiegt, ist ein Teil des

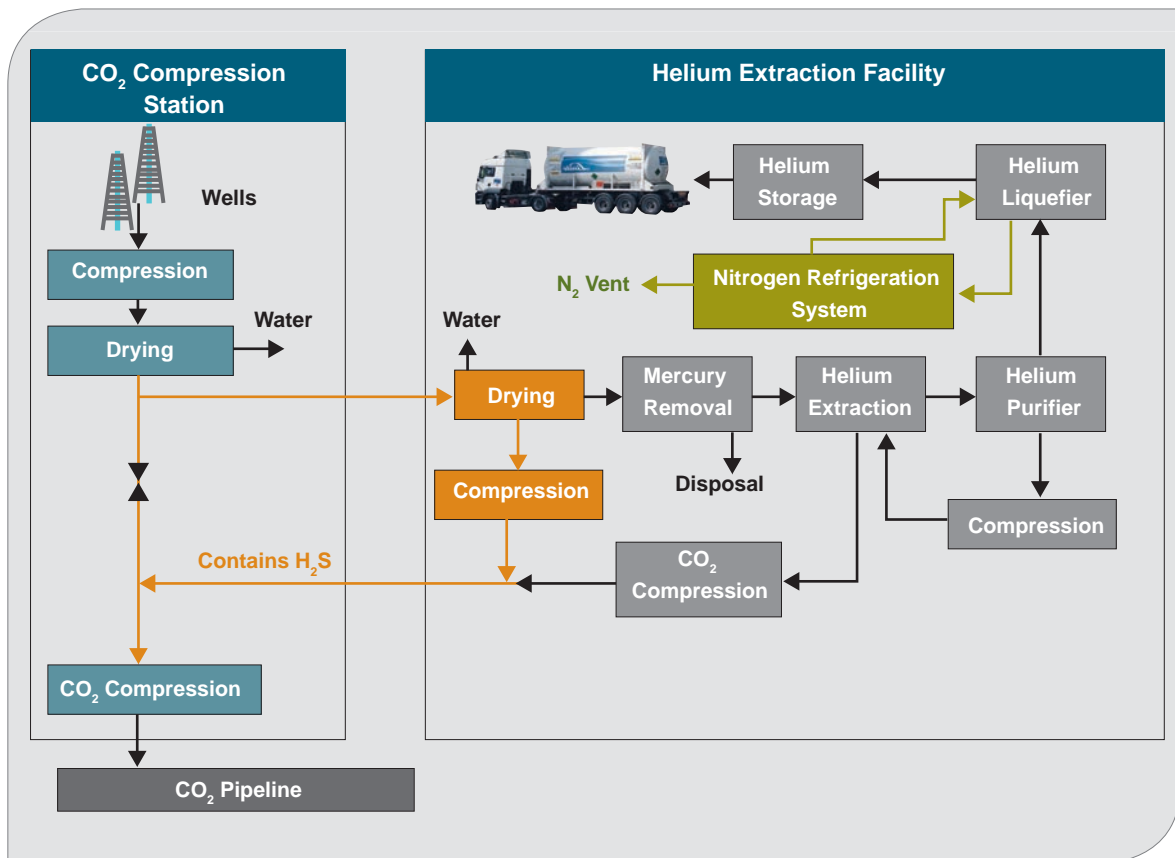


Abb. 3: Prinzip der Aufreinigung von CO<sub>2</sub> und dabei Abtrennung von Helium am Standort Doe Canyon/Colorado, Grafik: Air Products and Chemicals, Inc.

<sup>3</sup>He in der Erdatmosphäre künstlichen Ursprungs. Das als Nebenprodukt der Kernspaltung entstehende <sup>3</sup>H (Tritium) zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren zu <sup>3</sup>He. Größere Mengen an <sup>3</sup>He entstehen deshalb in Wiederaufbereitungsanlagen, Atomwaffenfabriken sowie Kernreaktoren. Das US-Energieministerium unterhält in seiner Savannah-River-Anlage, Georgia, einen zentralen Tritiumvorrat zur Nuklearwaffenproduktion. Das dort ständig neu gebildete <sup>3</sup>He wird verkauft und nach Aufreinigung kommerziell genutzt (vgl. Kap. 3.2.1). Bei weiterhin stark steigendem Bedarf an <sup>3</sup>He könnte dieses auch direkt in Kernreaktoren gewonnen oder aus bereits verflüssigtem Helium durch weitere Abkühlung abgetrennt werden.

### 3.1.2 Neon

Neon wurde über lange Zeit ausschließlich im Zuge der Luftzerlegung nach dem vom deutschen Ingenieur CARL PAUL GOTTFRIED VON LINDE (1842 – 1934, Gründer der heutigen Linde AG) im Jahr 1895 entwickelten und nach ihm benannten Linde-Verfahren bei der Sauerstoff- und Stickstoffgewinnung als zusätzliche Komponente

gewonnen. (Anm.: Dies jedoch nur, wenn international eine hohe Nachfrage nach Neon besteht, da Sauerstoff bzw. Stickstoff mit wenigen Ausnahmen stets die Hauptwertgase darstellen. Zudem lohnt sich eine Abtrennung der Edelgase Neon, Krypton und Xenon in Luftzerlegungsanlagen nur, wenn diese eine relativ hohe Mindestkapazität von 800 t (preisabhängig und gegenwärtig von 2.000 t) Sauerstoff/d besitzen). Nach CLARKE & CLARE (2012) liegen die Zusatzkosten für eine Helium-/Neon-Produktion im Zuge der Errichtung einer neuen Luftzerlegungsanlage bei rund 1 % der Gesamtkosten.

Aus energetischen Gründen wird heute das klassische Linde-Verfahren der Luftzerlegung in neueren Anlagen nicht mehr eingesetzt und stattdessen ein Zweisäulenapparat verwendet. Dabei wird die Umgebungsluft auf ca. 6 bar verdichtet und dann von Wasserdampf, Kohlendioxid und den meisten Kohlenwasserstoffen befreit. Die gereinigte Luft wird im Hauptwärmetauscher auf etwa –175 °C abgekühlt. Die Abkühlung erfolgt durch einen internen Wärmeaustausch – im Gesamtprozess bereits erzeugte kalte Gasströme kühlen dabei die verdichtete Luft. Durch Entspannung eines Teil-

stroms der verdichteten Luft erfolgt eine weitere Abkühlung. Dabei wird die Luft teilweise verflüssigt und kann nun im eigentlichen Luftzerleger in reinen Sauerstoff und reinen Stickstoff zerlegt werden. Der Luftzerleger besteht aus zwei Trennsäulen, der Mitteldruck- und der Niederdrucksäule. Beim Trennprozess werden die unterschiedlichen Siedepunkte der Luftbestandteile genutzt: Sauerstoff verflüssigt sich bei  $-183\text{ °C}$  und Stickstoff bei  $-196\text{ °C}$ . Durch intensiven Stoff- und Wärmeaustausch zwischen aufsteigendem Dampf und herablaufender Flüssigkeit erhält man über kontinuierliches Verdampfen und Kondensieren am Kopf der Niederdrucksäule reinen Stickstoff und am Boden, dem „Sumpf“, fast reinen Sauerstoff.

Am Kopf der Mitteldrucksäule erhält man als Zwischenprodukt eine gasförmige Stickstoff-Fraktion, welche u. a. auch das Neon enthält. Aus der kontinuierlich abgezogenen Stickstoff-Fraktion wird durch fraktionierende Destillation der Stickstoffanteil reduziert, bis sie aus etwa 35 – 37 % Ne, 50 %  $\text{N}_2$  und 13 – 15 %  $\text{H}_2 + \text{He}$  besteht. Andere typische Rohneonfraktionen enthalten 50 – 55 % Ne, 30 %  $\text{N}_2$ , 15 – 20 % He und 1,5 %  $\text{H}_2$ . Dieses Gasmisch kann mittels diverser Methoden weiter gereinigt werden: Man kann etwa den Wasserstoff katalytisch mit einer definierten Menge an Sauerstoff reagieren lassen und das entstandene Wasser als Eis abscheiden. Der Stickstoff lässt sich durch Adsorption an Silikagel entfernen. Das so erhaltene Gasmisch aus 70 – 76 % Ne und

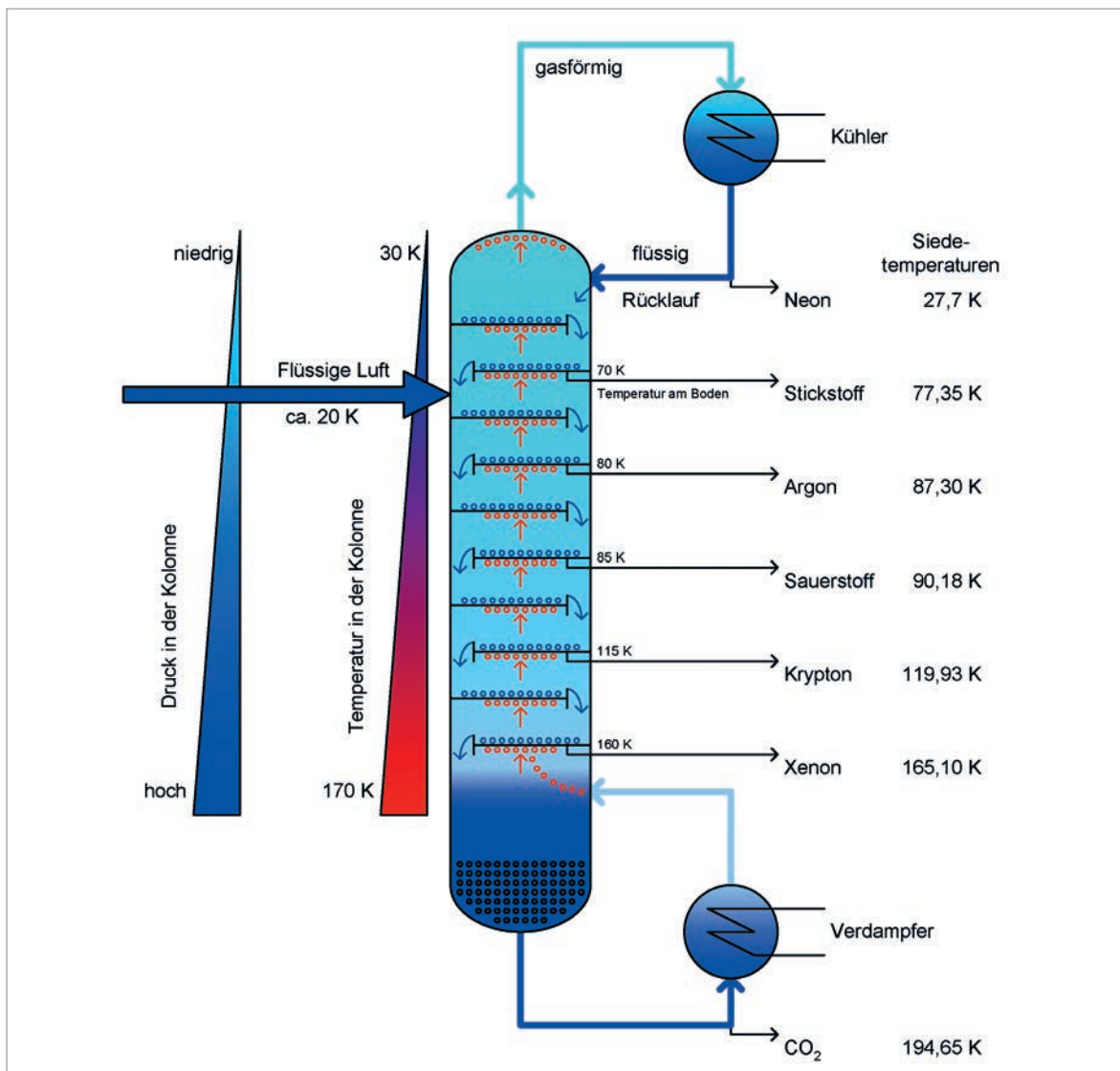
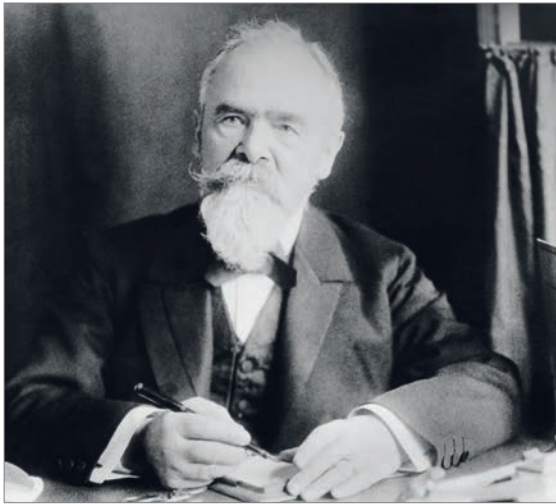


Abb. 4: Prinzip der fraktionierenden Destillation mithilfe einer Rektifikationskolonne, Grafik: Mordechai1/Wikipedia.



**Abb. 5:** Carl Paul Gottfried von Linde (1842 – 1934), deutscher Ingenieur und Gründer der heutigen Linde AG, der 1895 das Prinzip der Luftverflüssigung entwickelte, Foto: Wikipedia.

24 – 30 % He lässt sich dann durch Verdichtung auf 180 bar und anschließender schrittweiser Abkühlung auf  $-220\text{ °C}$  trennen. Dabei verflüssigt sich das Neon, während Helium gasförmig bleibt. Um hochreines Neon zu erhalten, muss dieses nochmals in Spezialanlagen einer fraktionierenden Destillation unterzogen werden, wobei sich das um 20 K tiefer siedende Helium relativ gut abtrennen lässt und flüssiges Neon mit einer Verunreinigung von nur noch ca. 5 – 10 ppm He zurückbleibt.

### 3.1.3 Argon

Auch die Gewinnung von Argon erfolgt vorrangig durch fraktionierende Destillation aus der Luft (Linde-Verfahren). Erschwerend dabei ist, dass der Siedepunkt von Argon ( $-189,2\text{ °C}$ ) zwischen den Siedepunkten von Sauerstoff ( $-183\text{ °C}$ ) und Stickstoff ( $-196\text{ °C}$ ) liegt. Das Argon wird daher zwar in der Haupt-Rektifikationskolonne des Verfahrens auf Gehalte bis rund 10 % angereichert, dann aber in einer eigenen Argon-Kolonne weiter aufbereitet. In der Argon-Kolonne wird durch Rektifikation zunächst Rohargon @ 95 % Ar hergestellt, das noch etwa 3 – 5 %  $\text{O}_2$  und 1 %  $\text{N}_2$  enthält. Anschließend wird das Rohargon, gelegentlich an anderen Standorten, in weiteren Stufen aufgereinigt. Das Gasgemisch wird dafür zunächst auf Raumtemperatur erwärmt und auf 4 – 6 bar verdichtet. Um den noch enthaltenen

Sauerstoff zu entfernen, wird danach Wasserstoff eingespritzt, der an Edelmetall-Katalysatoren mit dem Sauerstoff zu Wasser reagiert. Nachdem dieses Wasser entfernt wurde, wird in einer weiteren speziellen Argon-Kolonne das Argon, das sich am unteren Ende der Kolonne anreichert, vom restlichen Stickstoff getrennt, so dass letztendlich Reinargon @ 99,9999 % Ar zurückbleibt.

Durch Einsatz von anderen Einbauten besteht heutzutage auch die Möglichkeit, das Argon in der Argon-Kolonne soweit zu reinigen, dass der  $\text{O}_2$ -Gehalt bereits der Produktspezifikation entspricht und nur der Stickstoff entfernt werden muss. Das geschieht genauso wie beim oben beschriebenen Verfahren in einer weiteren speziellen Argon-Kolonne. Die Zwischenschritte mit der Sauerstoffverbrennung durch Zugabe von Wasserstoff können dabei jedoch komplett entfallen.

Nach CLARKE & CLARE (2012) liegen die Zusatzkosten für eine Argonanlage im Zuge der Errichtung einer neuen Luftzerlegungsanlage bei rund 15 % der Gesamtkosten. Im Regelfall sind alle neueren Luftzerlegungsanlagen mit einer Argonanlage ausgerüstet, die z. B. als Beiproduktion von 1.000 t  $\text{O}_2$ /d ca. 50 t Ar/d liefert. Hierdurch erhöhen sich die Erlöse um 4 – 5 % (COCKERILL 2015).

Weitere Quellen für die Gewinnung von Argon sind die Produktion von Ammoniak im Haber-Bosch-Verfahren sowie die Synthesegasherstellung, etwa zur Methanolproduktion. Bei diesen Verfahren, die ebenfalls alle Luft als Ausgangsstoff nutzen, reichern sich Rohargon und andere Edelgase im Produktionsprozess an und können aus dem Gasgemisch isoliert werden. Das dabei anfallende Rohargon muss danach allerdings in einer Argon-Kolonne noch zu Reinargon aufgereinigt werden. In Nordamerika etwa wird derzeit in drei Ammoniakanlagen (2 x in Oklahoma und 1 x in Ontario) auch Argon produziert (SURESH et al. 2016).

### 3.1.4 Krypton

Krypton wird wie die anderen Edelgase Neon, Argon und Xenon sowie untergeordnet auch Helium über das Linde-Verfahren in Luftzerlegungsanlagen (LZA) gewonnen. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften reichert sich Krypton zusammen mit Xenon im flüssigen Sauerstoff im

Sumpf der Rektifikationskolonne an (vgl. 3.1.2). Die Konzentration im flüssigen Sauerstoff beträgt dabei ca. 500 – 1.000 ppm. Diese erste Anreicherungsstufe wird in Teilen der deutschen Gaseindustrie als „dünne Suppe“ bezeichnet.

Für die weitere Aufkonzentrierung des Kryptons gibt es verschiedene technische Verfahren. Bei einem häufig verwendeten Verfahren wird das im flüssigen Sauerstoff gelöste Krypton in einer zusätzlichen Rektifikationskolonne weiter aufkonzentriert (Krypton-Gehalt dann ca. 1.000 – 2.000 ppm). Da sich mit dem Krypton auch die Kohlenwasserstoffe, die eine potenzielle Zündquelle darstellen, weiter im Sauerstoff aufkonzentrieren, müssen diese im nächsten Schritt zunächst entfernt werden. Dazu wird der flüssige Sauerstoff überkritisch verdichtet, verdampft und auf Umgebungstemperatur angewärmt. Anschließend werden die Kohlenwasserstoffe an einem Hochtemperatur-Katalysator verbrannt. Die dabei entstehenden CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Moleküle werden mittels einer Adsorberstation entfernt. Der nun kohlenwasserstofffreie Sauerstoff wird wieder abgekühlt und verflüssigt. In einer weiteren Rektifikationskolonne können dann das Krypton gemeinsam mit dem Xenon vom Sauerstoff getrennt werden. Das dabei entstehende Konzentrat enthält ca. 90 – 99 % Krypton/Xenon, wobei etwa zehnmal mehr Krypton als Xenon anfällt. Der Rest besteht aus Sauerstoff und Restbestandteilen, wie z. B. Fluorkohlenwasserstoffen, Tetrafluormethan, Schwefelhexafluorid, Tetrafluormethan, Stickoxiden und Kohlenoxiden. Dieses hochkonzentrierte Krypton/Xenongemisch wird in Teilen der deutschen Gaseindustrie im Gegensatz zur o. g. „dünnen Suppe“ als „dicke Suppe“ bezeichnet.

Die abschließende Aufreinigung der beiden Edelgase erfolgt wiederum in einem mehrstufigen Prozess in Spezialanlagen. Da die zu verarbeitenden Mengen bei dieser abschließenden Aufreinigung nur noch sehr gering sind, wird häufig die Produktion aus mehreren Vorkonzentrationsanlagen verarbeitet. Weil dieses mehrstufige Verfahren sehr aufwändig ist und Krypton und Xenon in der Luft sehr selten sind, handelt es sich bei diesen um vergleichsweise teurere Gase. Nach CLARKE & CLARE (2012) liegen die Zusatzkosten für eine Rohkrypton-/xenonproduktion im Zuge der Errichtung einer neuen Luftzerlegungsanlage bei rund 3 % der Gesamtkosten.

### 3.1.5 Xenon

Xenon wird, wie auch die anderen Edelgase mit Ausnahme von Helium, hauptsächlich durch das Linde-Verfahren (Luftverflüssigung) in Luftzerlegungsanlagen (LZA) gewonnen (vgl. Kap. 3.1.2 und 3.1.4). Das im Kapitel 3.1.4 beschriebene Verfahren für die Krypton-Gewinnung ermöglicht gleichzeitig auch die Gewinnung von Xenon, aufgrund der Konzentration in der angesaugten Umgebungsluft allerdings mit einer ca. um den Faktor 10 geringeren Xenon-Ausbeute als die des Kryptons. Alternativ zur Rektifikation und Destillation des N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Kr-Xe-Gasgemisches (vgl. Kap. 3.1.4) ist es auch möglich, Xenon an bestimmte Medien zu absorbieren und anschließend freizusetzen, an denen Krypton dagegen schwerer absorbierbar ist

Die Gewinnung von Xenon ist sehr aufwändig: Für die Herstellung von 1 m<sup>3</sup> Xe (5,9 kg) unter Normalbedingungen (1.013 hPa, 0 °C) muss man mehr als 10 Mio. m<sup>3</sup> Luft (12.920 t) verarbeiten!

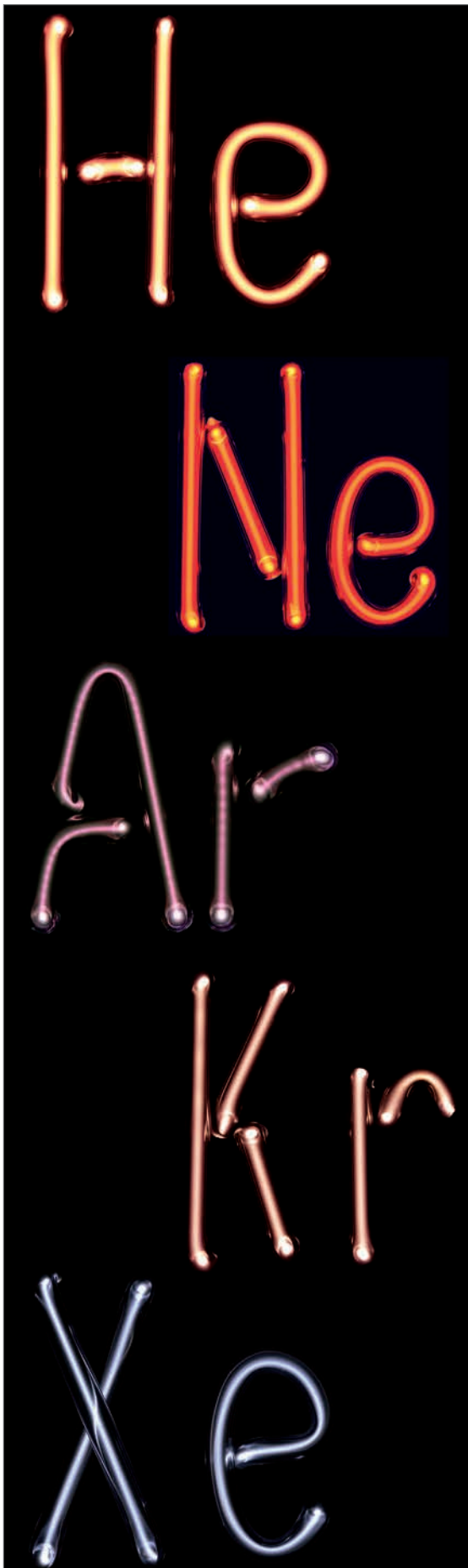
## 3.2 Verwendung

### Beleuchtungstechnik

Ein Verwendungszweck, den alle Edelgase verbindet, ist ihre Nutzung in Leuchtröhren für Leuchtreklamen, da die Edelgase in Gasentladungsröhren bzw. -lampen charakteristische Farben ausstrahlen (vgl. Abb. 1):

- Helium: weißrosa, bzw. in gelbem Rohr: gelb
- Neon: rötlich-orange, bzw. mit Quecksilber in grüngelbem Rohr: grün
- Argon: rosaviolett bzw. mit Quecksilber oder Iod: blau
- Krypton: grünlich-orange, ionisiert: weiß
- Xenon: blau-violett
- Radon: rot (keine kommerzielle Verwendung)

Der Überbegriff Gasentladungslampe kennzeichnet verschiedene Lampentypen, deren Wirkungsprinzip auf der Anregung von Edelgasen oder auch anderen Gasen wie Brom, Iod, Fluor, Chlor, Stickstoff, Kohlendioxid oder gasförmigem Quecksilber bzw. Natrium basiert. Gasentladungslampen werden entsprechend ihres Gasdrucks in Niederdruck-, Hochdruck- und Höchstdruck-Entladungslampen untergliedert. Zu den Nieder-



druck-Gasentladungslampen gehören die Neonlampe bzw. -röhre (s. u.), die mit Quecksilberdampf gefüllte und innen mit einem Leuchtstoff beschichtete Leuchtstofflampe oder auch die Metaldampf-Niederdrucklampe (Straßenbeleuchtung), während z. B. die Krypton-Bogenlampe (s. 3.2.4) oder die Xenonlampe (s. 3.2.5) zu den Hochdruck-Gasentladungslampen gehören.

Leuchtröhren sind dünne, mit Gas unter geringem Druck gefüllte Glasrohre, deren Enden mit Elektroden verschlossen sind. Beim Anlegen einer hohen Spannung wird das enthaltene Gas zum Leuchten angeregt. Die Leuchtfarbe der Leuchtröhre ist abhängig von der Art des eingefüllten Gases bzw. Gasmisches. Die Lebensdauer beträgt, je nach Füllgas, bis zu 20 Jahre. Sie ist unabhängig von Ein- und Ausschaltvorgängen; eine Eigenschaft, die für blinkende Leuchtreklame vorteilhaft ist.

Neonröhren haben einen unbeschichteten klaren oder rot getönten Glaskolben, sind mit Neon gefüllt und leuchten entsprechend dessen Emissionsspektrum rot. Sie wurden 1909 erfunden und werden deshalb schon sehr lange zur Lichtwerbung und zur Beleuchtung hoher Bauwerke verwendet.

Im Emissionsspektrum von Neon findet man neben den intensiven Linien im roten Bereich auch Linien bei Orange und Gelb, während die grünen Linien nur schwach strahlen. Daher erscheint eine Neonröhre normalerweise hellrot. Um dunkelrotes Licht zu erzeugen, färbt man die Glasröhren zusätzlich rot, um die gelben und grünen Leuchtanteile zu absorbieren.

**Abb. 6:** Mit Edelgasen gefüllte Leuchtröhren, die das jeweilige chemische Zeichen des Edelgases formen, Fotos: Pslawinski/Wikipedia.

### 3.2.1 Helium

Helium hat neben den in Kapitel 2.1 genannten Eigenschaften noch weitere, die dieses Edelgas für spezielle Verwendungsbereiche sehr attraktiv machen (CAI et al. 2012):

#### **Kernspintomographie/ Magnetresonanztomographie (MRT)**

Geschätzte 25 – 30 % (nach WADE (2017) nur 15 %) des gegenwärtig weltweit benötigten Heliums werden zur Kühlung von Kernspin- bzw. Magnetresonanztomographen (MRTs) in Krankenhäusern und Radiologiepraxen verwendet (s. Abb. 7). In Deutschland sind derzeit ca. 2.800 und weltweit rund 37.000 MRTs in Betrieb. Damit ist die Medizintechnik, die Helium auch noch für andere Anwendungen einsetzt (s. u.), weltweit der größte Verbraucher von Helium.

Die Kernspin- bzw. Magnetresonanztomographie ist ein in den 1970er Jahren entwickeltes bildgebendes Verfahren, das vor allem in der medizinischen Diagnostik zur Darstellung von Struktur und Funktion der Gewebe und Organe im Körper eingesetzt wird. Das Verfahren beruht darauf, dass die Atomkerne im untersuchten Gewebe durch eine Kombination von statischen und hochfrequenten magnetischen Feldern gezielt zu einer bestimmten Bewegung angeregt werden und dann ein messbares Signal in Form einer Wechselspannung abgeben, bis die Bewegung abgeklungen ist. Die magnetischen Felder werden größtenteils mit supraleitenden NbTi-Elektromagnetspulen erzeugt, die magnetische Flussdichten von heute meist 1,5 – 3,0 Tesla oder sogar noch höher aufbauen. Dagegen können selbst gesinterte NdFeB-Permanentmagnete nur Flussdichten bis maximal 1,3 Tesla erzeugen. Die Elektromagnete werden durch flüssiges Helium auf Temperaturen um  $-269\text{ °C}$  gekühlt. Nur durch die Tiefkühlung der Elektromagnete werden diese supraleitend (NbTi ab  $-263\text{ °C}$ ) und der Strom, mit dem die Magnete einmalig "aufgeladen" wurden, kann ohne einen elektrischen Widerstand in ihnen kreisen und das Magnetfeld mit großer Homogenität aufrechterhalten. Fällt die Kühlung aus bzw. wird durch eine Notfallabschaltung stillgelegt („Quenchen“), steigt der elektrische Widerstand schnell an, es kommt zur Wärmeentwicklung, dadurch innerhalb von Minuten zum völligen Verdampfen des Heliums und dadurch wiederum zum Zusammenbruch des



**Abb. 7:** Typischer MRT in einem Krankenhaus in Taiwan, Foto: KasugaHuang/Wikipedia.

magnetischen Feldes. Pro MRT werden zwischen 1.000 und 2.000 l, bei älteren Geräten ursprünglich sogar bis zu 6.000 l flüssiges Helium verwendet. Trotz mehrfacher Isolation entweicht Helium (ca. 30 – 60 ml/h) und muss daher halbjährlich bis jährlich in einer Größenordnung von bis zu 1.000 l ersetzt werden. Die Entwicklung geht dementsprechend zur Entwicklung von MRT-Kühlsystemen mit deutlich reduziertem Heliumbedarf (s. Kap. 3.5), während gleichzeitig der Einsatz von MRTs in den Entwicklungsländern (v. a. Indien und Brasilien) sowie China ständig steigt.

#### **Traggas**

Helium wird durch seinen statischen Auftrieb als unbrennbares Traggas zur Befüllung von Ballons (Partyballons, Wetterballons) und Luftfahrzeugen (Blimps, „Zeppeline“) verwendet. In den USA finden 9 % des verbrauchten Heliums auf diese Weise Verwendung.

Sicherlich der bekannteste und im Traggasbereich auch mit Abstand wichtigste Teilabsatzmarkt von Helium ist die Befüllung von Party- und Werbeballons. Je größer der Ballon, desto mehr Helium wird zur Befüllung benötigt. Zum Beispiel reichen  $0,42\text{ m}^3$  Helium für ca. 25 handelsübliche runde Partyballons mit 28 cm Durchmesser. Bei Latexballons entweicht das Gas durch Diffusion innerhalb weniger Stunden bis maximal zwei Tagen. Folienballons sind dichter und das Helium bleibt mehrere Wochen im Ballon erhalten. Ballongas wird in Deutschland in Behältern mit  $0,12\text{ m}^3$  bis  $9,2\text{ m}^3$  Inhalt @ 90 % He angeboten.

In den USA werden bei jeder der berühmten Paraden des New Yorker Kaufhauses Macy's am

Thanksgiving Day 8.300 m<sup>3</sup> Helium zur Befüllung der bunten Riesenballons benötigt. Auch der Spezialballon für die Red Bull Stratos Mission am 14. Oktober 2012 wurde mit rund 5.100 m<sup>3</sup> Helium befüllt. Bei dem Absprung von Felix Baumgartner in 38.969 m Höhe hatte sich der Balloninhalt aufgrund des geringeren Luftdrucks auf ca. 834.000 m<sup>3</sup> Volumen ausgedehnt.

Wetterballone dienen dem Aufstieg von Messgeräten in der Meteorologie und besitzen typischerweise eine 200 g schwere Hülle aus sehr dünnem Gummi und bis zu 3 kg Tragkraft. Die Füllung erfolgt je nach Größe mit 0,5 – 6,3 m<sup>3</sup> Helium – oder häufiger Wasserstoff, da wesentlich günstiger – und der Aufstieg mit 5 – 7 m/s. Wetterballone steigen bis auf 23 – 40 km Höhe auf, wobei sich die Hülle aufgrund des immer geringer werdenden Druckes immer weiter aufbläht und letztendlich platzt. Mit einem Fallschirm kehren die wertvollen Messsonden aus der Stratosphäre auf die Erde zurück und können erneut verwendet werden. Weltweit finden auf diese Weise zweimal täglich Wettermessungen an rund 900 Beobachtungsstellen statt. Schätzungen gehen davon aus, dass für diese Erfassung der Wetterdaten jährlich rund 4 Mio. m<sup>3</sup> Helium verbraucht werden (GUBLER et al. 2016).

Blimps sind Prallluftschiffe ohne starres inneres Gerüst und werden meist zu Werbezwecken, z. B. von der The Goodyear Tire & Rubber Company gebaut. Bewährt haben sich Blimps mit einem Hüllenvolumen von bis zu 20.000 m<sup>3</sup>.

Die heute vom Bodenseeraum her bekannten und in Friedrichshafen stationierten Zeppeline NT sind halbstarre Luftschiffe mit einem internen Gerüst aus Aluminium- und kohlenfaserverstärkten Kunststoff-Trägern, Kevlar-Spannseilen und einer gasdichten Hülle, die zur Formgebung mit Innendruck beaufschlagt ist. Sie bieten Sitzplätze für 14 Passagiere und zwei Piloten. Die 75 m langen Zeppeline NT besitzen ein Hüllenvolumen von 8.425 m<sup>3</sup> und fliegen üblicherweise in einer Höhe von 300 bis 600 m, können jedoch bis auf 2.600 m Höhe aufsteigen. Die Maximalgeschwindigkeit liegt bei 125 km/h, bei den touristischen Flügen in der Regel bei 75 km/h.

Jeder der derzeit sechs Zeppeline NT der ZLT Zeppelin Luftschifftechnik GmbH & Co. KG ist, bezogen auf Standard-Bedingungen, mit rund 7.400 m<sup>3</sup> Helium gefüllt. Das entspricht pro Schiff einem Auftrieb von rund 7,8 t bei 0 °C oder 8,4 t bei 20 °C, sofern Luft- und Heliumtemperatur gleich sind. Mit jedem Grad Temperaturdifferenz zwischen Heliumfüllung und Außenluft steigt oder fällt der Auftrieb um 30 kg. Das Luftschiff selbst hat eine Leermasse von etwa 6.300 kg. Davon entfällt etwa 1 t auf die Hülle, die nur 0,3 mm dick ist und aus einem Mehrschichtlaminat besteht. Die innere Schicht ist eine gasdichte Polyurethan-Folie, gefolgt von einem reißfesten Polyestergerüst. Über dem Polyester liegt eine ebenfalls heliumdichte Folie aus Tedlar, das mit einer Titansdioxid-Schicht versehen ist, um die Resistenz gegen UV-Strahlung und Alterung zusätzlich zu erhöhen.

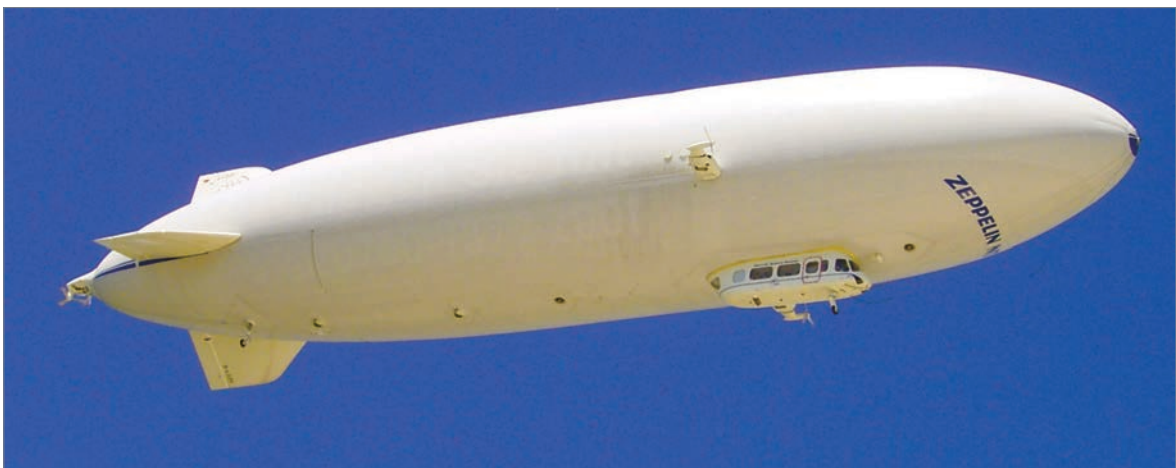


Abb. 8: Zeppelin NT über Friedrichshafen am Bodensee, Foto: Stefan-Xp/Wikipedia.



### Halbleiterindustrie

Siliziumeinkristalle zur späteren Produktion von Halbleitern werden aus heißem hochreinem Halbleitersilizium gezogen. Sie haben teils noch 150 mm oder 200 mm, meist jedoch 300 mm, zunehmend sogar 450 mm Durchmesser. Hierfür kommen starke, durch Helium tiefgekühlte, supraleitende Magnete zum Einsatz. Während der gesamten Prozesse der Wafer- und Halbleiterfertigung dient Helium aufgrund seiner Nichtreaktivität als Trägergas für Chemikalien sowie wegen seiner guten Wärmeleitfähigkeit als Kühlgas. Je größer die gefertigten Wafer, desto größer der Heliumbedarf zum Kühlen. Germaniumeinkristalle zur Produktion von Halbleitern werden in einer Schutzatmosphäre aus Helium gezüchtet. Auch in der eigentlichen Herstellung und Verarbeitung von Halbleitern, die immer kleiner und immer leistungsfähiger werden, spielen Verunreinigungen eine sehr wichtige Rolle und müssen unter allen Umständen vermieden werden. Hierzu, sowie auch zur Temperaturkontrolle, erfolgt die gesamte Halbleiterproduktion in einer kontrollierten Atmosphäre aus hochreinem Helium, das möglichst keinerlei Verunreinigungen anderer Gase, wie O<sub>2</sub> oder N<sub>2</sub>, oder anderer Elemente enthalten darf. Bei der Weiterverarbeitung der Halbleiter zu Schaltelementen findet Helium darüber hinaus als Zwischenräume ausfüllendes Gas Verwendung. Zudem dient es der Wärmeableitung im Produktionsprozess und steigert damit den Durchsatz. Auch zur Suche von Leckagen im Heliumsystem bzw. in Hochvakuumeinrichtungen kommt Helium zum Dichtungsnachweis zum Einsatz (s. Abschnitt Lecksuche). STOCKMAN (2016) beschreibt die einzelnen Verwendungsbereiche von Helium in der Halbleiterproduktion und beziffert den Jahresbedarf an Helium pro Fabrikationsstätte („Fab“) auf mittlerweile > 500.000 m<sup>3</sup>.

### Metallhärtung

Vakuumöfen werden in vielen Anwendungen und in zahlreichen Industriebereichen verwendet. In der industriellen Praxis hat sich die Niederdruckaufkohlung im Vakuumofen mit anschließender Hochdruckgasabschreckung für das Einsatzhärten von Stählen etabliert. Als vorteilhaft erweist sich bei der Aufkohlung im Niederdruck, dass die Ofenatmosphäre frei von Sauerstoff gehalten wird, so dass eine Randschichtschädigung durch Oxidation vermieden werden kann. Ein

Vakuumofen ist dabei in der Regel ein elektrisch beheizter Ofen, in dem ein Druck von 5 – 10 mbar während des Verfahrens gehalten wird. Um die aufgekohlten Bauteile von einer Temperatur von 940 – 980 °C auf Raumtemperatur schnell abzukühlen, wird ein Gas mit hoher Wärmeleitfähigkeit benötigt. Zum Einsatz kommen dafür Gasgemische aus Helium (sehr hohe Wärmeleitfähigkeit) und Stickstoff oder Argon (beides Gase mit hohem Molekulargewicht), wobei notfalls auf Helium auch verzichtet werden kann.

Eine weitere Methode zur Einsatzhärtung ist die Aufkohlung in Öfen und anschließender Abschreckung in einem Ölbad. Hierzu werden die aufgekohlten Metallteile durch Heliumgas abgekühlt, das mit einem Druck von bis zu 20 bar eingepulst und mittels zwei Turbinen bewegt wird. Nach dem Abschrecken brauchen die Bauteile dann im Vergleich zur Ölabschreckung weder gewaschen noch die Abwässer, die dabei entstanden wären, aufbereitet oder behandelt zu werden. Die Gasabschreckung ist somit ein vergleichsweise sauberes und umweltfreundliches, wenn auch wegen des Heliumbedarfs – trotz Kreislaufführung – relativ teures Härteverfahren.

### Gaschromatographie

Bei der qualitativen und quantitativen Bestimmung von Gasen kommt zur Auftrennung der Gemische meist die Gaschromatographie zum Einsatz. Die Gaschromatographie beruht darauf, dass Gasmoleküle verschiedener Stoffe aufgrund ihrer unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften (Siedepunkt, Wechselwirkung mit der chromatographischen Trennsäule) unterschiedlich schnell den Gaschromatographen durchlaufen. Damit erreicht man eine Trennung der einzelnen Gaskomponenten. Das Gasgemisch, das eingegeben wird, wird von einem Trägergas durch die Trennsäule getrieben. Pro Minute werden zwischen 1 und 100 ml Trägergas benötigt. Am Ausgang werden dann die einzelnen Gaskomponenten durch geeignete Detektoren (z. B. Infrarotspektroskop, Massenspektroskop, Wärmeleitfähigkeitsdetektor, Flammenionisationsdetektor) qualitativ und quantitativ bestimmt. Geeignete Trägergase für die Gaschromatographie müssen hochrein, sauerstofffrei (< 0,01 ppm O<sub>2</sub>), trocken, kohlenwasserstofffrei und von der Fließgeschwindigkeit und vom Druck her genau dosierbar sein. Zum Einsatz kommen Wasserstoff, Helium (größ-

te Empfindlichkeit im Wärmeleitfähigkeitsdetektor) oder Stickstoff, untergeordnet aber auch Argon, Argon + 5 % Methan sowie Kohlendioxid. Da die Qualitätsanforderungen in der Gasanalyse ständig wachsen, steigt der Bedarf an hochreinem Helium in diesem Verwendungsbereich kontinuierlich.

### Schutzgasschweißen

Das Schutzgasschweißen bildet eine Gruppe von Schweißverfahren, die wiederum zur Gruppe des Lichtbogenschweißens zählen. Wie bei allen Lichtbogenschweißverfahren dient als Wärmequelle zum Schmelzen ein sehr heißer elektrischer Lichtbogen, der zwischen dem leitfähigen Werkstück und einer Elektrode brennt. Kennzeichnend für das Schutzgasschweißen ist die Verwendung von Schutzgasen.



**Abb. 9:** *Wolfram-Inertgas-Schweißen in einer Schutzgasatmosphäre aus Argon oder Helium eignet sich zum Schweißen von allen Metallen und Legierungen, bei denen Qualität wichtiger ist als Schweißgeschwindigkeit, Foto: US Navy/Wikipedia.*

Helium besitzt das höchste Ionisierungspotenzial aller Schutzgase, kann also nur sehr schwer ionisiert werden. Das inerte Verhalten des Heliums erlaubt es, in einer Schutzgasatmosphäre aus Helium, Titan, Kupfer, Zirkonium, Hafnium, Tantal, Magnesium oder Aluminium für Einsätze im Flugzeugbau, in der Raumfahrt oder im Schiffsbau im Lichtbogen zu schweißen. Sehr häufig wird jedoch statt Helium Argon als Schutzgas genutzt, da es kostengünstiger ist und ebenfalls sehr gute Schutzeigenschaften besitzt. Helium und Argon schützen dabei das flüssige Metall vor dem Einfluss der Bestandteile der Luft (Stickstoff und Sauerstoff) und stabilisieren den Lichtbogen.

Zu den Schutzgasschweißverfahren zählen a) das Metallschutzgasschweißen (MSG-Schweißen) mit seinen beiden Varianten des Metall-Inertgasschweißens (MIG-Schweißen) mit inerten Gasen (Ar, He), also solchen, die keine Reaktion mit der Schmelze eingehen, und das Metall-Aktivgasschweißen (MAG-Schweißen) mit reaktionsfreudigen Gasen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ), die gewünschte, chemische Reaktionen bewirken sowie b) das Wolfram-Schutzgasschweißen (WSG-Schweißen) mit seinen Varianten Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG-Schweißen) und Wolfram-Plasmaschweißen (WP-Schweißen).

Beim WIG-Schweißen wird der Lichtbogen an einer Wolframelektrode erzeugt, die nicht abschmilzt. Das Wolfram-Inertgas-Schweißen ist sehr flexibel, es lassen sich nahezu alle Metalle damit schweißen. Aus Kostengründen wird zum Schweißen meist Argon eingesetzt, seltener reines Helium, häufig jedoch auch ein Gemisch aus beiden Gasen, wobei der Helium-Anteil zwischen 30 und 70 % variiert. Dabei wird das verhältnismäßig teure Helium aufgrund seiner besseren Wärmeleitfähigkeit verwendet, d. h. um die direkte Wärmeeinbringung in das Schmelzbad zu erhöhen.

Beim Wolfram-Plasmaschweißen, einer Weiterentwicklung des WIG-Schweißens, wird der Lichtbogen durch eine wassergekühlte Düse eingeschnürt und somit die Energie des Lichtbogens auf einen kleinen Spot fokussiert, ähnlich wie beim Laser- oder Elektronenstrahlschweißen. Da das Plasmagas nicht zum Schutz der Schmelze dient, muss ein zusätzliches Schutzgas (Sekundärgas), meist ebenfalls Argon, sehr selten Helium, aus einer zweiten Düse zugeführt werden. Mit Hilfe

des mechanisch eingeschnürten, elektrischen Lichtbogens können beim sogenannten Plasmaschneiden nahezu alle elektrisch leitfähigen Werkstücke bis zu Dicken von 120 mm geschnitten werden.

In den USA werden ca. 7 % des jährlich verwendeten Heliums zum Schweißen eingesetzt.

### **Plasmaspritzen, Plasma-Pulver-Auftrags-schweißen**

Das Plasmaspritzen ist ein Metallbeschichtungsverfahren von zunehmender Bedeutung und gehört zu den sogenannten thermischen Spritzverfahren. In einem Plasmabrenner wird ein elektrischer Lichtbogen zwischen einer zentrisch angeordneten, wassergekühlten Wolframkathode und einer ebenfalls wassergekühlten düsenförmigen Kupferanode durch Hochfrequenz gezündet. In den Lichtbogen werden dann Gase wie Argon, Helium, Stickstoff oder Wasserstoff oder Mischungen dieser Gase unter hohem Druck eingeleitet. Die zugeführten Gase werden im Lichtbogen zum Plasma ionisiert und erreichen dabei Temperaturen bis 20.000 Kelvin. Diese heiße Plasmaströmung verlässt mit hoher Geschwindigkeit (etwa 1.000 m/s) als hell leuchtender Plasmastrahl die Brennerdüse. Das Spritzpulver (z. B. Cr-, Mo- oder Keramikpulver) wird mit Hilfe eines Fördergases innerhalb oder außerhalb des Brenners dosiert dem Plasmagasstrom zugeführt. Im Plasmastrahl wird das Spritzpulver auf hohe Geschwindigkeit beschleunigt (kinetische Energie bis 450 m/s), dort aufgeschmolzen und in einer Schutzgasatmosphäre (meist Argon) auf die Werkstückoberfläche geschleudert (Auftragsleistung 4 – 8 kg/h). Beim Auftreten auf die vorbehandelte Oberfläche bilden sich die flüssig oder teigig gewordenen Pulverteilchen zu flachen Lamellen aus und erstarren sofort. Der energiereiche Plasmastrahl und die hohe Aufprallgeschwindigkeit der Pulverpartikel auf die Werkstückoberfläche ergeben dichte, festhaftende und qualitativ hochwertige Spritzschichten, die lamellenartig aufgebaut sind. Plasmaspritzen ist weit verbreitet in der Luft- und Raumfahrt (Aufbringung von Wärmedämmschichten auf Turbinenschaufeln oder Einlaufflächen), in der Medizintechnik (Implantate) sowie in der Chemie-, Druck-, Papier-, Maschinenbau-, Windenergie- und Hausgeräteindustrie (DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GMBH o. J.).

Beim Plasmaauftragsschweißen mit Pulver (PTA) wird die Werkstückoberfläche angeschmolzen. Der Lichtbogen bildet sich hier zwischen einer Dauerelektrode und dem Werkstück. Das Auftragspulver (meist Legierungen auf Ni-, Co- oder Fe-Basis, aber auch Carbide) wird mittels eines Trägergases zum Brenner gebracht, im Strahl aus Plasma gas (z. B. aus Argon, Helium oder einem Argon-Helium-Gemisch) erhitzt und auf die Werkstückoberfläche aufgetragen (kinetische Energie bis 50 m/s). Hier schmilzt es vollständig in einer Schutzgasatmosphäre (z. B. Argon oder Argon-Wasserstoff-Gemisch) im Schmelzbad auf dem Substrat. Das PTA-Verfahren wird zur Beschichtung einer Vielzahl von Grundwerkstoffen verwendet, die z. B. aus niedriglegiertem Stahl, Edelstahl, Gusseisen, Bronze oder Nickelbasis-Superlegierungen hergestellt sind. Auf diese Weise beschichtet werden Werkstücke für den Maschinenbau, die Landwirtschaft (Häckselmesser, Gegenschneiden) sowie die Bergbau (Schrämmmeißel, Baggerzähne) und Automobilindustrie (Ventile).

### **Spülung und Druckaufbau**

Da die Siedetemperatur von Helium ( $-268,93\text{ °C}$ ) noch unterhalb der von Wasserstoff ( $-252,87\text{ °C}$ ) liegt, wird Helium zum Durchspülen und Vorkühlen von Behältern und Leitungen benutzt, die hinterher mit flüssigem Wasserstoff gefüllt werden sollen. Durch dieses Durchspülen werden alle Gase, wie Stickstoff oder Argon, entfernt, die sonst in Kontakt mit flüssigem Wasserstoff sofort gefrieren und dabei Leitungen und Ventile verstopfen würden. Durch seine geringe Löslichkeit in Treibstoffen, seinen niedrigen Siedepunkt und seine chemische Nichtreaktivität ist Helium zudem das einzige Gas, das auch zum Druckaufbau von Spezialtreibstoffen sowie bei der Betankung bzw. in der Startvorbereitung von Interkontinental- und Weltraumraketen zum Einsatz kommt. Technische Einzelheiten sind bei CAI et al. (2012) zu finden. Für jeden Start einer Saturn-V-Trägerrakete wurden auf diese Weise rund 370.000 m<sup>3</sup> Helium und für jeden Start eines Space Shuttles 210.000 m<sup>3</sup> Helium verbraucht. In den USA werden gegenwärtig rund 7 % des Heliums zum Durchspülen und zum Druckaufbau verwendet. Staatlicher Hauptabnehmer ist dabei vor allem die NASA, die nach BAKER (2018) derzeit jährlich 2 – 2,4 Mio. m<sup>3</sup> Helium (entsprechend 4 – 5 % des US-Heliumbedarfs) verbraucht. Der Verbrauch durch das

US-Militär ist dagegen sehr gering (GUBLER et al. 2016).

### Lecksuche

Helium hat den kleinsten Atomdurchmesser aller Elemente und diffundiert daher sehr leicht selbst durch kleinste Öffnungen. Es ist zudem durch spezielle Gasmeßgeräte („Sniffer“) relativ leicht nachweisbar und wird deshalb zur Feststellung unterirdischer Gasbewegungen, zu Durchlässigkeitsprüfungen von Pumpen, Dichtungen, Leitungen, Getriebegehäusen, Kompressoren, Herzschrittmachern u. v. a. m. sowie zur Sicherheitsüberprüfung von Kernreaktoren benutzt. In den USA werden ca. 4 % des Heliums für Dichtigkeitsprüfungen eingesetzt. In zahlreichen Herstellungsbereichen der Industrie sind hochreine Vakuumbedingungen notwendig, die genauestens überwacht werden müssen. So wird beispielsweise nach der Wartung einer Halbleiterproduktionsanlage – einer sogenannten „Fab“ – eine Dichtheitsprüfung durch Druckanstiegs-Messung durchgeführt. Alternativ kann eine Vakuum-Messung erfolgen. Erst wenn die Dichtheit der Anlage auch durch diese integralen Tests nachgewiesen ist, erfolgt die Freigabe des Prozesses. Ist der Druckanstieg größer bzw. das Vakuum kleiner als ein definierter Schwellenwert, wird die Anlage gesperrt. Dann wird mit der Lecksuche mittels Helium begonnen, um das Leck lokalisieren und reparieren zu können. Technische Details der Vakuumtechnik und der Leckortung mittels Helium sind UMRATH (2016) zu entnehmen.

### Technisches Tauchen

Helium besitzt die geringste Löslichkeit aller Gase in Wasser (und damit auch Blut), wodurch es sich beim technischen Tieftauchen in Form von He-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-Gemischen („Trimix“) statt reinen N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Gemischen durchgesetzt hat. Trimix-Gemische werden nach den Anteilen von Sauerstoff und Helium benannt. So enthält ein Gemisch mit der Bezeichnung Tx21/35 beispielsweise 21 % O<sub>2</sub> sowie 35 % He. Der Rest von 44 % ist N<sub>2</sub>. Alternativ kann zum Tieftauchen auch ein reines He-O<sub>2</sub>-Gemisch („Heliox“) eingesetzt werden. In den USA werden ca. 2 % des Heliums für Tauchluftmischungen eingesetzt. Der Vorteil der Verwendung von Helium liegt darin, dass das Narkosepotenzial dieses Edelgases durch seine geringe Löslichkeit unabhängig vom Umgebungs-

druck praktisch immer gleich Null ist. Dies bedeutet, dass keine Stickstoffnarkose (Tiefenrausch) auftritt, die beim Tauchen mit Druckluft ein Problem wird, wenn der Umgebungsdruck (ab ca. 40 m Tauchtiefe) einen bestimmten Wert überschreitet. Erst bei einem Umgebungsdruck von > 15 bar (ab ca. 130 m Tauchtiefe) tritt bei einem hohen Heliumanteil im Atemgas und großen Abstiegsgeschwindigkeiten das sog. „HPNS“ (*high pressure nervous syndrome*) auf, das sog. „Heliumzittern“. Um dies zu vermeiden, fügt man dem Atemgas wieder einen bestimmten Stickstoffanteil hinzu, dessen Narkosepotenzial das HPNS unterdrücken kann. Nachteile der Verwendung von Helium liegen darin, dass es ein sehr guter Wärmeleiter ist und der Taucher dadurch schneller auskühlt. Zudem verändert Helium die Schallschwingung der Stimme des Tauchers, dem aber durch Einsatz spezieller Mikrofone entgegen gewirkt werden kann.

### Hochtemperaturkernreaktoren

In gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren wird gasförmiges Helium als bevorzugtes Kühlmittel verwendet, da es chemisch nichtreaktiv ist, nicht radioaktiv wird und eine relativ hohe thermische Leitfähigkeit besitzt. Zugleich wird das Hauptisotop <sup>4</sup>He durch Neutronenbestrahlung nicht aktiviert. Allerdings entsteht aus dem kleinen <sup>3</sup>He-Anteil von 0,00138 % im atmosphärischen Helium <sup>3</sup>H (Tritium), das wiederum ein radioaktiver Betastrahler mit einer Halbwertszeit von 12,32 Jahren ist. Ein weiterer Nachteil des Einsatzes von reinem Helium ist, dass dieses die Oxid-Schutzschichten auf Metallen zerstört. Geringe Zusätze an Korrosionsmitteln im Helium, wie Wasserdampf, können dies zwar beheben, aber nur auf Kosten einer ständigen Korrosion der Graphitkomponenten im Reaktor durch den Wasserdampf. Helium diffundiert als einatomiges Gas sehr leicht durch feste Materialien, so dass eine Dichtigkeit gegen Helium schwer erreichbar ist. Ein Versuchsreaktor in Jülich verlor 1 % seines Kühlmittels pro Tag, für neuere Reaktoren rechnet man mit 0,3 % pro Tag. Ein weiterer Nachteil von Helium liegt darin, dass seine Viskosität mit steigender Temperatur zunimmt. Das kann dazu führen, dass heiße Bereiche weniger durchströmt und damit schlechter gekühlt werden. Soweit bekannt, gibt es derzeit nur in China einen Hochtemperaturreaktor auf Heliumbasis und auch nur dort noch entsprechende Forschungsprojekte.

### Herstellung von optischen Glasfasern

Helium wird in zwei Prozessschritten bei der Produktion von optischen Glasfasern für die Telekommunikation eingesetzt. In einem der Schritte wird Sauerstoff mit einer Glasgrundsubstanz wie Siliziumtetrachlorid oder Silanen in einer Erdgasflamme erhitzt, wobei sich sog. „Glasruß“ bildet. Dieser „Glasruß“ wird in einer He-Cl<sub>2</sub>-Atmosphäre auf einem Siliziumstab aufgesintert. Das Chlor bindet die Feuchtigkeit, während das Helium die Gasblasen austreibt. Der aufgesinterte Siliziumstab wird dann in einer Ziehmaschine erhitzt und zu einer Glasfaser ausgezogen. Die Glasfaser wird in einem Hochgeschwindigkeitsgasstrom eines He-N<sub>2</sub>-Gemisches abgeschreckt, das hervorragende Wärmeleitfähigkeiten besitzt. In den USA werden ca. 8 %, in China jedoch über 30 % des Heliums in der Produktion von optischen Glasfasern eingesetzt.

### Bildschirmproduktion

Obwohl der Elektronikmarkt für Bildschirme und Smartphones nicht mehr wie vor einigen Jahren im zweistelligen Bereich wächst, ist er noch sehr aktiv, da die Endverbraucher, vorrangig in China, nach immer neuen Produkten, wie größeren LCD-Flachbildschirmen, OLED und 4K-Technologien, ultraflachen Bildschirmen, runden und tragbaren Geräten, Bildschirmen in Fahrzeugen u. v. a. m. verlangen. Die Hersteller dieser Geräte, die vorrangig in Südkorea, Taiwan, China und Japan ansässig sind, setzen wegen seiner großen Wärmeleitfähigkeit derzeit (noch) alle Helium zum Abkühlen des Glases während und nach der Herstellungsphase ein.

### Gaslaser

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) strahlen einfarbiges Licht aus, das im Gleichtakt schwingt und stark gerichtet ist, so dass ein energiereicher, konzentrierter Strahl entsteht. Um Laserlicht zu erzeugen, muss man Atome eines geeigneten Mediums (LasermEDIUM) mit Energie anregen („Pumpen“). Die angeregten Atome geben die Energie in Form von Photonen mit genau definierter Energie ab. Dabei können diese Lichtteilchen weitere Atome zur Energieabgabe stimulieren. Zwei Spiegel an beiden Enden des Lasers verstärken den Effekt. Das Ergebnis ist ein überaus energiereicher, präziser Lichtstrahl,

der je nach Modifikation zum Schneiden, Bohren, Gravieren, Schweißen, Löten, Reinigen oder Härten genutzt werden kann. Die Anwendungsmöglichkeiten sind entsprechend vielseitig und reichen von der Mikroelektronik bis zum Schiffbau. Die größte Auswahl an Lasern zum Schneiden und Schweißen setzt die Automobilindustrie ein. Bei den meisten Lasertypen werden Schutzgase verwendet, um eine Oxidation der bearbeiteten Oberfläche zu verhindern. Gaslaser, im Gegensatz zu Feststoff- und Farbstofflasern, nutzen in großem Umfang Edelgase als Lasermedium:

- **Helium-Neon-Laser** arbeiten mit einem unter hohem Druck befindlichen Helium-Neon-Gasgemisch (He:Ne-Verhältnis 5:1 – 20:1), wobei das Helium für das Pumpen benötigt wird, während das Neon das Lasermedium ist. Der emittierte Lichtstrahl ist rot. Der He-Ne-Laser wurde bereits 1960 entwickelt und mittlerweile in den meisten Anwendungen durch leistungsfähigere Diodenlaser verdrängt.
- **Argon-Ionen-Laser** haben einen hohen Leistungsbedarf. Sie werden neben dem Einsatz in Forschung und Entwicklung auch in der Unterhaltung (z. B. bei Lasershows), in Hochgeschwindigkeitsdruckmaschinen, Fotoplottern oder der Holografie sowie in der Medizin (Dermatologie, Augenheilkunde und Zahntechnik) verwendet. In der jüngeren Zeit wurden in den meisten Einsatzgebieten Argon-Ionen-Laser jedoch durch Festkörperlaser ersetzt.
- **Helium-Cadmium-Laser** bestehen aus einer mit Helium und Cadmium-Metaldampf gefüllten, vakuumdicht verschweißten Röhre. Der emittierte Lichtstrahl ist rot. Anwendungen liegen in der Grundlagenforschung, den Materialwissenschaften sowie in der Medizintechnik.
- **Kohlendioxidlaser** nutzen als Lasermedium eine Mischung aus CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> und He. Helium dient dabei zur Stabilisierung und Wärmeableitung. Für das „Resonatorgas“ sind Mindestreinheiten von 99,995 % CO<sub>2</sub>, 99,996 % He und 99,999 % N<sub>2</sub> gefordert, weil geringere Reinheiten die Optiken im Laser, den sogenannten Resonator, verunreinigen würden. Kohlendioxidlaser eignen sich besonders zum Schneiden, Gravieren und Perforieren von dünnen, organischen (Kunststoffe, Textilien, Holz) bis dickeren, anorganischen Materialien (Blech, Keramik, Glas). Der emittierte Lichtstrahl liegt im Infrarotbereich.

- **Excimerlaser** beruhen auf der chemischen Anregung von Edelgasen (Argon, Krypton, Xenon) und Halogeniden (Fluor, Chlor, Brom) in einem Puffergas (Helium, Neon) unter kurzfristiger Bildung metastabiler Edelgashalogenide. Die gespeicherte Energie wird in Form einer elektromagnetischen Strahlung abgegeben, wodurch ein ultravioletter Laserstrahl entsteht. Das Mischungsverhältnis der Gase bestimmt die Wellenlänge. Die am häufigsten eingesetzten Gasmischungen mit ihren Wellenlängen sind Ar+F+Ne (193 nm) sowie Kr+F+Ne (248 nm), wobei Neon als Puffergas ca. 96 – 97,5 Vol.-% des Gasanteils ausmacht (KHAN 2017). Die sehr kurze Wellenlänge ermöglicht die Herstellung von Strukturen im nm-Breitenbereich und bildet damit die Grundlage für die Fertigung aller modernen mikroelektronischen Bauelemente. Excimerlaser

werden aber auch für die direkte Bearbeitung von praktisch allen Materialien (Keramik, Metall, Kunststoff u. a.) zur Herstellung von Strukturen im Sub-Mikrometerbereich eingesetzt. Excimerlaser sind zudem unverzichtbar beim Schneiden menschlichen Gewebes (Dermatologie, Augenheilkunde, Plastische Chirurgie). Der Gasbedarf eines industriellen KrF-Excimerlasers liegt zwischen 10.000 l/a und 50.000 l/a, während ArF-Excimerlaser 60.000 – 200.000 l/a benötigen.

### Großforschungseinrichtungen

Durch seine Suprafluidität bei Temperaturen kleiner  $-270,98\text{ °C}$  eignet sich flüssiges Helium als Kühlmittel in Teilchenbeschleunigern, wie dem Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg (Bedarf nach ILLICHMANN 2018: 11 t/a), dem



**Abb. 10:** Blick in einen Teilabschnitt des Tunnels des Großen Hadronen-Speicherrings LHC, für dessen Funktion eine ständige Tiefkühlung der Magnete mittels flüssigem Helium notwendig ist, Foto: Maximilien Brice, CERN.

supraleitenden Elektronenlinearbeschleuniger S-DALINAC in Darmstadt, dem Elektronenbeschleuniger ELBE in Dresden-Rossendorf (Bedarf nach ILLICHMANN 2018: 12,5 t/a) oder am bekanntesten dem Großen Hadronen-Speicherring LHC am Europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf. Der LHC wurde 2008 montiert und ist das größte Tieftemperaturkühlgerät (Kryostat), das bisher jemals gebaut wurde. Im LHC werden die 9.000 Großmagnete (Gesamtmasse 36.000 t), die magnetische Flussdichten bis 8,6 Tesla erzeugen, in zwei Schritten auf ihre Betriebstemperatur von 1,9 K (−271,25 °C) heruntergekühlt. Im ersten Schritt werden sie hierfür mit 10.080 t flüssigem Stickstoff auf 80 K (−193,2 °C) vorgekühlt, im zweiten Schritt mittels 100 t flüssigen Heliums auf ihre Endtemperatur gebracht. Um die Magnete dann auf ihrer Betriebstemperatur zu halten, sind sie ständig von etwa 60 t flüssigem Helium im suprafluiden Zustand umgeben. In diesem Zustand hat Helium eine besonders gute Wärmeleitfähigkeit. Insgesamt werden am LHC 140 t Helium für Kühlzwecke bevorratet. Regelmäßig kommen Spezialfahrzeuge an, um die Heliumverluste auszugleichen. Diese liegen bei rund 60 t jährlich.

Auch in anderen physikalischen Forschungseinrichtungen und physikalischen Instituten von Universitäten weltweit werden unterschiedlich große, in ihrer Gesamtmenge jedoch vermutlich durchaus beachtliche Mengen an Helium benötigt (vgl. Kap. 8.3). Schätzungen gehen davon aus, dass 6 % des weltweit verwendeten Heliums von Forschungseinrichtungen benötigt werden. Allein die 17 Labore des US Department of Energy (DOE) verbrauchen zusammen rund 2,4 Mio. l bzw. 300 t flüssiges Helium jährlich (GUBLER et al. 2016). Für die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig gibt ILLICHMANN (2018) einen Bedarf von jährlich 38.800 l, für das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung in Dresden von 80.000 l/a, für das Helmholtz-Zentrum in Berlin von 6.000 l/a, für das DFG-Forschungszentrum in Karlsruhe von 170.000 l/a und für das Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart von 251.500 l/a an. Das Helium dient dabei der Grundlagenforschung im Kelvin- bis Millikelvinbereich zur Untersuchung von Josephson-Effekten, Streuung von Elementarteilchen, Quantenflüssigkeiten inkl. Entwicklung von Quantencomputern, der Erforschung von intelligenten

Werkstoffen sowie der Optimierung magnetischer Legierungen.

### Sonstiges

Zur Behandlung von Asthma, Atemnotstress von Frühgeborenen und bei Bronchienerkrankungen wird von Ärzten eine **Heliox-Therapie** empfohlen. Heliox ist ein Gasgemisch aus meist 20 % O<sub>2</sub> und 80 % He. Während der Sauerstoff vom menschlichen Körper benötigt wird, hat Helium aufgrund seiner geringen Atomgröße einen deutlich geringeren Strömungswiderstand als die anderen Luftbestandteile und erleichtert dadurch das Atmen (BERGANZA & ZHANG 2013).

In der **Magnetoenzephalographie** (MEG) werden die sehr schwachen Magnetfelder (10<sup>−15</sup> Tesla) des Gehirns durch einen außen am Kopf angebrachten helmartigen Körper mit Sensoren gemessen. Die Magnetspulen in den Sensoren werden mit flüssigem Helium auf eine Temperatur nahe 0 K gekühlt und können so ihre supraleitenden Eigenschaften entwickeln. Für die notwendige Tiefkühlung der supraleitenden Spulen werden monatlich rund 400 l flüssiges Helium benötigt.

In der Medizin wurde zur **Entfernung von Krebstumoren** und nekrotischem Gewebe ein Verfahren entwickelt, wobei mit flüssigem Argon oder Helium das organische Gewebe vereist und danach relativ schmerzfrei entfernt werden kann.

In den USA wurde früher Helium, da überreichlich vorhanden, zur Befüllung von **Auto- und Flugzeugreifen** verwendet. Heute nutzen es Formel-1-Techniker bei Boxenstopps, um mit heliumgetriebenen **Schlagschraubern** in Sekunden schnelle Reifen zu wechseln.

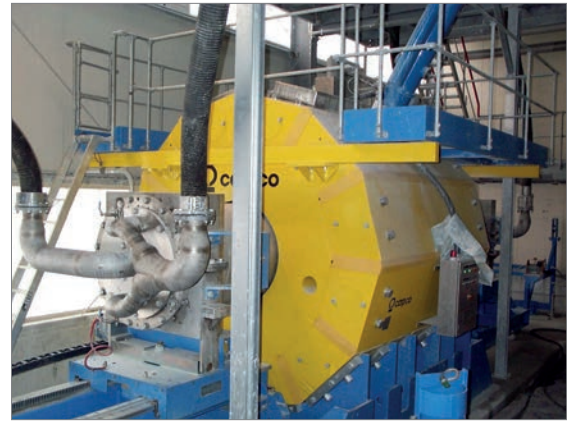
In Gasspeichern von **Seiten- und Kopfairbags** ist ein Gas, meist Helium oder eine Helium-Argon-Mischung, unter Hochdruck (600 bar) gespeichert. Beim Auslösen des Airbags zerstört ein Sprengsatz eine Membran, das Gas strömt in den Luftsack und dehnt diesen in Millisekunden aus. Da es nur bei der Auslösung von mit Edelgasen gefüllten Gasspeichern nicht zur Hitzeentwicklung und damit möglichen Verbrennungen kommt, haben diese einen Marktanteil von rund 80 % am weltweiten Airbagmarkt. GUBLER et al. (2016) schätzen den weltweiten Heliumbedarf zur Befüllung von Airbags auf 2 – 3 Mio. m<sup>3</sup> jährlich. Zudem

werden alle Gasgeneratoren von Airbags vor ihrem Einbau mit Helium-Lecksuchgeräten auf ihre Dichtheit geprüft, unabhängig davon, ob sie pyrotechnisch (mit Festtreibstoff) oder mit komprimiertem Edelgas funktionieren.

Im Jahr 1986 wurde in den USA erstmals ein **Starkfeldmagnetscheider** auf der Basis supraleitender Magnete auf den Markt gebracht. Er konnte eine magnetische Flussdichte von 2 Tesla erzeugen und wurde zur Enteisung von Kaolin in Georgia eingesetzt. Zu seiner Funktion war eine Kühlung mittels flüssigem Helium notwendig, das über einen 1.000 l fassenden Tank in einem geschlossenen Kreislauf gefahren wurde. Letztendlich stellte sich dieser erste Starkfeldmagnetscheider aufgrund des relativ häufigen An- und Ausschaltens als nicht wirtschaftlich heraus, da bei jedem Schalten 2 l Helium verbraucht wurden. Mittlerweile wurden verbesserte Geräte mit noch höheren Flussdichten entwickelt, die weltweit in Kaolinaufbereitungsanlagen im Einsatz sind (WATSON 1994).

Die Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co. KG (AKW) in Hirschau/Oberpfalz verwenden seit 1993 einen derartigen Starkfeldmagnetscheider, der mit flüssigem Helium gekühlt wird. Im Jahr 2000 wurde ein zweiter Magnetscheider dieser Art in Betrieb genommen (Abb. 11). Mit den beiden Anlagen wird durch Abtrennung magnetisierbarer, meist eisenreicher Minerale der Weißgrad im Kaolin erhöht. Dies ist ein sehr wichtiger Parameter für die Anwendung in der Papierindustrie. Bei den beiden Starkfeldmagnetscheidern können Feldstärken bis 5 Tesla eingestellt und dadurch eine Steigerung des Weißgrades um 2 – 4 Prozentpunkte erreicht werden. Damit wird zugleich auch die Ausnutzung der endlichen Lagerstätten erhöht, da der „cut-off“ in Bezug auf den Weißgrad abgesenkt werden kann. Durch mechanisches Kühlen der Abschirmung kann der Verlust des Heliums in Grenzen gehalten werden, so dass bei der AKW nur ca. einmal pro Jahr das Helium aufgefüllt werden muss, d. h. der Verbrauch an flüssigem Helium liegt bei ca. 2.000 l/a (Dr. Stefan Huber/AKW, pers. Mitteilung).

**Supraleitende Energiespeicher** werden benötigt, wenn über sehr kurze Zeiträume sehr hohe Stromstärken in ein Netz eingespeist werden müssen. Dies ist beim Betrieb von Teilchenbeschleunigern und bei Spannungsschwankungen



**Abb. 11: Mit flüssigem Helium tiefgekühlter Starkfeldmagnetscheider zur Abtrennung von eisenhaltigen Mineralen aus Kaolin, Foto: Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co. KG (mit frdl. Genehmigung).**

in öffentlichen Stromnetzen der Fall, wo gespeicherte Energie in Form von Stromimpulsen mit Frequenzen von 0,1 – 1 Hertz abgerufen wird. Bisher konnten hierfür nur supraleitende Energiespeicher mit flüssiger Heliumkühlung genutzt werden (GLOWACKI 2012).

**Infrarot-Sensoren** in Satelliten, sog. astronomische Teleskope, dienen der Beobachtung des Wetters, der Luftverschmutzung, der Meerestemperaturen, des Pflanzenwachstums oder der Eisverhältnisse auf der Erde und müssen hierfür auf Temperaturen von rund 80 K (–193 °C) abgekühlt werden, um die benötigte Empfindlichkeit zu erreichen. Auch spezielle Infrarotsichtgeräte auf der Erde, die auf sehr große Distanzen Messungen durchführen sollen, müssen stark abgekühlt werden. Noch tiefer, bis knapp über den absoluten Nullpunkt, müssen astronomische Teleskope abgekühlt werden, die zur Messung von infraroten Wellenlängen aus fernen Galaxien dienen. Hierzu führen die Satelliten bei ihrem Start doppelwandige, dadurch noch besser isolierte Behälter mit sich, die je nach Größe mit bis zu 2.300 l flüssigem Helium gefüllt sind. Die Sensoren auf den Satelliten funktionieren dann nur solange, bis auch der letzte Heliumtropfen verdampft und entwichen ist.

Im technischen **Kroll-Verfahren** zur Herstellung von Titan- bzw. Zirkoniummetall dienen Titan-tetrachlorid (aus dem Herstellungsprozess von Titandioxid für die Weißpigmentherstellung) bzw. Zirkoniumtetrachlorid (aus Zirkon) als Aus-



gangsmaterial. Diese beiden Metallchloride werden mit Magnesium bei Temperaturen von ca. 800 – 900 °C unter einer Schutzgasatmosphäre aus Helium oder Argon zu Titan- bzw. Zirkoniummetall reduziert.

Bei der Verpackung von Lebensmitteln dient Helium in Form des **Lebensmittelzusatzstoffes** E 939 als Packgas. Es verdrängt den Sauerstoff und verlangsamt somit Farb- und Aromaabbau sowie den Lebensmittelverderb.

**Überschall-Windkanäle** dienen der Eignungsprüfung von Flugzeugteilen bzw. Flugzeugen in Originalgröße unter kontrollierten und reproduzierbaren Laborbedingungen. Hierbei werden Machzahlen von 1,2 – 5 (1.400 – 6.000 km/h) simuliert. Treib- und Arbeitsgas können Luft oder Stickstoff sein. Vielfach werden als Treibgas aber auch leichtere Gase wie Wasserstoff oder Helium benutzt, da diese eine höhere Schallgeschwindigkeit besitzen und mit ihnen höhere Stoßmachzahlen, d. h. Druckwellen im Machbereich, zu erreichen sind.

Alle **Analysegeräte**, z. B. zur Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) sollten regelmäßig geeicht bzw. kalibriert werden. Um hier keine Messfehler zu erhalten, finden die Messungen in einem Vakuum oder auch in einer Heliumatmosphäre statt. Zudem dient Helium in vielen Analysen als inertes Trägergas.

Um die Kapazität von **Festplattenlaufwerken** zu erhöhen, werden diese seit einigen Jahren mit Helium gefüllt. Helium besitzt ein Siebtel der Dichte von Luft und erlaubt damit eine größere Stapeldichte der Festplatten durch geringere Reibung und Vibration. Zugleich leitet Helium die entstehende Wärme besser ab und der Computer benötigt daher weniger Energie zum Abkühlen.

Die Central Japan Railway Company kündigte an, bis zum Jahr 2027 zwischen den Großstädten Tokio und Nagoya eine neue Eisenbahnlinie für den Hochgeschwindigkeitszug Shinkansen in Betrieb nehmen zu wollen. Diese Linie soll erstmals als **Magnetschwebbahn** erbaut und die Magnete mit flüssigem Helium supraleitend gemacht werden.

Die **Kernresonanzspektroskopie** ist ein hochauflösendes Analyseverfahren zum zerstörungs-

freien Nachweis von Inhaltsstoffen einer Probe, zur Bestimmung von Strukturen auf Molekularebene sowie zur Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Molekülen. Zur Messung wird die Probe in ein magnetisches Feld gebracht, das üblicherweise mit Hilfe von supraleitenden Elektromagneten erzeugt wird, die mit flüssigem Helium und Stickstoff gekühlt werden. Der Verbrauch an Helium liegt im Betrieb bei weniger als 1 l/d (GUBLER et al. 2016).

Ein **Helium-Ionen-Mikroskop** ist ein bildgebendes Verfahren, das darauf basiert, dass ein Helium-Ionenstrahl ein zu untersuchendes Objekt abtastet. Das Verfahren ähnelt damit dem eines Rasterelektronenmikroskops, bietet jedoch eine höhere Auflösung im Zehntel-nm-Bereich. Von der Funktionsweise her werden in einer tiefgekühlten, unter Hochvakuum stehenden Apparatur in dem starken elektrischen Feld nahe einer spitzen Wolframnadel Helium-Ionen erzeugt. Der Helium-Ionen-Strahl wird gebündelt, gerichtet und auf das zu untersuchende Material gelenkt. Gemessen werden die Intensitäten des durch die Probe durchgehenden Strahls, des von der Probe reflektierten Strahls sowie die Zahl der erzeugten Sekundärelektronen.

Die Forschung zur **Kernfusion** konzentriert sich derzeit auf Reaktorkonzepte, die auf der Technik des magnetischen Einschlusses beruhen. Der Grundgedanke ist, eine kleine Menge von wenigen Gramm eines Deuterium-Tritium-Gasgemisches in ein luftleeres, mehrere tausend Kubikmeter großes Behältnis einzubringen und dort auf 100 – 150 Millionen Grad Celsius zu erhitzen. Alle Gasverunreinigungen im Hochvakuum ( $10^{-7}$  mbar) dieses Behälters müssten zuvor, ähnlich des Prinzips der Durchspülung (s. o.), durch große Kältepumpen auf flüssiger Heliumbasis entfernt werden. Bei den genannten hohen Temperaturen sind Elektronen und Atomkerne voneinander getrennt und bilden ein elektrisch leitendes Plasma. Um die Plasmakammer sind supraleitende Elektromagnete angeordnet, die ein Magnetfeld von bis zu 10 Tesla Stärke erzeugen. Durch dieses Magnetfeld wird das Plasma in der Kammer so eingeschlossen, dass es die Wände nicht berührt. Bei einem Kontakt mit der Wand würde das Plasma sofort auskühlen und die Reaktion würde zusammenbrechen. Die zum Aufbau des Magnetfeldes erforderlichen Elektromagnete müssten mit flüssigem Helium tiefgekühlt werden, um die benötigte Supraleitfähigkeit zu

erzeugen. Schätzungen des dabei zusätzlich nur durch Diffusionsprozesse zu ersetzenden Heliums reichen von 80 – 800 l wöchentlich. Als „best case“-Variante errechneten CLARKE & CAI (2012) für einen möglichen typischen Kernfusionsreaktor mit einem Gigawatt-Effektivleistung einen Bedarf von 620.000 m<sup>3</sup> (= 880.000 l flüssiges Helium) für die Erstbefüllung und den Betrieb im ersten Jahr sowie von 55.000 m<sup>3</sup> (= 79.000 l flüssiges Helium) in jedem Folgejahr.

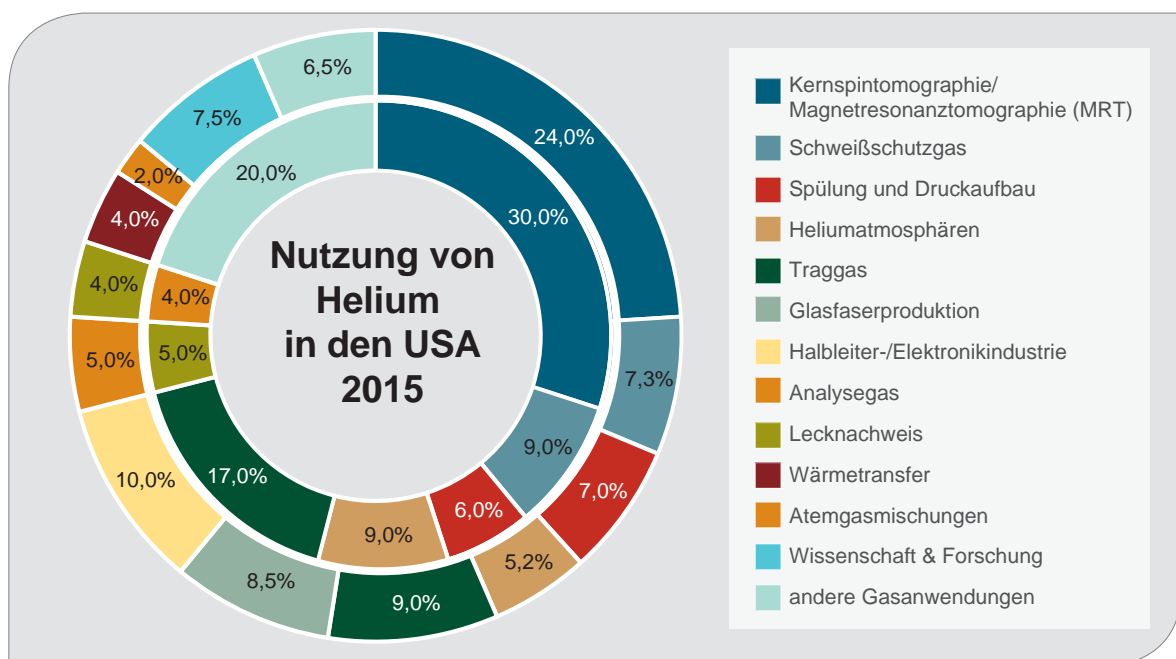
### <sup>3</sup>Helium

Im Gegensatz zu <sup>4</sup>He, von dem bisher die Rede war, kommt <sup>3</sup>He nur in wenigen Gebieten zur Anwendung, ist dort aber unverzichtbar. Dies ist zum einen die **Tiefemperaturforschung**, da mit <sup>3</sup>He Temperaturen im Millikelvin-Bereich, d. h. von wenigen tausendstel Kelvin über dem absoluten Nullpunkt von –273,15 °C erzeugt werden können. Zum anderen ist es der Betrieb von **Neutronendetektoren** zur Erfassung von Neutronen und Gammastrahlung. Aufgrund der nach den Terroranschlägen am 11. September 2001 in den USA stark gestiegenen Sicherheitskontrollen an Flughäfen und anderen öffentlichen Einrichtungen ist der weltweite Bedarf an <sup>3</sup>He explodiert, wobei das US Department of Homeland Security mittler-

weile auf Feststoffneutronendetektoren auf <sup>10</sup>B- und <sup>6</sup>Li-Basis umgestiegen ist (OSTERATH 2015). In der **Erdölexploration** dient <sup>3</sup>He in Neutronendetektoren zur Bestimmung von Gesteinsparametern bereits während des Bohrens. Seit einigen Jahren wird zudem der Einsatz von <sup>3</sup>He als **Kontrastmittel für Lungenuntersuchungen** in MRTs untersucht. Mit Hilfe von <sup>3</sup>He lassen sich die Größe der einzelnen Lufträume in den Lungen, die Verteilung der Atemluft während der Einatmung, der regionale Sauerstoffpartialdruck, die Effizienz der Sauerstoffaufnahme ins Blut und zahlreiche weitere Lungenparameter messen.

### Weltweite Verwendung von Helium

Die Verwendung von Helium (<sup>4</sup>He) nach verschiedenen Absatzbereichen in den USA wird seit Jahrzehnten alljährlich vom USGS publiziert. Nach Recherchen von GUBLER et al. (2016) handelt es sich dabei zumindest in jüngerer Zeit um Abfragen des US Bureau of Land Management bei den Heliumproduzenten im Vierjahresabstand, die den Absatz über Händler, die in den USA einen großen Marktanteil besitzen, außer Acht lassen. GUBLER et al. (2016) haben dementsprechend eine größere Vielzahl von Marktteilnehmern interviewt und kommen zu einer anderen Aufteilung der



**Abb. 12:** Verbrauch von Helium nach Verwendungsbereichen in den USA im Jahr 2015, innerer Kreis nach USGS, basierend auf Abfragen bei den Heliumproduzenten, äußerer Kreis nach GUBLER et al. (2016), basierend auf Interviews mit Industrie- und Regierungsangehörigen unter Einbeziehung von Gashändlern.

Absatzmärkte (vgl. Abb. 12). GUBLER et al. (2016) geben auch einen Überblick über die Verteilung der Absatzmärkte von Helium in Westeuropa, Chi-

na, Japan, dem restlichen Asien sowie der Welt, die in Abb. 13 gegenübergestellt sind.

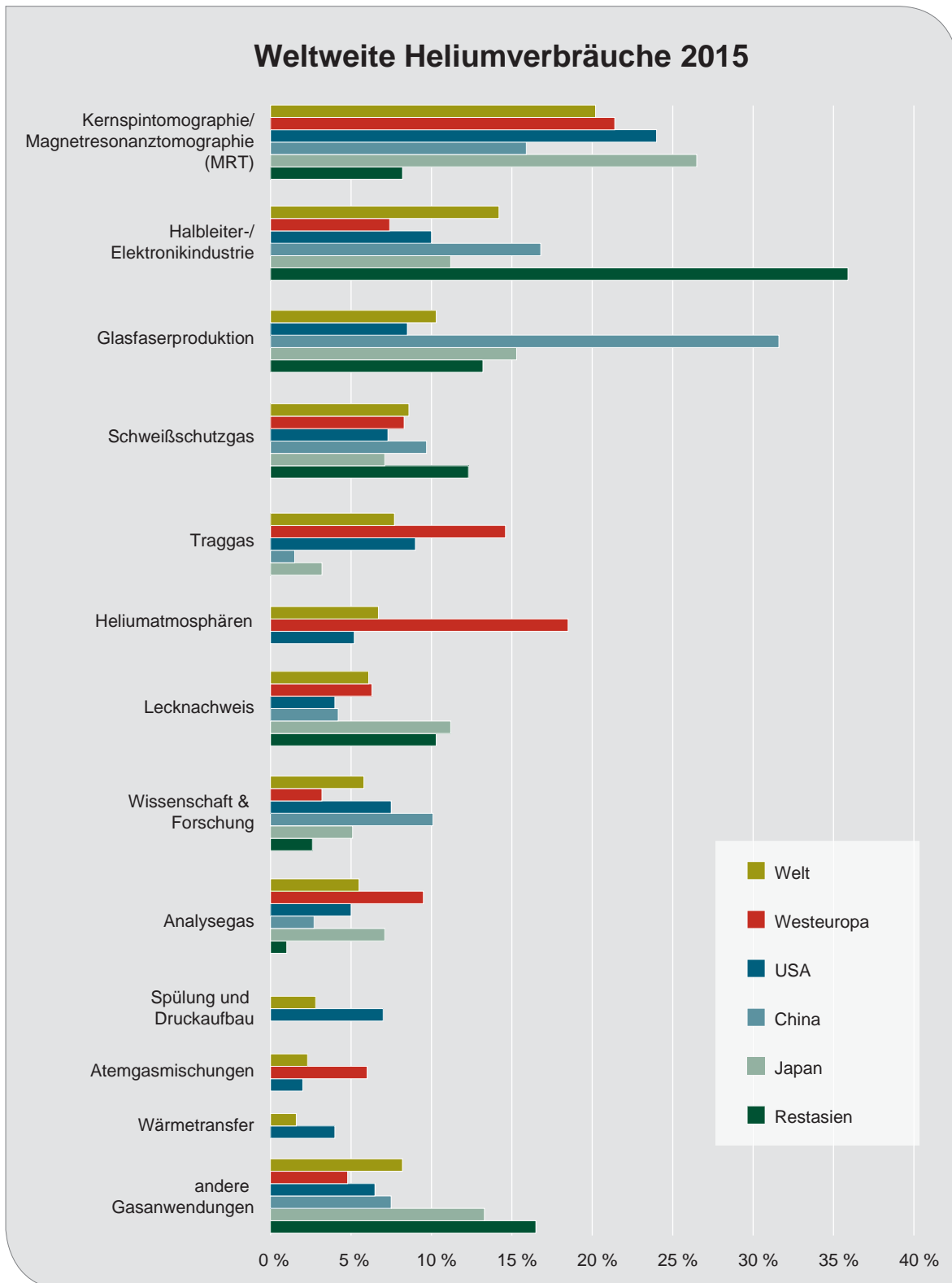


Abb. 13: Vergleich der weltweiten Verbräuche von Helium nach Verwendungsbereichen im Jahr 2015, nach GUBLER et al. (2016).

### 3.2.2 Neon

Durch den im Vergleich zu Helium und Argon deutlich höheren Preis von Neon sind seine Verwendungsmöglichkeiten in der Praxis begrenzt. Wenn möglich, wird es durch das in der Atmosphäre wesentlich häufigere und dadurch auch günstiger zu produzierende Argon ersetzt.

Mittlerweile mit weitem Abstand größter Absatzmarkt für Neon (nach BETZENDAHL (2015b) 80 – 90 % Marktanteil) ist die Herstellung von Gasgemischen für Excimerlaser (s. 3.2.1), in denen Neon mit > 95 Vol.-% wichtigster Bestandteil ist. Excimerlaser werden in der Fotolithographie, eine der zentralen Methoden der Halbleiter- und Mikrosystemtechnik zur Herstellung von integrierten Schaltkreisen, und zum Tempern, d. h. dem Erhitzen zur Verbesserung der Eigenschaften von Polysiliziumschichten bzw. Wafern für Halbleiter und Flachbildschirme, eingesetzt. Zudem kommen Excimerlaser in der Medizin zum Einsatz (vgl. 3.2.1). Nach BETZENDAHL (2015b) gehen 70 – 75 % der weltweiten Neonnachfrage auf den Bedarf der Halbleiterindustrie zurück. KHAN (2017) geht von einem Bedarfswachstum an Gasgemischen für Excimerlaser für die Halbleiterindustrie von jährlich 6 % im Zeitraum 2016 – 2023 aus.

Der Bedarf von Neon zur Produktion von **Helium-Neon-Lasern** ist dagegen stark rückläufig. Früher fand man diese Laser beispielsweise in den Barcodescannern von Registrierkassen oder Laserdruckern, mittlerweile sind sie dort aber fast vollständig von Diodenlasern verdrängt worden.

Das bekannteste, aber längst nicht mehr größte Anwendungsgebiet (nach BETZENDAHL (2015b) sowie SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) nur 1 % Marktanteil) von Neon liegt in der **Beleuchtungstechnik** (s. 3.2), da es in Leuchtröhren ein scharlachrotes Licht emittiert. In Leuchtstoffröhren auf Quecksilberbasis und mit Argonfüllung erhöht ein Zusatz von Neon von etwa 25 % die Spannung über dem Lichtbogen und führt so zu einer höheren Lichtausbeute. Inwieweit der boomende LED-Markt auch Einfluss auf die Verwendung von Leuchtröhren für Reklamezwecke haben wird, ist derzeit noch unklar.

In der Luft- und Raumfahrt dient flüssiges Neon als Substitut für flüssiges Helium als Kühlmittel für hochempfindliche **Infrarot-Sensoren**. Neon besitzt einen rund doppelt so großen Atomdurchmesser wie Helium, diffundiert daher langsamer in den Weltraum und erlaubt so einen längeren Betrieb der Satelliten (vgl. 3.2.1).

Auch in einigen **Kühlmitteln** in der Kältetechnik wird Neon in geringem Umfang als Substitut für Helium eingesetzt. Es ist zwar deutlich teurer als flüssiges Helium, hat jedoch eine 41-mal höhere Kühlleistung und eine dreimal höhere als flüssiger Wasserstoff. Neon wird daher v. a. im Abkühlungsvorgang von supraleitenden Materialien eingesetzt, bei denen eine hohe Kühlleistung gewünscht ist.

Weitere Anwendung findet Neon für **Forschungszwecke**, besonders im Bereich der Kernphysik.



Abb. 14: Leuchtreklame mittels Neonröhren an einem Restaurant in Lustenau/Österreich, Foto: Reinhard Müller/Wikipedia.



**Abb. 15:** Schweißen von Edelstahl nach dem Wolfram-Inertgas-Schweißen geschieht meist in einer Schutzgasatmosphäre aus Argon oder seltener Helium, Foto: Linde AG (mit frdl. Genehmigung).

### 3.2.3 Argon

Argon dient weltweit in großen Mengen als **Schutzgas** bei bestimmten Schweißverfahren (s. 3.2.1). Bei den Werkstoffen, die aus metallurgischen Gründen keinen Sauerstoff oder Stickstoff vertragen, z. B. Aluminium, Magnesium, Chrom, Vanadium, Silizium, Titan oder Molybdän, verhindert es den Luftzutritt, somit die Oxid- und Nitridbildung. Argon schützt also die heiße Schmelze vor dem Sauerstoff, dem Stickstoff und der Feuchte der Luft.

In Vakuuminduktionsöfen, in denen **Stahllegierungen** hergestellt werden, dient Argon aus den gleichen Gründen als Schutzgas und wird in einer Menge von bis zu 6 m<sup>3</sup> pro Tonne Legierung eingesetzt. Ähnliches gilt für Vakuum-Lichtbogen-Reaktionsöfen, in denen **Titan** erzeugt wird, das

als einziges Metall auch in einer reinen Stickstoffatmosphäre brennt.

Bei der Produktion von **Aluminium** fördert Argon zusammen mit N<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub> und CO die Entgasung und entfernt im Abstrom aus dem geschmolzenen Aluminium zugleich den sich entwickelnden Wasserstoff sowie feste Verunreinigungen.

Beim **Formguss** von heißen Metalllegierungen, z. B. von Al- und Mg-Legierungen für Lenkräder, verhindert eine Schutzatmosphäre aus Argon die Oxidation der Metalle.

Bei der **Stahlherstellung** kommt Argon in zahlreichen Verfahrensschritten zum Einsatz. Unter hohem Druck eingeblasenes Argon dient einerseits zum Durchmischen des flüssigen Stahls, um die Temperatur und die Zusammensetzung des

Stahls im Konverter bzw. der Pfanne zu homogenisieren, andererseits zum Austrag unerwünschter Gase, wie  $N_2$ , CO oder  $H_2$ , die die physikalischen Eigenschaften der Stähle beeinträchtigen. Auch feste Verunreinigungen werden im Argongasstrom ausgetragen und so ein „sauberer“ Stahl erzeugt. Mit Argon werden Ca und Mg in das Stahlbad eingetragen, mit deren Hilfe der Schwefelanteil des Stahls reduziert wird. Argon unterstützt zudem während der gesamten Stahlherstellung die Kohlenstoff-Sauerstoff-Reaktion (MORGAN 2007b).

Bei der Produktion von rostfreien und hochlegierten Edelstählen hat das 1954 entwickelte **Argon-Sauerstoff-Entkohlungsverfahren** große Bedeutung. Hierzu wird ein Argon-Sauerstoff-Gemisch in die zu behandelnde Stahlschmelze eingeblasen, wobei der  $O_2$ -Anteil im Mischgas während des etwa einstündigen Blasens kontinuierlich von rund 80 % auf rund 20 % reduziert wird. Durch die Zumischung von Argon als Inertgas wird der Partialdruck des Sauerstoffs gesenkt. Dies begünstigt die Oxidation des Kohlenstoffs zu CO, der, zusammen mit dem ebenfalls unerwünschten  $N_2$ , durch das Argon ausgespült wird, während andererseits die unerwünschte Verschlackung von wertvollen Legierungsmetallen wie Cr und Mn reduziert wird. Um die dennoch oxidierten Legierungsmetalle zurückzugewinnen, wird die Schlacke nach der Entkohlung durch die Zugabe von Kalk und Silikaten reduziert. Anschließend wird die Schmelze mit gebranntem Kalk entschwefelt. Während dieser beiden Prozesse wird die Schmelze für ihre bessere Durchmischung mit reinem Argon beblasen. Am Ende des Prozesses beträgt der Kohlenstoffgehalt im Stahl nur noch rund 0,015 %. Etwa 2 % Chrom gehen verloren. Pro Tonne Stahl werden rund  $25 \text{ m}^3 O_2$  und  $20 \text{ m}^3 \text{ Ar}$  verbraucht.

Auch in der **Halbleitertechnik** ist Argon eines der wichtigsten Gase, wo es vornehmlich als inertes Schutzgas in vielen Produktionsprozessen dient (GASWORLD 2018). Auch die Siliziumeinkristalle für die spätere Halbleiterproduktion werden bereits in einer Schutzgasatmosphäre aus Argon gezüchtet. Bei der Kathodenzerstäubung („Sputterdeposition“) unterstützt ein Plasma aus Argon, Helium oder Krypton die Reaktion bzw. dienen die Edelgase als Schutzgase. Ebenso dient ein Argonplasma der Aktivierung der Ätzgase im Ätzprozess. Kleinste Tropfen aus flüssigem Argon dienen zur



**Abb. 16:** Herstellung einer CrMoWVNbN-Edelstahlegierung in einem Konverter mittels Argon-Sauerstoff-Entkohlungsverfahren, Foto: Goodwin Steel Castings/Wikipedia.

Säuberung der winzigen, zerbrechlichen Computchips.

Bei der Produktion ultraflacher **Solarzellen** auf  $Cu(In,Ga)Se_2$ -Basis (CIGS-Solarzellen) werden die Halbleiter mit Hilfe von Schwefelwasserstoff und Argon auf das Glassubstrat aufgedampft. Pro Durchlauf durch den Kristallisationsofen werden rund  $120 \text{ m}^3$  Argon benötigt.

Zur Verwendung von Argon in Argon-Ionen-**Lasern** und Excimerlasern, siehe Kap. 3.2.1 bzw. 3.2.2. Auch die Verwendung von Argon in Gas speichern von Airbags wurde bereits in Kap. 3.2.1 erwähnt. Gleiches gilt für die Nutzung von Argon als Schutzgas beim **Plasmaspritzen** und generell in der **Pulvermetallurgie**.

Das Laserstrahlschmelzen gehört zu den additiven Fertigungstechniken und ist eines der bekanntesten **3D-Druck**-Verfahren für die Fertigung metallischer Bauteile aus Edelstahl, Titan-, Aluminium-, Kobalt-, Chrom- und Nickellegierungen. Hierbei dient Argon als inertes Schutzgas und ist zudem zur Pulververdüsung besonders gut geeignet.

Wegen seiner geringen Wärmeleitfähigkeit und seines relativ niedrigen Preises ist Argon seit langem das mit weitem Abstand wichtigste Füllgas zwischen **Isolierglasscheiben**. Argon bzw. das wegen seines hohen Preises wesentlich seltener eingesetzte Krypton verringert die Gasumwälzung und die Wärmeableitung, wodurch sich die Isolierungseigenschaften von Doppel- bzw. Mehrfachgläsern wesentlich verbessern.

Beim **technischen Tauchen** wird Argon – insbesondere bei der Nutzung des heliumhaltigen „Trimix“ als Atemgas – dazu verwendet, um Trockentauchanzüge zu füllen bzw. diese vom Gewicht her auszutarieren. Die geringe Wärmeleitfähigkeit von Argon verzögert dabei das Auskühlen des Tauchers (vgl. 3.2.1).

In **Leuchtstoffröhren** (dann zusammen mit Quecksilberdampf), aber auch in elektronischen Bauteilen, wie Gleichrichtern und Überspannungssicherungen, wird Argon als günstiges Füllgas verwendet.

**Glühlampen**, sofern noch im Einsatz, werden häufig unter hohem Druck (70 kPa) mit Argon-Stickstoff-Gemischen im Verhältnis von 93 % Ar und 7 % N<sub>2</sub> gefüllt, weil eine Schutzgasfüllung die Gefahr einer Verdampfung des Glühfadens vermindert (GASWORLD 2014). Argon besitzt eine geringere Wärmeleitfähigkeit als leichtere Gase, ist aber preiswerter als die schwereren und damit noch geringer wärmeleitenden Edelgase Krypton oder Xenon. Ein Vorteil der geringeren Wärmeleitfähigkeit ist eine höhere mögliche Glühtemperatur und damit eine höhere Lichtausbeute.

In der Durchführung zahlreicher **analytischer Untersuchungen**, z. B. der optischen Spektrometrie, der Atomabsorptionsspektrometrie, der Gaschromatographie, ICP-MS oder ICP-OES, wird Argon als Trägergas eingesetzt.

Bei der Weinherstellung und der Verpackung von Lebensmitteln dient Argon in Form des **Lebensmittelzusatzstoffes E 938** als Treib- und Schutzgas und verhindert den Verderb durch Oxidation oder Befall durch Bakterien und Pilze.

Speziell beim **Löschen** von Metallbränden, aber auch von elektrischen und EDV-Anlagen, kommt gasförmiges, stark verdichtetes Argon als Löschgas zum Einsatz. Es ist nicht reaktiv, zudem schwerer als Luft und durchflutet den zu löschenden Bereich besonders schnell und gründlich. Der Luftsauerstoff wird verdrängt und das Feuer erstickt.

In **Geigerzählern** dient Argon (oder das wesentlich teurere Krypton) als Grundgas in den Zählrohren. Argon ist besonders vorteilhaft zum Erzielen möglichst kurzer Impulse, weil es keine negativen Ionen bildet, die viel langsamer als die Elektro-

nen zur Anode wandern. Zur Detektion von Gammastrahlung wird Argon mit mehreren Bar Überdruck oder zum Teil auch Xenon verwendet.

In **Plasmaöfen**, die hauptsächlich der Verbrennung von toxischen Flug- und Filterstäuben aus Feuerungsanlagen oder metallurgischen Anlagen sowie von Kampfstoffen dienen, wird zwischen Plasmabrennern ein Plasma mit Temperaturen > 2.000 °C erzeugt. Die toxischen Materialien werden pneumatisch unter Argon als Schutzgas durch das Plasma geblasen, wodurch sie aufschmelzen, sich teils als Tropfen in einem Schmelzbad sammeln, teils aber auch verdampfen.

In den USA ist ein **Großforschungsprojekt** zur Untersuchung von Neutrino-Teilchen geplant. Hierfür soll am Standort Batavia, Illinois, ein *Deep Underground Neutrino Experiment* (DUNE) Detektor erbaut werden, dessen vier Module jeweils in einer Kühlanlage (Kryostat) eingehaust sind, die statt mit flüssigem Helium durch flüssiges Argon tiefgekühlt werden sollen. Hierfür werden über einen Zeitraum von vier Jahren insgesamt 69.600 t flüssiges Argon benötigt.

### 3.2.4 Krypton

In der **Isolierglasherstellung** wird Krypton als Füllgas zwischen Flachglasscheiben zur späteren Weiterverarbeitung zu wärmedämmenden und schallschluckenden **Isolierglasfenstern** (vgl. 3.2.3) genutzt. Je höher der Füllgrad und je schwerer das Edelgas, d. h. Argon < Krypton < Xenon, desto höher die Wärmeschutz- und Schallschutzwirkung. Xenon ist doppelt so effizient wie Krypton, das wiederum dreimal so effizient ist wie Argon, das doppelt so effizient ist wie Luft. Auch in speziellen, teils mit Hilfe von Krypton als Trägergas metallbeschichteten Sonnenschutzgläsern für die Solarindustrie, Automobilindustrie und den Gewerbebau werden die Zwischenräume der Glasscheiben mit Argon oder seltener, da teurer, Krypton gefüllt.

In **Excimerlasern** hat Krypton neben den anderen Edelgasen eine wichtige Rolle in der Halbleitertechnik (s. 3.2.1). Der steigende Absatz von Krypton für Laser in zahlreichen Verwendungen (Medizin, Halbleiter, Spezialgebiete) dürfte den sinkenden Marktanteil von Krypton für Glühlampen (s. u.) ausgeglichen haben.



**Abb. 17:** Im Jahr 2010 wurden nacheinander jede Nacht jeweils 50 der insgesamt 6.379 Fenster des Empire State Buildings in New York ausgebaut, die Glaszwischenräume mit einer Metallfolie beschichtet, dann mit einem Gasgemisch aus Luft, Argon und Krypton gefüllt und abschließend wieder eingebaut. Hierdurch ging der Wärmeverlust durch die Fenster um 75 % zurück, Foto: UN Women/Ryan Brown.

Die Befüllung von **Halogenlampen** für Autocheinwerfer mittels Krypton ist innerhalb der Beleuchtungsindustrie der größte Absatzbereich für dieses Edelgas. Auch in Glühlampen, sofern wegen der schnellen Marktdurchdringung von LED-Lampen noch im Einsatz, hat Krypton Bedeutung als Füllgas. Wegen der geringen Wärmeleitung dieses Gases kann der Wolframglühfaden bei höherer Temperatur als bei Argon- und Stickstofffüllungen betrieben werden. Dadurch wird die Lichtausbeute der Lampen erheblich vergrößert und ihre Farbtemperatur nähert sich der des Sonnenlichts. Aufgrund seiner Seltenheit und dadurch seines höheren Preises wird Krypton im Vergleich zu Argon jedoch nur eingesetzt, wo eine hohe Lichtausbeute erforderlich ist.

**Geigerzähler** mit einer Gasfüllung aus Krypton besitzen eine besonders hohe Empfindlichkeit. Auch Szintillationszählrohre, wie sie in der Nuklearmedizin für PET-Untersuchungen oder in Rasterelektronenmikroskopen im Einsatz sind, sind deswegen mit Krypton als Grundgas gefüllt.

Da Krypton seit Langem einen niedrigeren Preis besitzt als vor allem Xenon und auch mit keinerlei Versorgungsproblemen zu rechnen ist, ist Krypton ein besonderes Objekt der Forschung. In der Kathodenzerstäubung („Sputterdisposition“) hat es sich so zum Teil als Schutz- und Plasmagas sogar gegen Argon durchgesetzt.



### 3.2.5 Xenon

Xenon-Gasentladungslampen haben ein dem Tages- bzw. Sonnenlicht sehr ähnliches Farbspektrum und benötigen gleichzeitig relativ wenig Energie, um die dafür notwendige Temperatur zu erzeugen. Notwendig ist allerdings der Zusatz einer sehr geringen Menge an Quecksilber und eines Metallsalzes, um die ansonsten violette Farbe des reinen Xenons auszugleichen (vgl. 3.2). Hochdruckxenonlampen werden schon seit längerem zur Ausleuchtung großer Flächen, z. B. von Flughafenvorfeldern, Hafenkais, Sportanlagen oder in Leuchttürmen eingesetzt. Markierungsleuchten von Start- und Landebahnen, Leuchten für Scanner und Fotokopierer, Kinoprojektoren, Blitzlichter sowie künstliches Licht in Gewächshäusern beruhen auf dieser Technologie. Relativ neu dagegen ist zudem die Verwendung von Xenon für **Halogenlampen** in Autoscheinwerfern, die sich aber in hochwertigen Automobilen immer

mehr durchsetzt, bereits aber wieder von der LED-Technologie verdrängt wird.

Bei der Erforschung Dunkler Materie wird hochreines Xenon als **Detektormaterial** eingesetzt. Nach BETZENDAHL (2016) wurden im Jahr 2016 immerhin 7 – 8 % der weltweiten Xenonproduktion für diesen Zweck eingesetzt. Nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) wird dieses Xenon jedoch nicht verbraucht und dem Markt nach Beendigung der Forschungsaktivitäten wieder zur Verfügung stehen.

In der Raumfahrt dienen **Xenon-Ionenantriebe** zum Antrieb interplanetarer Sonden und zunehmend auch von manövrierfähigen Satelliten. Hierfür wird ein Gas, meist Xenon, wesentlich seltener Krypton oder Argon, ionisiert und anschließend in einem elektrischen Feld auf ca. 35 km/s beschleunigt. Nach der Passage eines sog. Neutralisators, der dem Strahl wieder Elektronen zuführt und



**Abb. 18:** 4.000 Watt-Hochdruckxenonstrahler von Osram beleuchten nachts die Niagara-Wasserfälle zwischen Kanada und den USA. Bei einer Spannung von 21 Volt erzeugen sie zusammen eine Lichtstärke von 8 Mrd. Candela, Foto: Ruben Yie/Wikipedia.

ihn somit elektrisch neutral macht, werden die Teilchen in Form eines Strahls ausgestoßen und dadurch die Sonde in die gewünschte Richtung getrieben. Sonden bzw. Satelliten führen beim Start mehrere hundert Kilogramm Xenon mit sich. Der Verbrauch ist gering und liegt bei rund 0,35 ml Xe/s (HALL 2016) bzw. bei 0,1 – 5 mg Xe/s, je nach Größe des Satelliten (AIRBUS DEFENCE AND SPACE, pers. Mitteilung).

Ähnlich den anderen Edelgasen hat Xenon in Form von XeCl eine Bedeutung in bestimmten **Excimerlasern**, die in einigen Prozessschritten („annealing“) in der Halbleiterindustrie eine wichtige Rolle spielen (s. 3.2.1).

Beim **Plasmaätzen** (engl.: plasma etching), ebenfalls einem Verfahrensschritt in der Halbleiterindustrie, wird in einem Vakuumreaktor, der bis zu einem Druck von wenigen Millibar mit einem Ätzgas gefüllt ist, eine Hochfrequenz- oder elektrodenlose Mikrowellenentladung gezündet und so ein hochreaktives, ätzaktives Plasma erzeugt. Als eines der geeigneten Ätzgase zum Ätzen von Si, Mo oder Ge hat sich XeF<sub>2</sub> herausgestellt.

Derzeit wird ebenfalls in der Halbleiterindustrie, angeführt von Samsung, ein **3D-Fotolithographieverfahren** in die Praxis umgesetzt, das zusätzlich erhebliche Mengen an Xenon erfordert (BETZENDAHL 2017, SPIRITUS & BETZENDAHL 2018).

Für einige spezielle Anwendungen in der **Medizin** spielen Isotope des Xenons eine Rolle. Hochreines Xenon wird zudem eingesetzt für Messungen des Gehirnbloodflusses sowie mit Sauerstoff gemischt, um den Kontrast bei Computertomographieaufnahmen zu erhöhen und um den Blutfluss zu bestimmen.

Xenon wirkt in bestimmten Konzentrationsbereichen narkotisierend und wird seit einigen Jahren als (teurere) Alternative zu den bisherigen **Narkosemitteln** getestet, die immer noch mit Risiken verbunden sind. Xenon beeinträchtigt kaum den Kreislauf und flutet aufgrund seiner schlechten Blutlöslichkeit schnell an und ab. Die Patienten wachen nach der Narkose schnell auf. Zudem wird das Edelgas nur über die Lunge abgegeben, so dass die Ärzte die Narkosetiefe durch Konzentrationsmessungen der Atemabluft gut steuern können. In einer zweistündigen Inhalationsnarkose werden jedoch rund 12 l Xenon verbraucht, was mit

hohen Kosten verbunden ist. Zudem kann Xenon wegen seiner hohen Dichte die Lungenfunktionen beeinträchtigen. Patienten mit Lungenerkrankungen und Kinder dürfen mit einer solchen reinen Xenonnarkose grundsätzlich nicht behandelt werden. Wird Xenon jedoch in einer Fettemulsion gelöst und mit Hilfe einer Infusion in den Organismus eingeführt, ändert sich die Situation. Anders als bei der Aufnahme des Edelgases über die Lunge, verteilt sich die Substanz nach intravenöser Gabe in einem wesentlich kleineren Bereich und der Verbrauch bei einer zweistündigen Narkose liegt nur noch bei 150 ml Xenon. Xenon als Narkosemittel ist allerdings erst in Russland, der EU und wenigen anderen Ländern, nicht aber in den USA, zugelassen.

In der elektronischen Industrie dient Xenon als Füllung für spezielle Bauteile der **Radartechnik**.

Der vor einigen Jahren noch große Bedarf an Xenon für **Plasmafernseher** ist sehr stark zurückgegangen, seitdem der gesamte Markt auf LCD-Fernseher umgeschwenkt ist. Es existiert jedoch noch ein kleiner Nebenmarkt für Smartphone-Bildschirme auf AMOLED (*Active-matrix organic light-emitting diode*)-Basis, für deren Produktion ebenfalls Xenon benötigt wird.

Xenondifluorid, XF<sub>2</sub>, ist ebenfalls ein starkes, wenn auch sehr teures Oxidationsmittel in der Organischen Synthese.

### 3.2.6 Radon

Aufgrund seiner Radioaktivität findet Radon – in Maßen genossen – Verwendung in der **Radonbalneologie**, z. B. in Bad Kreuznach/Rheinland-Pfalz (Radonaktivitäten zwischen 30.000 und 130.000 Bq/m<sup>3</sup> im Radonstollen, FALKENBACH 2008), Bad Gastein/Österreich (Radonaktivität im Mittel 44.000 Bq/m<sup>3</sup> im Radonstollen, FALKENBACH 2008), Jáchymov (Joachimsthal)/Tschechien (Radonaktivität der Bäder zwischen 4.500 – 5.500 Bq/l, LAZZERINI & BONOTTO 2015), St. Blasien-Menzenschwand/Baden-Württemberg (Radonaktivität der Bäder im Mittel 700 Bq/l), Karlovy Vary (Karlsbad)/Tschechien und Ischia/Italien. Die dortigen Heilbäder werben damit, dass eine Radontherapie entzündungshemmende und schmerzlindernde Effekte hat und zudem das Immunsystem anregen soll.

### 3.3 Toxizität

Alle Edelgase sind nicht reaktiv, nicht brennbar und ungiftig. Sie sind jedoch auch geruchlos, farblos, geschmacklos und nicht reizend und können daher vom Menschen in keiner Form gespürt werden. Hierdurch besteht die Gefahr des unbewussten – oder auch bewussten – Einatmens einer (zu) großen Menge an Edelgasen, in der Praxis meist Helium, was dann zum Erstickungstod durch Sauerstoffmangel führt, da die Edelgase Sauerstoff verdrängen.

Nach RADNEDGE (2012) kam es im Jahr 2007 in Großbritannien zu zwei Todesfällen durch Ersticken durch Helium, während diese Zahl im Jahr 2011 bereits auf 42 gestiegen war. Im Jahr 2015 waren es 65 Fälle. In den 16 Bundestaaten der USA, die entsprechende Statistiken führen, töteten sich im Zeitraum 2005 – 2012 mit stark zunehmender Tendenz insgesamt 665 Personen durch Helium. Allerdings macht die Selbsttötung durch Gas, meist wird Kohlenmonoxid genutzt, nur 4 % aller Selbstmorde in den untersuchten Bundesstaaten aus (AZRAEL et al. 2016). Zumeist handelt es sich bei Tötungen mittels Helium um Selbstmorde durch Jugendliche, die entsprechende Anleitungen im Internet nutzen. Nach statistischen Untersuchungen tritt beim Einatmen reinen Heliums nach fünf Atemzügen bzw. nach durchschnittlich 35 Sekunden Bewusstlosigkeit ein, dies jedoch nur, wenn keinerlei Sauerstoff eingeatmet wird bzw. sich noch in der Lunge befindet. Innerhalb von 2 – 40 Minuten, durchschnittlich 10 Minuten, folgt dann der Tod. Die ärztliche Diagnose lautet: „Hypoxämisches Ersticken infolge Heliumeinatmung“. Auch Todesfälle durch Ersticken bei Reinigungsarbeiten in großen Heliumballons wurden aus den USA berichtet.

Eine der weiteren physiologischen Eigenschaften der Edelgase ist ihre Fähigkeit, sich in Blut und anderen Körperflüssigkeiten in ähnlichem Ausmaß wie in Wasser zu lösen. Sie besitzen dadurch eine narkotisierende Wirkung, die besonders hinsichtlich Xenon bei Operationen genutzt wird (vgl. Kap. 3.2.5).

Beim Hantieren mit allen flüssigen Edelgasen ohne entsprechende Schutzausrüstung besteht Erfrierungsgefahr der Extremitäten.

Xenondifluorid ist ein weißes, kristallines Pulver, das bei 129 °C schmilzt und sich bei weiterer Erhitzung explosionsartig wieder zu Xenon und Fluor zersetzt. Es gilt entsprechend der Gefahrenkennzeichnung als brandfördernd und giftig. Seine maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) wurde auf 2,5 mg/m<sup>3</sup> festgelegt. Auch alle weiteren künstlichen Xenonverbindungen sind instabil und setzen bei Zersetzung ätzende und damit gefährliche Stoffe frei.

#### 3.3.1 Radon

Die weltweit zweithäufigste Todesursache durch Lungenkrebs nach Rauchen ist Radon. In Deutschland gibt es schätzungsweise jährlich 1.900 (andere Quellen: 3.000) Lungenkrebstodesfälle, die auf die Belastung durch Radon zurückzuführen sind. Radon selbst ist jedoch, wie auch die anderen Edelgase, inert und wird ein- und wieder ausgeatmet, ohne chemisch gebunden zu werden oder sich anzureichern. Die Hauptgefahr besteht durch die radioaktiven Zerfallsprodukte von Radon.

Radon ist ein Innenraumschadstoff. Die Hauptquelle für Radon im Gebäude ist in aller Regel der geogene Untergrund (vgl. Kap. 2.2). Die Freisetzung aus Baumaterialien sowie aus Brauch- und Trinkwasser spielt in Deutschland für die Belastung innerhalb eines Hauses in der Regel nur eine untergeordnete Rolle. Dies ist in anderen Ländern zum Teil anders.

Von den drei natürlich vorkommenden Radonisotopen <sup>219</sup>Rn, <sup>220</sup>Rn und <sup>222</sup>Rn (vgl. Kap. 2.2) zerfällt nur das häufigste Radonisotop <sup>222</sup>Rn so langsam, dass es aus seinem Entstehungsort im Gestein bzw. Boden durch Lösung ins Grundwasser oder Diffusion an die Erdoberfläche bzw. in die Gebäudehülle gelangen kann. Die durchschnittliche Diffusionsweite von Radon in trockenen Böden beträgt 1,6 – 1,9 m, in nassen Böden dagegen nur 1 cm (SCHUMANN et al. 1994).

Die Zerfallsprodukte von Radon sind selbst wieder instabile Isotope der Schwermetalle Polonium, Blei und Bismut. Sie entstehen zwar als freie Ionen, werden jedoch zum Teil schnell von Wasserdampf oder Gasen umlagert und bilden dadurch einen Verband von mehreren Molekülen. Diese sind sehr beweglich und neigen dazu, sich an Oberflächen im Raum oder an in der Luft befindliche

Schwebstoffteilchen (Aerosole) anzulagern. Welcher Gleichgewichtszustand sich in der Raumluft einstellt, hängt hauptsächlich von der Luftaustauschrate nach außen, der Aerosolkonzentration im Raum sowie dem Oberflächen-Volumen-Verhältnis des Raums ab (SSK 1992).

Von den Aerosolen werden bei jedem Atemzug ca. 20 – 30 % ausgefiltert und in verschiedenen Stellen in den Atemwegen deponiert. Im Bereich der Atemwege ist der Anteil der nicht an Aerosole gebundenen Isotope, das Verhältnis zwischen Radon und seinen Tochterisotopen, die Größe der Aerosole, das Atemvolumen und die Atemhäufigkeit, das Verhältnis zwischen durch den Mund bzw. durch die Nase eingeatmeter Luft, der Aufbau der Bronchien, der Selbstreinigungsmechanismus der Bronchien sowie die Abschirmung durch die evtl. bereits vorgeschädigte Schleimschicht entscheidend für die radioaktive Dosis in den Basalzellen (SAMET 1994).

Die unter den Zerfallsprodukten von Radon befindlichen Poloniumisotope  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ,  $^{215}\text{Po}$ ,  $^{216}\text{Po}$  und  $^{218}\text{Po}$  haben die größte radiologische Wirkung, weil sie Alpha-Strahler sind. Die Eindringtiefe von Alphateilchen ist sehr gering. Eingeatmet kommen die Alphateilchen jedoch in direkten Kontakt mit lebenden Zellen und schädigen diese konzentriert und auf kleinem Raum. Kritische Bereiche in der Lunge sind dabei die Basalzellen des Bronchialepithels, andere teilungsfähige Zellen im Alveolarepithel und die Bronchiolen. Die Schädigung erfolgt direkt durch Veränderungen der Erbsubstanz (DNS) in den bestrahlten Zellen. Die Zeitspanne zwischen der Bestrahlung und dem Auftreten des Lungenkrebses liegt praktisch nie unter 5 – 10 Jahren und kann mehrere Jahrzehnte erreichen, was auf sehr komplexe mehrstufige Mechanismen der Lungenkrebsentstehung beim Menschen hindeutet (SSK 1992).

Die mittlere Radonkonzentration in der Außenluft beträgt in Deutschland etwa  $14 \text{ Bq/m}^3$ . Dabei ist die bodennahe Luft besonders radonhaltig, s. u., während bodenferne Luftschichten vergleichsweise wenig Radon enthalten.

Der Mittelwert der Radonkonzentrationen in Wohnungen in den alten Bundesländern Deutschlands beträgt  $49 \text{ Bq/m}^3$  Raumluft. Bei Annahmen einer mittleren Aufenthaltswahrscheinlichkeit in

solch einer Durchschnittswohnung und einer mittleren Lebenserwartung von 70 – 80 Jahren ergibt sich eine kumulierte Exposition, die etwa um den Faktor 4 unterhalb des Expositionsbereichs von Bergarbeitern liegt, bei denen eine statistisch signifikante Erhöhung des Lungenkrebsrisikos beobachtet wurde. Das heißt selbst der jahrzehntelange Aufenthalt in einer durchschnittlich mit Radon belasteten Wohnung führt zu keinerlei nachweisbaren Gesundheitsrisiken. Mit steigender Radonkonzentration in der Raumluft steigt das Erkrankungsrisiko an Lungenkrebs jedoch deutlich an.

Die WHO empfiehlt einen Zielwert von  $100 \text{ Bq/m}^3$  im Jahresmittel, der im Aufenthaltsbereich von Gebäuden nicht überschritten werden soll. Sofern dieser Zielwert aufgrund der bestehenden Randbedingungen nicht erreicht werden kann, soll der Referenzwert nicht höher als  $300 \text{ Bq/m}^3$  sein. Nach aktuellem Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) beträgt der Referenzwert für die über das Jahr gemittelte  $^{222}\text{Rn}$ -Aktivitätskonzentration in der Luft in Aufenthaltsräumen in Deutschland  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Dieser Referenzwert gilt als Maßstab für die Prüfung der Angemessenheit von Maßnahmen, stellt aber keinen Grenzwert dar.

Da der geogene Untergrund die Hauptquelle für erhöhte Radonkonzentrationen in der Raumluft darstellt, hat das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) unter dem Gesichtspunkt präventiver Radon-schutzmaßnahmen bei Neubauten sogenannte Radonvorsorgegebiete definiert. Dazu zählen alle Flächen in Deutschland, für die Radonkonzentrationen in der Bodenluft über  $20.000 \text{ Bq/m}^3$  prognostiziert werden. Bei diesen Bodenluftgehalten wird eine Überschreitungshäufigkeit einer Radonkonzentration von  $100 \text{ Bq/m}^3$  in Aufenthaltsräumen von 1 % in Wohnhäusern erwartet. Die Radonvorsorgegebiete werden nach der Höhe der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft – und damit einer zunehmenden Überschreitungshäufigkeit von Radon in der Raumluft – klassifiziert. Folgende Klassen werden definiert:

- Radonvorsorgegebiet I:  $20.000$  bis  $40.000 \text{ Bq/m}^3$
- Radonvorsorgegebiet II: über  $40.000$  bis  $100.000 \text{ Bq/m}^3$
- Radonvorsorgegebiet III: über  $100.000 \text{ Bq/m}^3$

In Sachsen wurde als bisher einzigem und zudem neben Bayern und Thüringen besonders betroffe-

nem deutschen Bundesland eine landesweite Kartierung des geogenen Radonpotenzials in Form von Erwartungswerten der Radonkonzentration in der Bodenluft durchgeführt. Sie stützt sich auf ca. 1.000 Messpunkte. Vom Bundesamt für Strahlenschutz liegt zudem eine bundesweite Übersichtskarte der Radonkonzentration in der Bodenluft auf Basis von 2.346 geologisch repräsentativen Messpunkten vor (Abb. 19).

Nach einer Untersuchung der Strahlenschutzkommission (SSK) der Bundesrepublik Deutschland unterliegen die Radonkonzentrationen in Deutschland ausgeprägten zeitlichen (Tagesverlauf, Jahresverlauf), regionalen und sogar lokalen Schwankungen. Wesentlichen Einfluss auf die Höhe der

Radonkonzentrationen in Räumen haben dabei generell neben der geogenen Situation die Bauweise und der Haustyp (Unterkellerung, Hanglage, Risse im Gebäude, Leitungsdurchführungen, Baumaterialien, Unterdruck durch Kamineffekt im Gebäudeinneren) sowie die Luftaustauschrate, die wiederum von der Bauweise und den Lebensgewohnheiten der Hausbewohner abhängig ist.

Die Radonkonzentrationen in den Häusern der Großstädte sind deutlich geringer als in ländlichen Gebieten. Hohe Radonkonzentrationen findet man bevorzugt in Einzelhäusern, die teilunterkellert oder ohne Keller sind, sowie in alten Häusern mit Naturstein oder Lehm als Wandbaustoff (SSK 1992).

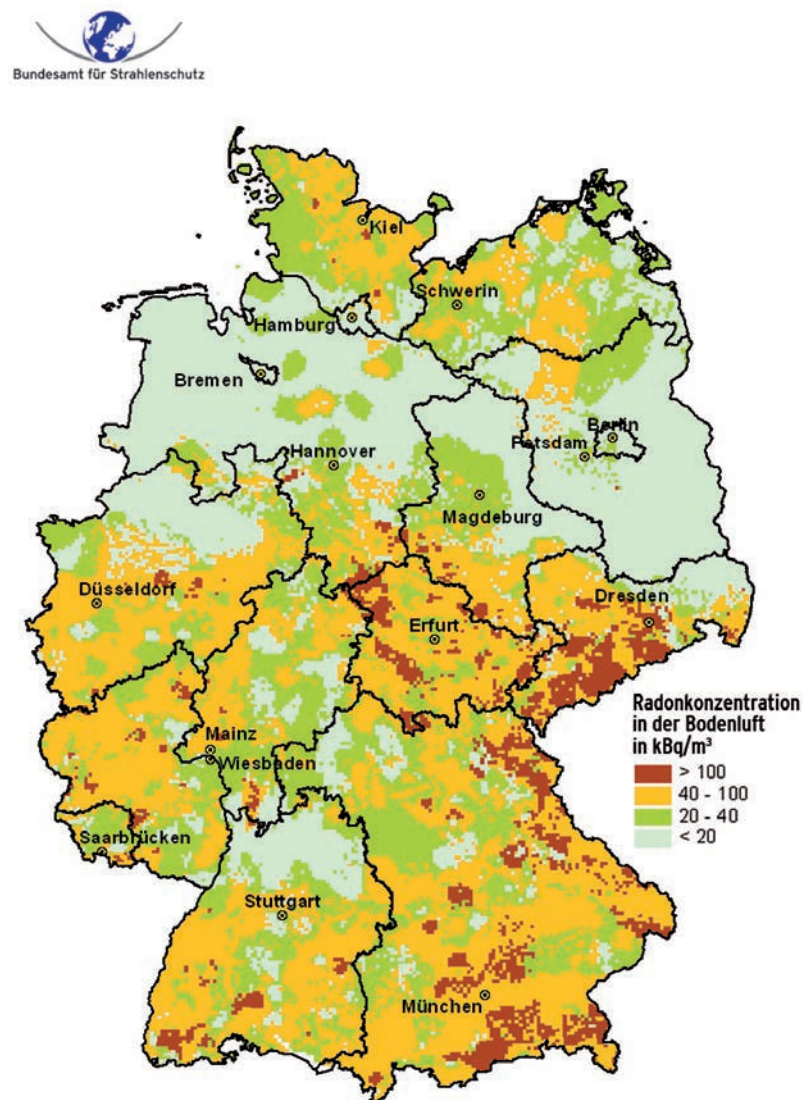


Abb. 19: Radonkonzentration in der Bodenluft in Deutschland, Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz.

### 3.4 Recycling

Aufgrund der in den letzten Jahren gestiegenen Preise für Helium bzw. der immer schon hohen Preise für die anderen Edelgase ist Recycling (genauer eher Wiederverwendung) in allen Einsatzbereichen der Industrie – sofern technisch überhaupt möglich – ein wichtiges Thema.

Ein echtes Recycling, also die Nutzung von „Abfallhelium“, gibt es nur bei der Befüllung bzw. Wartung von MRTs. Hierbei wird das verdunstende flüssige Helium als Gas aufgefangen, komprimiert und dann als Ballongas verkauft.

Nachweisbar erhöhte sich die Nachfrage nach Geräten zum Heliumrecycling Ende des Jahres 2012, als die weltweite Heliumversorgung nicht mehr gesichert war. Ebenfalls in diesem Zeitraum taten sich große wissenschaftliche Verbraucher von Helium zusammen und erwarben bzw. entwickelten gemeinsam Geräte zur Verflüssigung von gasförmigem Helium, da flüssiges Helium besser recycelt und transportiert werden kann. Für Kunden, bei denen jährlich mehr als 500 l flüssiges Helium anfällt, bieten die Gasunternehmen oft spezifische Recyclingprogramme an.

Auch mehrere deutsche Universitäten und Forschungseinrichtungen sammeln das von ihnen genutzte gasförmige Helium und liefern es teils in gasförmigem Zustand, teils in verflüssigtem Zustand gegen eine Vergütung an die jeweiligen Gaslieferanten zurück. Gute Rückgewinnungsquoten liegen dabei zwischen 90 und 95 %. Im Jahr 2010 gab es in Deutschland insgesamt 34 große Forschungseinrichtungen an 21 Standorten, die eine Heliumrückgewinnungseinheit bzw. -verflüssigungseinheit betrieben. Der Preis für eine solche komplette Anlage mit Verflüssigung soll bei rund 2 Mio. € liegen (ILLICHMANN 2018).

Bereits seit dem Jahr 2004 sind die großen MRT-Gerätehersteller, wie GE Healthcare, Philips Healthcare oder Siemens Healthineers dazu übergegangen, das aus ihren Geräten entweichende Helium nicht mehr in die Atmosphäre zu entlassen, sondern zu recyceln. Mit der Entwicklung der „zero boil-off“-Technologie in diesem Jahr ging der Verbrauch von Helium in MRTs deutlich zurück. Dennoch benötigt allein GE Healthcare geschätzt jährlich rund 6 Mio. l flüssiges Helium, um seine in den USA ausgelieferten Geräte in Betrieb zu

halten. Zusätzlich werden 5,7 Mio. l Helium zur Erstbefüllung von jährlich rund 1.000 MRTs am Produktionsstandort Florence, South Carolina, verwendet. Das Unternehmen gibt an, in den letzten Jahren jährlich rund 5 % Helium eingespart zu haben und hofft, diesen Trend fortsetzen zu können (GUBLER et al. 2016).

Auch die NASA gewinnt mittlerweile ihr zum Druckaufbau und zur Durchspülung in großen Mengen benötigtes Helium zurück. Hier gilt es, den nach Verwendung kontaminierenden Wasserstoff aus dem Helium zu entfernen, was aber technisch leicht möglich ist (BAKER 2018).

Bei der Lecksuche können bis zu 98 % des verwendeten heliumhaltigen Gasgemischs erneut genutzt werden. Hierzu wird der einmal genutzte Gasstrom aufgefangen, von Ölen und Verunreinigungen befreit, komprimiert und dann erneut eingesetzt (GASWORLD 2009).

Als im ersten Halbjahr 2015 die Preise für Neon deutlich anstiegen, wurden die einzigen beiden weltweiten Hersteller von Excimerlasern für die Halbleiterindustrie, Cymer LLC/USA (3.800 ausgelieferte Laser bis 2016) und Gigaphoton Inc./Japan (1.300 ausgelieferte Geräte bis 2016), von ihren Kunden aufgefordert, den Neonbedarf ihrer Geräte deutlich zu reduzieren. Cymer LLC gelang es, diesen Bedarf um 70 % (Anm.: unklar ist, ob durch technische Veränderungen oder Recycling) zu reduzieren, während Gigaphoton Inc. seinen Kunden kurzfristig und kostenfrei ein Recyclingprogramm anbot, mit dem bis zu 50 % des verwendeten Neons recycelt werden konnte (HEALY 2016). Nachweislich wurde in Zusammenarbeit zwischen Herstellern und Kunden sehr kurzfristig eine neue Excimerlasersoftware entwickelt, die 20 – 25 % des zuvor benötigten Neons einsparte.

In der Halbleiterindustrie werden in einigen Prozessschritten so große Mengen an Argon eingesetzt, dass sich dort jeweils eigene und getrennte Recyclinganlagen für dieses Edelgas lohnen.

Während an bereits verwendetem Krypton aufgrund des weltweiten Überangebots (vgl. Kap. 5.4) nur wenig Interesse besteht, wird Xenon aufgrund seiner Seltenheit und seines hohen Preises schon lange recycelt. Seit dem Jahr 2008 sammeln einige Gasunternehmen bei ihren Großkunden (Verbräuche > 10.000 l Xe/a) das benutzte Xenon

bzw. Xenondifluorid auch in Form von verunreinigten Abgasen, z. B. aus Plasmaätzprozessen mit hoher Xe-Konzentration (bis 0,5 % Xe), wieder ein und transportieren es nach Konzentration und Komprimierung zu speziellen Destillationsanlagen, wo es vollständig aufgereinigt und danach neu verpackt wird. Der Recyclingfaktor für dieses Xenon liegt bei > 98 %. Die Kunden, z. B. die Halbleiterfabriken, erhalten dann eine Gutschrift für ihre nächste Xenonbestellung.

### 3.5 Substitution

Ebenso bedeutend wie eine Wiederverwendung („Recycling“, s. Kap. 3.4) der Edelgase sind für die Industrie bzw. größeren Verbraucher sämtliche Entwicklungen, die es erlauben, den Einsatz der Edelgase soweit wie möglich zu minimieren bzw. sie im täglichen Gebrauch durch günstigere Gase, ggf. auch andere Edelgase, zu substituieren. Immer dann, wenn über Lieferengpässe eines Edelgases berichtet wird und/oder die Preise steigen, steigen naturgemäß auch die Substitutionsbemühungen an.

Den Stand der Forschung zu Wasserstoff als Substitut für Helium in Kühlanlagen beschrieb GLOWACKI (2012). Er wies darauf hin, dass flüssiger Wasserstoff (damals) 0,65 US\$/l, flüssiges Helium aber 4,50 US\$/l und flüssiges Neon sogar 225 US\$/l kostete.

Aufgrund der hohen und in den letzten Jahren gestiegenen Kosten für Helium hat sich die Forschung nach einem heliumfreien bzw. zumindest geringeren Bedarf an Helium zur Kühlung in MRTs intensiviert (vgl. Kap. 3.4). Durch hochdichte Kühlsysteme lässt sich bereits jetzt der Heliumbedarf bei der Wartung reduzieren. Im Jahr 2016 verkündete GE Healthcare die Entwicklung von *Freelium*, einer MRT-Technologie, die statt 2.000 l nur 20 l flüssiges Helium in der Erstbefüllung benötigen soll und in der Wartung gar kein Helium mehr braucht (GE HEALTHCARE 2016). Technische Einzelheiten von *Freelium* wurden jedoch noch nicht publiziert. Ebenfalls im Jahr 2016 kündigte Siemens technische Fortschritte bei der Entwicklung von Hochtemperatur-Supraleitern auf Seltene Erden-Basis anstelle von Niedrigtemperatur-Supraleitern auf NbTi-Basis für den Einsatz in MRTs an. Diese könnten mit flüssigem Neon oder flüssigem Wasserstoff auf  $-220\text{ °C}$

anstatt flüssigem Helium auf  $-270\text{ °C}$  tiefgekühlt werden und bräuchten während des Betriebs zudem keinen Strom mehr (WEBEL 2016).

Als Traggas kann Helium durch den günstigeren und sogar noch effektiveren Wasserstoff ersetzt werden. Dieser ist bekanntermaßen jedoch brennbar und explosiv und wird daher nur in abgelegenen Gegenden, meist durch das Militär, für diese Zwecke genutzt.

Zur Lecksuche kann Helium durch gering konzentrierte (bei 4 – 75 %  $\text{H}_2$  in einem Gas besteht Explosionsgefahr!) Wasserstoff-Gasgemische, durch Helium-Stickstoff-Gasgemische mit nur 10 % oder sogar nur 5 % He oder durch Kohlendioxid-Argon-Gasgemische ersetzt werden. Sogar die Gaslieferanten empfehlen, den Heliumgehalt im Gasgemisch zur Lecksuche auf 5 % zu minimieren, da ansonsten die empfindlichen Gasmessgeräte auf das überall im Betrieb vorhandene Helium reagieren könnten (COCKERILL 2013a). Helium bleibt aufgrund seiner geringen Atomgröße jedoch bevorzugtes Gas für alle anspruchsvolleren Dichtigkeitsnachweise.

Beim technischen Tauchen können große Tauchtiefen nicht nur durch die Verwendung von „Trimix“- oder „Heliox“-Gasgemischen, sondern auch durch Gasgemische wie „Hydrox“, das aus Wasserstoff und Sauerstoff besteht, sowie „Hydreliox“, einem Gasgemisch aus Wasserstoff, Helium und Sauerstoff, erreicht werden. Mit „Hydrox“ konnten Taucher bereits in Tiefen von 700 m gelangen.

In den meisten Schweißanwendungen kann Helium ohne große Qualitätseinbußen durch Argon als Schutzgas substituiert werden. Aus Kostengründen wird in Europa sowieso Argon als Schutzgas bevorzugt, während in den USA aufgrund der hohen Verfügbarkeit bisher fast ausschließlich mit Helium gearbeitet wurde. Nur in der Raumfahrtindustrie, wo es ausschließlich auf die Qualität ankommt, bleibt der Einsatz von Helium als Schutzgas beim Schweißen unverzichtbar.

Auch in der Halbleiterfertigung sowie in der Herstellung optischer Fasern wird Helium, soweit möglich, bereits durch Argon substituiert. Gegebenenfalls kommen auch Argon-Helium-Gasgemische in der Produktion zum Einsatz.

Keinen Einfluss auf die Verwendung von Edelgasen in der Halbleiterindustrie werden nach KHAN (2017) die gegenwärtig entwickelten ultrakurzwelligen (13,5 nm) CO<sub>2</sub>-Laser haben. Diese werden nach seiner Auffassung den stark wachsenden Markt für Excimerlaser nicht beeinflussen, sondern nur komplementieren.

In der Luft- und Raumfahrt dient flüssiges Neon statt flüssiges Helium als Kühlmittel für hochempfindliche Infrarot-Sensoren. Neon besitzt einen rund doppelt so großen Atomdurchmesser wie Helium, diffundiert daher langsamer in den Weltraum und erlaubt so einen längeren Betrieb der Satelliten.

Auch in einigen Kühlmitteln wird Neon in geringem Umfang als Substitut für Helium eingesetzt. Es ist zwar deutlich teurer als flüssiges Helium, hat jedoch eine 41-mal höhere Kühlleistung und eine dreimal höhere wie flüssiger Wasserstoff.

In der Gaschromatographie besitzt Wasserstoff anstelle von Helium den Vorteil geringerer Viskosität, wodurch die Analysen schneller ablaufen und in den kleinen Kapillarsäulen mehr Gase nachgewiesen werden können. Dies führt zur einer insgesamt höheren Produktivität im Labor. Auch Flammenionisationsdetektoren (FID), Wärmeleitfähigkeitsdetektoren (TCD), Flammenphotometrische Detektoren (FPD) wie auch Elektroneneinfangdetektoren (ECD) können sowohl auf der Basis von Helium als auch Wasserstoff arbeiten.

Nach GUBLER et al. (2016) wechselten die Nutzer von Gaschromatographen in den USA während der Heliumknappheit in den Jahren 2011 – 2013 allerdings nicht von Helium auf den günstigeren, jedoch brennbaren bzw. explosionsfähigen Wasserstoff, sondern stattdessen vorsichtshalber auf das nicht brennbare Argon, das allerdings eine höhere Viskosität besitzt.

Keine Substitution ist jedoch möglich in Heliumionisationsdetektoren, die Helium als Nachweismedium nutzen, sowie bei der Analyse von ungesättigten oder aromatischen Kohlenwasserstofflösungen, weil Wasserstoff mit diesen Lösungen reagiert und sie dadurch verändern könnte (COCKERILL 2013b).

In der Bildschirmproduktion wäre eine Abkühlung des Glases statt durch Helium auch durch Argon oder sogar Stickstoff möglich. Diese „Kühlmittel“ werden aber von den Bildschirmproduzenten in Südostasien und China wegen der gewünschten hohen Durchlaufmengen noch nicht eingesetzt.

Keine Substitution von Helium ist möglich im Bereich supraleitender Magnete, bei der Grundlagenforschung im Millikelvinbereich sowie bei der Durchspülung von Treibstofftanks zur Aufnahme flüssigen Wasserstoffs oder Sauerstoffs. In Sauerstofftanks würde Wasserstoff als Substitut für Helium mit Sauerstoff reagieren bzw. Stickstoff als Substitut den Tank kontaminieren. In Wasserstofftanks würden alle Gase außer eben Helium und Wasserstoff gefrieren und die Anlagenteile verstopfen.

Um die Kosten zu senken, wird im Argon-Sauerstoff-Entkohlungsverfahren zu Beginn des Prozesses mitunter statt Argon auch Stickstoff oder einfach nur Druckluft eingesetzt.

In der Isolierglasscheibenproduktion wird als Füllgas statt dem hocheffizienten Krypton meist das wesentlich günstigere Argon verwendet.

In Scheinwerfern können statt Halogenlampen mit Xenonfüllung auch solche mit Kryptonfüllung eingesetzt werden.

Aufgrund des hohen Preises und der in der Vergangenheit nicht immer ausreichenden Verfügbarkeit von Xenon wird daran geforscht, in Satellitenionenantrieben als Substitut zukünftig Krypton einzusetzen. Nach persönlicher Mitteilung von AIRBUS DEFENCE & SPACE ist jedoch Iod aufgrund seiner Atommasse bzw. Dichte dem Xenon wesentlich ähnlicher und bietet ein wesentlich besseres „*power-to-thrust ratio*“.



### 3.6 Chemische Anforderungen an Edelgase

Entsprechend den sehr unterschiedlichen Nutzungsbereichen, vor allem von Helium und Argon, werden diese Edelgase in unterschiedlichen Qualitäten benötigt und entsprechend auch angeboten. Generell gilt dabei, dass die Anforderungen an Edelgase in einigen Industriebereichen immer weiter steigen, da auch an die mit Hilfe der Edelgase hergestellten Endprodukte immer höhere Qualitätsanforderungen gestellt werden. Diese gestiegenen Qualitätsanforderungen gelten jedoch nicht branchenübergreifend. So wurde Helium früher standardmäßig in der Qualität 99,995 % (4.5), heute jedoch routinemäßig in der Qualität 99,999 % (5.0) angeboten und eingesetzt, obwohl dies nicht immer notwendig ist. Der Grund hierfür liegt im Ausgangsmaterial, d. h. flüssiges Helium @ 99,999 % He, das sich mittlerweile gut transportieren lässt, das dann aber größtenteils als gasförmiges Helium verwendet wird (vgl. Kap. 5.1). Nicht nur an Helium zur Lecksuche, sondern auch an Helium zur schnellen Wärmeübertragung bzw. -abfuhr, zur Airbagfüllung und vor allem als Traggas (typischerweise 95 – 97,5 % He) werden keine so hohen Reinheitsanforderungen gestellt. Allerdings würde die getrennte Behandlung von Ballonhelium und Helium 5.0 auch bei kleineren Gasproduzenten und -händlern neue bzw. zweite

Lagerkreisläufe erfordern, was aus Kostengründen verständlicherweise gerne vermieden wird.

In der Halbleiterproduktion liegen die erlaubten Verunreinigungen der Edelgase für viele Einsätze im ppt-Bereich. Häufig wird dafür das von den Heliumproduzenten angelieferte Helium mit 99,999 – 99,9999 % (5.0 bis 6.0) Reinheit sogar noch einmal aufgereinigt. Für „Resonatorgas“ sind die Mindestreinheiten dagegen geringer und liegen bei > 99,996 % He (4.6). Noch geringere Reinheiten würden die Optiken im Laser, den sogenannten Resonator, verunreinigen.

Auch in der Gaschromatographie sind nur Verunreinigungen im ppm-Bereich zulässig. Dies entspricht einem Mindestreinheitsgrad von 99,9999 % He (6.0).

Die Qualitätsanforderungen für Schweißschutzgase sind in der DIN EN ISO 14175 festgehalten. Gefordert für inerte Gase (Argon, Helium) wird hier eine Reinheit von mindestens 99,99 % (4.0). In Deutschland wird standardmäßig eine Reinheit von 99,996 (4.6) eingesetzt. Dabei wird ein Feuchtegehalt von 40 ppm nicht überschritten. Unterschieden werden in der Hauptgruppe I (inerte Gase) der ISO 14175 die Untergruppe 1 (reines Argon), die Untergruppe 2 (reines Helium) sowie die Untergruppe 3 (Argon-Helium-Mischgase mit 0,5 % < He < 95 %).

Seitens der führenden weltweiten Gasunternehmen garantierte Qualitäten von Helium, Argon, Neon, Krypton und Xenon für verschiedene Verwendungen sind in den folgenden Tabellen 6 – 10 aufgeführt.



**Abb. 20: Helium wird heute fast nur noch in der Standardqualität 5.0 (99,999 % He) angeboten, Foto: BGR.**

Tab. 6: Garantierte Qualitäten von Helium für verschiedene Verwendungen bzw. in verschiedenen Reinheitsgraden, nach Firmendatenblättern.

	He (Vol.-%)	H <sub>2</sub> O (ppmv)	O <sub>2</sub> (ppmv)	N <sub>2</sub> (ppmv)	Ne (ppmv)	H <sub>2</sub> (ppmv)	KW (als CH <sub>4</sub> ) (ppmv)	CO + CO <sub>2</sub> (ppmv)	halog. KW (ppbv)
<b>Air Liquide</b>									
Helium N46 <sup>1)</sup>	≥99,996	≤ 5	≤ 5	≤ 20	≤ 10	–	≤ 1	–	–
Helium N50 <sup>2)</sup>	≥99,999	≤ 3	≤ 1	≤ 4	≤ 1	–	≤ 0,5	–	–
Helium N60 <sup>3)</sup>	≥99,9999	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,1	–	–
ALPHAGAZ™ 1 Helium <sup>4)</sup>	≥99,999	≤ 2	≤ 2	≤ 5	–	–	≤ 0,2	–	–
ALPHAGAZ™ 2 Helium <sup>5)</sup>	≥99,9999	≤ 0,5	≤ 0,1	–	–	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,2 <sup>6)</sup>	≤ 1
Helium Electronic Grade 1	≥99,999	< 0,5	< 0,5	< 0,5	–	< 1	< 0,2	< 1,0 <sup>13)</sup>	–
Helium Electronic Grade 2	≥99,9995	< 1	< 1	< 5	–	< 0,5	< 0,2	< 1,0 <sup>13)</sup>	–
Ballongas <sup>7)</sup>	≥95,00	–	–	–	–	–	–	–	–
Helium 3 <sup>8)11)</sup>	≥99,995	< 3	< 1	< 10	< 10 <sup>10)</sup>	–	–	< 1 <sup>9)</sup>	–
<b>Air Products</b>									
Helium Chromatographic Grade	99,9999	< 0,2	< 1	< 1	< 0,5 <sup>12)</sup>	–	< 0,1	–	–
Helium GC Grade	99,999	< 0,02	< 0,01	< 5	–	–	< 0,1	< 0,5	–
Helium Research Grade	99,9999	< 0,2	< 1	< 1	< 0,5 <sup>12)</sup>	–	< 0,01	< 0,1 <sup>9)</sup>	–
Helium Ultra Pure Carrier Grade	99,995	< 1,0	< 1	< 5	–	–	< 0,5	–	–
Helium UHP/Zero Grade	99,999	< 3,5	< 4	–	–	–	< 0,5	–	–
Helium High Purity Grade	99,997	< 3,5	< 5	–	–	–	–	–	–
Helium Premium	99,9992	< 2	< 1	< 5	–	–	< 0,5	–	–
Helium BIP	99,9997	< 0,02	< 0,01	< 1	–	–	< 0,1	< 0,5	–
Helium BIP ECD	99,9997	< 0,02	< 0,01	< 1	–	–	< 0,1	< 0,5	< 1
Helium BIP Plus	99,99997	< 0,02	< 0,01	< 0,1	–	< 0,1	< 0,05	< 0,05	–

Fortsetzung Tab. 6.

	He (Vol.-%)	H <sub>2</sub> O (ppmv)	O <sub>2</sub> (ppmv)	N <sub>2</sub> (ppmv)	Ne (ppmv)	H <sub>2</sub> (ppmv)	KW (als CH <sub>4</sub> ) (ppmv)	CO + CO <sub>2</sub> (ppmv)	halog. KW (ppbv)
<b>Linde</b>									
Helium 4.6	≥ 99,996	≤ 5	≤ 5	–	–	–	–	–	–
Helium 5.0	≥ 99,999	≤ 3	≤ 2	≤ 5	–	–	≤ 0,5	–	–
Helium 6.0	≥ 99,9999	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	–	≤ 0,5	≤ 0,1	≤ 0,2 <sup>6)</sup>	–
Helium Pharmaceutical Grade	≥ 99,5	< 67	≤ 50	–	–	–	≤ 50	≤ 10 <sup>16)</sup>	–
Helium 5.0 Zero	≥ 99,999	≤ 3	≤ 2	≤ 5	–	–	≤ 0,2	≤ 1 <sup>13)</sup>	–
Helium 5.5 ECD	≥ 9,9995	≤ 1	≤ 1	≤ 2	–	–	≤ 0,1	≤ 1 <sup>13)</sup>	≤ 1
Helium 7.0	≥ 99,99999	≤ 0,05	≤ 0,03	–	–	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,06 <sup>17)</sup>	≤ 1
<b>Messer</b>									
Helium 4.6	> 99,996	< 5	< 5	< 20	–	–	< 1	–	–
Helium 5.0	> 99,999	< 3	< 1	< 4	–	–	< 0,2	–	–
Helium 5.6	> 99,9996	< 2	< 1	< 1	–	–	< 0,1	< 0,1	–
Helium ECD	> 99,9996	< 2	< 1	< 1	–	–	< 0,1	–	< 1
Helium 6.0	> 99,9999	< 0,5	< 0,5	< 0,5	–	–	< 0,1	< 0,1	–
<b>Praxair</b>									
Helium Research, 6.0	99,9999	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,4	<sup>12)</sup> –	≤ 0,5	≤ 0,1	≤ 0,2 <sup>6)</sup>	–
Helium Chromatography, 6.0	99,9999	≤ 0,2	≤ 0,5	–	–	–	≤ 0,1	≤ 0,2 <sup>6)</sup>	–
Helium Semiconductor, 6.0	99,9999	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,5	<sup>15)</sup> –	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,2 <sup>6)</sup>	–
Helium Trace Analytical, 5.5	99,9995	≤ 2	≤ 1	≤ 2	–	–	≤ 0,1	≤ 1,0 <sup>13)</sup>	≤ 0,5
Helium Semiconductor, 5.5	99,9995	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 2	–	–	≤ 0,5	≤ 1,0 <sup>13)</sup>	–
Helium Laser Star, 5.5	99,9995	≤ 1	≤ 1	–	–	–	≤ 0,1	–	≤ 0,05

Fortsetzung Tab. 6.

	He (Vol.-%)	H <sub>2</sub> O (ppmv)	O <sub>2</sub> (ppmv)	N <sub>2</sub> (ppmv)	Ne (ppmv)	H <sub>2</sub> (ppmv)	KW (als CH <sub>4</sub> ) (ppmv)	CO + CO <sub>2</sub> (ppmv)	halog. KW (ppbv)
<b>Praxair (Fortsetzung)</b>									
Helium UHP Plus, 5.5	99,9995	≤ 1	≤ 1	≤ 3	-	-	≤ 0,5	≤ 1,0 <sup>13)</sup>	-
Helium Semiconductor, 5.0	99,999	≤ 3	≤ 2	≤ 6	-	-	≤ 1	≤ 2 <sup>14)</sup>	-
Helium Ultra High Purity, 5.0	99,999	≤ 2	≤ 1	≤ 5	-	-	≤ 0,5	-	-
Helium Laser Star, 5.0	99,999	≤ 2	≤ 1	-	-	-	≤ 0,5	-	-
Helium Laser Star, 4.7	99,997	≤ 3	≤ 3	-	-	-	≤ 1	-	-
Helium Zero, 4.8	99,998	≤ 3	≤ 4	-	-	-	≤ 0,5	-	-
Helium High Purity, 4.8	99,998	≤ 5	≤ 5	-	-	-	-	-	-

Anm.: Teilweise existieren zu den gleichen Produkten Firmendatenblätter mit unterschiedlichen Spezifikationen!

- 1) Labor & Analytik: Lecktestmedium, Schweißen & Schneiden: Schutzgas zum WIG-, MIG-, Plasma- und Laserschweißen, Halbleiter-Industrie: Kühlung, Photovoltaik
- 2) Labor & Analytik: Anspruchsvolle Anwendungen, Trägergas für Gaschromatographie, Lecktestmedium, Schweißen & Schneiden: Schutzgas zum WIG-, MIG-, Plasma- und Laserschweißen, Halbleiter-Industrie: Kühlung, Photovoltaik
- 3) Labor & Analytik: Anspruchsvolle Anwendungen, Träger-, Spül- und Nullgas, Halbleiter-Industrie
- 4) Labor & Analytik: Trägergas (GC), Betriebsgas (MS, Elementaranalyse), Spül- (TOC, thermische Analyse) und Nullgas, Lecktestmedium, Halbleiter-Industrie: Kühlung
- 5) Labor & Analytik: Trägergas (GC), Nullgas, Spülgas, empfohlen für ECD (Elektroneneinfangdetektor), Halbleiter-Industrie
- 6) jeweils < 0,1 ppmv
- 7) Befüllen und Steigenlassen von Ballons, Ballon-Dekorationen
- 8) Labor & Forschung, Tieftemperaturphysik, Tieftemperatur-Kältemittel
- 9) nur CO<sub>2</sub>
- 10) Ar
- 11) Tritium: < 5 ppb Ci/l
- 12) Ar < 0,5 ppmv
- 13) jeweils < 0,5 ppmv
- 14) jeweils 1 ppmv
- 15) Ar < 0,1 ppmv
- 16) nur CO<sub>2</sub>
- 17) jeweils 0,03 ppmv

Tab. 7: Garantierte Qualitäten von Argon für verschiedene Verwendungen bzw. in verschiedenen Reinheitsgraden, nach Firmendatenblättern.

	Ar (Vol.-%)	H <sub>2</sub> O (ppmv)	O <sub>2</sub> (ppmv)	N <sub>2</sub> (ppmv)	KW (als CH <sub>4</sub> ) (ppmv)	CO+CO <sub>2</sub> (ppmv)	H <sub>2</sub> (ppmv)	halog. KW (ppbv)
<b>Air Liquide</b>								
Argon N46 <sup>1)</sup>	≥ 99,996	≤ 10	≤ 6	≤ 20	–	–	–	–
Argon N50 flüssig <sup>2)</sup>	≥ 99,999	≤ 0,2	< 2	< 5	< 0,2	–	–	–
Argon N50 Photovoltaik	≥ 99,999	≤ 1	≤ 2	≤ 5	≤ 0,5	–	–	–
Argon N60 <sup>3)</sup>	≥ 99,9999	≤ 0,5	≤ 0,1		≤ 0,1	≤ 0,2 <sup>4)</sup>	≤ 0,1	–
ALLNAT 6	≥ 99,999	≤ 2	≤ 3	≤ 5	–	–	–	–
ALPHAGAZ™ 1 Argon <sup>5)</sup>	≥ 99,999	≤ 2	≤ 2	≤ 5	≤ 0,2	≤ 0,2 <sup>6)</sup>	–	–
ALPHAGAZ™ 2 Argon <sup>7)</sup>	≥ 99,9999	≤ 0,5	≤ 0,1		≤ 0,1	≤ 0,2 <sup>4)</sup>	≤ 0,1	–
Electronic Grade 1	≥ 99,999	< 1	< 1	< 5	< 0,2	< 0,5 <sup>6)</sup>	< 1	–
Electronic Grade 2	≥ 99,9995	< 1	< 1	< 3	< 0,2	< 0,2 <sup>4)</sup>	< 0,1	–
Electronic Grade 3	≥ 99,9999	< 0,5	< 0,2	< 0,5	< 0,1	< 0,2	< 0,1	–
<b>Air Products</b>								
Argon flüssig	99,999	< 2	< 3	< 5	< 0,5	–	–	–
Argon Premium	99,9992	< 2	< 1,5	< 4	< 0,1	–	–	–
Argon BIP	99,9997	< 0,02	< 0,01	< 1	< 0,1	< 0,1	–	–
Argon BIP Plus	99,99996	< 0,02	< 0,01	< 0,3	< 0,05	< 0,05	–	–

Fortsetzung Tab. 7.

	Ar (Vol.-%)	H <sub>2</sub> O (ppmv)	O <sub>2</sub> (ppmv)	N <sub>2</sub> (ppmv)	KW (als CH <sub>4</sub> ) (ppmv)	CO+CO <sub>2</sub> (ppmv)	H <sub>2</sub> (ppmv)	halog. KW (ppbv)
<b>Linde</b>								
Argon 4.8	≥ 99,998	≤ 5	≤ 5	≤ 10	–	–	–	–
Argon 5.0	≥ 99,999	≤ 3	≤ 2	≤ 5	≤ 0,5	–	–	–
Argon 6.0	≥ 99,9999	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,1	≤ 0,2 <sup>4)</sup>	≤ 0,5	–
Argon Pharmaceutical Grade	≥ 99,998	≤ 5	–	≤ 10	≤ 1	–	–	–
Argon 5.0 Zero	≥ 99,999	≤ 3	≤ 2	≤ 5	≤ 0,2	≤ 2 <sup>9)</sup>	–	–
Argon 7.0	≥ 99,99999	≤ 0,05	≤ 0,03	–	≤ 0,03	≤ 0,06 <sup>10)</sup>	≤ 0,03	≤ 1
<b>Messer</b>								
Argon 4.8	> 99,998	< 4	< 3	< 10	< 0,2	< 0,2	–	–
Argon Spektro	> 99,998	< 2	< 2	–	< 0,2	< 0,2	–	–
Argon 5.0	> 99,999	< 3	< 2	< 5	< 0,1	< 0,1	–	–
Argon 5.7	> 99,9997	< 1	< 0,5	< 1	< 0,1	< 0,1	–	–
Argon 6.0	> 99,9999	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,1	< 0,1	–	–
<b>Praxair</b>								
Argon Semiconductor, 6.0	99,9999	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,1	≤ 0,2 <sup>4)</sup>	≤ 0,1	–
Argon Research, 6.0	99,9999	≤ 1	≤ 0,2	≤ 1	≤ 0,1	≤ 0,2 <sup>4)</sup>	–	–
Argon Chromatography, 6.0	99,9999	≤ 1	≤ 0,2	≤ 1	≤ 0,1	≤ 0,2 <sup>4)</sup>	–	–
Argon Trace Analytical, 5.5	99,9995	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 2	≤ 0,5	≤ 0,2 <sup>4)</sup>	–	–
Argon Semiconductor, 5.5	99,9995	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 2	≤ 0,5	≤ 1 <sup>8)</sup>	≤ 0,5	–
Argon Carrier, 5.5	99,9995	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 5	≤ 0,3	≤ 2 <sup>9)</sup>	–	–
Argon UHP Plus, 5.3	99,9993	≤ 1	≤ 1	–	≤ 0,5	≤ 2 <sup>9)</sup>	–	–

Fortsetzung Tab. 7.

	Ar (Vol.-%)	H <sub>2</sub> O (ppmv)	O <sub>2</sub> (ppmv)	N <sub>2</sub> (ppmv)	KW (als CH <sub>4</sub> ) (ppmv)	CO+CO <sub>2</sub> (ppmv)	H <sub>2</sub> (ppmv)	halog. KW (ppbv)
<b>Praxair (Fortsetzung)</b>								
Argon Ultra High Purity, 5.0	99,999	≤ 3	≤ 2	–	≤ 0,5	–	–	–
Argon Semiconductor, 5.0	99,999	≤ 3	≤ 2	≤ 6	≤ 1	≤ 2 <sup>9)</sup>	–	–
Argon High Purity, 4.8	99,998	≤ 3	≤ 4	–	–	–	–	–
Argon Zero, 4.8	99,998	≤ 3	≤ 4	–	≤ 0,5	–	–	–

Anm.: Teilweise existieren zu den gleichen Produkten Firmendatenblätter mit unterschiedlichen Spezifikationen!

- 1) Zum Schweißen & Schneiden: Schutzgas zum MIG-, WIG- und Plasmaschweißen; Plasmaschneiden
- 2) Halbleiter-Industrie: Inertisierung, Spülung, Härten, Gasentladung bei der Metallisierung (Sputtern), Schmelzmetallurgie: Inertisierung, Spülung, Labor & Analytik: Anspruchsvolle Anwendungen, Schutz- und Plasmagas für ICP-Geräte, Betriebsgas für Funkenspektrometrie, Schweißen & Schneiden: Schutzgas zum MIG-, WIG- und Plasmaschweißen; Plasmaschneiden
- 3) Halbleiter & Photovoltaik
- 4) jeweils < 0,1 ppmv
- 5) Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe, Glühen, Hochdruckgasabschrecken und Inertisieren, Labor & Analytik: Trägergas (GC), Spül- und Nullgas, Betriebsgas (Funkenspektrometrie, Plasmagas bei ICP, Schutzgas für AAS), Halbleiter-Industrie: Inertisierung, Spülung, Härten, Gasentladung bei der Metallisierung (Sputtern), Schmelzmetallurgie: Inertisierung, Spülung
- 6) als CO<sub>2</sub>
- 7) Labor & Analytik: Trägergas (GC), Spül- und Nullgas, Betriebsgas (Plasmagas bei ICP, Schutzgas für AAS)
- 8) jeweils 0,5 ppmv
- 9) jeweils 1,0 ppmv
- 10) jeweils 0,03 ppmv

Tab. 8: Garantierte Qualitäten von Neon für verschiedene Verwendungen bzw. in verschiedenen Reinheitsgraden, nach Firmendatenblättern.

	Ne (Vol.-%)	H <sub>2</sub> O (ppmv)	O <sub>2</sub> (ppmv)	N <sub>2</sub> (ppmv)	H <sub>2</sub> (ppmv)	He (ppmv)	Ar (ppmv)	Kr (ppmv)	KW (als CH <sub>4</sub> ) (ppmv)	CO+CO <sub>2</sub> (ppmv)
<b>Air Liquide</b>										
Neon N40 <sup>1)</sup>	≥ 99,99	< 2	< 1	< 5	–	< 100	–	–	–	–
Neon N50 <sup>1)</sup>	≥ 99,999	< 1	< 1	< 2	–	< 6	–	–	< 0,1	< 0,5
Neon Research	≥ 99,996	< 1	< 1	–	–	–	–	–	–	< 2 <sup>2)</sup>
Neon Research Plus	≥ 99,999	< 1	< 1	< 2	< 1	< 8	–	< 2	< 0,05	< 2 <sup>2)</sup>
<b>Linde</b>										
Neon Research	99,999	< 0,5	< 0,5	< 1	–	< 8	–	–	< 0,5	< 1 <sup>3)</sup>
Neon UHP	99,996	< 1	< 1	< 4	–	< 35	–	–	< 1	< 2 <sup>2)</sup>
<b>Messer</b>										
Neon 5.0	> 99,999	< 1	< 1	< 2	–	< 6	–	–	< 0,1	< 0,5
<b>Praxair</b>										
Neon Research, 5.0	99,999	≤ 1	≤ 1	≤ 5	–	≤ 4	≤ 1	–	≤ 0,5	–

Anm.: Teilweise existieren zu den gleichen Produkten Firmendatenblätter mit unterschiedlichen Spezifikationen!

1) Labor & Forschung, Lichttechnik

2) jeweils < 1,0 ppmv.

3) jeweils < 0,5 ppmv



**Tab. 9: Garantierte Qualitäten von Krypton für verschiedene Verwendungen bzw. in verschiedenen Reinheitsgraden, nach Firmendatenblättern.**

	Kr (Vol.-%)	H <sub>2</sub> O (ppmv)	O <sub>2</sub> (ppmv)	N <sub>2</sub> (ppmv)	Xe (ppmv)	Ar (ppmv)	H <sub>2</sub> (ppmv)	CF <sub>4</sub> (ppmv)	KW (ppmv)	CO+CO <sub>2</sub> (ppmv)
<b>Air Liquide</b>										
Krypton N40 <sup>1)</sup>	≥ 99,99	< 5	< 2	< 20	< 50	< 10	–	–	< 1	–
Krypton N48 <sup>2)</sup>	≥ 99,998	< 1	< 0,5	< 5	< 5	< 5	–	< 1	< 0,5	–
Krypton Research Plus	≥ 99,999	< 1	< 1	< 2	< 5	< 1	< 1	< 0,5	< 0,5	< 1
Krypton Insulated Glass	≥ 99	< 10	< 1 %	< 1 %	< 1 %					
<b>Linde</b>										
Krypton Research	99,995	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 2	≤ 5	≤ 2	≤ 0,5	≤ 0,5	–	≤ 1,5
Krypton UHP	99,97	≤ 1	≤ 1	≤ 5	≤ 25	≤ 2	≤ 2	≤ 1	–	≤ 1 <sup>3)</sup>
<b>Messer</b>										
Krypton 4.0	> 99,99	< 5	< 2	< 20	< 50	< 10	–	–	< 1	–
Krypton 5.0	> 99,999	< 1	< 0,5	< 5	< 5	< 1	–	< 0,5	< 0,5	–
<b>Praxair</b>										
Krypton Research, 5.0	99,999	≤ 3	≤ 2	≤ 5	< 4	< 4	< 4	< 3	< 0,2	< 0,5 <sup>3)</sup>

Anm.: Teilweise existieren zu den gleichen Produkten Firmendatenblätter mit unterschiedlichen Spezifikationen!

1) Labor & Forschung, Glasindustrie: Füllgas für Isoliereiben, Lichttechnik, Excimer-Laser, Oberflächenveredelung

2) Labor & Forschung, Glasindustrie: Füllgas für Isoliereiben, Lichttechnik, Excimer-Laser

3) nur CO<sub>2</sub>

4) CO 1,0 ppmv

Tab. 10: Garantierte Qualitäten von Xenon für verschiedene Verwendungen bzw. in verschiedenen Reinheitsgraden, nach Firmendatenblättern.

	Xe (Vol.-%)	H <sub>2</sub> O (ppmv)	O <sub>2</sub> (ppmv)	N <sub>2</sub> (ppmv)	Ar (ppmv)	Kr (ppmv)	H <sub>2</sub> (ppmv)	CF <sub>4</sub> (ppmv)	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> (ppmv)	SF <sub>6</sub> (ppmv)	KW (ppmv)	CO+CO <sub>2</sub> (ppmv)
<b>Air Liquide</b>												
Xenon N40 <sup>1)</sup>	≥ 99,99	< 5	< 2	< 10	< 10	< 50	–	–	–	–	< 1	–
Xenon N48 <sup>1)</sup>	≥ 99,998	< 1	< 0,5	< 5	< 5	< 8	–	< 0,5	–	–	< 0,1	–
Xenon N48 halogenfrei <sup>2)</sup>	≥ 99,998	< 1	< 0,5	< 5	< 5	< 8	–	< 0,1	–	< 0,1	< 0,1	–
Xenon Research Plus	≥ 99,999	< 1	< 1	< 2	< 1	< 5	< 1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,5	< 1
<b>Linde</b>												
Xenon 5.0	≥ 99,999	≤ 2	< 0,5	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	–	≤ 0,5	≤ 1
Xenon Research	99,999	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 2	≤ 1	≤ 5	≤ 2	≤ 0,5	–	–	≤ 0,5	≤ 1 <sup>4)</sup>
Xenon UHP	99,995	≤ 1	≤ 1	≤ 5	≤ 10	≤ 25	≤ 5	≤ 1	–	–	≤ 1	≤ 2 <sup>4)</sup>
Propulsion	99,9995	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 1	≤ 1	–	≤ 1	≤ 0,1	–	–	≤ 0,1	≤ 0,2 <sup>5)</sup>
<b>Messer</b>												
Xenon 4.8	> 99,998	< 1	< 0,5	< 5	< 5	< 8	–	< 1	–	–	< 0,1	–
<b>Praxair</b>												
Xenon Aerospace Grade, 5.5	99,9995	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 1	≤ 1	≤ 2	≤ 2	< 0,1	–	–	≤ 0,1	≤ 0,4 <sup>3)</sup>
Xenon Research, 5.0	99,999	≤ 2	≤ 1	≤ 5	–	–	–	–	–	–	≤ 1	≤ 1 <sup>4)</sup>

Anm.: Teilweise existieren zu den gleichen Produkten Firmendatenblätter mit unterschiedlichen Spezifikationen!

1) Labor & Forschung, Halbleiterindustrie: Elektronenlieferant bei der Ionenimplantation, Lichttechnik, Luftfahrtindustrie

2) Labor & Forschung, Halbleiterindustrie: Elektronenlieferant bei der Ionenimplantation, Lichttechnik

3) jeweils 0,2 ppmv

4) nur CO<sub>2</sub>

5) jeweils 0, 1 ppmv

### 3.7 Anforderungen an Heliumvorkommen

Ausgehend von den jahrzehntelangen Erfahrungen in den USA galt über lange Zeit als weltweite Richtlinie, dass Erdgasvorkommen  $> 0,3$  Vol.-% He enthalten müssen, damit sich eine wirtschaftliche Abtrennung des Heliums lohnt. YAKUTSENI (2014) geht dagegen für Vorkommen außerhalb der USA von einem Mindestgehalt von  $0,15$  Vol.-% He aus. Unberücksichtigt dabei bleiben die relativ großen Mindestmengen an verfügbarem Helium, ohne die sich die Errichtung einer stationären und teuren Aufbereitungsanlage erst gar nicht rechnet.

Ist die Gewinnung von Helium aus strategischen Gesichtspunkten politisch gewollt, können die Gehalte an Helium in Erdgasvorkommen, aus denen dieses Edelgas abgetrennt werden soll, auch wesentlich niedriger liegen. Das einzige in China zur Heliumgewinnung genutzte Erdgasfeld besitzt einen durchschnittlichen Heliumgehalt von  $0,16$  Vol.-% (s. Anhang: China), das ebenfalls zur Heliumgewinnung in Russland genutzte Erdgaskondensatfeld Orenburgskoye von sogar nur  $0,055$  Vol.-% He.

Ein Vergleich der Heliumgehalte mit der Tonnage (Grade-Tonnage-Diagramm) der sich derzeit in Gewinnung befindlichen heliumreichen Erdgasvorkommen im Rahmen dieser Studie ist leider nicht möglich, da belastbare und publizierte Daten sowohl über die ursprünglichen, als auch über die noch verfügbaren Erdgas- und Heliummengen der meisten US-amerikanischen Erdgasvorkommen nicht verfügbar sind (s. Anhang: USA).

Vor allem die Gewinnung von Helium aus Restgasen von Erdgasverflüssigungsanlagen, aber auch die gestiegenen Preise für Helium haben mittlerweile weltweit zu einer Spreizung der Mindestvoraussetzungen geführt. Die US-amerikanische Firma IACX Energy LLC (s. Anhang: USA) hat sich darauf spezialisiert, kleine mobile Heliumanlagen an Förderstellen von heliumreichen Erdgasvorkommen zu errichten. Hierbei ist weniger die verfügbare Gesamtheliumtonnage, als vielmehr ein möglichst hoher Heliumgehalt von mehreren Volumenprozent von Bedeutung. Nach eigenen Angaben hat IACX Energy derzeit sieben solcher Heliumanlagen in den USA in Betrieb (Stand: Frühjahr 2018).

Für Erdgase, die derzeit bzw. geplant in LNG-Anlagen verflüssigt und aus deren Restgasen Helium abgetrennt werden sollen, geht man auf Basis des North-Dome-Erdgasfeldes in Katar von Mindestgehalten von  $0,05$  Vol.-% He aus.

Das in die Heliumanlage eingespeiste Restgas muss mindestens  $3,0$  Vol.-% He besitzen, z. B. beinhaltet das in der Heliumanlage in Darwin (s. Anhang: Australien) zur Aufbereitung von Helium genutzte Restgas  $3,0$  Vol.-% He, das in der Skikda-Heliumanlage in Algerien (s. Anhang: Algerien) genutzte Restgas jedoch  $4,6$  Vol.-% He (D.N. BACIU, Linde AG, pers. Mitteilung). Damit sich eine Abtrennung des Heliums auch langfristig rechnet, müssen natürlich auch die LNG-Anlagen durch möglichst große Erdgasvorkommen versorgt werden.

Für eine diesbezügliche Heliumgewinnung werden bzw. sollen genutzt werden (vgl. Anhang):

- Algerien: Hassi-R'Mel-Feld mit  $2.415$  Mrd.  $m^3$  Erdgas mit durchschnittlich  $0,19$  % He
- Australien: Bayu-Undan-Feld mit  $88$  Mrd.  $m^3$  Erdgas mit  $0,013 - 0,28$  % He, durchschnittlich  $0,18$  % He
- Katar: North-Dome-Feld mit  $34.200$  Mrd.  $m^3$  Erdgas mit durchschnittlich  $0,05$  % He
- Russland (geplant): Kovyktinskoye-Feld mit  $1.563$  Mrd.  $m^3$  Erdgas mit  $0,24 - 0,28$  % He
- Russland (geplant): Srednebotuobinskoye-Feld mit  $182$  Mrd.  $m^3$  Erdgas mit  $0,2 - 0,6$  % He
- Russland (geplant): Chayandinskoye-Feld mit  $1.000$  Mrd.  $m^3$  Erdgas mit  $0,50 - 0,54$  % He



**Abb. 21:** Heliumanlage von IACX Energy auf dem Harley-Dome-Erdgasfeld mit  $\varnothing 7,0$  % He in Utah, Foto: [www.iacx.com](http://www.iacx.com).

## 4 Nachfrage

### 4.1 Helium

Die historische Entwicklung der Nachfrage nach Helium seit dem Ersten Weltkrieg ist im Kapitel USA (s. Anhang) zusammengefasst. Einen Überblick über den Zeitraum 1990 – 2015 gibt zudem KORNBLUTH (2015). Die folgende Darstellung der Nachfrageentwicklung seit dem Jahr 2000 beruht auf der Auswertung verschiedener Beiträge in der Fachzeitschrift GASWORLD sowie Analysen meist US-amerikanischer Industriegasexperten (vgl. dazu Kapitel 6.1):

Im Jahr 2001 soll die weltweite Nachfrage nach Helium bei 159 Mio. m<sup>3</sup> gelegen haben.

Im Jahr 2004 betrug das Nachfragewachstum 4 – 5 %, sank im Jahr 2006 auf 2 – 3 % und war im Jahr 2007 sogar negativ. In den Jahren 2006/2007 soll dennoch eine weltweite Knappheit von Helium bestanden haben; diese wird von einigen US-amerikanischen Analysten als „Helium Shortage 1.0“ bezeichnet.

Im Jahr 2008 sollen weltweit rund 175 Mio. m<sup>3</sup> Helium nachgefragt worden sein, davon ca. 44 % in den USA, 26 % in (West)Europa, 2 % im pazifischen Raum (China, Südostasien) und 8 % in der restlichen Welt, wo das Nachfragewachstum mit 7 – 8 %/a am höchsten ausfiel.

Aufgrund des weltweiten Wirtschaftsrückgangs soll die Nachfrage im Jahr 2009 auf geschätzte 158 Mio. m<sup>3</sup> Helium gesunken sein. Hiervon entfielen 44 % auf die USA, 24 % auf den pazifischen Raum, 21 % auf Europa, und 11 % auf die restliche Welt, wo das Nachfragewachstum mit 4 – 5 %/a weiterhin überdurchschnittlich war.

Bei einem vermeintlichen Angebot von 166 Mio. m<sup>3</sup> (vgl. Kapitel 5.1 und 6.1) lag die Heliumnachfrage im Jahr 2010 vermutlich bereits wieder bei 171 Mio. m<sup>3</sup>. Diese Nachfrage verteilte sich zu 39 % auf die USA, 27 % auf den pazifischen Raum, 21 % auf Europa, und 13 % auf die restliche Welt, wo das Nachfragewachstum mit 4 – 5 %/a weiterhin hoch war. Für die kommenden Jahre bis 2012 und die gesamte Welt wurde dagegen ein weltweites Nachfragewachstum von nur 2 – 3 %/a vorhergesagt.

Hätte im Jahr 2011 ausreichend Helium zur Verfügung gestanden, wären im Jahr 2011 vermutlich 178 Mio. m<sup>3</sup> Helium verbraucht worden. So waren es geschätzt nur 172 Mio. m<sup>3</sup>. Dieser Verbrauch lag zu 36 % in den USA, zu 28 % im pazifischen Raum, zu 22 % in Europa und zu 14 % in der restlichen Welt, letztere Region wiederum mit einem Nachfragewachstum von 4 – 5 %/a.

Ab Mitte des Jahres 2011 bis in das Jahr 2013 hinein soll erneut eine weltweite Knappheit an Helium bestanden haben (vgl. Kap. 5.1 und 6.1), von einigen US-amerikanischen Analysten mit „Helium Shortage 2.0“ bezeichnet. Grund war nach übereinstimmenden Analystenmeinungen das geringe weltweite Heliumangebot, nicht jedoch eine erhöhte Nachfrage nach diesem Edelgas. Nach KORNBLUTH (2015) lag damals das Angebot 20 % und zeitweise sogar mehr unter der Nachfrage. Für Deutschland berichten Gaseunternehmen (ANONYM, pers. Mitteilung) sehr unterschiedlich teils von einer Heliumverknappung im Zeitraum 2011 – 2013, also wie in den USA, teils aber auch nur im Jahr 2013. Nach Schätzungen von GUBLER et al. (2016) sind während bzw. aufgrund des „Helium Shortage 2011 – 2013“ ca. 15 – 20 % der weltweiten Heliumnachfrage durch Substitution und Recycling irreversibel verloren gegangen.

In den Jahren 2012 und 2013 sollen weltweit jeweils 175 Mio. m<sup>3</sup> Helium nachgefragt worden sein. Nach GARVEY (2013) entsprach im Jahr 2013 die Nachfrage dem verfügbaren Angebot. Die Nachfrage verteilte sich zu 32 % auf die USA, zu 31 % auf den pazifischen Raum, zu 21 % auf Europa und zu 16 % auf die restliche Welt, wo das Nachfragewachstum auf 3 – 5 %/a leicht sank.

Der US-amerikanische Heliumexperte PHIL KORNBLUTH (2015) bezeichnete das Datum 7.10.2013 als „Helium Cliff“, das es zu überwinden galt. An diesem Datum endete die bisherige US-Gesetzgebung zur Heliumbevorratung und somit auch die finanzielle Unterstützung des US Bureau of Land Management zur Unterhaltung des US-Heliumspeichernetzes. Das „Helium Cliff“ konnte durch Unterzeichnung des „Helium Stewardship Act of 2013“ überwunden werden (s. Anhang: USA).

Im Jahr 2014 soll die weltweite Nachfrage nach Helium auf 160 – 171 Mio. m<sup>3</sup> (je nach Analystenmeinung) zurückgegangen sein. Das Angebot soll bei rund 172 Mio. m<sup>3</sup> gelegen haben (vgl. Kap. 5.1).

Die Nachfrage lag zu 32 % in den USA, zu 31 % im pazifischen Raum, mit einem dortigen besonders starken Nachfragerwachstum von 5 – 7 %/a, zu 21 % in Europa, zu 12 % in Südamerika und zu 4 % in der restlichen Welt (Afrika, Mittlerer Osten, Indien). Das weltweite Nachfragerwachstum in 2014 wurde, wie auch prognostizierend für 2015, auf 2 – 3 %/a geschätzt. Der weltweite Rückgang der Nachfrage wurde mit verstärktem Recycling von gasförmigem Helium, höherer Effizienz und Substitution begründet. Nach KORNBLUTH (2016) sollen diese Effekte geschätzt ca. 10 % zum Rückgang der Nachfrage beigetragen haben.

In den Jahren 2015 und 2016 bestand angeblich ein Überangebot an Helium (vgl. Kap. 6.1). Die Nachfrage soll bei 164 Mio. m<sup>3</sup> und damit rund 2 Mio. m<sup>3</sup> unter dem Angebot von 166 Mio. m<sup>3</sup> gelegen haben. Das überschüssige Helium wurde in ISO Containern (s. Kap. 5.1) zwischengelagert und 2016 wurden darüber hinaus drei an das Speichernetz des US Bureau of Land Management (USBLM) angeschlossene Heliumanlagen gestundet (s. Anhang: USA). Im Jahr 2016 verteilte sich die Nachfrage zu 32 % auf die USA, zu 31 % auf den pazifischen Raum, dort weiterhin mit einem hohen Nachfragerwachstum von 5 – 7 %/a, zu 20 % auf Europa, zu 13 % auf Südamerika und zu 4 % auf die restliche Welt. Das weltweite Nachfragerwachstum lag wie in den Jahren zuvor bei 2 – 3 %/a.

Im Jahr 2017 lag die weltweite Nachfrage nach Helium bei vermuteten 166 Mio. m<sup>3</sup> und entsprach damit nach GARVEY (2017) dem Angebot. Die Nachfrage bestand zu 32 % in den USA, zu 32 % im pazifischen Raum, zu 19 % in Europa, zu 13 % in Südamerika und zu 4 % in der restlichen

Welt. Das weltweite Nachfragerwachstum wurde auf niedrige 1 %/a geschätzt und auf 1,5 %/a für die kommenden Jahre vorhergesagt. Die Katarikrise im Juni 2017 (s. Anhang: Katar) führte, soweit bekannt, nicht zu einem Einbruch der Heliumnachfrage.

Nach GUBLER et al. (2016) betrug das weltweite Wachstum der Nachfrage nach Helium im Zeitraum 2010 – 2015 nur 0,7 %/a, sollte aber im Zeitraum 2015 – 2020 auf 2 %/a anwachsen. Für einige asiatische und andere Länder wurde jedoch ein fast doppelt so hohes Nachfragerwachstum vorhergesagt. Dieses regional starke Nachfragerwachstum soll auf China, Indien, Südkorea und Taiwan sowie den Mittleren Osten aufgrund der dort ansässigen Elektronik- bzw. Halbleiterindustrie sowie den dortigen Produktionsstätten für LCDs und optische Glasfasern begrenzt sein.

Nach übereinstimmender Meinung aller Experten soll jedoch zumindest der Bedarf nach flüssigem Helium für MRTs in den kommenden Jahren ungefähr gleich bleiben. Zwar benötigen moderne MRTs immer weniger Helium (vgl. Kap. 3.4 und 3.5), dafür werden in den Schwellenländern Indien, China und Brasilien immer mehr Kliniken mit MRTs ausgestattet. Mittelfristig werden sich so die Auswirkungen eines geringeren Heliumbedarfs pro Gerät bei zugleich immer mehr Geräten ungefähr aufheben.

Die weltweite Nachfrage nach <sup>3</sup>He wird vom US Department of Energy auf jährlich 70.000 l (= 70 m<sup>3</sup>) geschätzt. Diese soll sich in den nächsten Jahren aufgrund der Substitution von <sup>3</sup>He in Neutronendetektoren für Sicherheitszwecke erstmal halbieren (vgl. Kap. 3.2.1), bevor mit Fertigstel-

**Tab. 11: Absolute weltweite Nachfrage nach Helium (in Mio. m<sup>3</sup>) und weltweites Nachfragerwachstum nach Helium (in %/a) nach Analysen US-amerikanischer Experten, zusammengetragen aus verschiedenen Beiträgen in der Fachzeitschrift gasworld.**

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
<b>Nachfrage</b>	159							175
<b>Wachstum</b>				4 – 5		2 – 3	< 0	
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Nachfrage</b>	171	178	175	175	160 – 171	164	164	166
<b>Wachstum</b>					2 – 3	2 – 3	2 – 3	1

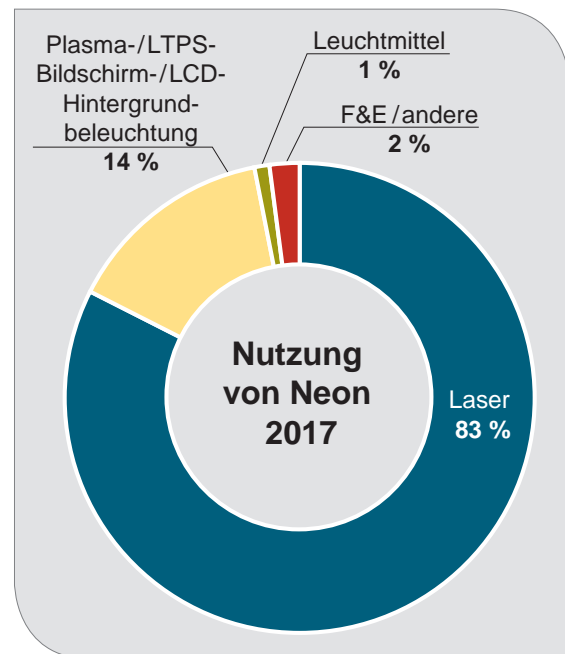
lung der Spallation-Neutron-Source-Einrichtung im Oak-Ridge-National-Laboratory in Tennessee ein erneuter deutlicher Nachfragezuwachs erwartet wird (GUBLER et al. 2016).

## 4.2 Neon

Die folgende Kurzbeschreibung der Nachfrageentwicklung von Neon beruht vollständig auf den Beiträgen von Richard Betzendahl – Betzendahl Gas Consultants LLC – in der Fachzeitschrift GAS-WORLD (s. Literaturverzeichnis) und wurde aktualisiert nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018):

Seit den 1990er Jahren ist die Nachfrage nach Neon aufgrund seines wachsenden Einsatzes in Lasern (vgl. Kap. 3.2.2) kontinuierlich gewachsen. Anfang der 2000er Jahre setzte sich die erhöhte Nachfrage fort, nicht nur durch den Einsatz von Neon in Lasern, sondern damals auch in Plasmafernsehern. Im Jahr 2009 brach die Nachfrage nach Plasmafernsehern jedoch relativ abrupt ein, was sich für einige Jahre auch auf die Neonnachfrage auswirkte.

In absoluten Zahlen soll die Neonnachfrage 1990 bei rund 300 Mio. l (= 300.000 m<sup>3</sup>) (Anm.: in der Gaseindustrie wird bei Neon, Krypton und Xenon häufig ein vereinfachter Umrechnungsfaktor von 1 m<sup>3</sup> = 1.000 l verwendet, obwohl die echten Flüssigkeiten ganz anders sind, vgl. Tab. 1), im Jahr 1995 bei 214 Mio. l, im Jahr 2008 bei 425 Mio. l, im Jahr 2012 bei 352 Mio. l und im Jahr 2015 bei 477 Mio. l Rohneon gelegen haben. Rohneon enthält durchschnittlich 50 % Neon. Allein im Zeitraum 2014 – 2015 betrug das Nachfragewachstum 12 %/a, wodurch die Nachfrage das Angebot in diesen Jahren erstmalig überschritt. Zusätzlich bevorrateten sich die Nutzer von Neon in diesem Zeitraum zu allen Preisen mit diesem Edelgas, um ihre Produktion auf jeden Fall aufrecht zu erhalten (vgl. Kap. 7). Mittlerweile hat sich der Preis aufgrund eines starken Angebotzuwachses und kurzfristiger Recyclerfolge (vgl. Kap. 3.4) stabilisiert, jedoch ist die Nachfrage weiterhin sehr einseitig ausgerichtet. 80 – 90 % der weltweiten Neonnachfrage gehen auf den Bedarf für Laser bzw. 70 – 75 % der Neonnachfrage auf den Laserbedarf allein der Halbleiterindustrie zurück – ein Absatzmarkt, der mit 8 – 10 %/a, mit Schwerpunkt in China, weiter wächst. Für 2018 wird derzeit eine weltweite Nachfrage von ca. 690 Mio. l



**Abb. 22: Verteilung der weltweiten Nachfrage nach Neon im Jahr 2017 (SPIRITUS & BETZENDAHL 2018).**

Rohneon, für die Jahre 2020 – 2022 von sogar 720 – 760 Mio. l Rohneon vorhergesagt.

Nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) stieg die weltweite Nachfrage nach Neon zwischen 2000 und 2015 um jährlich 6,3 %, zwischen 2012 und 2017 sogar um jährlich 9,0 % an. Die weltweite Gesamtnachfrage nach Neon soll in den Jahren 2017 – 2022 um weitere 6,7 % jährlich anwachsen. Markttreiber, zumindest bis zum Jahr 2020, soll der Einsatz von Neon in der extrem ultrakurzwelligen Fotolithographie (EUV) für die Halbleiterfertigung sein. Nur der bekannteste, aber bereits jetzt kleinste Teilmarkt, Neonbeleuchtung, soll in den nächsten Jahren weiter deutlich abnehmen (2017 – 2022: -5,6 %)

## 4.3 Argon

Im Gegensatz zu Helium, aber auch anders als zu den viel selteneren Edelgasen Neon, Krypton und Xenon, gibt es in den einschlägigen Fachpublikationen kaum Daten oder Analysen zur weltweiten Nachfrageentwicklung von Argon. Da Argon in großen Mengen, aber keineswegs ausschließlich, in der Herstellung und Bearbeitung von Stahl benötigt wird, korreliert die Nachfrage nach diesem Edelgas in etwa mit der weltweiten Stahlproduktion (s. Abb. 23).

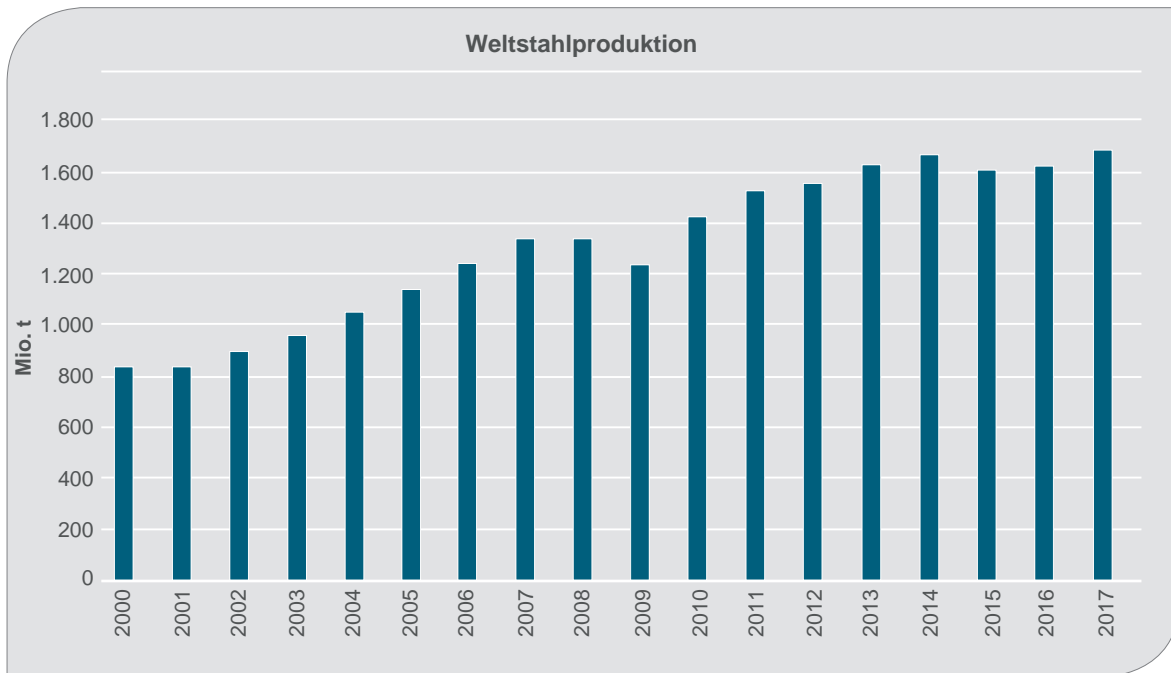


Abb. 23: Weltstahlproduktion in Mio. t, Quelle: World Steel Association.

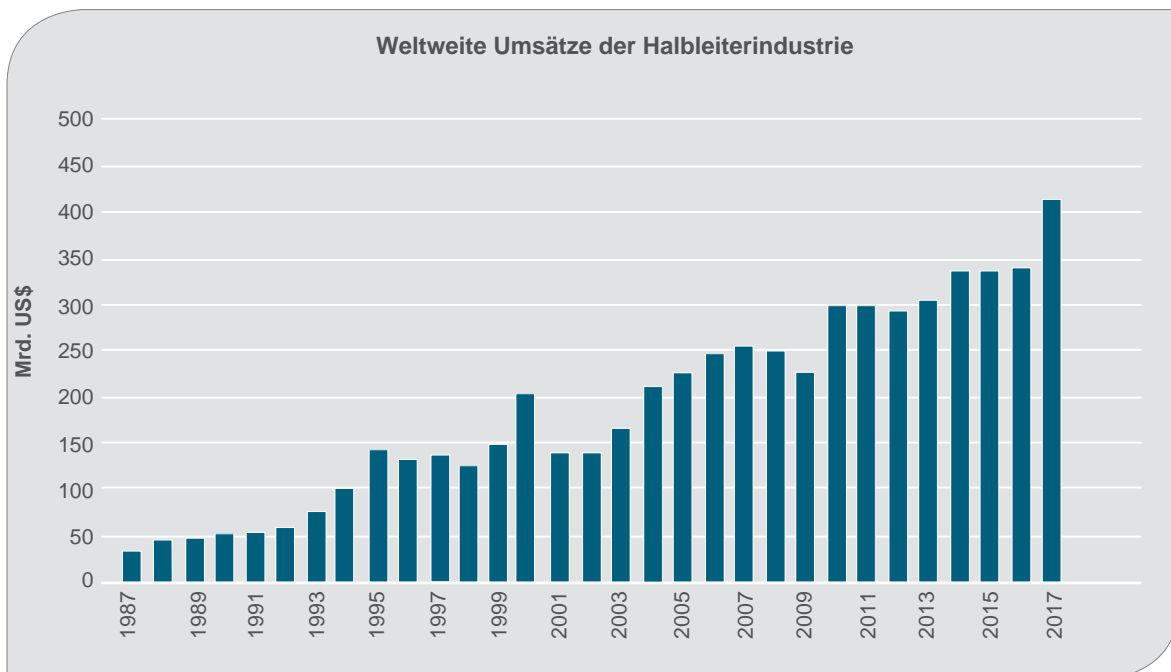


Abb. 24: Weltweite Umsätze der Halbleiterindustrie in Mrd. US\$, Quelle: Semiconductor Industry Association.

Ergänzend sind die Entwicklung der weltweiten Halbleiterindustrie (Abb. 24), in der Argon als Schutzgas benötigt wird, sowie die Substitutionsanstrengungen der Heliumverbraucher seit der Heliumknappheit 2011 – 2013 zu berücksichtigen, da diese Helium verstärkt durch Argon substituieren (vgl. Kap. 3.5 und 6.1). Als Fazit davon steigt

die Nachfrage nach Argon auch außerhalb der stahlproduzierenden und -verarbeitenden Industrie kontinuierlich an, weswegen die großen multinationalen Gasunternehmen versuchen, ihre Argonkapazitäten zu maximieren (Kap. 5.3).

Nach SURESH et al. (2016) wurden im Jahr 2015 in Japan rund 251 Mio. m<sup>3</sup> Argon verbraucht, die zu 30 % zur Verarbeitung von Metallprodukten (Schutzgas beim Schweißen), zu 23 % in der Primärproduktion von Metallen (Stahlproduktion), zu 17 % im Elektronikbereich (vor allem in der Halbleiterindustrie), zu 2 % in der chemischen Industrie und zu 28 % in anderen Verwendungsbereichen eingesetzt wurden.

In den USA verteilte sich die Nachfrage nach Argon im Jahr 2015 zu rund 47 % auf Schutzgas zum Schweißen, zu 29 % auf die Stahlproduktion, zu 12 % auf die Elektronikindustrie/Halbleiterindustrie/Solarzellenproduktion, zu 3 % auf die Herstellung von Beleuchtungskörpern und zu 9 % auf andere Bereiche (SURESH et al. 2016). Im Jahr 2016 benötigte die US-Industrie ca. 810 Mio. m<sup>3</sup> Argon.

Ebenfalls nach SURESH et al. (2016) wurden im Jahr 2015 in China rund 1,74 Mrd. m<sup>3</sup> Argon nachgefragt, wobei das Nachfragewachstum in den kommenden Jahren bei 4,5 %/a liegen soll. Die Nachfrage verteilte sich im Jahr 2015 zu 46 % auf die Stahlproduktion, zu 21 % auf Schutzgas zum Schweißen, zu 15 % auf den Elektronikbereich, zu 10 % auf den Beleuchtungsbereich und zu 8 % auf andere Verwendungsbereiche.

In Westeuropa sollen 2015 rund 1,3 Mrd. m<sup>3</sup> und in Osteuropa 355 Mio. m<sup>3</sup> Argon verbraucht worden sein. Nach Erhebungen für diese Studie lag im Jahr 2017 der deutsche Nettoverbrauch bei rund 180 Mio. m<sup>3</sup> (s. Kap. 8.2). Die Verbräuche im Rest der Welt sind unbekannt, doch kann der weltweite Argonbedarf auf Basis der o. g. Verbräuche auf > 5 Mrd. m<sup>3</sup>/a geschätzt werden.

#### 4.4 Krypton

Die folgende Kurzbeschreibung der Nachfrageentwicklung von Krypton beruht ebenfalls vollständig auf den Beiträgen von Richard Betzendahl – Betzendahl Gas Consultants LLC – in der Fachzeitschrift GASWORLD (s. Literaturverzeichnis), aktualisiert nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018):

Im Jahr 1990 lag die weltweite Nachfrage nach Krypton bei 17 Mio. l (= 17.000 m<sup>3</sup>) (Anm.: in der Gaseindustrie wird bei Neon, Krypton und Xenon häufig ein vereinfachter Umrechnungsfaktor

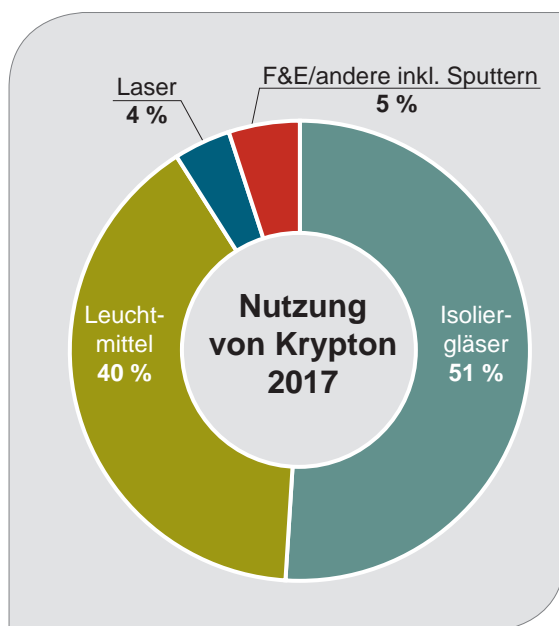
von 1 m<sup>3</sup> = 1.000 l verwendet, obwohl die echten Flüssigdichten ganz anders sind, vgl. Tab. 1) und stieg bis zum Jahr 1997 auf 39 Mio. l, also mehr als das Doppelte, an. Seit Mitte der 1990er Jahre wuchs der Absatzmarkt für Krypton v. a. in Europa, da dieses (neben dem deutlich günstigeren Argon) das bevorzugte Füllgas in Isolierglasfenstern ist. Der weltweite Anteil von Krypton zur Isolierglasproduktion wurde damals wie heute auf 40 – 50 % des Gesamtabsatzmarktes geschätzt. Bis zum Jahr 2005 hatte sich so die Nachfrage auf 82 Mio. l erneut verdoppelt, wobei in diesem Jahr 48 % der Kryptonproduktion in die Isolierglasherstellung ging. Als aufgrund der Weltfinanzkrise ab Ende 2008 der Bauboom in den USA ins Stocken geriet und billiges Heizöl keinen Grund mehr zur Energieeinsparung bot, brach der Isolierglasabsatz kurzfristig um 30 – 50 % ein und drückte damit auch massiv die Nachfrage nach Krypton. Erschwerend kam hinzu, dass die großen europäischen Gasehersteller mehrmonatige Vorräte an Krypton besessen haben sollen, die sie aufgrund mangelnder Nachfrage seitens ihrer Kunden langsam leerten, aber nicht wieder auffüllten.

Zudem hatte und hat Krypton auch zur Befüllung von Glühlampen eine große Bedeutung. Mitte der 2000er Jahre stieg der weltweite Leuchtmittelabsatz um 4 %/a, in den sich entwickelnden Ländern sogar um 10 – 20 %/a. Mit der Weltfinanzkrise brach auch dieser Absatzmarkt kurzfristig ein, so dass die Gesamtnachfrage nach Krypton bis zum Jahr 2010 um rund 15 % unter der des Jahres 2008 lag, in dem rund 87 Mio. l nachgefragt worden waren. Nur der relativ kleine Absatzmarkt von Krypton für medizinische Laser zeigte in der damaligen weltweiten Rezession keine Schwäche.

Anfang des Jahres 2010 mussten die europäischen Isolierglashersteller ihre Vorräte ergänzen und die US-Regierung legte ein Steuersparprogramm für Wärmeschutzmaßnahmen auf. Dieser Nachfrageschub um 5 – 10 % für Krypton war jedoch nur kurzlebig und ebte bis Ende 2012 ab. Zudem setzten sich in Europa, den USA und Australien Energiesparlampen durch, die weniger Krypton benötigten, bald aber selbst den LEDs Platz machten, die in der Herstellung und ihrer Funktion gar kein Krypton mehr brauchen. Als Auswirkung konnte sich der Kryptonmarkt nicht weiter erholen. Zudem verfügten die Produzenten über geschätzte 15 – 20 Mio. l Krypton in ihren Lagern.



Nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) stieg die weltweite Nachfrage nach Krypton zwischen 2000 und 2015 um jährlich 1,4 %, zwischen 2012 und 2017 aber immerhin um jährlich 6,8 % an. In den letzten Jahren vergrößerten aber auch die Produzenten notgedrungen ihre Vorräte. Diese sollen Ende 2015 mehr als die Hälfte der Jahresproduktion, d. h. mehr als 50 Mio. l betragen haben. Bis Ende 2016 waren die Vorräte bei den Produzenten auf 80 % der Jahresproduktion, d. h. auf 95 Mio. l angewachsen und sollen gegenwärtig bei immer noch rund 80 Mio. l liegen. Die Nachfrage war und ist zwar geprägt durch einen stetig steigenden Bedarf für Wärmeschutzverglasungen (2017 – 2022: +2,7 %), bei gleichzeitig aber rückgängigem Markt für Leuchtmittel, speziell Halogenlampen, mit Kryptonfüllung (2017 – 2022: -4,0 %). In diesem Teilmarkt hat in Deutschland vor allem der Ersatz von Halogenlampen für Auto-schweinwerfer Bedeutung. Stärkeres Wachstum bei jedoch wesentlich geringerer Ausgangsbasis (vgl. Abb. 25) sollen die Bereiche Lasertechnik (2017 – 2022: +5,9 %) und aufgrund des weiterhin niedrigen Kryptonpreises die Forschung & Entwicklung (2017 – 2022: +6,4 %) besitzen. Die weltweite Gesamtnachfrage nach Krypton soll in den Jahren 2017 – 2022 um 0,6 % jährlich anwachsen.



**Abb. 25: Verteilung der weltweiten Nachfrage nach Krypton im Jahr 2017 (SPIRITUS & BETZENDAHL 2018).**

## 4.5 Xenon

Die folgende Kurzbeschreibung der Nachfrageentwicklung von Xenon beruht ebenfalls vollständig auf den Beiträgen von Richard Betzendahl – Betzendahl Gas Consultants LLC – in der Fachzeitschrift GASWORLD (s. Literaturverzeichnis) und wurde aktualisiert nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018).

Xenon unterscheidet sich von Krypton darin, dass es einerseits rund zehnmal so selten ist, dafür aber viel mehr Verwendungsbereiche besitzt, so dass der Weltabsatzmarkt von Xenon zwar im Einzelnen sehr volatil ist, in seiner Gesamtheit aber nicht vollständig einbrechen kann.

Ähnlich wie Krypton und Neon wurde auch Xenon in der ehemaligen Sowjetunion als strategischer Rohstoff für die Satellitenproduktion betrachtet (s. Kap. 5.2), aber dennoch nicht in relevanten Mengen für militärische Zwecke eingesetzt.

Im Jahr 1990 lag die weltweite Nachfrage nach Xenon bei 2,2 Mio. l (= 2.200 m<sup>3</sup>) (Anm.: in der Gaseindustrie wird bei Neon, Krypton und Xenon häufig ein vereinfachter Umrechnungsfaktor von 1 m<sup>3</sup> = 1.000 l verwendet, obwohl die echten Flüssigdichten ganz anders sind, vgl. Tab. 1), verdoppelte sich jedoch fast bis 1995. In diesem Zeitraum begann sich der Markt für Xenonleuchten zu entwickeln, der bis heute bedeutende Mengen dieses Edelgases abnimmt. Zugleich war Xenon damals so günstig, dass es als billigeres (und hochwertigeres) Substitut für Krypton in der Produktion von Isolierglasfenstern genutzt wurde.

Ende der 1990er Jahre wurde Xenon verstärkt in Telekommunikationssatelliten als Manövriertreibstoff eingesetzt und Einzelanfragen der Satellitenhersteller über die Lieferung von bis zu 3 Mio. l Xenon beunruhigten kurzfristig die Xenonproduzenten.

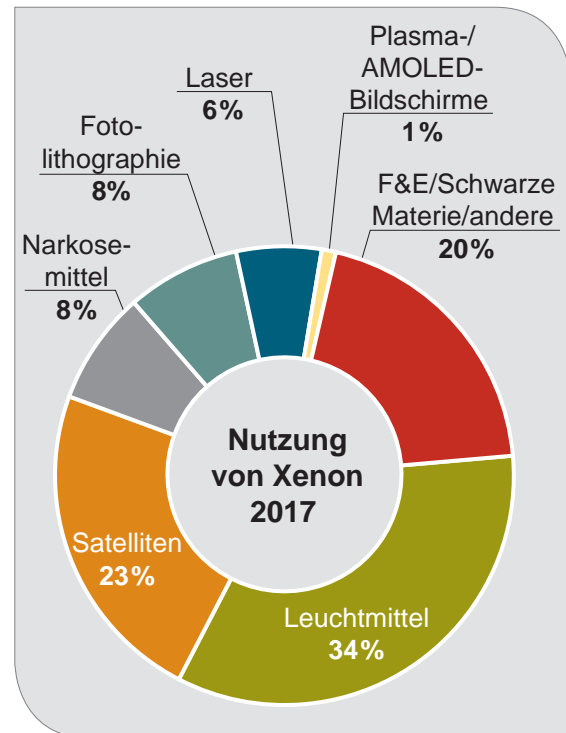
Bis zum Jahr 2005 war die Xenonnachfrage auf 8,3 Mio. l gestiegen und stieg unerwartet bis 2008 weiter auf 11,1 Mio. l an. Die Gründe für diesen Nachfrageschub lagen in einem Technologiewechsel von der Produktion von Plasmafernsehern statt Röhrenfernsehern, der 2 Mio. l Xenon/a erforderte („Toshiba-Effekt“). Zusätzlich sollen allein in Europa im Jahr 2008 jährlich 1 Mio. l Xenon nur für Narkoseanwendungen ver-

braucht worden sein (GASWORLD 2008). Im gleichen Jahr gingen bereits rund 30 % der Weltproduktion von Xenon in Laseranwendungen.

Aufgrund der Weltfinanzkrise brach auch die Nachfrage nach Xenon in fast allen Absatzbereichen ab Herbst 2008 bis in das Jahr 2010 hinein um über 20 % deutlich ein und konnte sich erst ab Mitte 2010 wieder langsam erholen. Besonders stark war der Absatzrückgang von Xenon für Laser in der Halbleiterindustrie, wo 50 – 70 % weniger Xenon nachgefragt wurde. Andererseits war ähnlich wie bei Krypton der Absatzmarkt von Xenon für medizinische Laser von der Rezession fast gar nicht betroffen. Zwischen 2008 und Ende 2009 sollen sowohl in der weltweiten Elektronikindustrie wie auch in der Produktion von Plasmafernsehern nur noch 1 Mio. l Xenon/a anstatt wie zuvor 3 Mio. l Xenon/a nachgefragt worden sein. Bei den Plasmafernsehherstellern war dies aber auch durch eine technische Änderung in der Produktion bedingt, infolgedessen 50 % weniger Xenon pro Fernseher benötigt wurde.

Ende des Jahres 2010 kaufte die russische Regierung 250.000 l Xenon für ihr Satellitenprogramm und auch der weltweite Gesamtverbrauch von Xenon stieg, ausgehend von der schnell wieder anziehenden Nachfrage in China, langsam wieder an. Im Zeitraum Mitte 2011 bis Mitte 2013 stieg der Bedarf an Xenon für Halogenlampen in der Beleuchtungsindustrie und erreichte einen Marktanteil von 2,5 – 3 Mio. l/a. Genauso schnell wie er gestiegen war, brach dieser Absatzmarkt jedoch wieder ein, da sich ab 2014 die immer günstigeren LEDs als Leuchtmittel durchsetzten. Damals hatte sich die Firma Osram vorsichtshalber mit großen Mengen Xenon eingedeckt, auf denen sie nun zum Teil erst einmal sitzen blieb (SPIRITUS & BETZENDAHL 2018).

In den letzten Jahren war der Xenonmarkt relativ stabil mit steigendem Absatz in der Grundlagenforschung (Erforschung Dunkler Materie) sowie als Satellitenantriebsmittel und sinkendem Absatz für konventionelle Leuchtmittel. Derzeit entwickelt sich ein Absatzmarkt für Xenon in Lasern für das 3D-Fotolithographieverfahren in der Halbleitertechnik. Dieser Laserteilmarkt soll bereits im Jahr 2018 2,4 Mio. l Xenon benötigen und ab 2019 auf 3,5 Mio. l Xenon/a anwachsen.



**Abb. 26: Verteilung der weltweiten Nachfrage nach Xenon im Jahr 2017 (SPIRITUS & BETZENDAHL 2018).**

Nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) stieg die weltweite Nachfrage nach Xenon zwischen 2000 und 2015 um jährlich 3,6 %, zwischen 2012 und 2017 sogar um jährlich 6,8 % an. Die weltweite Gesamtnachfrage nach Xenon soll in den Jahren 2017 – 2022 um weitere 3,0 % jährlich anwachsen. Negative Wachstumsraten werden für den Leuchtmittelmarkt (2017 – 2022: -4,6 %) sowie aufgrund der abgeschlossenen Beschaffung für Großforschungsvorhaben (2017 – 2022: -9,1 %) vorhergesagt. Dagegen soll die Nachfrage nach Xenon in der Halbleiterfabrikation bzw. in der Bildschirmproduktion (2017 – 2022: +22,2 % bzw. +14,9 %) überproportional stark zunehmen.

Besondere Beachtung verdient auch die Beobachtung der weltweiten Satelliten- und Raumfahrtindustrie. Ab dem Jahr 2018 sollen sukzessive 882, evtl. sogar 2.854 neue Satelliten den weltweiten und ständigen Zugang ins Internet („Oneweb“) ermöglichen. Für dieses ehrgeizige, aber bereits teilfinanzierte Projekt werden bis zum Jahr 2020 rund 2,5 Mio. l Xe benötigt. Auch das Marsraumfahrtprogramm könnte in den nächsten 15 Jahren 60 Mio. l Xenon nachfragen – sollte es umgesetzt werden und sollte nicht alternativ Krypton oder Iod statt Xenon als Manövriertreibstoff eingesetzt werden (s. Kap. 3.5).

## 5 Angebot

Helium ist in den meisten Fällen ein Beiprodukt der Erdgasaufbereitung in Gaswerken, der Erdgasverflüssigung in LNG-Anlagen oder der Luftzerlegung in Luftzerlegungsanlagen (vgl. Kap. 3.1.1). Sein Angebot ist damit fast ausschließlich von der weltweiten Nachfrage nach Erdgas bzw. nach Flüssigerdgas sowie weit untergeordnet der regionalen Nachfrage nach Sauerstoff und Stickstoff abhängig. Bisher wird Helium nur in sehr wenigen Anlagen in den USA, und zukünftig vielleicht auch in Tansania, als Hauptwertgas gewonnen.

Argon ist ein wichtiges Begleitwertgas in rund 1.000 Luftzerlegungsanlagen weltweit.

Neon bzw. Krypton und Xenon sind begleitende Spezialgase in rund 50 bzw. über 100 Luftzerlegungsanlagen weltweit. Diese Luftzerlegungsanlagen stellen diese seltenen Edelgase jedoch nur in Rohform her, die dann in weniger als 20 Aufbereitungsanlagen weltweit noch zu den industriell benötigten Reingasen aufgereinigt werden müssen.

## 5.1 Helium

Der Ausdehnungskoeffizient von Gasen beim Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand ist sehr groß und liegt z. B. bei Helium bei einem Faktor von 757. Dies bedeutet in der Praxis, dass gasförmiges Helium zwar technisch wesentlich leichter, aber bei gleichem Volumen nur in deutlich geringeren Mengen als flüssiges Helium transportiert werden kann. Ein typischer ISO („independent system operator“)-Container, s. u., für flüssiges Helium enthält rund 29.000 m<sup>3</sup> Helium, während der größte Trailer zum Transport von gasförmigem Helium nur 8.000 m<sup>3</sup> fasst.

Über große Distanzen wird Helium daher meistens in flüssiger Form @ 99,999 % He (5.0) (vgl. Kap. 3.6) in zertifizierten ISO-Kühlcontainern transportiert, die jeweils bis zu 41.400 l Helium fassen. Weltweit gibt es nur zwei Produzenten dieser ISO-Container, das US-amerikanische Unternehmen Gardner Cryogenics, Inc, eine Tochterfirma des Gasunternehmens Air Products & Chemicals, Inc., und Linde Engineering, die ihre Container (Helicon) im Werk Schalchen im bayerischen



**Abb. 27:** ISO-Kühlcontainer zum Transport von flüssigem Helium im Werk Unterschleißheim der Linde AG. Die zwei Container links wurden von Linde Engineering, der Container rechts von Gardner Cryogenics, Inc., gefertigt, Foto: BGR.

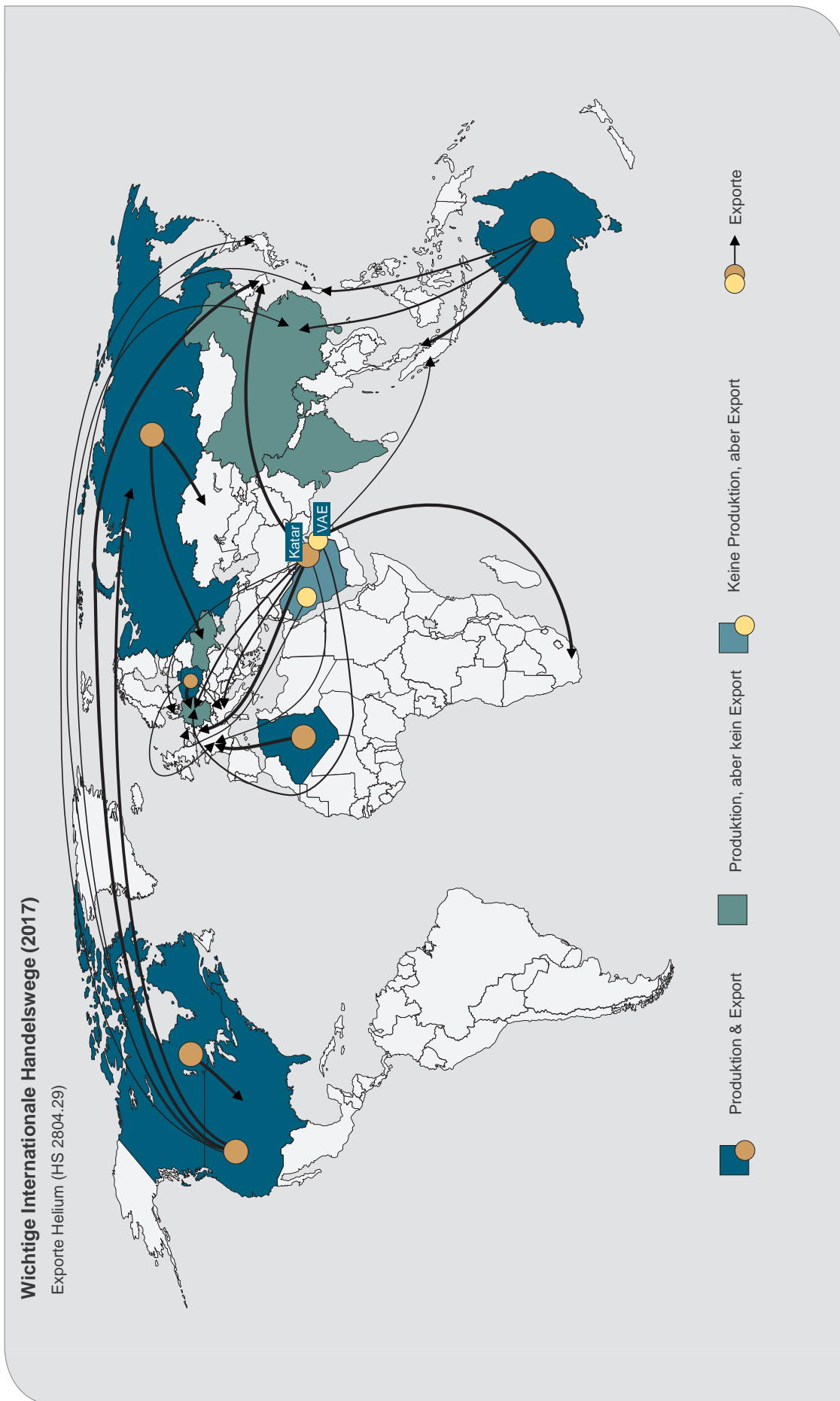


Abb. 28: Wichtige weltweite Handelsströme von Helium im Jahr 2017, nach Auswertung von Daten des Global Trade Atlas.



**Abb. 29: Mit 450 l flüssigem Helium gefüllte Transportbehälter im Werk Unterschleißheim der Linde AG, Foto: Linde AG (mit frdl. Genehmigung).**

Tacherting fertig. Technisch handelt es sich um mehrwandige, unter 5,2 bar Druck stehende Container aus Edelstahl, bei denen zudem der äußere Schutzmantel durch flüssigen Stickstoff gekühlt wird. Auf diese Weise sind Kühltransporte bis zu einer Dauer von 45 Tagen möglich. Bei der Ankunft am Ziel beträgt das Flüssigkeit-Gas-Verhältnis dann ca. 50:50 und das gasförmige Helium muss erneut verflüssigt werden. Weltweit sind rund 1.000 dieser ISO-Container im Einsatz, die einen Wert von jeweils 120.000 – 150.000 US\$ besitzen.

Die hohen Kosten der Heliumverflüssigung erlauben es nicht, große Mengen an flüssigem Helium zu bevorraten und so ist Helium ein „just-in-time“-Produkt. Praktisch die gesamte Menge des nicht gerade produzierten oder verwendeten flüssigen Heliums ist in ISO-Containern im weltweiten Umlauf. Ein Container mit dem Ziel Europa ist aus den/bis in die USA ca. 40 Tage, aus/bis Algerien ca. 16 Tage und aus/bis Russland ca. 18 Tage unterwegs. Je näher sich der Heliumproduzent zum Verbraucher befindet, desto mehr Umläufe und damit transportierte Mengen pro Jahr sind möglich (GUBLER et al. 2016).

Kleine Kühlbehältnisse mit 250 – 1.000 l Fassungsvermögen für den inländischen Transport können direkt aus den großen ISO-Containern mit flüssigem Helium befüllt werden. Über kurze Distanzen werden Helium und die anderen Edelgase bisher jedoch meist in gasförmigem Zustand auf Anhängern mit röhrenförmigen Druckbehältern, in Hochdruckzylindern und in sog. Dewars transportiert. Dewars sind doppelwandige Edelstahlcontainer, in denen die einzelnen Edelstahllagen durch ein isolierendes Vakuum voneinander getrennt sind.

Die internationalen großen Gasunternehmen sind an die wenigen weltweiten Heliumproduzenten praktisch ausschließlich über sog. „Take-or-Pay“-Verträge gebunden, d. h. die Unternehmen sind verpflichtet, die ihnen garantierte Heliummenge auf jeden Fall abzunehmen, egal, ob dafür derzeit ein Absatzmarkt besteht, oder nicht. Da, wie oben ausgeführt, eine Bevorratung von flüssigem Helium nur mit sehr hohen Kosten möglich ist, haben sich in den letzten Jahren einige Gasunternehmen entschieden, das ihnen zustehende Reinhelium – ebenfalls unter hohen Kosten – in das BLM-Heliumpipelinesystem bzw. zu natürlichen Gasspeichern (Cliffside/USA, Gronau-Epe/Deutsch-

land, geplant: Chayandinskoye bzw. Tas-Yuryakhs-koye/Russland) zu transportieren und dort zu reinjizieren und damit als Rohhelium zu bevorraten.

Alternativ können auch künstliche Gasspeicher zur Heliumbevorratung genutzt werden, so sie denn ausreichend groß sind. Das deutsche Gasunternehmen Messer Group hat einen langfristigen Liefervertrag über flüssiges Helium mit dem russischen Unternehmen Cryor abgeschlossen. Messer befördert das Helium in eigenen vakuumsuperisolierten Tankcontainern mit einem

Volumen von 40.000 l von Orenburg zu seinen europäischen Abfüllwerken. Am österreichischen Standort der Messer Gruppe in Gumpoldskirchen bei Wien nutzt Messer Europas größtes Heliumtanklager mit einem Fassungsvermögen von 113.000 l. Dadurch kann das Unternehmen z. B. bei Wartungsarbeiten am Großen Hadronen-Speicherring LHC (s. Kap. 3.2.1) auch flüssiges Helium zurücknehmen und zwischenspeichern.

Kenndaten der bisherigen weltweiten Heliumproduktion sind in Tabelle 12 aufgelistet (vgl. Anhang:

**Tab. 12: Kenndaten der bisherigen weltweiten Produktion von Helium, soweit bekannt (s. Anhang: Länderprofile).**

Land	Beginn	Ende	Herkunft	Anzahl der Heliumanlagen	Gesamtkapazität <sup>1)</sup> (Mio. m <sup>3</sup> )
Algerien	1994	aktiv	Erdgasverflüssigung	2	33,2
Australien	2010	aktiv	Erdgasverflüssigung	1	4,4
China	1970er	aktiv	Erdgasaufbereitung	2	0,3
	1998	aktiv	Luftzerlegung	7?	0,2
Deutschland	1970er	n.v.	Erdgasaufbereitung	1	< 0,1
	2014	aktiv	Luftzerlegung	1	< 0,1
Frankreich	1969?	1978?	Erdgasaufbereitung	1	0,2
Indien	2008	aktiv	Erdgasaufbereitung	1	0,1
Kanada	1917	1920	Erdgasaufbereitung	1	n.v.
	1963	1977	Erdgasaufbereitung	1	0,3 / 1,0
	2014	aktiv	Erdgasaufbereitung	2	2,2?
Katar	2005	aktiv	Erdgasverflüssigung	2	55,5
Polen	1977	aktiv	Erdgasaufbereitung	1	4,2
Russland	1949	1978	Erdgasaufbereitung	4	1,4 / 1,7
	1978	aktiv	Erdgasaufbereitung	7 <sup>3)</sup>	8,8
	n.v.	aktiv	Luftzerlegung	3?	0,1
Ukraine	n.v.	aktiv	Luftzerlegung	2?	0,1
USA	1918	aktiv	Erdgasaufbereitung	9 <sup>2), 3), 6)</sup>	143,2 <sup>2)</sup>
				7 <sup>4), 6)</sup>	19,9 <sup>4)</sup>
				6 <sup>5)</sup>	70,0 <sup>5)</sup>

n.v. = nicht verfügbar

<sup>1)</sup> Zu den Kapazitäten gibt es teils unterschiedliche Angaben

<sup>2)</sup> Grade-A

<sup>3)</sup> davon derzeit zwei gestundet

<sup>4)</sup> @ 95 – 98 % He

<sup>5)</sup> Rohhelium

<sup>6)</sup> davon eine sowohl 95 – 98 % He als auch Reinhelium

Länderprofile). In Tabelle 13 finden sich im Vergleich dazu die Produktionsdaten der Helium produzierenden Länder seit dem Jahr 2000. Ergänzt sind die Netto-Rohheliumentnahmen aus dem Cliffside-Heliumspeicher in Texas/USA, wodurch sich das weltweite Heliumangebot in jedem Jahr ergibt.

Nach Tabelle 12 gibt es derzeit weltweit vermutlich 53 Heliumanlagen (davon vier gestundet) mit einer (derzeit verfügbaren) Produktionskapazität von zusammen ca. 252 Mio. m<sup>3</sup> Reinhelium (vgl. Abb. 30) zzgl. 19,9 Mio. m<sup>3</sup> Helium @ 95 – 98 %

He (Rohhelium als Vorprodukt bleibt unberücksichtigt). Im Vergleich dazu betragen nach GUBLER et al. (2016) die weltweiten Heliumproduktionskapazitäten im Jahr 2010 225,1 Mio. m<sup>3</sup>, im Jahr 2015 289,2 Mio. m<sup>3</sup> und sollen bis zum Jahr 2020 auf 363,7 Mio. m<sup>3</sup> anwachsen. Im Vergleich dazu werden jährlich geschätzt 80.000 l (= 80 m<sup>3</sup>) <sup>3</sup>He produziert.

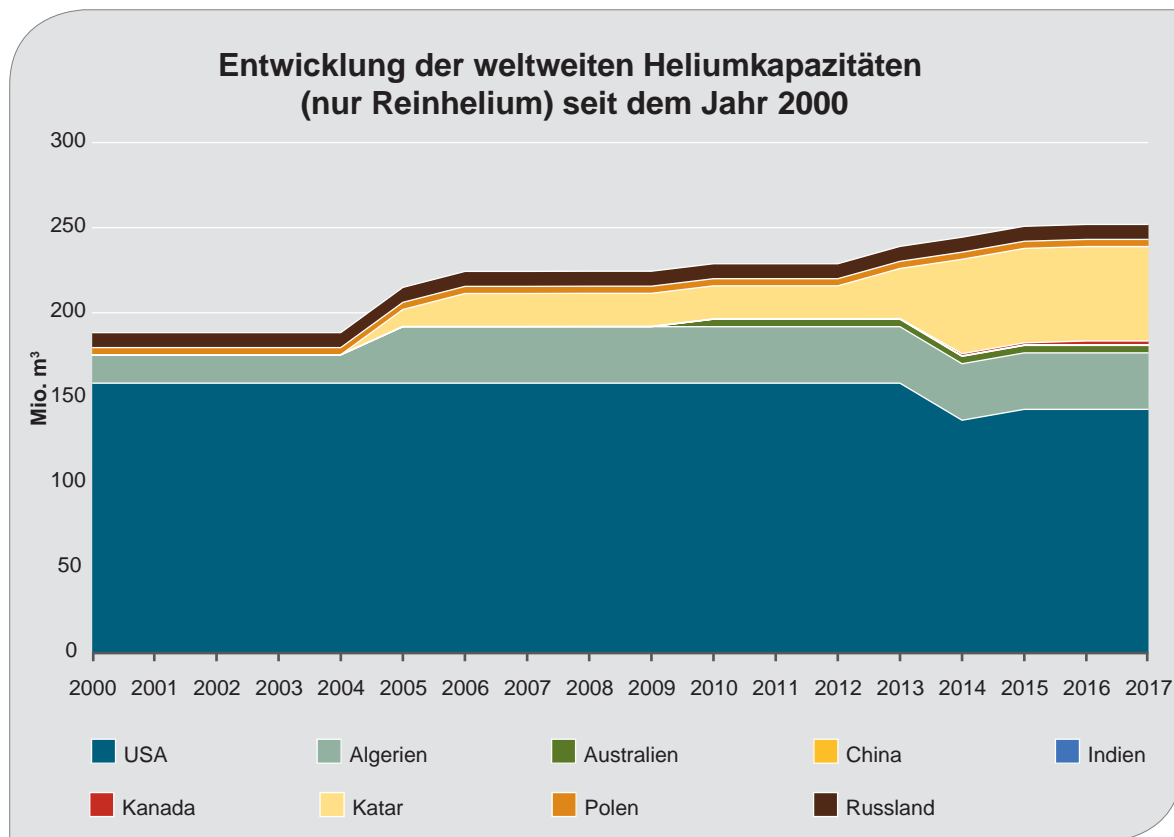


Abb. 30: Entwicklung der weltweiten Heliumkapazitäten (nur Reinhelium) seit dem Jahr 2000.

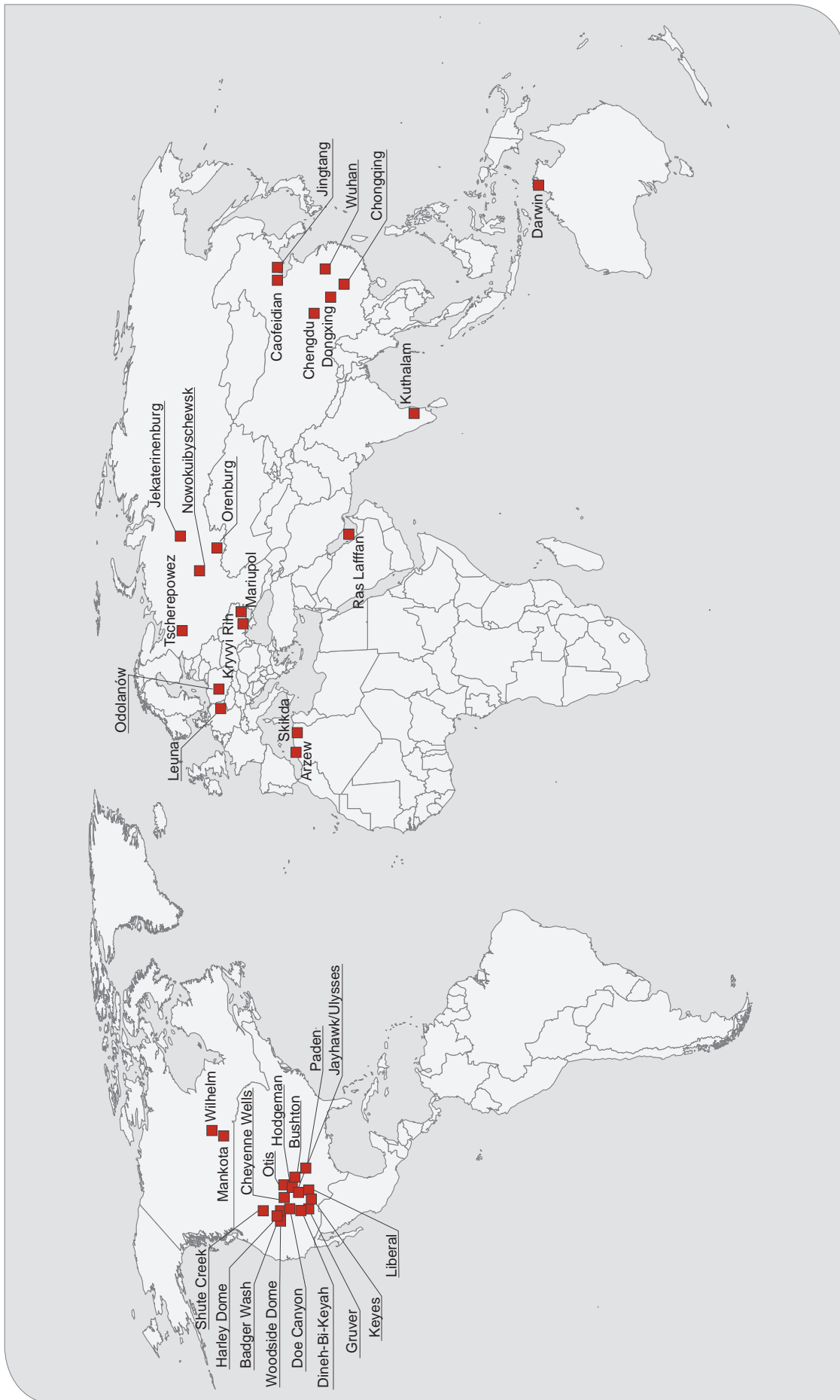


Abb. 31: Übersichtskarte der weltweiten Standorte von Heliumanlagen.



**Tab. 13: Weltproduktion von Helium (in Mio. m<sup>3</sup>) seit dem Jahr 2000 (s. Anhang: Länderprofile) zzgl. Nettomengen von Helium (in Mio. m<sup>3</sup>), die in den verschiedenen Jahren aus dem Cliffsides-Heliumspeicher in Texas/USA entnommen wurden (Quelle: USGS Minerals Yearbooks). Im Vergleich dazu geschätzte Weltproduktion von Helium nach USGS Minerals Yearbooks.**

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Algerien	18,4	17,4	19,6	17,0	21,9	24,8	22,4	25,9	30,4
Australien	–	–	–	–	–	–	–	–	–
China <sup>1)</sup>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Deutschland	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Indien <sup>1)</sup>	–	–	–	–	–	–	–	–	< 0,1
Kanada	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Katar	–	–	–	–	–	1,3	7,0	10,9	12,1
Polen	2,3	2,2	2,4	2,5	2,7	2,7	2,5	2,4	2,2
Russland	5,3	5,3	6,3	6,5	3,5	1,6	3,9	4,9	5,0
Ukraine <sup>1)</sup>	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
USA <sup>2)</sup>	98,0	87,0	87,4	86,9	86,0	75,9	79,4	77,0	79,6
Speicherentnahme	28,6	44,9	39,7	35,1	44,0	57,1	57,7	60,7	49,9
<b>Welt</b>	<b>152,7</b>	<b>156,9</b>	<b>155,5</b>	<b>148,1</b>	<b>158,2</b>	<b>163,5</b>	<b>173,0</b>	<b>181,9</b>	<b>179,3</b>
Welt nach USGS	117 <sup>3)</sup>	106 <sup>3)</sup>	109 <sup>3)</sup>	144	154	160	166	171	175

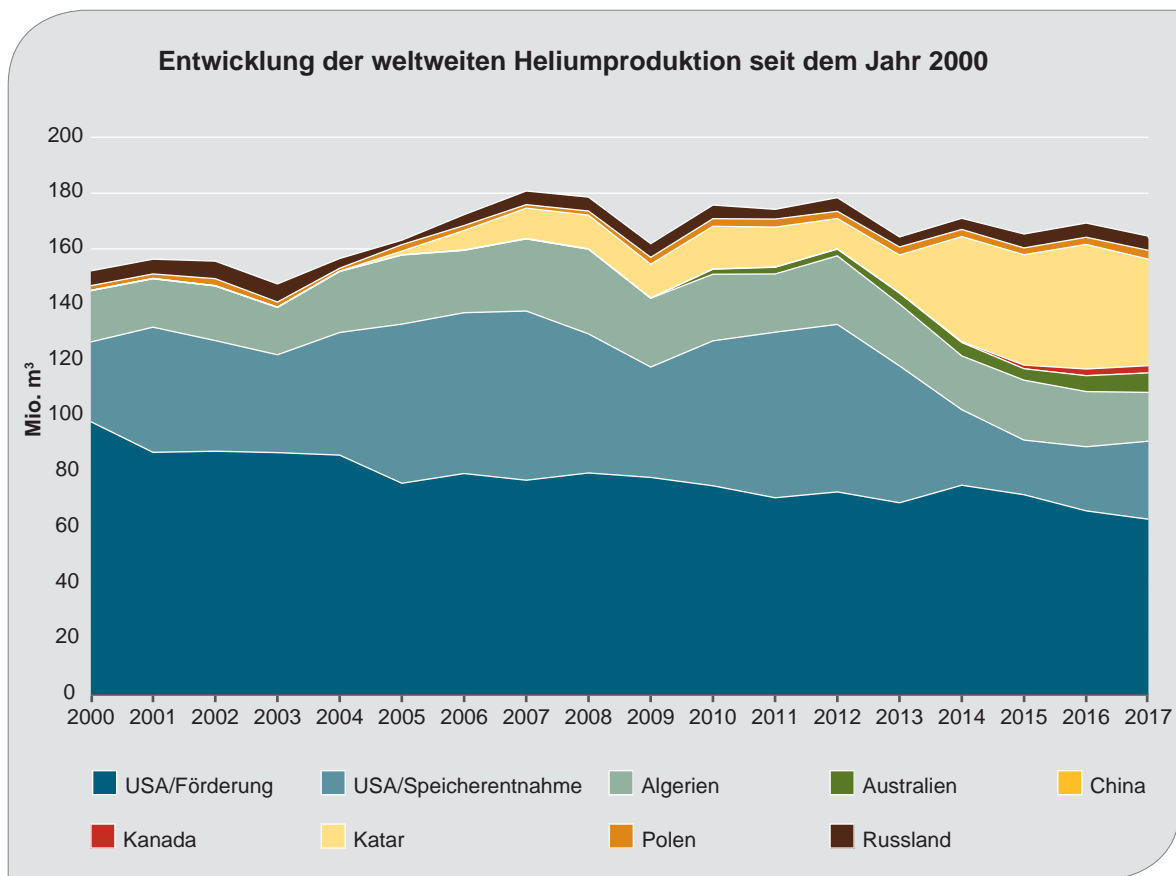
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Algerien	24,7	23,9	20,9	24,6	22,2	19,3	21,5	19,8	17,5
Australien	–	1,8	2,4	2,4	3,9	4,8	4,1	5,7	7,0
China <sup>1)</sup>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Deutschland	–	–	–	–	–	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Indien <sup>1)</sup>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Kanada	–	–	–	–	–	0,1	1,1	2,2	2,4
Katar	12,1	15,3	14,3	10,9	13,5	37,7	39,6	44,7	38,2
Polen	2,7	3,1	3,4	3,3	3,0	2,8	2,8	2,9	3,1
Russland	4,9	4,9	3,5	4,9	3,6	4,0	5,0	5,1	5,1
Ukraine <sup>1)</sup>	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
USA <sup>2)</sup>	78,0	75,0	70,7	72,8	68,9	75,2	71,8	66	63,0
Speicherentnahme	39,6	52,0	59,4	60,1	49,1	27,1	19,6	23	28,0
<b>Welt</b>	<b>162,2</b>	<b>176,2</b>	<b>174,8</b>	<b>179,1</b>	<b>164,4</b>	<b>171,3</b>	<b>165,8</b>	<b>169,7</b>	<b>164,6</b>
Welt nach USGS	147	168	172	174	171	164	159	160	160

n.v. = nicht verfügbar

<sup>1)</sup> Annahme

<sup>2)</sup> Differenz aus Verkäufen von Reinelium (Grade-A) minus Nettoentnahme von Rohhelium aus dem Cliffsides-Speicherfeld (Anm.: Das USBLM publiziert andere Nettoentnahmen als der USGS, z. B. für 2014 28,3 Mio. m<sup>3</sup> statt 27,1 Mio. m<sup>3</sup>, für 2015 21,2 Mio. m<sup>3</sup> statt 19,6 Mio. m<sup>3</sup>, für 2016 24,8 Mio. m<sup>3</sup> statt 23 Mio. m<sup>3</sup>.)

<sup>3)</sup> ohne Berücksichtigung von Nettospeicherentnahmen



**Abb. 32: Entwicklung der weltweiten Heliumproduktion seit dem Jahr 2000.**

Wie aus der Statistik der Produktion bzw. dem jährlich verfügbaren Angebot von Helium (Tab. 13) hervorgeht,

- ist die verfügbare Menge von Helium aus den USA seit dem Jahr 2013 rückläufig, jedoch keineswegs in so großem Umfang, dass es zu Besorgnissen Anlass geben sollte. Im Jahr 2017 stammten zwar 28,0 Mio. m<sup>3</sup> des in den USA produzierten Heliums aus dem sich in Schließung befindlichen Cliffs-Speicherfeld, in den Jahren zuvor aber teils noch geringere Mengen (vgl. Abb. 55). Diese, in den kommenden Jahren weiter absinkende Speicherentnahmemenge, kann durch eine höhere Produktion in Algerien und Katar bei dort bereits vorhandenen Kapazitäten sowie durch die ab 2021 geplante neue Produktionsaufnahme in Russland (vgl. Anhang: Russland sowie Kapitel 5.4) ausgeglichen werden.
- liegen die weltweiten Importe von Helium aus Australien seit dem Jahr 2016 oberhalb der für die dortige Heliumanlage angegebene Kapazitätsgrenze von 4,4 Mio. m<sup>3</sup>, so dass letztere entweder falsch ist oder es sich um

Reexporte in beträchtlicher Größenordnung handelt.

- gibt es zumindest seitens des verfügbaren Angebots keinen Hinweis auf eine Heliumknappheit in den Jahren 2006/2007 („*Helium Shortage 1.0*“). Auch eine Heliumknappheit in den Jahren 2011 – 2013 („*Helium Shortage 2.0*“, vgl. Kap. 4.1) aufgrund reduzierten Angebotes ist nur im Jahr 2013 ausgeprägt. In diesem Zeitraum bzw. besser Jahr sollen eine reduzierte Nachfrage nach Erdgas – und damit verbunden ein geringeres Angebot von heliumreichem Erdgas – zusammen mit geplanten und ungeplanten Wartungsarbeiten in einigen Heliumanlagen zu einer reduzierten Heliumproduktion geführt haben.

## 5.2 Neon

Bis auf Bahrain, Katar, Panama und Südkorea fassen alle anderen Länder der Erde ihre Im- und Exportdaten von Neon mit denen der anderen Spezialgase Krypton und Xenon zusammen, so dass sich sinnvoll nur aus den Importdaten von

Südkorea, einem wichtigen Halbleiter- und Elektronikproduzenten, Rückschlüsse auf den weltweiten Neonmarkt, hier dem Anbietermarkt von Neon, ableiten lassen.

Nach KOREA CUSTOMS SERVICE wurden im Jahr 2015 51.404 kg, im Jahr 2016 63.599 kg und im Jahr 2017 95.528 kg Neon (= 113.454 m<sup>3</sup> bei 15 °C) Neon (HS-Code 2804292000) bzw. möglicherweise auch neonreiche Gasgemische importiert.

Lieferländer 2017 waren zu 46,6 % die USA, zu 29,7 % die Ukraine, zu 23,6 % China und zu 0,1 % Taiwan. In den Jahren zuvor war das Verhältnis ähnlich. Im Jahr 2009 setzten die Lieferungen aus der Ukraine aus und stiegen danach nur langsam wieder an. Ehemalige Lieferländer von Neon nach Südkorea waren zudem in einigen Jahren auch Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Hongkong, Japan und Thailand.

Die folgende Kurzbeschreibung der Angebotsentwicklung von Neon beruht praktisch ausschließlich auf den Beiträgen von RICHARD BETZENDAHL – Betzendahl Gas Consultants LLC – in der Fachzeitschrift GASWORLD (s. Literaturverzeichnis), aktualisiert nach Daten in SPIRITUS & BETZENDAHL (2018):

In der früheren Sowjetunion wurde Neon als strategischer Rohstoff betrachtet, da man es in den 1980er Jahren für die angedachte Produktion von Laserwaffen zur Raketen- und Satellitenabwehr zu benötigen glaubte. Alle größeren Luftzerlegungsanlagen in der Sowjetunion waren dementsprechend mit Neon-, aber auch Krypton- und Xenon-Anreicherungs- bzw. zum Teil auch Aufreinigungsanlagen (vgl. Kap. 5.4 und 5.5) ausgestattet. Das innersowjetische Angebot von Neon war sehr groß, die Nachfrage jedoch gering.

Nach dem Zerfall der Sowjetunion lag die weltweite Rohneonproduktion bei ca. 500 – 600 Mio. l/a (= 500.000 – 600.000 m<sup>3</sup>/a). Sie war mit weitem Abstand dominiert von an Hüttenkombinate gebundene große Luftzerlegungsanlagen in Russland und der Ukraine. Zur gleichen Zeit wurde die Nachfrage auf rund 300 Mio. l/a geschätzt (vgl. Kap. 4.2). In den Jahren zwischen 1990 und 2012 wurde daher das meiste Rohneon nicht aufgereinigt, sondern in die Atmosphäre entlassen, da es keine Kunden dafür gab.

Im Jahr 2007 lag die weltweite Rohneonproduktion, wie in den Jahren zuvor, bei geschätzt 575 Mio. l/a. 70 % des verfügbaren Neons stammte aus Russland und der Ukraine, wo sich auch drei der weltweit nur fünf (zwei befanden sich in den USA) Aufreinigungsanlagen für Rohneon befanden. Neon war zu dieser Zeit und ist weiterhin ein weltweit gehandeltes Edelgas.

Im Jahr 2010 betrug die weltweite Rohneonproduktion vermutlich rund 545 Mio. l/a, wovon bei leichtem Rückgang ca. 60 % aus der GUS stammten. Drei der größten Luftzerlegungsanlagen mit Rohneonproduktion arbeiteten für Stahlhütten in der Ostukraine. Der große ukrainische Neonproduzent Iceblick Ltd. (s. Anhang: Ukraine) ging damals von einem etwas niedrigeren weltweiten Angebot von rund 450.000 m<sup>3</sup> Ne/a aus (COCKE-RILL 2010).

Im Jahr 2012 gab es weltweit rund 20 Luftzerlegungsanlagen mit einer Rohneonkapazität von ca. 575 Mio. l/a, deren gesamte Produktion aber nur bei rund 500 Mio. l lag. Acht Aufreinigungsanlagen für Rohneon besaßen zusammen eine mehrfache Kapazität der tatsächlichen Produktion, d. h. auch einige der Aufreinigungsanlagen waren in diesem Jahr gestundet.

Das seit den 1980er Jahren bestehende Überangebot auf dem Neonmarkt endete im Juli 2014, nachdem im Laufe der Jahre mehrere alte Luftzerlegungsanlagen mit Rohneonkapazitäten geschlossen und durch neue Anlagen ohne Neonkapazität ersetzt worden waren. Gleichzeitig ging die Stahlproduktion und damit der Sauerstoffbedarf der osteuropäischen Stahlindustrie deutlich zurück, wodurch dort auch viele Luftzerlegungsanlagen ihre Produktion herunterfuhren. Zwischen 2012 und 2015 gingen insgesamt vier große Luftzerlegungsanlagen in Osteuropa außer Betrieb und obwohl erste Neonkapazitäten in China hinzukamen, sank die weltweite Rohneonkapazität bis 2015 dennoch um 125 Mio. l/a. Mitte des Jahres 2014 wurde aufgrund der politischen Unruhen eine weitere große Luftzerlegungsanlage in der Ukraine stillgelegt, die immerhin 8 % der weltweiten Rohneonproduktion geliefert hatte. Im Jahr 2015 war dadurch die Weltrohneonproduktion auf 415 Mio. l/a gefallen. Gleichzeitig stieg die Nachfrage aufgrund des hohen Bedarfs auf dem Lasermarkt und der Bildung von Reinneonvorräten bei den Verbrauchern auf rund 477 Mio. l/a

**Tab. 14: Standorte von Luftzerlegungsanlagen mit Rohneonkapazitäten sowie von Aufreinigungsanlagen für Rohneon, nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018), SURESH et al. (2016), Internetrecherchen sowie ANONYM (pers. Mitteilung).**

Land	Standort	Produktion	Aufreinigung
China	diverse/Hubei (9 x)	He/Ne	
	Wuhan/Hubei		He, Ne
	Ma'anshan/Anhui (3 x)	He/Ne	
	Tangshan/Hebei	He/Ne	Ne
	Handan/Hebei	He/Ne	Ne
	Panzhuhua/Sichuan	He/Ne	
	Zhangjiagang/Jiangsu		Ne
	Huzhou/Zhejiang	He/Ne	Ne
	Nanxiang/Shanghai		Ne
	Guangzhou/Guangdong	He/Ne	Ne
	Shaoguan/Guangdong	He/Ne	Ne
	Nanjing/Jiangsu		
Deutschland	Leuna (2 x)	He/Ne	He, Ne
Frankreich	Le Blanc-Mesnil	He/Ne	He, Ne
Niederlande	IJmuiden	He/Ne	Ne
Russland	Moskau		Ne (gestundet)
	Nischni Tagil	He/Ne	
	Lipezk	He/Ne	
	Orsk	He/Ne	
	Magnitogorsk	He/Ne (derzeit ungenutzt)	
Ukraine	Krywyj Rih	He/Ne	He, Ne
	Mariupol (2 x)	He/Ne	He, Ne
	Zaporizhia	He/Ne	
	Alschevsk	He/Ne (gestundet)	
	Dzerzhinsky	He/Ne	
USA	Claymont, DE	He/Ne	
	Warren, OH	He/Ne	
	Pittsburgh, PA	He/Ne	
	La Porte, TX (2 x)	He/Ne	
	Burns Harbor, IN (2 x)	He/Ne	Ne
	Calumet, IN (3 x)	He/Ne	
	Bayport, TX	He/Ne	
	Alpha, NJ		Ne

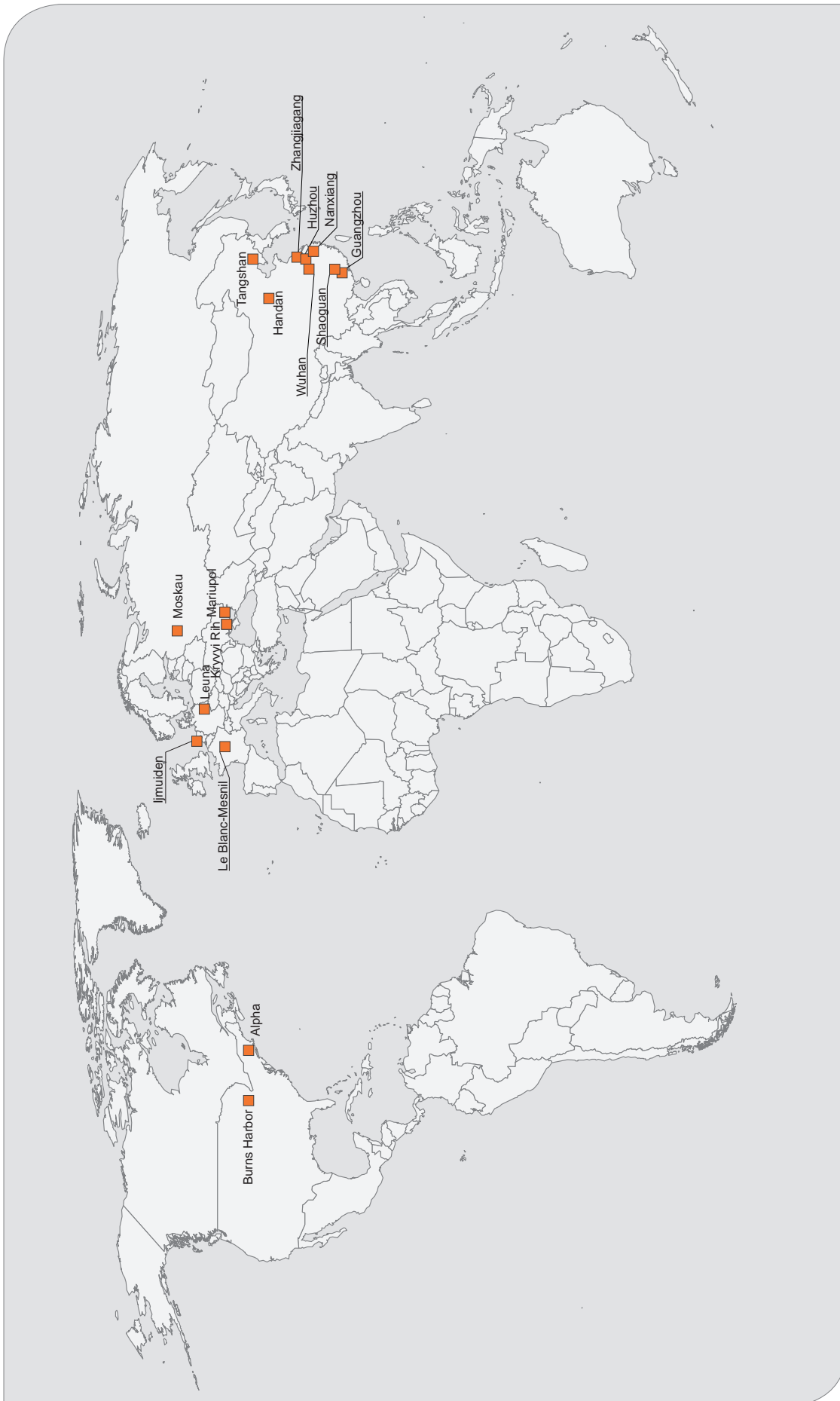


Abb. 33: Übersichtskarte der weltweiten Standorte von Aufreinigungsanlagen für Rohneon.

(s. Abb. 33). Weltweit waren 18 – 20 Luftzerlegungsanlagen mit Rohneonkapazitäten in Betrieb, gleichzeitig 5 – 6 Anlagen (mit 150 Mio. l Rohneonkapazität) gestundet. 70 – 75 % des Rohneonangebots stammte aus der Ukraine. Sechs Aufreinigungsanlagen arbeiteten weltweit, davon eine in Odessa/Ukraine, eine in Moskau/Russland und zwei in den USA (Burns Harbor/Indiana und Alpha/New Jersey).

Vor allem durch immer neue Luftzerlegungsanlagen mit Rohneonkapazitäten in China hatte sich bis zum Jahr 2016 das weltweite Rohneonangebot wieder auf ca. 470 Mio. l/a erhöht. Auch mehrere osteuropäische Luftzerlegungsanlagen könnten relativ schnell wieder (mehr) Rohneon produzieren – das derzeit als He/Ne-Mix in die Atmosphäre entlassen wird – wenn die Nachfrage wieder zunehmen sollte. Dies wird gegenwärtig ab Ende 2018 vorhergesagt, da bis dahin die Waferproduktion in China und damit verbunden der Bedarf nach Neon als wichtigstes Lasergas in der Halbleiterproduktion, merklich ansteigen soll (vgl. Kap. 4.2).

SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) identifizierten zum Oktober 2017 weltweit 25 Standorte von Luftzerlegungsanlagen mit Rohneon-/heliumkapazitäten und neun Standorte mit Neonaufreinigungsanlagen. Bei einer Produktion von 720 Mio. l Rohneon in Jahr 2017 sollen die theoretischen Kapazitäten bei deutlich höheren 853 Mio. l/a liegen. Die Zuverlässigkeit all dieser Angaben wird jedoch von deutschen Marktteilnehmern (ANONZM, pers. Mitteilung) bestritten. Tab.14 gibt einen aktualisierten, allerdings auch nicht vollständigen Überblick der relevanten Luftzerlegungsanlagen und Abb. 33 zeigt die weltweite Verteilung der Aufreinigungsanlagen für Rohneon.

### 5.3 Argon

Nach LIVONEN (2006) lag die weltweite Argonkapazität im Jahr 2006 bei rund 18.500 t/d, die wahre Produktionsmenge jedoch darunter. Nach ihrer Analyse entspricht die weltweite Argonkapazität in etwa 1,5 % der weltweiten Sauerstoffkapazität. Diese lag im Jahr 2006 bei ca. 1,2 Mio. t/d und stieg in den zehn Jahren zuvor jährlich um 5 – 6 % an. Im Jahr 2012 soll sie jedoch bereits ca. 2 Mio. t/d erreicht haben (CLARKE & CLARE 2012). Ein weiterer jährlicher Anstieg von 6 %/a angenommen, läge

die weltweite Sauerstoffkapazität heute bei rund 2,8 Mio. t/d bzw. die Argonkapazität bei 42.500 t/d bzw. 15,5 Mio. t/a bzw. 9,3 Mrd. m<sup>3</sup>/a.

Mehr als 950 Luftzerlegungsanlagen weltweit sind mit Argon-Kolonnen ausgerüstet (Tab. 15).

Auch heute noch gilt Argon als ein typisches Beiprodukt der Sauerstoffproduktion in an Stahlhütten angeschlossene Luftzerlegungsanlagen. Die Produktion dieses Edelgases fällt und steigt daher mit der regionalen bzw. weltweiten Stahlproduktion und damit der regionalen bzw. weltweiten Wirtschaftsentwicklung. Unabhängig davon wird Argon jedoch auch in Ammoniak- und andere Chemiewerke versorgende Luftzerlegungsanlagen produziert.

Aufgrund der seit rund einem Jahrzehnt auch außerhalb des Stahlsektors wachsenden weltweiten Nachfrage nach Argon versuchen die großen multinationalen Gasunternehmen seit einigen Jahren ihre Argonkapazitäten zu maximieren. Zum Beispiel lag die Argonkapazität der USA im Jahr 2011 bei ca. 5.000 t/d und wuchs seitdem um durchschnittlich 2 %/a auf derzeit ca. 5.600 t/d an. 90 % dieses Wachstums fiel allerdings in den jüngeren Zeitraum 2015 – 2017.



**Abb. 34:** Argon wird in Deutschland von mehreren Unternehmen, hier der Linde AG, angeboten, Foto: BGR.

**Tab.15: Anzahl von Standorten mit Luftzerlegungsanlagen mit Argonkapazitäten in einzelnen Ländern, soweit bekannt, Stand Februar 2016 (nach SURESH et al. 2016, bzgl. Deutschland ergänzt nach eigenen Recherchen).**

Land	Anzahl	Land	Anzahl
<b>Amerika</b>		<b>Westeuropa</b>	
Argentinien	8	Belgien	5
Bolivien	1	Dänemark	1
Brasilien	59	Deutschland	46
Chile	10	Finnland	3
Costa Rica	1	Frankreich	5
Dom. Republik	1	Griechenland	2
Ecuador	1	Großbritannien	1
Guatemala	2	Italien	2
Kanada	23	Luxemburg	1
Mexiko	14	Niederlande	2
Peru	5	Norwegen	2
Trinidad und Tobago	5	Österreich	5
Uruguay	2	Schweden	2
USA	222	Schweiz	2
Venezuela	5	Spanien	2
<b>gesamt</b>	<b>359</b>	<b>gesamt</b>	<b>81</b>
<b>Osteuropa</b>		<b>Asien</b>	
Bosnien-Herzegowina	1	Bangladesch	1
Bulgarien	3	China	181
Estland	1	Indien	21
Kasachstan	1	Indonesien	21
Kroatien	3	Japan	59
Lettland	1	Malaysia	7
Litauen	1	Philippinen	4
Mazedonien	1	Singapur	6
Polen	13	Rep. Südkorea	32
Rumänien	5	Taiwan	25
Russland	31	Thailand	13
Serbien	2	Vietnam	10
Slowakei	2	<b>gesamt</b>	<b>380</b>
Tschechien	6	<b>Naher und Mittlerer Osten</b>	
Ukraine	10	Bahrain	1
Ungarn	5	Iran	4
Usbekistan	2	Israel	2
Weißrussland	2	Katar	2
<b>gesamt</b>	<b>90</b>	Kuwait	1
<b>Afrika</b>		Saudi Arabien	2
Ägypten	4	Türkei	7
Algerien	2	<b>gesamt</b>	<b>19</b>
Kenia	1	<b>Ozeanien</b>	
Marokko	1	Australien	3
Rep. Südafrika	6	<b>gesamt</b>	<b>3</b>
Sudan	1		
<b>gesamt</b>	<b>15</b>		

## 5.4 Krypton

Bis auf Südkorea fassen alle anderen Länder der Erde ihre Im- und Exportdaten von Krypton mit denen der anderen Spezialgase Xenon und zumeist auch Neon zusammen. Südkorea ist allerdings ein bedeutendes Industrieland und zudem wichtiger Halbleiter- und Elektronikproduzent, so dass sich aus seinen Importdaten Rückschlüsse auf den weltweiten Kryptonmarkt, hier dem Anbietermarkt von Reinkrypton, ableiten lassen. Nach KOREA CUSTOMS SERVICE wurden im Jahr 2015 6.888 kg, im Jahr 2016 17.014 kg und im Jahr 2017 15.993 kg (= 4.562 m<sup>3</sup> bei 15 °C) Krypton (HS-Code 2804293000) importiert.

Lieferländer 2017 waren zu 45,1 % die Ukraine, zu 34,9 % Russland, zu 11,4 % die USA und zu 8,6 % China. Im Jahr 2016 waren es zu 73,9 % Russland, zu 13,7 % die Ukraine, zu 9,9 % die USA und zu 2,5 % China und im Jahr 2015 zu 49,9 % Russland, zu 24,4 % die USA, zu 16,3 % die Ukraine und zu 9,4 % China.

Die folgende Kurzbeschreibung der Angebotsentwicklung von Krypton beruht erneut weit überwiegend auf den Beiträgen von RICHARD BETZENDAHL – Betzendahl Gas Consultants LLC – in der Fachzeitschrift GASWORLD (s. Literaturverzeichnis), aktualisiert nach Daten in SPIRITUS & BETZENDAHL (2018):

Krypton ist Bestandteil des in allen Luftzerlegungsanlagen anfallenden Kolonnensumpfes (vgl. Kapitel 3.1), der, sofern genutzt, in mehreren Aufbereitungsschritten und in Spezialanlagen weiter angereichert bzw. in Reinkrypton und Reinxenon getrennt wird.

Obwohl Krypton deutlich weniger nachgefragt wird als Xenon (vgl. Kap. 3.2.4, 3.2.5, 4.4 und 4.5), ist es dessen Koppelgas und fällt bei zunehmender Xenonproduktion in großen Mengen an. Erst seit Kurzem arbeiten die großen Gaseunternehmen daran, das Kryptonverhältnis bei der Ausbringung von Krypton und Xenon zu reduzieren bzw. nur noch Xenon auszubringen.

In der früheren Sowjetunion wurden Krypton und Xenon als strategische Rohstoffe betrachtet, da man sie für die Entwicklung des sowjetischen Luft- und Raumfahrtprogramms nach dem 2. Weltkrieg und v. a. in den 1980er Jahren benötigte. Praktisch alle größeren Luftzerlegungsanlagen, u. a. in

Novomoskovsk, Lipetsk, Tscherepowez, Tscheljabinsk, Nischni Tagil und Orsk in Russland, Enakiyev, Kommunarsk, Krywyj Rih, Makeyevka, Mariupol, Severodonetsk und Dneprodzerzhinsk in der Ukraine sowie Temirtau in Kasachstan waren identisch mit Rohkrypton-/Rohxenonanlagen ausgestattet (PAKHOMOV & DUBASOV 2014). Nach LEBEDEV & PRYANICHNIKO (1993) wurden 1991 in der Ukraine rund 11.000 m<sup>3</sup> (= 11 Mio. l) Rohkrypton/Rohxenon produziert. In allen GUS-Staaten zusammen betrug die Produktion ca. 25.000 m<sup>3</sup>.

In den meisten Fällen haben die Betreiber der ex-sowjetischen Luftzerlegungsanlagen jedoch gar keinen Bedarf an Krypton und Xenon (sowie Neon), so dass sie ihren Kolonnensumpf (s. Kap. 3.1.4) interessierten Händlern oder direkt Aufreinigungsbetrieben zum Kauf anbieten. Aufgrund sehr guter Kontakte konnten in Russland v. a. die Unternehmen OOO „Akela-N“ (Chimki), aber auch Chromium Ltd. (Moskau) bzw. in der Ukraine das schon genannte Unternehmen Iceblick Ltd. über viele Jahre die meisten Kontrakte abschließen. Nach Auflösung von Iceblick haben nun neue Unternehmen wie Cryoin Engineering Ltd. (Odesa), Ingas AE (Mariupol) und UMG RT Gas (Kiew) den Markt für Neon, Krypton und Xenon aus der Ukraine unter sich aufgeteilt.

Bis zur Weltfinanzkrise im Jahr 2009 lag die weltweite Produktionskapazität von Rohkrypton/Rohxenon bei rund 135 Mio. l (davon 120 Mio. l Krypton) und sank bereits bis Ende des Jahres 2008 aufgrund des starken Rückgangs der weltweiten Stahlproduktion – und damit verbunden der Produktion der angeschlossenen Luftzerlegungsanlagen – auf rund 100 Mio. l. Im Jahr 2009 wurden ca. 85 Mio. l Krypton ausgebracht.

Im Jahr 2010 gab es weltweit ca. 85 Luftzerlegungsanlagen mit einer Rohkrypton/Rohxenon-Kapazität von zusammen 111 Mio. l, davon ca. 100 Mio. l Krypton. Diese wurde zu mehr als 80 % von den Gasunternehmen Air Liquide SA, Praxair Inc., Linde AG und Iceblick Ltd. (s. o.) kontrolliert. BETZENDAHL ging damals von einer Produktion in Höhe von rund 98 Mio. l Krypton aus, korrigierte diesen Wert jedoch immer weiter nach unten auf mittlerweile 84 Mio. l. Der große ukrainische Kryptonproduzent Iceblick Ltd. (s. Anhang: Ukraine) nannte damals in COCKERILL (2010) ein deutlich höheres weltweites Angebot von rund 130.000 m<sup>3</sup> Kr/a.





**Abb. 35: Reinkrypton wird in Deutschland u. a. von der Linde AG in ihrem Werk in Unterschleißheim produziert, Foto: BGR.**

Die Rohkrypton/Rohxenon-Produktion bzw. eher Rohkrypton/Rohxenon-Kapazität verteilte sich im Jahr 2010 wie folgt:

- USA: ca. 12 – 14 Mio. l, davon 85 % durch Praxair Inc., rückgehende Produktion, davon die meiste in alten Luftzerlegungsanlagen zur Versorgung von Stahlhütten
- Osteuropa: ca. 32 – 34 Mio. l, davon 70 % durch Iceblick Ltd., langsam rückgehende Produktion, davon die meiste in alten Luftzerlegungsanlagen zur Versorgung von Stahlhütten, Höchstproduktion ca. 40 Mio. l/a in 2005
- Westeuropa: ca. 18 – 20 Mio. l, davon fast 100 % durch Air Liquide SA und Linde AG, konstante Produktion in großen Luftzerlegungsanlagen von Stahlhütten und Chemiewerken
- Mittlerer Osten/Afrika: 14 – 16 Mio. t, konstante Produktion, davon rund 10 Mio. l (@ 70 % Kr) in der weltgrößten Kohlevergasungsanlage von Sasol (inzwischen deutlich nach unten korrigiert, s. Anhang: Südafrika)
- China/Asien: ca. 22 – 26 Mio. l, davon 15 – 20 Mio. l in China, starkes Wachstum, bis 2013 Wachstum in China um weitere 10 Mio. l aufgrund dort geplanter sehr großer Luftzerlegungsanlagen, in China zudem vier Aufreinigungsanlagen für Krypton/Xenon

Im Jahr 2012 gab es an 70 Lokationen rund 100 Luftzerlegungsanlagen mit Rohkrypton/Rohxenon-Kapazitäten in Höhe von rund 110 Mio. l

und einer Produktion von geschätzt 86 Mio. l Rohkrypton. Rund zehn von insgesamt 17 bekannten Aufreinigungsanlagen waren weltweit in Betrieb, davon zwei in den USA, und produzierten Reinkrypton.

Im Jahr 2013 lag die weltweite Rohkryptonkapazität bei 90 Mio. l und die Produktion relativ konstant bei geschätzten 87 Mio. l. Bereits in diesem Jahr waren die weltweiten Lagerbestände jedoch größer als die halbe Jahresproduktion und bis 2016 stiegen sie auf 80 % der Weltjahresproduktion an.

Das weltweite Angebot von Krypton soll durch immer neue und größere Luftzerlegungsanlagen in China beständig wachsen und wird voraussichtlich ab dem Jahr 2018 bei über 130 Mio. l/a liegen. Auch die Zahl der weltweiten Aufreinigungsanlagen dürfte, v. a. in China, weiter zunehmen.

SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) identifizierten zum Oktober 2017 weltweit 63 Standorte von Luftzerlegungsanlagen mit Rohkryptonkapazitäten und 21 Standorte mit Aufreinigungsanlagen. Die Zuverlässigkeit dieser Aufstellung wird jedoch von deutschen Marktteilnehmern (ANONYM, pers. Mitteilung) bestritten. Tab. 16 gibt einen aktualisierten, allerdings auch nicht vollständigen Überblick der relevanten Luftzerlegungsanlagen und Abb. 36 zeigt die weltweite Verteilung der Aufreinigungsanlagen für Krypton und Xenon.

**Tab.16: Standorte von Luftzerlegungsanlagen mit Rohkrypton-/ bzw. Rohxenonkapazitäten verschiedener Anreicherungsstufen sowie von Aufreinigungsanlagen, nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018), SURESH et al. (2016), Internetrecherchen sowie ANONYM (frdl. mdl. Mitt.).**

Land	Standort	Produktion	Aufreinigung
Brasilien	Ipatinga	Kr/Xe (Mitte 2018)	
China	diverse/Anhui (2 x)	Kr/Xe	
	Ma'anshan/Anhui		Kr, Xe
	diverse/Hubei (9 x)	Kr/Xe	Kr, Xe
	Ningbo/Zhejiang (2 x)	Kr/Xe	
	Quanzhou/Fujian (2 x)	Kr/Xe	
	Xiangtan/Hunan (6 x)	Kr/Xe	
	Chongqing	Kr/Xe	
	Taiyuan/Shanxi	Kr/Xe	
	Jinan/Shandong	Kr/Xe	Kr, Xe
	Handan/Hebei	Kr/Xe	Kr, Xe
	Panzhuhua/Sichuan (6 x)	Kr/Xe	Kr, Xe
	Xichang/Sichuan (2 x)	Kr/Xe	
	Huzhou/Zhejiang	Kr/Xe	
	Tangshan/Hebei	Kr/Xe	Kr, Xe
	Shaoguan/Guangdong	Kr/Xe	Kr, Xe
	Nanjing/Jiangsu	Kr/Xe	
	Yangzhou/Jiangsu	Kr/Xe	
Yantai/Shandong (2 x)	Kr/Xe (Mitte 2019)		
Deutschland	Ludwigshafen (2 x)	Kr/Xe	
	Duisburg-Ruhrort (2 x)	Kr/Xe	
	Duisburg-Hüttenheim (2 x)	Kr/Xe	
	Leuna (2 x)	Kr/Xe	
	Dormagen	Kr/Xe	
	Bremen (2 x)	Kr/Xe	
	Brunsbüttel	Kr/Xe	
	Marl	Kr/Xe	
	Eisenhüttenstadt (2 x)	Kr/Xe	
	Salzgitter	Kr/Xe	
	Gelsenkirchen	Kr/Xe	
	Oberhausen-Biefang (2 x)	Kr/Xe	
	Hürth (2 x)	Kr/Xe	
	Unterschleißheim		Kr, Xe
	Krefeld-Gellep		Kr, Xe
Finnland	Tornio	Kr/Xe	

Fortsetzung Tab. 16

Frankreich	Le Blanc-Mesnil	Kr/Xe	Kr, Xe
	Dunkerque	Kr/Xe	
	Richemont	Kr/Xe	
	Moissy-Cramayel	Kr/Xe	
Japan	Kashima	Xe	
	Kakogawa	Kr/Xe	Kr, Xe (2019)
	Oita	Kr/Xe	Kr, Xe
Kanada	Sault Ste. Marie, ON	Kr/Xe	
Niederlande	IJmuiden	Kr/Xe	
Österreich	Linz	Kr/Xe	
Rumänien	Galati	Kr/Xe	
Russland	Tscherepowez	Kr/Xe	
	Balashiha		Kr, Xe
	Murom		Kr, Xe
	Moskau (2 x)		Kr, Xe
	Saretschny		Kr, Xe
	Jekaterinburg	Kr/Xe	
	Nischni Tagil	Kr/Xe	
	Lipezk	Kr/Xe	
	Orsk	Kr/Xe	
	Magnitogorsk	Kr/Xe	
	Norilsk	Kr/Xe	
	Tscheljabinsk	Kr/Xe	
	Dzerzhinsk	Kr/Xe	
Slowakei	Kosice	Kr/Xe	
Rep. Südafrika	Secunda	Kr/Xe	
Tschechien	Vresova	Kr/Xe	
Ukraine	Krywyj Rih	Kr/Xe	
	Mariupol (2 x)	Kr/Xe	Kr, Xe
	Severodonetsk	Xe	
	Zaporizhia	Kr/Xe	
	Odessa		Kr, Xe
	Alschevsk	Kr/Xe (gestundet)	
USA	Alpha, NJ		Kr, Xe
	Arroyo, WV	Kr/Xe	
	Beulah, ND (2 x)	Kr/Xe	
	Burns Harbor, IN (2 x)	Kr/Xe	Kr, Xe

## Fortsetzung Tab. 16

	Calumet, IN (3 x)	Kr/Xe	
	Gary, IN (1 x)	Kr/Xe	
	Ecorse, MI	Kr/Xe	
	Groves, TX	Kr/Xe	
	La Porte, TX (2 x)	Kr/Xe (+ Mitte 2019)	
	La Porte, TX	Xe	
	Texas City, TX (2 x)	Kr/Xe	
	Dear Park, TX (2 x)	Kr/Xe	
	Garfield, UT	Kr/Xe	
	Cleveland, OH	Kr/Xe	
	Freeport, TX	Kr/Xe (Mitte 2019)	
VAE	Abu Dhabi	Kr/Xe	

## 5.5 Xenon

Bis auf Südkorea fassen alle anderen Länder der Erde ihre Im- und Exportdaten von Xenon mit denen der anderen Spezialgase Krypton und zumeist auch Neon zusammen. Südkorea ist allerdings ein bedeutendes Industrieland und zudem wichtiger Halbleiter- und Elektronikproduzent, so dass sich aus seinen Importdaten Rückschlüsse auf den weltweiten Xenonmarkt, hier dem Anbietermarkt von Reinxenon, ableiten lassen. Nach KOREA CUSTOMS SERVICE wurden im Jahr 2015 3.370 kg, im Jahr 2016 6.536 kg und im Jahr 2017 11.771 kg (= 2.135 m<sup>3</sup> bei 15 °C) Xenon (HS-Code 2804294000) importiert.

Lieferländer 2017 waren zu 64,5 % die USA, zu 22,6 % Frankreich, zu 4,9 % die Ukraine, zu 4,3 % Japan, zu 3,2 % China und zu 0,5 % andere Länder (Russland, Tschechien, Österreich, Taiwan). Im Jahr 2016 waren es zu 55,2 % die USA, zu 21,7 % die Ukraine, zu 18,7 % Frankreich und zu 4,4 % andere Länder (Japan, China, Russland, Österreich) und im Jahr 2015 zu 41,5 % Frankreich, zu 27,7 % die USA, zu 14,3 % Russland, zu 8,2 % Japan, zu 6,9 % die Ukraine und zu 1,4 % andere Länder (China, Österreich, Taiwan, Tschechien).

Die folgende Kurzbeschreibung der Angebotsentwicklung von Xenon beruht erneut weit überwiegend auf den Beiträgen von RICHARD BETZENDAHL – Betzendahl Gas Consultants LLC – in der Fachzeitschrift GASWORLD (s. Literaturverzeichnis),

aktualisiert nach Daten in SPIRITUS & BETZENDAHL (2018):

Xenon ist Bestandteil des in allen Luftzerlegungsanlagen anfallenden Kolonnensumpfes (vgl. Kapitel 3.1), der, sofern genutzt, in mehreren Aufbereitungsschritten und in Spezialanlagen weiter angereichert bzw. in Reinkrypton und Reinxenon getrennt wird.

Rund 40 % des weltweiten Xenons fallen in Luftzerlegungsanlagen an, die nicht Stahlhütten, sondern Chemieanlagen mit Sauerstoff versorgen. Bekanntestes Beispiel ist die Kohlevergasungsanlage von Sasol in Südafrika (s. Anhang: Republik Südafrika).

Die Weltproduktion von Krypton und Xenon wurde noch vor wenigen Jahren zu 75 % von den drei großen internationalen Gasspezialisten Air Liquide SA (Frankreich), Praxair Inc. (USA) und Linde AG (Deutschland) inklusive des ukrainischen Unternehmens Iceblick Ltd. kontrolliert. Iceblick wurde 1992 von Unternehmen in Russland, Kasachstan und der Ukraine gegründet, war der weltweit zweitgrößte Produzent von reinem Krypton bzw. Xenon und beherrschte den ehemals sowjetischen Markt der schweren Edelgase (s. Anhang: Ukraine). Die restlichen 25 % des Marktes für Krypton und Xenon teilten sich einige weitere Stahlhütten in China und Russland, ein Chemieunternehmen in Südafrika (s. o.), die Gasunternehmen Air Products & Chemicals, Inc. (USA), Messer Group GmbH (Deutschland) und

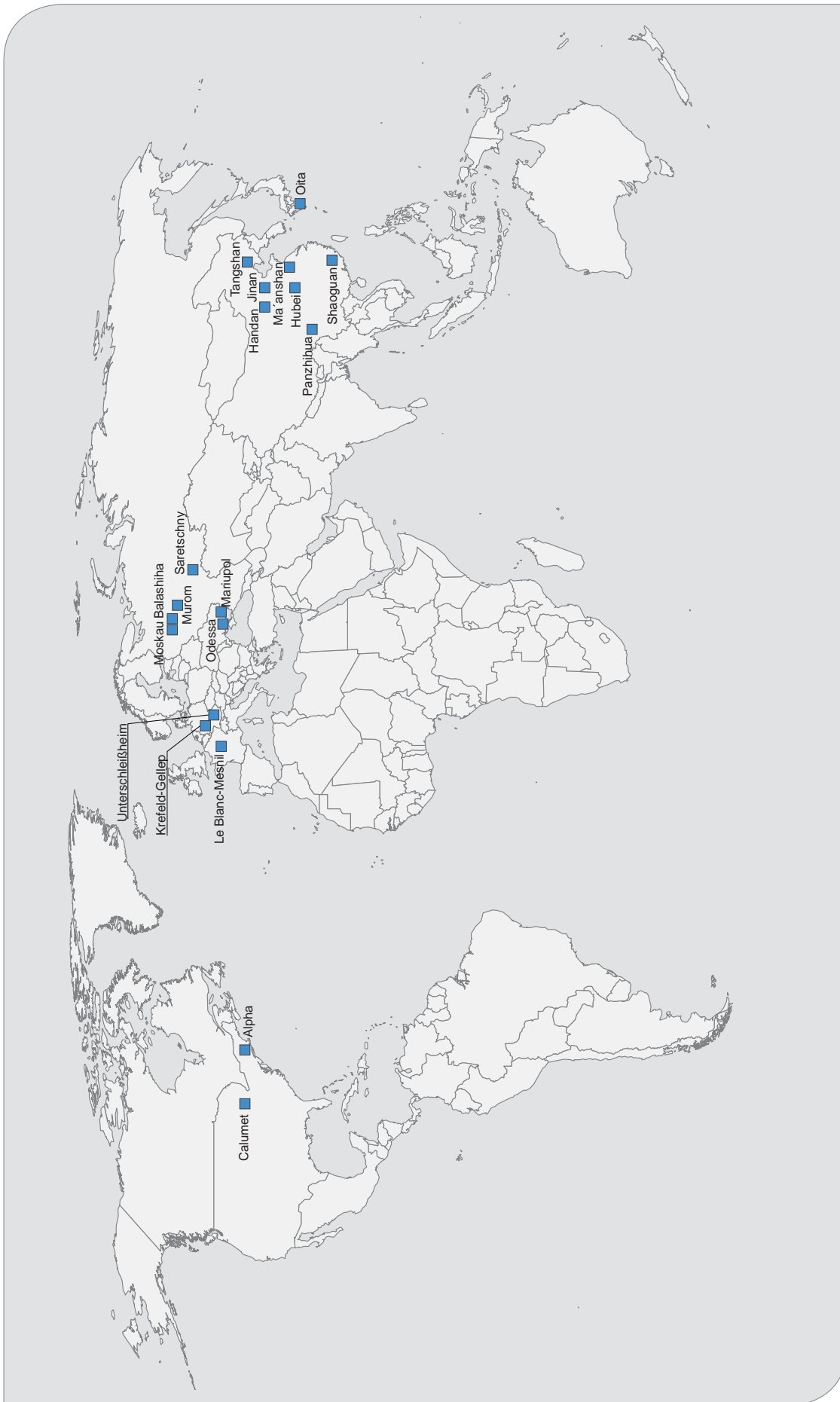


Abb. 36: Übersichtskarte der weltweiten Standorte von Aufreinigungsanlagen für Rohkrypton und Rohxenon.

Taiyo Nippon Sanso Corporation (Japan) sowie rund ein halbes Dutzend kleinere Luftzerlegungsanlagen in Osteuropa. In den letzten Jahren ist der chinesische Anteil an der weltweiten Xenonproduktion gestiegen.

Wie erwähnt wurden in der früheren Sowjetunion Krypton und Xenon als strategische Rohstoffe betrachtet. Nach LEBEDEV & PRYANICHNIKOV (1993) wurden 1991 in der Ukraine rund 11.000 m<sup>3</sup> (= 11 Mio. l) Rohkrypton/Rohxenon produziert. In allen GUS-Staaten zusammen lag die Produktion bei ca. 25.000 m<sup>3</sup> Rohkrypton/Rohxenon mit zusammen ca. 1.800 m<sup>3</sup> (= 1,8 Mio. l) Xenoninhalt.

Im Jahr 2007 gab es weltweit ca. 75 Luftzerlegungsanlagen mit Rohkrypton/Rohxenon-Produktionskapazitäten, die typischerweise jeweils rund 1,25 Mio. l Kr/a und 110.000 l Xe/a produzierten. Zehn Reinigungsanlagen waren in der Lage, aus den Rohkrypton/Rohxenon-Gasgemischen Reinxenon @ 99,999 % Xe bzw. Reinkrypton @ 99,999 % Kr zu produzieren. Die weltweite Xenonkapazität lag bei rund 10 Mio. l/a, die Produktion bei 9,0 Mio. l.

Ein Jahr später sollen 80 Luftzerlegungsanlagen in der Lage gewesen sein, Rohxenon zu produzieren (GASWORLD 2008). Die weltweite Produktionskapazität lag Ende 2008 bei 100 Mio. l Rohkrypton/Rohxenon und stieg bis in das Jahr 2009 auf 135 Mio. l (davon 14 Mio. l Xenon) an. Die weltweite Produktion lag zugleich bei rund 9,7 Mio. l Xenon.

Im Jahr 2010 gab es weltweit ca. 85 Luftzerlegungsanlagen mit einer Rohkrypton/Rohxenon-Kapazität von zusammen 111 Mio. l, davon ca. 11 Mio. l Xenon. Diese wurde zu mehr als 80 % von den Gasunternehmen Air Liquide SA, Praxair Inc., Linde AG und Iceblick Ltd. (s.o.) kontrolliert. Die Produktion soll, ungeachtet der Rezession, bei 9,7 Mio. l Xe gelegen haben. Der große ukrainische Kryptonproduzent Iceblick Ltd. (s. Anhang: Ukraine) nannte damals in COCKERILL (2010) allerdings ein deutlich höheres weltweites Angebot von rund 12.000 m<sup>3</sup> (= 12 Mio. l) Xe/a.

Zur regionalen Verteilung der weltweiten Rohkrypton/Rohxenon-Kapazitäten im Jahr 2010 sowie zu den bekannten Standorten von Luftzerlegungs- und Aufreinigungsanlagen mit Xenonproduktion siehe Kap. 5.4.

Im Jahr 2012 gab es an 70 Lokationen rund 100 Luftzerlegungsanlagen mit Rohkrypton/Rohxenon-Kapazitäten von ca. 108 Mio. l Kr-/Xe-Gasgemisch und einer Produktion von damals geschätzt 9,8 Mio. l, mittlerweile korrigiert auf 9,2 Mio. l Rohxenoninhalt. Mindestens zehn von insgesamt 17 bekannten Aufreinigungsanlagen waren weltweit in Betrieb, davon zwei in den USA, und produzierten Reinxenon.

Im Jahr 2013 lagen die weltweite Rohxenon-Kapazität bei erneut 9,8 Mio. l und die Produktion ebenfalls in dieser Höhe.

SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) identifizierten mit Stand Oktober 2017 weltweit 63 Standorte von Luftzerlegungsanlagen mit Rohxenon-Kapazitäten und 21 Standorte mit Aufreinigungsanlagen. Die Zuverlässigkeit dieser Aufstellung wird jedoch von deutschen Marktteilnehmern (ANONYM, pers. Mitteilung) bestritten. Tab. 16 gibt einen aktualisierten, allerdings auch nicht vollständigen Überblick der relevanten Luftzerlegungsanlagen und Abb. 36 zeigt die weltweite Verteilung der Aufreinigungsanlagen für Krypton und Xenon.

Ähnlich wie bei Krypton soll das weltweite Angebot von Xenon durch immer neue und größere Luftzerlegungsanlagen in China beständig wachsen und wird voraussichtlich im Jahr 2020 13 Mio. l/a erreichen und danach weiter ansteigen.

Zusätzlich wurden bzw. werden die zur Erforschung Dunkler Materie in den USA, der EU und in China genutzten rund 3 Mio. l Xenon nicht verbraucht und stehen dem Markt nach Beendigung der Forschungsaktivitäten wieder zur Verfügung.

## 5.6 Projekte (Helium)

Obwohl die Atmosphäre rund 370 Mio. t Helium enthält und die Erdkruste ständig neues Helium ausgast, kann der Weltbedarf an Helium in Höhe von rund 75 t He/d nicht aus Luftzerlegungsanlagen allein gedeckt werden. Aufgrund des geringen Heliumgehaltes in der Luft von 5,24 ppmv (Tab. 3) müssten jeden Tag über 100 km<sup>3</sup> Luft zerlegt werden, um diese weltweit benötigte Heliummenge zu generieren. Der Strombedarf hierfür würde zudem mehrere Kraftwerke erfordern. Wenn Helium alleiniges Wertgas wäre, würden die gegenwärtigen Herstellungskosten durch Luftzerlegung die Kos-

ten für eine Abtrennung aus Erdgasen um das 60 – 100fache überschreiten. Nach Berechnungen von CLARKE & CLARE (2012) könnten in 20 Jahren maximal 2 % der weltweiten Heliumproduktion aus Luftzerlegungsanlagen kommen, aber nur, wenn ab sofort alle neuen größeren Anlagen für eine He-/Ne-Gewinnung umgerüstet würden.

Die Gewinnung von Helium aus Erdgasen, ob als Bei- oder mittlerweile regional schon Hauptprodukt aus methanreichen, stickstoffreichen oder kohlendioxidreichen Erdgasen oder auch aus Restgasen der Erdgasverflüssigung, wird also auf lange Zeit unverzichtbar bleiben. Ungeachtet dessen könnte zukünftig auch Helium aus geothermischen Quellen, wie sie derzeit in Tansania erkundet werden (s. Anhang: Tansania), einen wichtigen Beitrag zur künftigen weltweiten Heliumversorgung beitragen.

Nach GUBLER et al. (2016) betragen die weltweiten Heliumressourcen zum 01.01.2016 58,82 Mrd. m<sup>3</sup> und die Heliumreserven 10,295 Mrd. m<sup>3</sup>. YAKUTSENI (2014) bezifferte die weltweiten Heliumreserven (Kategorien: A+B+C1 nach russ. Klassifikation) in Erdgasen zum 01.01.2009 auf 66,74 Mrd. m<sup>3</sup>, davon ca. 36 Mrd. m<sup>3</sup> Helium in Erdgasen mit Konzentrationen > 0,15 % He.

Der US Geological Survey (USGS) und das US Bureau of Land Management (USBLM) (s. Anhang: USA) planen mittelfristig eine Berechnung der weltweiten und bis Ende 2018 eine Neuberechnung der US-amerikanischen Heliumvorräte. Zum 31.12.2006 wurden die weltweiten Heliumvorräte auf 31,3 Mrd. m<sup>3</sup> (davon 10,1 Mrd. m<sup>3</sup> in Katar, 8,2 Mrd. m<sup>3</sup> in Algerien, 6,8 Mrd. m<sup>3</sup> in Russland, 2,0 Mrd. m<sup>3</sup> in Kanada und 1,1 Mrd. m<sup>3</sup> in China) geschätzt. Bis zum 31.12.2017 hatte das USBLM 22.100 Erdgasproben aus 27 Ländern analysiert, um die Heliumvorräte genauer berechnen zu können.

Eine unabhängige Berechnung der weltweiten Heliumvorräte im Rahmen dieser Studie ist leider nicht möglich, da Ausgangsdaten zu zahlreichen der US-amerikanischen Erdgasfelder fehlen und auch die Heliumgehalte wichtiger potenzieller Erdgasfelder, deren Erdgas bereits verflüssigt wird (Libyen, Indonesien) nicht publiziert sind.

Eine Übersicht der bekannten, da publizierten Heliumprojekte bzw. geplanten Heliumanlagen ist

Tabelle 17 zu entnehmen (vgl. Anhang: Länderprofile). Ob diese Projekte bzw. Anlagen jedoch alle realisiert werden – und dazu noch fristgerecht – wird allein die Zukunft zeigen. In dieser Aufstellung fehlen etwaige Heliumanlagen in Indonesien oder im Iran, über die in der Fachpresse immer wieder spekuliert wird.

Indonesien verfügte im Jahr 2016 mit rund 10 Billionen m<sup>3</sup> über die vierzehntgrößten Erdgasressourcen der Erde und stand mit einer Förderung von 74 Mrd. m<sup>3</sup> an 12. Stelle der weltweiten Erdgasförderung. Ein Großteil des Erdgases wird exportiert und Indonesien war im Jahr 2017 der fünfgrößte Exporteur von Flüssigerdgas weltweit. Der Heliumgehalt des derzeit genutzten heimischen Erdgases ist nicht publiziert und der Verbleib des Restgases aus den derzeit bereits betriebenen acht LNG-Anlagen unbekannt. Zwei weitere LNG-Anlagen sind derzeit im Bau und drei geplant. Aufgrund der stark steigenden heimischen Nachfrage nach Erdgas benötigt Indonesien jedoch geschätzt rund 32 Mrd. US\$ bis zum Jahr 2025 um seine Erdgasinfrastruktur auszubauen. Auch aufgrund dieses hohen Kapitalbedarfs für andere dringendere Investitionen ist es unwahrscheinlich, dass das Land zusätzlich in Heliumanlagen investiert.

Ähnlich wie der katarische Abschnitt führt auch der iranische Abschnitt des großen South-Pars-/North-Dome-Erdgasfeldes Helium, das bei der Verflüssigung im Iran gewonnen werden könnte. Nach GUBLER et al. (2016) werden auch die iranischen Heliumvorräte auf 10 Mrd. m<sup>3</sup> geschätzt. Aufgrund Kapitalmangels plant die staatliche iranische Erdölbehörde (NIOC) jedoch ebenfalls nicht den Bau einer eigenen Heliumanlage.

MOHR & WARD (2014) prognostizierten – allerdings basierend auf den fehlerhaften Produktionszahlen des USGS und unzähliger Annahmen bezüglich der Heliumförderung in den verschiedenen US-Bundesstaaten – dass es seitens der geologischen Verfügbarkeit von Helium in den nächsten 100 Jahren zu keinen Knappheiten bei diesem Edelgas kommen wird.

Tab. 17: Vergleichende Auflistung der bekanntesten Heliumprojekte bzw. geplanten Heliumanlagen.

Land	Erdgasfeld bzw. Anlagenbezeichnung	Unternehmen	He-Inhalt bzw. geplante Kapazität	He-Gehalt	Geplanter Produktionsbeginn
Kasachstan	Amangeldy, Anabay, Ayrakty, Kумыrly, Nord Ucharal, Ucharal-Kempirtobe	JCS KazTransGas	37,7 Mio. m <sup>3</sup>	0,22 – 0,69 %	offen
Katar	Helium 3	Qatargas	11,1/11,8 Mio. m <sup>3</sup> /a	0,05 % (LNG)	2019
Russische Föderation	Kovykta, Chayanda Amur GPP	PAO Gazprom	4,4 Mrd. m <sup>3</sup> 5 Mrd. m <sup>3</sup> 19,4 Mio. m <sup>3</sup> /a 19,4 Mio. m <sup>3</sup> /a 21,2 Mio. m <sup>3</sup> /a	0,24 – 0,28 % 0,50 – 0,54 %	bis 2021 2021 2022 2024
Russische Föderation	Yaraktinsky	Irkutsk Oil Company	7 Mio. m <sup>3</sup> /a		2021
Republik Südafrika	Virginia (Free State)	TETRA 4 (Pty) Ltd.	21 – 28 Mio. m <sup>3</sup> 650.000 m <sup>3</sup> /a	3 – 4 %	H1 2019
Tansania	Rukwa	Helium One Ltd.	1,5 Mrd. m <sup>3</sup>	8 – 10,2 %	offen
USA	St. John (Arizona)	IACX Energy LLC	0,2 Mio. m <sup>3</sup> /a	0,009 – 0,134 %	offen
USA	Pinta Dome (Arizona)	IACX Energy LLC	0,4 Mio. m <sup>3</sup> /a	5,4 – 9,8 %	offen
USA	Woodside Dome (Utah)	IACX Energy LLC	1,7 Mio. m <sup>3</sup> /a	0,7 – 1,5 %	offen
USA	Dry Piney Creek (Wyoming)	QEP Resources, Inc.	19,4 Mio. m <sup>3</sup> /a	0,6 %	Q3 2019



## Erdgasverflüssigung

Im Jahr 2016 wurden rund 1.086 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas und damit 30 % des weltweit geförderten Erdgases in Höhe von 3.620 Mrd. m<sup>3</sup> grenzüberschreitend gehandelt (BGR 2017), davon rund 347 Mrd. m<sup>3</sup> (32 %) in Form von Flüssigerdgas (*Liquefied Natural Gas/LNG*).

Die Zahl der LNG exportierenden Länder stieg 2016 wieder auf 18 an, da Angola und Ägypten ihre Produktion wieder aufgenommen haben (IGU 2017). Über 70 % der LNG-Nachfrage kam aus Asien, allen voran aus Japan, das als weltweit größter LNG-Importeur 2016 fast ein Drittel des globalen Angebotes einführte. Europa ist der zweitgrößte Importeur von LNG. Dort gibt es gegenwärtig 25 große LNG Anlandeterminals zwecks Regasifizierung des verflüssigten Erdgases, 23 davon liegen in der EU, zwei in der Türkei. Die entsprechenden europäischen Terminals befinden sich in Belgien, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Italien, Litauen, den Niederlanden, Polen, Portugal, Spanien und der Türkei. 2016 lag die gesamte Regasifizierungs-Kapazität der 25 europäischen Anlagen bei 216 Mrd. m<sup>3</sup>. Dies entspricht etwa 40 % des Erdgasverbrauches der Region.

Anfang 2017 standen weltweit in 78 LNG-Anlagen nominell rund 340 Mio. t pro Jahr, also etwa 457 Mrd. m<sup>3</sup> an Verflüssigungskapazitäten zur Verfügung. Rund 68 % der nominalen Gesamtkapazitäten verteilten sich auf die sechs Länder Katar, Australien, Malaysia, Indonesien, Algerien und Nigeria. 29 LNG-Anlagen mit Gesamtkapazitäten von 114,6 Mio. t/a waren Anfang 2017 weltweit

im Bau, weitere 123 Anlagen mit Gesamtkapazitäten von 879 Mio. t/a, diese zu 76 % in den USA, waren geplant.

Laut der International Gas Union (IGU 2017) war 2016 erneut Katar mit einem Exportvolumen von 77,2 Mio. t (104 Mrd. m<sup>3</sup>) der weltweit größte Exporteur von LNG, gefolgt von Australien mit 57 Mio. t (76 Mrd. m<sup>3</sup>) und Malaysia mit 24,9 Mio. t (33 Mrd. m<sup>3</sup>). Katar besitzt nach Russland und dem Iran die weltweit drittgrößten Erdgasreserven und damit gut 12 % der globalen Vorräte. Über 60 % seiner vermarkteten Erdgasförderung, die im Vorjahr 165 Mrd. m<sup>3</sup> betrug, verschiffte Katar in Form von LNG weltweit. Das Land deckte 2016 rund 30 % des LNG-Marktes ab und hat jetzt angekündigt, seine jährliche Erdgas-Verflüssigungskapazität bis spätestens 2025 um 30 % auf 100 Mio. t/a steigern zu wollen.

Damit steht Katar allerdings im Wettbewerb mit anderen Ländern, die ihre LNG-Mengen ebenfalls erhöhen wollen. So hat Australien in den vergangenen Jahren erhebliche Investitionen in seine LNG Export-Anlagen getätigt und könnte in den nächsten Jahren Katar als weltweit größten LNG-Exporteur ablösen. Darüber hinaus haben die USA 2016 mit dem Export von Flüssigerdgas aus der Schiefergasförderung begonnen.

Derzeit produzieren nur wenige LNG-Anlagen in Algerien, Australien und Katar Helium als Beiprodukt. Eine zusätzliche derartige Heliumanlage in Katar ist angekündigt.

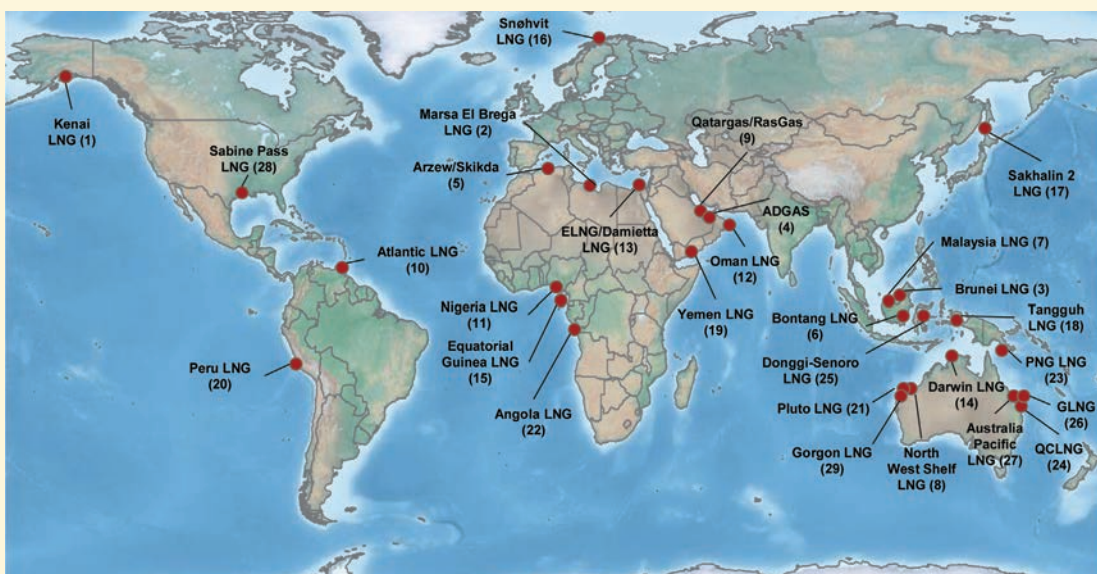


Abb: 37: Übersichtskarte der gegenwärtigen weltweiten LNG-Anlagen aus IGU (2017). Die Zahlen hinter den Anlagen sind Referenznummern und haben hier keine Bedeutung.

## 6 Bilanz von Angebot und Nachfrage

### 6.1 Helium

Da die Kosten zur Abkühlung, dem Transport und der Lagerung von Edelgasen in flüssiger Form hoch sind, andererseits Gase im gasförmigen Zustand extrem viel Platz benötigen (vgl. Kap. 5.1), nehmen viele Analysten vereinfacht an, dass die Nachfrage von Edelgasen, speziell Helium, im Regelfall ungefähr dem Angebot entspricht. Nur in Ausnahmeseiten, wo Kunden über stark steigende Preise oder gar Lieferengpässe klagen, wird nach Argumenten gesucht, um dieses dann doch offensichtliche Ungleichgewicht von Angebot und Nachfrage zu erklären. Im Zeitraum 2011 – 2013, als Helium weltweit nicht in ausreichenden Mengen für alle Nutzer zur Verfügung stand, wurde dies unisono (DAWSON 2011, GARVEY (2011), COCKERILL 2013c, KORNBLUTH 2015) mit einem unzureichenden Angebot aufgrund geringer Nachfrage nach Erdgas und damit verbunden geringem Angebot heliumreicher Erdgase, noch nicht angelegener neuer Heliumanlagen außerhalb der USA sowie mit unvorhergesehenen Wartungen von Heliumanlagen in den USA erklärt (vgl. Kap. 5.1). Mögliche Veränderungen im Nachfrageverhalten der Heliumnutzer wurden dagegen nicht berücksichtigt.

Auffallend ist, dass fast alle Heliumexperten – von denen die meisten in den USA ansässig sind – bei ihren Analysen auf die Angebotdaten (Nachfrage = Angebot) des USGS zurückgreifen und so zu den gleichen Schlüssen kommen. Mitarbeiter aus einzelnen Helium produzierenden Gasunternehmen kommentieren in Interviews dann unterstützend diese Rückschlüsse, ohne auf etwaige mögliche Mängel in den Analysen hinzuweisen. Nur sehr wenige Analysten, z. B. FROBES (2017), weisen darauf hin, dass etwas mit den Ausgangszahlen nicht stimmt.

Da, wie in Kap. 5.1 nachgewiesen, die bisher publizierten weltweiten Produktionsstatistiken von Helium Mängel enthalten, und damit unter der Annahme Nachfrage = Angebot (s. o.), auch die in Kap. 4.1 der Vollständigkeit halber zitierten absoluten Nachfragedaten, soll für eine Bilanzierung von Angebot und Nachfrage stattdessen das relative Nachfrageverhalten näher betrachtet werden.

Im Zeitraum 2006/2007 bestand eine weltweite Knappheit an Helium. In diesen Jahren war das absolute Angebot mit 173 Mio. m<sup>3</sup> bzw. 182 Mio. m<sup>3</sup> Helium jedoch auffallend hoch, so dass die Nachfrage sogar noch über diesen Werten gelegen haben muss.

GARVEY (2009) kam zu dem Schluss, dass die Knappheit an Helium nicht nur 2006 und 2007

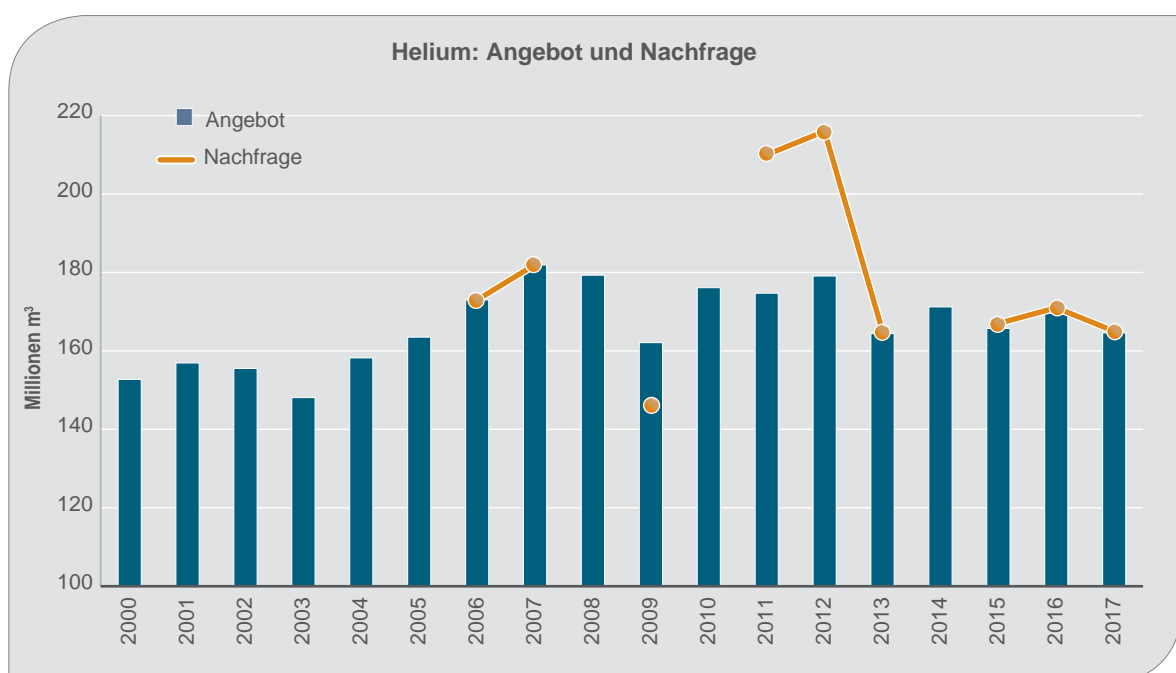


Abb. 38: Helium: Angebot und vermutete Nachfrage seit dem Jahr 2000.

bestand, sondern sich bis zum Beginn der Weltfinanzkrise im Herbst 2008 hinzog. Nur im 1. Quartal 2009 überschritt dann bei stark fallendem Bedarf das Angebot, geschätzt um 10 %, die Nachfrage. Da das Angebot im gesamten Jahr 2009 bei ca. 162 Mio. m<sup>3</sup> lag, kann daraus eine Nachfrage von ca. 146 Mio. m<sup>3</sup> abgeleitet werden.

Nach KORNBLUTH (2015) lag im Zeitraum 2011 – 2013 das weltweite Heliumangebot 20 % oder sogar mehr unter der Nachfrage. Die Nachfrage hätte dementsprechend in den Jahren 2011/2012 bei 210 – 215 Mio. m<sup>3</sup> bzw. im Jahr 2013 bei ca. 200 Mio. m<sup>3</sup> Helium gelegen. Nach GARVEY (2013) entsprach im Jahr 2013 die Nachfrage allerdings dem verfügbaren Angebot und hätte somit bei nur ca. 165 Mio. m<sup>3</sup> Helium gelegen.

Seit dem Jahr 2014 soll auf dem Weltmarkt ein Überangebot für Helium bestehen, was durch neue Kapazitäten in Katar, Algerien und Russland sowie fehlende Wartungsstillstände bei großen Produzenten begründet wird.

In den Jahren 2015 und 2016 soll das Angebot die Nachfrage um ca. 2 Mio. m<sup>3</sup> übertroffen haben, was einer Nachfrage nach 168 – 172 Mio. m<sup>3</sup> Helium gleich käme.

Nach GARVEY (2017b) entsprach im Jahr 2017 die weltweite Nachfrage nach Helium dem Angebot und lag somit bei ca. 165 Mio. m<sup>3</sup>.

Da die bisherigen Analysen der weltweiten Heliumexperten auf teils unrichtigen Daten und Annahmen beruhen, ist eine Bilanzierung von Angebot und Nachfrage über die letzten Jahre nur mit großen Einschränkungen möglich (s. Abb. 38). Vor allem das Fehlen jeglicher belastbarer Nachfrage-daten verhindert eine weitergehende Auswertung.

Vermutet werden kann, dass in den Jahren bis zur Weltfinanzkrise 2009 durch ungebremschte Nutzung von Helium die Nachfrage zeitweise das Angebot übertraf, obwohl im Jahr 2007 mit 181,9 Mio. m<sup>3</sup> das bisher weltweit höchste Angebot an Helium erreicht wurde. Bereits kurze Zeit nach der Weltfinanzkrise stieg der Konsum wieder auf neue Rekordwerte an, wobei dieses Mal das Angebot überhaupt nicht mehr mithalten konnte. Durch engagierte Substitution und Recycling gelang es den Nutzern bis 2013/2014 ihren Bedarf deutlich zu reduzieren. Die ehemals sehr hohe Nachfra-

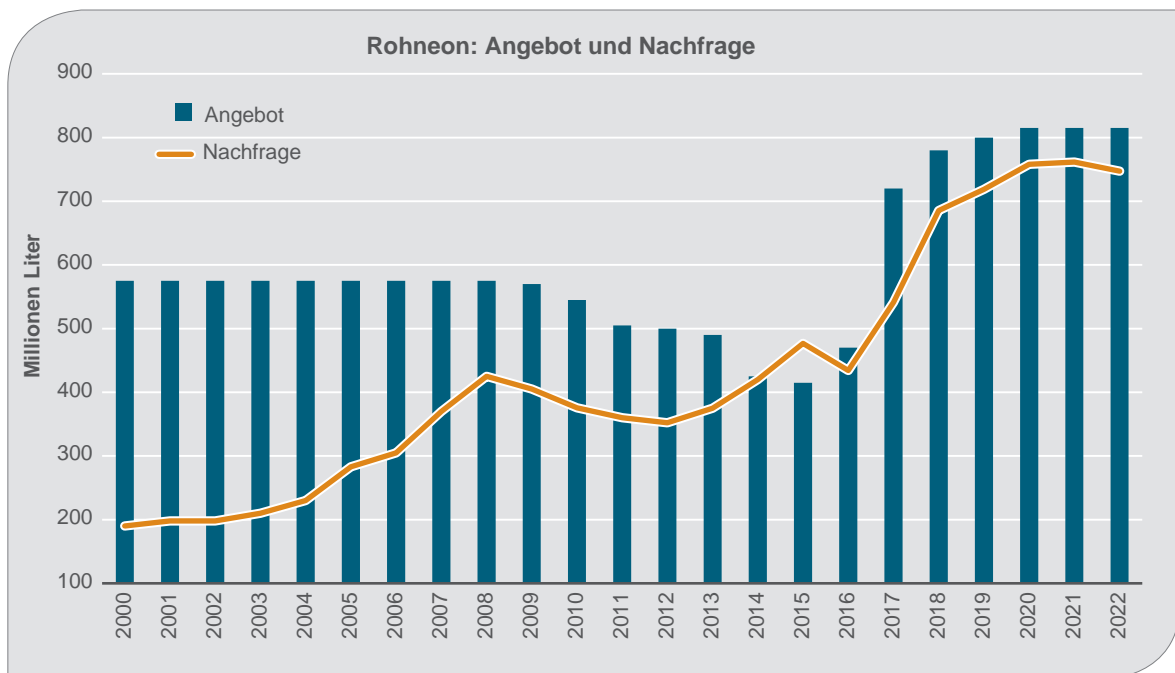
ge nach Helium wurde in den letzten Jahren nicht mehr erreicht, was weniger durch ein geringes Interesse an diesem Edelgas, sondern vielmehr durch Befürchtungen der Nutzer an einer neuen Knappheit begründet sein dürfte. Kurzfristige, in vielen Medien diskutierte Versorgungsengpässe, wie während der Katarkrise im Juni 2017, verhindern eine Rückkehr der potenziellen Nutzer zu Helium als bevorzugtes Industriegas.

## 6.2 Neon

Die folgende Darstellung der Entwicklung der Bilanz von Angebot und Nachfrage von Neon beruht vollständig auf den Beiträgen von RICHARD BETZENDAHL – Betzendahl Gas Consultants LLC – in der Fachzeitschrift GASWORLD (s. Literaturverzeichnis) und wurde ergänzt nach Angaben in SPIRITUS & BETZENDAHL (2018):

Bis zur Weltfinanzkrise im Jahr 2009 überstieg das weltweite Angebot an Neon die nur langsam steigende Nachfrage deutlich. Mit der Weltfinanzkrise und noch einige Jahre danach ging die Nachfrage nach Neon vor allem aufgrund der deutlich zurückgehenden Produktion von Plasmafernsehern zurück, aber auch das Neonangebot sank aufgrund geringerer Produktion in den weltweit Neon als Spezialgas produzierenden Luftzerlegungsanlagen.

Beginnend ab dem Jahr 2012 stieg die Nachfrage nach Neon aufgrund des hohen Bedarfs für Laser in der Halbleiterfertigung stark an. Bei gleichzeitigem Rückgang der Neonproduktion in Osteuropa (vgl. Kap. 5.2) überstieg ab Juli 2014 die Nachfrage das Angebot. Zugleich kam es ab Ende 2014 zu einem Eigentümerwechsel beim marktdominierenden ukrainischen Unternehmen Iceblick Ltd., wobei der neue Präsident versuchte, Extrempreise durchzusetzen (vgl. Anhang: Ukraine). All dies führte zu Panikkäufen der großen Neonverbraucher, d. h. der Halbleiterproduzenten, die sich direkt ab Neonaufreinigungsanlage eindeckten und sich bei den Preisen gegenseitig hochboten. Zudem führten Vorratskäufe zu kurzfristigen und extremen Preissteigerungen (vgl. Kap. 7.2). Den Käufern war es dabei wichtig, einen Stillstand ihrer Halbleiterproduktion unter allen Umständen zu vermeiden.



**Abb. 39: Rohneon: Angebot und Nachfrage seit dem Jahr 2000, inkl. Prognose der weiteren Entwicklung, Quellen: BETZENDAHL (diverse Jahre, s. Literaturverzeichnis), SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) sowie ANONYM (pers. Mitteilung).**

Aufgrund der sehr hohen Nachfrage und der extremen Preise erhöhten die Luftreinigungsanlagen mit Neonkapazitäten in Russland, der Ukraine und in China kurzfristig ihre Produktion und gestundete Anlagen wurden reaktiviert. Innerhalb eines Jahres, bis Mitte 2016, erhöhte sich dadurch die weltweite Neonproduktion um mehr als 40 % und übertraf damit erneut deutlich die durch Recycling (s. Kap. 3.4) mittlerweile reduzierte Nachfrage.

Im Juli 2016 kündigte die Linde-Gruppe an, ihre Rohneonkapazität durch Erweiterung ihrer Luftzerlegungsanlage in La Porte, Texas um 40 Mio. l/a zu erhöhen. Zudem sollen weitere Luftzerlegungsanlagen in Russland und China mit Neonkapazitäten ausgestattet werden, so dass das Angebot weiter steigen wird. Dies wird allerdings auch für die Nachfrage vorhergesagt, die von der Eröffnung und dem Bedarf neuer Halbleiterfabriken in China geprägt sein wird. Im Zeitraum 2020/21 könnte daher erneut eine Knappheit auf dem Weltneonmarkt auftreten.

### 6.3 Argon

Aktuelle und gesicherte Analysen zum weltweiten Angebot und zur Nachfrage von Argon sind nicht publiziert. Argon ist im Gegensatz zu allen anderen Edelgasen ein in ausreichenden Mengen regional produziertes und daher nicht weltweit gehandeltes Industriegas. Stellen die Gasunternehmen eine regional zunehmende Nachfrage nach Argon fest, planen sie zukünftige Luftzerlegungsanlagen (alte Anlagen umzurüsten ist zu aufwändig und zu teuer) mit Argon-Kolonnen auszurüsten und nehmen dieses Gas dann ggf. den Luftzerlegungsanlagenbetreibern als Handelsware ab.

Die derzeitige weltweite Nachfrage nach Argon beträgt mindestens 5 Mrd. m<sup>3</sup>/a (s. Kap. 4.3), das Angebot sollte jedoch 9 Mrd. m<sup>3</sup>/a übersteigen (s. Kap. 5.3), so dass Argonknappheiten, von denen zeitweise berichtet wird, sicherlich nur regionalen Ausmaßes und kurzfristig sind.

## 6.4 Krypton

Die folgende Darstellung der Bilanz von Angebot und Nachfrage von Krypton beruht vollständig auf den Beiträgen von RICHARD BETZENDAHL – Betzendahl Gas Consultants LLC – in der Fachzeitschrift GASWORLD (s. Literaturverzeichnis) und wurde ergänzt nach Angaben in SPIRITUS & BETZENDAHL (2018):

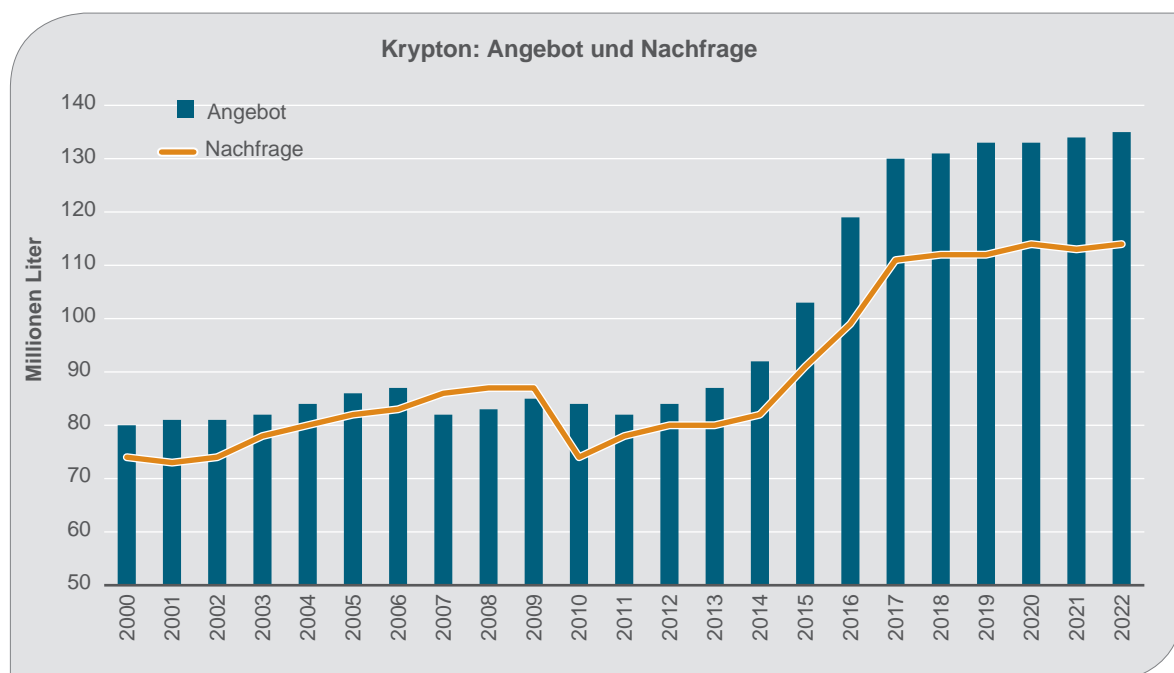
Der weltweite Markt von Krypton ist seit vielen Jahren, mit Ausnahme des Zeitraums 2007 – 2009, von einem Überangebot geprägt und wird es wohl auch noch für lange Zeit bleiben. Dies liegt darin begründet, das Krypton ausschließlich als Koppelprodukt des begehrten Xenons anfällt, das aber wiederum rund zehnmals so selten ist. Zugleich ist die Nachfrage nach Krypton sehr einseitig durch die Isolierglasindustrie geprägt, die Krypton als isolierendes Füllgas nutzt. Der ehemals zweite große Absatzmarkt für Krypton, die Befüllung von Glühlampen, ist mit der Entwicklung von Energiesparlampen erst eingebrochen, mittlerweile durch die rasante Durchdringung des Leuchtmittelmarktes mit LEDs größtenteils zusammengebrochen. Dennoch hat hier z. B. in Deutschland der Absatzmarkt von Halogenlampen mit Kryp-

tonfüllung für Autoscheinwerfer immer noch eine gewisse Bedeutung. Bei den Produzenten sollen sehr große Menge an Krypton lagern, die für viele Monate Produktion reichen und auch somit keine Notwendigkeit zur Produktionssteigerung erwarten lassen.

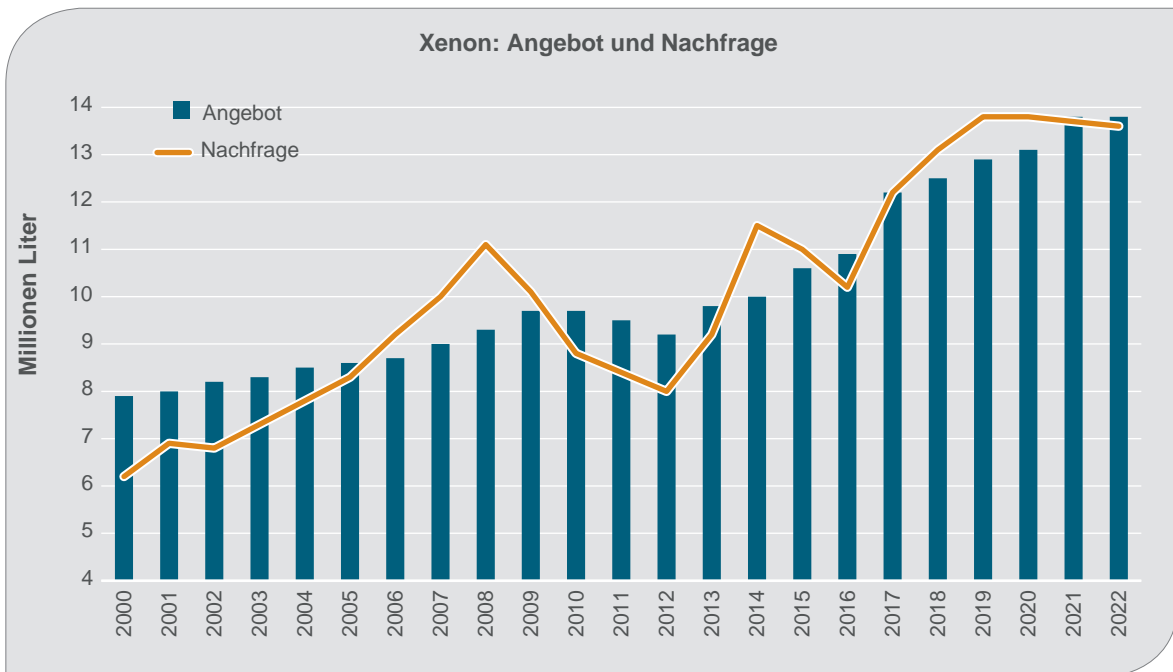
In den Jahren vor der Weltfinanzkrise 2009 waren alle Absatzmärkte stark und das Angebot von Krypton lag sogar kurzfristig unterhalb der Nachfrage. Mit der Rezession brach der weltweite Bauboom jedoch ein, Wärmeschutzgläser wurden nicht mehr in so hohem Masse nachgefragt und als die Rezession vorbei war, waren in vielen Ländern Energiesparlampen vorgeschrieben.

## 6.5 Xenon

Die folgende Darstellung der Entwicklung der Bilanz von Angebot und Nachfrage von Xenon beruht vollständig auf den Beiträgen von RICHARD BETZENDAHL – Betzendahl Gas Consultants LLC – in der Fachzeitschrift GASWORLD (s. Literaturverzeichnis) und wurde ergänzt nach Angaben in SPIRITUS & BETZENDAHL (2018):



**Abb. 40: Krypton: Angebot und Nachfrage seit dem Jahr 2000, inkl. Prognose der weiteren Entwicklung, Quellen: BETZENDAHL (diverse Jahre, s. Literaturverzeichnis) sowie SPIRITUS & BETZENDAHL (2018).**



**Abb. 41: Xenon: Angebot und Nachfrage seit dem Jahr 2000, inkl. Prognose der weiteren Entwicklung, Quellen: BETZENDAHL (diverse Jahre, s. Literaturverzeichnis), SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) sowie ANONYM (pers. Mitteilung).**

Bis in die Mitte der 2000er Jahre war der weltweite Xenonmarkt durch ein leichtes Überangebot gekennzeichnet. In den folgenden Jahren bis zur Weltfinanzkrise kamen ständig neuen Anwendungen für Xenon hinzu, so dass die Nachfrage das kaum steigende Angebot zum Teil deutlich überschritt. In diese Zeit fallen der Einsatz von Xenon und Neon in der Produktion von Plasmafernsehern sowie der beginnende Einsatz von Xenon, Krypton und Neon für Laser in der Halbleiterproduktion, beides Anwendungen, die große Mengen an Xenon erforderten. Vor allem in den Jahren 2007 und 2008 resultierte daraus eine Knappheit, die entsprechende Preissteigerungen zur Folge hatte (vgl. Kap. 7). Im Zuge der weltweiten Rezession ging dann vor allem die Nachfrage, weniger das Angebot von Xenon deutlich zurück.

Erst Ende des Jahres 2012 entwickelte sich mit der Verwendung von Xenon als Füllgas für Halogenlampen ein neuer vielversprechender Absatzmarkt für dieses Edelgas, der jedoch wider Erwarten sehr kurzlebig war. Nur im Jahr 2014 war hierdurch die Nachfrage nach Xenon erneut höher als das weltweite Angebot. Ab Mitte 2015 herrschte erneut ein Überangebot an Xenon, das aber zeitlich begrenzt war. Mit dem Einsatz von Xenon

in der Grundlagenforschung und in immer weiteren Satelliten, vor allem aber in neuen Laserverfahren in der Halbleiterfertigung, übertrifft damit die Nachfrage bereits wieder das Angebot.



**Abb. 42: Xenon – das wertvollste und kritischste Edelgas, Foto: BGR.**

## 7 Preisentwicklung

Mit Ausnahme von Helium werden die Preise für alle Edelgase (und alle anderen Industriegase) zwischen den Verbrauchern und den Produzenten individuell verhandelt. Hierbei haben der regionale Wettbewerbsmarkt, die benötigte Menge, die Dauer des Liefervertrages, die regionalen Energiekosten, die Betriebsdauer der Luftzerlegungsanlagen sowie die Transportentfernung zwischen Luftzerlegungsanlage und Abnahmepunkt den größten Einfluss. Zudem spielen die Art und Anzahl der ggf. benötigten bzw. ausgeliehenen Transport- und Lagerbehälter bei der Preisfindung eine Rolle.

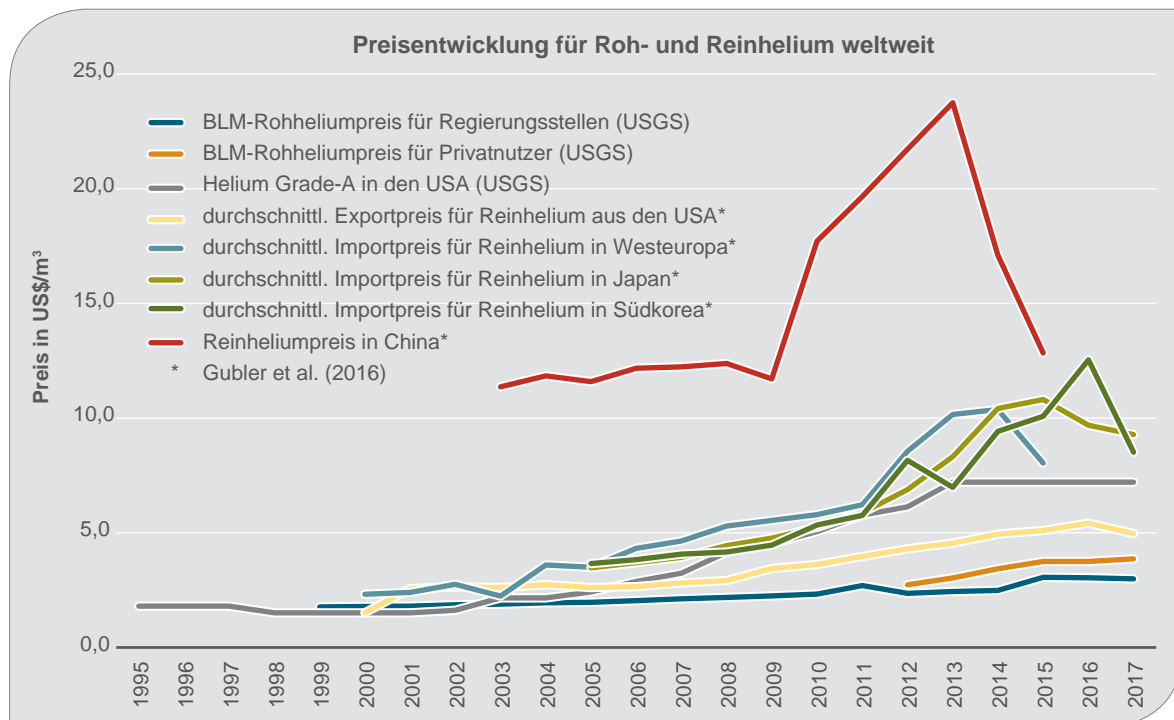
### 7.1 Helium

Die internationalen großen Gasunternehmen sind an die wenigen weltweiten Heliumproduzenten praktisch ausschließlich über sog. „Take-or-Pay“-Verträge gebunden. Durch diese Vertragsform sind die Unternehmen verpflichtet, die ihnen garantierte Heliummenge auf jeden Fall abzunehmen („take“) oder zu bezahlen („pay“), egal, ob dafür gerade ein Absatzmarkt besteht, oder nicht.

Die in den Verträgen zwischen den Heliumproduzenten und den Gasunternehmen vereinbarten Liefer- bzw. Abnahmepreise werden nicht veröffentlicht, doch gibt es Anhaltspunkte für deren ungefähre Höhe, da diese sich an den Preisangaben des US Bureau of Land Management (USBLM) orientieren. Häufig handelt es sich um Abnahmeverträge mit Preisgleitklauseln in Abhängigkeit vom USBLM-Preis (s. u.), die über eine Dauer von 20 Jahren abgeschlossen werden. Über zukünftige Preisgleitklauseln ist noch nicht entschieden, da das USBLM vermutlich in Zukunft keine Preise mehr publizieren wird (vgl. Anhang: USA).

Der USGS publiziert in seinen jährlichen Minerals Yearbooks (mit Unterbrechungen):

- seit 1925 offizielle Preise für Helium (@ 98,2 % He, später 99,995 % He, mittlerweile 99,997 % He) aus staatlichen Heliumanlagen für staatliche und seit 1938 auch für private Kunden (vgl. Cai et al. 2012)
- seit 1973 Schätzpreise für Reihelium (@ 99,995 % He, mittlerweile 99,997 % He), wie sie in den USA von privaten Heliumproduzenten verlangt werden



**Abb. 43: Preisentwicklung für Roh- und Reihelium seit dem Jahr 1995, nach USGS bzw. GUBLER et al. (2016), ergänzt.**

- seit 1999 offizielle Preise des USBLM für Rohhelium bei Abgabe an staatliche Kunden
- seit 2012 offizielle Preise des USBLM für Rohhelium bei Abgabe an private Kunden

GUBLER et al. (2016) recherchierten zudem:

- den durchschnittlichen Exportpreis für Reinhelium aus den USA seit dem Jahr 2000
- den durchschnittlichen Importpreis für Reinhelium nach Westeuropa seit dem Jahr 2000
- den durchschnittlichen Importpreis für Reinhelium nach Japan seit dem Jahr 2005
- den durchschnittlichen Importpreis für Reinhelium nach Südkorea seit dem Jahr 2005
- den durchschnittlichen Inlandspreis für Reinhelium in China seit dem Jahr 2003

Die Entwicklung dieser sehr unterschiedlichen Heliumpreise ist in Abb. 43 dargestellt.

Im Vergleich dazu lag der deutsche Durchschnittsimportpreis für Helium im Jahr 2017 bei 6,43 €/m<sup>3</sup> (Kap. 8.2).

Zusätzlich ist aus der Literatur der historische Preis von Helium im Jahr 1915 (61.000 US\$/m<sup>3</sup>) und 1921 (17,30 US\$/m<sup>3</sup>, später gefallen auf 6,27 US\$/m<sup>3</sup>) sowie durch den USBLM der durchschnittliche Erlös der Heliumauktionen in den letzten Jahren bekannt (vgl. Anhang: USA):

- 1. Auktion 30.7.2014:  
verauktioniert 2,6 Mio. m<sup>3</sup> Rohhelium,  
Durchschnittserlös 5,82 US\$/m<sup>3</sup>
- 2. Auktion 26.8.2015:  
verauktioniert 7,6 Mio. m<sup>3</sup> Rohhelium,  
Durchschnittserlös 3,74 US\$/m<sup>3</sup>
- 3. Auktion 20.7.2016:  
verauktioniert 11,1 Mio. m<sup>3</sup> Rohhelium,  
Durchschnittserlös 3,86 US\$/m<sup>3</sup>
- 4. Auktion 19.7.2017:  
verauktioniert 13,9 Mio. m<sup>3</sup> Rohhelium,  
Durchschnittserlös 4,29 US\$/m<sup>3</sup>
- 5. Auktion 31.8.2018:  
verauktioniert 5,8 m<sup>3</sup> Rohhelium,  
Durchschnittserlös 10,09 US\$/m<sup>3</sup>
- 6. Auktion 9.2018:  
verauktioniert 2,5 m<sup>3</sup> Rohhelium,  
Durchschnittserlös 6,31 US\$/m<sup>3</sup>

Der Preis für <sup>3</sup>He lag historisch bei 100 – 200 US\$/l, stieg dann nach Berichten über die Knappheit dieses Heliumisotops Mitte 2009 auf 1.000 – 1.200 US\$/l

an, erreichte im Herbst 2009 3.000 US\$/l, im Jahr 2012 3.900 US\$/l und lag im Jahr 2016 wieder bei 2.000 US\$/l (GUBLER et al. 2016).

## 7.2 Neon

Die Preisentwicklung von Neon ist aus den Beiträgen von RICHARD BETZENDAHL – Betzendahl Gas Consultants LLC – in der Fachzeitschrift GASWORLD (s. Literaturverzeichnis), aktualisiert nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) bekannt.

Danach lag der Durchschnittspreis für Neon im Großhandel über viele Jahre relativ konstant bei 0,10 US\$/l, stieg in den Jahren 2012 – 2014 aufgrund zunehmender Nachfrage auf das Doppelte bis Dreifache an und explodierte im Jahr 2015 auf das Hundertfache (bis 3,00 US\$/l, Spot-Preise bis 5,00 US\$/l) (s. Kap. 4.2, 5.2 und 6.2), nur um dann sehr schnell wieder auf Werte von 0,10 – 0,20 US\$/l, im September 2017 0,08 US\$/l, zurückzufallen. Für die kommenden Jahre bis 2022 wird tendenziell – mit leichten Schwankungen – eine generelle Preiserhöhung bis 0,30 US\$/l vorausgesagt.

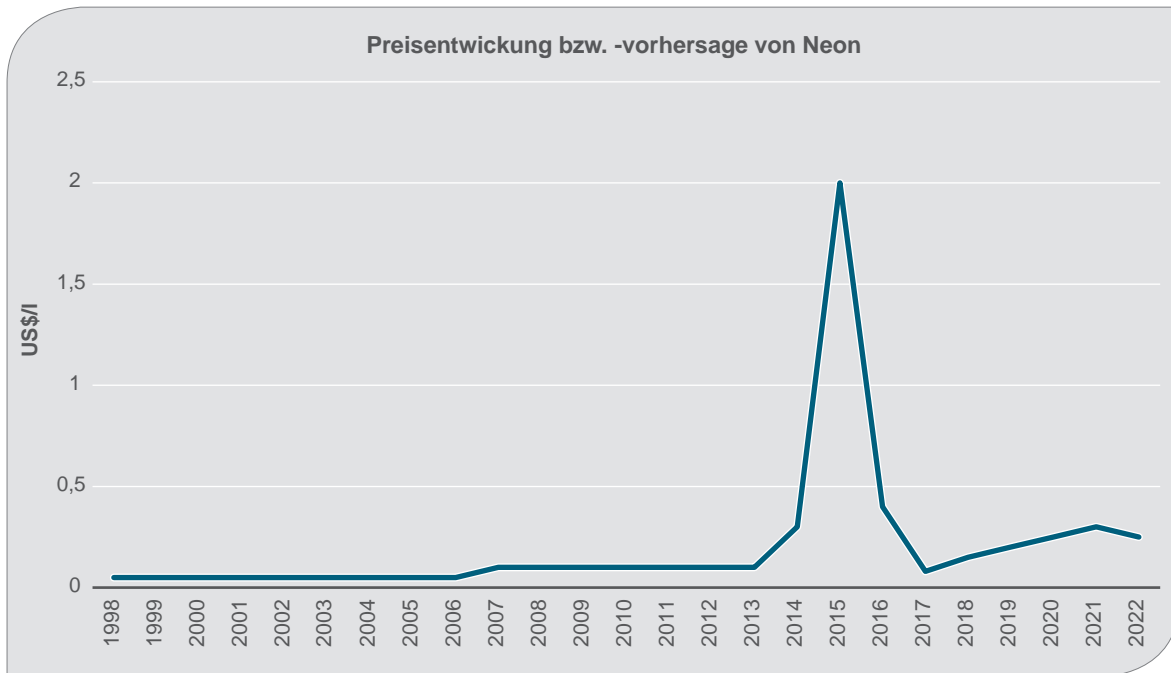
## 7.3 Argon

Die historische Preisentwicklung von Argon ist nicht bekannt und dürfte regional sehr stark variieren. Nach SURESH et al. (2016) stiegen die Preise im Jahr 2014 um 10 – 25 % und im Jahr 2015 um weitere 15 – 20 % an.

Nach einer Internetrecherche variieren die aktuellen Preise in den USA sehr stark und liegen derzeit (Stand: 2017/2018) für Privatkunden zwischen 8,80 und 19,10 US\$/m<sup>3</sup> bzw. bei durchschnittlich 12,50 US\$/m<sup>3</sup>.

Diese großen Preisdifferenzen erklären sich nach SURESH et al. (2016) auch durch das komplizierte Preisberechnungssystem, erläutert am Beispiel von größeren Kunden in Kanada. Dort wurden im Jahr 2015 750 CDN\$/m<sup>3</sup> als monatliche Grundgebühr zzgl. 4,00 CDN\$/m<sup>3</sup> für die ersten 1.500 m<sup>3</sup> zzgl. ggf. 2,00 CDN\$/m<sup>3</sup> für die nächsten 2.500 m<sup>3</sup> zzgl. ggf. 1,20 CDN\$/m<sup>3</sup> für alle darüber hinausgehenden Argonmengen in Rechnung gestellt.





**Abb. 44: Preisentwicklung und -vorhersage für Reinneon (Großhandelspreise) in US\$/l seit dem Jahr 1998, nach BETZENDAHL (diverse Jahre, s. Literaturverzeichnis) bzw. SPIRITUS & BETZENDAHL (2018).**

## 7.4 Krypton

Die Preisentwicklung von Krypton ist aus den Beiträgen von RICHARD BETZENDAHL – Betzendahl Gas Consultants LLC – in der Fachzeitschrift GASWORLD (s. Literaturverzeichnis), aktualisiert nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) bekannt.

Geprägt von einer langen Phase des Überangebots und somit zurückgehender bis stabiler Preise, konnte sich der Preis für Krypton im 1. Quartal 2007 um 10 – 20 % erholen und lag im Gesamtjahr 2007 im Großhandel bei 0,30 – 0,50 US\$/l. Ein starker Anstieg der Nachfrage nach Krypton für die Befüllung von Isolierglasscheiben führte dann im Jahr 2008 zu einer Preiserhöhung im Großhandel auf durchschnittlich 1,90 US\$/l bzw. maximal 2,50 US\$/l im 4. Quartal 2008. Aufgrund des Zusammenbruchs der weltweiten Bauindustrie im Rezessionsjahr 2009 fiel der Preis Mitte dieses Jahres auf 1,15 – 1,75 US\$/l und dann im Folgejahr sogar auf 0,75 – 1,10 US\$/l zurück. Seit dieser Zeit ist durch den weitgehenden Wegfall von Krypton als Füllgas in Beleuchtungsmitteln ein weiterer starker Preisrückgang auf 0,08 US\$/l (Stand: September 2017) eingetreten, der noch lange anhalten könnte. Die Lager der Produzenten sind übervoll (vgl. Kap. 4.4), die Nachfrage gering

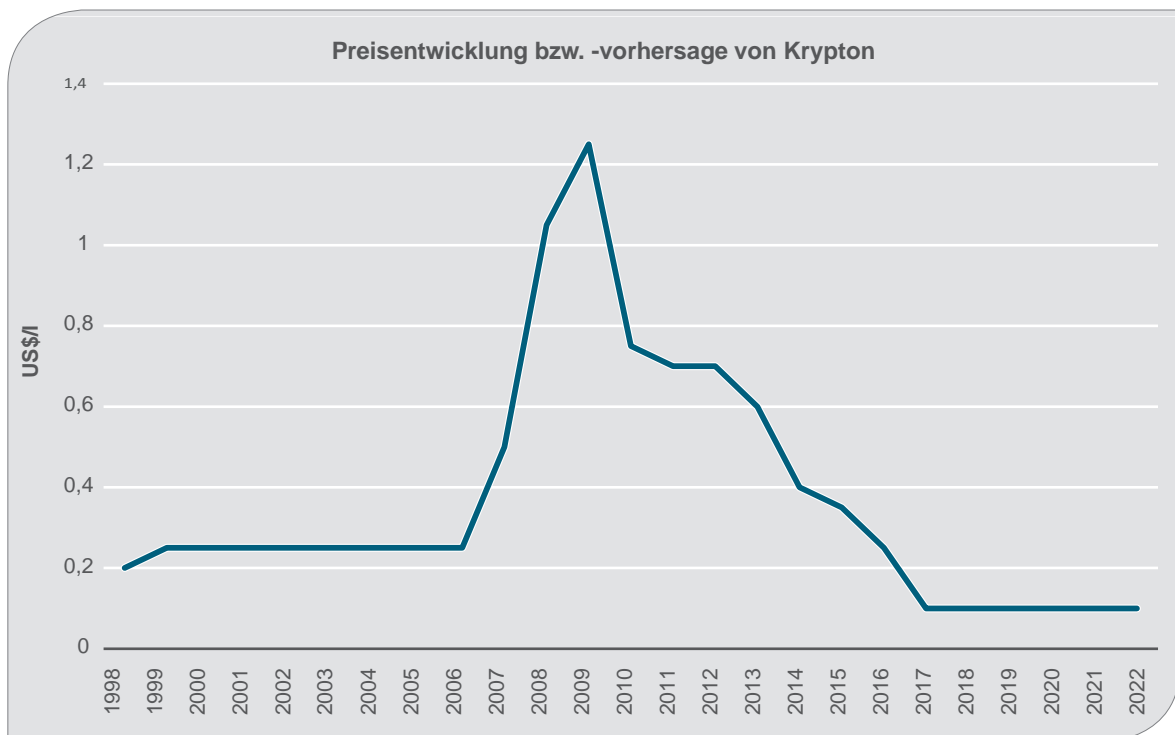
und die Produktion als Koppelprodukt des begehrten Xenons lässt sich nicht kurzfristig und überall reduzieren.

In Deutschland soll der Preis für Krypton laut Marktteilnehmern derzeit (Stand: Sommer 2018) bei ca. 0,10 €/l liegen.

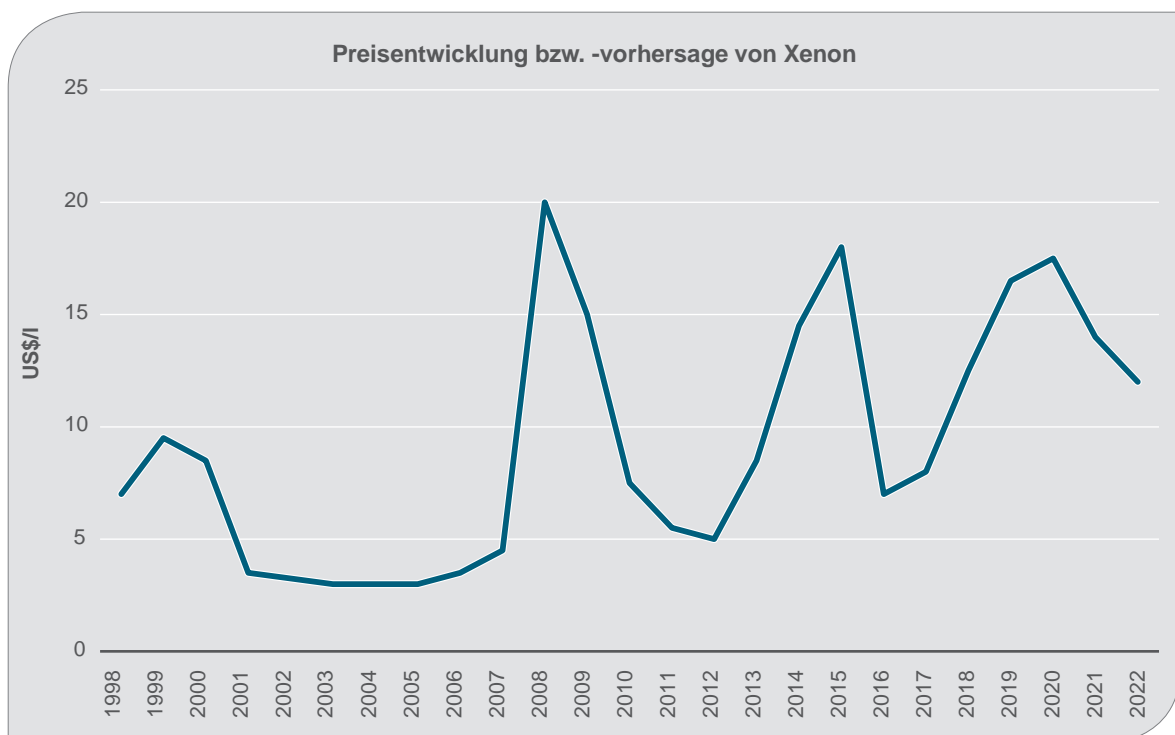
## 7.5 Xenon

Die Preisentwicklung von Xenon ist aus den Beiträgen von RICHARD BETZENDAHL – Betzendahl Gas Consultants LLC – in der Fachzeitschrift GASWORLD (s. Literaturverzeichnis), aktualisiert nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) bekannt.

Der Xenonpreis ist durch sehr starke Preisschwankungen aufgrund eines sehr kleinen Marktvolumens mit wenigen Produzenten, aber zugleich immer neuen und volumenmäßig teils relevanten Anwendungen geprägt. Die geringe Xenonkonzentration in der Luft erlaubt eine wirtschaftliche Gewinnung nur in großen Luftzerlegungsanlagen und eine Ausweitung der Produktion nur mit großen Planungs- und Vorlaufkosten.



**Abb. 45: Preisentwicklung und -vorhersage für Krypton (Großhandelspreise) in US\$/l seit dem Jahr 1998, nach BETZENDAHL (s. Literaturverzeichnis) bzw. SPIRITUS & BETZENDAHL (2018).**



**Abb. 46: Preisentwicklung und -vorhersage für Xenon (Großhandelspreise) in US\$/l seit dem Jahr 1998, nach BETZENDAHL (s. Literaturverzeichnis) bzw. SPIRITUS & BETZENDAHL (2018).**

Noch 1984 war Xenon im Westen ein sehr seltenes und gesuchtes und daher auch sehr teures Spezialgas, das rund 20,0 US\$/l kostete. Mit dem Zerfall der Sowjetunion gelangten große sowjetische Bestände auf den Weltmarkt und der Preis fiel in den Jahren 1990/91 auf 1,0 US\$/l zurück. Noch über viele Jahre danach war der Markt durch immer neue Verkäufe aus ex-sowjetischen Lagerbeständen gesättigt.

Im Jahr 2007 übertraf die Nachfrage aufgrund immer neuer und wachsender Anwendungen das Angebot, so dass der Xenonpreis im Großhandel allein im 1. Quartal 2007 von 3,0 – 5,0 US\$/l um 50 % anstieg und aufgrund der sehr starken Nachfrage Ende des Jahres 2007 20 US\$/l erreichte. Im Jahr 2008 wurden Preise von 20,0 – 30,0 US\$/l, im Durchschnitt von 28,0 US\$/l erzielt.

Mit der weltweiten Rezession ging auch dieser überhitzte Preis von Xenon wieder zurück und lag im Jahr 2010 bei 6,0 – 8,0 US\$/l. In den Folgejahren stieg die Nachfrage nach Xenon jedoch wieder an und im Jahr 2014 wurden erneut das weltweite Angebot überschritten und Preise bis zu 18,0 US\$/l erzielt. Bei Preisen von 6,0 – 8,0 US\$/l im Jahr 2016 steigt seitdem die Nachfrage und damit auch der Preis für Xenon wieder deutlich an. Im September 2017 lag er bei 11,0 US\$/l im Großhandel. In Deutschland soll der Preis für Xenon laut Marktteilnehmern derzeit (Stand: Sommer 2018) bei ca. 11,0 €/l liegen.

Für die kommenden Jahre wird eine hohe Nachfrage vorhergesagt, der aber ab dem Jahr 2020 zunehmende Kapazitäten vor allem in chinesischen Luftzerlegungsanlagen gegenüberstehen. Dies sollte zu kurzfristigen Preissteigerungen bis 20 US\$/l, mittelfristig jedoch wieder zu einer Beruhigung der Marktpreise von Xenon führen.

## 8 Angebot und Nachfrage nach Edelgasen in Deutschland

### 8.1 Vorkommen und Gewinnung

Eine Gewinnung von Helium aus der Erdgaslagerstätte Rüdersdorf, östlich Berlin, erfolgte seit den 1970er Jahren durch den VEB Technische Gase Leipzig. Die dortige Heliumanlage produzierte jährlich rund 50.000 m<sup>3</sup> Helium (s. Anhang: Deutschland).

Seit 1959 werden in einer Luftzerlegungsanlage in Leuna, Sachsen-Anhalt, neben Sauerstoff und Stickstoff (Hauptprodukte) auch Argon und seit einigen Jahren auch Helium, Rohneon, Rohkrypton und Rohxenon produziert.

Mittlerweile gibt es in Deutschland an 49 Standorten insgesamt 67 Luftzerlegungsanlagen (davon derzeit drei gestundet bzw. in Standby), von denen 46 Anlagen auch Argon (bzw. Rohargon) sowie 19 Anlagen auch Rohkrypton und Rohxenon produzieren (s. Anhang: Deutschland).

Nach Recherchen im Rahmen dieser Studie lag die bundesdeutsche Edelgasproduktion im Jahr 2017 bei 12.121 m<sup>3</sup> Helium und 233,12 Mio. m<sup>3</sup> Argon. Die genaue Produktionsmenge von Neon, Krypton und Xenon ist aufgrund einzelner fehlender Unternehmensrückmeldungen nicht bekannt, kann jedoch für das Jahr 2017 relativ zuverlässig auf 20.000 m<sup>3</sup> Neon, 20.000 m<sup>3</sup> Krypton und 1.700 m<sup>3</sup> Xenon hochgerechnet werden.

Eine Aufreinigungsanlage für das in der Luftzerlegungsanlage Leuna produzierte und zusätzlich aus dem Ausland importierte Rohneon wird von der Linde AG in Leuna betrieben. In Unterschleißheim bei München erfolgt ebenfalls durch die Linde AG die Aufreinigung von vorangereichertem bzw. angereichertem Rohkrypton und Rohxenon aus zahlreichen Luftzerlegungsanlagen in Deutschland. Auch die Air Liquide Deutschland GmbH betreibt eine Aufreinigungsanlage für Rohkrypton und Rohxenon am Standort Krefeld-Gellep.

Von anderen Herstellern in Deutschland produziertes Rohargon bzw. Rohkrypton/Rohxenon wird im Ausland aufgereinigt.

Folgende Unternehmen produzieren derzeit in Deutschland Edelgase:

- Die **Linde AG** wurde 1879 von dem Erfinder CARL PAUL GOTTFRIED LINDE (1842 – 1934) als Gesellschaft für Linde's Eismaschinen Aktiengesellschaft in Wiesbaden gegründet und ist heute ein DAX-notiertes, international tätiges Gase- und Engineeringunternehmen mit rund 58.000 Mitarbeitern in 100 Ländern weltweit. Das Unternehmen hat seinen Hauptsitz in München und ist in die drei Divisionen: Industriegase (Produktion und Vertrieb von Sauerstoff, Stickstoff, Argon, Wasserstoff, Acetylen, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Schweißschutzgasen, Edelgasen sowie hochreinen Spezialgasen, teils aus eigenen Anlagen) und Medizinische Gase (integrierte Pflegekonzepte rund um die Beatmung von Patienten), Anlagenbau (Errichtung von Anlagen zur Erzeugung von Wasserstoff, Synthesegas, Sauerstoff und Olefinen sowie zur Erdgasbehandlung) und Sonstige Aktivitäten (Logistikdienstleistungen) aufgeteilt. Derzeit bemühen sich die Linde AG und die US-amerikanische Praxair, Inc. ein gemeinsames Gaunternehmen zu bilden.

In Deutschland beschäftigt die Linde AG rund 6.100 Mitarbeiter und betreibt an gegenwärtig 13 Standorten 24 Luftzerlegungsanlagen. Davon werden an 12 Standorten in 18 Luftzerlegungsanlagen neben Sauerstoff und Stickstoff auch Argon, an fünf Standorten in acht Luftzerlegungsanlagen auch vorangereichertes Rohkrypton/Rohxenon („dünne Suppe“), in Duisburg-Ruhrort und Leuna auch hochangereichertes Rohkrypton/Rohxenon („dicke Suppe“) sowie in Leuna zudem Rohneon, Reinneon und Helium erzeugt. In Unterschleißheim bei München erfolgt die Produktion von Reinkrypton und Reinxenon.

- Die **Air Liquide S.A.** ist ein weiteres führendes internationales Industriegasunternehmen mit Firmensitz in Paris. Es wurde 1902 gegründet und beschäftigt weltweit ca. 67.000 Mitarbeiter in rund 80 Ländern. Neben der Produktion und dem Vertrieb von technischen Gasen sowie dem Bau und Betrieb von Anlagen zur Erzeugung von Gasen besitzt Air Liquide ein weiteres starkes Standbein in der Erbringung von Dienstleistungen im Bereich medizinischer

Gase bis hin zum Betrieb von Pflegediensten und Pflegeheimen.

In Deutschland beschäftigt die Air Liquide Industriegase GmbH & Co. KG, Düsseldorf, mit ihren Tochtergesellschaften ca. 4.700 Mitarbeiter an rund 75 Standorten. Hierzu gehören an 16 Standorten 18 Luftzerlegungsanlagen, davon neun mit Argonproduktion, drei mit Produktion von vorangereichertem Rohkrypton/Rohxenon („dünne Suppe“) sowie ein Standort (Oberhausen) mit Produktion von hochangereichertem Rohkrypton/Rohxenon („dicke Suppe“). In Krefeld-Gellep erfolgt die Aufreinigung des Rohkryptons/Rohxenons aus Oberhausen zu Reinkrypton und Reinxenon.

- Die **Praxair Inc.** ist ein 1907 gegründetes internationales Industriegasunternehmen mit rund 26.000 Mitarbeitern in mehr als 50 Ländern und Sitz in Danbury, CT, USA. In seinem Heimatland gehören dem Unternehmen u. a. mehrere Heliumanlagen. In Deutschland beschäftigt Praxair rund 330 Mitarbeiter und verfügt über ein flächendeckendes Netz von Produktions- und Vertriebsstandorten, die vom Hauptsitz in Düsseldorf geführt werden. An insgesamt sechs Standorten in Deutschland betreibt die Praxair zusammen acht Luftzerlegungsanlagen, wobei in fünf Luftzerlegungsanlagen neben Sauerstoff und Stickstoff auch Argon und in Dormagen sowie Hürth auch teilangereichertes Rohkrypton und Rohxenon erzeugt werden. Im Rahmen der geplanten Fusion der Praxair, Inc. mit der Linde Gruppe sollen die deutschen Aktivitäten der Praxair, Inc. an das japanische Gasunternehmen Taiyo Nippon Sanso Corporation (TNSC) verkauft werden.
- **Air Products and Chemicals, Inc.** ist ein 1940 gegründeter US-amerikanischer Hersteller von Industriegasen mit Firmensitz in Allentown, PA, USA. Er beschäftigt rund 15.300 Mitarbeiter, davon ca. 200 in Deutschland. Neben verschiedenen technischen Gasen produziert das Unternehmen Halbleitermaterialien und Chemikalien. Die Air Products GmbH betreibt in Deutschland zwei Luftzerlegungsanlagen in Hattingen und Wilhelmshaven, in denen auch Rohargon gewonnen wird.
- Die **Messer Group GmbH** ist ein deutscher Industriegashersteller mit Sitz in Sulzbach/Taunus, der bereits 1898 gegründet wurde. Das Unternehmen ist mit über 5.600 Mitarbeitern in über 30 europäischen und asiatischen Ländern, v. a. in China und Vietnam, sowie in Peru operativ tätig. Die Messer Gruppe produziert Industriegase, Schweißschutzgase, Spezialgase, medizinische Gase sowie verschiedene Gasgemische und ist Hersteller von Gasproduktionsanlagen. In Deutschland beschäftigt das Familienunternehmen rund 100 Mitarbeiter und betreibt u. a. zwei Luftzerlegungsanlagen in Siegen und Salzgitter, die beide mit Argon-Kolonnen ausgerüstet sind.
- Die 1923 unter dem Namen Sauerstoffwerke AG gegründete heutige **Westfalen AG** mit Sitz im westfälischen Münster ist nicht nur ein bekanntes Handelsunternehmen in den Bereichen Kraftstoffe (seit 1925) und Flüssiggas (Westfalengas, seit 1954) sondern seit Firmengründung auch ein Hersteller von technischen Gasen. Das Lieferprogramm umfasst heute über 300 standardisierte Gase und Gasgemische verschiedenster Arten und Reinheiten. Eigene Luftzerlegungsanlagen betreibt das Unternehmen mit seinen knapp 1.600 Mitarbeitern im westfälischen Hörstel, in Laichingen bei Ulm sowie im französischen Le Creusot. Alle drei Anlagen produzieren auch Argon.
- Die **Sauerstoffwerk Friedrichshafen GmbH** (SWF) geht auf Ferdinand Graf von Zeppelin zurück, der 1913 eine eigene Wasserstoffabteilung zur Versorgung seiner Luftschiffe gründete. Heute produziert und vertreibt das Unternehmen mit ca. 80 Mitarbeitern von drei Standorten aus technische und medizinische Gase sowie Reinstgase für Forschung und Entwicklung. Die SWF-Luftzerlegungsanlage in Friedrichshafen produziert neben Sauerstoff und Stickstoff auch Argon.
- Die 1925 gegründete und immer noch familiengeführte **Sauerstoffwerk Friedrich Gutbroff GmbH** im nordwürttembergischen Wertheim-Reicholzheim ist mit rund 90 Mitarbeitern in der Produktion und dem Vertrieb von technischen und medizinischen Gasen, Gasen für die Lebensmittelindustrie, der Planung von Schweißrobotern sowie dem Vertrieb von Schweiß- und Schneidtechnikzubehör tätig. Im

Jahr 2006 nahm das Unternehmen im unterfränkischen Dettelbach eine Luftzerlegungsanlage in Betrieb, in der auch Argon produziert wird.

- Die **BASF SE** ist mit über 115.000 Mitarbeitern in fast allen Ländern der Erde und einem Umsatz von rund 64,5 Mrd. € das weltweit größte Chemieunternehmen. Das Unternehmen betreibt weltweit mehrere Luftzerlegungsanlagen, davon an seinem Hauptsitz in Ludwigshafen drei sehr große Anlagen, wovon zwei mit Argon-Kolonnen ausgestattet sind. Zusätzlich werden in diesen zwei Luftzerlegungsanlagen jährlich auch rund 3.000 – 4.000 m<sup>3</sup> eines hochangereicherten Rohkrypton/Rohxenon-Gemischs („dicke Suppe“ @ 80 % Kr, 2 % Xe, 18 % N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>+Ar) produziert. Die gewonnenen Edelgase werden verkauft und bei Bedarf, ebenso wie Helium, in abgefüllter Form wieder zugekauft.
- Die **AlzChem Group AG** ist mit vier Produktionsstätten und rund 1.400 Mitarbeitern in Deutschland ein Hersteller von Spezialchemikalien für die Landwirtschaft, die Futtermittelindustrie, die Nahrungsmittelergänzungsindustrie, die Pharma-, Kosmetik- und Chemieindustrie, die Metallindustrie, den Erneuerbare-Energien-Sektor sowie die Automobilindustrie. Am Firmensitz im oberbayerischen Trostberg betreibt die AlzChem Group auch eine Luftzerlegungsanlage, in der neben Sauerstoff und Stickstoff auch Rohargon gewonnen wird, das aber nicht zur Produktion benötigt und daher verkauft wird.
- Die **Infraserv GmbH & Co. Höchst KG** (kurz: Infraserv Höchst) ist Standortbetreiber des Industrieparks Höchst in Frankfurt am Main sowie weiterer Standorte vor allem der Chemie- und Pharmaindustrie und ist eines der vielen Nachfolge-Unternehmen der aufgespaltenen Hoechst AG. Die Infraserv Höchst-Gruppe beschäftigt rund 2.500 Mitarbeiter und betreibt an ihrem Stammsitz in Höchst auch eine Luftzerlegungsanlage mit Argon-Kolonne, wobei das Argon allerdings nicht selbst benötigt, sondern ebenfalls verkauft wird.
- Die **Buderus Edelstahl GmbH** ist eine Tochtergesellschaft der Special Steel Division des österreichischen voestalpine Konzerns und beschäftigt rund 1.400 Mitarbeiter. Das bereits 1731 gegründete Unternehmen zählt zu den namhaften deutschen Herstellern von hochwertigen Edelstählen. Am Standort Wetzlar produziert das Unternehmen von der Ereschmelzung bis zum Endprodukt Werkzeugstahl, Edelbaustahl, Freiformschmiedestücke, Gesenkschmiedestücke, Warmband, Kaltband und gewalztes Halbzeug. Eine eigene Luftzerlegungsanlage am Standort Wetzlar produziert die hierfür benötigten technischen Gase Sauerstoff, Stickstoff und Argon.
- Die **Yara International ASA** ist ein im Jahr 2004 in Norwegen gegründeter, weltweit führender Anbieter stickstoffbasierter Mineraldünger und Industrieprodukte. Yaras derzeitige Aktivitäten reichen vom Phosphaterzbergbau über die Ammoniak-/Harnstoff-Produktion bis zum Rohstoffhandel. Am Standort Brunsbüttel beschäftigt die Yara Brunsbüttel GmbH rund 240 Mitarbeiter und betreibt eine Ammoniak- und eine Harnstoffanlage. Eine eigene Luftzerlegungsanlage in der Ammoniaksynthesanlage erzeugt den in großen Mengen benötigten Stickstoff. Das dort ebenfalls produzierte Argon wird verkauft.

## 8.2 Import und Export

Aufgrund des auch im Weltmaßstab hohen Bedarfs der deutschen Industrie an allen Edelgasen und fast vollständig fehlenden Produktionskapazitäten für Helium und nur bedingten Recyclingmöglichkeiten ist die deutsche Wirtschaft in großem Umfang auf Edelgasimporte aus dem Ausland angewiesen.

Die deutschen Importe an Helium, Argon und Neon/Krypton/Xenon (weitere Unterteilung der drei letztgenannten Edelgase handelsstatistisch nicht möglich) sind in den Tab. 18 – 20 aufgeführt. Die Tab. 21 – 23 listen entsprechend die Exporte auf. Die angegebenen Daten stammen vom Statistischen Bundesamt (destatis).

**Tab. 18: Deutsche Importe von Helium (HS-Code 28042910, in m<sup>3</sup>) zwischen 2010 und 2017 (Quelle: destatis 2017).**

Herkunft	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Welt	12.110.683	10.886.184	12.194.457	7.723.208	9.217.430	11.472.414	20.201.604	13.958.806
Katar	534.520		413.785	750.029	1.866.598	1.949.248	9.307.291	4.252.044
USA	1.207.602	2.453.433	2.223.494	1.776.838	802.669	1.769.713	1.542.548	2.723.213
Belgien <sup>1)</sup>	2.437.215	2.571.197	1.818.661	395.467	1.701.068	4.097.899	4.411.097	2.719.504
Algerien	2.305.063	2.023.181	2.301.023	2.173.464	2.023.911	1.854.864	1.980.383	1.698.618
VAE		36.020	2.994	54.494	80.000	204.818	1.328.456	1.058.765
Polen	1.004.594	1.295.721	1.976.325	1.427.441	1.418.220	159.229	286.701	737.562
Italien	44.375	192.382	134.667	87.468	233.370	310.938	310.239	174.541
Niederlande	5.978	131.285	12.054	24.520	62.848	65.641	116.288	147.519
Portugal	201.587	195.977	9.729	19.293	9.241	486	41.208	133.388
Russland	3.591.755	1.168.616	2.097.667	33.952	39.670	33.331	196.246	88.752
Frankreich	652.689	337.430	968.735	652.477	548.725	746.767	387.252	62.464
Tschechien	138	319.474	101.895	80.919	205.018	153.696	133.321	34.132
Oman								27.066
Finnland			5.106	56.016	3.262		25.553	26.576
Österreich	105.274	89.436	77.122	57.949	90.421	34.734	22.208	14.914
Schweiz	19.012	4.168	10.903	62.668	57.013	8.255	5.353	13.640
Groß-britannien	138	65.310	6.169	2.014	6.292	1.522	8.412	13.434
China			3.585	40.525		10	11.909	13.078
Spanien			3.432	23	36.606	35.561	4.642	11.890
Schweden			12.768	522	2.772	687	76.899	5.022
Dänemark			5.480	22.224	6.752	11.861	956	2.499
Japan			139					1.111
Singapur	1							74
Irland		131	40	760	10.886	9.742	354	
Argentinien						1.196		
Luxemburg		2.423	6.744	2.812	12.083	22.121	4.288	
andere	748		1.940	1.333	5	95		
Wert (Mio. €)	49,694	48,302	75,512	70,695	64,532	66,236	85,115	89,701

1) Originalherkunft v. a. USA und Katar

**Tab. 19: Deutsche Importe von Argon (HS-Code 28042910, in m<sup>3</sup>) zwischen 2010 und 2017 (Quelle: destatis 2017).**

Herkunft	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Welt	16.360.385	19.493.200	16.005.515	16.173.367	12.890.282	13.509.828	13.004.429	12.188.272
Österreich	1.548.723	6.855.148	4.800.245	5.988.440	4.601.645	5.063.629	3.401.482	3.227.672
Belgien	5.162.002	4.887.956	3.284.061	3.612.906	2.452.320	1.453.954	1.978.988	3.178.203
Niederlande	4.343.213	2.292.487	2.075.763	2.292.649	2.343.200	2.808.617	3.082.470	2.490.283
Frankreich	4.641.530	4.431.389	4.624.390	3.572.617	3.062.436	3.352.110	2.411.798	2.248.609
Tschechien	640.961	993.970	1.199.715	628.112	288.453	313.036	348.465	478.403
Polen				2.368		315.272	1.389.627	390.788
Schweiz	179	18.492	1.818	12	14.907	17.212	132.965	74.879
Italien	12.009	11.018	7.210	41.225	55.400	81.656	132.495	55.402
Schweden				6.446				27.737
Lettland								9.838
Spanien				18.374	178	6.384	10.908	5.490
Großbritannien	10.692	6	9.240	5.442	70.322	68.731	71.034	360
Slowakei								60
USA	1.011	2.048	3.069	2.217	501	341	147	41
Portugal								24
Ungarn				5	891		24	12
Japan	1	30	4	3	2		15	1
Türkei				2.550	24			1
Dänemark						28.398	43.837	
andere	64	656		1	3	488		7
Wert (Mio. €)	7,089	7,868	6,425	6,231	4,372	4,552	4,738	4,383



**Tab. 20: Deutsche Importe von Neon, Krypton und Xenon (HS-Code 28042990, in m<sup>3</sup>) zwischen 2010 und 2017 (Quelle: destatis 2017).**

Herkunft	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Welt	321.084	147.862	180.317	363.401	330.028	302.282	251.255	182.061
Niederlande <sup>1)</sup>	61.026	85.032	67.472	100.012	62.443	84.125	68.339	77.370
Österreich	45.185	2.081	952	3.964	19.373	25.033	21.246	24.241
Belgien	16	18	22.661	159.236	164.899	140.075	132.582	16.821
Rumänien		2.057	15.256	15.614	14.447	18.551	11.800	15.619
Schweiz	1.006	3.634	762	27	51	24	40	13.406
Ukraine	8.697	7.529	8.762	13.005	9.935	9.312	3.741	12.417
Italien	15.166	13.603	12.200	13.454	11.317	10.684	5.026	8.387
Russland	6.618	6.373	7.144	3.886	33.332	6.154	5.516	5.370
USA	35.471	21.305	7.659	1.962	649	2.500	196	4.762
Frankreich	3.407	5.538	31.907	601	820	5.302	1.266	3.210
Zypern				27.753				437
Südafrika						1	27	20
China					1.283	248		
Finnland	139.806							
Groß-britannien	90	58	1.672	2.648	236	41	1.430	
Polen			1.358	20.766				
Tschechien	584	152	1.611	235	11.243	142	46	
andere	4.012	482	901	238		90		1
Wert(Mio. €)	11,588	9,950	11,928	20,553	11,938	10,733	4,401	7,451

1) Originalherkunft v. a. Frankreich

**Tab. 21: Deutsche Exporte von Helium (HS-Code 28042910, in m<sup>3</sup>) zwischen 2010 und 2017**  
(Quelle: destatis 2017).

Herkunft	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Welt	2.637.011	2.189.417	3.120.651	2.829.253	2.790.486	3.610.920	3.781.688	4.502.030
Frankreich	1.342.026	784.319	682.106	639.645	421.895	883.186	725.549	957.616
Österreich	263.605	197.874	589.753	852.733	856.807	367.927	420.898	606.045
Belgien	236.998	395.863	320.580	281.818	209.377	307.201	518.802	516.839
Tschechien	227.358	238.063	333.649	236.267	174.141	195.332	173.814	368.530
Schweiz	93.548	88.564	337.108	109.815	80.418	357.923	346.113	341.623
Italien	2.276	15.889	13.598	7.524	363.694	482.105	408.444	329.380
Slowakei			61.466	87.291	88.478	218.171	295.860	328.731
Türkei	56.034	28.900	198.936	112.471	83.547	234.333	318.060	193.093
Niederlande	90.933	82.426	89.065	74.529	176.325	186.790	181.467	188.194
Russland	7.462	437	1.502	367	335	38	47.598	173.367
Polen	78.489	123.274	95.035	213.270	232.104	239.355	205.340	138.437
VAE	3.358	53	174	2.330	2.276	41	33	107.242
Serbien			6			27.706	27.666	83.118
Ungarn	1.981	197	261	187	372	187	1.733	29.805
Israel	4.950	2.315	1.643	3.338	4.012	29.680	1.042	26.020
Indien	392	836	1.157	809	266	264	516	24.143
Griechenland	67.874	51.220	51.378	27.250	21.713	11.968	15.171	20.786
Schweden	3.638	3.263	1.424	2.865	2.735	10.343	12.395	19.384
Ukraine		666	1.041	2.196	11.325	859	11.904	9.333
Großbritannien	4.070	66.393	258.876	91.392	6.093	15.968	14.756	9.155
Georgien	1.350	36	58	2.553	433	3.985	6.342	7.293
Aserbaidschan	1.854	91	3	2.964	2.076	571	1.156	4.674
Dänemark	37.817	41.502	24.517	16.212	8.839	1.993	3.508	4.291
Turkmenistan	1.200	2.352	23	57	3		1.835	1.554
Spanien	2.016	14.794	4.565	8.344	22.264	14.443	2.090	1.547
Island			94		7.038		2.109	1.457
Rumänien	3.694	271	807	158	129	165	154	1.406
China	2.035	3.290	6.244	4.242	1.564	341	348	1.287
Luxemburg	19	402	769	3.597	777	297	1.126	1.248
USA	18.926	33.591	23.796	19.801	2.915	3.201	28.748	952
Irland			344	228	145	249	203	784

Fortsetzung Tab. 21.

Herkunft	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Portugal	439	554	692	389	1.691	2.182	1.032	751
Mongolei	148						378	595
Südafrika	56.188	72	461	1.287	103	186	2	336
Mexiko	641	671	1.032	905	106	134	89	314
Pakistan					116	1	119	303
Japan	969	2.415	3.374	2.558	280	246	319	299
Bulgarien	235	145	1.040	220	313	397	292	256
Slowenien	193		18	219	18	36	42	196
Iran	102		192	97	18	164	650	190
Finnland	1.721	1.133	829	534	115		418	158
Litauen				120				157
Singapur	385	446	1.295	490	74	129	116	118
Vietnam	42	61	61	90	21	1.800	166	110
Senegal						30	73	100
Australien	103	284	149	119	108	191	32	99
Algerien				3	373	821	110	83
Indonesien	37	104	192	1.604	60	5	61	72
Ägypten	265	605	71	39	31	50	177	65
Malaysia	4		137	417	39	32	30	60
Thailand	136	266	356	724	77	84	62	59
Brasilien	303	1.325	538	365	139	137	82	45
Peru				437	21	45	101	41
Kanada	3		103	72	43	107	119	35
Tunesien				8	43	1.528	20	25
Korea, Rep.	86	176	373	3.730	39	22	17	20
Togo								18
Kolumbien			1	2	26	142	52	17
Argentinien			67	205	12	61		14
Macau				10		10	10	10
Taiwan	156	104	129	609	4	8	50	10
Tansania								10
Nigeria			44	3		57	110	3
Norwegen	2.988	1.013	2.707	1.815	1.855	2.356	61	3
Philippinen		2	56	44	5	7	4	3
Kuwait	43	778	403	89	22			2

*Fortsetzung Tab. 21.*

Herkunft	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Saudi-Arabien	158	83	527	2	5	4	8	2
Katar	3		3.742	4.820	2	15		1
andere	17.760	2.299	2.084	2.974	2.631	5.310	2.106	2.299
Wert (Mio. €)	11,670	10,303	21,068	21,090	17,452	22,723	24,009	27,844

**Tab. 22: Deutsche Exporte von Argon (HS-Code 28042100, in m<sup>3</sup>) zwischen 2010 und 2017**  
(Quelle: destatis 2017).

Herkunft	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Welt	52.163.414	62.689.478	64.665.523	61.233.773	65.943.453	65.900.827	63.600.562	65.033.946
Italien	15.101.062	14.851.384	16.745.355	14.723.440	14.863.052	16.803.978	17.626.868	18.597.266
Polen	5.903.379	7.366.120	9.144.940	10.593.426	14.081.034	13.629.894	8.099.184	8.389.451
Frankreich	9.023.901	11.074.984	11.621.508	11.087.108	12.840.616	10.206.703	9.358.105	8.259.365
Dänemark	3.237.068	4.062.712	4.297.789	1.122.705	1.412.618	4.064.768	3.359.043	4.957.337
Tschechien	2.093.820	2.499.387	2.960.439	3.528.966	3.571.256	3.393.066	3.554.519	4.006.486
Schweiz	2.855.826	2.404.275	2.401.213	2.475.607	2.311.802	2.086.899	2.181.038	2.522.681
Slowakei	173.113	816.301	435.457	342.106	394.584	949.258	1.298.128	2.421.674
Groß- britannien	68.085	28.808	745.621	21.383	142.481	21.932	1.315.679	2.346.758
Schweden	11.851	8.357	25.793	3.051	45.583	1.002.302	2.741.480	2.294.024
Belgien	3.731.517	2.457.310	1.981.498	2.028.710	1.565.577	904.108	1.576.073	2.233.598
Österreich	2.780.825	4.912.128	4.265.763	5.019.493	3.105.382	2.009.622	1.870.885	2.173.159
Niederlande	1.401.308	915.003	1.295.987	2.441.601	1.542.684	1.839.828	1.646.761	1.791.973
Finnland	2.944	2.567	27.140	6.704	24.289	1.415.036	2.096.587	1.727.215
Slowenien	274.809	566.198	1.368.788	859.635	893.566	832.331	634.725	1.485.777
Norwegen	4.286.969	7.989.982	4.483.002	4.358.727	5.544.868	4.587.523	4.353.469	773.536
Ungarn	14.500	25.621	1.038.929	1.622.427	1.460.259	1.172.456	1.230.488	478.296
USA			6.750	82.593	90.326	17.995	82.324	121.523
Spanien	364.781	1.877.990	1.131.309	88.847	56.796	36.897	74.784	86.157
Luxemburg	3.490	123.070	6.928	117.479	32.755	21.267	23.579	61.028
Türkei	1.928	11.282	10.083	12.440	199.034	223.529	76.806	49.048
Singapur		130	206	19.210	46.188	35.126	47.019	43.453
Indien		1	4	14.777	2.432	6.667	25.505	15.486
Korea, Rep.			611	567	625	4.564	1.562	15.106
Thailand				606	3.357			11.876
Südafrika	57.256		954	61.934	11.284	2.280	9.345	11.612
Aserbaid- schan			577					10.261
Ägypten	75	1.113		1.995	870	8.719	4.064	9.000
Kamerun			1.625					6.895
Israel			6.854	8.838	7.394	12.083	23.903	6.659

## Fortsetzung Tab. 22.

Herkunft	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Angola						2.140	4.479	5.200
Senegal						1.500	1.969	4.431
VAE			3	539	4.961		3.935	3.642
Portugal	13.550	45.619	112.703	23.643	474	27.279	3.794	3.514
Nigeria		28.849		13.125	5.069	55.366		2.079
Rumänien	60.453	19.277	48.744	67.386	1.094.036	164.066	4.095	1.914
Kenia								1.798
Russland	6.085	44.148	57.566	91.976	36.549	34.802	8.428	1.642
Bulgarien	11		72		1.183			1.310
Kuwait	1.246	300		728			14.234	903
Kroatien			26.231	12.325	611	389	971	501
Australien			7.990	3.848				480
Liberia	1.177		24.614	321		321	321	321
Lettland					60.132	116.050	146.887	
Litauen	545.197	489.353	267.189	241.615	361.906	14.802		
andere	147.188	67.209	115.288	133.892	127.820	195.281	99.526	99.379
Wert (Mio. €)	19,296	22,503	24,010	25,612	25,359	25,883	25,027	26,044

**Tab. 23: Deutsche Exporte von Neon, Krypton und Xenon (HS-Code 28042990, in m<sup>3</sup>) zwischen 2010 und 2017 (Quelle: destatis 2017).**

Herkunft	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Welt	290.152	151.651	168.797	163.414	176.966	239.906	237.977	270.337
USA	37.486	48.307	59.191	38.168	73.406	80.583	69.387	86.773
Frankreich	36.808	8.700	10.904	14.696	27.019	22.632	50.172	82.742
Niederlande	13.714	12.902	15.851	5.698	3.987	11.908	6.825	35.885
Polen	17.520	9.000	9.255	8.049	9.217	13.703	10.686	9.288
Dänemark	13.731	7.602	10.670	19.112	6.472	4.294	4.655	8.957
Österreich	24.944	6.596	10.303	9.704	11.503	17.380	12.150	8.688
Groß-britannien	14.266	6.123	8.610	8.447	12.712	6.255	6.648	7.851
Schweiz	3.428	3.187	6.976	7.109	3.878	6.740	4.886	4.916
Schweden	21.193	12.964	9.654	9.534	6.094	8.175	5.777	4.556
Russland	133	258	409	224	756	498	1.123	4.411
Italien	3.863	3.945	1.066	3.335	4.309	3.534	3.487	3.190
Finnland	1.345	1.200	1.592	2.093	1.675	1.720	2.121	2.211
Spanien	4.820	1.304	546	625	604	1.285	2.634	1.672
Belgien	77.499	5.584	2.176	3.918	5.190	49.004	38.873	1.660
Griechen-land	390	258	363	1.054	969	1.859	1.457	1.587
Rumänien	137	185	248	307	1.118	2.055	2.581	1.482
Tschechien	9.274	1.654	1.898	3.009	1.440	964	1.981	1.287
Ungarn	437	812	391	357	2.552	1.106	853	727
Portugal	667	1.191	1.183	984	392	250	742	627
Saudi-Arabien	53	33	53	66	55	25	70	361
China	235	11.922	10.255	24.006	1.419	1.238	7.898	319
Brasilien	4.054	42	41	296	31	104	32	224
Malta	3	52	39	41				144
Slowenien	50	140	127	140	341	153	198	142
Norwegen	169	4.788	4.813	67	278	1.642	128	130
VAE	29	105	63	146	156	90	21	88
Malaysia			1	21		39	20	52
Japan	10	1			10	91	294	42
Indien	278	150	105	111	91	103	23	41
Korea, Rep.	784	228	414	564	293	277	171	36
Mexiko	18	11	14	25	44	21	72	35
Hongkong		221	3	426	14	71	173	32
Ukraine	17	47	49	18	266	1.229	80	31

## Fortsetzung Tab. 23.

Herkunft	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Singapur	863	778	305	31	15	42	215	20
Serbien			3	3	12	6	7	16
Ägypten	44	115	143	50	35	55	30	14
Thailand	443		3	4	1	23	4	10
Neuseeland	4				4			9
Australien	87	34	80	39	4	9	0	7
Kanada			6	4	4	25	4	7
Libanon	11	11	94	11	7	21	3	7
Jordanien	52	50	92	15	20	14	28	6
Kolumbien			25	8	15	4	19	6
Israel	72	74	114	36	39	110	45	5
Luxemburg			26	46	9	36	5	5
Türkei	352	341	135	91	86	138	33	5
Marokko			4	8	47	27	13	4
Guatemala				3	7	3		3
Libyen	4		6	3	6			3
Slowakei	93	100	18	6	1	55	117	3
Vietnam	25			1	4		3	3
Algerien	28	6		3			3	1
Weißrussland			3	3	1	3		1
Bolivien	3			3	7	20	5	1
Pakistan				4	3	5	8	1
Peru	3		9	13	1	6	9	1
Taiwan	56	55	28	39	1	3	3	1
andere	657	575	440	640	346	273	1.205	9
Wert (Mio. €)	16,849	11,473	10,193	11,385	13,382	26,604	18,027	17,181

Zusammenfassend ergeben sich für Helium und Argon im Jahr 2017 folgende deutsche Nettoverbräuche bzw. Durchschnittsimportpreise:

	Helium	Argon
Import	13.958.806 m <sup>3</sup>	12.188.272 m <sup>3</sup>
Produktion	12.121 m <sup>3</sup>	233.116.922 m <sup>3</sup>
Export	4.502.030 m <sup>3</sup>	65.033.946 m <sup>3</sup>
= Nettoverbrauch	9.468.897 m <sup>3</sup>	180.272.248 m <sup>3</sup>
Durchschnittsimportpreis	6,43 €/m <sup>3</sup>	0,36 €/m <sup>3</sup>

Aufgrund fehlender Produktionsstatistiken für die meisten Edelgase ist nur für Helium eine weltweite Bewertung möglich. Hiernach benötigte die deutsche Industrie im Jahr 2017 mit 9,47 Mio. m<sup>3</sup> ca. 5,8 % des weltweit produzierten Heliums und stand damit hinter den USA (26,5 %), China (12,5 %), der Republik Korea (8,1 %) und Japan (6,3 %) an fünfter Stelle der Länder mit der höchsten Heliumnachfrage.



### 8.3 Verbrauch

In Deutschland, als eine der weltgrößten Industrienationen, gibt es Hunderte, wenn nicht Tausende kommerzieller Verbraucher bzw. Nutzer von Edelgasen. Eine Recherche und Auflistung all dieser Firmen ist nicht möglich, so dass hier nur einige Nutzer beispielhaft vorgestellt werden sollen.

#### Helium – MRT

Das im März 2018 von der Konzernmutter Siemens an die Börse gebrachte Unternehmen **Siemens Healthineers AG** hat seinen Firmensitz in Erlangen und beschäftigt weltweit rund 47.800 Mitarbeiter. Zum Portfolio des im gesamten Gesundheitswesen tätigen Unternehmens zählen Systeme zur Bildgebung (u. a. Magnetresonanztomographen (MRTs), Ultraschalluntersuchungssysteme, Mammographiegeräte, Computertomographen, Angiographiesysteme, konventionelle Röntgensysteme, sportmedizinische Diagnosegeräte, molekularmedizinische Systeme (PET-CT, SPECT-CT, PET-MRT, etc.), Produkte zur Labordiagnostik sowie Therapiesysteme. Außerdem bietet Siemens Healthineers Systeme zur medizinischen Informationsverarbeitung an. Nach eigenen Angaben hatte Siemens im Jahr 2016 eine installierte Basis von ca. 18.000 MRTs weltweit und besaß damit einen Marktanteil von > 40 %. Hauptwettbewerber in Europa sind General Electric Healthcare (USA) und Philips (NL). Siemens Healthineers fertigt MRTs in den USA, China und Großbritannien und ist einer der größten Verbraucher von flüssigem Helium sowohl weltweit (1/3 in Erstausrüstung, 2/3 in Wartung), wie auch in Deutschland (Bedarf für die Wartung ca. 500.000 l/a).

#### Helium – Traggas

Die **Zeppelin Luftschifftechnik GmbH & Co. KG** (ZLT) mit Sitz in Friedrichshafen am Bodensee wurde im September 1993 unter dem Namen ZLT Zeppelin Luftschifftechnik GmbH gegründet. Der Unternehmenszweck besteht in der Entwicklung, Herstellung und dem Vertrieb von Luftschiffen der Marke Zeppelin NT (Neue Technologie). Der vor über einem Jahrhundert von Ferdinand Graf von Zeppelin (1838 – 1917) gegründete Unternehmensverbund zur Entwicklung und Herstellung von Luftschiffen besteht somit noch heute. Aus der 1908 gegründeten „Luftschiffbau Zeppelin GmbH“ entstanden über die Jahre hinweg u. a.

die international agierenden Industrieunternehmen „Zeppelin GmbH“ und „ZF Friedrichshafen AG“. Die heutigen Hauptgesellschafter der Zeppelin Luftschifftechnik GmbH & Co KG sind der ZF Konzern mit 49 % und die Luftschiffbau Zeppelin GmbH mit 51 %. Der Jahresbedarf an Helium der ZLT ist abhängig von der Anzahl der eingesetzten Luftschiffe und liegt bei rund 30.000 m<sup>3</sup> Helium @ 99,996 % He.

#### Helium, Neon, Argon, (Krypton,) Xenon – Halbleiterindustrie

Obwohl ein Großteil der weltweit benötigten Halbleiter in Südostasien, in China und den USA gefertigt werden, gibt es auch in Deutschland zahlreiche Halbleiterfabriken, die für ihre Produktion eine Vielzahl technischer Gase, darunter alle Edelgase benötigen. Führendes deutsches, aber international tätiges Unternehmen ist die **Infineon Technologies AG**, die im Jahr 1999 durch die Ausgliederung des Halbleitergeschäfts der Siemens AG entstand. Das Unternehmen gliedert sich in die vier Geschäftsbereiche Automotive (Automobil-elektronik), Industrial Power Control (Industrie-elektronik), Power Management & Multimarket (Stromversorgung in der Unterhaltungsindustrie) sowie Chip Card & Security (SIM- und Chipkarten). Die Infineon Technologies AG hat ihren Unternehmenssitz in Neubiberg bei München und beschäftigt weltweit rund 37.500 Mitarbeiter in 36 F&E- sowie 17 Fertigungsstandorten. Im Geschäftsjahr 2017 wurden 15 % des Umsatzes in Deutschland erwirtschaftet, wo Fertigungsstätten in Dresden, Regensburg und Warstein bestehen. Weitere Halbleiterproduzenten in Deutschland – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – sind Global Foundries (Dresden), Robert Bosch GmbH (Reutlingen, im Bau Dresden), X-Fab Semiconductor Foundries AG (Dresden, Erfurt, Itzehoe), NXP Semiconductors Germany GmbH (Hamburg-Lokstedt), Nexperia Germany GmbH (Hamburg-Eimsbüttel), TDK-Micronas GmbH (Freiburg), PREMA Semiconductor GmbH (Mainz), Texas Instruments Deutschland GmbH (Freising) und Osram Opto Semiconductors GmbH (Regensburg).

#### Helium – Metallhärtung

Die **Volkswagen AG** fertigt, wie auch alle anderen deutschen Automobilhersteller, ihre Getriebe selber und zwar seit 1958 u. a. am Standort Kassel-Baunatal. Das Werk Kassel der Volks-

wagen AG beschäftigt rund 16.500 Mitarbeiter. Es ist der wichtigste Getriebehersteller des VW-Konzerns und zählt zu den bedeutendsten Komponentenlieferanten für die fahrzeugaufbauenden Werke. Neben Schalt- und Direktschalt-Getrieben werden auch e-Antriebe, Abgasanlagen und formgehärtete Karosserieteile produziert. Seit der Werksgründung haben mehr als 130 Mio. Getriebe die Produktionshallen verlassen, je Geschäftsjahr sind es aktuell, mit steigender Tendenz, rund 3,6 Mio. Die gefertigten Getriebeteile gelangen vor dem Zusammenbau in die Härterei. Mit über 260.000 zu härtenden Einzelteilen am Tag hat das Werk Kassel die größte Härterei Europas. Zur Härtung werden die bis zu 1.000 °C heißen Chargen unter Hochdruck (18 bar) mit gasförmigem Helium abgeschreckt, das Gas danach größtenteils recycelt und nur die Heliumverluste ersetzt. Der Heliumbedarf der Volkswagen AG in Kassel liegt bei rund 25.000 m<sup>3</sup> jährlich. Neben der Härterei der Volkswagen AG gibt es noch Dutzende weitere Härtereien in Deutschland, die nach dem Prinzip der Hochdruckgasabschreckung mit Helium arbeiten.

### **Helium, Argon – Gaschromatographie und andere Analysen**

Nach ILLICHMANN (2018) gibt es in Deutschland 1.423 private Prüf- und Kalibrierlaboratorien, 100 nicht-private Labore und weitere 730 Labore, die direkt in Industrieunternehmen integriert sind.

Die **Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe** (BGR) ist eine obere Bundesbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) und geht mit ihren Anfängen auf das Jahr 1873 zurück. Seit dem Jahr 1958 ist sie in Hannover ansässig und beschäftigt derzeit 757 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, davon rund die Hälfte Wissenschaftler. Die Aufgaben der BGR sind sehr vielfältig. Zu ihnen gehören die Beratung der Bundesregierung und der deutschen Industrie in allen Fragen der Verfügbarkeit von mineralischen und energetischen Rohstoffen, aber auch der Eigenschaften des Grundwassers und des Bodens. Zur Durchführung eigener wissenschaftlicher Arbeiten auf diesen Gebieten stehen der BGR sowie den beiden anderen im Geozentrum Hannover ansässigen Institutionen (LBEG – Landesamt für Geologie und Bergbau Niedersachsen, LIAG – Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik) eine Vielzahl von modernen



**Abb. 47: Gaschromatograph im Arbeitsbereich „Geochemie der Energierohstoffe und Gasmonitoring“ der BGR mit verschiedenen Gasanschlüssen oberhalb des Geräts, Foto: BGR.**

analytischen Messgeräten zur Verfügung. Hierzu gehören mehrere Gaschromatographen, verschiedene Arten von Massenspektrometern (MS, ICP-MS), Quadrupol-Massenspektrometer (QMS), Atomemissionsspektrometer (ICP-OES), Oberflächenanalytoren, Porositätsmessgeräte und Laser, die auf der Grundlage von Helium und/oder Argon, die Laser auch von Neon als Träger-, Spül- oder Kalibriergas arbeiten. Der Verbrauch an Edelgasen im Geozentrum Hannover lag im Jahr 2017 bei 8.210 m<sup>3</sup> Argon (5.0) sowie 1.880 m<sup>3</sup> Helium (5.0).

### **Helium – Lecksuche**

Die **Pfeiffer Vacuum Technology AG** bzw. ihre operative Gesellschaft, die Pfeiffer Vacuum GmbH, ist ein bedeutender deutscher mittelständischer Maschinenbaukonzern mit Sitz in Aßlar in Mittelhessen. International ist das Unternehmen mit seinen derzeit 3.000 Mitarbeitern insbesondere im Geschäftsfeld Entwicklung, Herstellung und Vertrieb von Komponenten und Systemen zur Vakuumerzeugung, -messung und -analyse sowie

von Helium-Dichtheitsprüfgeräten tätig. Der Konzern ist überwiegend exportorientiert (Anteil etwa 70 %) und hat mehr als 20 Tochtergesellschaften weltweit. An seinem Hauptproduktionsstandort in Aßlar stellt das Unternehmen u. a. portable und stationäre Lecksuchgeräte auf Heliumbasis z. B. für die Automobilindustrie, die Luft- und Raumfahrt oder Halbleiterherstellung her. Pfeiffer Vacuum ist mit Ausnahme seiner F&E-Abteilung somit selbst kein Nutzer von Helium, versorgt jedoch die weltweite Industrie mit modernsten Lecksuchgeräten.

### Argon – Stahl- und Edelstahlproduktion

Die **Salzgitter AG** ist ein MDAX-notierter Stahlkonzern mit weltweit über 150 Tochter- und Beteiligungsgesellschaften und rund 25.000 Mitarbeitern, davon 19.000 in Deutschland. Unter Führung der Salzgitter AG als Holding ist der Konzern in die fünf Geschäftsbereiche Flachstahl, Grobblech/Profilstahl, Mannesmann, Handel und Technologie untergliedert. Größtes Unternehmen des Geschäftsbereichs Flachstahl ist die Salzgitter Flachstahl GmbH, die am Standort Salzgitter eines der modernsten und umweltfreundlichsten integrierten Hüttenwerke der Welt betreibt. Im Jahr 2017 erzeugten dort 5.580 Mitarbeiter rund 4,5 Mio. t Roh- sowie 3,5 Mio. t Walzstahl. Die Firmen im Geschäftsbereich Grobblech/Profilstahl produzierten bzw. verarbeiteten an den Standorten Peine bzw. Ilsenburg und Mülheim an der Ruhr 1,1 Mio. t Rohstahl (aus Stahlschrotten) und 2,2 Mio. t Walzstahl. Der Geschäftsbereich Mannesmann fertigt in mehreren Werken in Europa sowie in den USA und Mexiko Stahlrohre. Die Salzgitter AG ist einer der großen Argonverbraucher in Deutschland und wird am Standort Salzgitter mit technischen Gasen über zwei Luftzerlegungsanlagen der Linde AG versorgt, von denen eine mit einer Argon-Kolonne ausgerüstet ist. Produktion und Verbrauch von Argon am Hauptproduktionsstandort Salzgitter liegen bei mehreren Mio. m<sup>3</sup> jährlich. Benötigt wird das Argon bei der Stahlherstellung im Konverter, in der Sekundärmetallurgie zum Homogenisieren und Spülen der Pfanne sowie im Strangguß zur Abschleierung als Reoxidationsschutz beim Gießen. Auch viele andere der über 20 weiteren Stahlwerke in Deutschland (Gesamtproduktion im Jahr 2016 42,1 Mio. t Rohstahl) verfügen aufgrund ihres hohen Bedarfs an Sauerstoff, Stickstoff und Argon über eigene Luftzerlegungsanlagen oder sind zumindest über

Leitungen an Luftzerlegungsanlagen angeschlossen.

### Argon, Krypton – Wärmeschutzverglasung

Mit ca. 1.450 Mitarbeitern und 18 Standorten in Deutschland gehört die **Semcoglas Holding GmbH** mit ihren zahlreichen operativen Tochterunternehmen und Hauptsitz in Westerstede zu den großen Flachglasveredlern Deutschlands und Westeuropas. Als Vollsortimenter produziert das mittelständische Unternehmen in seinem Floatglaswerk in Magdeburg/Osterweddingen täglich bis zu 800 t Floatglas in den Stärken von 3 bis 19 mm und veredelt sie in den gruppen-eigenen Werken zu Wärme-, Sonnen-, Klima- oder Schallschutzgläsern, Glastüren, Wandverkleidungen oder Küchenarbeitsplatten. In den 13 Werken Kropp, Westerstede, Vechta, Bramsche, Nordhorn, Dülmen, Wassenberg, Gießen, Aschaffenburg, Schweinfurt, Zerbst, Eberswalde und Bad Sülze stellt das Unternehmen Isoliergläser her, wozu jährlich nur mehrere hundert Kubikmeter Krypton, jedoch viele zehntausende Kubikmeter Argon eingesetzt werden. Xenon findet aufgrund seines schlechten Preis-Leistungsverhältnisses keine Anwendung. Weitere große Isolierglasproduzenten in Deutschland sind die Interpane Glasindustrie AG (Lauenförde), die Saint-Gobain Gruppe (F) und die Glas Trösch Gruppe (CH). Zudem gibt es zahlreiche kleinere Isolierglasproduzenten. Zusammen produzierten sie im Jahr 2017 in Deutschland 29,61 Mio. m<sup>2</sup> Isolierglas, davon 12,2 % für den Export bzw. 59,6 % als moderne Dreischeiben-Gläser.

### Argon, Krypton, Xenon – Beleuchtungstechnik

Die **Osram Licht AG** bzw. ihre operative Gesellschaft, die Osram GmbH, ist ein MDAX-notiertes deutsches Unternehmen mit Sitz in München und weltweit 79 Tochter- und Beteiligungsgesellschaften mit zusammen rund 26.400 Mitarbeitern. Osram war von 1978 bis 2013 ein hundertprozentiges Tochterunternehmen der Siemens AG und wurde danach an die Börse gebracht. Osram stellt Leuchtmittel und -systeme für Spezialanwendungen, halbleiterbasierte Lichtprodukte (LED) sowie professionelle Leuchten und Lösungen her. Das Geschäft mit traditionellen Leuchtmitteln und Lampen für Endverbraucher (LEDVANCE) gehört

hingegen seit dem Jahr 2016 nicht mehr zum Konzern und wurde an ein chinesisches Konsortium abgestoßen. Das Unternehmen ist in vier Geschäftsbereichen tätig:

- Der Geschäftsbereich Opto Semiconductors entwickelt, produziert und vermarktet LED für Auto- und Bühnenscheinwerfer, Büro- oder Straßenbeleuchtung, kleinste LED für mobile Endgeräte, Halbleiterlaser, Detektoren sowie Infrarot-Dioden (IRED), z. B. für den Einsatz in Iris-Scannern oder Fitness-Armbändern.
- Der Geschäftsbereich Specialty Lighting bietet ein breites Spektrum an Lampen und Systemen für die Automobilindustrie sowie den industriellen und professionellen Beleuchtungsbereich, inkl. Speziallampen und Lichtsystemen für Bühnen-, Kino- und Studiobeleuchtung. Gemessen am Umsatz stellt das größte Geschäftsfeld die Automobilbeleuchtung (u. a. Xenonlampen) dar, in der Osram seit vielen Jahren Weltmarktführer ist. Jedes Jahr wird die Hälfte aller weltweit gebauten Pkws mit OSRAM Lampen ausgerüstet. Die deutschen Produktionsstandorte liegen in Eichstätt in Bayern und Herbrechtingen in Baden-Württemberg. Hier werden an Edelgasen Argon, besonders aber Krypton und Xenon teils in reiner Form, v. a. aber auch in Form von Gasmischungen benötigt.
- Der Geschäftsbereich Digital Systems bietet Komponenten für intelligente Lichtlösungen wie LED-Treiber, LED-Module und Lichtmanagementsysteme, die Basis für effiziente und vernetzte LED-Lösungen sind.
- Der Geschäftsbereich Lighting Solutions umfasst das Leuchten- und Lösungsgeschäft von Osram für Industrie, Sport und Freizeit, zudem Bürobeleuchtung und Einzelhandel sowie für kundenspezifische Projekte im Bereich Straßen- und Architekturbeleuchtung.

### **Xenon – Ionenantriebe**

Die **Airbus Defence and Space** ist eine Division des Airbus-Konzerns, die aus der Zusammenlegung der Geschäftsaktivitäten der ehemaligen Spezial- bzw. Tochtergesellschaften Cassidian, Astrium und Airbus Military des EADS-Konzerns entstanden ist. Die neue Division ist das führende Verteidigungs- und Raumfahrtunternehmen Europas, das zweitgrößte Raumfahrtunterneh-

men der Welt und gehört zu den zehn größten Verteidigungsunternehmen weltweit. Der Standort Immenstaad westlich Friedrichshafen am Bodensee mit seinen rund 2.250 Mitarbeitern ist Dreh- und Angelpunkt für die Entwicklung von Satelliten, Sonden, Instrumenten und Ausrüstung für Erdbeobachtung, Telekommunikation, Navigation, Meteorologie und Weltraumerforschung. Zudem wird in Immenstaad an neuen Aufklärungs- und Überwachungssystemen, Avioniksystemen, unbemannten Flugsystemen, Hinderniswarnsystemen für Hubschrauber, Gefechtsführungs- und Kommunikationssystemen, mobilen Krankenhäusern und Sensoren für die Aufklärung aus der Luft und aus dem Weltraum geforscht. Die in Immenstaad entwickelten Satelliten werden dann größtenteils an anderen Standorten des Airbus-Konzerns gefertigt, besonders in Toulouse/Frankreich und in Portsmouth/Großbritannien.

## Literatur

AZRAEL, D., MUKAMAL, A., COHEN, A.P., GUNNELL, D., BARBER, C. & MILLER, M. (2016): Identifying and tracking gas suicides in the U.S. using the National Violent Death Reporting System, 2005–2012. – *American Journal of Preventive Medicine*, **51**, 5, S3: S219 – S225; 1 Abb., 2 Tab.; New York, NY – URL: [https://ac.els-cdn.com/S0749379716303129/1-s2.0-S0749379716303129-main.pdf?tid=edca51de-58ad-4312-b9e8-4a2fa6a211d5&acdnat=1521637412\\_39d5851710518a80c09b265a41a8fd81](https://ac.els-cdn.com/S0749379716303129/1-s2.0-S0749379716303129-main.pdf?tid=edca51de-58ad-4312-b9e8-4a2fa6a211d5&acdnat=1521637412_39d5851710518a80c09b265a41a8fd81) [Stand 27.09.2018].

BAKER, A. H. (2018): Helium – a space odyssey. – *gasworld magazine*, 4.6.2018: 7 S., 2 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/helium-a-space-odyssey/2014847.article> [Stand 27.09.2018].

BALDUS, H., BAUMGÄRTNER, K., KNAPP, H. & STREICH, M. (1983): Verflüssigung und Trennung von Gasen. – In: Winnacker, K. & Weingärtner, E. (Hrsg.): *Chemische Technologie*. **Bd. 3**: Anorganische Technologie II, 4. Aufl.: 566 – 650, 59 Abb., 8 Tab.; München – Wien.

BALLENTINE, C. J. & LOLLAR, B. S. (2002): Regional groundwater focusing of nitrogen and noble gases into the Hugoton-Panhandle giant gas field, USA. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **66**, 14: 2483 – 2497, 9 Abb., 2 Tab.; Washington, DC.

BERGANZA, C. J. & ZHANG, J. H. (2013): The role of helium gas in medicine. – *Medical Gas Research*, **3**, 18: 1 – 7, 4 Abb.; New York, NY – URL: <https://doi.org/10.1186/2045-9912-3-18> [Stand 27.09.2018].

BETZENDAHL, R. (2007): Rare gases. A fast growing global commodity. – *CryoGas International*, Juni 2007: 20 – 24, 7 Abb.; Cornwall, UK – URL: <http://bgcspecgas.com/media/Rare%20Gases%20Supply%20%26%20Demand%206-07.pdf> [Stand 27.09.2018].

BETZENDAHL, R. (2009): Rare gases market update. Demand is down but unique applications give this market staying power. – *CryoGas International*, Juli 2009: 36 – 37, 2 Abb.; Cornwall, UK – URL: <http://bgcspecgas.com/media/Rare%20Gases%20Market%20Update%206-09.pdf> [Stand 27.09.18].

BETZENDAHL, R. (2010): The rare gas market report. Restraint in supply makes for a better man-aged business. – *CryoGas International*, August/September 2010: 46 – 52, 3 Abb.; Cornwall, UK – URL: <http://bgcspecgas.com/media/81c996d1f5b60acffff838dffffe907.pdf> [Stand 27.09.2018].

BETZENDAHL, R. (2011): The rare gas market recovers with global economies. – *CryoGas International*, März 2011: 40 – 43, 2 Abb.; Cornwall, UK – URL: <http://bgcspecgas.com/media/b7896da26ea95008ffff-86c47f000101.pdf> [Stand 27.09.2018].

BETZENDAHL, R. (2012): Still bullish on rare gases. – *CryoGas International*, Februar 2012: 28 – 30, 2 Abb.; Cornwall, UK – URL: <http://bgcspecgas.com/media/bb261f6d358e4257fff81fbffffe904.pdf> [Stand 27.09.2018].

BETZENDAHL, R. (2013a): Ever changing rare gas market. – *CryoGas International*, Februar 2013: 32 - 34, 4 Abb.; Cornwall, UK (URL: <http://www.bgcspecgas.com/media/bb261f6d358e4257fff81fbffffe904.pdf>) [Stand 28.09.2018].

BETZENDAHL, R. (2013b): Rare gases – a fast growing global commodity. – *CryoGas International*, 28.8.2013: 20 – 24, 7 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/rare-gases-a-fast-growing-global-commodity/2002655.article> [Stand 28.09.2018].

BETZENDAHL, R. (2015a): Hot topic: Neon – the new rare gas shortage of 2015. – *gasworld magazine*, 2.9.2015: 4 S., 2 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/neon-the-new-rare-gas-shortage-of-2015/2008118.article> [Stand 28.09.2018].

BETZENDAHL, R. (2015b): The rare gases roller-coaster fueled by volatile markets. – CryoGas magazine, 1.12.2015: 20 – 24, 7 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/the-rare-gases-roller-coaster-fueled-by-volatile-markets/2009662.article> [Stand 28.09.2018].

BETZENDAHL, R. (2016): Another volatile year for rare gases. – gasworld magazine, 1.12.2016: 8 S., 5 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/another-volatile-year-for-rare-gases/2011826.article> [Stand 28.09.2018].

BETZENDAHL, R. (2017): The ever-changing rare gas market. – Speciality Gas Report, 1.12.2017: 8 S., 6 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/the-ever-changing-rare-gas-market/2013884.article> [Stand 28.09.2018].

BGR–BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2017): BGR Energiestudie 2017 – Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung: 184 S., zahlr. Abb. und Tab. Anh.; Hannover – URL: [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/energiestudie\\_2017.pdf?](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/energiestudie_2017.pdf?) [Stand 28.09.2018].

BORZIO, R. (2016): Gas opportunities in welding, cutting, and metal fabrication. – Speciality Gas Report, 1.2.2016: 7 S., 1 Abb., 3 Tab.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/gas-opportunities-in-welding-cutting-and-metal-fabrication/2009910.article> [Stand 28.09.2018].

BÖTTCHER, D. (2015a): Helium (He). – brand eins, **2/2015**: 4 S.; Hamburg – URL: <https://www.brandeins.de/magazine/brand-eins-wirtschaftsmagazin/2015/marketing/helium-he> [Stand 28.09.2018].

BÖTTCHER, D. (2015b): Argon (Ar). – brand eins, **12/2015**: 4 S.; Hamburg – URL: <https://www.brandeins.de/magazine/brand-eins-wirtschaftsmagazin/2015/geschwindigkeit/argon-ar> [Stand 28.09.2018].

BÖTTCHER, D. (2016): Xenon (Xe). – brand eins, **6/2016**: 4 S.; Hamburg – URL: <https://www.brandeins.de/magazine/brand-eins-wirtschaftsmagazin/2016/einfach-machen/xenon-xe> [Stand 28.09.2018].

CAI, Z., CLARKE, R.H. & NUTTALL, W. J. (2012): Helium demand. Application, prices and substitution. – in: NUTTALL, W. J., CLARKE, R.H. & GLOWACKI, B. A. (Hrsg.): The future of helium as a natural resource: 134 - 156, 11 Abb., 6 Tab.; Oxon, UK (Routledge).

CLARKE, R.H. & CAI, Z. (2012): Helium and fusion energy. – In: NUTTALL, W. J., CLARKE, R.H. & GLOWACKI, B. A. (Hrsg.): The future of helium as a natural resource: 235 – 264, 14 Abb., 3 Tab., 1 Anh.; Oxon, UK (Routledge).

CLARKE, R.H. & CLARE, R. (2012): Helium from the air. The backstop. – In: Nuttall, W. J., Clarke, R.H. & Glowacki, B. A. (Hrsg.): The future of helium as a natural resource: 119 - 133, 6 Abb., 3 Tab.; Oxon, UK (Routledge).

COCKERILL, R. (2010): Feed the world – an interview with Iceblick. – gasworld magazine, 12.4.2010: 4 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/feed-the-world-an-interview-with-iceblick/4573.article> [Stand 28.09.2018].

COCKERILL, R. (2013a): Helium supply: scarcity prompts the search for alternatives. – gasworld magazine, April 2013: 26 – 27, 2 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/features/hot-topic-helium-scarcity-prompts-the-search-for-alternatives/2001977.article> [Stand 28.09.2018].

COCKERILL, R. (2013b): Helium: Economising world usage. – gasworld magazine, 1.5.2013: 5 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/special-features/hot-topic-helium-economising-world-usage/2002095.article> [Stand 28.09.2018].

COCKERILL, R. (2013c): "Helium Cliff" approaches in 2013 – Helium shortage expected to continue into New Year. – *gasworld magazine*, 7.1.2013: 9 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/features/helium-cliff-approaches-in-2013-helium-shortage-expected-to-continue-into-new-year/2001613.article> [Stand 28.09.2018].

COCKERILL, R. (2014): Helium – Softening demand ahead?. – *gasworld magazine*, 8.1.2014: 4 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/special-features/helium-softening-demand-ahead/2003181.article> [Stand 28.09.2018].

COCKERILL, R. (2015): In focus...Gas production technologies. – *gasworld magazine*, 2.12.2015: 6 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/in-focusgas-production-technologies/2009645.article> [Stand 28.09.2018].

COCKERILL, R. (2018): Irkutsk Oil Company announces new helium project. - *gasworld magazine*, 4.10.2018: 2 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/irkutsk-oil-company-announces-new-helium-project/2015565.article> [Stand 08.10.2018].

DANABALAN, D., GLUYAS, J., MACPHERSON, C., BARRY, P. & BALLENTINE, C. (2018): Helium. Hero or Houdini. – *Geoscientist*, **27**, **11**: 10 - 15, 16 Abb.; London – URL: <https://www.geolsoc.org.uk/~/%20~/media/shared/documents/Geoscientist/2017/Geoscientist%20Dec2017-Jan2018%20LR.pdf>. [Stand 28.09.2018].

DAWSON, J. (2011): World exclusive: Helium Shortage 2.0. – *gasworld magazine*, 12.6.2011: 3 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/world-exclusive-helium-shortage-20/5727.article> [Stand 08.10.2018].

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GMBH (o.J.): Metallpulver und Stranggusstäbe: 28 S., zahlr. Abb. und Tab.; Krefeld – URL: [https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publicationen/Broschuren/050\\_DEW\\_Metallpulver\\_D.pdf](https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publicationen/Broschuren/050_DEW_Metallpulver_D.pdf) [Stand 08.10.2018].

EPCM-EPCMCONSULTANTS SOUTH AFRICA (2017): Process technologies for helium recovery from natural gas: a review: 35 S., 13 Abb., 5 Tab.; Centurion, SA – URL: <http://epcmconsultants.co.za/process-technologies-for-helium-recovery-from-natural-gas-a-review/> [Stand 08.10.2018].

FALKENBACH, A. (2008): Radon in der Kurortmedizin. – In: *Deutsches Bäderbuch*. Zweite Aufl.: 152 - 154; Stuttgart.

FORBES, W. (2017): Helium – macro view. – Report by Edison Investment Research for North American Helium: 17 S., 13 Abb.; London – URL: <https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKewidPOC1fbdAhVvh4sKHWauALsQFjABegQICBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.edisoninvestmentresearch.com%2F%3FACT%3D19%26ID%3D20087%26dir%3Dsectorreports%26field%3D19&usg=AOvVaw0EIYNtvW7hbxUPYR7T3gO2> [Stand 08.10.2018].

GARVEY, M. D. (2009): 2009 worldwide helium market update. – *gasworld magazine*, 8.10.2009: 7 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/2009-worldwide-helium-market-update/2005343.article> [Stand 08.10.2018].

GARVEY, M. D. (2011): Tight supply reins in the worldwide helium market. – *gasworld magazine*, 10.11.2011: 7 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/tight-supply-reins-in-the-worldwide-helium-market/2005043.article> [Stand 08.10.2018].

GARVEY, M. D. (2013): The worldwide helium market report 2013. – *gasworld magazine*, 11.10.2013: 7 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/the-worldwide-helium-market-report-2013/2004770.article> [Stand 08.10.2018].

GARVEY, M. D. (2017): 2017 global helium market – supply chain challenges remain. – gasworld magazine, 1.11.2017: 10 S., 4 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/2017-global-helium-market/2013724.article> [Stand 08.10.2018].

GASWORLD (2008): Xenon – the stranger. – gasworld magazine, 15.9.2008: 2 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/xenon-the-stranger/3109.article> [Stand 08.10.2018].

GASWORLD (2009): The economics of helium recovery. – gasworld magazine, 8.10.2009: 5 S., 1 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/the-economics-of-helium-recovery/2005340.article> [Stand 08.10.2018].

GASWORLD (2014): A noble hero – the multiple uses of argon in manufacturing and fabrication. – gasworld magazine, 30.4.2014: 5 S., 3 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/special-features/a-noble-hero-the-multiple-uses-of-argon-in-manufacturing-and-fabrication/2003688.article> [Stand 08.10.2018].

GASWORLD (2018): Creating a semiconductor and the gases that make it happen. – gasworld magazine, 2.2.2018: 6 S., 2 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/creating-a-semiconductor/2014135.article> [Stand 08.10.2018].

GE HEALTHCARE (2016): Setting helium free: revolutionary MRI tech from GE Healthcare. – GE Healthcare Press Release, 29.11.2016: 2 S.; Chicago – URL: [https://www3.gehealthcare.com/~/media/rsna-2016-press-kit-assets/press%20releases/press%20release\\_setting%20helium%20free-revolutionary%20mri%20tech%20from%20gehc.pdf](https://www3.gehealthcare.com/~/media/rsna-2016-press-kit-assets/press%20releases/press%20release_setting%20helium%20free-revolutionary%20mri%20tech%20from%20gehc.pdf)? [Stand 08.10.2018].

GLOWACKI, B. A. (2012): Substituting hydrogen for helium in cryogenic applications. – In: NUTTALL, W. J., CLARKE, R.H. & GLOWACKI, B. A. (Hrsg.): The future of helium as a natural resource: 265 – 295, 24 Abb.; Oxon, UK (Routledge).

GRYNIA, E. & GRIFFIN, P. J. (2016): Helium in natural gas – occurrence and production. – Journal of Natural Gas Engineering, 1, 2: 163 – 215, 24 Abb., 7 Tab.; Beverly, MA – URL: [https://www.gasliquids.com/pdfs/2016\\_HeliumInNaturalGas.pdf](https://www.gasliquids.com/pdfs/2016_HeliumInNaturalGas.pdf) [Stand 08.10.2018].

GUBLER, R., SURESH, B., HE, H. & YAMAGUCHI, Y. (2016): Helium. – IHS Chemical Economics Handbook: 72 S., zahlr. Abb. u. Tab.; London. – IHS Markt.

HALL, K. (2016): Xenon – an elemental noble gas propelling a “big” market. – CryoGas magazine, 1.3.2016: 6 S., 3 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/xenon-an-elemental-noble-gas-propelling-a-big-market/2010067.article#commentsJump> [Stand 08.10.2018].

HEALY, R. (2016): Excimer laser sales grow as worldwide supply of neon stabilizes. – Gas Review, 423: 5 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/excimer-laser-sales-grow-as-neon-supply-stabilizes-/2011508.article> [Stand 08.10.2018].

IGU – INTERNATIONAL GAS UNION (2017): 2017 World LNG Report: 94 S., zahlr. Abb. u. Tab., 8 Anh.; Barcelona – URL: [https://www.igu.org/sites/default/files/103419-World\\_IGU\\_Report\\_\\_no%20crops.pdf](https://www.igu.org/sites/default/files/103419-World_IGU_Report__no%20crops.pdf) [Stand 08.10.2018].

ILLICHMANN, M. (2018): Materialflussanalyse des kritischen Rohstoffs Helium für Deutschland. – Masterarbeit an der Professur für Wirtschaftschemie: 127 S., 36 Abb., 42 Tab.; Ulm (unveröffentlicht).



- KHAN, S. (2017): Excimer laser gases – an exciting application for lithography. – *Speciality Gas Report*, 1.6.2017: 5 S., 3 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/excimer-laser-gases/2012862.article> [Stand 08.10.2018].
- KORNBLUTH, P. (2015): Evolution of the global helium business. – *CryoGas International*, **53**, 9: 34–36, 1 Abb., 1 Tab.; Lexington, MA – URL: <http://www.kornbluthheliumconsulting.com/wp-content/uploads/2018/06/CryoGas-Article-Final.pdf> [Stand 08.10.2018].
- KORNBLUTH, P. (2016): Helium markets finding equilibrium. – *CryoGas International*, **54**, 6: 40 - 41, 1 Abb.; Lexington, MA – URL: <http://www.kornbluthheliumconsulting.com/wp-content/uploads/2018/06/cryo2.pdf> [Stand 08.10.2018].
- LAZZERINI, F. T. & BONOTTO, D. M. (2015): The use of radon and thoron in balneotherapy. – in: STACKS, A. M. (Hrsg.): *Radon. Geology, environmental impact and toxicity concerns*: 117 – 132, 2 Tab.; New York.
- LEBEDEV, P. K. & PRYANICHNIKOV, V. I. (1993): Present and future production of xenon and krypton in the former USSR region and some physical properties of these gases. – *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **A327**: 222 – 226, 3 Abb., 2 Tab.; Noord-Holland – URL: <https://www.nevis.columbia.edu/~ju/Paper/Paper-detector/science16.pdf> [Stand 08.10.2018].
- LIVONEN, K. (2006): Argon – Tight supply as steel output drives up demand. – *gasworld magazine*, 16.11.2006: 6 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/argon-tight-supply-as-steel-output-drives-up-demand/1150.article> [Stand 08.10.2018].
- LÜBBERS, B., REHMER, K.-P. & HAQ, A. A. (2018): Errichtung des weltweit ersten Helium-Kavernenspeichers in Deutschland. – *Erdgas, Erdöl, Kohle*, **134**, 4: 166 – 168, 1 Abb., 1 Tab.; Hamburg.
- MALIK, Y. (2008): Krypton – the hidden one. – *gasworld magazine*, 18.12.2008: 3 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/krypton-the-hidden-one/3402.article> [Stand 08.10.2018].
- MOHR, S. & WARD, J. (2014): Helium production and possible projection. – *minerals*, **4**, 1: 130 – 144, 4 Abb.; Basel – URL: <http://www.mdpi.com/2075-163X/4/1/130/html> [Stand 08.10.2018].
- MORGAN, N. (2007a): Helium – making light work. – *gasworld magazine*, 25.5.2007: 3 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/helium-making-light-work/1651.article> [Stand 08.10.2018].
- MORGAN, N. (2007b): Argon – the noble protector. – *gasworld magazine*, 15.6.2007: 4 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/argon-the-noble-protector/1706.article> [Stand 08.10.2018].
- NATIONALRESEARCHCOUNCILOFTHE NATIONALACADEMIES (2010): *Selling the nations's helium reserve.* – Report: 156 S., 30 Abb., 6 Tab., 7 Anh., Washington, DC.
- NUTTALL, W. J., CLARKE, R.H. & GLOWACKI, B. A. (Hrsg.) (2012): *The future of helium as a natural resource*: 330 S., 132 Abb., 32 Tab.; Oxon, UK (Routledge).
- OSTERATH, B. (2015): Begehrter Neutronenfänger. – *Nachrichten aus der Chemie*, **63**: 1168 – 1171, 4 Abb.; Weinheim – URL: [http://www.writing-science.de/artikel/helium3\\_osterath.pdf](http://www.writing-science.de/artikel/helium3_osterath.pdf) [Stand 08.10.2018].
- OZIMA, M. & PODOSEK, F. A. (2002): *Noble gas geochemistry*. 2nd Ed. – 286 S., zahlr. Abb. u. Tab.; Cambridge (Cambridge University Press).

- PAKHOMOV, S. & DUBASOV, Y. (2014): Development of atmospheric air  $^{85}\text{Kr}$  monitoring methodology on the territory of the USSR. – European Geosciences Union General Assembly 2014, Wien 27.4. – 2.5.2014, Geophysical Research Abstracts, **16**: 12335; Wien – URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-12335.pdf> [Stand 08.10.2018].
- RADNEDGE, S. (2012): Last year's helium deaths total figure "an underestimate". – gasworld magazine, 6.9.2012: 2 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/west-europe/last-years-helium-deaths-total-figure-an-underestimate/2001146.article> [Stand 08.10.2018].
- SAMET, J. M. (1994): Health effects of radon. – In: NAGDA, N. L. (Hrsg.): Radon: prevalence, measurements, health risks and control. – ASTM Manual Series, **MNL 15**: 33 – 48, 4 Abb., 11 Tab.; Philadelphia, PA.
- SCHUMANN, R. R., GUNDERSON, L. C. S. & TANNER, A. B. (1994): Geology and occurrence of radon. – In: NAGDA, N. L. (Hrsg.): Radon: prevalence, measurements, health risks and control. – ASTM Manual Series, **MNL 15**: 83 – 96, 10 Abb., 2 Tab.; Philadelphia, PA.
- SEARS, W. M. JR. (2015): Helium. The disappearing element. – SpringerBriefs in Earth Sciences: 138 S., 37 Abb.; Cham u.a.
- SEXTRO, R. G. (1994): Radon and the natural environment. – In: NAGDA, N. L. (Hrsg.): Radon: prevalence, measurements, health risks and control. – ASTM Manual Series, **MNL 15**: 9 – 32, 14 Abb., 6 Tab.; Philadelphia, PA.
- SPIRITUS&BETZENDAHL–SPIRITUSCONSULTINGLTD.&BETZENDAHLGASCONSULTANTS,LLC.(2018):Theglobal rare gases business. A 2018 update multi-subscriber report: 57 S., 20 Abb., 16 Tab.; Truro, UK.
- SSK–STRAHLENSCHUTZKOMMISSION(1992):DieExpositiondurchRadonundseineZerfallsprodukteinWohnungen in der Bundesrepublik Deutschland.- **19**: 114 S., zahlr. Abb. u. Tab.; Stuttgart - Jena - New York (G. Fischer).
- STOCKMAN, P. (2016): Helium in electronics – enabling leading-edge semiconductor manufacturing. – gasworld magazine, 6.1.2016: 8 S., 2 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/helium-in-electronics/2009763.article> [Stand 08.10.2018].
- SURESH, B., HE, H., GUBLER, R. & YAMAGUCHI, Y. (2016): Air separation gases. – IHS Chemical Economics Handbook: 352 S., zahlr. Abb. u. Tab.; London (IHS Markit).
- UMRATH, W. (2016): Grundlagen der Vakuumtechnik. – 234 S., zahlr. Abb. u. Tab.; Köln (Leybold). – URL: [https://www.leyboldproducts.de/media/pdf/55/0f/9d/FVT\\_Grundlagen\\_der\\_Vakuum-technik\\_DE.pdf](https://www.leyboldproducts.de/media/pdf/55/0f/9d/FVT_Grundlagen_der_Vakuum-technik_DE.pdf) [Stand 08.10.2018].
- WADE, A. (2017): The MRI story – past, present and future. – gasworld magazine, 4.1.2017: 5 S., 2 Abb.; Cornwall, UK (URL: <https://www.gasworld.com/the-mri-story/2012043.article>) [Stand 08.10.2018].
- WATSON, J.H.P. (1994): Status of superconducting magnetic separation in the minerals industry. – Minerals Engineering, **7**, 5/6: 737-746, 6 Abb.; Cambridge, UK – URL: [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(94\)90103-1](https://doi.org/10.1016/0892-6875(94)90103-1) [Stand 08.10.2018].
- WEBEL, S. (2016): Innovationen: Hochtemperatursupraleiter in der Bildgebung. Große Magnetfelder einfach zur Hand.- Siemens. Picture of the Future, 10.3.2016: 4 S., 7 Abb.; München – URL: <https://www.siemens.com/innovation/de/home/pictures-of-the-future/forschung-und-management/innovationen-mrt-mit-hts.html> [Stand 08.10.2018].

YAKUTSENI, V. P. (2014): World helium resources and the perspectives of helium industry development. – Neftegasovaâ geologiâ. Teoriâ i praktika, **9**, 1: 22 S., 5 Abb., 9 Tab.; St. Petersburg – URL: [http://www.ngtp.ru/rub/9/11\\_2014\\_eng.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/9/11_2014_eng.pdf) [Stand 08.10.2018].

YONGCHANG, X., WENHUI, L., PING, S. & MINGXIN, T. (1996): Geochemistry of noble gases in natural gases. – 275 S., zahlr. Abb. u. Tab.; Beijing (Science Press).



## Anhang

---

Länderprofile



## Algerien



### Helium

Algerien verfügte zum 31.12.2016 über Reserven von 4.501 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas bzw. Ressourcen von 26.720 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas. Damit liegt das nordafrikanische Land bei den Reserven weltweit an 11. Stelle und bei den Ressourcen weltweit an 7. Stelle. Seine Jahresförderung betrug im Jahr 2016 93,2 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas. Dies entspricht 2,6 % der weltweiten Erdgasförderung bzw. Rang 9 weltweit. Seit Aufnahme der Erdgasproduktion Anfang der 1960er Jahre sind in Algerien etwa 2.483 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas gefördert worden. Das größte algerische Erdgasfeld ist Hassi R'Mel mit einem Durchschnittsgehalt von 0,19 % He im Erdgas.

Im Jahr 1964 wurde Algerien der weltweit erste Produzent von Flüssigerdgas (LNG), als es ein Erdgasverflüssigungswerk in Béthioua bei Arzew am Mittelmeer in Betrieb nahm. Seit Herbst 1994 wird hier u. a. auch flüssiges Helium gewonnen, seit 1995 kommerziell produziert und seit Ende 1995 von hier vornehmlich nach Europa exportiert. Sofern die liefernde LNG-2-Anlage in Arzew ausreichende Mengen an Helium reichen Restgasen zur Verfügung stellt, kann eine Jahresproduktion von 16,6 Mio. m<sup>3</sup> gasförmiges Helium bzw. 2.800 t flüssiges Helium erreicht werden. Dies scheint jedoch schon seit längerer Zeit nicht mehr der Fall zu sein (D.N. BACIU, Linde AG, pers. Mitteilung). Eigentümer der Heliumanlage ist das 1991 gegründete Joint Venture „*Helios S.p.A. – La Société pour la Construction et l'Exploitation d'une Usine d'Helium Liquide et d'Azote*“, das sich zu 51 % im Besitz des algerischen Staatsunternehmens Sonatrach S.p.A. und zu 49 % im Besitz des Joint-Ventures Helap S.p.A. (Gesellschafter Air Liquide S.A./Frankreich und Air Products and Chemicals, Inc./USA) befindet. Seit einem Jahrzehnt ist angedacht, in Arzew noch eine zweite Heliumanlage aufzubauen (REINOEHL 2012).

Im Jahr 2005 folgte die Eröffnung einer zweiten Heliumanlage in der Nähe der drei bestehenden und zum Teil seit 1971 produzierenden LNG-Anlagen eines Erdgasverflüssigungswerkes in Skikda, rund 510 km östlich von Algiers, ebenfalls am Mittelmeer gelegen. Diese Heliumanlage der Helison Production S.p.A. wurde vom Unternehmen Linde Engineering erbaut, ging im April 2007 in Produktion und befindet sich zu 51 % im Besitz der deutschen Linde AG und zu 49 % im Besitz der algerischen Sonatrach S.p.A. Linde stehen 50 % der Heliumproduktion zu. Die Jahreskapazität der Heliumanlage beträgt (je nach Quelle) 3.000 t flüssiges Helium bzw. 16,6 Mio. m<sup>3</sup> gasförmiges Helium @ > 99,999 % He. Gleichzeitig kann die angeschlossene LNG-Anlage aber nur Restgas mit max. 12,5 Mio. m<sup>3</sup> He-Inhalt/a liefern (D.N. BACIU, Linde AG, pers. Mitteilung).

Die Produktionszahlen von Helium in Algerien sind nicht publiziert. In einigen Medien wurde nur berichtet, dass die Heliumanlage in Skikda im Jahr ihrer Eröffnung (2007) 3 Mio. m<sup>3</sup> Helium produziert haben soll.

Bei den anderen Produktionsdaten in Tab. 24 handelt es sich um Schätzungen des US Geological Survey, wobei sich die Schätzungen je nach USGS-Autor seit 2010 unterscheiden und offensichtlich nicht abgestimmt sind.

Den Produktionsdaten sind die weltweiten Gesamtimporte von Helium aus Algerien (bzw. Frankreich, da in Marseille ein Großteil des Heliums aus Algerien angelandet wird) nach Global Trade Atlas gegenübergestellt.

**Tab. 24: Gesamtmenge der weltweiten Importe von Helium aus Algerien bzw. Frankreich (in Mio. m<sup>3</sup>), nach Global Trade Atlas (t und ft<sup>3</sup> umgerechnet in m<sup>3</sup>) sowie Schätzungen der algerischen Heliumproduktion nach US Geological Survey (USGS).**

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
<b>Importe</b>								
- aus Algerien	n.v.	n.v.	10,55	10,85	12,09	10,41	9,08	10,81
- aus Frankreich	0,05	0,54	2,07	6,32	8,20	8,00	8,30	8,76
<b>- gesamt</b>	n.v.	n.v.	12,62	17,17	20,29	18,41	17,38	19,57
<b>Schätzung USGS</b>	10	15	15	16	16	10	17	17
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<b>Importe</b>								
- aus Algerien	11,97	14,27	15,16	12,22	14,70	14,59	12,35	10,10
- aus Frankreich	5,04	7,64	9,59	10,18	11,21	15,77	12,32	13,80
<b>- gesamt</b>	17,01	21,91	24,75	22,40	25,91	30,36	24,67	23,90
<b>Schätzung USGS</b>	17	17	17	15	20	20	20	20/17
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
<b>Importe</b>								
- aus Algerien	11,97	14,27	15,16	12,22	14,70	14,59	12,35	
- aus Frankreich	8,91	10,30	7,06	7,05	6,82	5,24	5,13	
<b>- gesamt</b>	20,88	24,57	22,22	19,27	21,52	19,83	17,48	
<b>Schätzung USGS</b>	20/17	15/17	15/25	16/25	10	10	14	

## Literatur

REINOEHL, B. (2012): Helium in Algeria.- in: NUTTALL, W.J., CLARKE, R.H. & GLOWACKI, B.A. (Hrsg.): The future of helium as a natural resource: 55 - 68, 4 Abb.; London – New York (Routledge).



## Australien



### Helium

In Australien gibt es mehrere Sedimentbecken, in denen Helium als Begleitgas im Erdgas nachgewiesen wurde. Einige Beispiele sind:

Amadeus-Becken (Zentralaustralien):

- Konstante Erdgasförderung aus Sandsteinen im Palm-Valley-Erdgasfeld mit durchschnittlich 0,15 % He
- Im Jahr 1992 Testförderung aus einer Störung in einem Salz unterlagernden Quarzit, die täglich 1.750 m<sup>3</sup> stickstoffreiches Nassgas mit einem Gehalt von 7,2 % He lieferte
- Im Jahr 2014 zwei Testförderungen aus Bohrungen in Salz unterlagerndem geklüfteten Granit, die anfangs bis zu 14.700 m<sup>3</sup>/d, dann aber nach wenigen Minuten nur noch deutlich geringere Mengen an Erdgas lieferten, das bis zu 12 % He enthielt

North-Perth-Becken (Western Australia)

- Woodada-Erdgasfeld mit durchschnittlich 0,21 % He. Vorräte: 3,5 Mio. m<sup>3</sup> He („proven reserves“) zzgl. 4 Mio. m<sup>3</sup> He („possible resources“), derzeit keine Förderung

Canning-Becken (Western Australia)

- Meda: explorierte Erdgasakkumulation mit 0,50 % He, Förderung unwahrscheinlich

Gunnedah-Becken (New South Wales)

- Wilga Park: explorierte Erdgasakkumulation mit 0,45 % He, Förderung unwahrscheinlich

McArthur-Becken (Northern Territory):

- Testförderung von Erdgasen mit hohen Methan- und He-, aber niedrigen CO<sub>2</sub>-Gehalten, in Exploration

Unabhängig von den zahlreichen inneraustralischen Heliumnachweisen begann die Produktion von Helium in Australien in Wickham Point bei Darwin, Northern Territory, im März 2010. Damals eröffnete das Unternehmen BOC Ltd., eine Tochterfirma der Linde AG, eine Anlage, die seitdem Helium aus He-reichen Restgasen (mit durchschnittlich 3,0 % He, 0,1 % H<sub>2</sub>, 3,2 % CH<sub>4</sub>, 93,6 % N<sub>2</sub>) eines benachbarten Erdgasverflüssigungswerkes von ConocoPhillips abtrennt. Das dort verflüssigte Erdgas stammt aus dem Bayu-Undan-Feld des offshore Bonaparte-Beckens in der Timor See. Dieses Erdgasfeld liegt rund 250 km südwestlich von Suai auf Timor-Leste und 500 km nordwestlich von Australien in ca. 90 m Wassertiefe. Die vermuteten Reserven betragen 88 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas (mit 0,013 – 0,28 % He, durchschnittlich 0,18 % He) und reichen für eine Förderung über ca. 25 Jahre. Die Erdgasförderung im Bayu-Undan-Feld begann im April 2004, das über Pipeline angeschlossene Erdgasverflüssigungswerk in Darwin wurde im Februar 2006 in Betrieb genommen.

Die Heliumanlage in Darwin wurde von dem schweizerischen Unternehmen Linde Kryotechnik AG erbaut und besitzt offiziell eine Kapazität von – je nach Quelle – 4,16 Mio. m<sup>3</sup> bzw. 5,6 Mio. m<sup>3</sup> gasförmigem Helium @ 99,999 % He pro Jahr. Nach D. N. BACIU (Linde AG, pers. Mitteilung) liegen die Kapazität bei 4,44 Mio. m<sup>3</sup> und auch die Produktion jedes Jahr konstant auf Höhe dieser Kapazität. Die Anlage versorgt jedoch offensichtlich nicht, wie ursprünglich angekündigt, Kunden in Australien, sondern fast ausschließlich in Südostasien (v. a. Malaysia und Südkorea) sowie Neuseeland. Die Produktionsdaten seit Eröffnung sind nicht publiziert, jedoch sind die weltweiten Gesamtimporte von Helium aus Australien nach Global Trade Atlas in Tab. 25 aufgeführt (Anm.: Die Höhe der Gesamtimporte von Helium aus Australien in den Jahren 2016 und 2017 liegt deutlich oberhalb der installierten Heliumkapazität und kann derzeit nicht erklärt werden). Im Vergleich dazu liegt der inneraustralische Heliumbedarf zwischen 500 und 850 t/a, entsprechend 3,0 – 5,1 Mio. m<sup>3</sup>/a.

**Tab. 25: Gesamtmenge der weltweiten Importe von Helium aus Australien nach Global Trade Atlas (in m<sup>3</sup> bzw. t, 1 t He entspricht ca. 5.988 m<sup>3</sup> He bei 15 °C und 1 bar Druck).**

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>m<sup>3</sup></b>	141.773	548.595	627.745	925.121	41.863	176.078	181.846	1.137.347
<b>t</b>	269	305	292	490	799	658	920	977
<b>Summe in Mio. m<sup>3</sup></b>	1,75	2,37	2,38	3,86	4,83	4,12	5,69	6,99

## Literatur

BOREHAM, C., EDWARDS, D. & POREDA, R. (2016): Helium isotopic distribution of Australian natural gases. – 19th Australian Organic Geochemistry Conference, Fremantle 4 – 7 December 2016: 30 S.; Canberra – URL: [https://d28rz98at9flks.cloudfront.net/101684/101684\\_presentation.pdf](https://d28rz98at9flks.cloudfront.net/101684/101684_presentation.pdf) [Stand: 08.10.2018].

CLARKE, M.C., SEDDON, D. & AMBROSE, G. (2014): Helium: will it be the next mineral to boom in Australia?. – Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Bull., **12**: Carlton South – URL: <http://www.metts.com.au/helium-next-mineral-boom-australia.html> [Stand: 08.10.2018].

McKAY, B.A. (1987): Helium resources and developments in Australia: speaking notes, figures and tables. – Petroleum and Minerals Review Conference, Canberra, 18 – 19 March, 1987. – Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, Record **1987/22**: 7 S., 4 Abb., 2 Tab.; Canberra – URL: [https://d28rz98at9flks.cloudfront.net/14150/Rec1987\\_022.pdf](https://d28rz98at9flks.cloudfront.net/14150/Rec1987_022.pdf) [Stand: 08.10.2018].

WALTENBERG, K. (2015): Helium as a critical commodity – opportunities in the Northern Territory. – Geoscience Australia: 20 S.; Canberra – URL: [https://minerals.nt.gov.au/data/assets/pdf\\_file/0010/259390/Helium-as-a-critical-commodity.pdf](https://minerals.nt.gov.au/data/assets/pdf_file/0010/259390/Helium-as-a-critical-commodity.pdf) [Stand: 08.10.2018].

## China



### Helium

Die chinesische Industrie hat einen hohen und stark steigenden Bedarf an Helium, der nicht aus inländischer Produktion gedeckt werden kann. Schon Anfang der 1960er Jahre begann China in eine eigene Heliumproduktion zu investieren, da in den USA ein Embargo gegenüber China bestand und sich ein erhöhter inländischer Bedarf für militärische Zwecke abzeichnete. Hierfür wurden als Erstes die Heliumgehalte der inländischen Erdgasvorkommen untersucht. Daten zur Genese, Tektonik und den Edelgasisotopenverhältnissen zahlreicher chinesischer Sedimentbecken sind in YONGCHANG et al. (1996) zu finden. Vor allem zum rund 180.000 km<sup>2</sup> großen Sichuan-Becken, das offensichtlich die höchsten Gehalte an Helium enthält, wurden bisher auch einige wirtschaftsgeologische Daten publiziert (JIAN et al. 2015):

Sichuan-Becken, östliche Provinz Sichuan

- Südliches Sichuan-Becken mit den großen Erdgasfeldern Weiyuan, Ziliujin und Washi, durchschnittlich 0,24 % He;  
Weiyuan-Erdgasfeld mit ursprünglichen gesicherten Reserven von 40 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas @ 88 – 93 % CH<sub>4</sub>, 4,8 – 15,3 % N<sub>2</sub> und 0,12 – 0,22 % He, maximal 0,40 % He, durchschnittlich 0,16 % He, entdeckt 1964, nahezu erschöpft
- Östliches Sichuan-Becken, durchschnittlich 0,04 % He
- Zentrales Sichuan-Becken, durchschnittlich 0,03 % He
- Westliches Sichuan-Becken, durchschnittlich 0,02 % He

Nur aus dem Weiyuan-Erdgasfeld, aus Bohrungen in 3 km Teufe, wurde bisher in industriellem Maßstab Helium gewonnen und zwar seit den 1970er Jahren in einer Heliumanlage des Unternehmens Chengdu Natural Gas Chemical Plant General, einem Tochterunternehmen der Petro-China Southwest Oil and Gasfield Company. Die jährliche Produktionsmenge soll bei nur 50.000 m<sup>3</sup> Helium gelegen haben und die Produktionskosten überstiegen aufgrund der niedrigen Heliumgehalte im Erdgas die Kosten für importiertes Helium. Um zumindest die chinesische Wissenschaft und das Militär von Heliumimporten unabhängiger zu machen, begann Chengdu Natural Gas Chemical Plant General im Jahr 2010 in der Stadt Dongxing, Provinz Sichuan, bei Investitionskosten von 110 Mio. Yuan (ca. 12 Mio. Euro) mit dem Bau einer weiteren, selbst entwickelten Heliumanlage. Im April 2012 soll diese Anlage erstmals testweise Helium produziert haben – ob sie aber bisher in industrielle Produktion ging, ist unbekannt. Nach GUBLER et al. (2016) betragen die Kapazität dieser Anlage 285.000 m<sup>3</sup> He/a und die Auslastung 40 – 50 %.

Chinesische Marktteilnehmer schlagen vor (DONGXIANG 2014), zur Reduzierung der Importabhängigkeit von Helium aus den USA

- auf Helium aus Katar und Australien auszuweichen
- Joint-Ventures mit Russland im Heliumbereich aufzubauen
- strategische Heliumvorräte anzulegen
- mit Heliumrecycling zu beginnen sowie
- Helium als Nebenprodukt aus inländischen Erdgasverflüssigungswerken zu gewinnen.

Erwähnenswert ist, dass im Mai 2016 der viertgrößte chinesische Stahlkonzern, Wuhan Iron and Steel (WISCO), ankündigte, nach zwei bereits existierenden Luftzerlegungsanlagen mit Hilfe der Linde AG in Zentralchina eine weitere Anlage errichten zu wollen. Dort sollen dann jährlich rund 230.000 m<sup>3</sup> Neon und auch Helium produziert bzw. aufbereitet werden.

Auch das US-Unternehmen Air Products & Chemicals, Inc. nahm im April 2017 in Chongqing City eine neue Luftzerlegungsanlage in Betrieb, die einen dort ansässigen Halbleiterproduzenten mit Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Argon und Helium versorgt.

Die chinesischen Importe von Helium lagen im Jahr 2017 bei 3.629 t (entsprechend 20,3 Mio. m<sup>3</sup>) und stammten zu 51,3 % aus Katar, 36,4 % aus den USA und 11,2 % aus Australien.

### Argon

Nach SURESH et al. (2016) gab es Anfang 2016 in China mindestens 181 Luftzerlegungsanlagen, in denen neben Sauerstoff und Stickstoff auch Argon produziert wurde. Im Jahr 2015 lag bei einer Produktion von 1,771 Mrd. m<sup>3</sup> der Verbrauch bei rund 1,745 Mrd. m<sup>3</sup> Argon. 1,7 Mio. m<sup>3</sup> Argon wurden im Jahr 2015 importiert und 28,4 Mio. m<sup>3</sup> exportiert.

Das deutsche Unternehmen Messer ist in China seit 1994 vertreten und gehört dort zu den Pionieren unter den internationalen Gaseanbietern. Bislang wurden 17 operative Gesellschaften in drei Kernregionen gegründet, die eine führende Stellung in Hunan, Yunnan und Sichuan sowie in Jiangsu, Zhejiang und Guangdong einnehmen. Messer China hat landesweit in mehr als 30 Luftzerlegungsanlagen investiert, um Stahlwerke und andere Industriebereiche mit den erforderlichen Industriegasen Sauerstoff, Stickstoff und Argon zu versorgen. Alle Luftzerlegungsanlagen von Messer in China sind mit Argon-Kolonnen ausgerüstet.

Die Linde-Gruppe betrieb Ende 2015 in China 25 Luftzerlegungsanlagen, davon 13 mit Argon-Kolonnen, und hat angekündigt, sechs weitere große Anlagen für die Shenhua Ningxia Coal Industry Group Co. Ltd. sowie die Shenhua Logistics Group Co. Ltd. in Yinchuan in der Autonomen Region Ningxia Hui im Nordwesten Chinas zu bauen. Diese neuen Anlagen werden zusammen eine Kapazität von über 10.000 t O<sub>2</sub>/d, 6.000 t N<sub>2</sub>/d und 700 t Ar/d besitzen.

### Neon, Krypton, Xenon

Nach eigenen Aussagen war der viertgrößte Stahlkonzern Chinas, Wuhan Iron and Steel (WISCO), im Jahr 2015 mit 70 % Marktanteil der größte Produzent von Edelgasen in China. WISCO verfügt über drei Luftzerlegungsanlagen mit einer Gesamtluftzerlegekapazität von 450.000 m<sup>3</sup>/h und gewinnt aus Luft Argon, Neon, Helium, Krypton und Xenon.

Der chinesische Polyurethan-Hersteller Ningbo Wanhua Polyurethane betreibt derzeit zwei Luftzerlegungsanlagen, die von Linde Gas Ningbo errichtet wurden. Die im Jahr 2010 in Betrieb genommenen Anlagen besitzen eine Tageskapazität von 800 t flüssigem O<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> und produzieren zudem Krypton und Xenon für den freien Markt.

Die Shougang-Gruppe ist ebenfalls einer von Chinas größten Stahlkonzernen. Die gruppeneigene Ingenieurgesellschaft errichtete bereits 1998 eine erste Luftzerlegungsanlage mit einer Sauerstoffkapazität von 30.000 m<sup>3</sup>/h, in der zusätzlich auch N<sub>2</sub>, Ar, Kr, Xe und He erzeugt werden. Im Jahr 2005 kam eine zweite ähnliche Anlage mit einer Sauerstoffkapazität von 35.000 m<sup>3</sup>/h (inkl. N<sub>2</sub>, Ar, Roh-Kr/Xe und He) und im Jahr 2009 eine dritte ähnliche Anlage in Jingtang mit Sauerstoffkapazitäten von 2 x 75.000 m<sup>3</sup>/h (inkl. N<sub>2</sub>, Ar, Roh-Kr/Xe und He) hinzu.

Im März 2012 teilte das deutsche Gasunternehmen Messer mit, dass sein chinesisches Tochterunternehmen Hunan Xianggang Messer mit einem chinesischen Unternehmen eine Partnerschaft zum Aufbau einer Krypton-Xenon-Anlage in Xiangtan, Hunan Provinz, unterzeichnet habe. Die neue Anlage könne täglich

neben 24 t flüssigem Sauerstoff 9,4 kg eines Gasgemisches (= „dicke Suppe“) aus 90 % Kr und 10 % Xe erzeugen.

Im Juni 2015 folgte durch Messer die Eröffnung einer Aufreinigungsanlage für Krypton und Xenon in Panzhihua, Sichuan Provinz. Diese Anlage besitzt eine Kapazität von 5 Mio. l Krypton und 450.000 l Xenon bei Reinheiten von 99,999 %.

Weitere Aufreinigungsanlagen für Rohkrypton/Rohxenon zu Reingasen errichtete der russische Gasspezialist PJSC "Cryogenmash" im Jahr 2011 für die Jinan Iron and Steel Works, mittlerweile aufgegangen in der Shandong Iron and Steel Group Co Ltd. (Tageskapazität 960 l Xe und 10.800 l Kr) in Jinan sowie ein Jahr später auch in Handan.



**Abb. 48:** Die Aufreinigungsanlage für Krypton und Xenon in Panzhihua, Sichuan Provinz, der Hunan Xianggang Messer, Foto: Messer Group GmbH (mit frdl. Genehmigung).

## Literatur

DONGXIANG-TIANJINDONGXIANGSPECIALGASCo.,LTD.(2014):HeliumglobalmarketandheliumsecurityinChina (in chinesisches); Tianjin – URL: [www.dongxianggas.com/news\\_detail/id/1415.html](http://www.dongxianggas.com/news_detail/id/1415.html) [Stand 08.10.2018].

GUBLER, R., SURESH, B., HE, H. & YAMAGUCHI, Y. (2016): Helium. – IHS Chemical Economics Handbook: 72 S., zahlr. Abb. u. Tab.; London (IHS Markit).

JIAN,Z.,WEI,Y.,HAIYONG,Y.,WUREN,X.,ZENGYE,X.FUYING,Z.&YONGJING,C.(2015):Feasibilityofhigh-helium natural gas exploration in the Presinian strata, Sichuan Basin. – Natural Gas Industry B, **2**, 1: 88 – 94: 6 Abb., 1 Tab.; Amsterdam – URL: [https://ac.els-cdn.com/S235285401500008X/1-s2.0-S235285401500008X-main.pdf?\\_tid=5157a0b0-b7e7-11e7-9aad-00000aab0f6c&acdnat=1508759159\\_3c0e2f2996584bf-f2343a49e7fb0028f](https://ac.els-cdn.com/S235285401500008X/1-s2.0-S235285401500008X-main.pdf?_tid=5157a0b0-b7e7-11e7-9aad-00000aab0f6c&acdnat=1508759159_3c0e2f2996584bf-f2343a49e7fb0028f) [Stand 08.10.2018].

YONGCHANG, X., WENHUI, L., PING, S. & MINGXIN, T. (1996): Geochemistry of noble gases in natural gases. – 275 S., zahlr. Abb. u. Tab.; Beijing (Science Press).

## Deutschland



### Helium

Die Heliumgehalte der deutschen Erdgasfelder, aber auch der Steinkohlenzechen und Thermalquellen wurden seit Ende der 1930er Jahre immer wieder untersucht und auf ihre Eignung zur industriellen Gewinnung von Helium bewertet. Eine Heliumproduktion erfolgte bisher jedoch nur in der ehemaligen DDR seit Anfang der 1970er Jahre.

MAYER-GÜRR (1938) führte Heliumgehalte von zahlreichen Erdgasbohrungen, Grubenwettern (aus Steinkohlenschächten) und Quellgasen (aus Thermalquellen) aus ganz Deutschland auf. Bei meist sehr geringer, und damit unwirtschaftlicher Schüttung, fanden sich die damals bekannten höchsten Heliumgehalte in Erdgasbohrungen bei Mühlhausen (Thüringer Becken, bis 0,16 % He), Steinkohlenschächten der ehemaligen Zeche Ewald (Herten/Nordrhein-Westfalen, Förderung 1877 – 2000, bis 0,23 % He) sowie in Thermalwässern des ehemaligen Schwefelbads Künzing (Ldkr. Passau, Bayern, 0,26 % He), der Maxquelle in Bad Dürkheim (1,5 – 2 % He), der Mineralquelle(n) Baden-Baden (0,85 % He), der Mineralquelle(n) Wiesbaden (1,7 – 4,9 % Edelgase gesamt), der ehemaligen Thermalquelle Heidelberg (1957 versendet, 0,65 % He) sowie der Thermalquellen von Bad Wildbad im Schwarzwald (0,71 % He).

Neben 0,71 % Helium sollen die Thermalquellen von Bad Wildbad sogar 1,56 % Argon führen. Hierbei wurde zumindest der Heliumgehalt des Thermalwassers von Wildbad schon kurz nach Entdeckung dieses Elements bestimmt. Die dortigen Thermalwässer stammen aus einem Granit in 2.500 – 3.000 m Tiefe und besitzen ein Alter von 7.500 – 12.000 Jahren. Aktuelle Analysen zur Edelgasführung der dortigen Quellen liegen, wie in fast allen deutschen Bädern aufgrund der hohen Analysekosten, nicht vor.

In Bad Dürkheim, Rheinland-Pfalz, musste die bereits 1859 erbohrte alte „Maxquelle“ 1970/71 durch die „Neubohrung Maxquelle“ an anderer Stelle ersetzt werden. Diese 351 m tiefe Bohrung erschließt im Wesentlichen NaCl-haltiges Tiefenwasser, dessen Ursprung in den tief abgesunkenen tertiären Salzablagerungen des Oberrheingrabens zu suchen ist. In den letzten 30 Jahren wurden jedoch keine Analysen von Edelgasen mehr durchgeführt (pers. Mitteilung Stadtwerke Bad Dürkheim GmbH).

Die zahlreichen in Baden Baden genutzten Thermalwasser sind vermutlich jungen Ursprungs und stellen Niederschlagswasser dar, die durch den Buntsandstein und durch Klüfte in größere Tiefen eindringen, dort erwärmt werden und an Störungen wieder aufsteigen. Zudem wird hochmineralisiertes Wasser aus Poren und Klüften des tieferen Untergrunds aufgenommen. Nach ROGERS (1921) enthalten die Gase der Thermalwasserstollen von Baden Baden allerdings maximal nur 0,015 % He. In den letzten Jahren wurde in Baden-Baden keine große Heilwasseranalyse mehr durchgeführt, in der auch Edelgase analysiert wurden (pers. Mitteilung Carasana Bäderbetriebe GmbH).

Die Thermalwasser von Wiesbaden sind ebenfalls Niederschlagswasser, die auf Spaltensystemen in große Tiefen eindringen konnten und unter Mitwirkung von alten Vulkanherden sowohl erwärmt als auch mit Gasen angereichert wurden. Nach KÄSS & KÄSS (2008) führen von den fünf genutzten Thermalquellen Wiesbadens die Schützenhofquelle mit 0,9 % Ar und 0,4 % He, gefolgt von der Salmquelle mit 0,6 % Ar und 0,2 % He, dem Kochbrunnen mit 0,7 % Ar und 0,09 % He sowie der Großen Adlerquelle mit 0,4 % Ar und 0,08 % He die höchsten Edelgaswerte (alle Daten aus 1996). Die letzten großen Heilwasseranalysen stammen aus den Jahren 2009 bzw. 2016 und erbrachten für die Schützenhofquelle 0,8 % Ar und 0,35 % He (2009), für den Kochbrunnen 1,0 % Ar und 0,09 % He (2016) sowie für die Große Adlerquelle 0,3 % Ar und 0,08 % He (2009) bzw. 0,4 % Ar und 0,06 % He (2016) (pers. Mitteilung mattiaqua Wiesbaden).

In einer Publikation von BENZEL (1975) wurden Daten zu Heliumgehalten aus 126 Erkundungsbohrungen auf Kohlenwasserstoffe in Nordwestdeutschland aufgeführt. 71 Analysen zeigten Werte von 0,01 – 0,04 % He, 46 Analysen ergaben Werte von 0,05 – 0,09 % He und 42 Analysen von 0,10 – 0,58 % He. Aufgrund

der zu geringen Datenmenge war es dem Autor nicht möglich, regionale und geologische Zusammenhänge der He-Verteilung in Nordwestdeutschland aufzuzeigen oder He-Gehalte auch nur einzelnen geologischen Strukturen zuzuweisen.

Mit die höchsten He-Werte (0,42 – 0,53 % He) fanden sich in Bohrungen des im Jahr 1972 entdeckten Erdgasfeldes Alfeld-Elze/Hildesheimer-Wald südlich Hannover. Dieses wurde in den 1990er Jahren aufgegeben und zurückgebaut, im Jahr 2015 aber erneut in Betrieb genommen. Im Jahr 2016 betrug die dortige Förderung 29,8 Mio. m<sup>3</sup> Erdgas.

SCHMIDT (1977) bezifferte die damaligen Heliumressourcen im Erdgasfeld Salzwedel/Peckensen (Förderung seit 1969) der westlichen Altmark bei Gehalten von 0,18 – 0,24 % He auf 350 Mio. m<sup>3</sup>. Diese Ressource verringerte sich durch jährliche Förderung von rund 8 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas um jährlich 16 Mio. m<sup>3</sup> Helium.

Die Erdgaslagerstätten Thüringens enthielten zwischen 0,08 und 0,17 % He bei Heliumressourcen von damals ca. 6 Mio. m<sup>3</sup>. Erhöhte Konzentrationen von Helium wurden in den Erdgasfeldern Fahner Höhe und Langensalza mit 0,8 % He bzw. 0,6 % He festgestellt. Die Heliumressourcen dieser beiden, wirtschaftlich jedoch nicht abbaubaren Felder, lagen bei zusammen rund 2 Mio. m<sup>3</sup>.

Die 1964 entdeckte und 1992 abgeworfene Erdgaslagerstätte Rüdersdorf östlich Berlin führte 0,3 % He (sowie 93 % N<sub>2</sub>, aber nur 6 % CH<sub>4</sub>) und enthielt ursprüngliche gewinnbare Ressourcen von 1,5 – 2,0 Mio. m<sup>3</sup> Helium. Aufbauend auf dieser Erdgasführung nahm Anfang der 1970er Jahre der VEB



**Abb. 49:** Die Luftzerlegungsanlage in Leuna produziert neben Sauerstoff, Stickstoff und Argon auch Rohneon, Rohkrypton/Rohxenon sowie Helium, Foto: Linde AG (mit frdl. Genehmigung).



Technische Gase Leipzig eine Heliumanlage in Betrieb, die jährlich rund 50.000 m<sup>3</sup> Helium produzierte. Nach SCHMIDT (1977) war eine Erweiterung auf 100.000 m<sup>3</sup> Helium/a angedacht. Diese erhöhte Produktion sollte den steigenden inländischen Heliumbedarf der DDR bis nach 1980 decken. Bis wann diese Heliumanlage letztendlich produzierte ist nicht bekannt.

Seit 1959 wird in einer Luftzerlegungsanlage in Leuna neben Sauerstoff und Stickstoff (Hauptprodukte) auch Argon produziert. Zum 1.3.1991 übernahm die Linde AG diesen Standort, an dem nun mittlerweile zwei Luftzerlegungsanlagen mit einer täglichen Zerlegekapazität von rund 7.000 t Luft neben Argon auch Rohneon (seit 2008/2009), Rohxenon/Rohkrypton (seit 2010/2011) und Helium (seit 2014) produzieren.

Seit Juli 2016 nutzt die Air Liquide Helium Services S.A., eine Tochterfirma der französischen Air Liquide S.A, zur Heliumspeicherung eine Salzkaverne im Solfeld Epe zwischen Gronau-Epe und Ahaus-Graes im westlichen Münsterland. Die genutzte Kaverne S72 entstand durch Aussolung in den Jahren 2004 – 2011, liegt in einer Teufe von 1.181 – 1.376 m und besitzt ein Volumen von 281.000 m<sup>3</sup>. Sie kann bis zu 47 Mio. m<sup>3</sup> Helium, entsprechend dem ungefähren Jahresbedarf von Air Liquide in Europa, aufnehmen. Das flüssige Helium wird dazu mit Tankwagen angeliefert, zu Gas verdampft und dann unter Druck in die Kaverne eingeleitet, wo es die dort befindliche Sole sukzessive verdrängt. Erwähnenswert ist, dass das Betriebsplanverfahren zur Einspeicherung des Heliums in Gronau-Epe in nur neun Monaten abgeschlossen werden konnte (LÜBBERS et al. 2018).

### Neon

Seit der Jahreswende 2008/2009 wird Rohneon in den beiden Luftzerlegungsanlagen der Linde AG in Leuna produziert. An diesem Standort befindet sich auch eine der wenigen weltweiten und die einzige europäische Aufreinigungsanlage für Neon. Es soll sich dabei um die größte Aufreinigungsanlage für Reinneon weltweit handeln (ANONYM, pers. Mitteilung). Weder die Höhe der Rohneon-, noch der Reinneonproduktion am Standort Leuna sind jedoch publiziert. SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) gehen bei voller Auslastung der von ihnen angenommenen Kapazität von einer Jahresproduktion von 36 Mio. l Rohneon bzw. von einer Kapazität von 120 Mio. l Reinneon aus. Für das Jahr 2017 wird eine Produktion von ca. 40 Mio. l Rohneon mit einem Inhalt von ca. 20 Mio. l Neon angenommen (ANONYM, pers. Mitteilung).

### Argon

Basierend auf SURESH et al. (2016) und freundlicherweise korrigiert von den deutschen Marktteilnehmern sind in Deutschland durch 13 Unternehmen an insgesamt 49 Standorten 67 Luftzerlegungsanlagen (LZA) in Betrieb, von denen 46 LZA an folgenden 36 Standorten mit Argon-Kolonnen ausgerüstet sind (vgl. Abb. 50):

- Standort Duisburg-Hüttenheim: zwei LZA der Air Liquide Deutschland GmbH
- Standort Dortmund-Hörde: zwei LZA der Air Liquide Deutschland GmbH, Argonkapazität 40 t/d
- Standort Frankfurt a.M.: LZA der Air Liquide Deutschland GmbH
- Standort Gelsenkirchen: LZA der Air Liquide Deutschland GmbH, Inbetriebnahme 2001
- Standort Kornwestheim: LZA der Air Liquide Deutschland GmbH
- Standort Oberhausen-Biefang: zwei LZA der Air Liquide Deutschland GmbH, Inbetriebnahme der 2. Anlage 2013, Argonkapazität 180 t/d
- Standort Stade: LZA der Air Liquide Deutschland GmbH
- Standort Hattingen: LZA der Air Products GmbH
- Standort Wilhelmshaven: LZA der Air Products GmbH
- Standort Bremen: zwei LZA der Linde AG (Stahlproduktion durch ArcelorMittal)
- Standort Buna/Schkopau: zwei LZA der Linde AG

- Standort Duisburg-Ruhrort: fünf LZA der Linde AG, davon drei mit Argon-Kolonnen, Inbetriebnahme 2012 (Stahlproduktion durch ThyssenKrupp)
- Standort Eisenhüttenstadt: drei LZA der Linde AG, davon zwei mit Argon-Kolonnen, Inbetriebnahme 2017 (Stahlproduktion durch ArcelorMittal)
- Standort Gablingen: LZA der Linde AG
- Standort Hamburg-Finkenwerder: LZA der Linde AG
- Standort Herne: LZA der Linde AG
- Standort Leuna: zwei LZA der Linde AG, Beginn der Argonproduktion 1959, seit 1989 Herstellung von Reinargon @ 99,999 % Ar
- Standort Marl: LZA der Linde AG
- Standort Salzgitter: zwei LZA der Linde AG, davon eine mit Argon-Kolonne, auch Herstellung von Reinargon @ 99,9999 % Ar (Stahlveredelung durch die Salzgitter Flachstahl GmbH)
- Standort Stolberg: zwei LZA der Linde AG, davon eine mit Argon-Kolonne
- Standort Worms: LZA der Linde AG
- Standort Salzgitter: LZA der Messer Industriegase GmbH (Stahlproduktion durch die Salzgitter AG)
- Standort Siegen: LZA der Messer Industriegase GmbH, Inbetriebnahme 2009, Argonkapazität 12 t/d (Stahlproduktion durch die Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH & Co. KG)
- Standort Biebesheim (Rhein): LZA der Praxair Deutschland GmbH
- Standort Völklingen-Dillingen: drei LZA der Praxair Deutschland GmbH, davon zwei mit Argon-Kolonnen
- Standort Dormagen: LZA der Praxair Deutschland GmbH
- Standort Hürth: zwei LZA (davon eine in Standby) der Praxair Deutschland GmbH, Argonkapazität 70 t/d
- Standort Hörstel: LZA der Westfalen AG, Inbetriebnahme 1993
- Standort Laichingen: LZA der Westfalen AG, Inbetriebnahme 2001
- Standort Trostberg: LZA der AlzChem AG (Metallverarbeitung)
- Standort Ludwigshafen: drei LZA der BASF SE, davon zwei mit Argon-Kolonnen
- Standort Frankfurt-Höchst: LZA der Infracore GmbH & Co. Höchst KG (Chemiepark Höchst)
- Standort Wetzlar: LZA der Buderus Edelstahl GmbH
- Standort Friedrichshafen: LZA der Sauerstoffwerk Friedrichshafen GmbH, Herstellung von Reinargon @ 99,9999 % Ar
- Standort Dettelbach: LZA der Sauerstoffwerke Friedrich Gutfrohn GmbH, Inbetriebnahme 2006
- Standort Brunsbüttel: LZA der Yara Brunsbüttel GmbH (Ammoniak-Synthese)

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes wurden im Jahr 2017 in Deutschland durch zehn Unternehmen 243,0 Mio. m<sup>3</sup> Argon produziert, das einen Wert von 98,3 Mio. € besaß (= 40,4 Cent/m<sup>3</sup>), vgl. Tab. 26. Eine Recherche bei den in Deutschland produzierenden Gaseunternehmen im Rahmen dieser Studie ergab dagegen 13 Unternehmen, die im Jahr 2017 zusammen 233,1 Mio. m<sup>3</sup> Argon produzierten.

**Tabelle 26: Produktion von Argon in Deutschland, nach Statistisches Bundesamt (Fachserie 4, Reihe 3.1).**

Jahr	Produktion (Mio. m <sup>3</sup> )	Wert (Mio. €)	Wert (€/m <sup>3</sup> )
2009	186,7	75,6	0,41
2010	219,1	100,9	0,46
2011	224,1	91,6	0,41
2012	228,1	86,8	0,38
2013	222,8	90,7	0,41
2014	226,0	95,0	0,42
2015	224,7	91,8	0,41
2016	240,7	95,9	0,40
2017	243,0	98,3	0,40



**Abb. 50: Übersichtskarte von Standorten von Luftzerlegungsanlagen (LZA) mit Argonproduktion in Deutschland. An einzelnen Standorten können mehrere LZA verschiedener Unternehmen in Produktion sein.**

## Krypton, Xenon

Soweit bekannt, werden in Deutschland an folgenden Standorten Krypton und Xenon in roher bzw. reiner Form produziert:

- Standort Ludwigshafen: zwei von drei Luftzerlegungsanlagen (LZA) der BASF SE, Produktion von hochangereichertem Rohkrypton/Rohxenon
- Standort Gelsenkirchen, LZA der Air Liquide Deutschland GmbH, Produktion von vorangereichertem Rohkrypton/Rohxenon
- Standort Duisburg-Hüttenheim: zwei LZA der Air Liquide Deutschland GmbH, Produktion von vorangereichertem Rohkrypton/Rohxenon
- Standort Oberhausen: zwei LZA der Air Liquide Deutschland GmbH, Produktion von vorangereichertem und hochangereichertem Rohkrypton/Rohxenon
- Standort Krefeld-Gellep: Werk der Air Liquide Deutschland GmbH, Aufreinigung von hochangereichertem Rohkrypton/Rohxenon aus dem Werk Oberhausen zu Reinkrypton und Reinxenon
- Standort Duisburg-Ruhrort: fünf LZA der Linde AG, in zwei LZA Produktion von vorangereichertem Rohkrypton/Rohxenon in einer LZA von hochangereichertem Rohkrypton/Rohxenon sowie teilaufgereinigtem Rohkrypton/Rohxenon
- Standort Leuna: zwei LZA der Linde AG, Produktion von hochangereichertem Rohkrypton/Rohxenon
- Standort Marl: LZA der Linde AG, Produktion von vorangereichertem Rohkrypton/Rohxenon
- Standort Bremen: eine von zwei LZA der Linde AG, Produktion von vorangereichertem Rohkrypton/Rohxenon
- Standort Eisenhüttenstadt: zwei LZA der Linde AG, Produktion von vorangereichertem Rohkrypton/Rohxenon
- Standort Salzgitter: zwei LZA der Linde AG, Produktion von vorangereichertem Rohkrypton/Rohxenon
- Standort Brunsbüttel: LZA der Yara Brunsbüttel GmbH, Produktion von vorangereichertem Rohkrypton/Rohxenon
- Standort Hürth: LZA der Praxair Deutschland GmbH, Produktion von teilangereichertem Rohkrypton/Rohxenon
- Standort Dormagen: LZA der Praxair Deutschland GmbH, Produktion von teilangereichertem Rohkrypton/Rohxenon
- Standort Unterschleißheim: Werk der Linde AG (s. Abb. 51), Aufreinigung von vor- bzw. teilangereichertem Rohkrypton/Rohxenon aus den LZA Salzgitter (Linde), Marl (Linde), Duisburg-Ruhrort (Linde), Bremen (Linde), Eisenhüttenstadt (Linde), Hürth (Praxair), Dormagen (Praxair) und Brunsbüttel (Yara) sowie hochangereichertem Rohkrypton/Rohxenon aus den LZA Leuna (Linde) und Duisburg-Ruhrort (Linde) zu Reinkrypton und Reinxenon.



**Abb. 51: Übersichtskarte von Standorten von Luftzerlegungsanlagen (LZA) mit Produktion von Rohkrypton und Rohxenon in Deutschland. An einzelnen Standorten können mehrere LZA verschiedener Unternehmen in Produktion sein.**



**Abb. 52: Blick auf einen Teil der Aufreinigungsanlage für Rohkrypton und Rohxenon im Werk Unterschleißheim der Linde AG, Foto: BGR.**

## Literatur

BENZEL, M. (1975): Helium-Anteil in Erdgasproben Nordwest-Deutschlands. – Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Archivbericht, **74933**: 28 S., 4 Tab., 5 Anl.; Hannover (unveröffentlicht).

Käss, W. & Käss, H. (2008): Deutsches Bäderbuch. Zweite Aufl.: 1232 S., zahlr. Abb. u. Tab., 1 Karte; Stuttgart.

LÜBBERS, B., REHMER, K.-P. & HAQ, A. A. (2018): Errichtung des weltweit ersten Helium-Kavernenspeichers in Deutschland. – Erdgas, Erdöl, Kohle, **134**, 4: 166 – 168, 1 Abb., 1 Tab.; Hamburg.

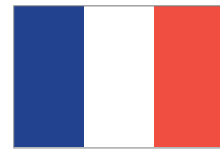
MAYER-GÜRR, A. (1938): Bericht über die Untersuchung deutscher Erdgase auf Helium und die Möglichkeit der Erschließung von Heliumlagerstätten in Deutschland. – Geologische Landesanstalt: 5 S., 1 Anl.; Berlin (unveröffentlicht) (BGR-Archivbericht 2011456).

ROGERS, G. S. (1921): Helium-bearing natural gas. – U.S. Professional Paper, **121**: 113 S., 16 Abb., zahlr. Tab., 4 Taf.; Washington D.C.

SCHMIDT, K. (1977): Zu Problemen der Gewinnung von Helium aus einheimischen Erdgas. – Vorlage des Zentralen Geologischen Instituts beim Ministerium für Geologie der DDR: 7 S.; Berlin (unveröffentlicht) (BGR-Archivbericht 4103683).

STAMMBERGER, F., BEWILOGUA, L., JUNGNICHEL, H., OTTO, W. & SCHÖN, H. (1970): Gutachten über die volkswirtschaftliche Bedeutung einer eigenen Helium-Produktion bei der Entwicklung der Erdgasförderung in der DDR. – 14 S., 1 Anl.; Berlin (unveröffentlicht) (BGR-Archivbericht 4103682).

## Frankreich



### Helium

Die Heliumgehalte der französischen Erdgase sind nicht publiziert und deshalb vermutlich ohne mögliche wirtschaftliche Bedeutung.

Im Gegensatz dazu wurde die Edelgasführung der meisten französischen Thermalwässer schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts analysiert und in verschiedenen Schriften publiziert. ROGERS (1921) gab eine Zusammenfassung, wonach in 55 Quellen Gehalte von bis zu 10,16 % He und bis zu 1,643 % Ar nachgewiesen wurden. Die höchsten Heliumgehalte bzw. Schüttungen der damaligen Zeit sind in Tab. 27 aufgeführt.

**Tab. 27: Edelgasgehalte und jährliche Heliumschüttung französischer Thermalwässer zu Beginn des 20. Jahrhunderts, nach ROGERS (1921).**

Quelle	Ort	Department	He-Gehalt %	Ar-Gehalt %	He-Schüttung l/a
Lithium	Santenay	Côte-d'Or	10,16	n.v.	5.182
Carnot	Santenay	Côte-d'Or	9,7	n.v.	17.845
Fontaine Salée	Santenay	Côte-d'Or	8,40	n.v.	n.v.
Romaine	Maizières	Côte-d'Or	5,92	0,92	1.080
Ys	Grisy	Saône-et-Loire	2,18	1,18	n.v.
Lymbe	Bourbon-Lancy	Saône-et-Loire	1,84	1,20	10.074
Reine	Bourbon-Lancy	Saône-et-Loire	1,75	1,15	n.v.
Parc Sainte-Marie	Nancy	Meurthe-et-Moselle	1,60	1,29	n.v.
César	Néris	Aller	0,97	0,88	33.990
Choussy	La Bourboule	Puy-de-Dôme	0,01	0,10	3.048

Nach den Minerals Yearbooks des U.S. Geological Survey wurde in einer Heliumanlage nahe Paris zwischen den Jahren 1973 und 1978 jährlich zwischen 0,2 und 0,4 Mio. m<sup>3</sup> Helium produziert. SEARS (2015) zitiert aus dieser Anlage eine Heliumproduktion von 0,2 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 1971. JONES & STACEY (1974) berichten über sogar zwei Heliumanlagen in Frankreich, die 1974 mit einer Gesamtkapazität von 420.000 m<sup>3</sup> Helium/a in Produktion gewesen sein sollen. Das Helium soll aus niederländischen Erdgas extrahiert worden sein. Nach YAKUTSENI (2014) gewinnt schon seit 1960 eine Heliumanlage in Frankreich Helium – Quelle soll wiederum das aus dem niederländischen Erdgasfeld Groningen importierte Erdgas sein.

Bestätigt werden kann eine von der damaligen Gaz de France betriebene Anlage zur Denitrifizierung von Erdgas aus Groningen, die Ende 1968 in der Gemeinde Alfortville bei Paris ihren Betrieb aufnahm. Eine angeschlossene Heliumanlage mit einer Kapazität von 0,2 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a ging später, vermutlich 1969, in Produktion. Das Gaswerk in Alfortville wurde in den 1980er Jahren stillgelegt, als die Versorgung mit russischem Gas zunahm. Welche Mengen und bis wann die Anlage Helium produzierte, ist nicht bekannt. Hauptabnehmer des Heliums war das französische Verteidigungsministerium. Das Erdgasfeld Groningen ging 1963 in Produktion und führt 0,037 – 0,055 % He, durchschnittlich 0,045 % He. Russisches Gas erreichte erstmals 1975 Frankreich.

Seit dem Jahr 1989 gewinnt das französische Industriegasunternehmen Air Liquide SA in seiner Luftzerlegungsanlage in Le Blanc-Mesnil bei Paris stündlich bis zu 18 m<sup>3</sup> eines Helium-Neon-Gemisches und bereitet es dort auch weiter auf. Von Le Blanc-Mesnil und Jebel Ali/VAE werden auch die weltweiten Heliumaktivitäten von Air Liquide SA gesteuert.

Die französischen Importe von Helium lagen im Jahr 2017 bei 13,97 Mio. m<sup>3</sup> und stammten zu 37,6 % aus Algerien, 2,7 % (2016 noch 26,2 %) aus Katar, 4,3 % aus Polen, 7,1 % aus den USA bzw. zu 48,3 % indirekt aus 14 anderen Ländern, darunter v. a. Deutschland (32,9 %).

### **Krypton, Xenon**

Im Jahr 1988 ging in der Luftzerlegungsanlage in Le Blanc-Mesnil bei Paris eine Produktionsanlage für stündlich bis zu 2 m<sup>3</sup> Rohkrypton/Rohxenon in Betrieb. Auch in der Air Liquide-Luftzerlegungsanlage in Moissy-Cramayel, südöstlich Paris, wird ein Rohkrypton-/Rohxenongemisch erzeugt.

### **Literatur**

JONES, J. K. & STACEY, J. M. (1974): The recovery and liquefaction of helium from natural gas in Poland. – *Cryogenics*, April 1974: 198 – 202, 3 Abb., 2 Tab.; Amsterdam (Elsevier).

SEARS, W. M. JR. (2015): Helium. The disappearing element. – *SpringerBriefs in Earth Sciences*: 138 S., 37 Abb.; Cham u.a.

YAKUTSENI, V. P. (2014): World helium resources and the perspectives of helium industry development. – *Neftegasovaâ geologiâ. Teoriâ i praktika*, **9**, **1**: 22 S., 5 Abb., 9 Tab.; St. Petersburg – URL: [http://www.ngtp.ru/rub/9/11\\_2014\\_eng.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/9/11_2014_eng.pdf) [Stand 08.10.2018].



## Indien



### Helium

Indien verfügt über keine Erdgasvorkommen mit relevanten Heliumgehalten, so dass dort bisher vor allem die Möglichkeit der Heliumextraktion aus Monazitsanden ( $1 \text{ m}^3 \text{ He je t Monazit}$ ) sowie die Gasführung von Thermalwässern näher untersucht wurden (DAS et al. 2005, CHAUDHURI et al. 2015).

In Indien sind rund 300 Thermalwasserquellen bekannt, die sich innerhalb von drei Gürteln aufreihen:

- 1) Ostindien: Bihar, Assam und Orissa
- 2) Westküste Indiens: Ratnagiri, Thane, Colaba und Surat
- 3) Himalaya-Gebirgskette: Jamunotri (Uttaranchal), Gangotri und Monikaran (Kullu Valley, Himachal Pradesh)

Zwei bekannte Gruppen von Thermalquellen bei Bakreswar (Westbengalen) und Tantloi (Jharkand) enthalten Gase mit erhöhten Gehalten an Edelgasen bei gleichzeitig aber nur schwacher Schüttung. Diese beiden Gruppen liegen 25 km voneinander entfernt und rund 250 km von Kalkutta. Die Gase der Thermalwasserquellen von Bakreswar führen durchschnittlich 92,20 %  $\text{N}_2$ , 1,40 % He (max. 1,88 % He), 2,07 % Ar, 0,90 %  $\text{O}_2$  und 3,43 %  $\text{CH}_4$ . Die Gase der Thermalwasserquellen von Tantloi sind sehr ähnlicher Zusammensetzung: 92,00 %  $\text{N}_2$ , 1,26 % He (in Bohrungen max. 2,77 % He), 2,40 % Ar, 1,14 %  $\text{O}_2$  und 3,20 %  $\text{CH}_4$ .

Andere Thermalwässer Indiens führen  $< 1,0 \%$  He. Zwar existieren Pilotanlagen zur Nutzung ihrer Gasführung, doch entstanden diese auf universitärer Ebene und sind nicht wirtschaftlich betreibbar. Ähnliches gilt für eine Pilotanlage am Standort Kuthalam nahe Mayiladuturai in Tamil Nadu, wo seit Anfang 2008 Erdgas mit einem Gehalt von 88,5 %  $\text{CH}_4$ , 9,86 % schweren Kohlenwasserstoffen, 1,18 %  $\text{N}_2$ , 0,4 %  $\text{CO}_2$  und 0,06 % He gesammelt und aufbereitet wird. Die Durchsatzkapazität dieser Kleinanlage liegt bei  $50 \text{ m}^3 \text{ Gas/h}$  und die Heliumproduktion @ 99,0 % He bei 18 l/h, entsprechend max. ca.  $100.000 \text{ m}^3 \text{ Helium/a}$ . Das Ausbringen liegt bei ca. 61 %.

Indien ist somit bisher fast vollständig auf Importe von Helium angewiesen. Diese lagen im Jahr 2017 bei 580 t (entsprechend ca.  $3,47 \text{ Mio. m}^3$ ) und stammten zu 88 % direkt oder indirekt aus Katar.

### Argon

In Indien sind zahlreiche Ammoniakanlagen mit Argonaufbereitungsanlagen ausgestattet, in den täglich zwischen 20 und 40 t Ar produziert werden können. SURESH et al. (2016) identifizierten zudem mindestens 21 Luftzerlegungsanlagen, die mit Argon-Kolonnen ausgerüstet sind.

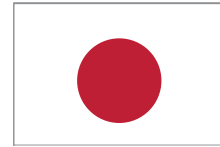
### Literatur

CHAUDHURI, H., SINHA, B. & CHANDRASEKHARAM, D. (2015): Helium from geothermal sources.- Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 15 – 25 April 2015: 14 S., 14 Abb., 6 Tab.; Melbourne.

DAS, N. K., BHANDARI, R. K. & MALLIK, S. C. (2012): Harnessing helium from the Earth's interior.- in: NUTTALL, W.J., CLARKE, R.H. & GLOWACKI, B.A. (Hrsg.): The future of helium as a natural resource: 101 – 118, 12 Abb., 5 Tab.; London – New York (Routledge).

DAS, N. K., BHANDARI, R. K. , SEN. P. & SINHA, B. (2005): The helium potential of India.- Current Science, **88**, 12: 1883 – 1888, 4 Abb., 5 Tab.; Bangalore – URL: <http://www.iisc.ernet.in/currsci/jun252005/1883.pdf>.

## Japan



### Helium

Japan produziert kein Helium und ist vollständig auf Importe dieses Edelgases angewiesen. Diese hatten im Jahr 2017 einen Umfang von 1.719 t (entsprechend ca. 10,3 Mio. m<sup>3</sup>) und stammten zu 75,3 % aus den USA und zu 24,7 % aus Katar. Zur Reduzierung seiner hohen Abhängigkeit von diesen beiden Ländern plant Japan strategische Lieferbeziehungen mit Russland aufzubauen und von dort langfristig Helium aus ostsibirischen Erdgaslagerstätten zu beziehen.

### Argon

Japan ist ein bedeutender Produzent und Verbraucher von Argon. Nach SURESH et al. (2016) waren mit Stand Februar 2016 an 59 Standorten Luftzerlegungsanlagen mit Argon-Kolonnen in Betrieb, die eine Gesamtkapazität von ca. 40.700 m<sup>3</sup> Ar/h, entsprechend 356 Mio. m<sup>3</sup> Ar/a besaßen. Im Jahr 2016 wurden in Japan mit steigender Tendenz 268 Mio. m<sup>3</sup> Argon produziert, davon 96 % in flüssiger Form ausgeliefert.

### Krypton, Xenon

Das japanische Unternehmen Air Water Inc. kündigte an, zusätzlich zu seiner Produktion von Rohxenon in der Luftzerlegungsanlage in Kashima ab April 2019 in seiner Luftzerlegungsanlage in Kakogawa ebenfalls Xenon und auch Krypton, wohl in aufgereinigter Form, produzieren zu wollen. Die Produktionskapazität in der Kakogawa-Anlage soll jährlich 1.103.600 l Xe, aber nur 88.909 l Kr betragen.



## Kanada



### Helium

Die Untersuchung des Heliumgehalts kanadischer Erdgasvorkommen reicht bis in die Jahre 1916 – 1918 zurück, als die britische Admiralität Interesse an kanadischem Helium für Luftschiffe zeigte. 1917 ging in Hamilton, Ontario, auf Basis der dortigen Blackheath-Erdgaslagerstätte @ 0,34 % He eine Heliumpilotanlage in Produktion. Diese konnte nach zahlreichen Rückschlägen Heliumgas @ 87 % He erzeugen. Da jedoch bald nicht mehr ausreichend Erdgas zur Verfügung stand, wurde die Anlage im Herbst 1918 stillgelegt und nach Calgary, Alberta, transportiert.

In Calgary griff man auf Erdgas aus dem Bow-Insel-Erdgasfeld zurück, das einen Heliumgehalt von 0,36 % aufwies. Nach einer Reihe von Rückschlägen begann dort die kommerzielle Heliumproduktion im Herbst 1919 und dauerte bis 17. April des folgenden Jahres an. In diesem kurzen Zeitraum wurden knapp 1.700 m<sup>3</sup> Helium in einer Reinheit von 60 – 90 % produziert. Als nach dem Ende des 1. Weltkriegs wieder ausreichend Helium aus den USA zur Verfügung stand und der Bedarf drastisch sank, wurde die Anlage erneut stillgelegt.

Im Oktober 1958 wurde bei Aikens im südwestlichen Saskatchewan, ca. 14,5 km nördlich der Kleinstadt Swift Current, eine Erkundungsbohrung niedergebracht, die in rund 2.000 m Teufe ein Erdgasvorkommen mit einer Zusammensetzung von 96,57 % N<sub>2</sub>, 1,90 % He, 0,99 % CO<sub>2</sub>, 0,23 % Ar und 0,31 % sonstigen Gasen antraf. Die initiale Erdgastestförderung erreichte bis zu 140.000 m<sup>3</sup>/d.

Im Februar 1960 wurde in einer anderen Bohrung, rund 150 km südöstlich von Swift Current bei Wood Mountain (heute Mankota), ein zweites ähnliches Erdgasvorkommen mit einer Zusammensetzung von 96,35 % N<sub>2</sub>, 1,08 % He, 0,29 % Ar und 2,28 % CH<sub>4</sub> gefunden. Die Erdgastestförderung lag zwischen 460.000 und 570.000 m<sup>3</sup>/d. Eine im Dezember 1960 auf das gleiche Vorkommen angesetzte Bohrung erbrachte Erdgas mit einer Zusammensetzung von 94,40 % N<sub>2</sub>, 1,38 % He, 2,87 % CH<sub>4</sub> und 1,20 % H<sub>2</sub>. Die Heliumressourcen der beiden Erdgasvorkommen von Aikens und Wood Mountain wurden damals vom zuständigen geologischen Dienst von Saskatchewan auf 25 – 50 Mio. m<sup>3</sup> geschätzt (LEE 1962).

Im Dezember 1963 ging nördlich von Swift Current auf der Basis von vier fördernden Bohrungen eine Aufbereitungsanlage in Produktion, die nach einer Publikation der kanadischen Wissenschaftlerin M. M. Yurkowski (YURKOWSKI 2016b) bis zu ihrer Stilllegung im Jahr 1977 57,2 Mio. m<sup>3</sup> Erdgas produzierte, von dem geschätzt ca. 1,4 % Helium (entsprechend ca. 800.000 m<sup>3</sup> Helium) war. Erwähnenswert ist, dass wenige Monate zuvor die gleiche Wissenschaftlerin (YURKOWSKI 2016a) auf einer Tagung noch einen Betriebszeitraum von 1964 – 1975 und eine genaue Produktionshöhe von „464,181 mscf“ (entsprechend 12,875 Mio. m<sup>3</sup>) Helium genannt hatte. Nach den Minerals Yearbooks des U.S. Geological Survey lag die Heliumproduktion der kanadischen Anlage im Zeitraum 1963 – 1977 bei rund 10,5 Mio. m<sup>3</sup> Helium.

Die Kapazität der damaligen Anlage der Firma Canada Helium Ltd. (Gesellschafter: British American Oil, British Oxygen und Canadian Liquid Air) lag anfangs bei 330.000 m<sup>3</sup> Helium/a und wurde 1967 auf 1 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a erhöht. Die Anlage wurde 1977 stillgelegt, als der Förderdruck der Lagerstätte nachließ und Wasser eindrang. Im Juni 2014 begann die Firma Canada Helium Inc. bzw. Quantum Helium Management Corp. am Standort Wilhelm erneut mit der Erdgasproduktion aus dem wieder aufgeschlossenen Vorkommen nördlich Swift Current. Die bisher produzierte Menge an Helium ist nicht publiziert.

Im Januar 2016 startete die Firma North America Helium Inc. mit der Erkundung eines möglichen weiteren Heliumvorkommens im Südwesten Saskatchewan an der Provinzgrenze zu Alberta. Auch die Firmen Royal Helium Corporation, Jasper Mining Corporation, Navis Resources Corporation und Thor Resources untersuchen potenzielle Heliumvorkommen in Kanada (FORBES 2017, GRYNIA & GRIFFIN 2016).

Wenige Monate später, im August 2016, eröffnete das US-amerikanische Unternehmen Weil Group Resources, LLC eine zweite Heliumanlage in Saskatchewan. Diese Anlage in Mankota nutzt Erdgas aus dem 1960 entdeckten dortigen Vorkommen und besitzt eine Kapazität von > 1,1 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a, das aus rund 100 Mio. m<sup>3</sup> Erdgas/a abgetrennt werden soll. Das dort produzierte Helium mit einer Reinheit von 99,99 % wird von der Linde Gruppe vermarktet, die auch die Anlage konstruierte. Im November 2017 kündigte Weil Resources zudem an, in der Stadt Medicine Hat, Alberta, eine Heliumverflüssigungsanlage namens CryoHub™ errichten zu wollen, was auf einen positiven Produktionsstart hindeutet. Mit dem dort produzierten flüssigen Helium soll zudem vermutlich der inländische Markt versorgt werden.

Die Produktionsmengen der seit dem Jahr 2014 in Kanada neu eröffneten beiden Heliumanlagen sind nicht publiziert, jedoch sind die weltweiten Gesamtimporte (praktisch ausschließlich der USA) von Helium aus Kanada nach Global Trade Atlas in Tab. 28 aufgeführt. Im Vergleich dazu liegt der inländische Bedarf bei jährlich zwischen ca. 2.500 und 3.500 t flüssigem Helium (entsprechend ca. 15 – 21 Mio. m<sup>3</sup> gasförmigem Helium).

**Tab. 28: Gesamtmenge der weltweiten Importe von Helium aus Kanada, leicht verändert nach Global Trade Atlas (in Mio. m<sup>3</sup>).**

	2014	2015	2016	2017
Mio. m <sup>3</sup>	0,09	1,11	2,22	2,36

## Argon

Nach SURESH et al. (2016) lagen die Argonproduktionskapazitäten Kanadas im Februar 2016 bei ca. 2.950 t/d. An 23 Standorten mit teils mehreren Luftzerlegungsanlagen waren Argon-Kolonnen in Betrieb.

## Krypton, Xenon

Nach BETZENDAHL & SPIRITUS (2018) werden in den Luftzerlegungsanlagen von Praxair Canada Inc. am Standort Sault Ste. Marie in Ontario, die eine Gesamtkapazität von 2.700 t O<sub>2</sub>/d besitzen, auch Rohkrypton/Rohxenon gewonnen.

## Literatur

FORBES, W. (2017): Helium – macro view. – Report by Edison Investment Research for North American Helium: 17 S., 13 Abb.; London.

GRYNIA, E. & GRIFFIN, P. J. (2016): Helium in natural gas – occurrence and production.- Journal of Natural Gas Engineering, 1, 2: 163 – 215, 24 Abb., 7 Tab.; Beverly, MA – URL: [https://www.gasliquids.com/pdfs/2016\\_HeliumInNaturalGas.pdf](https://www.gasliquids.com/pdfs/2016_HeliumInNaturalGas.pdf) [Stand 08.10.2018].

LEE, H. (1962): The technical and economic aspects of helium production in Saskatchewan, Canada. – Department of Mineral Resources, Report, 72: 36 S., 5 Abb., 8 Tab.; Regina, SK – URL: [http://publications.gov.sk.ca/documents/310/39041-Report-72\\_Technical\\_and\\_Economic\\_Aspects\\_of\\_Helium\\_Production\\_in\\_Saskatchewan.pdf](http://publications.gov.sk.ca/documents/310/39041-Report-72_Technical_and_Economic_Aspects_of_Helium_Production_in_Saskatchewan.pdf) [Stand 08.10.2018].

YURKOWSKI, M.M. (2016a): Helium in southwestern Saskatchewan. – AAPG Annual Convention and Exhibition, Calgary, Alberta, June 19 – 22, 2016, Abstract: 1 S.; Calgary, AB – URL: <http://www.searchanddiscovery.com/abstracts/html/2016/90259ace/abstracts/2383607.html> [Stand 08.10.2018].

YURKOWSKI, M.M. (2016b): Helium in southwestern Saskatchewan: accumulation and geological setting. – Saskatchewan Geol. Surv., OF Report, 2016-1: 20 S., 6 Abb., 1 Tab.; Regina, SK – URL: [http://publications.gov.sk.ca/documents/310/94157-Open%20File%20Report%202016-1\\_Yurkowski.pdf](http://publications.gov.sk.ca/documents/310/94157-Open%20File%20Report%202016-1_Yurkowski.pdf) [Stand 08.10.2018].

## Kasachstan



### Helium

Kasachstan verfügte zum 31.12.2016 über Reserven von 1.907 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas bzw. Ressourcen von 4.179 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas. Damit liegt dieses zentralasiatische Land bei den Reserven weltweit an 18. Stelle und bei den Ressourcen weltweit an 6. Stelle. Seine Jahresförderung betrug im Jahr 2016 rund 22 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas. Dies entspricht 0,6 % der weltweiten Erdgasförderung bzw. Rang 32 weltweit. Seit Aufnahme der intensiveren Erdgasproduktion Ende der 1960er Jahre sind in Kasachstan etwa 578 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas gefördert worden.

Das kasachische Erdgas enthält sehr unterschiedliche Gehalte an Helium (Tab. 29).

**Tab. 29: Heliumgehalte von Erdgasfeldern in Kasachstan, aus WORLDBANK (1997).**

Region	Erdgasfeld	Erdgas-Reserven / -Ressourcen Kategorie: A+B+C (Mio. m <sup>3</sup> )	Heliumgehalt %
Aktjubinsk	Kzilojskoe	1.488	0,03 – 0,15
Atyrau	Imashevskoe	78.679	0,1
Zhambyl	Ayrakty	2.079	0,2 – 0,3
	Amangeldy	8.143	0,2
	Kumyrly	1.533	0,7
	Pridorjnoj	7.396	0,2
Jezkazgan	Kumkol	8.710	0,1 – 0,2
	Ortalik	665	0,2 – 0,3
West Kasachstan	Karachaganak	1.322.390	0,0
Mangistau	Zentral-/Ost-Prorva	25.410	0,01 – 0,02
	Kansu	4.313	0,1

Das Erdgas-/Kondensatfeld Karachaganak liegt im Nordwesten Kasachstans und ist eines der größten Erdgaskondensatfelder der Welt. Es umfasst eine Fläche von 280 km<sup>2</sup>, wurde im Jahr 1979 entdeckt und ging 1984 in Produktion. Die geschätzten Ressourcen (Stand 2017) liegen bei rund 1.704 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas sowie 13,3 Mrd. Barrel Erdgaskondensat und Rohöl. Derzeitiger Betreiber ist das internationale Konsortium Karachaganak Petroleum Operating B.V. mit Royal Dutch Shell plc und ENI S.p.A. als Operators.

Die Aufbereitung des Erdgases aus Karachaganak, dessen Heliumgehalte nicht veröffentlicht, aber vermutlich sehr niedrig sind, erfolgt im russischen Gaswerk Orenburg der PAO Gazprom. Dieses ist über fünf 140 km lange Pipelines mit Karachaganak verbunden und umfasst auch eine Heliumanlage (s. Russland). Im Jahr 2016 wurde aus Karachaganak 8,934 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas nach Orenburg geliefert.

Ende des Jahres 2012 schrieb der kasachische Konzern JCS KazTransGas weltweit eine Machbarkeitsstudie für ein integriertes Gasproduktions- und -aufbereitungswerk in Kasachstan aus (TULESHOW 2012). Der Konzern verfügt in der Zhambyl Region, im Süden Kasachstans, über große Vorräte an Stickstoff-Methan-Heliumreichen Erdgasen in den Feldern Amangeldy, Anabay, Ayrakty (0,22 – 0,26 % He, C1-Ressourcen: 10,9 Mio. m<sup>3</sup> Helium) und Kumyrly (0,694 % He, C1-Ressourcen: 10,6 Mio. m<sup>3</sup> Helium) bzw. Stickstoff-Helium-reichen Erdgasen in den Feldern Nord Ucharal (0,46 % He, C1-Ressourcen: 1,9 Mio. m<sup>3</sup> Helium) und Ucharal-Kempirtobe (0,68 % He, C1-Ressourcen: 14,2 Mio. m<sup>3</sup> Helium). Die dortigen Erdgasfelder beinhalten, soweit bisher erkundet, insgesamt C1-Gesamtressourcen von mindestens 37,7 Mio. m<sup>3</sup> Helium. Stickstoff, Helium und Methan aus diesen Erdgasfeldern sollten zukünftig im Land aufbereitet und die Reingase vornehmlich nach China exportiert werden.

## Literatur

TULESHOW, D. (2012): Request for proposals. Feasibility study for the Kazakhstan integrated gas processing and production. 13 S.: 6 Anh.: Astana.

WORLD BANK (1997): Kazakhstan. Natural gas investment strategy study, Appendices 1 to 3. – Energy Sector Management Assistance Programme (ESMAP), **ESM 199 / 97**: 229 S; Washington, DC – URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/824301468773693431/Appendices-1-to-3> [Stand 08.10.2018].



## Katar



## Helium

Katar verfügte zum 31.12.2016 über Reserven von 24.073 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas bzw. Ressourcen von 2.000 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas. Damit liegt das Land bei den Reserven weltweit an 3. Stelle; die Ressourcen sind im globalen Maßstab gering. Seine Jahresförderung betrug im Jahr 2016 rund 165 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas. Dies entspricht 4,6 % der weltweiten Erdgasförderung bzw. Rang 4 weltweit. In Katar wurden bereits in den 1960er Jahren geringe Mengen an Erdgas gefördert, bis heute sind es insgesamt etwa 1.772 Mrd. m<sup>3</sup>.

Katar ist weltweit der zweitgrößte Erdgasexporteur und der größte Produzent und Exporteur von Flüssigerdgas (LNG). Die Produktion von Flüssigerdgas in Katar begann im Jahr 1981 mit der Inbetriebnahme von zwei LNG-Anlagen am Industriestandort Ras Laffan. 1984 wurde das Unternehmen Qatargas gegründet, das die Aufgabe hat, Flüssigerdgas aus seinen mittlerweile vier produzierenden Betrieben

- Qatargas 1 (Gesellschafter: Qatar Petroleum – 65 %, ExxonMobil Corp. – 10 %, Total S.A. – 10 %, Mitsui & Co. Ltd. – 7,5 % und Marubeni Corp. - 7,5 %), Inbetriebnahme 1984, 3 LNG-Anlagen
- Qatargas 2 (Gesellschafter: Qatar Petroleum – 70 % und ExxonMobil Corp. – 30 % bzw. Qatar Petroleum – 65 %, ExxonMobil Corp. – 18,3 % und Total S.A. – 16,7 %), Inbetriebnahme 2009, 2 LNG-Anlagen
- Qatargas 3 (Gesellschafter: Qatar Petroleum – 68,5 %, ConocoPhillips Co. – 30 %, Mitsui & Co. Ltd. – 1,5 %), Inbetriebnahme 2010, 1 LNG-Anlage
- Qatargas 4 (Gesellschafter: Qatar Petroleum – 70 %, Royal Dutch Shell plc – 30 %), Inbetriebnahme 2011, 1 LNG-Anlage

zu vermarkten.

Das durch Qatargas produzierte Flüssigerdgas stammt aus dem im Persischen Golf gelegenen und im Jahr 1971 entdeckten, rund 9.700 km<sup>2</sup> großen Erdgasfeld South Pars/North Dome, wobei der South Pars-Anteil (ca. 3.700 km<sup>2</sup>) zum Iran gehört. South Pars/North Dome ist das mit Abstand größte Erdgasfeld der Erde mit den höchsten Reserven. Letztere liegen bei rund 34.200 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas und 16 Mrd. Barrel Erdgaskondensat.

Der Heliumgehalt des Erdgases ist sehr gering und liegt bei durchschnittlich 0,05 %. Die gewinnbaren Reserven von Helium aus North Dome werden aufgrund seiner schieren Größe dennoch auf ca. 10 Mrd. m<sup>3</sup> geschätzt. Qatargas und RasGas gehen davon aus, dass diese Menge rund 26 % der weltweit bekannten Heliumreserven entspricht.

Zweitgrößter Produzent von Flüssigerdgas in Katar war das im Jahr 2011 gegründete und zum 1.1.2018 mit Qatargas verschmolzene Unternehmen RasGas Company Ltd. Seine produzierenden Betriebe waren:

- Ras Laffan I, Inbetriebnahme 1999, 2 LNG-Anlagen
- Ras Laffan II, Inbetriebnahme 2004/2005/2007, 3 LNG-Anlagen
- Ras Laffan III, Inbetriebnahme 2009/2010, 2 LNG-Anlagen

Im Industriekomplex von Ras Laffan betreibt Qatargas zwei Heliumanlagen:

- Helium 1, Inbetriebnahme August 2005, Kapazität: 19,4 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a, Vertrieb durch BOC Group Inc. (Linde AG) und Air Liquide America LP
- Helium 2, Inbetriebnahme Juni 2013, Kapazität: 36,1 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a bzw. 17,3 t Helium/d, Vertrieb bis 2032 durch Air Liquide America LP – 50 %, Linde AG – 30 % und Iwatani Corp. – 20 %

Das in Helium 1 und besonders in der großen Verflüssigungsanlage in Helium 2 produzierte flüssige Helium besitzt eine Reinheit von 99,999 %.

Die Errichtung einer dritten Heliumanlage, Helium 3, wurde bereits bei der Einweihungsfeier von Helium 2 im Dezember 2013 angekündigt. Diese soll eine Kapazität von 11,1 oder 11,8 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a besitzen

und nach Verzögerungen frühestens im Jahr 2019 in Produktion gehen. Als Vertriebspartner wurde Ende 2015 Air Liquide America LP ausgewählt.

Sogar über die Errichtung einer vierten Heliumanlage wurde zwischenzeitlich spekuliert.

Am 5. Juni 2017 verkündeten Saudi-Arabien, Ägypten, Jemen, Bahrain, die Malediven und die Vereinigten Arabischen Emirate (VAE) – über deren Hafen Jebel Ali ein Großteil des Heliums aus Katar exportiert wird – ein Handelsembargo gegen Katar. Aufgrund sehr begrenzter Lagerungskapazitäten fuhr Katar eine Woche später seine beiden Heliumanlagen herunter. Am 2. Juli 2017 wurden die beiden Anlagen wieder hochgefahren und seither ein Teil des Heliums über verschiedene Häfen, z. B. den Hafen von Hamad nahe Doha, der Hauptstadt von Katar, umgeleitet.

Die Produktionsmengen von Helium in Katar sind zum Teil publiziert, wobei sich die Produktionsdaten von Qatargas (in Mio. ft<sup>3</sup>) und RasGas (in Mio. t) widersprechen (Tab. 30). Eine zuverlässigere Ableitung der seit Inbetriebnahme der ersten Heliumanlage im Jahr 2005 produzierten Heliummengen ist aus den weltweiten Importdaten von Helium aus Katar nach Global Trade Atlas möglich. Hierbei sind aber auch die Nachbarländer von Katar (VAE, Oman, Saudi-Arabien) als mögliche Exportländer miteinzubeziehen (Tab. 31).

**Tab. 30: Produktion von Helium in Katar in Mio. m<sup>3</sup> (umgerechnet aus ft<sup>3</sup>) nach Geschäftsberichten von Qatargas bzw. in t (umgerechnet in Mio. m<sup>3</sup>, 1 t He entspricht ca. 5.988 m<sup>3</sup> He bei 15 °C und 1 bar Druck) nach Nachhaltigkeitsberichten von RasGas.**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Mio. m <sup>3</sup>	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	6,1	5,9
t	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	1.900	1.800	1.800
= Mio. m <sup>3</sup>	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	11,4	10,8	10,8
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Mio. m <sup>3</sup>	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	
t	1.900	2.870	3.300	3.700	n.v.	n.v.	
= ca. Mio. m <sup>3</sup>	11,4	16,6	19,8	22,2	n.v.	n.v.	



**Abb.53: In den riesigen LNG-Anlagen der Qatargas in Ras Laffan, Katar, wurde im Jahr 2017 knapp ein Viertel des weltweit produzierten Heliums gewonnen, Foto: [www.qatargas.com](http://www.qatargas.com).**

**Tab. 31: Gesamtmenge der weltweiten Importe von Helium aus Katar, Saudi-Arabien und den Vereinigten Arabischen Emiraten (VAE) nach Global Trade Atlas (in Mio. m<sup>3</sup> und t, 1 t He entspricht ca. 5.988 m<sup>3</sup> He bei 15 °C und 1 bar Druck) im Vergleich dazu die Schätzungen des USGS zur Heliumproduktion in Katar.**

Jahr	Katar		Saudi-Arabien		VAE		Gesamt	USGS
	Mio. m <sup>3</sup>	t	Mio. m <sup>3</sup>	t	Mio. m <sup>3</sup>	t	Mio. m <sup>3</sup>	Mio. m <sup>3</sup>
2005	0,08	35	0,29	4	0,02	119	1,34	0,2
2006	0,65	496	0,15	6	0,04	534	7,04	4,4
2007	1,70	837	0,12	5	1,25	470	10,93	7,1
2008	0,89	1.503	0,06	1	0,14	339	12,13	12,7
2009	2,72	1.248			0,03	319	12,13	20
2010	3,55	1.441			0,13	494	15,27	20
2011	2,14	1.218	0,79	14	0,14	649	14,33	20
2012	3,04	808	0,99	15	0,17	301	10,93	20
2013	3,86	933		104	0,24	535	13,51	38
2014	13,15	3.247		60	0,84	652	37,70	46
2015	14,22	3.089	0,07	30	2,97	606	39,57	49
2016	17,37	2.922	0,01	43	5,69	645	44,69	50
2017 <sup>1)</sup>	11,69	3.435	0,22	31	3,65	316	38,23	45

<sup>1)</sup> im Jahr 2017 wurden auch 27.066 m<sup>3</sup> Helium aus Katar von Deutschland über den Oman importiert (Anm.: Dies heißt nicht, dass nur 27.066 m<sup>3</sup> Helium (entspricht genau einem ISO-Container) Deutschland über das Transitland Oman erreichten, sondern dass alle weitere Importe aus dem Oman, die nach Linde AG (pers. Mitteilung) wesentlich größer waren, vom Zoll dem Herkunftsland VAE zugeordnet wurden.)

## Literatur

MESSNER, J. (2017): Katar und Iran teilen sich das größte Erdgasfeld der Erde. – Commodity TopNews, 54: 7 S., 4 Abb., 1 Tab.; Hannover (BGR) – URL: [https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity\\_Top\\_News/Energie/54\\_erdgasfeld\\_iran\\_katar.pdf?](https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Energie/54_erdgasfeld_iran_katar.pdf?) [Stand 08.10.2018].

RASGAS COMPANY LTD. (2013): Helium. Qatar's Journey: 85 S.: Doha.



## Polen



### Helium

Polen verfügte zum 31.12.2016 über Reserven von 91 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas bzw. Ressourcen von 1.224 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas. Damit liegt unser Nachbarland bei den Reserven weltweit an 53. Stelle und bei den Ressourcen weltweit an 50. Stelle. Seine Jahresförderung betrug im Jahr 2017 5,0 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas. Dies entspricht weniger als 0,2 % der globalen Erdgasförderung bzw. Rang 51 weltweit. Bereits in den 1920er Jahren wurde in Polen in geringem Umfang Erdgas gefördert. Kumulativ waren es bis Ende 2017 etwa 274 Mrd. m<sup>3</sup>.

Die Suche nach Erdgasvorkommen begann in den 1960er Jahren im polnischen Tiefland und war bald erfolgreich. Gegenwärtig sind in dieser Region 152 Erdgasvorkommen bekannt, von denen im Jahr 2017 79 in Förderung standen. Bei 16 Vorkommen im Gebiet Zielona Góra-Rawicz-Odolanów handelt es sich um Erdgase mit hohem Stickstoffgehalt (> 40 %) und erhöhten Heliumgehalten (0,22 – 0,42 %). Hiervon standen im Jahr 2017 neun in Förderung; das bedeutendste ist das Feld Bogdaj – Uciechów mit Reserven von 3,37 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas bzw. 11,68 Mio. m<sup>3</sup> Helium. Die Gesamtreserven (Kategorien: A+B) an Helium in Polen zum 31.12.2017 lagen bei 24,01 Mio. m<sup>3</sup>.

Zur Reduzierung des hohen Stickstoffgehaltes in vielen neu entdeckten Erdgasfeldern des polnischen Tieflands wurde am zentralen Standort Odolanów eine Denitrifizierungsanlage mit integrierter Heliumanlage errichtet, die 1977 in Produktion ging und in der auch Erdgas verflüssigt werden kann. Heute gehört das Werk Odolanów zur sich mehrheitlich im Staatsbesitz befindlichen Polish Oil & Gas Company (*Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA – PGNiG SA*) und produziert neben flüssigem Stickstoff weiterhin gasförmiges und flüssiges Helium. Die Kapazitäten betragen 4,2 Mio. m<sup>3</sup> gasförmiges Helium/a bzw. 420 t flüssiges Helium/a, wobei diese aufgrund sinkender Erdgasproduktion bzw. geringerer Auslastung seit einigen Jahren nicht mehr erreicht werden (Tab. 32). Auch ist der Heliumgehalt der verarbeiteten heliumreichen Erdgase von ursprünglich bis zu 0,42 % auf heute unter 0,18 % gefallen.

Im Jahr 2017 wurden in Odolanów 3,172 Mio. m<sup>3</sup> Helium produziert, von denen jedoch nur 0,75 Mio. m<sup>3</sup> aus Erdgasfeldern mit erhöhten Heliumgehalten (s. o.) stammten (PGI 2018).

Mit Ausnahme des Jahres 2017 sind vom Polish Geological Institute in der Vergangenheit nur die Teilproduktionsmengen von Helium aus Erdgasfeldern mit erhöhten Heliumgehalten publiziert worden, jedoch stellte das Unternehmen PGNiG SA freundlicherweise für diese Studie auch seine vollständigen Heliumproduktionsdaten zur Verfügung (Tab. 32).

**Tab. 32: Produktion von Helium in Polen seit 1989 (in Mio. m<sup>3</sup>) aus Erdgasfeldern mit erhöhten Heliumgehalten, nach POLISH GEOLOGICAL INSTITUTE (PGI 2018) sowie Gesamtheliumproduktion seit 2000 (in Mio. m<sup>3</sup>), nach PGNiG SA (frdl. schriftl. Mitt.).**

	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
PGI	4	3	2,5	2	3	3	2	1,3	1,3	1,3
PGNiG	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
PGI	1,3	1,22	1,37	1,43	1,26	1,29	1,22	1,15	1,12	1,03
PGNiG	n. v.	2,27	2,22	2,30	2,51	2,71	2,67	2,47	2,36	2,24
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
PGI	1,05	1,01	0,91	0,91	0,84	0,81	0,80	0,78	0,75	
PGNiG	2,69	3,14	3,40	3,31	2,99	2,81	2,83	2,86	3,17	

## Literatur

JONES, J. K. & STACEY, J. M. (1974): The recovery and liquefaction of helium from natural gas in Poland. – *Cryogenics*, April 1974: 198 – 202, 3 Abb., 2 Tab.; Amsterdam (Elsevier).

PGI - POLISH GEOLOGICAL INSTITUTE (2018): Helium. – In: *Mineral Resources of Poland*: 1 S., 1 Abb., 2 Tab.; Warschau – URL: <http://geoportal.pgi.gov.pl/surowce/energetyczne/he> [Stand 08.10.2018].

## Russische Föderation



### Helium

Die Russische Föderation (kurz: Russland) verfügte zum 31.12.2016 über Reserven in Höhe von 47.777 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas bzw. Ressourcen von 152.050 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas. Damit liegt dieses Land sowohl bei den Reserven als auch bei den Ressourcen weltweit an erster Stelle. Seine Jahresförderung betrug im Jahr 2016 rund 641 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas. Dies entspricht 17,7 % der weltweiten Erdgasförderung bzw. Rang 2 weltweit. Erst nach dem 2. Weltkrieg wurden in Russland größere Mengen an Erdgas gefördert, bis Ende 2016 waren es kumulativ rund 23 Bill. m<sup>3</sup> Erdgas.

Nach STEPANYUK (1995) begann die geologische Exploration von potentiellen Heliumvorkommen in Russland bereits in den 1920er Jahren. Über 200 Erdgasfelder wurden bis in die 1990er Jahre bewertet, doch nur in den Regionen Orenburg und Astrachan in Südrussland konnten bis dahin nennenswerte Reserven und im südlichen Sibirien (Regionen Irkutsk und Krasnojarsk) sowie in der Republik Sacha in Ostsibirien Erdgasvorkommen mit erhöhten Gehalten an Helium (0,20 – 0,56 % He) entdeckt werden. 1949 begann in der Stadt Uchta, Republik Komi, im Nordwesten Russlands, auf Basis des dortigen Voyvozh-Erdgasvorkommens (@ 0,06 – 0,15 % He) die kommerzielle Heliumproduktion. Bereits zuvor, 1933 – 1935, war im Dorf Melnikowo (Oblast Tomsk) eine Testanlage zur Aufbereitung von Helium errichtet worden (ANDREEV 1995). In den 1950er und 1960er Jahren wurden auch die Gaswerke von Moskau sowie noch später von Minnibaewo (Republik Tatarstan) und Otradny (Oblast Samara) um kleine Heliumanlagen ergänzt. Aus diesen vier Heliumanlagen konnten jährlich bis zu 1,7 Mio. m<sup>3</sup> Helium (nach ANDREEV 2005 bis zu 1,4 Mio. m<sup>3</sup> Helium) gewonnen werden. Alle diese Anlagen wurden mit Produktionsaufnahme in Orenburg, s. u., 1978 geschlossen.

Im Jahr 1966 wurde im Süden von Russland, unweit der damaligen Kasachischen Sozialistischen Sowjetrepublik, mit Osnovnaya die erste Teillagerstätte des großen Erdöl- und Erdgaskondensatfelds Orenburgskoye entdeckt. Zur Nutzung des an Schwefelwasserstoff (1,8 %) und Stickstoff (5,4 %) reichen Erdgases (@ 0,055 % Helium) aus diesem Feld wurde westlich der Stadt Orenburg ein Gaswerk errichtet, das 1974 in Produktion ging. Im Januar 1978 erfolgte im Dorf Kholodnye Klyuchi die Inbetriebnahme einer angeschlossenen Heliumanlage. Ein Jahr später wurde im heutigen Kasachstan (s. dort) das große Erdgaskondensatfeld Karachaganak entdeckt und nach Aufnahme der Förderung 1984 ebenfalls dem Gaswerk Orenburg angeschlossen.

Das Erdöl- und Erdgaskondensatfeld Orenburgskoye lieferte seit seiner Entwicklung bereits über 1.200 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas und das Gaswerk Orenburg u.a. über 35 Mio. t Schwefel und 172 Mio. m<sup>3</sup> Helium. Die verbliebenen Reserven bzw. Ressourcen der Kategorien A+B+C1 des Feldes betragen zum 31.12.2016 648,9 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas, 202,5 Mio. t Rohöl und 55,7 Mio. t Erdgaskondensat. Die Hochzeit der Erdgasförderung aus Orenburgskoye lag in den 1980er Jahren, als nahe der Maximalkapazität jährlich rund 45 Mrd. m<sup>3</sup> (maximal 48,7 Mrd. m<sup>3</sup>) Erdgas und 3,2 Mio. t Erdgaskondensat/Rohöl gefördert bzw. aufbereitet wurden. Das dabei anfallende Helium wurde größtenteils von der sowjetischen Maschinenbau- und nur untergeordnet von der Verteidigungsindustrie abgenommen (ANDREEV 1995). Im Jahr 1990 wurde mit 9,2 Mio. m<sup>3</sup> der Höchststand der Heliumproduktion erreicht. Bereits seit 1986 geht die Förderung aus Orenburgskoye langsam, seit dem Jahr 2000 deutlich zurück. Im Jahr 2016 betrug die Erdgasförderung dort 15,65 Mrd. m<sup>3</sup>.

Heute gehört das Gaswerk Orenburg als Gazprom dobycha Orenburg, LLC zum russischen Konzern PAO Gazprom. Die derzeitige Verarbeitungskapazität liegt bei 37,5 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas. Die Heliumanlage in Orenburg besteht aus sieben Einzelanlagen (hiervon sind fünf in Produktion) mit einem maximalen Durchsatz von 18 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas (derzeit auf 15 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas begrenzt) und einer Heliumkapazität von 8,8 Mio. m<sup>3</sup> jährlich. Produziert wird Helium mit Reinheitsgraden von 99,99 % He und 99,995 % He. Bei den Verunreinigungen handelt es sich um Spuren von N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, Ne und Ar, die mit russischer

Technik nicht zu entfernen waren bzw. sind. Seit dem Jahr 1993 arbeitete in Orenburg eine Heliumverflüssigungsanlage mit einer Kapazität von 500 l/h (andere Quellen: 700 l/h). Im Juli 2004 wurde diese veraltete Anlage durch eine neue Heliumverflüssigungsanlage ergänzt bzw. ersetzt, die von der Linde Kryotechnik AG installiert wurde. Diese Anlage soll flüssiges Helium in einer Reinheit von 99,9999 % und einer Kapazität von 4.000 l/a (umgerechnet 500 t/a bzw. 3 Mio. m<sup>3</sup>/a, andere Quellen: 4,2 Mio. m<sup>3</sup>/a) erzeugen. Im Jahr 2017 verkaufte Gazprom nach eigenen Angaben 3,32 Mio. m<sup>3</sup> gasförmiges Helium und 289,56 t flüssiges Helium.

Auch die Produktionsmengen von Helium in Orenburg seit dem Jahr 2000 sind vom Betreiberkonzern PAO Gazprom im Detail publiziert (Tab. 33).

**Tab. 33: Produktion von Helium in Orenburg, Russland, seit dem Jahr 2000 (in Mio. m<sup>3</sup>), nach PAO Gazprom.**

2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
5,27	5,34	6,29	6,47	3,45	1,64	3,84	4,87	5,04
2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
4,89	4,86	3,53	4,92	3,57	4,00	4,97	5,05	5,10

Nach staatlichen russischen Quellen (MINISTERIUM 2014) ist die Heliumproduktionskapazität Russlands bei weitem nicht ausgeschöpft. So wurden zwar beispielsweise im Jahr 2013 in Orenburg rund 3,6 Mio. m<sup>3</sup> Helium produziert, aber es hätten im gleichen Jahr 4,1 Mio. m<sup>3</sup> mehr sein können. Zudem entweichen im gleichen Jahr 2013 10,2 Mio. m<sup>3</sup> Helium aus 160 anderen heliumführenden russischen Erdgasfeldern ungenutzt in die Atmosphäre.

Großes Potenzial wird in den schon genannten Erdgasfeldern in Süd- und Ostsibirien gesehen. Nach YAKUTSENI (2014) betragen die Heliumressourcen allein der in Ostsibirien bisher erkundeten Erdgaslagerstätten rund 16 Mrd. m<sup>3</sup>.

Die Ressourcen des noch unzureichend explorierten Erdgaskondensatfelds Sobinskoye-Paiginskoye in der Region Krasnojarsk werden auf 130 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas mit Gehalten von 26,29 % N<sub>2</sub> und 0,60 % He, entsprechend einem Heliuminhalt von 780 Mio. m<sup>3</sup>, geschätzt.

Ebenfalls in der Region Krasnojarsk liegt das 1972 entdeckte und 2012 in Produktion gegangene Erdgasfeld Yurubchenko-Tokhomskoye. Es enthält nachgewiesene Reserven von 330 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas mit Gehalten von 6,39 % N<sub>2</sub> und 0,18 % He, d. h. Reserven von 594 Mio. m<sup>3</sup> Helium.

Das Erdgaskondensatfeld Kovyktinskoye (Kovykta), nahe des Baikalsees, 350 km nordöstlich von Irkutsk, wurde 1987 entdeckt. Es enthält Reserven bzw. Ressourcen (Kategorien A-C1) von 86 Mio. t förderbarem Erdgaskondensat und 1.563 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas @ 0,24 – 0,28 % He, d. h. einen Heliuminhalt von ca. 4,4 Mrd. m<sup>3</sup>.

In der Republik Sacha liegen u. a. die Erdöl- und Erdgaskondensatfelder

- Srednebotuobinskoye, in Produktion seit 2014, mit Reserven bzw. Ressourcen (Kategorien A – C2) von 162 Mio. t Rohöl/Erdgaskondensat und 182 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas @ 2,93 % N<sub>2</sub> und 0,2 – 0,6 % He, d. h. ca. 0,4 – 1,1 Mrd. m<sup>3</sup> Heliuminhalt.

sowie

- Chayandinskoye bzw. Chayanda, in Produktion (Erdgas) seit 2015, mit Reserven bzw. Ressourcen (Kategorien A-C1) von 1.000 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas @ 6,44 % N<sub>2</sub> und 0,50 – 0,54 % He, d. h. rund 5 Mrd. m<sup>3</sup> Heliuminhalt, wovon 1,4 Mrd. m<sup>3</sup> gewinnbar sein sollen.



Zur Aufbereitung des Erdgases aus seinen sibirischen Erdgaslagerstätten Kovykta und Chayanda, aber auch seinem Lizenzanteil an Srednebotuobinskoye, hat der russische Konzern PAO Gazprom im August 2015 nahe der Stadt Svobodny, Region Amur, auf über 850 ha Fläche und mit geschätzten Gesamtkosten von 11,5 Mrd. € mit der Konstruktion eines großen Gaswerkes, Amur Gas Processing Plant (GPP), begonnen. Dieses soll 2021 (19,4 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a), 2022 (weitere 19,4 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a) bzw. bis 2024 vollständig in Produktion gehen. Die Erdgaslagerstätten sind über das Netz der „Power of Siberia“-Pipeline angeschlossen. Hauptvertragspartner für die Abtrennung der wertvollen Industriegase aus dem Erdgas ist die Linde AG. Das Amur GPP soll nach vollständiger Inbetriebnahme eine Verarbeitungskapazität von 42 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas/a bzw. eine Heliumanlage mit einer Kapazität von maximal 60 Mio. m<sup>3</sup>/a besitzen. Das verflüssigte Helium soll über (eine noch zu bauende Straße) zur Hafenstadt Wladiwostok transportiert und von dort exportiert werden. Wichtigster Abnehmer für die Mehrheit der hergestellten Gase wird aufgrund der regionalen Nähe und seines Wirtschaftswachstums China sein. Zusätzlich ist die Eröffnung eines unterirdischen Heliumspeicherfeldes, ähnlich dem Cliffsidespeicherfeld in den USA, im Bereich der Salzstrukturen der Chayandinskoye- und Tas-Yuryakhskoye-Erdgasfelder angedacht, wobei die hierfür notwendige geologische Erkundung schon abgeschlossen ist.

Auch die Irkutsk Oil Company kündigte an, auf Basis ihres sibirischen Erdölfeldes Yaraktinsky, rund 200 km nördlich von Ust-Kut gelegen, im Jahr 2021 eine Heliumanlage in Betrieb nehmen zu wollen. Diese soll eine Jahreskapazität von 10 Mio. l flüssiges Helium, entsprechend ca. 7 Mio. m<sup>3</sup> gasförmiges Helium, besitzen.

Nach SURESH et al. (2016) wird auch in den Luftzerlegungsanlagen in Jekaterinburg, in Nowokuibyschewsk sowie vermutlich in Tscherepowez Helium produziert.

Der Verbrauch von Helium in Russland wird auf 3,5 Mio. m<sup>3</sup>/a, davon etwas über 1 Mio. l flüssiges Helium/a geschätzt.

### **Neon, Argon, Krypton, Xenon**

Nach SURESH et al. (2016) sind in Russland mindestens 31 Standorte von Luftzerlegungsanlagen bekannt, an denen auch Argon produziert wird.

In der Luftzerlegungsanlage in Tscherepowez werden Rohkrypton, Rohxenon und vermutlich auch Rohneon gewonnen.

Die Luftzerlegungsanlage der Lipezk Stahlhütte produziert monatlich rund 810 m<sup>3</sup> eines Rohkrypton-/Rohxenongemisches.

### **Literatur**

ANDREEV, I. L. (1995): Processing of helium-containing gases. Development of world helium business. Helium industry in Russia and world experience with the development and operation of helium equipment.- Chemical and Petroleum Engineering, 31, 1 – 2: 73–85, 6 Abb., 2 Tab.; New York, NY – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF01147379.pdf> [Stand 08.10.2018].

COCKERILL, R. (2018): Irkutsk Oil Company announces new helium project.- gasworld magazine, 4.10.2018: 2 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/irkutsk-oil-company-announces-new-helium-project/2015565.article> [Stand 08.10.2018].

HOOKE, B. (2012): Helium in Russia. – In: NUTTALL, W.J., CLARKE, R.H. & GLOWACKI, B.A. (Hrsg.): The future of helium as a natural resource: 88 - 100, 6 Abb., 1 Tab.; London – New York (Routledge).

IVANOV, S. (2009): Experience and problems of development of Orenburg oil-gas-condensate field, prospects of gas-chemistry development at Orenburg gas-chemical complex. – Proceedings, 24th World Gas Conference, Buenos Aires, Argentina, October 5-9, 2009: 2391 – 2417, 13 Abb., 1 Tab.; Oslo (International Gas Union) – URL: <http://members.igu.org/html/wgc2009/papers/docs/wgcFinal00240.pdf> [Stand 08.10.2018].

MINISTERIUM-MINISTERIUM FÜR NATÜRLICHE RESSOURCEN UND UMWELT DER RUSSISCHEN FÖDERATION (2014): Natürliches brennbares Gas. – In: Über den Stand und die Nutzung mineralischer Ressourcen in der Russischen Föderation 2013 (in russ.): 77 – 95, 19 Abb., 2 Tab.; Moskau.

PAO GAZPROM (verschiedene Jahre): Factbook „Gazprom in Figures“ – URL z. B.: <http://www.gazprom.com/f/posts/44/307258/gazprom-in-figures-2012-2016-en.pdf> [Stand 08.10.2018].

RPI INTERNATIONAL, LTD. (2008): Gazprom Dobycha Orenburg (former Orenburggazprom). – In: Natural gas production in Russia 2008 – 2020: 387 S., 270 Abb., zahlr. Tab. u. Kart.; Moskau – URL: [http://www.petrofinder.com/pdf/russia\\_natural\\_gas\\_data.pdf](http://www.petrofinder.com/pdf/russia_natural_gas_data.pdf) [Stand 08.10.2018].

STEPANYUK, V. A. (1995): Helium production in Russia. – Chemical and Petroleum Engineering, **31**: 1 – 2: 67 – 69; New York, NY – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF01147377.pdf> [Stand 08.10.2018].

YAKUTSENI, V. P. (2014): World helium resources and the perspectives of helium industry development. – Neftegasovaâ geologiâ. Teoriâ i praktika, **9**, **1**: 22 S., 5 Abb., 9 Tab.; St. Petersburg – URL: [http://www.ngtp.ru/rub/9/11\\_2014\\_eng.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/9/11_2014_eng.pdf) [Stand 08.10.2018].

## Südafrika



### Helium

Die Republik Südafrika ist der größte Verbraucher von Erdgas in Afrika, wobei das Land weitestgehend auf Importe vor allem aus dem Nachbarland Mosambik angewiesen ist. Seit vielen Jahren wird im Land die Exploration der wenigen Erdgasvorkommen vorangetrieben, wobei man v. a. offshore fündig wurde. Größtes bisher gefundenes Erdgasfeld ist Ithubesi, 105 km offshore der North Cape Province, mit nachgewiesenen Reserven von 15 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas. Die potentiellen Schiefergasvorräte werden auf 7.510 Mrd. m<sup>3</sup> geschätzt (Weltrang 9).

Onshore wurde bisher nur ein Erdgasfeld erschlossen, das 1.870 km<sup>2</sup> große Virginia-Erdgasfeld bzw. Free-State-Gasfeld bei Virginia, nahe der Stadt Welkom, auf halbem Weg zwischen Johannesburg und Bloemfontein. Virginia enthält nachgewiesene Reserven von rund 690 Mio. m<sup>3</sup> Erdgas mit 3 – 4 % He, entsprechend einem Heliuminhalt von 21 – 28 Mio. m<sup>3</sup>. Im Mai 2016 wurde die Linde AG durch eine regionale Tochterfirma mit der Errichtung einer Heliumanlage und dem Vertrieb von Helium aus diesem Vorkommen beauftragt. Die Anlage soll in der ersten Hälfte des Jahres 2019 in Produktion gehen und eine Kapazität von 650.000 m<sup>3</sup> Helium/a besitzen.

Der südafrikanische Bedarf an Helium ist jedoch wesentlich höher, von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich und lag z. B. im Jahr 2015 bei 7,0 Mio. m<sup>3</sup>, im Jahr 2016 bei 9,0 Mio. m<sup>3</sup>, aber im Jahr 2017 nur noch bei 3,0 Mio. m<sup>3</sup>.

### Argon, Krypton, Xenon

In Secunda, rund 130 km östlich Johannesburg, betreibt das Petrochemieunternehmen Sasol die weltweit größte kommerzielle Kohlevergasungsanlage. Beliefert wird das Werk aus fünf Kohlenbergwerken in Mpumalanga. Die Kohle wird mithilfe großer Mengen Sauerstoffs vergast und aus dem Gas über zahlreiche Zwischenschritte eine Vielzahl von Grundstoffen für die chemische und petrochemische Industrie erzeugt. 15 Luftzerlegungsanlagen mit einer Gesamtkapazität von 41.900 t O<sub>2</sub>/d (darunter die derzeit größte Einzel-luftzerlegungsanlage der Welt mit einer Kapazität von 5.000 t O<sub>2</sub>/d) bzw. rund 13 Mio. t O<sub>2</sub>/a erzeugen den notwendigen Sauerstoff. Die Gesamtargonkapazität liegt bei 150 t/d. In 14 der Luftzerlegungsanlagen wird Rohkrypton/Rohxenon abgetrennt. 1999 wurde zum letzten Mal auch die bereits bestehende Krypton-/Xenon-Anreicherungsanlage von dem Unternehmen Air Liquide SA im Auftrag von Sasol erweitert und besitzt nun eine Jahreskapazität von 9,5 Mio. l (= 9.500 m<sup>3</sup>) Krypton und 2,5 Mio. l (= 2.500 m<sup>3</sup>) Xenon in Form eines Rohkrypton/Rohxenon-Gasgemisches („dicke Suppe“ mit einem Kr:Xe-Verhältnis von 4:1, vgl. Kap. 3.1.4). Nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) liegt die tatsächliche Produktion dieser weltgrößten Kr/Xe-Quelle jedoch bei rund 7 Mio. l jährlich, die vollständig durch Air Liquide nach Frankreich exportiert und dort aufbereitet werden.

### Literatur

BREYTENBACH, M. (2016): Free State poised to be helium pioneer as gas developments unfold. – Engineering News, June 10, 2016; Johannesburg – URL: <http://www.engineeringnews.co.za/article/free-state-gas-potential-to-pioneer-helium-natural-gas-production-for-sas-local-gas-economy-2016-06-10> [Stand 08.10.2018].

SPIRITUS&BETZENDAHL–SPIRITUSCONSULTINGLTD.&BETZENDAHLGASCONSULTANTS,LLC.(2018):Theglobal rare gases business. A 2018 update multi-subscriber report: 57 S., 20 Abb., 16 Tab.; Truro, UK.



## Tansania



### Helium

Mit Schreiben vom 03.11.2004 genehmigte das Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) den Arbeitsvorschlag der BGR vom 20.10.2004 zur Durchführung einer Teilmaßnahme im Rahmen des Studien- und Fachkräftefonds für Geosektorvorhaben (Geo-SFF) mit dem Arbeitstitel „Nachhaltige Nutzung von Nichtmetallrohstoffen in Ostafrika“. Im Rahmen der Teilmaßnahme wurde entschieden, die Länder Malawi, Tansania und Äthiopien zu befahren.

Mit Datum vom 25.01.2006 genehmigte das BMZ eine Aufstockung und Verlängerung des Projektes bis zum 31.12.2007. Im Rahmen dieses verlängerten Zeitraums sollte für die tansanische Regierung ein englischsprachiges Investoren-Handbuch mit dem Arbeitstitel „Industrial Minerals of Tanzania. A Progress Report“ erarbeitet werden.

Das Investoren-Handbuch mit dem letztendlichen Titel „Industrial Minerals in Tanzania. An Investor's Guide“ (ELSNER et al. 2008) wurde im Januar 2008 fertiggestellt und im April 2008 der tansanischen Regierung in 1.850 gedruckten Exemplaren zur Verfügung gestellt.

Im November 2013 reisten die beiden Geologen Thomas Abraham-James und Josh Bluett auf dem Weg zu einem Goldvorkommen durch Tansania. Auf dem Rücksitz ihres Landrovers fanden sie ein Exemplar des o. g. Investorenhandbuchs und wurden auf das Kapitel „Helium and other natural gases“ (S. 92 – 94) aufmerksam. In diesem Kapitel wurden, basierend auf älteren Literaturquellen, folgende Thermalwässer mit Heliumführung genannt:

#### Mbeya District:

- Nyamosi mit Erdgas @ 17,9 – 18,2 % He

#### Mara District:

- Maji Moto Musoma im mit einer in Bohrungen angetroffenen Schüttung von 200 l Erdgas/h @ 13,2 – 13,5 % He

#### Singida District:

- Gongga, 64 km nordöstlich von Saranda mit Erdgas @ 8,9 % He
- Mponde, 48 km nördlich von Saranda mit Erdgas @ 4,4 – 10,2 % He
- Hika, 11 km nördlich von Saranda mit Erdgas @ 6,7 % He
- Takwa mit Erdgas @ 7,0 % He

#### Dodoma District:

- Manyeghi, 137 km nordwestlich von Dodoma, mit Erdgas aus 320 m tiefen Diamantkernbohrungen @ 4,4 – 6,7 % He, 1,2 – 1,6 % Ar, 89,3 – 93,0 % N<sub>2</sub> und 0,6 – 1,8 % CO<sub>2</sub>

Zudem führten hochsaline Wässer bei Uvinza, Kigoma District, Erdgas @ 2,5 % He, 1,2 % Ar, 1,7 % CO<sub>2</sub> und 94,6 % N<sub>2</sub>.

Die Geologen gründeten daraufhin mit Investoren auf den Britischen Jungferninseln die Firma „Helium One Ltd.“ und sicherten sich zahlreiche *Exclusive Prospecting Licenses* über eine Gesamtfläche von 4.500 km<sup>2</sup> in den Teilgebieten Rukwa (@ ca. 90 % N<sub>2</sub> und 8 – 10,2 % He) sowie Eyasi (max. 6,0 % He) und Balangida (max. 10,6 % He) in verschiedenen tansanischen Abschnitten des Ostafrikanischen Riftvalleys. Die Firma konzentrierte sich jedoch auf das Gebiet um Rukwa im Mbeya District im Südosten Tansanias, weil von dort bereits ältere seismische Daten und Ergebnisse aus Erdölbohrungen vorlagen. Im Mai 2016 legten sie eine Abschätzung der verfügbaren Heliumressourcen in diesem Gebiet von insgesamt 700 Mio. m<sup>3</sup> (niedrige Schätzung), 2,7 Mrd. m<sup>3</sup> (beste Schätzung) bzw. 8,9 Mrd. m<sup>3</sup> (hohe Schätzung) in mehr als 28 Einzelfeldern vor. Nach Verbesserung der Datenlage wurde im Oktober 2017 eine wahrschein-

liche Ressource von 1,5 Mrd. m<sup>3</sup> Helium publiziert (OWEN-JONES 2017). Helium-One Ltd. nennt weiterhin 2,7 Mrd. m<sup>3</sup> Helium als möglicherweise gewinnbare Ressource („*unrisked prospective recoverable helium volume (P50)*“).

### Literatur

ELSNER, H., WITTENBERG, A., MWAKALUKWA, G. & SEMKIWA, P. (2008): Industrial Minerals in Tanzania. An Investor's Guide. – Ministry of Energy and Minerals of the United Republic of Tanzania: 203 S., 87 Abb., 56 Tab., 33 Kart.; Dar es Salaam – URL: [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/investorenhandbuch-industrial-minerals-tanzania.pdf](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/investorenhandbuch-industrial-minerals-tanzania.pdf); [Stand 08.10.2018].

OWEN-JONES, J. (2017): A huge helium discovery has been made. – gasworld, 17.10.2017: 2 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/a-huge-helium-discovery-has-been-made/2013614.article> [Stand 08.10.2018].

## Ukraine



### Argon

Nach SURESH et al. (2016) sind in der Ukraine zehn Standorte von Luftzerlegungsanlagen bekannt, an denen auch Argon produziert wird. Vermutlich sind es jedoch mehr, da der Argonbedarf in der ukrainischen Stahlindustrie sehr hoch ist.

### Helium, Neon, Krypton, Xenon

Einer der weltweiten größten Anbieter von schweren Edelgasen war das 1990 gegründete und 2016 aufgelöste Unternehmen Iceblick Ltd. mit Firmensitz in Odessa und Zugriff auf je eine Produktionsstätte samt Aufreinigungsanlage in Moskau und Odessa (Rare Gases International Group). Iceblick vertrat zudem weitere Spezialgasunternehmen aus Russland (OOO Zenon Gas und Chromium Ltd.), der Ukraine (Airgas Ltd.), Kasachstan und den USA. Vertrieben wurden Xenon, Krypton und Neon in hochreiner Form (5.0, 6.0), aber auch gasförmiges und flüssiges Helium, Gasegemische und isotonenfraktioniertes Neon ( $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ). Noch vor zehn Jahren, 2007, besaß Iceblick Ltd. weltweite Marktanteile von 70 % bei Neon und 25 % bei Krypton und Xenon. Bis zum Jahr 2010 waren diese Marktanteile auf 65 % bzw. 17 %, 2012 auf 65 % bzw. 15 % und bis zum Jahr 2015 bei Neon auf immer noch sehr hohe 50 % gesunken.

Ab Ende des Jahres 2014 kam es zu einem internen Richtungsstreit bei Iceblick (SPIRITUS & BETZENDAHL 2018). Ein neuer Eigentümer versuchte extreme Preise auf dem Markt durchzusetzen. Der ehemalige Präsident, Dr. Vitaly Bondarenko, der die gesamten Kontakte zu den Lieferanten und Kunden besaß, verließ daraufhin sein ehemaliges Unternehmen und gründete mit Cryoin Engineering Ltd. eine neue Firma, ebenfalls in Odessa. Iceblick Ltd. ist mittlerweile nicht mehr aktiv, während Cryoin Engineering Ltd. heute einer der großen weltweiten Lieferanten von Neon, Krypton und Xenon ist. Weitere ukrainische Edelgasproduzenten, die den Weltmarkt versorgen, sind Ingas AE (Mariupol) und UMG RT Gas (Kiew).

Ingas AE bezieht seine Edelgase aus dem Hüttenkombinat der PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works und dem Metallhüttenkombinat in Krywyj Rih (Eigentümer: ArcelorMittal Kryviy Rih PJSC), wobei in letzterem täglich neben bis zu 1.000  $\text{O}_2$ , 7.400 t  $\text{N}_2$  und 80 t Ar auch alle weiteren Edelgase gewonnen werden.

UMG RT Gas wird beliefert von den Metallhüttenkombinaten in Zaporizhia (PJSC "Zaporizhstal") und Mariupol (PJSC Azovstal Iron & Steel Works sowie PJSC Ilyich Iron & Steel Works). Die Luftzerlegungsanlagen, die dem Ilyich Metallurgiekomplex in Mariupol angeschlossen sind, wurden von dem französischen Unternehmen Air Liquide SA erbaut und 2007 eröffnet. Neben 60.000  $\text{m}^3 \text{O}_2/\text{h}$  produzieren sie  $\text{N}_2$ , Ar, sowie Kr-Xe- und Ne-He-Gasegemische. Auch dem Azovstal Metallkombinat in Mariupol sind Luftzerlegungsanlagen angeschlossen, die neben gasförmigem und flüssigem  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  sowie Ar ebenfalls ein Ne-He-Gasegemisch und ein Kr-Xe-Rohgasegemisch produzieren.

Das Chemiekombinat PJSC «Severodonetsk Azot Association» betreibt in Severodonetsk Luftzerlegungsanlagen, in denen neben  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  und Ar nach Firmenangaben auch ein „Xe- $\text{N}_2$ -Gemisch“ erzeugt wird.

In Mariupol sind Aufreinigungsanlagen für Rohkrypton/Rohxenon sowie Rohneon (und vermutlich Helium) durch Ingas AE sowie in Odessa für Rohkrypton/Rohxenon durch Cryoin Engineering Ltd. in Betrieb.





## Vereinigte Staaten von Amerika



### Helium

Seit 100 Jahren wird in den USA kommerziell Helium gewonnen; seit dieser Zeit dominiert die USA den Weltheliummarkt. Über viele Jahrzehnte waren die USA der einzige Heliumproduzent weltweit. Erst im letzten Jahrzehnt begann der Einfluss der USA zu sinken und wird in den kommenden Jahren vermutlich weiter deutlich abnehmen.

Die erste US-amerikanische Erdgasbohrung mit erhöhter Heliumführung wurde im Frühjahr 1903 durch eine kleine Firma in Dexter, Kansas, niedergebracht. In nur rund 120 m Teufe wurde ein Erdgasvorkommen angetroffen, das 250.000 m<sup>3</sup> Erdgas/d schüttete, das anders als andere Erdgase aber nicht brannte. Spätere Analysen der University of Kansas ergaben eine Zusammensetzung von 71,89 % N<sub>2</sub>, 15,02 % CH<sub>4</sub>, 0,80 % H<sub>2</sub>, 0,20 % O<sub>2</sub> sowie 12,09 % „inerten Gasen“, darunter 1,84 % He.

Bis 1906 wurden 44 weitere Erdgasvorkommen in Kansas und Missouri auf Helium analysiert. In allen war Helium in erhöhten Gehalten nachweisbar, wobei sich geologische Strukturen im Untergrund abzeichneten und ein Zusammenhang zwischen hohen Stickstoffgehalten und erhöhter Heliumführung deutlich wurde. Da es zu damaliger Zeit keinerlei Nutzung für Helium gab, blieb es bei diesen ersten Beobachtungen.

Im Jahr 1914 machte der Chemiker Dr. Géza-Victor Austerweil in seinem Buch „Die angewandte Chemie in der Luftfahrt“ darauf aufmerksam, dass sich das nicht-brennbare Helium besser als Wasserstoff zur Ballonfüllung eignen würde. Es gäbe nur leider nicht genug davon.

Nach Kriegseintritt am 6.4.1917 wuchs auch in den USA (vgl. Kanada) das Interesse, Helium für Aufklärungsluftschiffe zu verwenden. Besonders das voll entwickelte Petrolia-Erdgasfeld nahe Wichita Falls, Texas, rückte in den Blickpunkt der Regierung, da dort seit 1907 bekanntermaßen stickstoffreiches Erdgas mit 1 % He gefördert wurde. Im Juli 1917 wurde beschlossen, das 1910 gegründete US Bureau of Mines (USBM) mit der Sicherstellung der zukünftigen strategischen Heliumversorgung der USA zu beauftragen. Durch verschiedene Firmen wurden daraufhin unter dem Codenamen „Argon Plant“ und unter Nutzung eines Teils des Petrolia Erdgases drei kleinere Heliumpilotanlagen errichtet:

- Argon Plant No. 1 in Fort Worth durch Linde Air Products (Anm.: Rechtsvorgängerin der späteren Praxair, Inc.), Inbetriebnahme im März 1918, Durchsatzkapazität 140 m<sup>3</sup> Erdgas/d, Produktion von Heliumgas mit 70 % He, nach Aufreinigung mit 92 % He, stillgelegt im Januar 1919.
- Argon Plant No. 2 in Fort Worth durch Air Reduction Company, Inbetriebnahme 1.5.1918, Durchsatzkapazität 140 m<sup>3</sup> Erdgas/d, Produktion von Heliumgas mit 70 % He, stillgelegt im April 1919 und später umgebaut zu einer Heliumaufreinigungsanlage.
- Argon Plant No. 3 in Fort Worth durch Jeffries-Norton Company, Inbetriebnahme 1.10.1918, Durchsatzkapazität 830 m<sup>3</sup> Erdgas/d, Produktion von Heliumgas mit 20 % He, stillgelegt und verschrottet im Juni 1919.

Das Unternehmen Linde Air Products setzte sich auf dem eng begrenzten Anbietermarkt für Heliumanlagen durch und wurde am 22.10.1918 – 20 Tage vor Kriegsende – beauftragt, eine kommerzielle Anlage mit einer Kapazität von 830 m<sup>3</sup> Helium/d zu errichten. Im April 1921 ging diese Anlage in Produktion und produzierte in den ersten vier Monaten 7.200 m<sup>3</sup> Helium. Bis zur endgültigen Stilllegung der Anlage im Januar 1929 aufgrund Erschöpfung des Petrolia-Erdgasfeldes produzierte sie 1,3 Mio. m<sup>3</sup> Helium, eine zuvor für unglaublich gehaltene Menge.

Nach dem 1. Weltkrieg planten auch die USA drei große Luftschiffe in Betrieb zu nehmen, die jeweils zwischen 28.000 und 56.000 m<sup>3</sup> Helium für ihre Erstbefüllung benötigen würden. Am 3.3.1925 wurde deshalb der „*Helium Conservation Act of 1925*“ erlassen, in dem sämtliche Aktivitäten rund um den Roh-

stoff Helium in die Verantwortung des US Bureau of Mines übertragen wurden. Die Nutzung von Helium durch nicht-staatliche Unternehmen und der Export von Helium wurden zudem in einer ersten Ergänzung zum „*Helium Conservation Act*“ ab dem 3.3.1927 verboten. Nach Auflösung des USBM zum Ende des Jahres 1995 ging die Verantwortung für Helium im Jahr 1998 auf das US Bureau of Land Management (USBLM) über.

Im Jahr 1925 wurde die Nutzungsmöglichkeit von Helium für Tauchzwecke entdeckt. Im Jahr 1926 kam die Behandlung von Asthma mittels Helium hinzu.

Das USBM hatte bereits 1919 ein großes Heliumerkundungsprogramm aufgesetzt und auf Staatsland zwei große Erdgasvorkommen mit erhöhten Heliumgehalten gefunden:

- Nr. 1: Woodside Dome in Emery County, Utah, mit Erlass vom 21.3.1924 als Helium Reserve No. 1 ausgewiesen
- Nr. 2: Harley Dome in Grand County, Utah, mit Erlass vom 26.6.1933 als Helium Reserve No. 2 ausgewiesen

Im Jahr 1927 errichtete dann auch die private Girdler Corporation aus Louisville, Kentucky, zwei Heliumanlagen in Dexter, Kansas (s. o.), und in Thatcher, Colorado. Bei Thatcher war im März 1927 Erdgas erbohrt worden, das neben 81 % N<sub>2</sub> mehr als 7 % He enthielt. Diese beiden privaten Heliumanlagen produzierten zwischen Oktober 1927 und Februar 1930 zusammen rund 220.000 m<sup>3</sup> Helium. Nach Inkrafttreten der zweiten Ergänzung zum „*Helium Conservation Act*“ im Jahr 1937 (s. u.) trat die Regierung in Verhandlungen mit der Besitzerin, konnte letztendlich die beiden Anlagen zum 3.11.1938 erwerben, aber baute sie dann doch 1944 ab.

Mittlerweile war im Jahr 1924 das Cliffside-Erdgasvorkommen in Potter County, Texas, entdeckt worden, das rund 1,75 % He enthielt. Nachdem das USBM mit den Eigentümern des Feldes 1927 einen Abnahmevertrag geschlossen hatte, begann im Februar 1928 die Detailerkundung auf Helium. Ab August 1928 wurde westlich Amarillo, Texas, eine neue Heliumanlage errichtet und nach deren Fertigstellung am 6.5.1929 die ersten 5.500 m<sup>3</sup> Helium per Zug an die Air Force nach Langley, Virginia, versandt. In den 1930er Jahren wurde die Heliumanlage bei Amarillo aus vier Bohrungen im Cliffside-Erdgasfeld mit täglich 830.000 m<sup>3</sup> Erdgas versorgt, aus dem täglich 12.500 m<sup>3</sup> Helium abgetrennt werden konnten. 1933 und 1935 gingen jedoch zwei Luftschiffe der USA durch Unglücke verloren, wodurch das Regierungsinteresse an Helium deutlich sank. Um die Anlage in Amarillo überhaupt noch in Betrieb halten zu können, durften daraufhin ab 1936 Helium an die Goodyear Zeppelin Corporation „vermietet“ und auch an die US-amerikanische Gesundheitsbehörde zur Asthmabehandlung abgegeben werden. Als dann am 6.5.1937 das deutsche Luftschiff Hindenburg beim Landeanflug auf Lakehurst, New Jersey, Feuer fing und aufgrund seiner Wasserstoff- statt Heliumfüllung in Flammen aufging, wurde in einer zweiten Ergänzung zum „*Helium Conservation Act*“ ab dem 1.9.1937 das Verkaufs- und Exportverbot von Helium wieder aufgehoben. 1938 wurden 3.250 m<sup>3</sup> Helium an private Kunden, meistens Kliniken, veräußert. Bis Mitte des Jahres 1939 wuchs die private Nutzung von Helium in den USA auf 28.000 m<sup>3</sup> an. Der Wunsch des Deutschen Reichs nach Erwerb von 500.000 m<sup>3</sup> Helium wurde jedoch nicht erfüllt.

Mit Beginn des 2. Weltkriegs und späteren Kriegseintritts der USA ab dem 8.12.1941 wuchs der militärische Bedarf an Helium erneut um ein Vielfaches an. Auch der nicht-staatliche Bedarf, vor allem für das neu entwickelte Magnesiumschweißen von Flugzeugteilen unter einer Heliumatmosphäre, benötigte große Mengen des Edelgases. 1941 wurden in den USA bereits 75.000 m<sup>3</sup> Helium von Unternehmen nachgefragt. Die Amarillo Anlage konnte nur 1 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a produzieren, so dass eine weitere Anlage (Exell Plant) nahe Masterson, Texas, mit einer Kapazität von 665.000 m<sup>3</sup> konzipiert wurde und am 13.3.1943 in Produktion ging. Sie nutzte Erdgas aus dem südwestlichen Teil des Panhandle-Erdgasfeldes (Channing Gebiet in Moore, Potter, Oldham und Hartley Counties, Texas), das rund 1 % Helium enthielt.

Im Jahr 1924 wurde im Rattlesnake-Erdöl- und -Erdgasfeld nahe Shiprock, New Mexico, erstmals Erdöl und bei einer tieferen Bohrung im Juni 1942 in 2.100 m Teufe auch Erdgas mit 73 % N<sub>2</sub> und 7,6 % He entdeckt. Dieses neue und bedeutende Heliumvorkommen wurde bis Mai 1943 erschlossen und dann vom USBM zum symbolischen Preis von 1 US\$ übernommen.

Obwohl die Amarillo- und die Exell-Anlagen bei voller Auslastung sogar über ihren Maximalkapazitäten produzierten, überstieg die Nachfrage des Militärs das Angebot an Helium weiterhin deutlich. Schon im Frühjahr 1943 hatte man daher mit dem Bau weiterer Heliumanlagen in Otis und Cunningham, beide Kansas, sowie nahe Shiprock, New Mexico, begonnen. Die Otis-Anlage ging im Oktober 1943, die Cunningham-Anlage im Januar 1944 und die Navajo Anlage bei Shiprock im März 1944 in Betrieb. Bereits nach nur 18 Tagen Produktionszeit wurde die Navajo-Anlage wegen Überkapazitäten jedoch in den Standby-Modus versetzt. Mit vier der fünf Anlagen in Produktion konnte das USBM im Fiskaljahr 1944 (1.7.1944 – 30.6.1945) 3,8 Mio. m<sup>3</sup> Helium erzeugen.

Wie auch nach dem 1. Weltkrieg brach nach dem Ende des 2. Weltkriegs die Nachfrage nach Helium wieder rasch ein. Die Cunningham-Anlage wurde im Juli 1945 abgebaut, da das liefernde Erdgasfeld Förderprobleme hatte. Die Otis-Anlage wurde einen Monat später vorübergehend stillgelegt. Im Bush-Dome Horizont (ein randlich abgeschlossener Dolomitsteinhorizont im Liegenden einer undurchlässigen Anhydritsteinschicht) des Cliffsides-Erdgasfelds hatte man schon Anfang des Jahres 1945 begonnen, zuvor abgetrenntes Helium zur vorübergehenden Speicherung wieder einzupressen. Bis Ende Juni 1945 gelangten so bereits 560.000 m<sup>3</sup> Helium in das Erdgasfeld zurück. Bis Ende Juni 1948 hatte sich diese Menge auf 1,9 Mio. m<sup>3</sup> Helium erhöht.

1949 gelang es technisch erstmals hochreines Helium (Grade-A) mit einer Reinheit von 99,995 % He (heute: >99,997 % He) zu erzeugen. Zuvor war die Reinheit auf 98,2 % begrenzt gewesen. Die Exell-Anlage wurde entsprechend umgerüstet und lieferte bald dieses von der Schweißindustrie in immer größeren Mengen nachgefragte Gas. Im August 1950 wurde aufgrund des Koreakrieges die Amarillo Anlage reaktiviert (endgültig stillgelegt am 15.4.1970), gefolgt von der Otis Anlage im März 1951 (endgültig stillgelegt im Jahr 1968). 1953 folgte schließlich auch die Navajo-Anlage bei Shiprock. Im Sommer 1955 drang jedoch unerwartet Lagerstättenwasser in die liefernde Rattlesnake Erdgaslagerstätte ein und verhinderte so ihre weitere Nutzung. Nur 1,2 Mio. m<sup>3</sup> Helium aus einer berechneten Reserve von über 22 Mio. m<sup>3</sup> Helium waren bis dahin extrahiert worden.

Die Nachfrage nach Helium, v. a. Grade-A Helium, wuchs Mitte der 1950er Jahre deutlich an, worauf das USBM kurzfristig mit einer Erweiterung der Kapazität der Exell-Anlage von 2,5 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a auf 6,7 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a ab Juni 1957 reagierte. 1960 kamen Kapazitäten von weiteren 1,7 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a und 1968 dann noch einmal von 1,1 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a hinzu. Erst 1998 wurde die Exell-Heliumanlage dann endgültig stillgelegt. Ebenfalls zur Deckung der Nachfrage wurden zwischen 1955 und 1958 1,9 Mio. m<sup>3</sup> Helium aus dem Cliffsides-Speicherfeld entnommen. Nicht-staatliche Nachfragen nach Helium wurden nachrangig bedient.

Das durch die Colorado Interstate Gas Company neu entdeckte Keyes-Erdgasfeld in Cimarron County, Oklahoma, bot sich als weiteres zukünftiges Heliumvorkommen an und wurde bereits ab August 1954 vorrangig untersucht. Im April 1958 einigte sich das USBM mit der Gasgesellschaft über die weitere Nutzung und im August 1959 ging aufbauend auf diesem Erdgasvorkommen die Keyes-Heliumanlage in Produktion. Im Juli 1959 war endlich auch die Heliumanlage bei Shiprock wieder in Betrieb gegangen. Die verfügbare Heliummenge wuchs daraufhin so gewaltig, dass in den nächsten Jahren jeweils zwischen 2,1 und 4,8 Mio. m<sup>3</sup> Helium erneut in das Cliffsides-Speicherfeld eingepresst werden konnten.

1950 wurden in Apache County, Arizona, mit dem Pinta-Dome- und den drei Navajo-Springs-Erdgasfeldern (Navajo Springs, East Navajo Springs, Tohache Wash) mehrere weitere Erdgasvorkommen entdeckt, die, wie spätere Untersuchungen zeigten, Erdgas mit 89,4 – 90,6 % N<sub>2</sub>, 8,0 – 9,0 % He, 0,8 – 0,9 % CO<sub>2</sub> und 0,5 – 0,7 % Ar enthielten. Die gewinnbaren Heliumreserven des Pinta-Dome-Erdgasfeldes wurden

auf 16,6 Mio. m<sup>3</sup> und die der Navajo-Springs-Erdgasfelder auf 8,5 Mio. m<sup>3</sup> geschätzt. Darauf aufbauend entschloss sich zuerst die Kerr-McGee Oil Industries, Inc. mit dem Bau einer privaten Heliumanlage, die dann zwischen 1961 und Anfang 1976 aus dem Pinta-Dome-Erdgasfeld geförderten 181 Mio. m<sup>3</sup> Erdgas rund 15 Mio. m<sup>3</sup> Helium produzierte. Die Arizona Helium Corporation folgte mit einer weiteren Anlage, die zwischen 1964 und 1976 in Produktion war. Sie bereitete aus 75 Mio. m<sup>3</sup> Erdgas aus den Navajo-Springs-Erdgasfeldern rund 6 Mio. m<sup>3</sup> Helium auf. 1967 war in Apache County zudem noch das Dineh-bi-Keyah-Erdgasfeld (mit 4,65 – 5,65 % He) entdeckt worden, dessen gewinnbare Heliumressourcen ursprünglich auf 36 Mio. m<sup>3</sup> (derzeit nachgewiesene Heliumreserven 53 Mio. m<sup>3</sup>, PUSCH et al. 2018) geschätzt wurden und das erst im Jahr 2003 in Förderung ging. Das Helium aus dem Dineh-bi-Keyah Erdgas wurde in der Heliumanlage der damaligen Newpoint Gas Services, Inc. in Shiprock abgetrennt.

Zum 13.9.1960 wurde eine weitere Ergänzung zum „*Helium Conservation Act*“ von 1925 rechtskräftig. Mit diesem „*Helium Amendment Act*“ wurde es dem USBM erlaubt, Rohhelium aus privaten Heliumanlagen zu kaufen und für eine spätere Verwendung durch die Regierung im Cliffside-Feld zu speichern. Das Innenministerium durfte hierfür vom Finanzministerium bis zu 47,5 Mio. US\$ jährlich leihen, wurde aber verpflichtet, diese Gelder später zurück zu zahlen. Um hierfür ausreichend Mittel zu generieren, wurde der Preis für Grade-A Helium für staatliche Abnehmer von 0,68 US\$/m<sup>3</sup> auf 1,26 US\$/m<sup>3</sup> angehoben.

14 Unternehmen sandten daraufhin Vorschläge für private Heliumanlagen ein, von denen fünf in der 2. Jahreshälfte 1961 genehmigt wurden:

- Northern Helix Company für eine Anlage in Bushton, Kansas, einsatzbereit ab Dezember 1962. (1979 errichtete die Union Carbide Corporation in Bushton eine Aufreinigungsanlage, um dort aus dem voraufbereiteten Rohhelium direkt Grade-A Helium herstellen zu können).
- Cities Service Helix, Inc. für eine Anlage in Ulysses, Kansas, einsatzbereit ab 1963
- National Helium Corporation mit einer Anlage in Liberal, Kansas, mit einer geplanten Kapazität von 160.000 m<sup>3</sup> Helium/d, einsatzbereit ab Juli 1963.
- Phillips Petroleum Company mit zwei Anlagen in Dumas, Texas, einsatzbereit ab April 1963, und Sherman County, Texas, in Betrieb seit Dezember 1962.

Um diese Heliumanlagen mit dem Cliffside-Speicherfeld zu verbinden, wo das Rohhelium zwischengespeichert werden sollte, wurden diese Anlagen durch ein 725 km langes Pipelinenetz miteinander verbunden. Dieses Netz war ab Juli 1962 einsatzbereit.

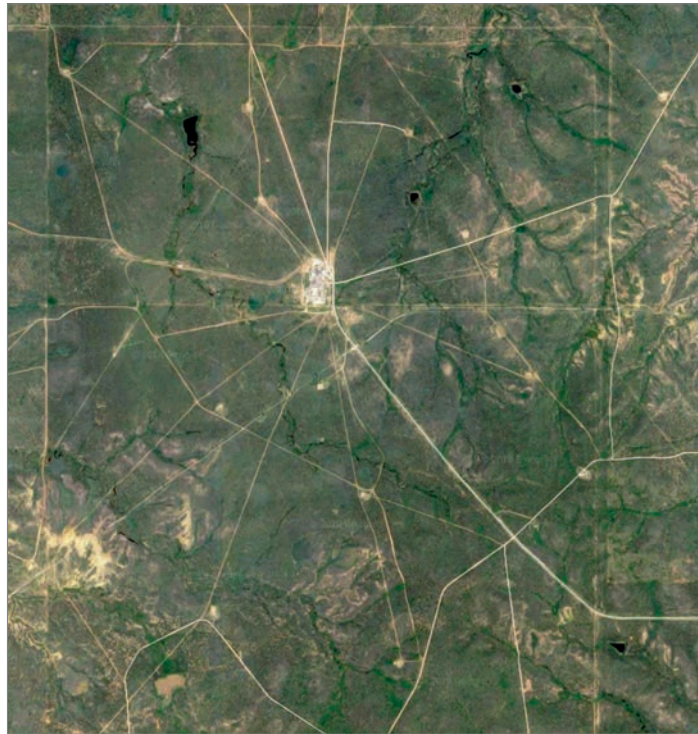
Der vom USBM festgesetzte Preis von 1,26 US\$/m<sup>3</sup> Grade-A Helium war hoch genug, um private Wettbewerber auf den Plan zu rufen. 1964 wurde auf Basis des Reichel-Erdgasvorkommens (mit 1 – 2 % He) in Rush County, Texas, in Otis, Kansas, durch die Kansas Refined Helium Company eine Heliumanlage mit einer Kapazität von 5 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a errichtet. 1966 kam auf Basis des Greenwood-Erdgasfeldes im südöstlichen Colorado/südwestlichen Kansas durch die Alamo Chemical Company und Gardner Cryogenics eine Heliumanlage am Standort Elkhart, Kansas, hinzu. Im Jahr 1967 waren drei private Heliumanlagen, Navajo Springs, Otis und Elkhart, in der Lage, sowohl gasförmiges, als auch flüssiges Helium in Grade-A Qualität zu liefern und den vom USBM festgesetzten Preis für Regierungsbehörden um 0,50 US\$/m<sup>3</sup> deutlich zu unterbieten. Alle Privatunternehmen bezogen daher ihr Helium aus diesen drei nicht-staatlichen Heliumanlagen.

1966 war aufgrund des boomenden US-Raumfahrtprogramms mit 22,4 Mio. m<sup>3</sup> Helium der Höhepunkt des Heliumbedarfs durch US-amerikanische Regierungsbehörden erreicht. Niemals in den letzten 50 Jahren wurde diese Menge wieder überschritten. Dennoch gingen im Jahr 1968 noch vier weitere nicht-staatliche Heliumanlagen in Produktion, die sowohl Rohhelium, als auch Grade-A Helium produzieren konnten:

- Cities Service Cryogenics mit einer Rohheliumanlage in Scott City, Kansas, und einer über eine eigene Pipeline angeschlossene Aufreinigungsanlage (Jayhawk Plant) (Grade-A) in Ulysses, Kansas.
- Arizona Helium Corporation in Navajo, Arizona, stillgelegt 1969.

- Air Reduction Company in Teec Nos Pos, Arizona (Rohhelium), stillgelegt 1969, mit einer Aufreinigungsanlage zu Grade-A Helium in Shiprock, New Mexico.
- Linde Air Products in Amarillo, Texas, stillgelegt 1969.

Durch die stark zurückgehenden staatlichen Verkäufe von Helium, den sich dadurch vergrößernden Schuldenberg des Innenministeriums und die seit der Ergänzung zum Helium Act im Jahr 1960 mittlerweile im Cliffsides-Feld eingelagerten 790 Mio. m<sup>3</sup> Helium, sah das USBM keine Notwendigkeit zum Ankauf weiteren Heliums und kündigte den vier Zulieferunternehmen zum 28.3.1971 ihre Verträge. Alle Unternehmen klagten gegen diese Entscheidung; ihr Helium wurde jedoch ab dem 12.11.1973 nicht mehr angenommen. In den nächsten beiden Jahren gingen rund 120 Mio. m<sup>3</sup> Helium ungenutzt verloren, bevor sich das USBM 1975 entschloss, das staatliche Cliffsides-Speicherfeld gegen eine Speichergebühr auch privaten Unternehmen zur Speicherung von Rohhelium zur Verfügung zu stellen. Northern Helix Co. akzeptierte als erstes Unternehmen diese Möglichkeit und speicherte ab September 1975 jährlich rund 17 Mio. m<sup>3</sup> Helium ein.



**Abb. 54: Satellitenbild des Cliffsides-Heliumspeicherfelds nordwestlich Amarillo, Texas, USA. Gut sichtbar sind die Pipelines von/zur Förder-/Entnahmebohrungen, Foto: Google Earth.**

Generell sah man das Cliffsides-Speicherfeld als ein „Heliumschwungrad“ an: im Winter wurde besonders viel Erdgas nachgefragt und dadurch auch Helium produziert, dieses aber kaum verwendet. Im Sommer sanken die Erdgasnachfrage und damit auch die Heliumproduktion. Für die Industrie stand aber ausreichend im Winter eingespeichertes Helium zur Verfügung.

Zum 1.7.1976 waren die Schulden des Innenministeriums gegenüber dem Finanzministerium aufgrund des Helium Conservation Act von 1925 bzw. seiner Ergänzungen auf 412 Mio. US\$ mit jährlichen Zinsen von 24 Mio. US\$ angewachsen. Dem stand aus Heliumverkäufen ein Jahreserlös von 1 Mio. US\$ gegenüber.

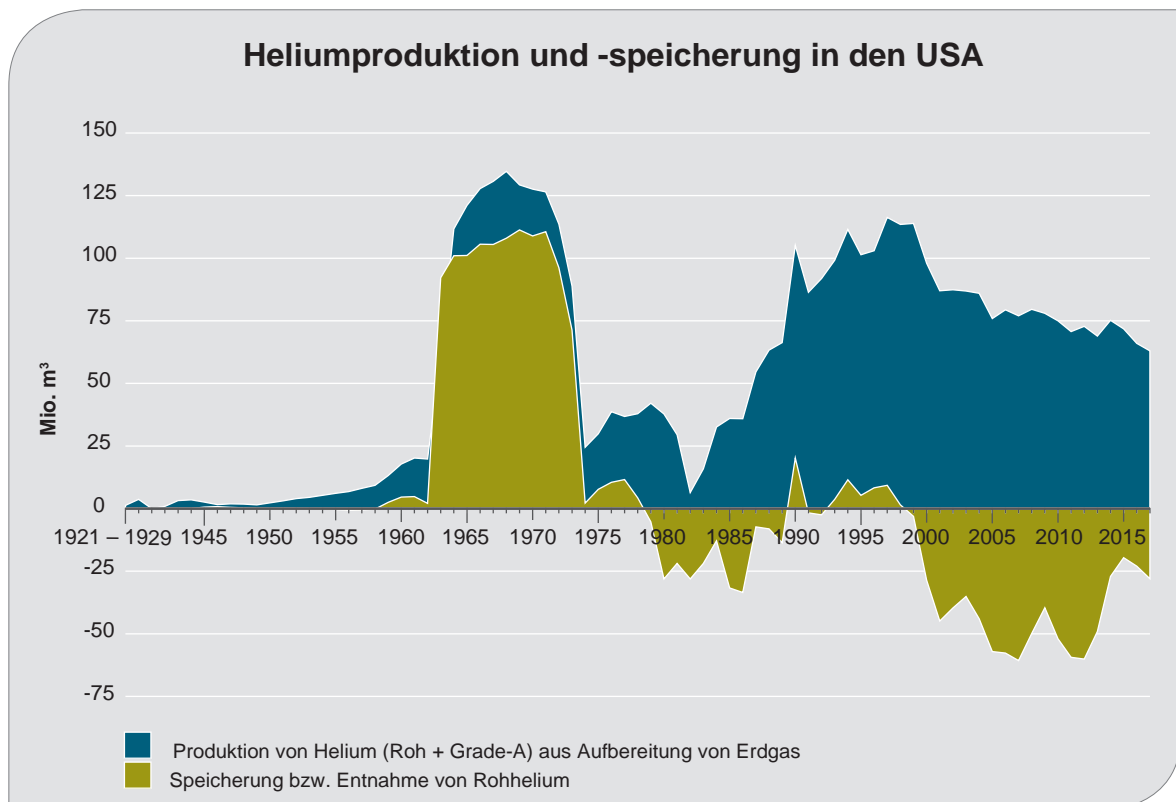
Bereits 1962 war in Sublette County, Wyoming, durch die Mobil Oil Corporation das große Tip-Top-Erdgasfeld entdeckt worden, das damals aufgrund der ungünstigen Zusammensetzung mit 66 % CO<sub>2</sub>, 21 % CH<sub>4</sub>, 5 % H<sub>2</sub>S und 0,6 % He nicht entwickelt wurde. Die Heliumressourcen betragen immerhin 1,25 Mrd. m<sup>3</sup>. 1978 sollte das Feld nun doch entwickelt werden, wobei vor einer Nutzung des Methans zuvor alle störenden Bestandteile abgetrennt werden mussten. 1986 ging durch ExxonMobil am Standort Shute Creek, Wyoming, dann eine Heliumanlage in Produktion, die anfangs eine Kapazität von 42.000 m<sup>3</sup> Helium/d und mittlerweile von 110.000 m<sup>3</sup> Helium/d bzw. 40,2 Mio. m<sup>3</sup> Helium/a besitzt. Damit handelt es sich um die derzeit größte Heliumanlage der Welt.

Mit Beginn der 1990er Jahre wurde offensichtlich, dass das Speicherprogramm der Regierung für Helium in dieser Form nicht mehr benötigt wurde. Auch waren die Schulden des BLM gegenüber dem Finanzministerium aufgrund des Heliumprogramms auf über 1,3 Mrd. US\$ angewachsen. Am 9.10.1996 trat daher

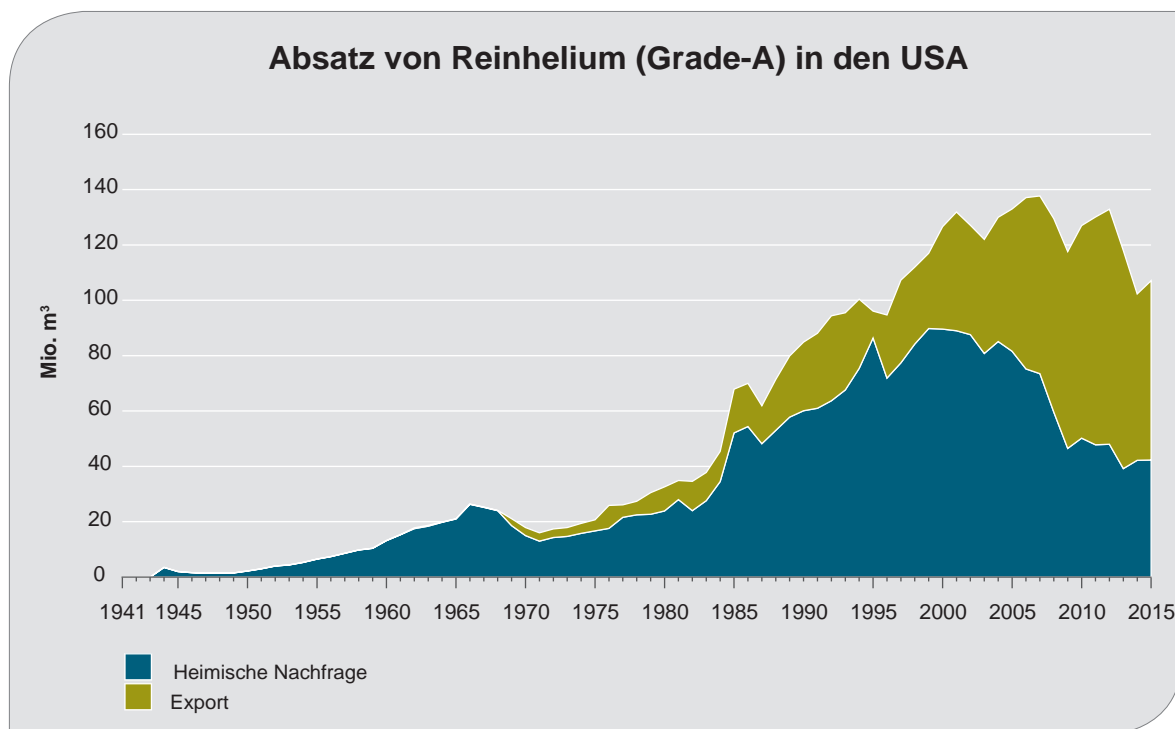
eine weitere Ergänzung zum „*Helium Conservation Act*“ in Kraft, die als „*Helium Privatization Act*“ von 1996 bekannt wurde. Sie bestimmte, dass die US-Regierung bis

- 1998 die Produktion und den Verkauf von Grade-A Helium einstellen müsse (worauf im März 1998 die letzte staatliche Heliumanlage, Exell Plant in Texas, geschlossen und später an ein Privatunternehmen verkauft wurde).
- 2015 alle Helium bezogenen Vermögen abgestoßen und besonders,
- spätestens zum 1.1.2015 (bis auf einen für die Regierung reservierten Rest von 16,6 Mio. m<sup>3</sup>) sämtliches Helium aus der nationalen strategischen Heliumreserve, dem Cliffside-Speicherfeld, das damals 978 Mio. m<sup>3</sup> Helium enthielt, „ohne Marktschwankungen zu verursachen“ verkaufen müsse, um die Schulden gegenüber dem Finanzministerium zu begleichen.

Als zur Erfüllung der letzten Forderung notwendigen Verkaufspreis wurde im Jahr 2000 ein Preis von 1,55 US\$/m<sup>3</sup> Rohhelium festgelegt, während Privatunternehmen damals Rohhelium für 1,15 US\$/m<sup>3</sup> verkauften. Der Heliummarkt war stabil und man rechnete nicht mit erhöhten Bedarfen seitens der US-amerikanischen Industrie oder gar der Regierung. Vergessen hatte man dabei aber den stark steigenden internationalen Bedarf, der nicht durch die damals bestehenden Heliumanlagen in Algerien, Katar, Polen und Russland gedeckt werden konnte. Der Verkaufspreis durch die US-amerikanischen Privatproduzenten stieg stark an, so dass die Kunden vorrangig auf Helium aus dem Cliffside-Speicherfeld auswichen, dessen Abgabepreis ja festgelegt worden war und nur sehr zögerlich erhöht wurde. Besonders die US-amerikanischen Forschungseinrichtungen waren betroffen und argumentierten gegen die strikte Umsetzung des „*Helium Privatization Act*“ von 1996.



**Abb. 55: Produktion und Speicherung von Helium in den USA, nach Daten des US Bureau of Mines bzw. US Geological Surveys.**



**Abb. 56: Entwicklung des Absatzes von Reihelium (Grade-A) in den USA, nach Daten des US Bureau of Mines bzw. US Geological Surveys.**

Im Jahr 2004 nahm das USBLM in Zusammenarbeit mit drei privaten Heliumproduzenten und einem Energieunternehmen am Cliffs-Feld eine Anreicherungsanlage für Rohhelium (CHEU) in Betrieb (Abb. 57). Diese kann täglich bis zu 600.000 m<sup>3</sup> Rohgas mit 29,4 % He (Durchschnittsgehalt des eingespeicherten Rohheliums) zu

- Rohhelium (mit 75 – 78 % He zur Ein- und Rückleitung in das Heliumpipelinennetz),
  - Erdgas (zur Einspeisung in das nationale Erdgaspipelinennetz) sowie
  - Erdgaskondensat (zum Verkauf an Privatunternehmen)
- verarbeiten.

Mit Wirkung vom 2.10.2013 wurde der „Helium Privatization Act“ in Form des „Helium Stewardship Act“ überarbeitet. Dieser regelt nun, dass im Cliffs-Feld 83,2 Mio. m<sup>3</sup> Helium für Regierungszwecke verbleiben und das restliche, dort befindliche Helium in vorgegebenen Mengen bis zum Erreichen der o. g. Restmenge öffentlich verauktioniert werden soll. Bisher fanden in den USA auf Veranlassung des USBLM folgende dementsprechende Heliumauktionen statt:

- 1. Auktion 30.7.2014: verauktioniert 2,6 Mio. m<sup>3</sup> Rohhelium, Durchschnittserlös 5,82 US\$/m<sup>3</sup>
- 2. Auktion 26.8.2015: verauktioniert 7,6 Mio. m<sup>3</sup> Rohhelium, Durchschnittserlös 3,74 US\$/m<sup>3</sup>
- 3. Auktion 20.7.2016: verauktioniert 11,1 Mio. m<sup>3</sup> Rohhelium, Durchschnittserlös 3,86 US\$/m<sup>3</sup>
- 4. Auktion 19.7.2017: verauktioniert 13,9 Mio. m<sup>3</sup> Rohhelium, Durchschnittserlös 4,29 US\$/m<sup>3</sup>
- 5. Auktion 31.8.2018: verauktioniert 5,8 m<sup>3</sup> Rohhelium, Durchschnittserlös 10,09 US\$/m<sup>3</sup>
- 6. Auktion 9.2018: verauktioniert 2,5 m<sup>3</sup> Rohhelium, Durchschnittserlös 6,31 US\$/m<sup>3</sup>

Bis zum 30.9.2021 muss das USBLM zudem alle verbliebenen Bestandteile des staatlichen Heliumsystems (z. B. das Pipelinennetz) veräußern. Der US Geological Survey wurde beauftragt, eine Bewertung der nationalen Heliumressourcen vorzunehmen und dem Kongress eine internationale Heliumbedarfsstudie vorzulegen.

Im Jahr 2016 führte der „Helium Rush“ aufgrund beständig hoher Heliumpreise zu einer Suche nach neuen Heliumquellen v. a. in den USA. Neue Technologien, wie Druckwechseladsorption und Membranseparati-



**Abb. 57: Die Crude Helium Enrichment Unit (CHEU) auf dem Cliffside-Speicherfeld nordwestlich Amarillo, Texas, USA, aus dem All, Foto: Google Earth.**

on, erlaubten zunehmend die Heliumgewinnung aus vorher uninteressanten Erdgasvorkommen. Dazu kamen die zunehmende Leerung des Cliffside-Speicherfeldes, die damit verbundene öffentliche Diskussion um die Zukunft der Heliumversorgung in den USA sowie schwache Märkte für Erdöl und Erdgas, die die Kohlenwasserstoffunternehmen nach alternativen Einnahmequellen suchen ließen.

Fraglich ist, ob die Daten des USGS/USBLM zur Produktion von Helium in den USA aufgrund der zahlreichen privaten Aktivitäten überhaupt noch vollständig sind. So berichtet der Präsident von American Gas Products (AGP) mit Sitz in Everett, Massachusetts, dem größten Verkäufer von Ballongas in den USA, dass man bei der Heliumversorgung von allen großen Erdgasproduzenten und dem BLM-Erdgas-speicher völlig unabhängig sei und Helium aus fünf unabhängigen Bohrungen beziehe (GARVEY 2017b). Laut Homepage von AGP „besitzt“ das Unternehmen vier eigene Heliumbohrungen in Utah, Colorado, Oklahoma und Kansas. Hierbei könnte es sich allerdings auch um die Förderanlagen von IACX Energy handeln (s. Tab. 34).

Zum 31.12.2017 waren, soweit bekannt, in den USA folgende 19 Heliumanlagen in Betrieb:



Tab. 34: Liste der aktiven, gestundeten und geplanten Heliumanlagen in den USA, soweit bekannt.

Bundesstaat	Bezeichnung/Ort	Betreiber	Kapazität (Mio. m <sup>3</sup> Helium/a)	Inbetriebnahme	Herkunft	Heliumprodukt
Arizona	Dineh-Bi-Keyah	IACX Energy <sup>3)</sup>	1,8 <sup>1)</sup>	2014	Heliumreiche (Stickstoff-)Erdgase	95 – 98 % He
Arizona	St. John	IACX Energy	0,2	geplant	CO <sub>2</sub> -reiche Erdgase mit 0,009 – 0,134 % He	95 – 98 % He
Arizona	Pinta Dome	IACX Energy	0,4	geplant	Heliumreiche (Stickstoff-)Erdgase	95 – 98 % He
Colorado	Ladder Creek/ Cheyenne Wells	DCP Midstream, LLC	14,0 <sup>6)</sup>	(1986), 1998	aus Erdgasfeldern im östlichen Colorado und aus dem Dineh-Bi-Keyah-Erdgasfeld, AZ	95 – 98 % He
Colorado	Badger Wash	IACX Energy	0,2	2015	aus der Erdgasdenitrifizierung	95 – 98 % He
Colorado	Doe Canyon	Air Products Corp., Inc.	6,4 <sup>4)</sup>	2015	CO <sub>2</sub> -reiche Erdgase mit 73,3 % CO <sub>2</sub> , 19,7 % N <sub>2</sub> , 3,94 % CH <sub>4</sub> , 0,5 % He	Grade-A <sup>5)</sup>
Kansas	Jayhawk/Ulysses	Linn Energy, LLC	16,9	1962	Hugoton-Erdgasfeld	Rohhelium
Kansas	Jayhawk/Ulysses	Praxair, Inc.	26,4	(1968), 1998	aus der Anlage Jayhawk/Kansas der Linn Energy, LLC, die He-reiches Erdgas aus dem Hugoton-Erdgasfeld aufbereitet und aus dem Dineh-Bi-Keyah-Erdgasfeld, AZ	Grade-A
Kansas	Bushton*	Praxair, Inc.	18,7	1962	Rohhelium aus dem BLM-Speichernetz	Grade-A
Kansas	Otis	IACX Energy	0,3	2009 2016	aus der Erdgasdenitrifizierung Rohhelium aus dem BLM-Speichernetz	95 – 98 % He Grade-A
Kansas	Otis	Linde Global Helium, Inc.	30,5	(1965), 2009	Otis-Albert-Erdgasfeld	Grade-A
Kansas	Liberal/National	DCP Midstream, LLC	29,2	1963	aus verschiedenen Erdgasfeldern in Oklahoma	Rohhelium
Kansas	Liberal	Air Products Corp., Inc.	27,8	(1966), 1991	aus der Anlage Liberal/Kansas der DCP Midstream, LLC, die He-reiche Erdgase aus verschiedenen Feldern in Oklahoma aufbereitet	Grade-A
Kansas	Hodgeman	IACX Energy	0,9	2013	aus der Erdgasdenitrifizierung	95 – 98 % He

## Fortsetzung Tab. 34.

Bundesstaat	Bezeichnung/Ort	Betreiber	Kapazität (Mio. m <sup>3</sup> Helium/a)	Inbetriebnahme	Herkunft	Heliumprodukt
Oklahoma	Keyes	Badger Midstream Energy, LP	11,6	(1959), 1996	Keyes-Erdgasfeld u. a.	Grade-A
Oklahoma	Paden	IACX Energy	0,2	2015	aus der Erdgasdenitrifizierung	95 – 98 % He
Texas	Fain	Pioneer Natural Resources Co.	3,9	1965	Panhandle-West-Erdgasfeld	Rohhelium
Texas	Borger/Rock Creek	DCP Midstream, LLC	4,0	2001	Panhandle-West-Erdgasfeld	Rohhelium
Texas	Sunray	Eagle Rock Energy Partners, LP	3,5	1993	Panhandle-West- & Hugoton-Erdgasfelder	Rohhelium
Texas	Sher-Han	DCP Midstream, LLC	12,5	1962	Hugoton-Erdgasfeld	Rohhelium
Texas	Gruver/Panhandle*	Air Products Corp., Inc.	3,1	1982	aus der Anlage Sher-Han/Texas der DCP Midstream, LLC, die He-reiche Erdgase aus verschiedenen Feldern in Nordtexas aufbereitet	Grade-A
Utah	Harley Dome	IACX Energy	2,8	2013	Heliumreiche (Stickstoff-)Erdgase	95 – 98 % He
Utah	Woodside Dome	IACX Energy	1,7	geplant	Heliumreiche (Stickstoff-)Erdgase	95 – 98 % He
Wyoming	Shute Creek	ExxonMobil Gas Marketing	40,2 <sup>2)</sup>	(1966), 1986	LaBarge-Erdgasfeld	Grade-A
Wyoming	Dry Piney Creek	QEP Resources	19,4	Q3 2019	LaBarge-Erdgasfeld	n. v.

\* gestundet, 1) Verdoppelung der Kapazität angedacht, 2) Produktion 2013: 36,1 Mio m<sup>3</sup>, 2014: 38,8 Mio. m<sup>3</sup>, 2015: 37,4 Mio. m<sup>3</sup>, 2016: 35,8 Mio. m<sup>3</sup>, 3) Feldinhaber: 75 % NASCO Energie & Rohstoff AG, 25 % Nacogdoches Oil & Gas, Inc. 4) vermutete Produktion 3,8 Mio. m<sup>3</sup>/a aufgrund geringer CO<sub>2</sub>-Nachfrage (FORBES 2017), 5) in Form von flüssigem Helium, 6) nach GUBLER et al. (2016): Produktion ca. 2 Mio. m<sup>3</sup>/a aufgrund geringem Erdgasangebot

## Heliumgewinnung in den Vereinigten Staaten von Amerika

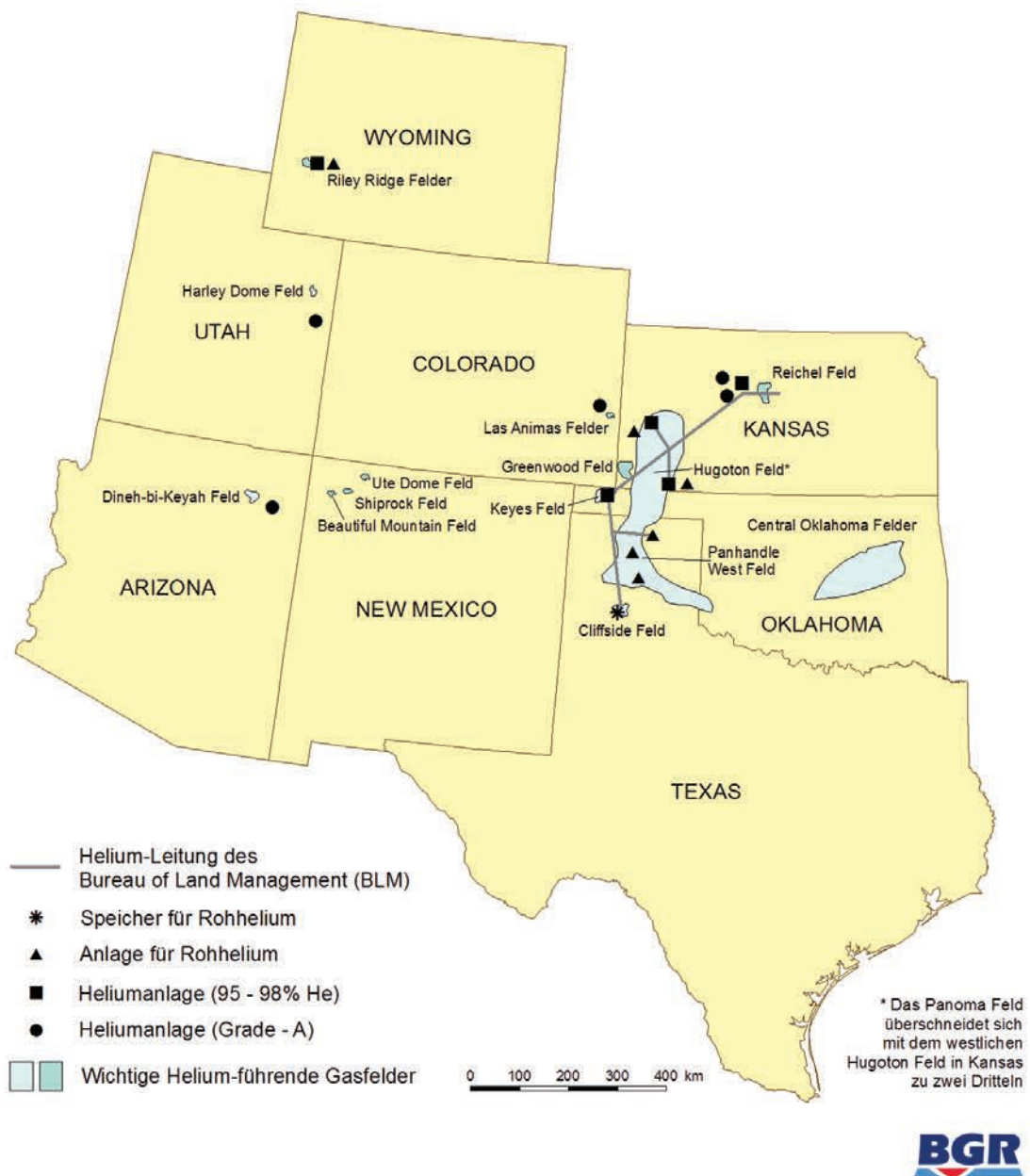


Abb. 58: Übersichtskarte wichtiger heliumführender Erdgasfelder sowie der derzeitigen Anlagen zur Gewinnung, zum Transport und zur Speicherung von Helium in den USA, Karte: Marcel Radke (BGR), nach USGS Minerals Yearbook.

Weitere Unternehmen planen, ebenfalls in den USA Helium zu produzieren, darunter Highlands Natural Resources, Inc. aus heliumführenden Erdgasen in Montana, American Helium Inc. aus dem Four Corners Gebiet im Südwesten der USA und Gulf Energy Corporation aus einem Erdöl- und Erdgasfeld in New Mexico (GARVEY 2017a).

In den USA sind derzeit 104 Erdgasfelder mit stark erhöhten Heliumgehalten in elf Bundesstaaten bekannt (vgl. Tab. 35). Sechs dieser Felder: Hugoton, Panoma, Keyes, Panhandle West, das Riley-Ridge-Gebiet des LaBarge-Feldes und das als Heliumspeicher genutzte Cliffside-Feld enthalten rund 97 % aller in den USA identifizierten Heliumreserven.

**Tab. 35: Übersicht über die bedeutendsten US-amerikanischen Erdgasfelder mit erhöhten Heliumgehalten, nach verschiedenen Einzelquellen und Internetangaben. Die Heliumgehalte variieren häufig innerhalb der teils sehr großen Felder.**

Bundestaat	Feldname	Ursprünglicher Erdgasinhalt (Mrd. m <sup>3</sup> )	Gehalt He (%)	Ursprünglicher Heliuminhalt (Mrd. m <sup>3</sup> )
Kansas/Oklahoma/Texas	Hugoton	2.300 <sup>3)</sup>	0,2 – 1,9 (Ø 0,6)	13,8
Texas	Panhandle	850	0,1 – 2,2 (Ø 0,5)	4
Arizona/New Mexico	St. Johns	445 <sup>1)</sup>	0,1 – 0,8	1,8
Wyoming	LaBarge	11,1 <sup>4)</sup>	0,0 – 0,6 (Ø 0,6)	0,4
Oklahoma	Keyes	28	0,3 – 2,7 (Ø 2,2)	n.v.
Kansas	Greenwood	28	0,4 – 0,7	n.v.
Texas	Cliffside	n.v.	1,7 – 1,8	Heliumspeicher
Kansas	Panoma	n.v.	0,4 – 0,6	n.v.
Kansas	Otis-Albert	4,8	1,2 – 2,3 (Ø 1,3)	0,07
Arizona	Dineh-bi-Keyah	1,4	4,7 – 5,7	0,05
Arizona	Pinta Dome	n.v.	5,4 – 9,8 (Ø 8,0)	0,017
Colorado	Model Dome	0,09	6,7 – 8,3 (Ø 8,0)	0,007
New Mexico	Rattlesnake	0,07	7,3 – 8,0 (Ø 7,6)	0,005
New Mexico	Hogback	n.v.	1,4 – 8,0 (Ø 7) <sup>2)</sup>	n.v.
New Mexico	Ute Dome	n.v.	0,1 – 0,6	n.v.
New Mexico	Table Mesa	n.v.	5,4 – 5,7	n.v.
New Mexico	Beautiful Mountain	n.v.	4,0 – 7,1	n.v.
Utah	Lisbon	n.v.	0,3 – 1,1	n.v.
Utah	Harley Dome	n.v.	0,2 – 8,0 (Ø 7,0)	n.v.
Utah	Woodside Dome	n.v.	0,7 – 1,5	n.v.
Wyoming	Tip Top	n.v.	0,4 – 0,8	n.v.
Montana	Cabin Creek	n.v.	0,4	n.v.
Kansas	Reichel	n.v.	1,5 – 2,0	n.v.
Kansas	Cunningham	n.v. <sup>2)</sup>	0,5 – 1,2	n.v.

n.v. = nicht verfügbar, 1) davon ca. 140 Mrd. m<sup>3</sup> gewinnbar, 2) erschöpft, 3) davon ca. 1.120 Mrd. m<sup>3</sup> gewinnbar, Restvorräte ca. 100 Mrd. m<sup>3</sup> (Stand 2017), Förderung (2016): 2,7 Mrd. m<sup>3</sup>, jährlich um 6 - 7 % abnehmend (FORBES 2017), 4) nach ILLICH-MANN (2018) betragen die verbliebenen Gasreserven des He-reichen Riley-Ridge-Gebietes innerhalb des La-Barge-Erdgasfeldes im Jahr 2016 860 Mio. m<sup>3</sup>.

Zum 31.12.2006 (aktuellere Daten liegen nicht vor) betragen die Heliumvorräte der USA 20,6 Mrd. m<sup>3</sup> Helium, darunter 4,25 Mrd. m<sup>3</sup> „measured reserves“ (inkl. 670 Mio. m<sup>3</sup> im Cliffs-Speicherfeld), 5,33 Mrd. m<sup>3</sup> „probable resources“, 5,93 Mrd. m<sup>3</sup> „possible resources“ und 5,11 Mrd. m<sup>3</sup> „speculative resources“. Die großen Erdgasfelder Hugoton, Panhandle West, Panoma, Riley Ridge und Cliffs enthielten zusammen geschätzte 3,9 Mrd. m<sup>3</sup> Helium.

PHETTEPLACE (2014) berechnete von 29 unkonventionellen Erdgaslagerstätten (Schiefergas) in den USA deren geologischen Gesamterdgasinhalt (12.037 Mrd. m<sup>3</sup>) sowie deren geologischen Gesamtheliuminhalt, der bei Heliumgehalten zwischen 0,415 und 0,0014 % bei rund 6,98 Mrd. m<sup>3</sup> liegt. Da allerdings vermutlich nur rund 10 % des Schiefergases technisch gewinnbar wäre, sinkt auch das technisch gewinnbare Heliumvolumen auf rund 700 Mio. m<sup>3</sup>, verteilt auf 29 Einzellagerstätten.

GUBLER et al. (2016) schließen sich andere Experten an, die meinen, dass Schiefergestein generell zu porös sei, um die kleinen Heliumatome effektiv zurückzuhalten. Zudem seien die Heliumgehalte in den US-amerikanischen Schiefergasvorkommen nicht hoch genug, um eine wirtschaftliche Abtrennung des enthaltenen Heliums zu erlauben. Eine erhöhte Schiefergasproduktion in den USA würde dementsprechend nicht zu einer erhöhten Heliumproduktion führen.

## Neon

Die Linde AG betreibt weltweit über 35 Luftzerlegungsanlagen und hat im Jahr 2016 seine Rohneonkapazitäten durch eine neue Anlage in La Porte, Texas, um 40 Mio. l/a erhöht. Im Rahmen der geplanten Fusion der Linde Gruppe mit der US-amerikanischen Praxair, Inc. sollen jedoch die meisten US-amerikanischen Aktivitäten der Linde Gruppe an das neu gegründete Joint-Venture MG-Industries, ein Konsortium der Messer Gruppe und des CVC Capital Partners Fund VII, verkauft werden. Nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) gibt es an sechs weiteren Standorten in den USA Luftzerlegungsanlagen mit Rohneonproduktion (s. Kap. 5.2).

## Argon

Nach SURESH et al. (2016) betragen die Argonproduktionskapazitäten in den USA im Februar 2016 ca. 2.950 t/d (s. Tab. 36), entsprechend knapp 1,1 Mio. t/a bzw. 645 Mio. m<sup>3</sup>/a.

**Tab. 36: Argonproduktionskapazitäten in den USA, gegliedert nach Unternehmen, Stand Februar 2016 (SURESH et al. 2016).**

Unternehmen	Anzahl von Standorten <sup>1)</sup> von Luftzerlegungsanlagen mit Argonkapazitäten	Gesamtargonkapazität (short tons/d)
Airgas Merchant Gases <sup>3)</sup>	18	65
Air Liquide America L.P.	60	1.825
Air Products and Chemicals, Inc.	32 <sup>4)</sup>	287
Linde Group	41	280
Matheson Tri-Gas, Inc.	17	96
Praxair, Inc.	50	695
Procal (Air Products/Air Liquide)	3	n.v.
Dakota Gasification Company	1	n.v.
<b>Gesamt</b>	<b>222</b>	<b>~3.250<sup>2)</sup></b>

1) teils mehrere Einzelanlagen an einem Standort, 2) entsprechend ca. 2.950 t, 3) in 2016 durch Air Liquide America I.P. übernommen, 4) nach Internetangaben im Sommer 2018: 34 Standorte

Nach GARVEY (2017c) war die Argonproduktionskapazität in den USA im Jahr 2016 jedoch deutlich höher und lag bei 5.200 short tons (st)/d (= 4.700 t/d), was einer Jahresproduktion von über 1,7 Mio. t/a bzw. 1,03 Mrd. m<sup>3</sup>/a entspricht. Diese Kapazität verteilte sich prozentual auf folgende Unternehmen: Praxair, Inc (30 %), Air Liquide America L.P. (34 %), Air Products and Chemicals, Inc. (16 %), Linde Group (13 %), Matheson Tri-Gas, Inc. (6 %) sowie andere Unternehmen (1 %). Bis zum Jahr 2019 soll die Argonkapazität auf 5.600 st/d, d. h. mit Steigerungsrate von + 2,8 %/a, anwachsen. Die prozentuale Verteilung auf Unternehmen wird von GARVEY (2017d) wie folgt vorhergesagt: Praxair, Inc (32 %), Air Liquide America L.P. (31 %), Air Products and Chemicals, Inc. (15 %), Linde Group (13 %), Matheson Tri-Gas, Inc. (8 %) sowie andere Unternehmen (1 %).

Aufgrund der hohen inländischen Produktion von ca. 645 Mio. m<sup>3</sup> Ar/a (nach SURESH et al. 2016) bzw. 1,03 Mrd. m<sup>3</sup> Ar/a (nach GARVEY 2017c) kann damit der inländische Bedarf der USA (nach SURESH et al. (2016) in Höhe von 810 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 2016) vollständig gedeckt werden. Im Jahr 2017 wurden von den USA nur rund 30,4 Mio. m<sup>3</sup> Argon importiert, fast ausschließlich aus Kanada, und 35,7 Mio. m<sup>3</sup> Argon exportiert, v. a. in verschiedene Länder Mittelamerikas.

Seit einigen Jahren werden alle neuen größeren Luftzerlegungsanlagen in den USA standardmäßig mit Argon-Kolonnen ausgerüstet, um die hohe Nachfrage zu decken.

### **Krypton, Xenon**

Nach SPIRITUS & BETZENDAHL (2018) gibt es in den USA an 13 Standorten Luftzerlegungsanlagen mit Rohkrypton/Rohxenon-Produktion (vgl. Kap. 5.4). Eine Aufreinigungsanlage wird von der Linde AG am Standort Alpha, New Jersey (s. o.) und eine weitere Aufreinigungsanlage von der Praxair, Inc. in Burns Harbor, Indiana, betrieben. Erwähnenswert ist zudem die Firma Electronic Fluorocarbons LLC, die in ihrer Anlage in Ivyland, Pennsylvania, zahlreiche Spezialgase darunter Neon, Krypton und Xenon in Reinheiten bis zu 7.0 herstellt.

### **Literatur**

BROADHEAD, R. F. (2005): Helium in New Mexico – geologic distribution, resource demand, and exploration possibilities. – *New Mexico Geology*, **27**, 4: 93 – 101, 8 Abb., 3 Tab.; So-corro, NM – URL: [http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/tilghman1/docs/nmg\\_v27\\_n4\\_p93.pdf](http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/tilghman1/docs/nmg_v27_n4_p93.pdf) [Stand 08.10.2018].

DUNLAP, R.E. (1969): The geology of the Pinta Dome-Navajo Springs helium fields, Apache County, Arizona.- M.Sc. Thesis, Department of Geology, University of Arizona: 73 S., 6 Tab., zahlr. Abb. u. Karten; Tucson, AZ – URL: [http://arizona.openrepository.com/arizona/bitstream/10150/552036/1/AZU\\_TD\\_BOX262\\_E9791\\_1969\\_21.pdf](http://arizona.openrepository.com/arizona/bitstream/10150/552036/1/AZU_TD_BOX262_E9791_1969_21.pdf) [Stand 08.10.2018].

FORBES, W. (2017): Helium – macro view. – Report by Edison Investment Research for North American Helium: 17 S., 13 Abb.; London – URL: <https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwid-POC1fbdAhVvh4sKHWauALsQFjABegQICBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.edison-investmentresearch.com%2F%3FACT%3D19%26ID%3D20087%26dir%3Dsectorreports%26field%3D19&usg=AOvVaw0EIYNtvW7hbxUPYR7T3gO2> [Stand 08.10.2018].

GARVEY, M. D. (2017a): Non-conventional helium sourcing: A North American update.- *gasworld magazine*, 4.1.2017: 4 S., 2 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/non-conventional-helium-sourcing/2012016.article> [Stand 08.10.2018].

GARVEY, M. D. (2017b): Helium: Qatar blockade and impact on the US distributor. – gasworld magazine, 1.9.2017: 3 S.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/helium-qatar-blockade-and-impact-on-the-us-distributor/2013353.article> [Stand 08.10.2018].

GARVEY, M. D. (2017c): US air gases market report – key industries keep demand growing. – gasworld magazine, 4.1.2017: 8 S., 3 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/us-air-gases-market-report/2012020.article> [Stand 08.10.2018].

GARVEY, M. D. (2017d): US argon market report – key industries keep supply growing. – gasworld magazine, 1.4.2017: 10 S., 3 Abb.; Cornwall, UK – URL: <https://www.gasworld.com/us-argon-market-report/2012504.article> [Stand 08.10.2018].

GILFILLAN, S. M. V., BALLENTINE, C. J., HOLLAND, G., BLAGBURN, D., LOLLAR, B. S., STEVENS, S., SCHOELL, M. & CASSIDY, M. (2008): The noble gas geochemistry of natural CO<sub>2</sub> gas reservoirs from the Colorado Plateau and Rocky Mountain provinces, USA. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **72**, 4: 1174 – 1198, 14 Abb., 4 Tab.; Los Angeles, CA – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703707005807> [Stand 08.10.2018].

PACHECO, N. & ALI, S.F. (2008): Helium resources of the United States – 2007. – US Department of the Interior. Bureau of Land Management, Technical Note, **429**: iii + 20 S., 2 Abb., 1 Tab.; Amarillo, TX – URL: [https://www.blm.gov/nstc/library/pdf/TN429\\_3\\_09.pdf](https://www.blm.gov/nstc/library/pdf/TN429_3_09.pdf) [Stand 08.10.2018].

PETERSON, J. B. (2012): The US federal helium reserve. – In: NUTTALL, W.J., CLARKE, R.H. & GLOWACKI, B.A. (Hrsg.): The future of helium as a natural resource: 48 – 54, 3 Abb., 6 Tab.; London – New York (Routledge).

PHETTEPLACE, T. (2014): Examining the geological potential for helium production in the United States. – Senior Thesis at the Ohio State University. 18 S., 7 Abb., 2 Tab.; Columbus, OH – URL: [https://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/61504/phetteplace\\_thesissigned2014.pdf?sequence=3](https://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/61504/phetteplace_thesissigned2014.pdf?sequence=3) [Stand 08.10.2018].

PUSCH, G., LIERMANN, N. & WARSTAT, J. (2018): Helium - wichtiger Rohstoff aus Erdgas und geothermalen Quellen. – *Erdöl Erdgas Kohle*, **134**, 7/8: 295 – 301, 10 Abb., 4 Tab.; Hamburg.

RAUZI, S. L. (2003): Review of helium production and potential in Arizona. – Arizona Geological Survey, Open-File Report, OFR 03-05: 29 S., 18 Abb.; Tucson, AZ – URL: [http://repository.azgs.az.gov/sites/default/files/dlio/files/2010/u14/ofr\\_03\\_05.pdf](http://repository.azgs.az.gov/sites/default/files/dlio/files/2010/u14/ofr_03_05.pdf) [Stand 08.10.2018].

RAUZI, S. L. & FELLOWS, L. D. (2003): Arizona has helium. – *Arizona Geology*, **33**, 4: 5 S., 3 Abb., 2 Tab.; Tucson, AZ – URL: [https://repository.asu.edu/attachments/79794/content/Winter\\_2003.pdf](https://repository.asu.edu/attachments/79794/content/Winter_2003.pdf) [Stand 08.10.2018].

SEARS, B. (2012): A history of the helium industry. – In: NUTTALL, W.J., CLARKE, R.H. & GLOWACKI, B.A. (Hrsg.): The future of helium as a natural resource: 15 - 47, 3 Abb.; London – New York (Routledge).

SPENCER, J. E. (1983): Helium resources and production in Arizona. – Arizona Geological Survey, Fieldnotes, **13**, 2: 6 – 16, 4 Abb.; Tucson, AZ – URL: <http://www.azgs.az.gov/Mineral%20Scans/Arizona%20Helium%20Resources%202.pdf> [Stand 08.10.2018].

USBUREAUOFLANDMANAGEMENT(BLM)–URL:<https://www.blm.gov/programs/energy-and-minerals/helium> [Stand 08.10.2018].

USGEOLOGICALSURVEY(USGS)–URL:<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/helium/>[Stand 08.10.2018].





## Anhang

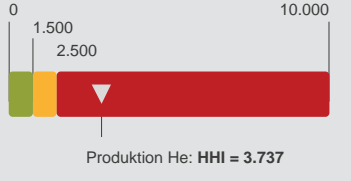

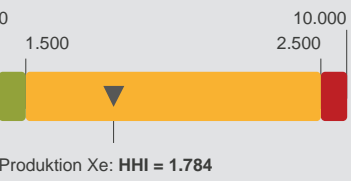

---

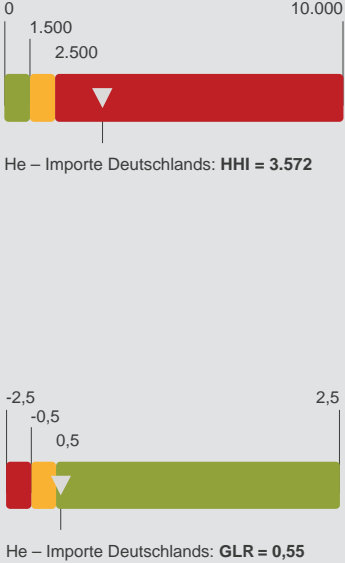

Indikatoren und Risikobewertung



## Indikatoren und Risikobewertung für Helium und Xenon

Tab. 37: Indikatoren und Risikobewertung für Helium und Xenon.

Indikator	Ergebnisse (Datenbasis 2016)	Bewertung  unkritisch   mäßig   bedenklich
<b>Angebot und Nachfrage</b>		
<b>Länderkonzentration der Produktion (HHI)::</b>  Summe der quadrierten Anteile an der Primärproduktion	He-Produktion: <b>HHI = 3.737</b>	 Produktion He: HHI = 3.737
<b>Gewichtetes Länderrisiko der Produktion (GLR):</b>  Summe der Anteile der Primärproduktion multipliziert mit dem Länderrisiko  <i>Bewertungsskala HHI:</i> 10.000 – 2.500 = <i>bedenklich</i> 2.500 – 1.500 = <i>mäßig</i> < 1.500 = <i>unkritisch</i>  <i>Bewertungsskala GLR:</i> -2,5 – -0,5 = <i>bedenklich</i> -0,5 – 0,5 = <i>mäßig</i> -0,5 – 2,5 = <i>unkritisch</i>	He-Produktion: <b>GLR = 0,78</b>  Xe-Produktion: <b>HHI = 1.784</b>  Xe-Produktion: <b>GLR = 0,46</b>	 Produktion He: GLR = 0,78   Produktion Xe: HHI = 1.784   Produktion Xe: GLR = 0,46

Indikator	Ergebnisse (Datenbasis 2016)	Bewertung  unkritisch    mäßig    bedenklich
<b>Geopolitische Risiken und Marktmacht</b>		
<p><b>Diversifizierung der Importe Deutschlands (HHI):</b></p> <p>Summe der quadrierten Anteile der deutschen Importe</p> <p><b>Gewichtetes Länderrisiko der Importe Deutschlands (GLR):</b></p> <p>Summe der Anteile der Importe multipliziert mit dem Länderrisiko der Lieferländer</p> <p><i>Bewertungsskala HHI:</i>  10.000 – 2.500 = bedenklich  2.500 – 1.500 = mäßig  &lt; 1.500 = unkritisch</p> <p><i>Bewertungsskala GLR :</i>  -2,5 – -0,5 = bedenklich  -0,5 – 0,5 = mäßig  -0,5 – 2,5 = unkritisch</p>	<p>He-Importe Deutschlands:  <b>HHI = 3.572</b></p> <p>He-Importe Deutschlands:  <b>GLR = 0,55</b></p>	 <p>He – Importe Deutschlands: <b>HHI = 3.572</b></p> <p>He – Importe Deutschlands: <b>GLR = 0,55</b></p>
<p><b>Wettbewerbsverzerrungen:</b></p> <p><i>Qualitative Bewertung</i></p>	<p><b>unbedenklich (qualitativ)</b></p>	 <p>Wettbewerbsverzerrungen: <b>unbedenklich</b></p>
<p><b>Firmenkonzentration (HHI):</b></p> <p>Summe der quadrierten Anteile der Bergwerksförderung / Weiterverarbeitung einzelner Firmen.</p> <p><i>Bewertungsskala HHI:</i>  10.000 – 2.500 = bedenklich  2.500 – 1.500 = mäßig  &lt; 1.500 = unkritisch</p>	<p><b>k.A.</b></p>	

## Glossar

<b>Diversifizierung der Importe</b>	Die Diversifizierung der Importe errechnet sich mithilfe des HHI, wobei die mengenmäßigen Anteilswerte am Import auf Länderebene herangezogen werden.
<b>Firmenkonzentration</b>	Die Firmenkonzentration wird mithilfe des HHI berechnet, wobei Anteilswerte der Bergbaufirmen und der Raffinerien an der weltweiten Gesamtproduktion herangezogen werden.
<b>Gewichtetes Länderrisiko</b>	Das gewichtete Länderrisiko (GLR) errechnet sich aus der Summe der Anteilswerte der Länder an der Produktion, dem Nettoexport oder dem deutschen Import, multipliziert mit dem Länderrisiko (LR). Das gewichtete Länderrisiko liegt in einem Intervall zwischen +2,5 und -2,5. Bei Werten über 0,5 wird das Risiko als niedrig eingestuft, bei Werten zwischen +0,5 und -0,5 liegt ein mäßiges Risiko vor und Werte unter -0,5 gelten als kritisch.
<b>GHT</b>	Gewichtsprozent
<b>Herfindahl-Hirschman-Index (HHI)</b>	Der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) ist eine Kennzahl, die die unternehmerische Konzentration in einem Markt angibt. Sie wird durch das Summieren der quadrierten Marktanteile aller Wettbewerber errechnet. Die Bewertungsskala für den HHI richtet sich nach den Vorgaben des U.S. Department of Justice und der Federal State Commission, die einen Markt bei einem HHI unter 1.500 als gering und zwischen 1.500 und 2.500 Punkten als mäßig konzentriert definieren. Bei einem Indexwert über 2.500 gilt ein Markt als hoch konzentriert.
<b>Länderkonzentration</b>	Die Länderkonzentration wird mithilfe des HHI berechnet, wobei jahresbezogene Anteilswerte der Bergwerksförderung, der Raffinadeproduktion oder der weltweiten Nettoexporte auf Länderebene herangezogen werden.
<b>Länderrisiko</b>	Das Länderrisiko (LR) ergibt sich aus dem Mittelwert der sechs „Worldwide Governance Indicators“ der Weltbank, die jährlich die Regierungsführung von über 200 Staaten weltweit bewertet. Gemessen werden (1) Mitspracherecht und Rechenschaftspflicht, (2) politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt, (3) Leistungsfähigkeit der Regierung, (4) Regulierungsqualität, (5) Rechtsstaatlichkeit und (6) Korruptionsbekämpfung.
<b>Lebensdauer kennziffer</b>	Die Lebensdauer kennziffer ergibt sich aus dem Quotienten der derzeitigen Reserven und der aktuellen Weltbergwerksförderung. Die Lebensdauer kennziffer (statische Reichweite) gibt einen Hinweis auf den Stand der Exploration und das Maß, in welchem zukünftig Explorationsaktivitäten notwendig sind. Die Kennziffer sagt nichts über den Erschöpfungszeitpunkt eines Rohstoffes aus.
<b>Marktdeckung</b>	Die Marktdeckung ergibt sich aus dem Quotienten der Nachfrage (Raffinadeverbrauch) und des Angebots (Raffinadeproduktion).
<b>Raffinadeproduktion</b>	Summe aus primärer und sekundärer Raffinadeproduktion. Primäre Raffinade: Produktion von Raffinademetall aus Erzen und Konzentraten der Bergwerksförderung. Sekundäre Raffinade: Produktion von Raffinademetall aus recycelten Materialien (Abfälle, Schrott, Aschen und Rückstände).
<b>Raffinadeverbrauch</b>	Summe aus der Raffinadeproduktion und der Differenz aus Raffinadeimport und Raffinadeexport zuzüglich der Veränderung der Lagerbestände von Jahresbeginn bis -ende.
<b>Recyclingrate (EOL-RR)</b>	Die End-of-Life-Recyclingrate (EOL-RR) ist der Quotient aus der Menge des dem Recycling zugeführten Altschrotts eines Rohstoffes und der Gesamtmenge des theoretisch in den End-of-Life-Produkten angefallenen Rohstoffes.

<b>Reserven und Ressourcen</b>	Reserven sind die zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbaren Rohstoffmengen. Ressourcen sind nachgewiesene, aber derzeit technisch-wirtschaftlich und/oder wirtschaftlich nicht gewinnbare sowie nicht nachgewiesene, aber geologisch mögliche, künftig gewinnbare Rohstoffmengen.
<b>t Inh.</b>	Angabe des Metallinhalts in Tonnen.
<b>Wachstumsraten CAGR</b>	Wachstumsraten basieren auf der jährlichen durchschnittlichen Wachstumsrate (engl.: Compound Annual Growth Rate, CAGR). Diese stellt den durchschnittlichen Prozentsatz dar, um den der Anfangswert einer Zeitreihe auf hypothetische Folgewerte für die Berichtsjahre wächst, bis der tatsächliche Endwert der Zeitreihe erreicht ist. Tatsächliche Ausschläge der Folgejahre in der Zwischenzeit wirken sich dabei nicht aus.
<b>Zukünftige Marktdeckung</b>	Die zukünftige Marktdeckung ergibt sich aus dem Quotienten der zukünftigen Nachfrage und des zukünftigen Angebots. Für das zukünftige Angebot sowie die zukünftige Nachfrage werden jeweils zwei Szenarien erstellt. Das zukünftige Angebot errechnet sich aus der Summe der derzeitigen Bergwerksförderung und einer zusätzlichen Jahresförderkapazität aus neuen Bergbauprojekten.



**Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der  
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)**

Wilhelmstraße 25–30  
13593 Berlin  
Tel.: +49 30 36993 226  
dera@bgr.de  
www.deutsche-rohstoffagentur.de

ISBN: 978-3-943566-54-3 (PDF)