

35

DERA Rohstoffinformationen



Rohstoffrisikobewertung – Gallium

Impressum

Editor: 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

Autoren: Maren Liedtke, Dieter Huy

Datenstand: Januar 2018

Titelbilder: © BGR
© solosergio-Fotolia.com

Zitierhinweis: LIEDTKE, M. & HUY, D. (2018): Rohstoffrisikobewertung – Gallium. –
DERA Rohstoffinformationen 35: 86 S.; Berlin.

ISBN: 978-3-943566-50-5 (Druckversion)

ISBN: 978-3-943566-51-2 (PDF)

ISSN: 2193-5319

Berlin, 2018



DERA Rohstoffinformationen

Rohstoffrisikobewertung – Gallium



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Zusammenfassung	7
Executive Summary	9
1 Der Rohstoff Gallium	11
1.1 Einführung	11
1.2 Vorkommen	11
1.3 Gewinnung und Verarbeitung	13
1.4 Verwendung	18
1.5 Substitution	25
1.6 Umwelt und Toxizität	25
2 Risikobewertung	27
2.1 Preisentwicklung	27
2.2 Angebot und Nachfrage	30
2.2.1 Primärproduktion von Rohgallium	30
2.2.1.1 Länderkonzentration und gewichtetes Länderrisiko der Produktionskapazitäten	33
2.2.2 Raffinadeproduktion	37
2.2.3 Sekundärproduktion	38
2.2.4 Wichtige Produzenten nach Ländern	39
2.2.5 Lagerhaltung	47
2.2.6 Nachfrage	48
2.3 Derzeitige Marktdeckung	52
2.4 Handel	53
2.4.1 Handelsbeschränkungen	61
2.5 Angebots- und Nachfragetrends	61
2.5.1 Vorräte	61
2.5.2 Potenziale	63
2.5.3 Zukünftiges Angebot	65
2.5.3.1 Länderkonzentration und gewichtetes Länderrisiko des zukünftigen Angebots	67
2.5.4 Zukünftige Nachfrage	67
2.5.5 Zukünftige Marktdeckung	69
3 Fazit	71
4 Literaturverzeichnis	72
Anhang	79
Indikatoren und Risikobewertung für Gallium	80
Glossar	85

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Extraktionsprozess von Primärgallium aus Bauxit oder Zinkerz.	14
Abb. 2:	Arbeitsschritte bei der GaAs-Waferproduktion und -verarbeitung mit anteiligen Galliumströmen.	17
Abb. 3:	Verfahren zum Recycling von Gallium aus arsenhaltigen Galliumreststoffen.	18
Abb. 4:	Galliumverwendung nach Anwendungsbereichen für das Jahr 2013 und Aufteilung in die Anwendungsbereiche Hochfrequenzbauteile und Optoelektronik für die wichtigsten Nachfrageländer für 2013 und 2016.	23
Abb. 5:	Zeitliche Veränderung der weltweiten Galliumverwendung nach den Anwendungsbereichen Hochfrequenzbauteile und Optoelektronik und Verbindungen zwischen 2009 und 2012.	23
Abb. 6:	Galliumverwendung in den USA nach Anwendung zwischen 1993 und 2015.	24
Abb. 7:	Preisentwicklung der Jahresdurchschnittspreise für 6N-Gallium; Vergleich Nominal-, Realpreis bezogen auf den US\$ 2017.	27
Abb. 8:	Preisentwicklung von 4N-Gallium (Monatsdurchschnitte).	28
Abb. 9:	Historische Jahresvolatilität für die Monatsdurchschnittspreise von 4N-Gallium.	29
Abb. 10:	Entwicklung der weltweiten Produktion und der Produktionskapazität von primärem Rohgallium zwischen 1973 bzw. 1994 und 2017.	31
Abb. 11:	Entwicklung der Produktionskapazität für Primärgallium und deren jährliche Wachstumsrate sowie des 6N-Galliumpreises.	32
Abb. 12:	Entwicklung der Länderkonzentration (HHI) und des gewichteten Länderrisikos (GLR) der Kapazität für die Primärproduktion von Gallium.	34
Abb. 13:	Länder mit Produktionskapazitäten von Primärgallium im Jahr 2016 und deren aggregierter World-Governance-Indikator (Länderrisiko).	35
Abb. 14:	Länder mit Produktionskapazitäten von Primärgallium im Jahr 2006 und deren aggregierter World-Governance-Indikator (Länderrisiko).	36
Abb. 15:	Entwicklung der Kapazität und Produktion von Primärgallium, der Raffinadeproduktion und -kapazität sowie der Recyclingkapazität.	37
Abb. 16:	Weltweite Galliumnachfrage.	48
Abb. 17:	Entwicklung von Angebot und Nachfrage sowie der Marktdeckung.	54
Abb. 18:	Die wichtigsten Handelsströme für Gallium im Jahr 2016.	57
Abb. 19:	Nettoexporte von Gallium für die Jahre 2012 und 2016.	58
Abb. 20:	Die größten Import- und Exportländer von Deutschland für Gallium im Jahr 2016.	59
Abb. 21:	Galliumimporte und -exporte Deutschlands im Zeitraum 2002–2017.	61
Abb. 22:	Verteilung der Bauxitreserven.	62
Abb. 23:	Potenzial der primären Rohgalliumgewinnung aus den weltweit geförderten Bauxiten und Zinkerzen bei einem durchschnittlichen Galliumgehalt von 50 ppm im Erz und einer Ausbringungsrate von 30 %.	63
Abb. 24:	Veränderung der Länderkonzentration der Primärproduktionskapazitäten bis 2026.	67
Abb. 25:	Entwicklungsszenario von Angebot und Nachfrage von Gallium bis 2026 (Angebotsszenario 1).	69
Abb. 26:	Entwicklungsszenario von Angebot und Nachfrage von Gallium bis 2026 (Angebotsszenario 2).	70

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Eigenschaften von Gallium.	11
Tab. 2:	Geschätzte Primärproduktion von Rohgallium 2014–2016.	30
Tab. 3:	Geschätzte Primärproduktion von Rohgallium in China 2009–2016 nach verschiedenen Quellen.	30
Tab. 4:	Länder und ihre Kapazitäten für die Primärproduktion von Gallium für verschiedene Jahre.	31
Tab. 5:	Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten der Kapazitäten der Länder für ausgewählte Zeiträume.	33
Tab. 6:	Geopolitisches Risiko (Länderkonzentration und gewichtetes Länderrisiko) der Produktionskapazität von Primärgallium 2006 und 2016 im Vergleich.	34
Tab. 7:	Raffinadekapazität, Raffinadeproduktion und Primärproduktion für verschiedene Jahre.	38
Tab. 8:	Recyclingkapazitäten und -produktion Japans für verschiedene Jahre.	38
Tab. 9:	Wichtige Produzenten von Primärgallium.	39
Tab. 10:	Wichtige Produzenten für Sekundär- und Raffinadegallium.	40
Tab. 11:	Galliumnachfrage nach Ländern.	48
Tab. 12:	Angebot und Nachfrage von Gallium.	53
Tab. 13:	Globale Galliumexporte (HS 811292XX).	55
Tab. 14:	Globale Galliumimporte (HS 811292XX).	55
Tab. 15:	Galliumimporte und -exporte für die Jahre 2012 und 2016.	60
Tab. 16:	Zusätzliche mögliche Jahreskapazität für Primärgallium 2026.	66



Zusammenfassung

Das Elektronikmetall Gallium ist in den letzten Jahrzehnten aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften zu einem unverzichtbaren Hightech-Rohstoff in zahlreichen Anwendungen vor allem im Bereich der Mikro- bzw. Optoelektronik geworden. Gallium wird hauptsächlich als Verbindungshalbleiter in Form von Galliumarsenid (GaAs) und Galliumnitrid (GaN) verwendet. Die Hauptanwendungen dieser Verbindungshalbleiter sind Hochfrequenz-Bauelemente und optoelektronische Geräte für die Telekommunikationstechnik und LEDs.

Gallium ist mit etwa 18 ppm in der Erdkruste zwar weit verbreitet, aber nur selten in höheren Konzentrationen zu finden. In der Natur kommt Gallium meist als Spurenelement in Sphalerit (Zinkblende), Germanit und Bauxit sowie Kohle vor.

Die Gewinnung erfolgt nur als Beiprodukt im Zuge der Herstellung von Industriemetallen wie Aluminium oder Zink. Wirtschaftlich am bedeutendsten sind zzt. die Vorkommen in Bauxiten, aus denen etwa 90 % des primären Galliums gewonnen werden; aber auch aus Zinkerzen wird Gallium in geringen Mengen produziert. Ein Großteil des Galliums stammt auch aus dem Recycling von Neuschrott, der insbesondere bei der Produktion von Galliumarsenid- und Galliumnitrid-Substraten anfällt. Eine Wiedergewinnung aus Altschrott ist nicht wirtschaftlich.

Die Preisentwicklung von Rohgallium (Reinheit von 99,99 % bzw. 4N) seit 2001 zeigt drei markante Peaks in den Jahren 2001 (Halbleiterboom), 2007 (Einführung von Exportlizenzen in China, höhere Nachfrage für Mobiltelefone und LEDs) und 2011 (Erwartung hoher Nachfrage für CIGS und LEDs), in denen der Preis über 500 US\$/kg gestiegen ist. Seit 2012 sinken die Preise und lagen in den letzten Jahren mit unter 200 US\$/kg unterhalb der Produktionskosten.

Im Jahr 2016 wird die weltweite Primärproduktion von Gallium auf 274 t geschätzt, wobei China der führende Produzent war. Deutschland, Südkorea, Russland, die Ukraine und Japan verfügten 2015 und 2016 ebenfalls über eine geringe Primärproduktion. 2015 lag die gesamte Primärproduktion noch bei geschätzten 470 t.

Die weltweiten Kapazitäten für die Produktion von Rohgallium betragen seit 2015 etwa 720 t, davon befinden sich mehr als 80 % in China, das seit 2009 die Produktionskapazitäten massiv erhöht hat. Außerhalb Chinas befinden sich Produktionskapazitäten in Deutschland, Kasachstan, Südkorea, der Ukraine, Russland, Japan und Ungarn; diese belaufen sich auf rund 118 t.

Insgesamt ist das geopolitische Risiko für die Kapazitätsverteilung der Primärproduktion von Gallium mäßig bedenklich, allerdings besteht eine sehr hohe Länderkonzentration der Kapazitäten der Primärproduktion auf China.

Die weltweiten Sekundärkapazitäten werden auf 270 t geschätzt, Recycling von Neuschrott findet hauptsächlich in Japan, China, Kanada, den USA, Großbritannien, Deutschland und der Slowakei statt. Über die Höhe der Sekundärproduktion gibt es keine klaren Angaben, es wird davon ausgegangen, dass 40 % der Nachfrage durch Recycling gedeckt werden (Recyclinganteil von 40 % an der Produktion).

Das primär und sekundär gewonnene Rohgallium (4N) wird zum Teil weiter aufgereinigt (> 6N). Die Kapazitäten für die Veredelung liegen bei vermutlich 320 t. Die Raffinadeproduktion von Gallium wird allerdings auf nur 180 t geschätzt. China, Japan und USA sind die größten Anbieterländer für Raffinadegallium. Die Aufreinigung von Primärgallium erfolgt vor allem in China, Japan, den USA und Großbritannien, die Hauptproduzenten von Raffinadegallium aus Sekundärmaterial sind Japan, China, USA, Großbritannien, die Slowakei und Deutschland.

Die weltweite Galliumnachfrage wird für das Jahr 2015 auf 320 t geschätzt. Etwa 90 % des weltweiten Galliumbedarfs werden in halbleitenden oder halbisolierenden Substraten und Epitaxieschichten für die Herstellung von integrierten Schaltungen, Feldeffekttransistoren und Leuchtdioden etc. verwendet. Der größte Markt für Gallium ist immer noch Japan, gefolgt von China, USA und Deutschland. Allerdings wächst Chinas Nachfrage schnell und es wird angenommen, dass China Japan in den nächsten Jahren überholt.

Die Handelsdaten spiegeln in etwa die Daten der Produktion von Primär-, Raffinade- und Sekundärgallium sowie die Nachfrage wider. In den Jahren 2012 bis 2016 wurden jährlich 160–195 t Gallium exportiert. Hauptexportland war China gefolgt von Deutschland, Großbritannien und, in wechselnder Reihenfolge, der Slowakei, Südkorea, Russland und den USA. Hauptimporteure waren Deutschland, Japan, Südkorea, Großbritannien und die USA.

Derzeit übersteigt die mögliche Galliumversorgung (Kapazitäten) die Galliumnachfrage bei Weitem, der Galliummarkt ist überversorgt. Dies schlägt sich auch bei der Preisentwicklung nieder. Seit 2013 liegen die Preise für Gallium in Rohform (4N) unter 300 US\$/kg und seit 2015 sogar unter 200 US\$/kg. Erst seit Anfang 2018 steigen die Preise wieder leicht an, was eine Folge der starken Produktionskürzungen bei den Primärproduzenten ist.

Allerdings wird für Gallium eine steigende Nachfrage erwartet. Eine hohe Nachfrage nach LEDs insbesondere in der Allgemeinbeleuchtung, der Ausbau von CIGS-Kapazitäten vor allem in China sowie die Einführung des Mobilfunknetzes der fünften Generation (5G) sind Nachfragetreiber.

Für eine bis zum Jahr 2026 ausreichende Versorgung mit Primärgallium reicht eine Produktionserhöhung bei den bereits vorhandenen Galliumproduzenten aus. Gegenwärtig wird die Angebotskapazität auf 988 t Rohgallium geschätzt (718 t Primärgallium, 270 t Sekundärgallium). Diese Kapazitäten übersteigen eine mögliche Nachfrage von 490 t (bei Nachfragewachstum von 3,9 %/Jahr) bis 845 t (bei Nachfragewachstum von 9,2 %/Jahr) deutlich und können somit die Nachfrage bis 2026 bedienen.

Sollte die Nachfrage unerwartet stark steigen und die vorhandenen Kapazitäten übertreffen (über 11 % Wachstum jährlich), ist davon auszugehen, dass neue Produktionskapazitäten entstehen. Es gibt verschiedene Projekte für zusätzliche Primärgalliumkapazitäten in Höhe von 750 t. Der Status dieser Projekte ist allerdings ungewiss.

Die Potenziale für die Galliumgewinnung sind weit höher als die heutigen Produktionskapazitäten. Um eine künftige Nachfrage auch in weiter Zukunft bedienen zu können, sind Kapazitätserweiterungen bei den Tonerdeproduzenten denkbar. Die Anreicherung von Gallium in der Aluminatlauge findet bei dem Tonerdeproduktionsprozess statt. Allerdings beschäftigen sich nur wenige Firmen auch mit der Gewinnung von Gallium aus dieser Lösung. Potenziell wäre eine jährliche Galliumgewinnung aus der Tonerdeproduktion von geschätzt bis zu 4.000 t möglich.

Executive Summary

The technology metal gallium plays a vital role in the innovation and manufacture of a range of high technology applications and componentry. Owing to its unique properties, gallium is increasingly used in a range of electronic applications, particularly in micro- and optoelectronics and is mainly used as compound semiconductors in the form of gallium arsenide (GaAs) and gallium nitride (GaN). The main applications of these compound semiconductors are high-frequency devices and optoelectronic devices for telecommunications and LEDs.

At 18 ppm gallium is moderately abundant in the earth's crust, however higher concentrations of gallium are relatively scarce. The metal is not found in its solid state and does merely exist in trace amounts in various compounds, including zinc ores (sphalerite), germanite, bauxite, and coal.

Primary gallium is recovered only as a by-product from both the processing of aluminium and zinc ores, with bauxite accounting for approximately 90 % of primary gallium production. Gallium-bearing scrap represents another important part of the supply chain, with gallium-bearing residues generated from gallium arsenide and gallium nitride production accounting for the majority of pre-consumer scrap. The recycling of gallium-bearing post-consumer scrap is currently not viable.

Prices for 4N gallium metal (99.99 %) have spiked three times over the past 18 years with prices exceeding 500 US\$/kg. The price hike in 2001 marks the highest rise in recent history and is attributed to the so-called semiconductor boom when demand from the semiconductor industry increased substantially. Prices also significantly increased in 2007 in response to China's export policy together with a rise in demand from the telecommunications and optoelectronics industries and in 2011 owing to a predicted increase in demand for the manufacture of CIGS and LEDs, respectively. Since 2012, prices have been moderately low and at around 200 US\$/kg in recent years have fallen below production cost.

Primary gallium production for 2016 is estimated at 274 t, an overall decrease of 42 % compared to the previous year. China was the principal producer globally, with additional production from Germany, South Korea, Russia, Ukraine and Japan.

Global capacities for primary gallium production (4N) are estimated at 720 t. Chinese production capacity accounted for over 80 % market share which represents a significant increase since 2009. Germany, Kazakhstan, South Korea, Ukraine, Russia Japan and Hungary accounted for a combined 118 t of production capacity.

Although the geopolitical risk for primary gallium production capacity is merely moderately critical, the country concentration can be regarded as high with China being by far the dominant player in the market.

Worldwide capacities for secondary gallium production is estimated at 270 t and include only the recycling of new scrap. This market is dominated by Japan, China, Canada, Germany, Slovakia, the US and UK. Recycling of new scrap represents an important part of the supply chain and can account for up to 40 % of gallium demand.

Worldwide production capacities for the purification of primary and secondary 4N gallium to > 6N are estimated at 320 t and are substantially higher than the estimated refined production of approximately 180 t. Purification of primary gallium is concentrated in China, Japan, the US and UK; the main producers of refined gallium from secondary sources are predominantly located in Japan, China, the US, the UK, Slovakia and Germany.

Global gallium demand for 2015 is estimated at 320 t. The electronics and optoelectronics industries make up the largest part of the gallium market, with high frequency devices (discrete field effect transistors, integrated circuits) and optoelectronic devices (LEDs) accounting for approximately 90 % of consumption.

Leading consumers are Japan, followed by China, the US and Germany. A fast-growing gallium demand from China is forecast to eclipse Japanese consumption in the next few years.

Trade data in general closely mirrors supply and demand data. Annual gallium exports amounted to 160–195 t between 2012 and 2016 with China as the main exporting country. Other important exporting countries include Germany, the UK, Slovakia, South Korea, Russia and the US. Major importing countries of gallium include Germany, Japan, South Korea, the UK and US.

Current gallium supply (with regards to capacity) by far exceeds gallium demand, which is reflected in current price developments. Prices for 4N gallium have been hovering below the 200 US\$/kg mark since 2015 but have started to pick up slightly since early 2018, owing to significant cuts in primary gallium production.

Gallium demand is expected to grow in the coming years with a positive outlook for the production of LEDs, CIGS and the introduction of the 5th generation telecom network (5G) expected to be important demand drivers.

We estimate that an increase in gallium demand will likely be met by an increase in production rates from existing producers which is likely to result in the market remaining in surplus over the outlook period until 2026. Supply capacities for crude gallium are currently estimated at 988 t (718 t and 270 t for primary and secondary gallium production, respectively). This significantly outstrips the predicted demand increase of both 490 t (at 3.9 % growth rate per year) and 845 t (at 9.2 % growth rate per year).

An increase in demand beyond the predicted growth rates that would exceed existing production capacities (above 11 % growth rate per year) is likely to result in the development of production capacities. A number of new projects are predicted to be able to compensate for a potential deficit and could supply additional production capacities of up to 750 t crude gallium from primary sources. The status of these projects, however, remains uncertain.

The potential for future gallium production significantly exceeds current production capacities. In order to adequately meet future demand, an increase in production from the bauxite-processing industry could prove viable. During the processing of bauxite to alumina, gallium accumulates in the aluminate solution hydroxide streams (Bayer liquor). Although only a limited number of production facilities are currently able to recover gallium from this process, an estimated additional annual capacity of up to 4,000 t could potentially be feasible.

1 Der Rohstoff Gallium

1.1 Einführung

Gallium wird nur in geringen Mengen gewonnen bzw. technologisch eingesetzt. Haupteinsatzgebiet ist der Elektronikbereich. Durch den stark gestiegenen weltweiten Absatz an Elektronikgeräten steigt auch der Bedarf an Gallium. Dies zeigt sich auch in der Entwicklung der Produktionskapazitäten der letzten Jahre.

Gallium (Ga) ist ein sehr weiches, silbrigblau glänzendes Metall. Im Periodensystem der chemischen Elemente steht es in der 3. Hauptgruppe (Borgruppe) unter Aluminium und in der 4. Periode zwischen Zink und Germanium. Mit 29,8 °C ist es das Metall mit dem drittniedrigsten Schmelzpunkt (nur Quecksilber und Cäsium schmelzen bei noch tieferen Temperaturen). Der Siedepunkt liegt mit 2.403 °C relativ hoch, wodurch sich ein sehr weiter Temperaturbereich ergibt, in dem das Metall flüssig vorliegt. Bei Gallium tritt, wie bei Wasser, eine Dichteanomalie auf. Bei Temperaturabnahme und Wechsel zum festen Aggregatzustand kommt es zur Dichteabnahme, d. h. Ausdehnung. Für weitere Eigenschaften siehe Tab. 1.

Tab. 1: Eigenschaften von Gallium
(GREBER 2012, KRAUSS et al. 1989).

Ordnungszahl	31
Atomgewicht	69,72
Schmelzpunkt	29,8 °C
Siedepunkt	2.403 °C
Dichte	6,095 g/cm ³ im flüssigen Zustand (29,8 °C) 5,904 g/cm ³ im festen Zustand (24,6 °C)
Oxidationsstufe	3
Elektronegativität (Pauling-Skala)	1,81
Wärmeleitfähigkeit (30 °C)	29 W/(m·K)
Kristallstruktur	Orthorhombisch
Wärmeausdehnungskoeffizienten	a-Achse 1,65·10 ⁻⁵ K ⁻¹ b-Achse 1,13·10 ⁻⁵ K ⁻¹ c-Achse 3,1·10 ⁻⁵ K ⁻¹

Mit durchschnittlich etwa 18 ppm ist Gallium in der Erdkruste weit verbreitet (GAO et al. 1998). Allerdings ist es nur selten in höheren Konzentrationen zu finden. In der Natur tritt Gallium nicht in elementarer Form auf, sondern wird in Mineralen wie z. B. Sphalerit, Germanit und Alumnosilikaten eingebaut.

1.2 Vorkommen

Gallium liegt in einer Vielzahl von Mineralen als Spurenelement vor. Wegen seiner geochemischen Verwandtschaft mit Aluminium ist Gallium vor allem in Aluminiummineralen angereichert. Aufgrund ähnlicher Ionenradien kann Aluminium im Kristallgitter durch Gallium substituiert werden. Bei der lateritischen Verwitterung und der damit verbundenen Bauxitbildung erfährt Gallium ebenso wie Aluminium eine zwei- bis fünffache Anreicherung. Wichtigstes Primärerz ist daher das Aluminiumerz Bauxit.

Für Bauxit wird ein durchschnittlicher Galliumgehalt von 50 ppm angenommen (KRAMER 1988, JASKULA 2016a). Literaturdaten von weltweit analysierten Bauxitvorkommen zeigen Galliumgehalte im Bereich von kleiner 10 bis 180 ppm. Eine Ausnahme bildet das Vorkommen Maşatdağı in Antalya, Türkei, wo ein Maximalwert von 812 ppm gemessen wurde. Der Durchschnittsgehalt aller analysierten Bauxitvorkommen beträgt laut SCHULTE & FOLEY (2014) 57 ppm Gallium. Die Durchschnittsgehalte der Lagerstätten liegen zwischen 5 und 142 ppm Gallium. Bei Betrachtung nach Bauxit-Distrikten enthalten mit Werten zwischen 80 bis 96 ppm die höchsten durchschnittlichen Galliumgehalte die Bauxit-Distrikte:

- Bihar und Central Hindustan in Indien (87,5 bzw. 89 ppm),
- Lištica in Bosnien-Herzegowina (91 ppm),
- Kroatien (83,1 ppm),
- Saint Elizabeth in Jamaika (96 ppm),
- South Timan und Tikhvin in Russland (82 bzw. 80 ppm),
- Martitime in Suriname, Guyana und Französisch-Guyana (92 ppm) und
- Arkansas in den USA (86 ppm).

Umfassende Datentabellen zu Galliumgehalten in Bauxiten finden sich in FRENZEL et al. (2016a, b), SCHULTE & FOLEY (2014) und KRAMER (1988).

Aus Nephelin- und Aluniterzen, die in Russland für die Aluminiumgewinnung eingesetzt werden, wird ebenfalls Gallium gewonnen.

In wirtschaftlich relevanten Gehalten findet sich Gallium in der Natur zudem noch in Zinkerzen (im Zinkmineral Sphalerit/Zinkblende), aus denen geringe Galliummengen gewonnen werden. Für einige nordamerikanische Zinkerze sind Galliumgehalte um 50 ppm bekannt (JASKULA 2016a). Sphalerite enthalten im Allgemeinen zwischen 5 und 300 ppm Gallium, Gehalte bis zu 700 – 1000 ppm Gallium sind möglich (KRAUSS et al. 1989, FRENZEL et al. 2016b). Gehalte über 300 ppm Gallium finden sich nach FRENZEL et al. (2016a) beispielsweise in Sphaleriten von

- Fankou in der Guangdong-Provinz in China,
- Saint-Salvy (Vein) in Frankreich,
- Kerber Creek District in Colorado, USA,
- Picher Orefield in Oklahoma und Kansas, USA,
- Cottonwood Canyon in Utha, USA.

Zu umfangreichen Angaben von Galliumgehalten in Sphaleriten siehe FRENZEL et al. (2016b).

Kohlen bzw. Kohleflugaschen können ebenfalls bedeutende Mengen Gallium führen. Der Galliumgehalt in Kohlen variiert regional stark und liegt im weltweiten Durchschnitt zwischen 2 und 10 ppm (QIN et al. 2015). In Russland werden Kraftwerkskohlen mit einem Gehalt ab 20 ppm als wirtschaftlich für die Galliumextraktion klassifiziert (FRENZEL et al. 2016a). Für Kohlen verschiedener chinesischer Reviere werden Galliumgehalte zwischen 0,8 und 249 ppm angegeben (QIN et al. 2015). In nordenglischen Kohlen wurden bis zu 500 ppm Gallium gefunden (KRAUSS et al. 1989).

Beim Verbrennen der Kohle reichert sich Gallium in den Flugaschen an und kann eine sechs- bis zehnfache Konzentration erreichen (CONZEMIUS et al. 1984). Als Maximalwert wird bis zu 1,5 % Gallium in Kohleflugaschen angegeben (ROSKILL 2002). In Großbritannien wurden zwischen 1950 und 1970 Gallium und Germanium aus Kohleflugaschen gewonnen, die bis zu 1 % Gallium aufwiesen (KRAUSS et al. 1989). Galliumgehalte von Steinkohleaschen aus Westdeutschland lagen zwischen 5 und 75 ppm (DEUTSCHE CHEMISCHE GESELLSCHAFT 1936). FANG & GESSER (1996) fanden in Kohleaschen verschiedener Kraftwerke aus

Kanada, Israel und China Galliumgehalte zwischen 37 und 120 ppm. In dem chinesischen Kohlerevier Zhungee (Innere Mongolei) sind Durchschnittsgehalte von 25 ppm Gallium in der Kohle und 82 – 87 ppm Gallium in der Flugasche bekannt; die Gewinnung von Gallium als Nebenprodukt ist geplant (SHENHUA COAL COMPANY, pers. Mitteilung 2015). Kohle bzw. Kohleflugaschen könnten in China künftig eine wichtige Galliumquelle darstellen (s. Kap. 2.5.3 Zukünftiges Angebot).

Neuschrott, der insbesondere bei der Produktion der auf Galliumarsenid basierenden Halbleiterscheiben (Wafer) anfällt, hat einen hohen Galliumanteil. Die derzeitige Recyclingquote von diesen Schrotten beträgt rund 45 %.

Weitere Galliumquellen waren in der Vergangenheit:

- Ofenstaub der elektrothermischen Öfen bei der Herstellung von Phosphor. Aus diesen könnte ebenfalls Gallium gewonnen werden (BROUHIER 1976). Allerdings wurde der pyrometallurgische Aufbereitungsprozess von Phosphaterz nahezu vollständig durch hydro-metallurgische Prozesse ersetzt.
- Flugstäube mit 0,5 % Gallium aus der Aluminiumproduktion der Hütten Mosjoen und Tyssedal wurden in Norwegen Ende der 1980er Jahre auf Gallium verarbeitet (KRAUSS et al. 1989).

Lagerstätten

Zurzeit gibt es keine Lagerstätte, in der Gallium als Hauptprodukt abgebaut wird. Die geologischen Hauptvorkommen von Gallium sind an die großen Bauxitlagerstätten und -vorkommen wie in Guinea, Australien, Brasilien, Indonesien, Jamaika, Indien, China, Vietnam sowie Guyana gebunden. Des Weiteren führen einige Zink- und Kohlelagerstätten beispielsweise in Mexiko und in China Gallium als Nebenprodukt.

Weltweit gibt es einige wenige Vorkommen, deren Galliumkonzentration im Erz hoch genug ist, um eine Gewinnung als Hauptelement in Betracht zu ziehen. Das bekannteste Beispiel ist die Apex-Lagerstätte in Utah, USA. Im Jahr 1985 nahm die St. George Mining Company dieses weltweit erste Primärgallium- und Germaniumbergwerk

in Betrieb (BAUTISTA 2003). Für wenige Monate wurden Haldenmaterial und im Untertagebergbau gewonnenes Erz mit Galliumgehalten von 0,03 % bis 0,045 % abgebaut und verarbeitet. Nachdem sich die Galliumproduktion als nicht wirtschaftlich erwies, wurde das Unternehmen im Jahr 1987 aufgelöst. Auch ein zweiter Versuch 1990 scheiterte (WELLMER et al. 2008).

In dem Vorkommen Painted Hills der Win-Eldrich Mines Ltd. in Humboldt County in Nevada wurden 2001 Galliumgehalte von durchschnittlich 21,7 ppm gemeldet. Hohe Galliumgehalte zwischen 40 und 224 ppm wurden außerdem 2001 im Cordero-Vorkommen der Gold Canyon Resources Inc., ebenfalls in Humboldt County, gefunden (KRAMER 2002). 2006 wurden Indicated Ressourcen mit einem Inhalt von 337.360 kg Gallium und Inferred Ressourcen mit einem Gehalt von 384.640 kg bekannt gegeben (KRAMER 2007). 2008 gab Gold Canyon Resources Inc. bekannt, dass die Vorbereitungen für eine Machbarkeitsstudie aufgrund von Turbulenzen an den globalen Finanzmärkten, der Unsicherheit bei den kurzfristigen Galliumpreisen und des starken Anstiegs der Preise für wichtige Schlüsselchemikalien, die für die Galliumgewinnung nötig sind, ausgesetzt werden (JASKULA 2010a).

1958 wurde im Kupfer-Blei-Zink-Tsumeb-Bergbaukomplex in Namibia Gallit (CuGaS_2) als bisher einziges bekanntes Galliummineral entdeckt. Der Galliumanteil in diesem Mineral beträgt 35,4 %. Gallium wurde in Tsumeb nie abgebaut, die lagernenden Schlacken der Bleiverarbeitung zwischen 1963 und 1996 sind aber u. a. mit Gallium, Germanium und Indium angereichert. Der Galliumgehalt in der Schlacke liegt bei etwa 0,02 % (ROSKILL 2014).

1.3 Gewinnung und Verarbeitung

Gallium wird sowohl primär als auch sekundär gewonnen. Die Primärgewinnung von Gallium erfolgt nur als Beiprodukt im Zuge der Herstellung von Tonerde/Aluminium oder Zink. Wirtschaftlich am bedeutendsten sind die Vorkommen im Bauxit. Nach dessen Aufschluss mit Natronlauge (Bayer-Verfahren) wird das Gallium als Begleitmetall der Kreislaufauflage entzogen. Auch aus Rückständen, die in Zinkhütten anfallen, wird Gallium in geringen Mengen gewonnen. Ebenfalls lässt sich aus Kraftwerksaschen aus der Kohleverbrennung

Gallium zusammen mit Germanium abtrennen. Da die Gewinnung aus den beiden letztgenannten Quellen aufgrund anderer metallischer Verunreinigungen sehr komplex ist, wird in der Industrie derzeit die Abtrennung von Gallium aus Bauxit deutlich bevorzugt. Die Gewinnung über die Zinkelektrolyse (Südkorea, Japan, geringe Mengen in China) spielt mit unter 10 % nur eine untergeordnete Rolle.

Sekundärgallium wird aus recycelten galliumführenden Prozessschrotten (Neuschrott), die überwiegend bei der Wafer-Produktion anfallen, zurückgewonnen.

Primäres Rohgallium wird typischerweise mit einer Reinheit von 99,9 bis 99,99 % (3N, 4N) gewonnen und dann, in Abhängigkeit von der weiteren Verwendung, zu höheren Reinheiten raffiniert.

Beiprodukte

Beiproduktelemente sind ökonomisch und technologisch wertvolle Nebenelemente oder Verunreinigungen, die aus Erzen von Trägermetallen (Hauptmetallen) mitgewonnen werden. Während die Hauptmetalle in Erzen im Prozentbereich vorkommen, treten die Beiproduktelemente in der Regel nur im ppm-Bereich auf. Viele Elemente, die für die Elektronik- oder Hightech-Industrie wichtig sind, sind Beiprodukte. Beispiele sind Gallium aus Bauxit, Indium aus Zink-, Zinn- oder Kupfererz, Tellur aus Kupfererz.

Eine Steigerung der Beiproduktgewinnung ist dann zu erwarten, wenn die Nachfrage und der Rohstoffpreis langfristig steigen und sich die Gewinnung bei entsprechenden Produktionskosten und Investitionen lohnt. Viele Produktionsstätten gewinnen die Beiprodukte bisher nicht oder nur untergeordnet. Der Prozess der Aufbereitung der Erze bzw. Verhüttung oder Raffinade der Hauptmetalle kann zugunsten der Maximierung der Beiproduktgewinnung optimiert oder ein Produktionsprozess zur Gewinnung installiert werden. Die Marktanpassung kann dabei für Beiprodukte voraussichtlich mit einer geringeren Vorlaufzeit erfolgen als für die Hauptprodukte, da die Rohstoffquelle vorliegt und nicht erst gefunden, erkundet und in Produktion gebracht werden muss. Durch eine

aktive Exploration nach Beiprodukten könnte die Angebotsseite zukünftig ebenfalls erhöht werden. Einige Beiprodukte können in speziellen Vorkommen als Hauptelement vorliegen.

Die als Beiprodukte neben den Wertmetallen gewonnenen Metalle können den wirtschaftlichen Wert eines Erzes stark beeinflussen. Die Gewinnung der Wertmetalle oder Hauptprodukte wiederum beeinflusst maßgeblich die Menge der gewonnenen Nebenprodukte.

Primärer Gewinnungsprozess

Es gibt verschiedene Gewinnungsprozesse, die beispielsweise in GREBER (2012), BUTCHER & BROWN (2014), LAHIRI (1996), ZHAO et al. (2012), JACQUIN et al. (1987), FANG & GESSER (1996) dargestellt werden.

Etwa 90 % des Primärgalliums werden derzeit aus Bauxit bei der Raffination von Aluminiumoxid (Tonerde) extrahiert. Daher befinden sich die Anlagen

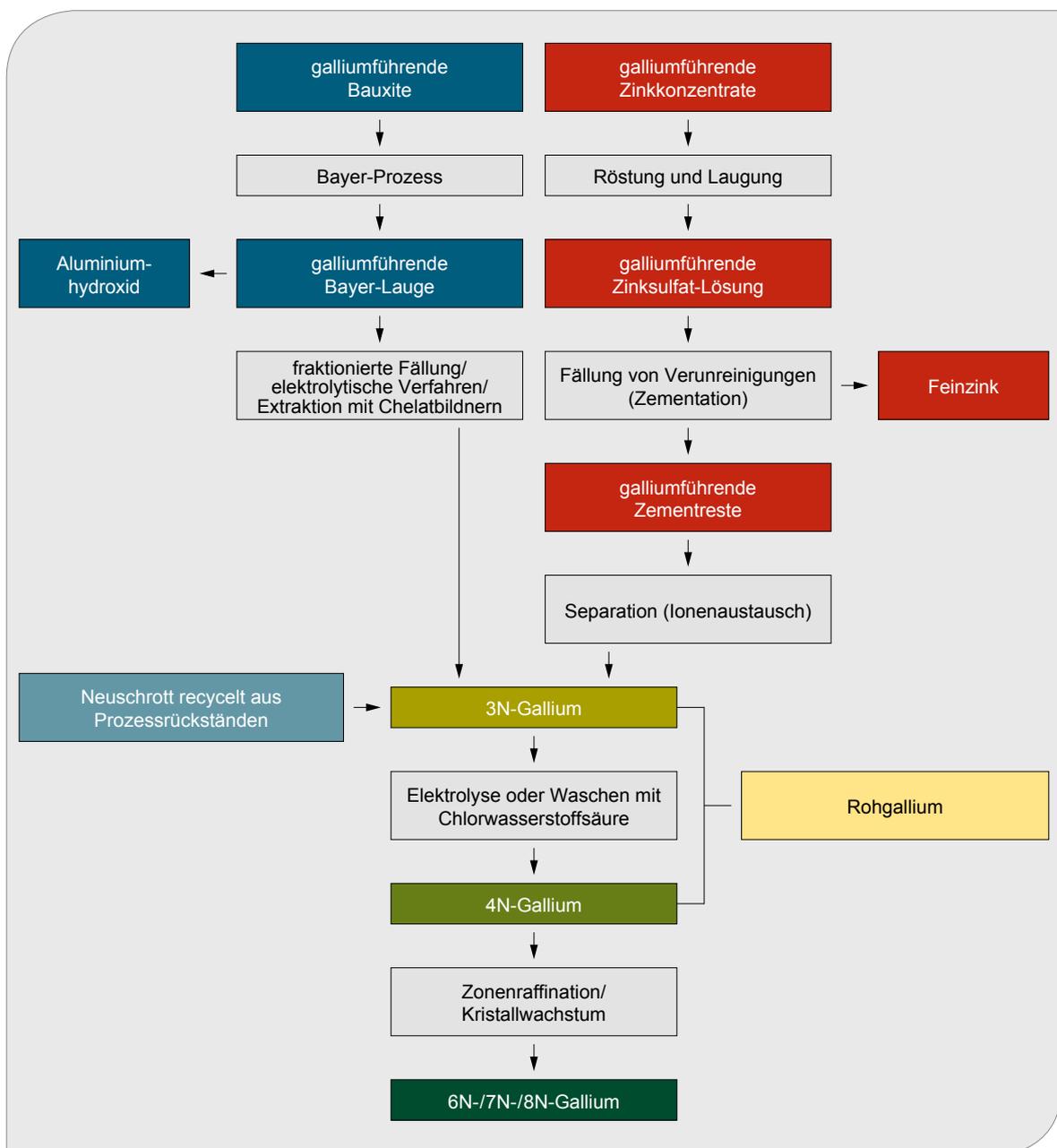


Abb. 1: Extraktionsprozess von Primärgallium aus Bauxit oder Zinkerz (nach BUTCHER & BROWN 2014).

zur Galliumextraktion in der Regel innerhalb oder nahe der Tonerdewerke. Das am häufigsten verwendete Verfahren zur Herstellung von Aluminiumoxid aus Bauxit, und somit von Gallium, ist das Bayer-Verfahren, benannt nach dem österreichischen Chemiker Karl Joseph Bayer. Während des Prozesses werden die Aluminiumminerale im Bauxit (Gibbsit, Boehmit und Diaspor) selektiv von den unlöslichen Komponenten extrahiert, indem sie in einer Lösung von Natriumhydroxid (Natronlauge) bei Temperaturen von etwa 270 °C und hohem Druck gelöst werden. Die Lösung enthält Natriumaluminat und auch Gallium sowie nicht gelöste Bauxitrückstände (Rotschlamm hauptsächlich bestehend aus mineralischen Eisen-, Aluminium-, Silizium- und Titanverbindungen, inklusive nicht gelöstem Gallium). Verschiedene Verfahren werden angewandt, um das Gallium aus der Natriumaluminatlösung zu gewinnen: fraktionierte Fällung, elektrolytische Verfahren (elektrochemische Verfahren) und Extraktion mit Chelatbildnern (Lösungsmittelextraktion und Ionenaustausch) (GREBER 2012, ZHAO et al. 2012). Ein effizientes Verfahren ist die Lösungsmittelextraktion. Durch Verwendung des Kelex-100-Systems können etwa 80 % des Galliums aus der Bayer-Lauge extrahiert werden. Allerdings ist die Kinetik des Extraktionsprozesses sehr langsam und die Extraktion erfordert in der Regel mehrere Stunden. Die in der Industrie am häufigsten angewandte Methode für die Galliumgewinnung aus der Bayer-Lauge ist der Ionenaustausch. Die Ionenaustauscherharze Duolite ES-346 und DHG586 zeigen gute Extraktionseigenschaften für Gallium (ZHAO et al. 2012).

Eine geringe Menge Gallium wird als Nebenprodukt der Zinkgewinnung aus Sphalerit (ZnS) gewonnen. Während dieses Prozesses wird das Sphalerit zunächst zu Zinkoxid (ZnO) geröstet und dieses dann mit Schwefelsäure gelaugt. Das Gallium ist in den Verunreinigungen enthalten, die aus der Extraktionslösung ausgefällt werden, und wird unter Verwendung von Ionenaustauscherharzen wie beispielsweise Duolite® ES 467 durch Ionenaustausch gewonnen (JACQUIN et al. 1987).

Sowohl bei der Gewinnung aus Aluminiumoxid als auch während der Raffination von Zink wird zum Abschluss die elektrolytische Gewinnung angewandt, um ein Rohgallium mit Reinheiten von 99,9 bis 99,99 % (3N/4N Gallium) zu erzeugen (Abb. 1).

Für eine wirtschaftliche Gewinnung von Gallium aus Bauxit mit einem Gehalt von rund 50 ppm Gallium sollte der Galliumpreis bei über 400 US\$/kg Gallium liegen. Bei Preisen unter 200 US\$/kg, wie sie im Jahr 2016 und 2017 erzielt wurden, ist der Betrieb unwirtschaftlich und auch die Inbetriebnahme neuer Werke unwahrscheinlich.

Für die Errichtung einer neuen Anlage zur Extraktion von Gallium im Rahmen der Aufbereitung von Bauxit außerhalb Chinas sollten mindestens drei Jahre eingeplant werden (U. LOCHTE, pers. Mitteilung 2018): Vorplanung mit Standortsuche > 8 Monate, Genehmigungsverfahren > 8 Monate, Prozessoptimierung (Engineering), je nach Verfahren > 5 Monate („China-Harz“) bis > 10 Monate (Kelex), Bauphase inkl. Inbetriebnahme > 12 Monate.

Für eine Anlage mit einer Kapazität von 50 t Gallium pro Jahr sollte die Aluminiumoxidfabrik eine Kapazität von mindestens 2 Mio. t aufweisen. Anlagen dieser Größenordnung gibt es hauptsächlich in Australien und Brasilien. Für das Aluminiumoxidwerk bedeutet der Anschluss einer Galliumanlage zusätzliche Abwassermengen im Fabrikkreislauf und eine Belastung des Lauge-Kreislaufs mit organischem Kohlenstoff.

Für die Extraktion von Gallium mittels Ionenaustauscherharzen stehen derzeit prinzipiell zwei Verfahren zur Verfügung:

Die Extraktion mit Kelex, wie sie gegenwärtig weltweit nur in Stade erfolgt, ist in Aluminiumoxidanlagen, die nach dem „Rohraufschlussverfahren“ produzieren (alle modernen Anlagen weltweit), einsetzbar. Dieses Verfahren benötigt ein spezielles Engineering, Fachkenntnisse sind nur eingeschränkt verfügbar.

In China erfolgt die Galliumextraktion standardmäßig mittels Extraktionsharz („China-Harz“) mit funktionellen Gruppen. Dieses Verfahren ist sehr energieintensiv und in „modernen“ Aluminiumoxidwerken ohne Zwischeneindampfung nicht anwendbar (U. LOCHTE, pers. Mitteilung 2018).

Primärer Gewinnungsprozess am Beispiel der Ingal Stade GmbH in Deutschland

In Deutschland produzierte bis ins erste Quartal 2016 die Ingal Stade GmbH jährlich rund 20–30 t Primärgallium (4N-Rohgallium). Die Produktionsanlage befindet sich auf dem Betriebsgelände der Aluminium Oxid Stade (AOS), die aus etwa 2,5 Mio. t Bauxit pro Jahr etwa 1 Mio. t Aluminiumoxid und -hydroxid produziert. Von AOS bezog die Ingal Stade GmbH gegen die Zahlung eines Laugennutzungsentgeltes einen Teil der Natronlauge, die beim Bayer-Verfahren zum Lösen der Aluminiumbestandteile aus dem Bauxit im Kreislaufverfahren eingesetzt wird. Durch die wiederholte Nutzung der Natronlauge für den Aufschluss von neuem Bauxit reichert sich Gallium in der Umlauge auf etwa 100–200 mg/l an.

Für die Gewinnung von Gallium setzte die Ingal Stade GmbH das Kelex-Verfahren ein. Kelex ist ein organisches Extraktionsmittel (Harz). Die Extraktion aus der Lauge (diese weist nur eine geringe C_{org} -Verunreinigung auf) erfolgte über einen Fest-Flüssig-Ionenaustausch: Als fester Ionentauscher dient ein mit Kelex belegter Harz-Grundkörper. Die Galliumextraktion kann auch über einen Flüssig-Flüssig-Ionenaustausch erfolgen, wie er einst in Australien praktiziert wurde. Die Natronlauge wird mit dem Kelex-Harz in Kontakt gebracht und das Gallium wird über Chelatverbindungen an das Kelex gebunden. Das Kelexharz mit dem Gallium wird gewaschen, um es von der Restlauge zu befreien. Mit H_2SO_4 wird das Gallium als Ga_2SO_4 vom Kelexharz gelöst, mittels NaOH erfolgt die Neutralisation der Säure und Gallium fällt als $GaOH$ aus. Das Galliumhydroxid wird mittels einer Filterpresse getrocknet. Für die Elektrolyse wird der Galliumhydroxid-Filterkuchen wiederum in Natronlauge als Gallat gelöst und der Elektrolyse aus wässriger Lösung zugeführt. Als Elektrodenmaterial dient Edelstahl. Das nach der Elektrolyse anfallende Gallium wird bis zur Vermischung mit mehreren Chargen bei etwa 70 °C flüssig gelagert. In einem letzten Schritt erfolgt das Abkühlen, und es kommt durch Ausfrieren zu einem weiteren Reinigungsprozess. Das beim Ionenaustausch verwendete Kelexharz wird nach Lösen des Galliums erneut gewaschen und für den nächsten Ionenaustausch bereitgestellt. Zur Raffination wurde der Großteil des Rohgalliums in die USA (Molycorp Inc.) und nach Großbritannien (5N Plus Inc.) geliefert.

Bei einem Gehalt von etwa 50 ppm im Bauxit fallen bei einer Produktion von rund 1 Mio. t Aluminiumoxid pro Jahr ca. 100 t Gallium an, wovon etwa ein Drittel gewinnbar ist. Erhöht sich der Bauxiteintrag im Werk (hohe Bauxitverbrauchsrate), erhöht sich auch die Möglichkeit der Galliumanreicherung in der Lauge. Eine Kapazitätserweiterung der Primärgalliumproduktion wäre theoretisch in rund einem Jahr möglich. Hierfür müsste aber das Aluminiumoxidwerk als Bereitsteller der galliumführenden Lauge dauerhaft eine genügend hohe Produktion aufweisen.

Raffinade

Das extrahierte Rohgallium hat eine Reinheit von etwa 99,9 bis 99,99 % (3–4N). Für die meisten Anwendungen sind aber deutlich höhere Reinheiten von 99,9999 bis 99,99999 % (6–7N) und bis zu 99,999999 % (8N) nötig. Hochreines Gallium wird für die Fertigung von Verbindungshalbleitern wie Galliumarsenid und Galliumnitrid benötigt, welche in der Produktion von LEDs, Laserdioden und Hochfrequenz-Bauelementen z. B. für Mobilfunknetze eingesetzt werden. Spezielle Qualitäten (8N) sind für den Molekularstrahlepitaxie-Einsatz (molecular beam epitaxy, MBE) geeignet.

Für das Entfernen von Verunreinigungen werden verschiedene Verfahren angewandt. Leichtflüchtige Metalle wie Quecksilber und Zink werden beispielsweise unter Vakuum destilliert. Weitere Reinigungsschritte werden durch Waschen mit wässrigen Säuren und Alkalien oder elektrolytischer Raffination erreicht. Hochreines Gallium wird durch fraktionierte Kristallisation, Zonenschmelzen oder Einkristallwachstum gewonnen (Abb. 1). Die Eigenschaft der Dichteanomalie von Gallium wird bei der Hochreinigung des Galliums ausgenutzt. Die durch fraktionierte Kristallisation gereinigten Galliumkristalle tauchen in der Schmelze, in der sich die Verunreinigungen anreichern, an der Oberfläche auf und können abgeschöpft werden. Andere Methoden der Aufreinigung umfassen die Extraktion von Galliumchlorid aus Säurelösung und fraktionierte Destillation von flüssigen Galliumverbindungen (GREBER 2012, ROSKILL 2014).

Nach dem Raffinieren wird das hochreine Gallium üblicherweise mittels Massenspektrometrie auf Verunreinigungen analysiert. Für die Herstellung von GaAs sollten die Konzentrationen von

Kalzium, Kohlenstoff, Kupfer, Eisen, Magnesium, Mangan, Nickel, Selen, Silizium, Schwefel, Tellur und Zinn kleiner als 1 ppb im Gallium (und dem Arsen) sein. Blei, Quecksilber und Zink sollten in Konzentrationen von weniger als 5 ppb vorliegen (ROSKILL 2014).

Sekundärer Gewinnungsprozess (Recycling)

Für das weltweite Angebot spielt das Recycling von Gallium aus Prozessrückständen (Neuschrott) eine bedeutende Rolle.

Abfälle aus der Herstellung von GaAs- und GaN-Wafern sind die wichtigste Quelle für Sekundärgallium. Bei ihrer Produktion fällt eine große Menge an Neuschrott an, der recycelt wird. Die technologischen Prozesse bei der Herstellung von GaAs-Wafern, bei denen Prozessschrott anfällt, sind am Beispiel des Unternehmens Freiberger Compound Materials (FCM) in Abb. 2 dargestellt. Nach der Synthese, in der die chemische Verbindung von Gallium und Arsen zu polykristallinem GaAs erfolgt, werden Einkristalle gezüchtet, die dann zu Wafern verarbeitet werden. Produktionsrückstände wie abgesägte Kristallenden werden teilweise vor Ort recycelt. Die GaAs-Kristalle

werden in mehreren Schritten (Sägen, mehrfaches Schleifen, Polieren, Ätzen) zu Wafern weiterverarbeitet. Die Sägewässer und Schleifschlämme werden filtriert und das in den gepressten Schlämmen enthaltene Gallium wird recycelt. Die bei den Ätzprozessen anfallenden stark sauren Abwässer weisen hohe Galliumgehalte auf, die ebenfalls wiedergewonnen werden können. Beim Poliervorgang fallen ebenfalls große Mengen galliumhaltiger Abwässer an, deren überwiegender Teil niedrige Gallium-Konzentrationen aufweist. Das Aufbereiten des darin enthaltenen Galliums ist mit den etablierten Methoden nicht wirtschaftlich. Das Abwasser wird der Neutralisation zugeführt und das enthaltene Gallium mit dem arsenhaltigen Fällschlamm deponiert. Etwa 40 % des ursprünglich eingesetzten Galliums befinden sich im Wafer (nur ca. 8 % gehen ins Endprodukt), rund 45 % werden wiedergewonnen, der Rest (15 %) wird deponiert (Abb. 2) (FCM o. J., STELTER & ZEIDLER 2013).

Recycling von Prozessschrott: Die Aufbereitung der Gallium-Prozessschrotte erfolgt auf hydrometallurgischem Weg (Abb. 3). Nach der Klassierung, Bemusterung und Aufbereitung des Recyclingmaterials erfolgt die Überführung der Feststoffe in eine wässrige Phase. Dafür müssen zunächst Arsenat-,

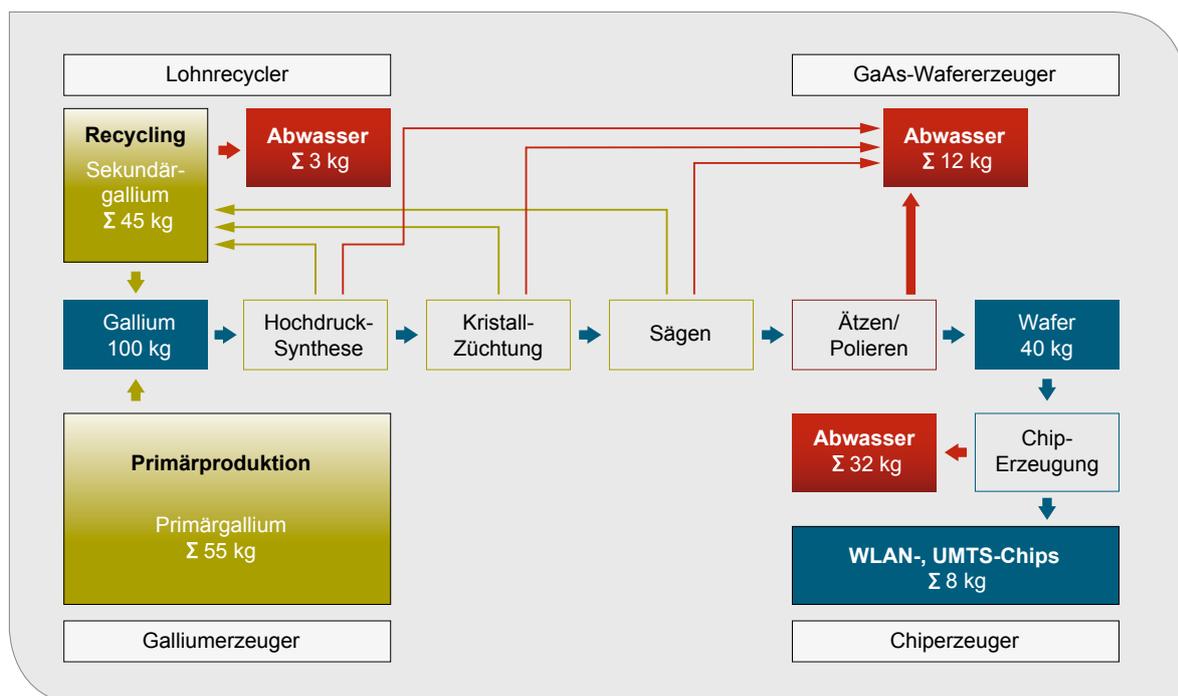


Abb. 2: Arbeitsschritte bei der GaAs-Waferproduktion und -verarbeitung mit anteiligen Galliumströmen (nach ZEIDLER 2016).

Nitrat- und Chloridionen nasschemisch abgetrennt werden. Arsenat wird durch eine Kalziumarsenatfällung bei pH 12 abgetrennt. Die Trennung von Nitrat- und Chloridionen geschieht durch anschließende Hydroxidfällung von $\text{Ga}(\text{OH})_3$ bei pH 6. Die Gewinnung von Gallium durch Elektrolyse erfolgt in alkalischen Medien. Das abfiltrierte $\text{Ga}(\text{OH})_3$ wird dabei dem alkalischen Elektrolyten zudosiert. Zum Schluss folgt die Hochreinigung durch Kristallwachstum (PPM, pers. Mitteilung 2017, STELTER & ZEIDLER 2013).

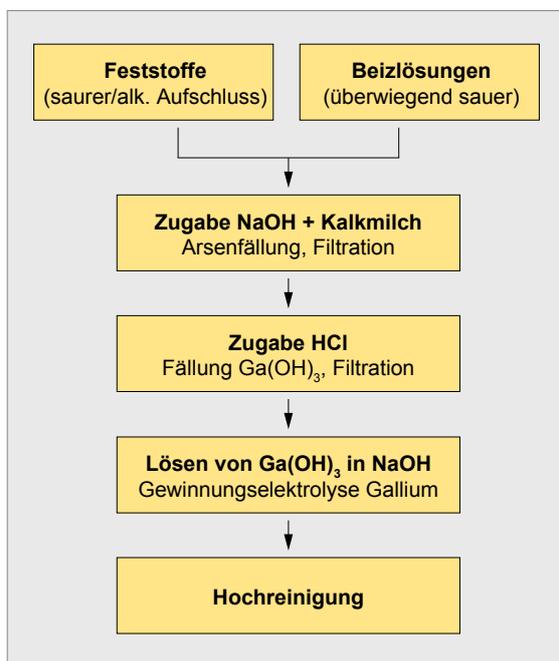


Abb. 3: Verfahren zum Recycling von Gallium aus arsenhaltigen Galliumreststoffen (PPM, mit freundlicher Genehmigung).

In Langelshausen, Niedersachsen bietet das Unternehmen PPM Pure Metals GmbH (eine Tochter der Recylex Gruppe) das Recycling von Gallium aus Produktionsrückständen an. Aufbereitet werden können GaAs-Schrotte, Rückstände und Lösungen mit einem Gehalt von mind. 30 ppm Gallium.

Das Helmholtz-Institut Freiberg und die TU Bergakademie Freiberg forschen in Zusammenarbeit mit der Freiburger Compound Materials GmbH (FCM) und weiteren Industriepartnern an einem Verfahren, Gallium auch aus sehr verdünnten Galliumabgängen wirtschaftlich zurückzugewinnen. Dialyseverfahren sollen das Gallium und das Arsen in einem Schritt trennen und eine anschlie-

ßende $\text{Ga}(\text{OH})_3$ -Fällung direkt aus dem sauren Milieu erlauben (STELTER & ZEIDLER 2013; siehe auch Exkurs „Aktuelle Forschung zu Galliumpotenzialen ...“ unter Kap. 2.5.2).

Da die produzierten Galliummengen meist klein sind, kann es ökonomisch sinnvoll sein, Primär- und Sekundärroute der Galliumgewinnung zu kombinieren. Ein Recycling-Konzentrat von Gallium könnte als Zwischenstufe erzeugt werden, das dann an passender Stelle in den konventionellen Gewinnungsprozess eingeschleust wird, oder die aus den primären Gewinnungsprozessen für Gallium gewonnenen Extraktionslösungen (Bayer-Lauge aus der Herstellung von Tonerde) werden in die Recyclingroute integriert.

Das wirtschaftliche Recyceln von Gallium aus Altschrott (End-of-Life-Produkten) ist durch die geringen Galliumgehalte schwierig. Gleiches gilt für die Gewinnung von Gallium aus Rotschlammdeponien; problematisch sind hier auch die hohen Gehalte an Störstoffen wie Al^{3+} und Fe^{3+} (STELTER & ZEIDLER 2013).

1.4 Verwendung

Das Hauptanwendungsgebiet von Gallium ist die Herstellung von III-V-Verbindungshalbleitern wie Galliumarsenid (GaAs) und Galliumnitrid (GaN) und, in wesentlich kleineren Mengen, Galliumantimonid (GaSb) und Galliumphosphid (GaP) für Hochfrequenzbauteile (HF; integrierte Schaltungen, Transistoren) und optoelektronische Komponenten (LEDs, Laserdioden, Infrarot-LED, Photodetektoren/Photodioden). Daneben wird Gallium für die Produktion Kupfer-Indium-Gallium-Selenid(CIGS)-basierender Solarzellen, für Magnete und für Galliumchemikalien wie Galliumchlorid (GaCl_3) und Galliumoxid (Ga_2O , Ga_2O_3) u. a. verwendet.

Gallium-Verbindungshalbleiter

Ein Halbleiterbauteil besteht aus einem Substrat, auf das eine oder mehrere sehr dünne Oberflächenschichten (Epitaxialschichten) aufgebracht sind. Die Fläche auf dem Substrat (Wafer), die das Halbleiterbauteil oder die integrierte Schaltung einnimmt, wird als „Chip“, „Microchip“, „Die“ oder „Bar“ bezeichnet.

Gallium wird in Verbindung mit anderen Elementen wie beispielsweise Arsen (GaAs) und Stickstoff (GaN) vor allem als Substratmaterial (Verbindungshalbleiter-Substrat) verwendet. Für die Herstellung des Substrats werden hochreine Kristalle gezüchtet. Die gebräuchlichsten Methoden für die GaAs-Einkristallzüchtung sind:

- Czochralski-Verfahren (Cz)
- Liquid-Encapsulated-Czochralski-Verfahren (LEC)
- Vertical-Gradient-Freeze-Verfahren (VGF)
- Bridgman-Verfahren (HB)

Für die Produktion von GaN-Substraten können die klassischen Verfahren zur Einkristallzüchtung großer Kristalle nicht eingesetzt werden; Gründe sind u. a. der hohe Schmelzpunkt (> 2.500 °C) und Dampfdruck (> 100.000 bar) von GaN. GaN-Einkristalle stellt man heute vorwiegend nach dem sogenannten HVPE-Verfahren (Hydride Vapor Phase Epitaxy) her. Dadurch ergeben sich extrem hohe Preise für GaN-Substrate und sie werden trotz deutlich höherer Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit nur in geringem Umfang verwendet (FRAUNHOFER IISB 2014). Galliumnitrid(GaN)-Bauelemente basieren meist auf einer GaN-Schicht, die auf einem Substrat aus Saphir (Al₂O₃), Silizium oder Siliziumkarbid epitaktisch abgeschieden wurde.

Die Einkristalle mit Durchmesser von 2, 4, 6 oder 8 Zoll werden in verschiedenen Arbeitsschritten (Sägen, Schleifen, Ätzen, Polieren) zu dünnen Scheiben (Wafer) verarbeitet, auf die anschließend die erforderlichen Epitaxialschichten aufgebracht werden. Einige der wichtigsten Methoden des epitaktischen Wachstums sind:

- Molekularstrahlepitaxie (Molecular beam epitaxy, MBE)
- Metallorganische Gasphasenepitaxie (Metal organic vapour phase epitaxy, MOVPE)
- Flüssigphasenepitaxie (liquid phase epitaxy, LPE) (BUTCHER & BROWN 2014)

Für das Verfahren der Molekularstrahlepitaxie (MBE) bei der Produktion von Halbleitern wird hochreines Gallium (7–8N) benötigt. Für die metallorganische Gasphasenepitaxie (MOVPE) werden Trimethylgallium und auch Triethylgallium (TMG, TEG) eingesetzt.

Galliumarsenid (GaAs) ist der Verbindungshalbleiterwerkstoff, für dessen Herstellung der weit überwiegende Anteil von Gallium genutzt wird. Das größte Einsatzgebiet von GaAs-Verbindungshalbleitern sind Hochfrequenzbauteile wie integrierte Schaltungen (IC) und diskrete Transistoren (Feld-effekttransistoren; FETs) in der Mikroelektronik. ICs basieren meist auf der Silizium-Technologie, allerdings wird für besondere Leistungsanforderungen verstärkt auf GaAs zurückgegriffen.

Für die elektronischen Bauteile werden Substrate aus hochreinen GaAs-Einkristallen verwendet. Diese dienen als Substratmaterial (Wafer) für das epitaxiale Wachstum von III-V-GaAs-Halbleitern bzw. Halbleitern wie Indiumgalliumarsenid und Aluminiumgalliumarsenid. Je nach Endanwendung sind unterschiedliche Qualitäten der Substrate erforderlich. Mikrowellenbauelemente und integrierte Schaltungen benötigen mit die reinsten Qualitäten.

GaAs-Verbindungshalbleiter sind besonders für Hochfrequenzleistungsanwendungen in Mobiltelefonen (z. B. Leistungsverstärker, Filtermodule, Hochfrequenz-Schalter), drahtlose lokale Netze (WLAN) und GPS sowie Radar- und militärische High-End-Anwendungen geeignet. Der Mobiltelefonmarkt ist der Haupttreiber für GaAs-basierte Hochfrequenzbauteile. Die Nachfrage nach Mobiltelefonen wird auch weiterhin der Wachstumstreiber für die GaAs-Industrie sein. Entwicklungen bei der Mobilfunktechnologie haben in den letzten Jahren zu einer Zunahme des GaAs-Verbrauchs für integrierte Schaltungen geführt. Smartphones der dritten und vierten Generation (3G, 4G) brauchen deutlich mehr Gallium als ihre Vorgänger; so benötigen Mobilfunktelefone der vierten Generation (4G) zehnmal mehr GaAs als die der zweiten Generation (JASKULA 2017b). Durch die Einführung der fünften Generation (5G) und einem zunehmenden Ausbau der Telekommunikation wird auch der Galliumbedarf weiter steigen. GaAs-ICs werden zudem in der Mikrowellenelektronik, in Kabelfernsehempfängern, in Telekommunikationsgeräten und in der Raumfahrt verwendet (MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016).

Des Weiteren wird GaAs für optoelektronische Anwendungen wie Laserdioden (LDs, z. B. für Barcodescanner, Sensoren), Infrarotemittierende Dioden (IREDs, z. B. für „Touchscreens“) und

Leuchtdioden (LEDs, z. B. für die Hintergrundbeleuchtung von LCDs) verwendet.

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) ist eine Technologie zur Erzeugung eines stark gebündelten Lichtstrahls hoher Intensität. Der eigentliche Laser besteht aus einem Wirts- und dem aktiven Lasermaterial. In Festkörperlasern werden typischerweise monokristalline Kristalle als Wirtsmaterial verwendet, die meist mit dreiwertigen Ionen der Seltenen Erden oder Übergangsmetallen als aktivem Lasermaterial dotiert sind. Eine Hauptkomponente in Faser- und Festkörperlasern sind Diodenlaser-Pumpeinheiten (GaAs). Der weltweit dominierende Marktsektor für Laseranwendungen sind Laser zur industriellen Materialbearbeitung. Mehr als 60 % des Lasermarktes für industrielle Materialbearbeitung basieren auf Hochleistungsdiodenlasertechnologie auf GaAs-Basis (EPIC 2015 in MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016).

Für das automatische Fahren von Fahrzeugen ist eine Vielzahl an Assistenzsystemen (optische Kameras im sichtbaren und IR-Lichtwellenspektrum, Ultraschallsensoren und Radarsensoren) nötig. Eine Komponente, die in Serienfahrzeugen heute noch fehlt, ist der Laserscanner. Der Laserscanner ist technisch ein LiDAR (Light Detection And Ranging), das mithilfe von monochromatischer Laserstrahlung auf optischem Weg Entfernung und Geschwindigkeit im Nah- und Fernbereich messen kann. Das LiDAR arbeitet mit Festkörper- oder Halbleiterlasern. Kommerziell weit verbreitet sind mit Neodym dotierte YAG-Laser (Nd:YAG-Laser). Dieser Festkörper-Laser nutzt als Wirtsmaterial einen transparenten Yttrium-Aluminium-Granat-Einkristall ($Y_3Al_5O_{12}$, YAG). Für das Pumpen werden GaAs-Laserdioden eingesetzt, die Licht der Wellenlänge 808 nm in den YAG-Kristall einstrahlen. Für das im selbstfahrenden Google-Fahrzeug genutzte mobile LiDAR-Gerät HDL-64E der Firma Velodyne, Inc., könnte es sich um einen Indium-Gallium-Arsenid(InGaAs)-Laser handeln, dessen stoffliche Zusammensetzung und Geometrie allerdings nicht bekannt sind (MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016).

Infrarot(IR)-Detektoren werden in gekühlte und ungekühlte Detektoren eingeteilt. Gekühlte Detektoren basieren vorwiegend auf Photodioden, die in großer Zahl (Hunderte bis Tausende) zu Arrays zusammengeschaltet werden. Für die

Infrarot-Photodioden gibt es unterschiedliche Materialien, z. B. im Spektralbereich 0,7–2,6 μm InGaAs (MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016). Innerhalb der ungekühlten IR-Detektoren wurden für pyroelektrische Systeme auch künstliche pyroelektrische Materialien (normalerweise als Dünnschichten) aus GaN, Caesiumnitrat (Cs_3NO_3) oder Lithiumtantalat (LiTaO_3) entwickelt (GAUTSCHI 2002, LANG 2005 in MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016). Infrarot(IR)-Detektoren kommen in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen zum Einsatz, Beispiele sind:

- militärische Anwendungen: Navigations-systeme, Nachtsichtgeräte, optische Bildgebung, thermografische Geländeaufnahmen, Zielevaluierungen
- Automobilbau: Nachtsichtsysteme
- Facility Management: Bewegungsmelder, thermografische Gebäudeaufnahmen zur Isolationsüberprüfung von Gebäuden) (MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016)

Galliumarsenid ist auch ein ideales Material für hocheffiziente Solarzellen, die beispielsweise für die Stromversorgung von Satelliten genutzt werden können (BUTCHER & BROWN 2014). Die Energielücke von GaAs ist optimal für Sonnenlicht, und als direkter Halbleiter absorbiert GaAs das Licht schon in wenigen μm Schichtdicken vollständig. Allerdings ist die Anwendung so teuer, dass sich dieser Zelltyp, selbst für Weltraumanwendungen, nicht durchgesetzt hat (MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016).

Galliumnitrid (GaN) wird als Verbindungshalbleiter ebenfalls zunehmend in der Mikro- und Optoelektronik genutzt. Der überwiegende Einsatz von GaN liegt aber in der Optoelektronik u. a. für blaue, grüne und weiße Leuchtdioden (LEDs) sowie ultraviolette und blaue Laserdioden (LDs) z. B. für Blue-Ray-Geräte. Im Rahmen des enormen Wachstums des LED-Marktes ist in den letzten Jahren speziell der Einsatz von GaN in LEDs rasant gestiegen.

Eine Leuchtdiode (LED – light emitting diode) besteht aus dotierten Halbleitermaterialien: einer n-leitenden Schicht mit einem Überschuss an Elektronen und einer p-leitenden Schicht mit einem Elektronenmangel. Dazwischen liegt der Übergangsbereich (aktive Schicht, Sperrschicht). Je nach Halbleitermaterial wird Licht in einer bestimmten Farbe abgegeben. Für blaue und

grüne Dioden werden die Halbleitermaterialien auf Basis von (Indium-)Galliumnitrid (InAlGaN) hergestellt. Auf einem einkristallinen Grundmaterial (Wafer aus Saphir, Siliziumcarbid, Silizium oder Galliumnitrid) werden unterschiedliche Halbleiterschichten aufgetragen. Eine moderne blaue Leuchtdiode besteht aus einer Vielzahl verschiedener Materialien wie Galliumnitrid als Basismaterial, Indium-Galliumnitrid als leuchtende Schicht und Aluminium-Gallium-Nitrid zur Effizienzsteigerung (MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016).

Ein wichtiger Markt für GaN sind weiße LEDs. Weiße LEDs werden hauptsächlich für die Beleuchtung sowie als LC-Display-Hintergrundbeleuchtung für mobile elektronische Geräte und Fernseher/Monitore verwendet. Die Bedeutung für den Displaymarkt nimmt in Zukunft ab, da angenommen wird, dass LCDs insbesondere bei kleineren Geräten (Tablets, Smartphones) durch selbstleuchtende OLED-Displays ersetzt werden. Ein wachsender Markt ist der Einsatz von LEDs für Autoscheinwerfer (YOLE 2013b in MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016).

GaN wird auch für Infrarot(IR)-Detektoren eingesetzt (s. auch GaAs). Für pyroelektrische Systeme innerhalb von ungekühlten IR-Detektoren wird hauptsächlich Barium-Strontium-Titanit (BST) benutzt. Es wurden aber auch künstliche pyroelektrische Materialien (normalerweise als Dünnschichten) aus Galliumnitrid (GaN), Caesiumnitrat (Cs_3NO_3) oder Lithiumtantalat (LiTaO_3) entwickelt (GAUTSCHI 2002, LANG 2005 in MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016).

GaN besitzt eine Reihe von Vorteilen gegenüber anderen Verbindungshalbleitern und ist ideal für den Einsatz in elektronischen Hochfrequenz- und Hochleistungsgeräten. So wird es in Hochfrequenz-Hochleistungs-Transistoren der nächsten Generation verwendet, die in der Lage sind, bei hohen Temperaturen zu arbeiten. Technologien, in denen GaN zum Einsatz kommt, sind: Radar, Kabelfernsehen, Luft- und Raumfahrt, Versorgungsnetze (BUTCHER & BROWN 2014).

Galliumphosphid (GaP) wird als Verbindungshalbleiter – allein oder zusammen mit anderen Galliumverbindungen (GaAs, InGaAlP) – zur Herstellung von LEDs in verschiedenen Farben (z. B. rote, orange, gelbe und grüne Leuchtdioden) genutzt. In Verbindung mit Indium (InGaP) wird

es für Leistungsverstärker in Funksystemen wie WLAN und WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) eingesetzt.

Galliumantimonid (GaSb) ist als Verbindungshalbleiter ebenfalls Grundstoff für die Herstellung von elektronischen und optoelektronischen Bauelementen. Beispielsweise wird es für Infrarotdetektoren, Raketensteuerungssysteme und thermophotovoltaische Systeme genutzt.

Weitere Anwendungen

Gallium wird auch für die Produktion von **Magneten** verwendet. So besitzen die Spinelle des Galliums mit Gadolinium, Eisen, Yttrium, Lithium und Magnesium magnetische Eigenschaften (BROUHIER 1976). Für eine Verbesserung der magnetischen Eigenschaften, der Korrosionsresistenz, der thermischen Stabilität und des Herstellungsprozesses können bei der Produktion von Neodym-Eisen-Bor-Magneten (NdFeB-Magnete) bis zu 0,5 Gew.-% Gallium zugefügt werden, im Mittel kann von einem Gehalt zwischen 0 und 0,2 % Gallium ausgegangen werden (LØVIK et al. 2015, BUTCHER & BROWN 2014, VACUUMSCHMELZE, pers. Mitteilung). LØVIK et al. (2015) schätzen, dass 2011 fast 30 % (85 t) der primären Galliumproduktion für die Herstellung von NdFeB-Permanentmagneten genutzt wurden, ROSKILL (2014) geht für 2013 dagegen von nur 3 % (8–10 t) aus. In China werden jährlich etwa 100.000 t Permanentmagnete hergestellt, rund 10.000 t kommen vom japanischen Markt. Nicht alle Hersteller verwenden Gallium für die Produktion von NdFeB-Permanentmagneten, weshalb eine Schätzung über die Höhe des Bedarfs schwierig ist.

Des Weiteren wird Gallium zur Herstellung von **niedrigschmelzenden Legierungen** und als Material für Hochtemperaturthermometer bzw. als ungiftiger, nichtflüchtiger Quecksilberersatz (Galinstan, eine eutektische Legierung aus Gallium, Indium und Zinn) für Thermometerfüllungen verwendet.

Material geringerer Reinheit wird verwendet, um **Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS)** für Dünnschicht-Solarzellen herzustellen (PPM 2017). CIS (Kupfer-Indium-Diselenid bzw. -Disulfid) oder auch CIGS (Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid bzw. -Disulfid) ist eine photovoltaische

Dünnschichtzelle auf Basis von Chalcopyrit-Verbindungshalbleitern (Cu(In,Ga)(Se,S)_2) (MARSCH-EIDER-WEIDEMANN et al. 2016). Die Verwendung von CIGS-Dünnschichtzellen ist in den letzten Jahren nicht so stark gewachsen, wie von ANGERER et al. (2009) prognostiziert. Gründe sind u. a. die hohen Produktionskosten im Vergleich zur geringeren Effizienz gegenüber kristallinen (c-Si) und amorphen Silizium(a-Si)-Zellen. Für die Zukunft wird aber weiterhin davon ausgegangen, dass es bei der Anwendung von den CIGS-Zellen zu einem Wachstum kommt (ROSKILL 2014).

Zu den **Galliumchemikalien** zählen Galliumnitrat ($\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$), Galliumtrichlorid (GaCl_3), Galliumtrioxid (Ga_2O_3), Triethylgallium (TEG, $\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$) und Trimethylgallium (TMG, $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$). Verwendungsbeispiele sind (BUTCHER & BROWN 2014):

- Galliumnitrat wird als Arzneimittel und bei der Produktion von Katalysatoren für die petrochemische Industrie und der Produktion von Styrol verwendet.
- Galliumtrichlorid wird in Batterien (Lithium-Thionylchlorid-Batterien) eingesetzt und als Katalysator für spezielle chemische Reaktionen. Es dient als Vorprodukt für z. B. Trimethyl- und Triethylgallium.
- Trimethylgallium und auch Triethylgallium werden für die metallorganische Gasphasenepitaxie (MOVPE) genutzt.
- Galliumcitrat wird in der medizinischen Bildgebung für die Krebsdiagnostik („Gallium-Bildgebung“) eingesetzt.
- Galliumoxid wird in Feritten mit speziellen magnetischen Eigenschaften angewandt und in der Herstellung von Langasit, einem Gallium-Lanthan-Silikat-Kristallmaterial.

Eine Zukunftstechnologie für die Anwendung von Galliumoxid könnte die **Festoxidbrennstoffzelle** (SOFC) sein. Die Festoxidbrennstoffzelle besteht aus zwei porösen Elektroden, zwischen denen ein dichter ionenleitender Elektrolyt liegt. Der an der Kathode zugeführte Sauerstoff reagiert mit den von dem externen Stromkreis kommenden Elektronen zu Oxidionen (O^{2-}), die zur Anode (Treibstoffelektrode) durch den ionenleitenden Elektrolyten wandern. Yttriumdotiertes Zirkoniumdioxid (YSZ) ist wegen der ausreichenden ionischen Leitfähigkeit, der chemischen Stabilität und der mechanischen Festigkeit weiterhin das meist benutzte Elektrolytmaterial. Zusätzlich zu den üblicherweise

genutzten Zirkonium- oder Ceroxiden könnte auch **Galliumoxid** als Elektrolyt genutzt werden. Galliumoxid ist jedoch chemisch und mechanisch instabil. Mitsubishi Material Corporation (Japan) hat bis zu 10 kW große SOFC-Energiesysteme mit Gallium als Elektrolytmaterial erfolgreich gebaut und getestet (Electrochemistry Encyclopedia 2008 in MARSCH-EIDER-WEIDEMANN et al. 2016).

In der Flachbildschirmindustrie fokussiert die Forschung und Entwicklung darauf, Alternativen zu Indiumzinnoxid-Dünnschichten (Indium-Tin-Oxide, ITO) zu finden. Neue amorphe transparente, elektrisch leitfähige Oxide (transparent conducting oxides, TCO) wie Gallium-Indium-Zinkoxide (IGZO/IZGO), Indium-Zinkoxide (IZO) und Zink-Zinnoxide haben ähnliche oder sogar bessere Eigenschaften als ITO, brauchen allerdings noch Jahre zur Marktreife. LED-Displays für Schilder oder große „Leinwände“ sind Alternativen zu ITO-freien Displays (MARSCH-EIDER-WEIDEMANN et al. 2016).

Verwendung nach Anwendungsbereichen

Die Verwendung von Gallium nach Anwendungsbereichen zeigt Abb. 4. Gallium wurde im Jahr 2013 mit etwa 50 % für Hochfrequenzbauteile (HF; integrierte Schaltungen und Transistoren) und etwa 44 % für optoelektronische Anwendungen verwendet. Über 80 % der Galliumnachfrage erfolgt durch die Länder Japan, China und USA (s. Kap. 2.2.6 Nachfrage).

Bei Betrachtung der Jahre von 2009 bis 2012 (Abb. 5) zeigt sich ein weltweiter Trend zur stärkeren Verwendung von Gallium für die Optoelektronik. Dies spiegelt sich auch in der zunehmenden Verwendung von GaN gegenüber GaAs wider.

Die Entwicklung der Verwendung nach Anwendungsfeldern in den USA zeigt Abb. 6. Die größte Anwendung für Gallium liegt in den USA bei Hochfrequenzbauteilen (analoge und digitale Integrierte Schaltungen; IC). Im Jahr 2013 wurde mit rund 74 % für dieses Segment ein Höchststand erreicht. Der Anteil an der Nachfrage für das Anwendungsfeld der Optoelektronik (LDs, LEDs, Solarzellen und Photodetektoren) machte Anfang der 1990er Jahre den Großteil der Nachfrage in den USA aus, sank aber zwischen 1995 und 2006 deutlich auf unter 20 % im Jahr 2006. Seit 2007 steigt die Nachfrage nach Gallium für Optoelektronik und

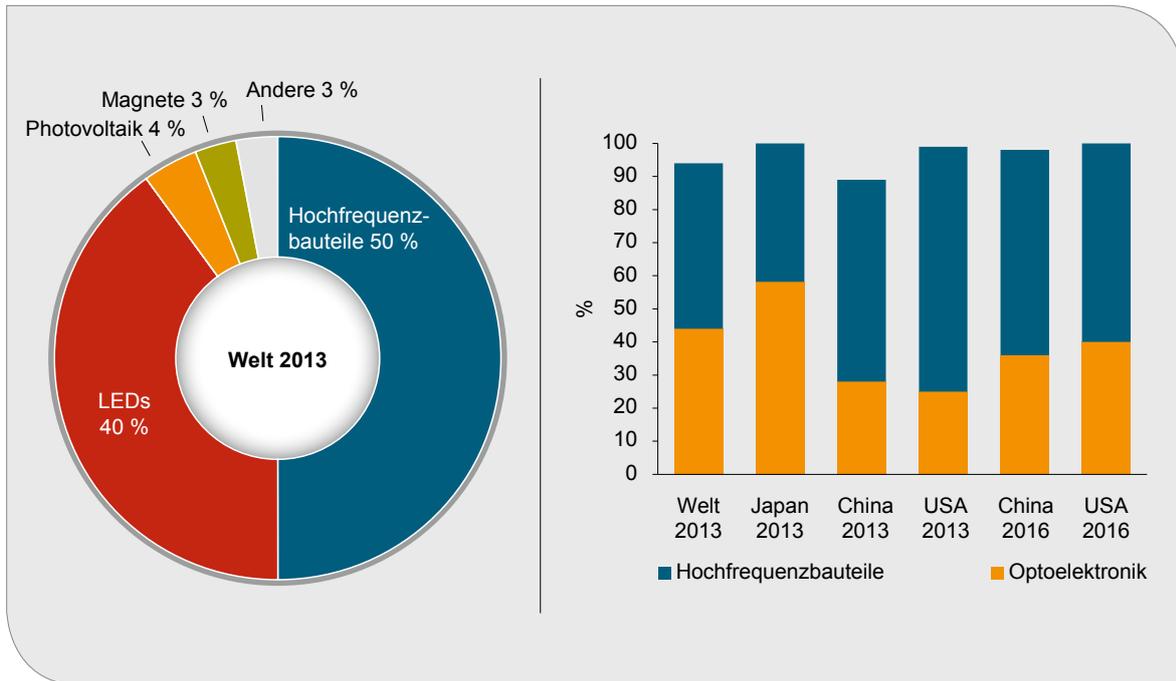


Abb. 4: Galliumverwendung nach Anwendungsbereichen für das Jahr 2013 und Aufteilung in die Anwendungsbereiche Hochfrequenzbauteile und Optoelektronik für die wichtigsten Nachfrageländer für 2013 und 2016 (Datenquelle: ROSKILL 2014, USGS versch. Jahre a).

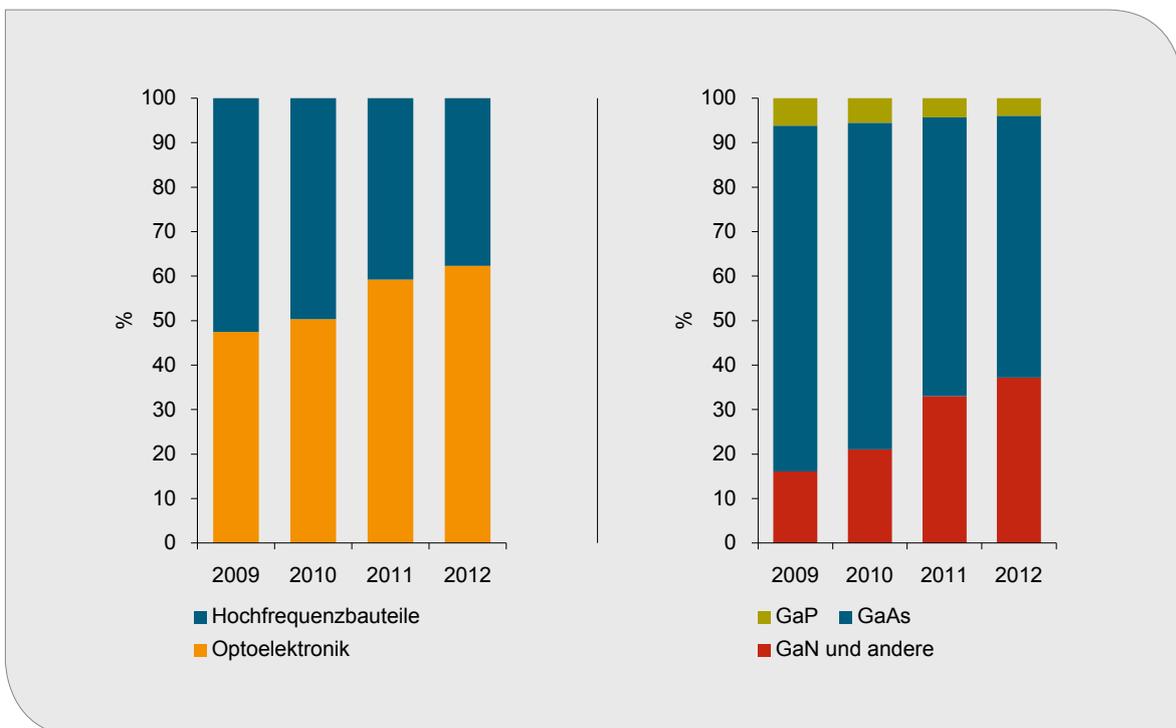


Abb. 5: Zeitliche Veränderung der weltweiten Galliumverwendung nach den Anwendungsbereichen Hochfrequenzbauteile und Optoelektronik und Verbindungen zwischen 2009 und 2012 (Datenquelle: DOWA in ROSKILL 2014).

insbesondere für LDs und LEDs wieder. Im Jahr 2015 entfielen 60 % des Galliumverbrauchs der Vereinigten Staaten auf die Produktion von Integrierten Schaltungen (Hochfrequenzbauteile), 39 % auf die Herstellung von optoelektronischen Geräten wie Laserdioden, LEDs, Photodetektoren,

Solarzellen und 1 % auf Forschung und Entwicklung (JASKULA 2017b). Für das Jahr 2017 wird eine Zunahme der Nachfrage für Hochfrequenzbauteile auf 70 % der Gesamtnachfrage erwartet (JASKULA 2018a).

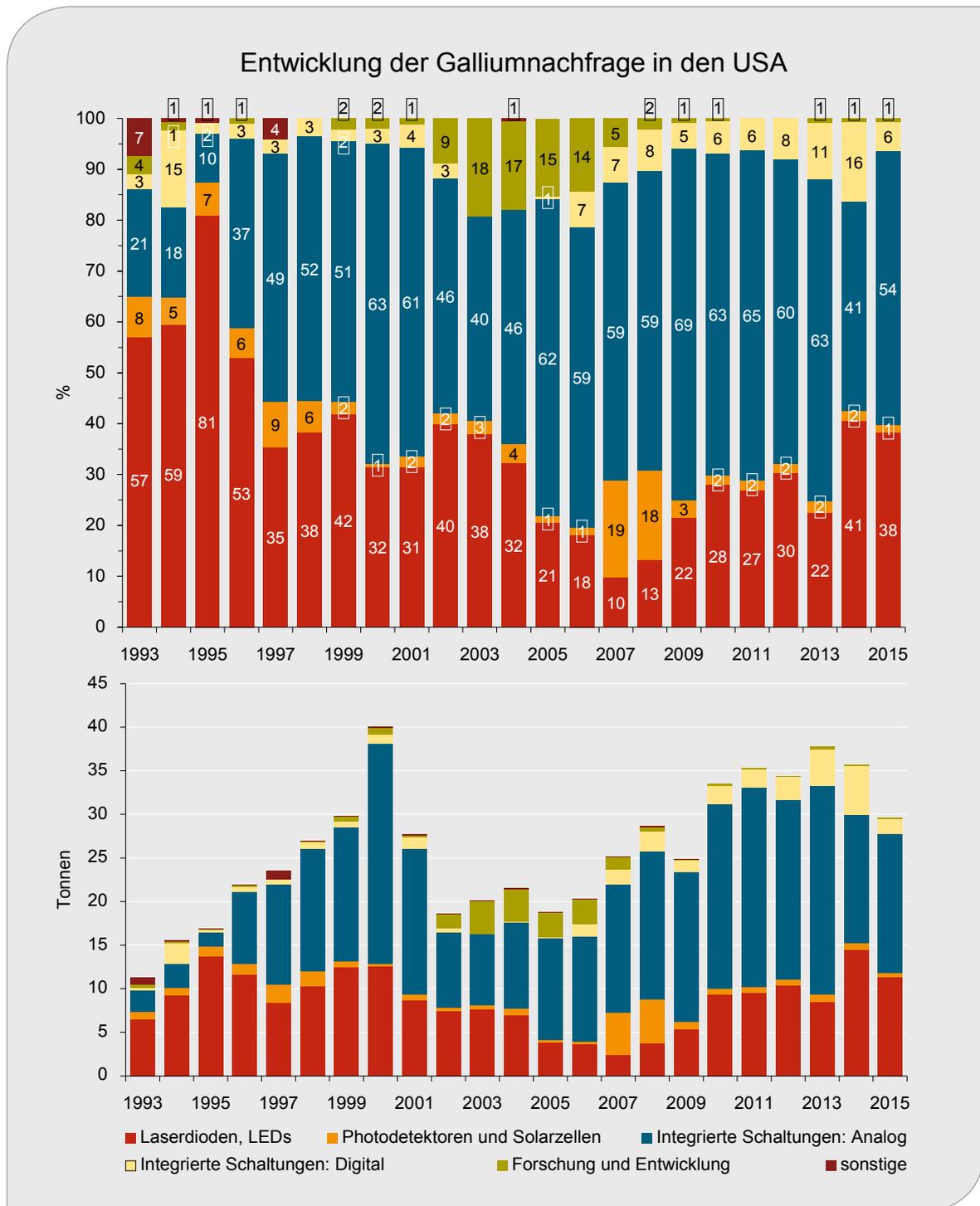


Abb. 6: Galliumverwendung in den USA nach Anwendung zwischen 1993 und 2015 (Datenquelle: USGS versch. Jahre a).

Für Japan sind keine aktuellen Daten zum Galliumverbrauch nach Anwendungsfeldern bekannt. Die letzten Daten von Dowa Electronics in ROSKILL (2014) geben für das Jahr 2009 den Verbrauch für Hochfrequenzbauteile auf rund 49 % (GaAs 43,9 %, GaP 4,9 %) und den für optoelektronische Anwendungen auf etwa 51 % (GaAs 39,9 %, GaP 5,7 %, andere 5,7 %) an. Für 2013 schätzt ROSKILL (2014), dass der Anteil für Hochfrequenzbauteile auf 42 % sinkt.

Für China gibt die China Nonferrous Metals Industry Association (CNIA) (FENG 2017) für das Jahr 2016 den Galliumverbrauch mit 62 % für Hochfrequenzbauteile, 36 % für optoelektronische Anwendungen wie LEDs (30 %) und Photovoltaik (6 %) und 2 % für weitere kleinere Anwendungen an.

1.5 Substitution

Grundsätzlich könnte Gallium durch andere Halbleiter wie Silizium ersetzt werden. Allerdings bietet Gallium als Verbindungshalbleiter gegenüber anderen Halbleitern deutliche Vorteile. Beispielsweise ist GaAs als Substrat in Integrierten Schaltungen (ICs) wesentlich effizienter als Silizium und kann über einen viel breiteren Temperaturbereich arbeiten. GaAs-basierte ICs sind speziell für Applikationen entwickelt, für die siliziumbasierte Halbleiter nicht ausreichen, sodass die Substitution dieser Komponenten ohne Funktions- oder Leistungsverlust nicht möglich ist (TERCERO ESPINOZA et al. 2014 in MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016). Die Elektronengeschwindigkeit und die Elektronenmobilität von GaAs sind höher als die von Silizium, was dazu führt, dass Transistoren hergestellt werden können, die bei mehreren Hundert GHz arbeiten. Außerdem haben sie bei diesen hohen Frequenzen weniger Rauschen als Silizium-Bauteile und können bei höheren Leistungsstufen arbeiten, da sie eine höhere Durchschlagsspannung besitzen. Bauteile aus GaAs sind zehnmal schneller als Silizium-Bauteile. Außerdem sind sie weniger störanfällig und haben einen geringeren Energiebedarf. Wegen dieser Eigenschaften ist GaAs für Hochfrequenzleistungsanwendungen in Mobiltelefonen, für drahtlose lokale Netze (WLAN) und GPS besonders geeignet (Hischier et al. 2007, Wikipedia 2008b in MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016). Auch SiGe kann GaAs nur in manchen Anwendungen ersetzen, könnte aber bei Anwen-

dungen wie z. B. WLAN verstärkt eingesetzt werden (Yole 2012 in MARSCHIEDER-WEIDEMANN et al. 2016).

1.6 Umwelt und Toxizität

Gefahren für die Umwelt durch die Gewinnung

Gallium wird als Beiprodukt der Aluminiumoxidproduktion gewonnen. Bei der Produktion von Aluminiumoxid (ein Zwischenprodukt der Aluminiumherstellung) aus Bauxit fällt als Prozessrückstand Rotschlamm an. Dieses Abfallprodukt ist durch die beim Bayer-Prozess eingesetzte Natronlauge stark alkalisch (pH-Wert von bis zu 13 und auch höher) und enthält neben Oxiden von Eisen, Titan, Silizium, Aluminium auch Schwermetalle bzw. giftige Elemente wie Arsen, Chrom, Quecksilber, deren Anteil je nach ursprünglicher Bauxitquelle variiert (FOLEY et al. 2017, THE INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE 2017). Dieser Rotschlamm wird gewaschen, meist filtriert und in Deponien eingelagert. Unsachgemäße Entsorgung oder der Bruch einer Rotschlammdeponie kann große Umweltschäden verursachen, so geschehen im Oktober 2010 in Ungarn, wo durch eine durchbrochene Rotschlammdeponie der Aluminiumoxidfabrik Ajka des Unternehmens Magyar Aluminium Zrt. zwischen 600.000 und 1,1 Mio. m³ Material freigesetzt wurden.

Die Verwendung von Quecksilber bei der Galliumgewinnung kann zu Umweltproblemen führen. In einigen Ländern erfolgte die Rohgalliumgewinnung aus den Aluminat-Laugen (Bayer-Lauge) unter Verwendung von Quecksilber, durch Abscheiden von Gallium an einer Quecksilber-Kathode als Amalgam oder durch unmittelbare Amalgam-Reduktion (Amalgamelektrolyse) (GREBER 2012).

Transport

Die Beförderung von Gallium über weite Strecken erfolgt üblicherweise per Lufttransport, bei dem eine ununterbrochene Kühlung aufrechterhalten werden soll. Aufgrund der Fähigkeit von Gallium, bei normalen Temperaturen mit Aluminium Legierungen mit sehr geringen mechanischen Festigkeiten zu bilden, schreibt die IATA (International Air Transport Association) vor, dass Gallium für den Lufttransport in sieben Lagen verpackt werden und

bei warmer Witterung der Behälter gekühlt werden muss. Auf diese Weise kann die Gefahr eines Unfalls, bei dem das strukturelle Metall des Flugzeugs durch flüssiges Gallium angegriffen wird, reduziert werden. Zusätzlich gibt es eine Grenze für die Menge an Gallium, die in einem Flugzeug transportiert werden darf (GREBER 2012).

Toxizität und Chemikalienverordnung (REACH)

Die Toxizität von **Galliummetall** ist noch nicht vollständig erforscht. Eine Untersuchung der Chemischen Handelsvereinigung 1984 und 1985 ergab keine Hinweise auf gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Gallium (GREBER 2012). Laut der von Unternehmen im Rahmen von Meldungen zur Einstufung und Kennzeichnung (CLP-Meldungen) angegebenen Einstufung an die European Chemicals Agency (ECHA) verursacht Gallium schwere Hautverbrennungen und Augenschäden, kann lang anhaltende schädliche Auswirkungen auf das Leben im Wasser haben und für Metalle ätzend sein (ECHA 2018a).

Von **Galliumarsenid** gehen Gefahren für die menschliche Gesundheit aus, insbesondere von dem potenziell schädlichen Staub, der bei der Verarbeitung erzeugt und von den Arbeitskräften aufgenommen werden kann. Galliumarsenid kann gemäß der von der Europäischen Union anerkannten harmonisierten Einstufung und Kennzeichnung (CLH) Krebs erzeugen, die Fruchtbarkeit beeinträchtigen und bei längerer oder wiederholter Exposition die Organe schädigen. Darüber hinaus ist GaAs schädlich für Wasserlebewesen (ECHA 2018b).

Galliumarsenid ist unter der Europäischen Chemikalienverordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) registriert (ECHA 2018b). Arsenverbindungen (inkl. Galliumarsenid) sind im Anhang XVII von REACH (Liste der Beschränkungen) gelistet, d. h., für diese Stoffe gelten eingeschränkte Verwendungen.

2 Risikobewertung

2.1 Preisentwicklung

Die Preise der mineralischen Rohstoffe, die als Beiprodukte gewonnen werden, werden kaum von makroökonomischen Faktoren beeinflusst. Ihre Preisentwicklung wird vielmehr durch Angebot und Nachfrage und den Stand der jeweiligen Technologieentwicklung bestimmt. Beiprodukte weisen typischerweise lange Phasen relativ konstanter niedriger Preise bei Überversorgung auf, die sich mit kurzen hohen Preisausschlägen in Zeiten von Unterversorgung bzw. hohen Nachfrageerwartungen infolge technischer Neuerungen abwechseln. Das Tempo der Entwicklung lässt sich dabei kaum vorhersagen.

Gallium wird nicht an der Börse gehandelt. Die Preise von Nebenmetallen wie Gallium werden meist direkt zwischen Produzent und Händler bzw. Verbraucher in der Regel auf einer langfristigen Basis ausgehandelt. Die in den Abbildungen dar-

gestellten Preise geben nicht unbedingt die tatsächlich bezahlten Verkaufspreise wieder, zeigen aber Preisentwicklungen auf.

6N-Gallium (99,9999 %), amerikanischer Markt

In den frühen 1960er Jahren wurden die kommerziellen Methoden zur Galliumextraktion deutlich verbessert und die Galliumverfügbarkeit wurde erhöht. Dies führte bei gleichbleibender Nachfrage zu einem starken Preisabfall. Durch die Einführung der Galliumarsenid-basierten LEDs ab den 1960er Jahren erreichte das zuvor hauptsächlich für Laborexperimente genutzte Gallium verstärkt kommerzielle Anwendung. Zwischen 1966 und 1973 kam es zu einer umfangreichen Nachfragezunahme, die durch die Eroberung des LED-Markts weiter zunahm. Durch die infolge der Nachfragezunahme verstärkte industrielle Galliumproduktion sank der Galliumpreis bis Mitte der 1980er Jahre weiter (Abb. 7). Nach einem kurzen Hoch 1980 und 1981 auf über 600 US\$/kg für 6N-Gallium im Jahresdurchschnitt blieb der Galliumpreis bis Mitte der 1990er Jahre auf einem Niveau unter 500 US\$/

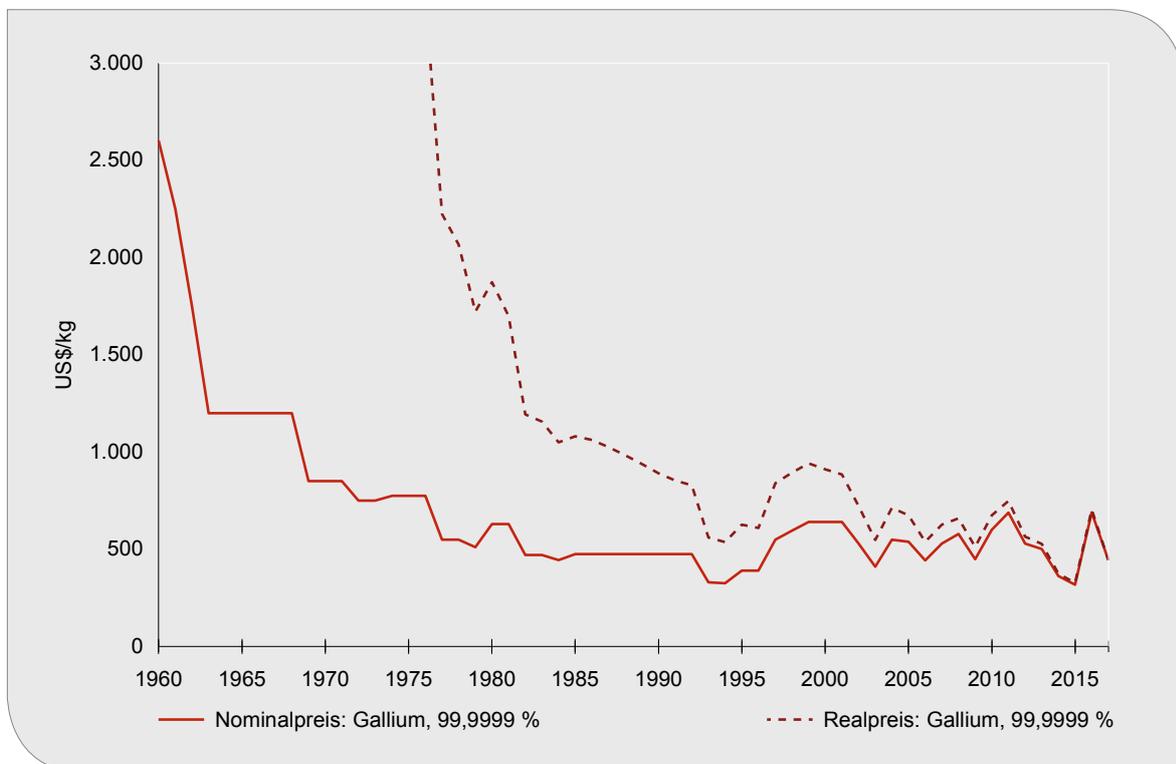


Abb. 7: Preisentwicklung der Jahresdurchschnittspreise für 6N-Gallium; Vergleich Nominal-, Realpreis bezogen auf den US\$ 2017; der Realpreis liegt zwischen 1960 und 1976 zwischen 21.520 und 3.337 US\$/kg und wird im Diagramm nicht dargestellt (Datenquellen: USGS versch. Jahre a, BGR o. J.).

kg relativ konstant. Der Anwendungsmarkt für Gallium entwickelte sich zwar weiter, aber die benötigte Galliummenge pro Einheit blieb in der Regel sehr gering. Die Kosten für den Rohstoff stellten keine signifikanten Kosten für das Endprodukt dar. Die Galliumnachfrage erreichte insgesamt kein Niveau, das von den Produzenten nicht erfüllt werden konnte. Ende der 1990er Jahre gab es erneut einen Preisanstieg auf über 600 US\$/kg für 6N-Gallium im Jahresdurchschnitt, der sich bis Anfang des neuen Jahrtausends hielt (Abb. 7). In dieser Zeit hatte auch die Galliumproduktion ein Hoch (KRAMER 2000, USGS versch. Jahre a).

In der Hochpreisphase im Jahr 2000 und 2001, als Gerüchte über Versorgungsengpässe aufgrund der steigenden Nachfrage nach Galliumarsenid für Mobiltelefone neuerer Generation verbreitet wurden, lag der Spotpreis für Gallium zeitweilig bei etwa 2.500 US\$/kg. Für Langzeitverträge, deren Dauer meist bei einem halben bis einem Jahr liegt, wurden allerdings nur um die 800 US\$/kg verhandelt. 2001 folgte ein Preiszusammenbruch auf dem Spotmarkt.

Zwischen Anfang der 2000er Jahre und 2011 schwankten die Jahresdurchschnittspreise von 6N-Gallium zwischen 400 und 700 US\$/kg (Abb. 8). Die Produktion zog 2007 und 2008 an und fiel daraufhin wieder aufgrund der weltweiten Wirtschaftskrise im Jahr 2009.

Anfang 2010 stiegen die Preise wieder stark an, um seit Mitte 2011 ebenso deutlich wieder zu fallen. Im Jahr 2015 erreichte der Jahresdurchschnittspreis mit 317 US\$/kg einen Tiefstand. Seit 2010 hat China seine Produktionskapazitäten für Primärgallium enorm ausgeweitet und auch die weltweiten Raffinadekapazitäten sind stark gestiegen. 2016 stiegen die Preise wieder auf das Niveau von 2011, sanken aber bereits 2017 wieder (JASKULA 2018).

4N-Gallium

Die durchschnittlichen Monatspreise für Rohgallium (99,99 %, fob China) erreichten im März 2001 aufgrund einer hohen Nachfrageerwartung auf dem Halbleitermarkt einen Höchststand von 1.840 US\$/kg. Im Januar 2002 war der Preis aber bereits auf unter 400 US\$/kg gesunken. Es folgte eine lange Niedrigpreisphase bis März 2007 mit



Abb. 8: Preisentwicklung von 4N-Gallium (Monatsdurchschnitte).

Preisen zwischen 200 und 400 US\$/kg. Im zweiten und dritten Quartal 2007 stiegen die Preise auf 735 US\$/kg, was auf die Einführung von Exportlizenzen für chinesische Galliumexporte, eine höhere Nachfrage nach Gallium in Galliumarsenidverbindungs Halbleitern für Mobiltelefone und auf Aluminiumgalliumindiumphosphid- und Galliumphosphidverbindungs Halbleiter in LEDs zurückzuführen ist (RLJ 2007). Eine geringere Nachfrage während der weltweiten Finanzmarktkrise führte zu sinkenden Preisen. Im Jahr 2011 stiegen die Preise erneut bis auf etwa 940 US\$/kg Mitte des Jahres, was einerseits auf die Erwartungen einer signifikanten Nachfragezunahme bei CIGS-Photovoltaikzellen und Gallium-Nitrid-Weiß-LEDs zurückzuführen ist (RLJ 2012) und andererseits auf Versorgungsengpässe, da die Galliumverbraucher ihre Lagerbestände nach der Finanzmarktkrise wieder aufstockten (JASKULA 2013). Allerdings fielen die Preise bereits ab der zweiten Hälfte 2011 wieder stark, als die neuen Primärgallium-Kapazitäten in China den Markt erreichten. Im Mai 2012 lagen die Preise für 4N-Gallium wieder unter 400 US\$/kg und sanken bis Mitte 2016 stetig auf ihren niedrigsten Stand von etwa 110 US\$/kg. Grund war eine schwache Nachfrage bei einem

Überangebot. Hinzu kamen Befürchtungen, dass Vorräte der im Jahr 2015 zusammengebrochenen chinesischen Fanya Metal Exchange (s. Kap. 2.2.5 Lagerhaltung) den Markt überschwemmen könnten. Produktionskürzungen bei Gallium, insbesondere seit Mai 2016, der Abbau von Lagerbeständen und zunehmende Einkaufsaktivitäten führten Ende 2016 zu einem leichten Wiederanstieg der Preise (METAL BULLETIN 2016). Umweltinspektionen in China und Preise, die unterhalb der Produktionskosten lagen, führten auch 2017 zu deutlichen Produktionskürzungen. Verbunden mit einem stetigen Nachfrageanstieg kam es nach einem Preistief im Mai 2017 wieder zu einer leichten Erholung der Rohgalliumpreise.

Hohe Volatilitäten des Galliumpreises reflektieren nur selten die makroökonomische Situation auf dem Weltmarkt. Die Preisvolatilitäten waren besonders hoch (> 35 %) während des Halbleiterbooms und des darauffolgenden Preisabsturzes (Halbleiterkrise) in den Jahren 2000–2002 sowie 2007 und 2010/2011 und spiegeln Spekulation und instinktiv gesteuerte Panikkäufe wider, wie sie typisch für die kleinen Märkte der Nebenmetalle sind (Abb. 9).

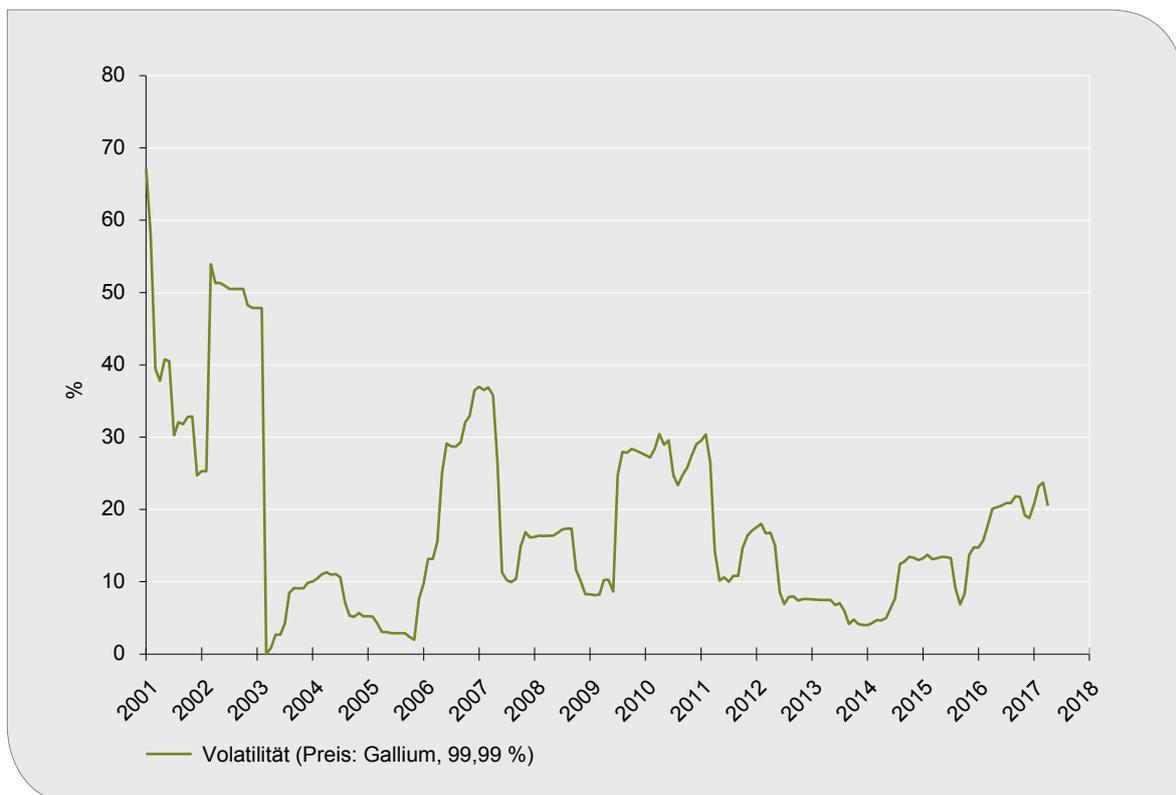


Abb. 9: Historische Jahresvolatilität für die Monatsdurchschnittspreise von 4N-Gallium.

2.2 Angebot und Nachfrage

2.2.1 Primärproduktion von Rohgallium

Produktion

Daten zur Primärproduktion von Gallium sind meist Schätzwerte. Im Jahr 2015 wurde mit einer Produktion von etwa 470 t Rohgallium aus Primärrohstoffen ein Höchstwert erreicht (JASKULA 2017a). Bei weitem größtes Produzentenland war China (rund 360 t, s. Tab. 2), gefolgt von Deutschland, Russland, Südkorea, der Ukraine und Japan.

Im Zeitraum von Anfang der 1970er bis Ende der 1990er Jahre ist die Rohgalliumproduktion kontinuierlich gestiegen (Abb. 10). Von 1973 bis 1998 stieg die Produktion um durchschnittlich 7,3 % pro Jahr. Anfang der Jahrtausendwende kam es bedingt durch einen Nachfragerückgang an elektronischen Geräten zu einer Produktionsabnahme. Von 2005 bis 2008 stieg die Produktion wieder. Der Produktionsrückgang für 2009 geht auf die Wirtschaftskrise und den damit verbundenen Nachfragerückgang nach Elektronikgeräten zurück. Von 2009 bis 2015, mit kurzer Unterbrechung 2013, ist die Produktion von etwa 79 t auf 470 t extrem gestiegen. Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate lag für diesen Zeitraum bei 34,6 %. Verantwortlich für diesen Anstieg ist die enorme Produktionszunahme

in China seit 2010. Ausschlaggebend war der Durchbruch bei der Rohgalliumgewinnung mittels Austauschharz (resin technology) (FENG 2017). Im Jahr 2014 wurden in China je nach Quelle zwischen 335 und mehr als 500 t produziert (Tab. 3) (FENG 2017, ICMLR, pers. Mitteilung 2017, JASKULA 2016b). Hohe Überkapazitäten und die seit dem Preispeak im Jahr 2011 stark gesunkenen Galliumpreise führten 2016 zu bedeutenden Produktionskürzungen. 2016 wurden in China nur noch 193 t Primärgallium gewonnen (ICMLR, pers. Mitteilung 2017), ASIAN METAL (2017b) gibt allerdings eine Galliumproduktion von über 320 t an. Geringe Mengen wurden ebenfalls in Russland, Südkorea, der Ukraine, Deutschland und Japan produziert. Die Produktion in Deutschland wurde Anfang 2016 eingestellt. Kasachstan produziert seit 2013 kein Primärgallium mehr und auch Ungarn stellte die Produktion im gleichen Jahr ein. Nach dem Produktionshöhepunkt in den Jahren 2014/2015 kam es 2016 wieder zu Produktionsrückgängen. 2016 lag die Rohgalliumproduktion aus Primärrohstoffen nur noch bei 274 t; für 2017 schätzt der USGS eine Zunahme um 15 % auf 315 t (JASKULA 2018). Laut ASIAN METAL (2018) wurden 2017 in China etwa 297 t Rohgallium produziert.

Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (CAGR) der gesamten Primärgalliumproduktion lag zwischen 1973 und 2017 bei 7 %.

Tab. 2: Geschätzte Primärproduktion von Rohgallium 2014–2016.

	China	Deutschland	Japan	Ukraine	Russland	Südkorea	Gesamt
	[Tonnen]						
2016	193 ¹ –250 ⁵	8 ²	3 ³	?	13 ³	?	200–274 ⁵
2015	358 ¹ –440 ⁵	22 ²	5 ⁵	9 ⁴	13 ³	?	400–470 ⁵
2014	335 ¹ –500 ⁶	17 ²	5 ⁵	?	13 ³	?	370–540

¹ ICMLR, pers. Mitteilung 2017; ² AOS, pers. Mitteilung; ³ BGS 2018; ⁴ ARGUS 2016; ⁵ Jaskula 2017a, 2018; ⁶ Feng 2017

Tab. 3: Geschätzte Primärproduktion von Rohgallium in China 2009–2016 nach verschiedenen Quellen.

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	[Tonnen]							
USGS			200	300	300	400	440	250
CNIA ²	80	145	280	350	350	500	380	197
ICMLR ¹					327	335	358	193

USGS = United States Geological Survey, CNIA = China Nonferrous Metals Industry Association, ICMLR = Information Center of Ministry of Land and Resources; ¹ ICMLR, pers. Mitteilung 2017, ² FENG 2017

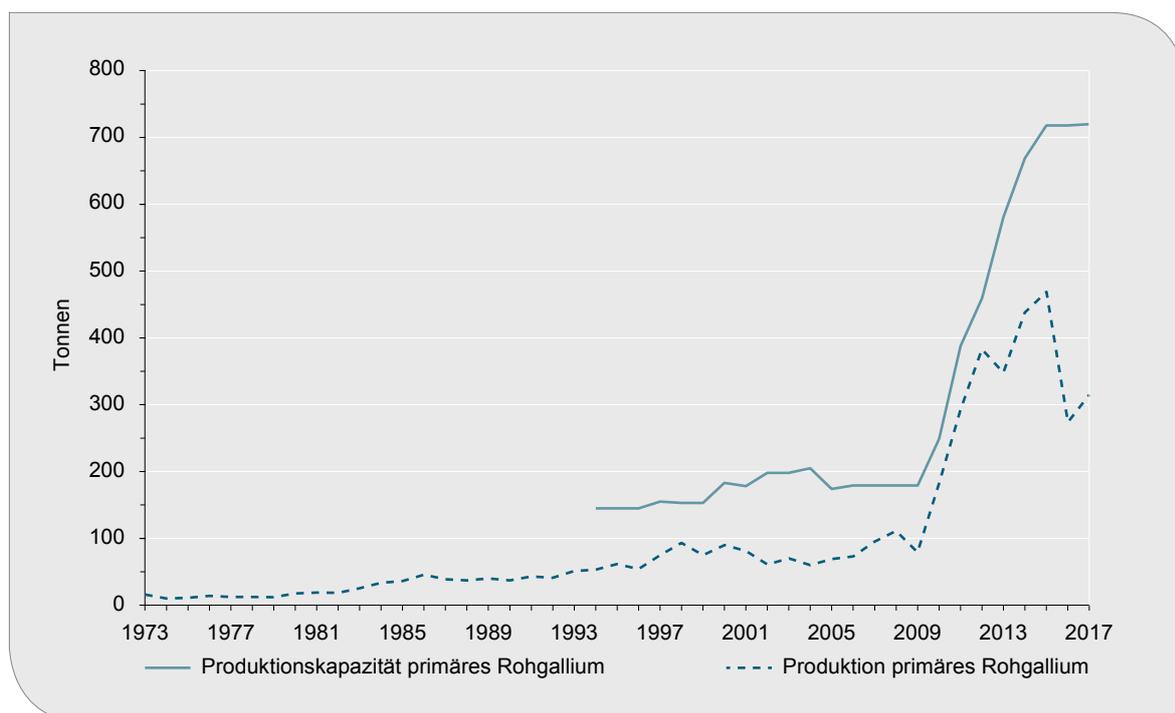


Abb. 10: Entwicklung der weltweiten Produktion und der Produktionskapazität von primärem Rohgallium zwischen 1973 bzw. 1994 und 2017 (Datenquelle USGS versch. Jahre a, BGR o. J.).

Kapazitäten

Zwischen 1994 und 2017 stiegen die weltweiten Kapazitäten im Jahresdurchschnitt um über 7 %. Seit der Jahrtausendwende hat vor allem China

die Produktionskapazitäten massiv erhöht und verfügt heute über mehr als 80 % der weltweiten Rohgalliumkapazitäten.

Tab. 4: Länder und ihre Kapazitäten für die Primärproduktion von Gallium für verschiedene Jahre (Datenquellen: USGS versch. Jahre a, BGR o. J.).

	2000	2005	2010	2014	2015	2016
	[Tonnen]					
China	20	59	141	551	600	600
Deutschland	30	30	30	30	30	30
Kasachstan	20	20	25	25	25	25
Südkorea	–	–	10	20	20	20
Ukraine	5	10	15	15	15	15
Japan	20	20	10	10	10	10
Russland	19	19	10	10	10	10
Ungarn	8	8	8	8	8	8
Slowakei	8	8	–	–	–	–
Australien	50	–	–	–	–	–
USA	3	–	–	–	–	–
Summe	183	174	249	669	718	718

Anmerkung: Enthalten sind auch Kapazitäten von nicht-produzierenden Unternehmen wie z. B. in Kasachstan und Ungarn.

Für das Jahr 2016 waren Primärproduktionskapazitäten von etwa 718 t Gallium bekannt (Tab. 4, Abb. 11). Diese befanden sich in China (84 % der Gesamtkapazitäten), Deutschland (4,2 %), Kasachstan (3,5 %), Südkorea (2,8 %), der Ukraine (2,1 %), Japan (1,4 %), Russland (1,4 %) und Ungarn (1,1 %) (JASKULA 2017b, NAUMOV 2014, KOREA INVESTMENT & SECURITIES 2012). Diese Kapazitätsangaben beinhalten auch Kapazitäten von Unternehmen, die nicht produzieren, deren Kapazitäten aber noch bestehen. Für 2017 wer-

den ebenfalls 718 t Primärproduktionskapazitäten angenommen. In der Vergangenheit wurden weitere Produktionskapazitäten für Australien, die USA, die Slowakei und Frankreich angegeben.

Global betrachtet lag die Auslastung der Kapazitäten vor 2008 meist unter 50 %, selten darüber. Allerdings gehen in die Kapazitätsbetrachtungen auch Anlagen ein, die nicht produzieren (Standby basis) oder nie ihre Produktionskapazität in Anspruch nahmen; in den letzten Jahren stieg die

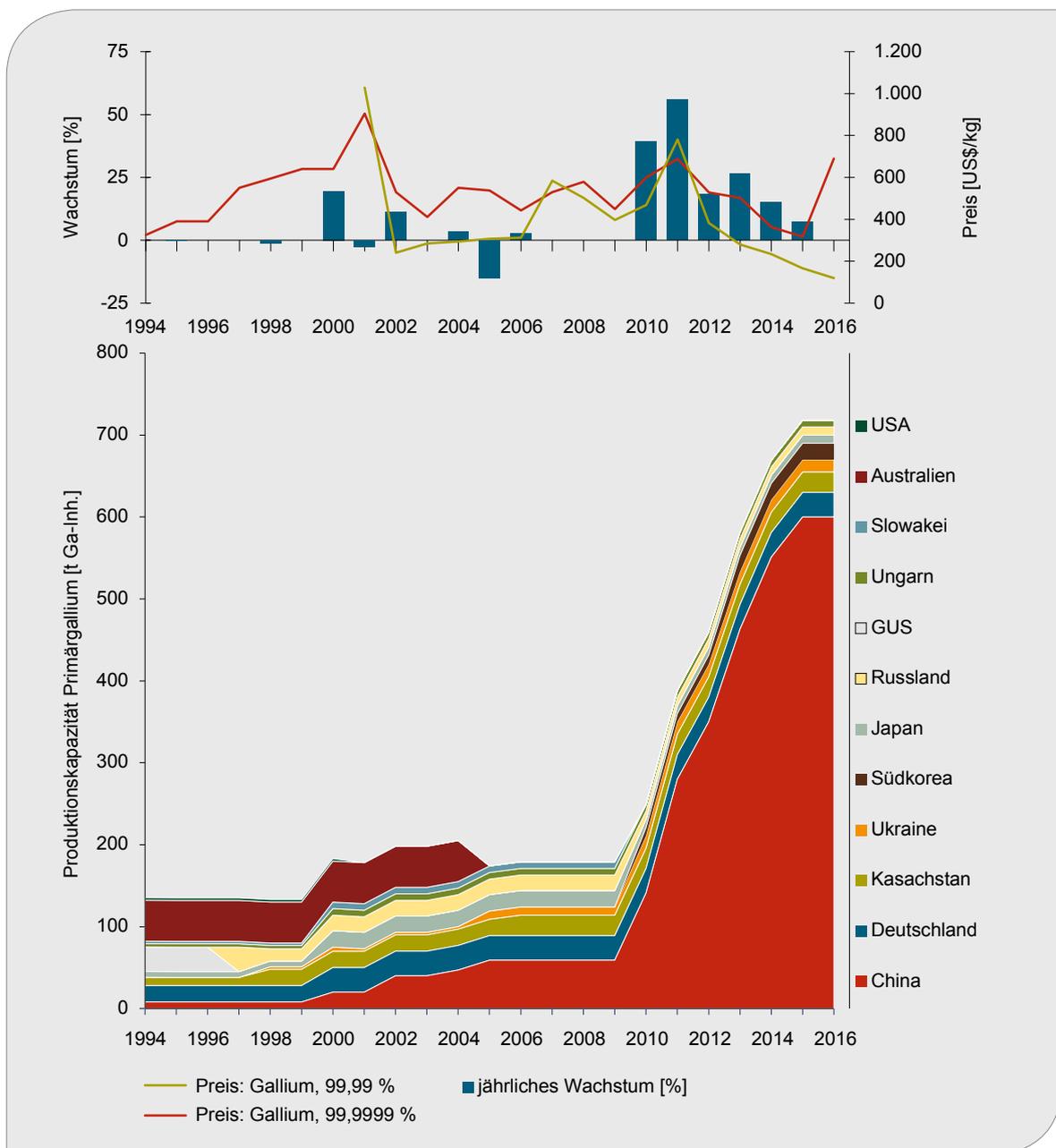


Abb. 11: Entwicklung der Produktionskapazität für Primärgallium (unten) und deren jährliche Wachstumsrate sowie des 6N-Galliumpreises (oben).

Tab. 5: Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten der Kapazitäten der Länder für ausgewählte Zeiträume.

	1994–2016	1994–2009	2009–2016	2006–2016	2011–2016
	jährliche Wachstumsraten [%]				
China	21,7	14,2	39,3	26,1	16,5
Deutschland	1,9	2,7	0,0	0,0	0,0
Kasachstan	–	–	0,0	0,0	0,0
Südkorea	–	–	–	–	4,9
Ukraine	–	–	6,0	4,1	0,0
Japan	1,6	7,2	–9,4	–6,7	0,0
Russland	–	–	–8,8	–6,2	0,0
Ungarn	3,2	4,7	0,0	0,0	0,0
Slowakei	–	6,8	–	–	–
Welt	7,2	1,0	21,9	14,9	13,1

Kapazitätsauslastung und erreichte in den Jahren 2010 bis 2015 in der Regel 65–75 %, 2012 sogar 81 %. Durch die tiefen Preise 2016 und 2017 und den dadurch erfolgten Produktionskürzungen, insbesondere in China, sank die Kapazitätsauslastung wieder auf unter 60 %.

2.2.1.1 Länderkonzentration und gewichtetes Länderrisiko der Produktionskapazitäten

Länderkonzentration (Herfindahl-Hirschman-Index)

Über 91 % der Produktionskapazitäten für Primärgallium verteilen sich im Jahr 2016 auf nur drei Länder (China, Deutschland, Kasachstan); zehn Jahre zuvor waren es nur 64 % (Tab. 6, Abb. 12). Seit der Jahrtausendwende hat sich China zum Land mit den höchsten Kapazitäten für die Primärgalliumproduktion entwickelt. Seit 2005 liegt der Kapazitätsanteil Chinas bei über 30 % und seit 2011 bei über 70 % (zwischen 71 und 83 %), seit 2014 hat China mit einer Kapazität von 550 bis 600 t einen Spitzenwert. Japan und Russland haben gegenüber 2006 Primärproduktionskapazitäten abgebaut; Südkorea baut seit 2010 Produktionskapazitäten auf. Kurz- bis mittelfristig wird die Primärproduktion weiterhin von China dominiert werden. Neben Chinas Dominanz bei der primären Produktion spielt auch die Sekundärproduktion im Land eine zunehmende Rolle.

Der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI)¹ der Kapazitäten für die Primärgalliumproduktion stieg im Betrachtungszeitraum von 1994 bis 2016 von 2.068 (mäßig bedenklich) auf 7.030 (Abb. 12); die Länderkonzentration liegt somit im hoch bedenklichen Bereich.

Gewichtetes Länderrisiko (GLR)

Das gewichtete Länderrisiko (GLR) der Primärproduktionskapazität (s. Glossar) von Gallium, das auf den „Worldwide Governance Indicators“ der Weltbank (WORLD BANK 2017) und der Produktionskapazität basiert, liegt für das Jahr 2016 mit einem Wert von –0,28 im mäßigen, aber nahe zum bedenklichen Bereich (Werte zwischen 0,5 und –0,5 werden als mäßig risikoreich bewertet)². Gegenüber dem Jahr 2006, in dem das GLR bei 0,14 lag, hat sich das gewichtete Länderrisiko deutlich erhöht (Abb. 12, Tab. 6). Für die Bewertung ist der hohe Kapazitätsanteil Chinas ausschlaggebend. China galt 2016 mit einer Risikobewertung von –0,42 als ein noch mäßig bis bedenklich risikoreiches Land.

¹ Für die Ermittlung des Konzentrationsgrads wird der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) berechnet (s. Anhang). HHI-Werte zwischen 1.500 und 2.500 werden als mäßig risikoreich bewertet, Werte > 2.500 gelten als bedenklich. Diese Einteilung gilt auch für die Firmenkonzentration (U.S. DEPARTMENT OF JUSTICE 2010).

² Bezogen auf die Weltbank-Skala für das Länderrisiko (von –2,5 bis 2,5) werden Länder mit einem Länderrisiko zwischen 0,5 und –0,5 als mäßig risikoreich bewertet. Werte < –0,5 werden als bedenklich eingestuft. Diese Bewertungsskala gilt auch für das gewichtete Länderrisiko (GLR).

Tab. 6: Geopolitisches Risiko (Länderkonzentration und gewichtetes Länderrisiko) der Produktionskapazität von Primärgallium 2006 und 2016 im Vergleich (Datenquellen: USGS versch. Jahre a, BGR o. J., WORLD BANK 2017).

	2006			2016		
	Kapazität ¹ [t]	%	Länderrisiko	Kapazität ¹ [t]	%	Länderrisiko
China	59	33,0	-0,60	600	83,6	-0,42
Deutschland	30	16,8	1,53	30	4,2	1,51
Kasachstan	25	14,0	-0,63	25	3,5	-0,44
Südkorea	0	0,0	0,69	20	2,8	0,75
Ukraine	10	5,6	-0,42	15	2,1	-0,75
Japan	20	11,2	1,27	10	1,4	1,36
Russland	19	10,6	-0,76	10	1,4	-0,73
Ungarn	8	4,5	0,96	8	1,1	0,46
Slowakei	8	4,5	0,78	-	-	-
Summe	179	100		718	100	
HHI		1.871			7.030	
GLR		0,13			-0,28	

GLR = gewichtetes Länderrisiko, HHI = Herfindahl-Hirschman-Index.

¹ Enthalten sind auch Kapazitäten von nicht-produzierenden Unternehmen wie z. B. in Kasachstan und Ungarn;

Das gewichtete Länderrisiko (GLR) der Kapazitäten für die Primärgalliumproduktion stieg im Betrachtungszeitraum von 2000 bis 2016 von

unbedenklich (GLR: 0,69) auf mäßig bedenklich (GLR: -0,28) (Abb. 12).

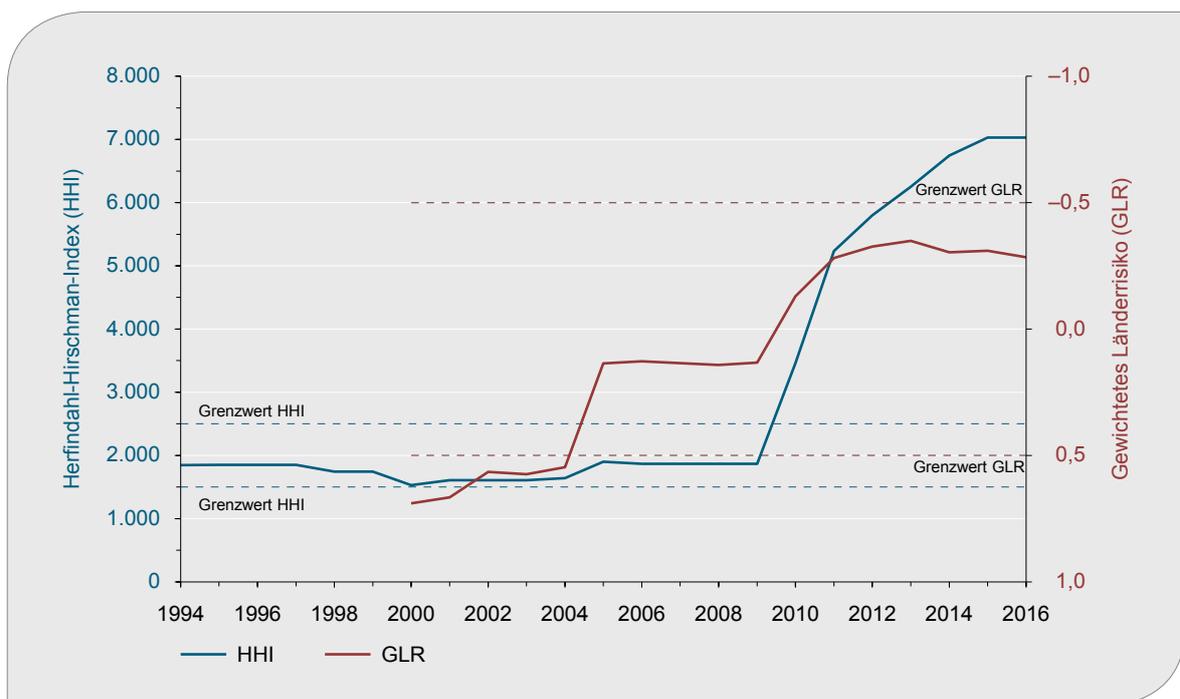


Abb. 12: Entwicklung der Länderkonzentration (HHI) und des gewichteten Länderrisikos (GLR) der Kapazität für die Primärproduktion von Gallium.

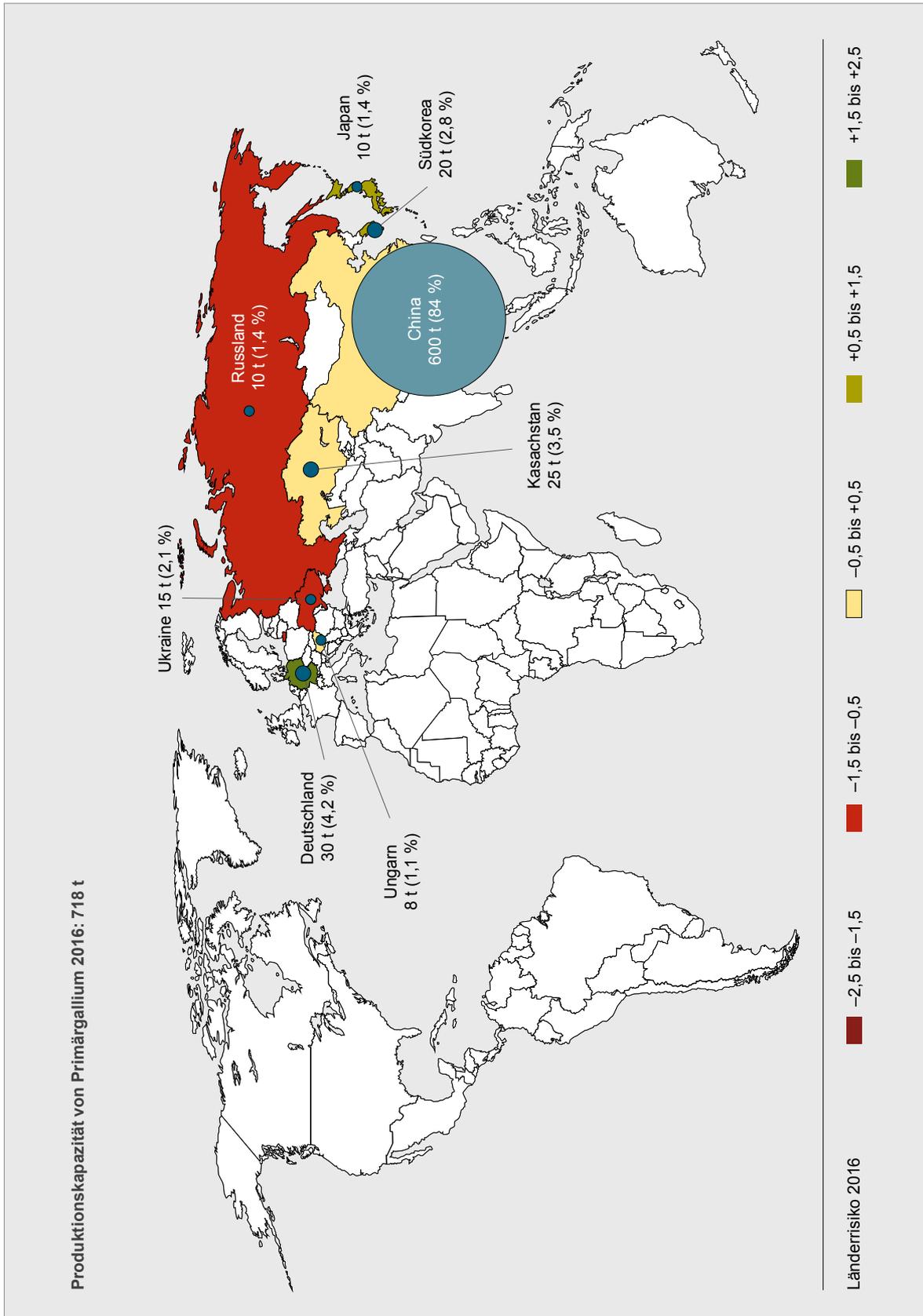


Abb. 13: Länder mit Produktionskapazitäten von Primärgallium im Jahr 2016 und deren aggregierter World-Governance-Indikator (Länderrisiko) (Datenquellen: BGR o. J., WORLD BANK 2017).

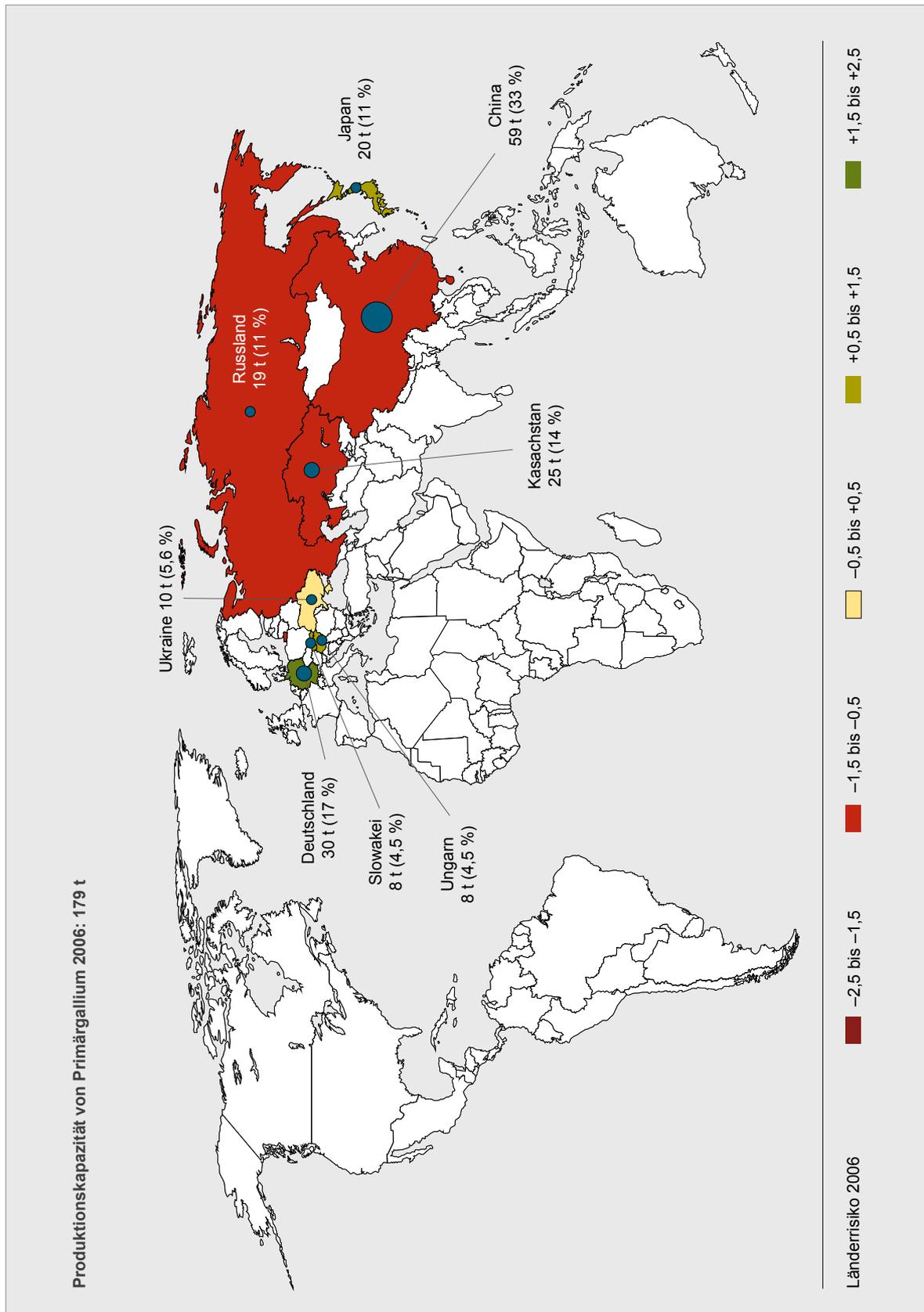


Abb. 14: Länder mit Produktionskapazitäten von Primärgallium im Jahr 2006 und deren aggregierter World-Governance-Indikator (Länderrisiko) (Datenquellen: BGR o. J., WORLD BANK 2017).

2.2.2 Raffinadeproduktion

Im ersten Produktionsschritt der Primär- und Sekundärproduktion wird Rohgallium mit einer Reinheit von 3N/4N (99,9 bis 99,99 %) erzeugt. Dieses Rohgallium muss, abhängig von der Verwendung, auf bis zu 7N/8N Gallium aufgereinigt werden (s. Kap. 1.3). Zuverlässige Daten für die Produktion von Raffinadegallium und für die Raffinadeproduktionskapazitäten liegen nicht vor. Insbesondere bei den älteren Angaben für die Raffinadeproduktion ist eine Unterscheidung zwischen Sekundär- oder Primärgallium als Ausgangsstoff nicht möglich, hier enthalten die Zahlen auch Anteile von Sekundärgallium.

Die Raffinadeproduktion wird für 2015, 2016 und 2017 vom USGS auf 180 t geschätzt (JASKULA 2017a, 2018). Die Raffinadeproduktionskapazität für Gallium lag bei etwa 320 t (JASKULA 2017a, 2018), also

deutlich höher als die Produktion. Raffinadegallium aus Primärgallium wurde in China, Japan, Großbritannien und den USA produziert (JASKULA 2017a). Hauptproduzenten von hochreinem Gallium aus Sekundärmaterial waren ebenfalls Japan, China, Großbritannien, die USA sowie Kanada, die Slowakei und Deutschland. Bis 2006 war Frankreich ebenfalls ein großer Raffinadeproduzent; das Rohgallium wurde aus Deutschland bezogen.

Nur etwa 60 % des produzierten Rohgalliums wurde 2017 zu Raffinadegallium weiterverarbeitet. In den Jahren 2014 und 2015 lag der Anteil bei noch nicht einmal 40 %. Demgegenüber wurde vor 2010 fast jedes Jahr mehr Raffinadegallium als Rohgallium produziert (Abb. 15, Tab. 7). In diesen Zahlen ist vermutlich auch Raffinadeproduktion aus Sekundärgallium enthalten, des Weiteren könnte Rohgallium aus Lagerhaltung auf den Markt gekommen sein.

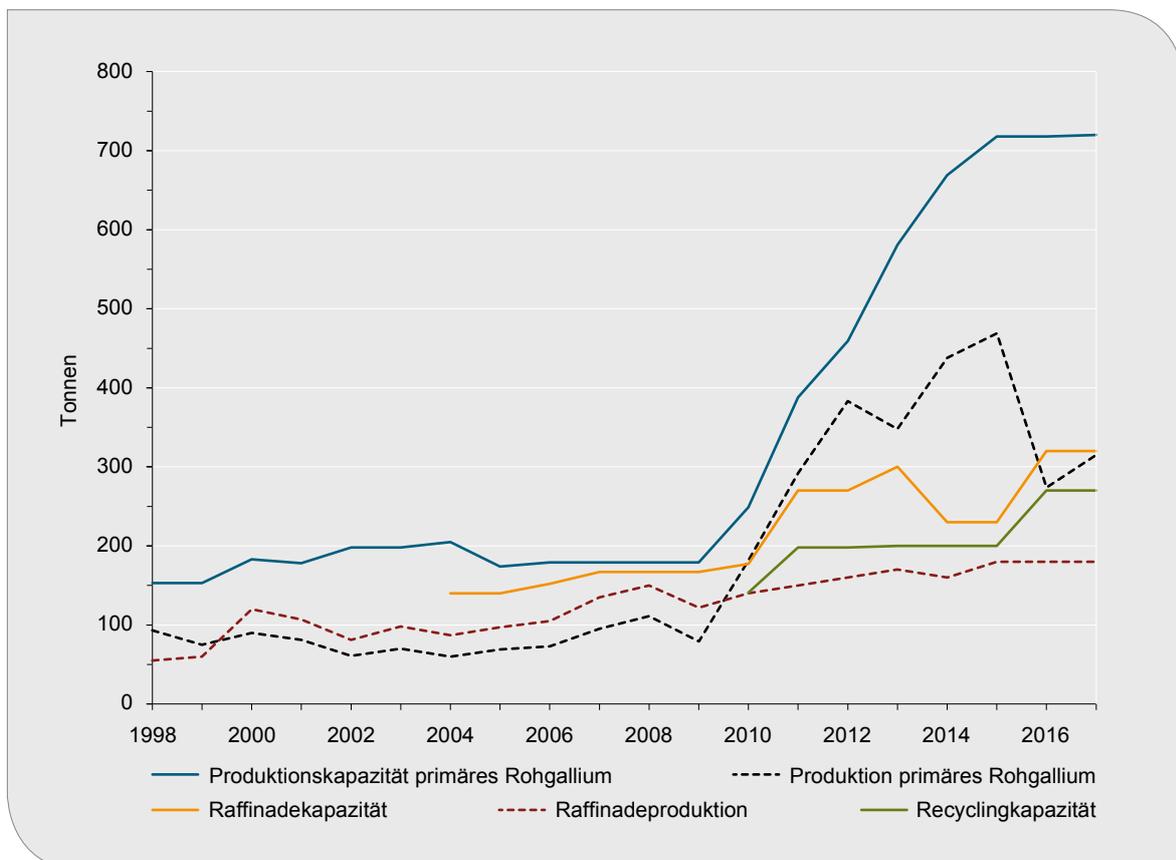


Abb. 15: Entwicklung der Kapazität und Produktion von Primärgallium, der Raffinadeproduktion und -kapazität sowie der Recyclingkapazität. Die Differenz zwischen der primären Rohgalliumproduktion und der Raffinadeproduktion in den Jahren 2000 bis 2009 wurde vermutlich durch Sekundärgallium aus Neuschrott gedeckt.

Tab. 7: Raffinadekapazität, Raffinadeproduktion und Primärproduktion für verschiedene Jahre (Datenquellen: USGS versch. Jahre a, BGR o. J.).

	2005	2010	2012	2014	2015	2016	2017
	[Tonnen]						
Primärproduktion	69	182	383	438	469	274	315
Raffinadeproduktion	97 ¹⁾	140	160	160	180	180	180
Raffinadekapazität	140	177	270	230	230	320	320
	[%]						
Kapazitätsauslastung	69 %	79 %	59 %	70 %	78 %	56 %	56 %
Anteil der Primärproduktion, der raffiniert wurde	139 %	77 %	42 %	36 %	38 %	66 %	57 %

¹⁾ vermutlich inklusive Sekundärgallium.

2.2.3 Sekundärproduktion

Für das weltweite Angebot spielt das Recycling von Gallium aus Neuschrott eine bedeutende Rolle. Ein Recycling findet nahezu ausschließlich aus Produktionsrückständen statt. Abfälle aus der Herstellung von GaAs- und GaN-Wafern sind die wichtigste Quelle für Sekundärgallium. Während ihrer Produktion fällt eine große Menge an Neuschrott an, der recycelt wird (s. Kap. 1.3) Die Herstellung dieser Halbleiterscheiben erzeugt etwa 45–60 % Neuschrott (FCM o. J., STELTER & ZEIDLER 2013).

Laut UNEP (2011) liegt der Sekundäranteil an der gesamten Produktion (Recycling Content, RC) von Gallium bei etwa 25–50 %. 2015 wurden etwa 40–45 % des Galliumbedarfs aus recycelten Prozessrückständen gedeckt (JASKULA 2017b). Beispielsweise nutzt das in Freiberg ansässige Unternehmen Freiburger Compound Materials (FCM) als Galliumquelle zu 50 % Sekundärgallium und strebt eine weitere Steigerung an. Die weltweiten

Sekundärkapazitäten werden vom USGS für das Jahr 2015 auf 200 t und für 2016 und 2017 auf 270 t geschätzt (JASKULA 2016a, 2018). Für den Zeitraum vor 2010 fehlen verlässliche Angaben für die Sekundärproduktion bzw. -produktionskapazitäten. Die vom USGS (versch. Jahre a) angegebenen Zahlen scheinen viel zu gering zu sein; so hat die Sekundärproduktion alleine von Japan (80–96 t) in den Jahren 2006–2009 die vom USGS ermittelten weltweiten Recyclingkapazitäten überschritten (ROSKILL 2014). Japan verfügte im Jahr 2013 über Recycling- und Aufbereitungskapazitäten von rund 210 t Gallium und hat über viele Jahre große Mengen an Sekundärgallium produziert. Seit dem Jahr 2000 werden dort zwischen 50 und 95 t Gallium aus Neuschrott zurückgewonnen (ROSKILL 2014, USGS versch. Jahre a) (Tab. 8). In China wurden 2016 rund 120 t Sekundärgallium produziert (ICMLR, pers. Mitteilung). Weitere Länder, in denen Gallium in deutlich geringeren Mengen recycelt wird, sind Deutschland, die Slowakei, Kanada, die USA und Großbritannien.

Tab. 8: Recyclingkapazitäten und -produktion Japans für verschiedene Jahre (Datenquelle: USGS versch. Jahre a).

	2010	2012	2014	2015	2016	2017
	[Tonnen]					
Recyclingkapazität (weltweit)	141	198	200	200	270	270
Recyclingproduktion in Japan	k. A.	65	82	75	k. A.	k. A.
40 % des Bedarfs ¹	83	92	120	128	k. A.	k. A.

k. A. = keine Angaben; ¹ 40 % ist eine Annahme basierend auf JASKULA 2017b.

Gallium aus Altschrott wird derzeit so gut wie nicht zurückgewonnen. Der Anteil des Altschrotts am Gesamtschrott (Old Scrap Ratio, OSR) liegt unter 1 %. Entsprechend niedrig ist mit unter 1 % die End-of-Life-Recyclingrate (EOL-RR). Die Wiedergewinnung aus Altschrott ist schwierig, da häufig eine Vielzahl von Werkstoffen stark vernetzt nebeneinander vorliegt oder in sehr geringen Mengen verarbeitet wurde.

Weitere noch zu erschließende Sekundärquellen sind neben den Produktionsrückständen der betroffenen Industrien Aufbereitungsabgänge früherer Abbaubetriebe, aus denen Gallium noch nicht mitgewonnen wurde.

2.2.4 Wichtige Produzenten nach Ländern

Für das Jahr 2016 wurden 16 Firmen in neun Ländern mit Kapazitäten für die Primärproduktion von Gallium identifiziert. Die acht chinesischen Unternehmen kontrollierten dabei etwa 84 % der Primärproduktionskapazität. Die Firmenkonzentration wird mit einem HHI von 1.193 als unbedenklich bewertet (Tab. 9).

Für die Produzenten von Sekundär- und Raffinadegallium liegen keine vollständigen Informationen vor (Tab. 10). Dargestellt sind wichtige Produzenten; Angaben zu Kapazitäten und Produktionsmengen sind unvollständig. Die unternehmerische Konzentration kann nicht berechnet werden.

Tab. 9: Wichtige Produzenten von Primärgallium.

Unternehmen	Land (Standort der Anlage)	Standorte	Kapazität	Anteil
Aluminum Corporation of China (CHALCO)	China	Guangxi, Guizhou, Henan, Shandong, Shanxi	160 t	21 %
Beijing JiYa Semiconductor Material (Beijing)	China	Shanxi	65 t	9 %
Beijing ZhuoLongYuan Technology (Guangxi Debao Gallium industry)	China	Guangxi	50 t	7 %
East Hope Mianchi Gallium Industry	China	Henan	80 t	11 %
Guangxi Tiandongjinxin Rare Metal	China	Guangxi	60 t	8 %
Shanxi Zhaofeng Gallium Industry	China	Shanxi	25 t	3 %
Xiaoyi Xingan Gallium	China	Shanxi	60–70 t	8 %
Zhuhai SEZ Fangyuan	China	Yuanping, Shanxi, Nanchuan, Chongqing, Zouping, Shandong, Jingxi, Guangxi, Lushan, Henan, Dengfeng, Henan	140 t	18 %
Ingal Stade (AOS)	Deutschland	Stade, Niedersachsen	30 t	4 %
DOWA Electronics	Japan	Iijima, Präfektur Nagano	10 t	1 %
Aluminium of Kazakhstan JSC	Kasachstan	Pavlodar	25 t	3 %
Pikalevo Alumina	Russland	Pikalevo, Leningrad	9–12 t	1 %
Korea Zinc	Südkorea	Onsan, Gyeonggi-do	20 t	3 %
RUSAL	Ukraine	Oblast Mykolajiw	15 t	2 %
Magyar Aluminium	Ungarn	Ajka, Komitat Veszprém	8 t	1 %
Summe			758 t	
HHI			1.193	

Tab. 10: Wichtige Produzenten für Sekundär- und Raffinadegallium.

Unternehmen	Land (Standort der Anlage)	Produktbeispiele ¹	Kapazität Sekundär-gallium	Kapazität Raffinadegallium
Beijing JiYa Semiconductor Material Co.	China	6–7N-Ga, Ga ₂ O ₃ , GaCl ₃ , TMG, Ga(NO ₃) ₃		30 t
Nanjing Jinmei Gallium Co., Ltd.	China	4N-Ga, 6–8N-Ga, Ga ₂ O ₃ , Ga(NO ₃) ₃	50 t	100 t
Shanxi Jiahua Tianhe Electronic Materials	China	> 6N Ga		50 t ²
5N Plus Inc. (MCP Metals Shenzhen)	China	6–7N-Ga		20 t ²
Vital Materials Co.	China	5–7N-Ga, Ga ₂ O ₃ , GaCl ₃ , TMG, Ga(NO ₃) ₃ , GaAs etc.	k. A.	60 t
DEC Emei Semiconductor Material Factory & Institute	China	5–7N-Ga, Ga ₂ O ₃		k. A.
Sumika Electronic Materials (Shanghai)	China	6–7N-Ga		40 t (Angabe für Jahr 2001)
Zhuhai SEZ Fangyuan Inc.	China	> 6N Ga		k. A.
Zhuzhou Keneng New Material Co., Ltd.	China	4–6N-Ga		k. A.
PPM Pure Metals GmbH	Deutschland	7N-Ga	10–12 t	10–12 t
5N PLUS UK Ltd.	Großbritannien	7N-Ga, Ga ₂ O ₃ , GaCl ₃ , Ga(NO ₃) ₃	k. A.	20 t ²
DOWA Electronics	Japan	> 7N-Ga, GaAs, GaN, etc.	90 t ²	90 t ²
Nichia Corporation	Japan	?	15 t ²	15 t ²
Nippon Rare Metal, INC.	Japan	4–5N-Ga, Ga ₂ O ₃	10 t	
Rasa Industries, Ltd.	Japan	6–7N-Ga	35 t	
Sumitomo Chemicals Co.	Japan	> 6N-Ga, TMG, TEG, GaAs, etc.		60 t
Neo Performance Materials	Kanada	3–4N-Ga	15–20 t	
Neo Performance Materials	USA	4–7N-Ga, 8N(MBE)Ga, GaCl ₃	30 t	50 t
Neo Performance Materials	Südkorea	GaCl ₃	k. A.	k. A.
CMK, s.r.o	Slowakei	4–7N-Ga, GaAs	8 t	25 t

¹ Unvollständige Angaben; ² geschätzt von ROSKILL (2014), k. A. = Höhe der Kapazität unbekannt.

Australien

Aktuell gibt es in Australien keine Galliumproduktion. In der ersten Hälfte der 1990er Jahre war Australien ein bedeutender Produzent von Primärgallium. Das südlich von Perth gelegene Werk Pinjarra wurde 1989 von Rhône-Poulenc S.A. (heute Rhodia Inc.) in der Nähe der gleichnamigen Tonerderaffinerie (Alcoa Inc., USA) gegründet und war auf eine Jahreskapazität von 50 t Gallium ausgelegt. Die Anlage produzierte Galliumchlorid,

welches nach Frankreich exportiert und von Rhône-Poulenc im Werk Salindres zu Gallium raffiniert wurde. Ein Überangebot von Gallium führte weltweit zur Abschaltung mehrerer Galliumwerke, darunter Pinjarra, das nach nur einem Jahr den Betrieb einstellte (KRAMER 1992). 1998 übernahm Rhodia Chimie SA die Galliumsparte von Rhône-Poulenc und betrieb Pinjarra durch die australische Tochter Rhodia Pinjarra Pty Ltd. 1999 hat die US-Firma GEO Speciality Chemicals Inc. Rhodia erworben. GEO Gallium S.A., eine Tochtergesell-

schaft von GEO Speciality Chemicals, kündigte für das Jahr 2002 eine Verdoppelung der Kapazität auf 100 t/Jahr an (CS 2001); der Plan wurde nie realisiert. Für Australien wurde noch bis 2004 eine Primärproduktionskapazität von 50 t Gallium ausgewiesen. Inzwischen wurde Pinjarra endgültig stillgelegt.

China

China ist bei weitem der weltgrößte Produzent von Gallium. Das betrifft sowohl Roh- als auch Raffinadegallium. Die Jahreskapazität für die Produktion von Rohgallium wird für das Jahr 2016 auf 600 t geschätzt (JASKULA 2017a). Die Produktion von Rohgallium lag je nach Quelle im Jahr 2016 zwischen 193 t und 250 t und 2015 bei 358 bis 440 t (ICMLR, pers. Mitteilung, JASKULA 2017a, 2018). Der größte Teil des Rohgalliums wird als Beiprodukt bei der Bauxitaufbereitung zu Tonerde gewonnen, nur ein kleiner Anteil fällt bei der Zinkproduktion an. Die Produktion von Primärgallium ist hauptsächlich in den Regionen Guangxi, Henan, Shanxi und Guizhou konzentriert, wo sich auch die größten Bauxitvorkommen befinden.

Aluminum Corporation of China Ltd. (CHALCO) produziert Gallium (Galliummetall und Galliumoxid) als Beiprodukt der Bauxitverarbeitung an Standorten in den Provinzen: Guangxi (CHALCO Guangxi Werk (Pingguo Aluminum Co.), Kapazität: 55 t), Guizhou (Zunyi Alumina Co. Ltd, Kapazität: 60 t) und Henan (CHALCO Henan Werk, Kapazität: 40–50 t) (ASIAN METAL versch. Jahre). Des Weiteren werden von CHALCO für die Galliumproduktion noch die Standorte Shandong (CHALCO Shandong Werk) und Shanxi (CHALCO Shanxi Werk) genannt (CHALCO 2018a, 2018b). Das 2001 gegründete Unternehmen ist Chinas größter Tonerde- und Aluminiumproduzent und eine Tochterfirma der Aluminum Corporation of China (CHINALCO). CHALCO produzierte im Jahr 2016 71 t Gallium, 2015 121,4 t Gallium, 2014 81,2 t Gallium, 2013 127,8 t Gallium und 2012 39,2 t Gallium. Aufgrund der niedrigen Galliumpreise wurde in der ersten Hälfte 2017 die Produktion in den Werken Henan und Guizhou vorübergehend ausgesetzt. Der größte Teil des Galliums wird in China verkauft (CHALCO 2015, 2016, 2017).

Beijing JiYa Semiconductor Material Co. Ltd. mit Sitz im Haidian-Distrikt in Peking ist ein bedeu-

tender chinesischer Rohgalliumhersteller. Beijing JiYa wurde 1999 gegründet und ist ein Joint Venture gebildet durch die US-amerikanische American Xtal Technology, Inc. (AXT), der Harmony Overseas Ltd., der Consco Gruppe und Faithful Properties Co., Ltd. in Hong Kong und der Shanxi Aluminium Plant. Die Produktion befindet sich in Hejin (Shanxi) bei dem Aluminiumwerk der Shanxi Aluminium Plant. Gewonnen wird das Gallium aus der beim Bayer-Prozess anfallenden Lauge. Die Beijing JiYa besitzt eine jährliche Produktionskapazität von rund 65 t Rohgallium (BEIJING JIYA SEMICONDUCTOR MATERIAL 2018). Neben Rohgallium (4N) bietet die Beijing JiYa hochreines Gallium (6–7N) und Galliumverbindungen wie Ga_2O_3 , $GaCl_3$, TMG und $Ga(NO_3)_3$ an. Beijing JiYa vertreibt das Rohgallium u. a. in China, den USA, Großbritannien, Deutschland, den Niederlanden, Japan und Korea. Beijing JiYa war nie Mitglied der Fanya Metal Exchange. Die deutsche TRADIUM GmbH ist seit 2004 deutscher Produzentenvertreter der Beijing JiYa.

Beijing ZhuoLongYuan Technologie Co., Ltd. mit Hauptsitz in Peking, wurde im Jahr 2010 gegründet. Das 2012 gegründete Tochterunternehmen **Guangxi Debao Gallium Co., Ltd.** gewinnt Gallium mittels Ionenaustauscher aus der Bayer-Lösung. Die jährliche Produktionskapazität wird mit 50 t Gallium angegeben (ECPLAZA 2016).

East Hope Mianchi Gallium Industry Co., Ltd. mit Sitz im Kreis Mianchi, Provinz Henan ist eine Tochterfirma der East Hope Group Co. Ltd. Ein weiteres Tochterunternehmen ist die East Hope (Sanmenxia) Aluminium Co, Ltd. Mianchi Gallium Industry produziert 4N-Gallium aus der beim Bayer-Prozess anfallenden Bayer-Lauge. Laut eigener Angaben (EAST HOPE MIANCHI GALLIUM INDUSTRY 2012) besitzt das Unternehmen eine Jahreskapazität von 80 t Gallium; METAL BULLETIN (2016) gibt eine Jahreskapazität von 60 t Gallium an.

Guangxi Tiandongjinxin Rare Metal Co., Ltd., ein Joint Venture von Xiaoyi Xinan, Tiandon Chemical und Vital Materials Co., wurde Anfang 2015 gegründet und besitzt eine Jahreskapazität von 60 t (TDJYFW o. J.).

Shanxi Zhaofeng Gallium Co., Ltd. ist ein Joint Venture der Shanxi Zhaofeng Aluminum Co., Ltd. der Yangmei Group, der Beijing JiYa Semiconductor Material Co. und von der Chalco Jinlv Refr Co.

Das im Jahr 2012 in Betrieb gegangene Werk hat eine Jahreskapazität von 25 t (BEIJING JIYA SEMICONDUCTOR MATERIAL 2018).

Xiaoyi Xingan Gallium Co., Ltd. wurde 2011 von Xiaoyi Xingan Chemicals Co. Ltd, einer Tochter der **Hangzhou Jinjiang Group**, die wiederum eine der größten Tonerde- und Aluminiumproduzenten in China ist, gegründet. Das Unternehmen besitzt eine Rohgalliumkapazität (4N) von 60 bis 70 t pro Jahr an nur einem Standort und hat damit eine der größten Einzelproduktionsstätten (XINGAN 2015, BEIJING JIYA SEMICONDUCTOR MATERIAL, pers. Mitteilung).

Zhuhai SEZ Fangyuan Inc. wurde 1996 gegründet und besitzt nach eigenen Angaben (ZHUHAI FANGYUAN 2016) eine Jahreskapazität von 140 t Gallium an sechs Standorten, die zwischen 2005 und 2015 errichtet wurden: Yuanping bzw. Jiaye Metal Material (30 t Jahreskapazität) in Shanxi, Lushan Lianshun (15 t Jahreskapazität) und Dengfeng in Henan, Nanchuan in Chongqing, Zouping in Shandong und Jingxi Xintai (40 t Jahreskapazität) in Guangxi. Da zwei der Werke nie produzierten, liegt die nutzbare Jahreskapazität bei 90 t. Das Unternehmen ist einer der weltweit größten Produzenten von Primärgallium und produziert Rohgallium (4N) sowie Raffinadegallium (> 6N), die auf dem heimischen Markt und u. a. in die USA, Japan, Südkorea und Taiwan verkauft werden (ZHUHAI FANGYUAN 2016). Des Weiteren hält Zhuhai Fangyuan ein Patent für einen speziellen chelatbildenden Austauschharz, der zur Extraktion von Gallium über Ionenaustausch dient („GaXW-7“, State invention patent no. ZL03112341). Im Jahr 2016 produzierte Zhuhai aufgrund der anhaltenden niedrigen Galliumpreise nur an zwei Standorten mit einer geschätzten Jahresproduktion von rund 60 t Gallium. Auch 2017 wurde die Produktion an den meisten Standorten zeitweise gestoppt oder heruntergefahren.

Neben den Primärgalliumproduzenten gibt es in China Unternehmen, die Gallium recyceln und/oder veredeln. Folgende Unternehmen mit Sekundär- und/oder Raffinadeproduktion in China sind bekannt (Tab. 10):

Beijing JiYa Semiconductor Material Co. (s. Primärgalliumproduzenten) produziert neben Rohgallium (4N) auch hochreines Gallium (6–7N) und Galliumverbindungen wie Ga_2O_3 , GaCl_3 , TMG und

$\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$. Die Raffinadepkapazität liegt bei etwa 30 t.

Nanjing Jinmei Gallium Co., Ltd. (JM Gallium), im Jahr 2000 gegründet, ist ein Joint Venture zwischen dem US-amerikanischen Unternehmen AXT Inc. (83 %) und der Nanjing Germanium Factory (17 %) (AXT 2015, CNGE 2015). Laut der Unternehmenswebsite verfügt Nanjing Jinmei über Jahreskapazitäten von 100 t für die Produktion von hochreinem 5N- bis 8N-Gallium (einschließlich MBE Gallium), 50 t für die Produktion von Rohgallium aus Recycling, 6 t für die Produktion von 4N/5N-Galliumoxid und 2 t für die Produktion von 4N/5N-Galliumnitrat (NANJING JINMEI 2017).

Shanxi Jiahua Tianhe Electronic Materials ist als Joint Venture des 2016 insolvent gegangenen US-amerikanischen Unternehmens Molycorp Inc., der Shanxi Aluminium Plant und der Beijing JiYa Semiconductor Material gegründet worden. Das Unternehmen bereitet Gallium zu hoher Reinheit auf (BEIJING JIYA SEMICONDUCTOR MATERIAL, pers. Mitteilung). Die Jahreskapazität wird auf 50 t geschätzt (ROSKILL 2014).

5N Plus Inc. (MCP Metals Shenzhen Co., Ltd.) (Kanada) betreibt im Industriegebiet von Tairan, Shenzhen eine Gallium-Raffinerie. Die Anlage kann Gallium mit Reinheit bis 7N produzieren; die geschätzte Jahreskapazität liegt bei 20 t (ROSKILL 2014). 2006 hat die damalige Mining & Chemicals Products (MCP-Gruppe) eine neue Gallium-Raffinadeanlage in ihrem Betrieb in Shenzhen installiert, da MCP als Folge des Erwerbs von Ingal Stade (Werk in Deutschland) zusätzliche Raffinadepkapazitäten benötigte. Im Jahr 2009 gründeten die MCP-Gruppe und die chinesische Golden Harvest Investments Ltd. (Hongkong) das Joint Venture MCP Crystal. Ziel war ein integriertes Galliumunternehmen, das sowohl niedriggradiges als auch hochreines Gallium herstellen kann. Drei Rohgalliumanlagen, die 4N-Gallium produzieren, sollten die Raffinerie in Shenzhen, die 6N- bis 7N-Gallium herstellt, beliefern. Inhaber der Rohgalliumanlagen, die sich in Lushan in der Henanprovinz, in Yuanping in der Provinz Shangxi und in Chongqing befinden, ist das Unternehmen Zhuhai Fangyuan (s. oben), damals eine Tochter von Golden Harvest. Es wurde erwartet, dass die 4N-Anlagen zusammen zwischen 70 und 80 t/Jahr Gallium produzieren (JASKULA 2011b, METAL BULLETIN 2009). 2012 hat 5N Plus die MCP-Gruppe

übernommen und erwarb auch die restlichen 50 % der Joint-Venture-Anteile an MCP Metals (Shenzhen) Co., Ltd.

Vital Materials Co. (Guangzhou, Guangdong) produziert hochreines Gallium (5–7N) aus Rohgallium sowie Galliumverbindungen wie Galliumoxid, -chlorid, -sulfat, -nitrat, -arsenid, -phosphid, -antimonid und Trimethylgallium. Das Unternehmen wurde 2003 gegründet und ist auf die Produktion von Spezialmetallen wie Selen, Tellur, Indium, Germanium, Bismut, Kadmium und Gallium sowie auf Produkte aus diesen spezialisiert. Im Jahr 2013 hat Vital Materials mit der Hangzhou Jinjiang Group eine Vereinbarung für die Galliumproduktion geschlossen. Für das Joint Venture wurde eine Produktion von 60 t/Jahr geplant (VITAL MATERIALS 2013). Das Rohgallium wird von der Xiaoyi Xingan Chemicals Co. Ltd, einer Tochtergesellschaft von Hangzhou Jinjiangs, geliefert. Des Weiteren recycelt Vital im Auftrag von Kunden Gallium aus Material, das u. a. bei der Produktion von GaAs-Kristallen und dem Epitaxialwachstum anfällt. Vital hat Niederlassungen in China (Guangzhou und Qingyuan in Guangdong sowie in Tianjin), Taiwan, Japan, den Philippinen, den USA, Belgien, Großbritannien und Brasilien (VITAL MATERIALS 2017).

DongFang Electric Emei Semiconductor Materials Co., Ltd., (DEC Emei) (Leshan, Provinz Sichuan) wurde 1964 gegründet und ist ein Tochterunternehmen der staatlichen Dongfang Electric Corporation (DEC, Chengdu, Sichuan). DEC Emei ist eines der bedeutendsten wissenschaftlichen Forschungsinstitute in China, das auf die Produktion und Erforschung von Halbleiterkristallen (Zonenschmelzen und Czochralski-Verfahren) spezialisiert ist. DEC Emei produziert eine breite Palette von hochreinen Elementen wie Silizium, Antimon und Gallium (5–7N) sowie Verbindungshalbleiter und vertreibt sie an die Elektronik- sowie Verteidigungsindustrie (EMEI 2012, EMEI 2016).

Sumika Electronic Materials (Shanghai) wurde im Jahr 2001 von der Sumitomo Chemicals Co. Ltd. und der Inabata & Co., Ltd., Japan, als Joint Venture (70 : 30) mit dem Namen Shanghai Sumika High Purity Metal Ltd. gegründet. Die Raffinerianlage hat eine Jahreskapazität von 40 t 6N- bis 7N-Gallium, die an Sumitomo geliefert wurden (KRAMER 2002).

Zhuhai SEZ Fangyuan Inc. (s. Primärgalliumproduzenten) produziert neben Rohgallium auch hochreines Gallium (> 6N).

Zhuzhou Keneng New Material Co., Ltd. wurde 2001 in Zhuzhou, Henan Province gegründet. Die wichtigsten Produkte sind neben 4N- und 6N-Gallium Indium, Wismut und Tellur (ZZK 2015).

Deutschland

In Deutschland war bis Anfang 2016 die in Stade, nahe Hamburg, ansässige **Ingal Stade GmbH** (heute zu AOS gehörend) mit einer Kapazität von 30 t/Jahr der einzige deutsche und außerhalb Chinas größte Primärgalliumproduzent. Die Anlage befindet sich auf dem Firmengelände der Aluminium Oxide Stade GmbH (AOS), einer Aluminiumoxid-Raffinerie mit einer jährlichen Produktionskapazität von über 1 Mio. t Aluminiumoxid/-hydroxid im Besitz der Dadco Alumina & Chemicals Ltd. Bis zur Insolvenz von Molycorp im Jahr 2016 war Ingal Stade ein 50:50-Gemeinschaftsunternehmen zwischen dem kanadischen Unternehmen 5N Plus Inc. und dem US-Unternehmen Molycorp Inc. Die Ingal wurde als International Gallium in Schwandorf 1989 gegründet und bis 1999 von der Rhône Poulenc S.A. und Rhodia S.A. betrieben. Nachdem in Schwandorf das Tonerdewerk der Vereinigten Aluminiumwerke AG (VAW) 1995 geschlossen wurde, wurde das Galliumwerk nach Stade verlagert. 1999 erfolgte der Verkauf an die GEO Gallium und 2006 an MCP (gehört seit 2011 zu 5N Plus) und Recapture Metals. Recapture Metals wurde von Neo Material Technologies übernommen und Neo Material Technologies wiederum von Molycorp Inc. Im Jahr 2000 wurde die Jahreskapazität von 26 t auf über 30 t Gallium erweitert. Maximal wurden 36 t Gallium pro Jahr produziert, allerdings kam es dabei zu einem massiven Konzentrationsabfall des Galliumgehaltes in der Natronlauge, die beim Tonerdeprozess der Oxid Stade GmbH anfällt, sodass das Maximum der möglichen Galliumproduktion, begrenzt durch die Höhe der Tonerdeproduktion der Aluminium Oxid Stade GmbH, überschritten wurde. Die Ingal Stade produzierte in den Jahren ab 2000 jährlich etwa 20–30 t Primärgallium (4N). Der Großteil des Rohgalliums wurde zur Raffinade per Luftfracht an die damaligen Eigentümer in die USA (Molycorp Inc.) und nach Großbritannien (5N Plus) geliefert. Durch die

niedrigen Galliumpreise der letzten Jahre ging die Produktion deutlich zurück und im ersten Halbjahr 2016 wurde die Produktion eingestellt. Nach dem Ausscheiden von Molycorp und 5N Plus 2016 hat die AOS die Produktionsanlage der Ingal übernommen. Für 2019 ist die Wiederaufnahme der Galliumproduktion geplant.

Die **PPM Pure Metals GmbH** aus Langelsheim erzeugt Gallium mit Reinheiten von 4N bis 8N durch Recycling und Aufreinigung von Prozessschrotten, Rückständen und Schlämmen (Slurry) aus der GaAs-Kristallzucht, Waferproduktion und Epitaxy-Prozessen sowie anderen galliumhaltigen Materialien (PPM 2015). Die Jahreskapazität für die Produktion von 7N-Gallium liegt bei etwa 12 t, wobei ein Ausbau der Kapazität leicht möglich wäre. Der Standort verfügt über eine lange Tradition in der Raffination und Weiterverarbeitung von hochreinen Metallen und deren Verbindungen. Bereits ab dem Jahre 1575 wurden Blei und Zink der damaligen umliegenden Bergwerke verhüttet. Später war es eine Betriebsstätte der deutschen Preussag AG. 1986 wurde PPM als eigenständiges Unternehmen gegründet und seit 1988 ist PPM Teil der französischen Recylex S.A. (ehemals Metaleurop S.A.). PPM beschäftigt sich mit der Herstellung von hochreinen Spezialmetallen und deren Verbindungen hauptsächlich für die Elektronik- und Optoelektronik sowie auch Photovoltaikindustrie. Dazu gehören hochreine Metalle (bis zu 7N5 Qualität) und Verbindungen der Elemente Antimon, Arsen, Cadmium, Kupfer, Gallium, Germanium, Indium, Blei, Tellur und Zinn.

Frankreich

Derzeit gibt es in Frankreich keine Galliumproduktion. Bis zum Jahr 2006 war das Unternehmen GEO Gallium S.A., eine Tochter der US-amerikanischen GEO Speciality Metals Inc., ein führender Produzent von Gallium. GEO verarbeitete in Salindres, Frankreich (früher im Besitz von Rhône-Poulenc und Rhodia Chimie SA; s.a. Australien) Rohgallium aus ihrem Werk Ingal Stade in Deutschland. Die Jahreskapazität in Salindres betrug 20 t Raffinadegallium (KRAMER 2000). Nachdem GEO Ingal Stade anteilig an die MCP Group SA (heute 5N Plus), Großbritannien und Recapture Metals (später Molycorp Inc.), USA verkauft hat, wurden das Werk in Salindres und die Galliumsparte von GEO geschlossen (KRAMER 2007).

Großbritannien

In Großbritannien gibt es keine primäre Galliumproduktion. **5N PLUS UK Ltd.** gewinnt und veredelt Gallium aus importiertem Rohgallium und Neuschrotten in Wellingborough. Die Kapazität liegt bei 20 t/Jahr (ROSKILL 2014). Die kanadische 5N PLUS Inc. hat die Anlage der ehemaligen Mining & Chemical Products (MCP) im Jahr 2011 durch die Übernahme der belgischen MCP Group SA erworben. 5N PLUS ist spezialisiert auf die Herstellung von Spezialmetallen. Die Anlage in Wellingborough produziert eine breite Palette von hochreinen Produkten und Chemikalien der Spezialmetalle u. a. Bismut, Selen, Tellur, Indium und Gallium (7N-Gallium, Galliumnitrat, Galliumtrichlorid und Galliumoxid). Das Rohgallium wurde in erster Linie von der Ingal Stade GmbH aus Deutschland bezogen, an der 5N PLUS bis 2016 mit 50 % beteiligt war. Ingal Stade hat allerdings 2016, als Folge der niedrigen Rohstoffpreise, die Produktion eingestellt.

Im September 2016 kündigte 5N PLUS die Absicht an, seine Geschäfte in Wellingborough mit anderen Standorten innerhalb des Konzerns zu konsolidieren und eine Reihe der Produktlinien von Wellingborough an andere Standorte des Unternehmens zu verlagern (5N PLUS 2016). Seit 2017 wird kein Raffinadegallium mehr in Großbritannien produziert.

Japan

Japan verfügt über Primärgalliumkapazitäten von 10 t/Jahr und laut ROSKILL (2014) auch über Recycling- und Aufbereitungskapazitäten von rund 210 t/Jahr. Im Jahr 2015 wurden in Japan rund 80 t Gallium produziert. Etwa 5 t primäres Gallium stammten aus der Zinkverhüttung und rund 75 t sekundäres Gallium wurden durch Recycling gewonnen. Zusätzlich wurden etwa 82 t Gallium importiert (JASKULA 2017b).

Die Produktionskapazität von Primärgallium der Japanischen **DOWA Electronics** liegt bei 10 t/Jahr. Gallium (und auch Indium) wird als Beiprodukt der Zinkverhüttung von der Akita Zinc Co., Ltd (Japans größter Elektrolyt-Zink-Produzent), einer 81%igen Tochtergesellschaft von DOWA Metals and Mining Co., Ltd., gewonnen. Die von Akita in der Zinkhütte Iijima weiterverarbeiteten Zinkerze werden

importiert, da in Japan selbst Zinkerz nicht mehr abgebaut wird. Einer der bedeutendsten Zinkerz-Lieferanten ist das Bergwerk Minera Tizapa in Zentralmexiko, an dem Dowa mit 39 % beteiligt ist (DOWA 2015). Das Rohgallium wird von der DOWA Electronics Materials Co., Ltd. zu hochreinem Gallium (7N), Galliumarsenid, Galliumnitrid und LEDs weiterverarbeitet. DOWA Electronics gewinnt Gallium auch aus dem Recycling von Neuschrott; die Kapazität liegt vermutlich bei 90 t/Jahr (ROSKILL 2014). Nach eigenen Angaben ist DOWA der weltweit größte Anbieter von Raffinadegallium. Neben Galliummetall produziert DOWA Galliumoxid sowie GaAs- bzw. GaN-Wafer und LEDs

Weitere Unternehmen, die über Raffinade, Aufbereitung oder Recycling von Gallium berichten, sind (RLJ 2007):

Sumitomo Chemicals Co. ist ein großer Chemiekonzern und Mitglied der Sumitomo Group, einer Gruppe unabhängiger Unternehmen. Sumitomo verfügt am Standort Ehime in Japan über Raffinadekapazitäten von etwa 60 t/Jahr. Des Weiteren ist Sumitomo mit 70 % an Sumika Electronic Materials in Shanghai (s. China) beteiligt. Die Produktpalette von Sumitomo umfasst Raffinadegallium, Trimethyl- und Triethyl-Gallium sowie GaAs-Wafer. 2015 übernahm Sumitomo die Halbleitersparte von Hitachi Metals Ltd.

Rasa Industries, Ltd. wurde 1911 als Rasa Island Phosphate Ore Co. Ltd. gegründet. 1982 begann das Unternehmen in seinem Werk in Osaka mit der Wiedergewinnung von Gallium (6–7N) aus Neuschrott aus der Waferproduktion. Die Jahreskapazität wird auf 35 t geschätzt (ROSKILL 2014).

Nippon Rare Metal, INC. (NRM) begann 1958 als Produzent von Selen, Photozellen und Metallsalzen. Seit dem Jahr 2000 beschäftigt sich NRM mit dem Recycling von Gallium und Tantal (NRM o. J.). NRM produziert Gallium (4–5N) und Galliumoxid aus der Aufbereitung von Waferneuschrott und CIGS-Solarmodulen. Nach Angaben von ROSKILL (2014) verfügt NRM über Kapazitäten von 10 t/Jahr.

Die **Nichia Corporation**, gegründet 1956, mit Hauptsitz in Tokushima produziert Feinchemikalien und insbesondere anorganische Leuchtstoffe. Zu den Produkten zählen u. a. LEDs, LDs, optische Halbleitergeräte und magnetische Mate-

rialien (NICHIA o. J.). Laut ROSKILL (2014) verfügt Nichia über Produktionskapazitäten für das Recycling und die Aufreinigung von Gallium von mindestens 15 t/Jahr.

Kanada

Obwohl Kanada einer der fünf größten Zinkproduzenten ist, gibt es dort keine Gewinnung von Primärgallium.

Neo Performance Materials gewinnt in ihrer hydrometallurgischen Anlage in Peterborough, Ontario, Gallium und Indium aus niedriggradigen Prozessschrotten und -rückständen. Peterborough verfügt über eine jährliche Produktionskapazität von 15 bis 20 t Gallium und Indium (NEO PERFORMANCE MATERIALS 2018). Die Anlage gehörte ursprünglich der Firma Recapture Metals Ltd., die im Jahr 2009 in den Besitz von Neo Material Technologies Inc. überging (SEMICONDUCTORTODAY 2009). Im Jahr 2012 hat das US-amerikanische Unternehmen Molycorp Inc. Neo Material Technologies Inc. übernommen und damit die Anlage in Peterborough erworben (MOLYCORP 2012). Im Jahr 2016 ging Molycorp in die Insolvenz. Im Rahmen finanzieller Restrukturierungen ist daraus u. a. Neo Performance Materials als privat geführtes Unternehmen hervorgegangen.

Neo Performance besitzt ebenfalls Werke in den USA (Blanding und Quapaw), die Gallium aus Neuschrott gewinnen bzw. veredeln. Für die Werke in Kanada und den USA (Blanding, Utah) wurde zusammen sowohl für 2013 als auch für 2014 eine Galliumproduktion von 13 t aus Schrott berichtet (MOLYCORP 2015b).

Kasachstan

In Kasachstan liegt die Jahreskapazität für die Produktion von Primärgallium bei 25 t. Zwischen 2008 und 2011 wurden pro Jahr rund 19 t produziert, 2012 ging die Produktion auf 15,7 t zurück (ENRC 2014) und wurde 2013 eingestellt.

Das Gallium fiel als Beiprodukt bei Kasachstans einzigem Tonerdeproduzenten **Aluminium of Kazakhstan JSC (AoK)** an. AoK baut in den Regionen Pavlodar und Kostanay im Norden des Landes Bauxit ab und stellt rund 1,4 Mio. t Ton-

erde pro Jahr her. Nach eigenen Angaben besitzt AoK Bauxitreserven in Höhe von 157 Mio. t. AoK war ursprünglich eine Tochter des internationalen Bergbaukonzerns Eurasian Natural Resources Corporation (ENRC). Nach dessen Übernahme durch die Eurasian Resources Group (ERG) im Jahr 2013 befindet sich AoK ebenfalls im Besitz der ERG mit Sitz in Luxemburg.

Südkorea

Korea Zinc Co., Ltd. nahm die Produktion von Primärgallium (6N) im ersten Quartal 2010 mit einer Anfangskapazität von ca. 10 t/Jahr auf. Das Gallium wird als Beiprodukt bei der Zinkraffination in der Zinkhütte in Onsan im Südosten des Landes gewonnen. In Onsan wurden 2015 rund 580.000 t Zink produziert. Nach diversen Erweiterungen zwischen 2010 und 2012 liegt die aktuelle Jahreskapazität für Gallium bei 16 bis 20 t (KOREA INVESTMENT 2012, ROSKILL 2014).

Neo Rare Metals (Korea) Inc. betreibt in Hyeon-gok (Hyeon-gok Industrial Zone) ein Werk, das Galliumtrichlorid produziert (NEO PERFORMANCE MATERIALS 2018).

Russland

In Russland gibt es Kapazitäten für die Primärgalliumproduktion, ob aktuell Primärgallium gewonnen wird bzw. die Höhe der Produktion, ist nicht bekannt.

In Russland wird Gallium von der **ОАО Пикалевский глинозем (Pikalevo Alumina)**, einer Tochter der LLC BaselCement, als Beiprodukt bei der Herstellung von Tonerde aus Nephelin-Konzentrat gewonnen. Laut NAUMOV (2014) liegt die Kapazität für die Produktion von Gallium bei 9 bis 12 t/Jahr. Bis 2012 produzierte **ООО Галлий (Gallium)** bei Kamensk-Uralski Gallium als Beiprodukt der Bauxitverarbeitung. Das Unternehmen besaß eine Kapazität von 4 t/Jahr (NAUMOV 2014).

Slowakei

In der Slowakei wird kein primäres Gallium produziert. Bis 2009 wurden vom USGS für die Gewinn-

nung von Gallium Kapazitäten von 8 t/Jahr angegeben (JASKULA 2011a).

Das Recycling von Galliumschrotten und die Raffination von Rohgallium bietet das Unternehmen **CMK, s.r.o.** mit Sitz in Zarnovica an (CMK o. J.). CMK wurde in den 1970er Jahren als Forschungseinrichtung auf dem Gebiet der Gallium- und Galliumarsenidverarbeitung gegründet. CMK recycelt Gallium aus verschiedenen galliumhaltigen Abfallstoffen (Galliumarsenid, -chlorid, -oxid) und führt auch die Raffination von Gallium mit geringer Reinheit (3N, 4N) durch. Produkte sind u. a. Galliumarsenid-Wafer und Galliummetall der Reinheiten 4N, 6N und 7N.

Aktuelle Kapazitäts- und Produktionsdaten liegen nicht vor. Die zuletzt berichteten Daten sind Recyclingkapazitäten von 8 t und Raffinationkapazitäten von 25 t im Jahr 2009. Die Produktion von 4N-Gallium aus Schrotten lag in den Jahren 2005 bis 2009 zwischen 2,1 und 5 t, die Raffinationproduktion zwischen 6,05 und 16,75 t (ROSKILL 2014).

Ungarn

In Ungarn wurden bis 2013 von der **Magyar Aluminium Zrt. (MAL)** etwa 4–5 t Primärgallium als Beiprodukt aus Bauxit gewonnen. Die Jahreskapazität liegt bei 8 t.

Magyar Aluminium Zrt. (MAL) wurde 1995 gegründet, als die ungarische Aluminiumindustrie privatisiert wurde. In Ajka, etwa 150 km westlich von Budapest, betreibt MAL eine Tonerdeanlage, in der sowohl einheimischer Bauxit als auch Bauxite aus der 2004 übernommenen Bauxitmine Rudnici Bok-sita Jajce in Bosnien verarbeitet werden. In Ajka gewann MAL Rohgallium aus der Bayer-Lauge mit einer Reinheit von 99,99 % bis 99,99999 % (7N) (MAL 2014). Die Gewinnung erfolgte mittels Quecksilber (Amalgamelektrolyse). Die zuletzt berichtete Produktion betrug 2009 3,9 t (ROSKILL 2014). Laut Unternehmensberichten wurde die Galliumproduktion 2013 eingestellt (MAL, pers. Mitteilung 2014).

Ukraine

In der Ukraine fällt Gallium in den Reinheiten von 99,99 % und 99,999 % als Beiprodukt der Tonerde-

herstellung im Werk **Nikolaev** an. Nikolaev befindet sich im Besitz von **United Company RUSAL Plc (RUSAL)** und verarbeitet Bauxite aus Guyana und Guinea. Die Produktionskapazität für Tonerde beträgt rund 1,6 Mio. t. Die Jahreskapazität zur Produktion von Primärgallium liegt bei etwa 15 t.

USA

In den USA wird seit 1987 kein Primärgallium mehr gewonnen (JASKULA 2017a). Hochreines Gallium wird aus Neuschrott und importiertem Rohgallium von dem Unternehmen **Neo Performance Materials Inc.** in dem Werk Blanding in Utah produziert und veredelt. Bis 2016 gehörte das Werk Blanding zur Molycorp Inc., einem ehemals US-amerikanischen Bergbauunternehmen und Produzent von Seltenen Erden und seltenen Metallprodukten mit 25 Standorten in zehn Ländern (MOLYCORP 2015a). Molycorp produzierte hochreines Gallium in 4N-, 6N-, 7N- und MBE(8N)-Qualitäten aus hochreinem Galliumarsenid-Schrott sowie durch Veredelung von Rohgallium verschiedener globaler Produzenten. Durch die Insolvenz von Molycorp im Jahr 2016 ist als ein Ergebnis der finanziellen Restrukturierung das privat geführte Unternehmen Neo Performance Materials hervorgegangen (siehe auch Abschnitt Kanada).

In Blanding findet die Raffination von Gallium sowohl aus Neuschrott als auch aus primärem Rohgallium statt. Die Recyclingkapazität liegt bei 30 t/Jahr, die Raffinadekapazität bei 50 t/Jahr Gallium (NEO PERFORMANCE MATERIALS 2018). In den Jahren 2013 und 2014 wurden dort 46 t bzw. 57 t Gallium aus Primärmetall veredelt. Aus Neuschrott wurden sowohl 2013 als auch 2014 in den Werken Blanding und Peterborough (Kanada) zusammen 13 t Gallium zurückgewonnen (siehe auch Abschnitt Kanada). Neben hochreinem Gallium werden in Blanding Galliumnitrat und Galliumoxid produziert.

In den Jahren 2012 und 2013 wurde das primäre Rohgallium vor allem von der Ingal Stade aus Deutschland bezogen, an der Molycorp eine 50%ige Beteiligung hielt. Im Jahr 2013 und im zweiten Halbjahr 2012 erwarb Molycorp Gallium von Ingal Stade im Wert von etwa 4,9 Mio. US\$ bzw. 3,3 Mio. US\$ (MOLYCORP 2015c). Im Dezember 2014 beschloss Molycorp jedoch, den Erwerb von Rohgallium von Ingal Stade zu beenden, da

das Joint Venture nicht mehr zu einem konkurrenzfähigen Preis Gallium anbieten konnte (MOLYCORP 2015b).

Des Weiteren betreibt Neo Performance Materials das Werk Quapaw in Oklahoma (ehemals Gallium Compounds), welches ein führender Hersteller von Galliumtrichlorid ist.

2.2.5 Lagerhaltung

Bedeutende Vorräte an Gallium liegen in den Lagern der ehemaligen chinesischen Fanya Metal Exchange (Fanya, FYME). Gegründet wurde die Metallbörse im Jahr 2011 unter staatlicher Kontrolle in Kunming, China. Fanya selbst verstand sich als Plattform und Brücke für die Sondermetall verarbeitende Industrie. Fanya hatte sich auf die physische Einlagerung sowie den Handel mit elf Sondermetallen, zwei Seltenerdmetallen und zwei Edelmetallen spezialisiert. Gallium wurde im März 2013 in den Lagerbestand aufgenommen; die Lagerkapazitäten für Gallium betragen 200 t. Im August 2015 berichtete Fanya von Lagerbeständen in Höhe von 197,46 t Gallium, damit wurde die Lagerkapazität nahezu erreicht (FANYA METAL EXCHANGE 2015). Im Jahr 2015 haben chinesische Behörden die Finanz- und Handelsdaten der Börse auf illegale Praktiken untersucht, was schließlich zur Aussetzung der Handelsaktivitäten führte. Die von Fanya gemeldeten Bestände sollten daher mit Vorsicht betrachtet werden. Im Juni 2016 verhaftete die chinesische Polizei den Eigentümer der Börse und übernahm die Kontrolle über das Börsenvermögen und die eingelagerten Metalle. Seit der Schließung der Metallbörse wird darüber diskutiert, wann die Bestände wieder den freien Markt erreichen könnten. Sollten die hohen Lagerbestände der Fanya in Zeiten des Überangebots auf den Markt gelangen, könnte dies zu weiteren Preiseinbrüchen führen. Es wird angenommen, dass der Rechtsstreit gegen die Fanya-Funktionäre 2018 zu Ende gehen wird, dann könnten auch die Fanya-Bestände in Losen versteigert werden und könnte der Auktionspreis den Spotmarktpreis beeinflussen (ARGUS 2017a).

Zusätzlich zur Fanya hält das State Reserve Bureau of China (SRB) ebenfalls Bestände an Gallium. Im Jahr 2013 waren dies 50 t (METAL BULLETIN 2013).

Für das Jahr 2015 vermutet der USGS, dass von den in China produzierten rund 470 t Rohgallium 400 t nicht verbraucht und deshalb bevorratet wurden (JASKULA 2017b). Im Januar 2016 befanden sich laut ASIAN METAL (2017a) rund 323 t Gallium in den Lagern der chinesischen Galliumproduzenten; diese Vorräte wurden im Jahr 2016 kontinuierlich auf etwa 60 t im November 2016 abgebaut. Durch die Wiederaufnahme bzw. zunehmende chinesische Produktion stiegen die Vorräte wieder leicht an, auf knapp 79 t im Januar 2017. Demnach kamen im Jahr 2016 zusätzlich zur Galliumproduktion etwa 250 t Gallium aus der Lagerhaltung auf den Markt.

In den USA werden laut USGS bei Galliumverbrauchern etwa 3–4 t Gallium (4–8N) bevorratet. Im Zeitraum von 2010 bis 2013 waren es zwischen 5 und 6,85 t (2011). Seit 2011 werden die Vorräte abgebaut und betragen im Jahr 2017 etwa 3 t. Vor 2007 lagen die genannten Vorräte meist bei 1 bis 2 t.

In Japan gibt es bei der Japan Oil, Gas and Metals Corporation (JOGMEC) vermutlich ebenfalls Galliumbestände in Höhe des Bedarfs von bis zu 42 Tagen der heimischen Nachfrage (JAPAN METAL BULLETIN 2009).

2.2.6 Nachfrage

Die globale Galliumnachfrage wird für das Jahr 2014 auf 285–300t und für 2015 auf 320 t

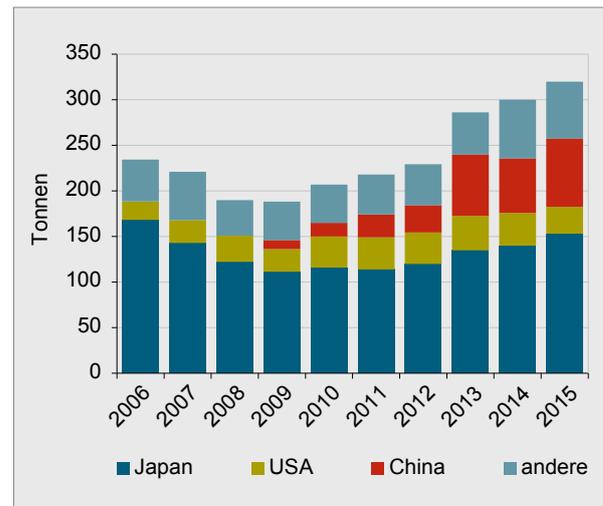


Abb. 16: Weltweite Galliumnachfrage; für China liegen für die Jahre vor 2009 keine Daten vor (Datenquellen: ROSKILL 2014, RLJ 2009, 2010, JASKULA versch. Jahre, ICMLR, pers. Mitteilung, FENG 2017).

geschätzt (Abb. 16). Die größten Galliumnachfrägeländer sind Japan, China, die USA und Deutschland (Tab. 11) (JASKULA 2017b).

2015 lag der größte Nachfragemarkt für Gallium in Japan. Dort wurden mit 153 t Gallium fast 50 % des weltweiten Galliumbedarfs nachgefragt (JASKULA 2017b). Zwischen 2004 und 2015 ist die Nachfrage nach Gallium im jährlichen Durchschnitt

Tab. 11: Galliumnachfrage nach Ländern (Datenquellen: ROSKILL 2014, USGS versch. Jahre a, ICMLR, pers. Mitteilung, FENG 2017).

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	[Tonnen]					
Japan	116	114	85–120	97–135	142	153
China	5–15	15–25	20–30	35–68	60	75–80
USA	34	35	34	38	36	30
Deutschland	20–30	20–30	20–30	20–30	30–40	30–40
übriges Europa	10	10	10	10	k. A.	k. A.
Taiwan	5	6	6	6	k. A.	k. A.
Südkorea	2	3	4	5	k. A.	k. A.
andere	5	5	5	5	k. A.	k. A.
Summe	207	218	230	286	285–300	320

k. A. = keine Angaben

weltweit um rund 3,9 % gewachsen. Zwischen dem Nachfragetief im Jahr 2009 und dem Jahr 2015 stieg die Nachfrage sogar um durchschnittlich 9,2 % pro Jahr. Besonders stark nahm in diesem Zeitraum die Nachfrage in China von etwa 10 t im Jahr 2009 (ROSKILL 2014) auf 75 t im Jahr 2015 zu (ICMLR, pers. Mitteilung), was einem jährlichen Wachstum von fast 40 % entspricht. Damit erreichte China im Jahr 2015 einen Nachfrageanteil von 23 % des Weltmarkts. Die deutsche Nachfrage wird mittels Produktions- und Handelsdaten auf 30–40 t geschätzt (9–13 % Weltanteil); die Freiburger Compound Materials GmbH (FCM) mit Sitz in Deutschland ist weltweit einer der größten Hersteller von GaAs-Wafern. Die Nachfrage in den USA liegt bei 30 t (9 % Weltanteil). Für Europa ohne Deutschland wird der Galliumverbrauch auf etwa 10 t/Jahr geschätzt. Große Hersteller von Substraten und Wafern aus Galliumverbindungen sowie Solarzellen befinden sich in Frankreich, den Niederlanden, Polen, der Slowakei und Großbritannien (ROSKILL 2014).

Nachfrage nach Gallium in Deutschland

Die Nachfrage nach Gallium in Deutschland wird von ROSKILL (2014) für die Jahre 2009 bis 2013 auf jeweils etwa 20 t geschätzt. Die Importe von Gallium liegen seit dem Jahr 2010 zwischen 33 und 48 t jährlich (Tab. 14). Aus den Handelsdaten und der geschätzten Produktion ergibt sich ein jährlicher Bedarf von etwa 30 bis 40 t.

Firmen in Deutschland

In Deutschland gibt es neben den Galliumproduzenten Ingal Stade (heute AOS) und PPM Pure Metals GmbH (s. Kap. 2.2.4 Wichtige Produzenten nach Ländern) verschiedene Unternehmen, die Gallium in ihren Produkten verwenden oder mit Gallium handeln und daher Nachfrager sind. Zu diesen Unternehmen gehören:

Die **Freiberger Compound Materials GmbH** (FCM) mit Sitz in Freiberg/Sachsen wurde 1995 in ihrer heutigen Form gegründet. FCM kann jedoch auf eine mehr als 50-jährige Erfahrung in der Halbleiterindustrie noch aus DDR-Zeiten zurückblicken. Nach der Wende firmierte der ehemalige Staatsbetrieb VEB Spurenmetalle Freiberg (SMF) zunächst als Freiburger Elektronikwerkstoffe GmbH (FEW)

und war bis dahin vor allem auf die Produktion von Silizium in Halbleiterqualität spezialisiert. Neben Germanium und Silizium wurden in der Vergangenheit bereits auch III-V-Verbindungshalbleiter wie z. B. GaAs- und GaP-Substrate sowie die dafür benötigten Verfahren und Rohstoffe entwickelt und produziert. Der Einstieg in das weltweite Gallium-/GaAs-Geschäft erfolgte 1991 durch die Übernahme der GaAs-Fertigungstechnologien der Wacker Siltronic AG. In den Jahren 1994/95 wurden die einzelnen Abteilungen der FEW privatisiert und es entstanden die drei Firmen: Bayer Solar GmbH (die heutige Solar World AG), Wacker Siltronic GmbH (heute Siltronic AG) und, gegründet durch die israelische Federmann Enterprises Ltd., die den GaAs-Bereich übernahm, die heutige Freiburger Compound Materials GmbH (FCM o. J.).

Die FCM ist mit 260 Mitarbeitern einer der weltweit führenden Hersteller von halbisolierenden und halbleitenden Galliumarsenid-Substraten (Wafer) mit Durchmessern zwischen 3" und 8" für Anwendungen in der Mikro- und Optoelektronik. Der jährliche Galliumeinsatz liegt bei etwa 30 t, je zur Hälfte primäres und sekundäres Gallium.

Die **OSRAM Licht AG** ist ein weltweit tätiges deutsches Unternehmen mit Hauptsitz in München und einer mehr als 100-jährigen Geschichte. OSRAM zählt zu den führenden Lichtherstellern und bietet vorwiegend halbleiterbasierte Produkte und Technologien für Hightech-Anwendungen wie Virtual Reality, Fahrerassistenzsysteme bis hin zu vernetzten intelligenten Beleuchtungslösungen in Gebäuden und Städten an. Die OSRAM Licht AG gliedert sich in vier Geschäftsbereiche (Business Units) (OSRAM GROUP o. J.):

- **OSRAM Opto Semiconductors (OS)** ging 1999 aus einem Joint Venture zwischen OSRAM und der Halbleitersparte von Siemens hervor und befindet sich seit 2001 zu 100 % im Besitz von OSRAM. OS entwickelt, produziert und vermarktet Produkte der optischen Halbleitertechnologien wie LED, für unterschiedlichste Beleuchtungsanwendungen oder andere Optohalbleiter. Das Kerngeschäftsfeld sind LED-Komponenten und Laserdioden für die Automobilindustrie, Büro- und Straßenbeleuchtung sowie kleinste LEDs für mobile Endgeräte, Halbleiterlaser, Detektoren und Infrarotdioden. Die Produktionsstätten befinden sich in Regensburg

- sowie in Wuxi (China) und Kulim und Penang (Malaysia).
- **Speciality Lighting:** Lampen und Systeme für diverse Branchen und Spezialanwendungen, z. B. Automobilbeleuchtung, mit traditionellen und LED-Produkten sowie Laser-Technologien.
- **Digital Systems:** Anbieter traditioneller elektronischer Betriebsgeräte und von LED-Treibern, LED-Modulen, Light-Engines (Kombination aus LED-Modul und elektronischem Steuergerät) sowie Lichtmanagementsystemen zur Unterstützung bei der Planung und Realisierung von Projekten für intelligente Gebäudeautomation und das Internet der Dinge (IoT).
- **Lighting Solutions:** Herstellung und Vertrieb von Leuchten, Konzeption und Umsetzung von Beleuchtungslösungen in der Innen- und Außenbeleuchtung sowie das Servicegeschäft.

Die **Geratherm Medical AG** ist ein international ausgerichtetes Medizintechnikunternehmen mit Sitz in Geschwenda/Thüringen, dessen Wurzeln in der medizinischen Temperaturmessung liegen. Geratherm Medical bietet u. a. weltweit als einziger Hersteller ein analoges Fieberthermometer an, das statt Quecksilber Gallistan, eine flüssige Legierung aus Gallium, Indium und Zinn, verwendet (GERATHERM MEDICAL AG o. J.).

Die **Infineon Technologies AG** ist ein deutscher Halbleiterhersteller mit Hauptsitz in Neuburg bei München. Die Firma entstand im Jahr 1999 durch die Ausgliederung der Halbleitersparte der Siemens AG. Der Schwerpunkt der Produkte liegt bei den Themen Mobilität, Energieeffizienz und Sicherheit.

In seiner heutigen Struktur gliedert sich Infineon in die Geschäftsbereiche:

- **Automotive (ATV):** Halbleiterprodukte (Mikrocontroller, Leistungshalbleiter, Sensoren) für den Einsatz in der Automobilelektronik wie z. B. in Motor- und Getriebesteuerung oder in Sicherheitssystemen (ABS, Airbag, ESP).
- **Industrial Power Control (IPC):** Produkte, die bei Erzeugung, Übertragung und Verbrauch elektrischer Energie zum Einsatz kommen, z. B. zur Steuerung von elektrischen Antrieben für Industriemaschinen oder Haushaltsgeräte oder für die erneuerbare Energieerzeugung in Solar- und Windkraftanlagen.
- **Power Management & Multimarket (PMM):** Chips für energieeffiziente Stromversorgungen und Hochfrequenz-Anwendungen z. B. in Fernsehern, Spielkonsolen, PCs, mobilen Endgeräten sowie in Computer-Servern.
- **Chip Card & Security (CCS):** Mikrocontroller für SIM-Karten für Mobiltelefone, Sicherheitschips für Bezahlkarten und Zugangsberechtigungskarten sowie chipbasierte Lösungen für Reisepässe, Personalausweise und sonstige behördliche Dokumente.

Mit weltweit etwa 37.500 Beschäftigten erzielte das Unternehmen im Geschäftsjahr 2017 einen Umsatz von rund 7,1 Mrd. € (INFINEON o. J.).

Das belgische Unternehmen **Umicore AG & Co. KG** eröffnete 2017 in Hanau-Wolfgang eine Produktionsanlage für die Herstellung von Trimethylgallium (TMG). TMG ist ein Vorprodukt zur Herstellung von Halbleitern, LEDs und optoelektronischen Geräten. Umicore ist ein weltweit agierendes Unternehmen mit sechs Standorten in Deutschland. Umicores Expertise liegt in Chemie, Materialwissenschaften, Metallurgie und Recycling (UMICORE 2017)

Die **Solibro GmbH**, Ende 2006 als Joint Venture zwischen Q-Cells und der Solibro AB (Schweden) gegründet, hat ihren Hauptsitz in Thalheim im Erzgebirge und einen Forschungsstandort in Uppsala/Schweden. Solibro ist mit einer Produktionskapazität von 145 MW einer der weltweit führenden Hersteller von CIGS-Dünnschichtmodulen. Im Februar 2018 stellt Solibro mit einem Wirkungsgrad von 17,52 % einen neuen Effizienz-Weltrekord für CIGS-Dünnschichtmodule auf (SOLIBRO GMBH o. J.).

Das deutsche Unternehmen **Azurspace Solar Power GmbH** mit Sitz in Heilbronn ist ein Hersteller von Raumfahrtsolarzellen für die Luft- und Raumfahrtindustrie, z. B. für Telekommunikations- und Erdbeobachtungssatelliten für die Wissenschaft, Aufklärung und Navigation. Die Firma wurde als Teil der Telefonken GmbH 1964 gegründet, der Firmenname geht auf den ersten deutschen Forschungssatelliten „AZUR“ zurück. Seit 2006 firmiert das Unternehmen mit 200 Mitarbeitern nach einigen Umgestaltungen als Teil der Generali Group unter seinem heutigen Namen. Neben der Produktion ist das Unternehmen auch in der Forschung und Entwicklung von Mehrfach- und

CPV-Solarzellen (Concentrated Photovoltaics) aktiv (AZURSPACE SOLAR POWER GMBH o. J.).

Die Wurzeln des Unternehmens **Avancis GmbH** liegen in der CIGS-Forschung. Nach der Übernahme durch Siemens Solar im Jahr 1990 begann das damals unter dem Namen ARCO Solar firmierende Unternehmen die weltweit erste kommerzielle CIS-Serienproduktion in Kalifornien. Nach weiteren Übernahmen durch Shell Solar und Saint-Gobain befindet sich das Unternehmen seit 2014 im Besitz des chinesischen Baustoff- und Glaskonzerns CNBM (China National Building Materials Group Corporation). Das Produktportfolio umfasst u. a. Solarfassaden, Dachanlagen und gebäudeintegrierte Systeme. Die Unternehmenszentrale und ein Produktionsstandort (Produktionskapazität 100 MW/Jahr) befinden sich in Torgau. Ein in München ansässiger Forschungs- und Entwicklungsstandort befasst sich mit der Entwicklung neuer CIGS-Zellendesigns, neuer Fertigungsprozesse und Produktionsanlagen (AVANCIS GMBH o. J.).

Die **Philips Photonics** in Ulm gehört seit 2006 zum Philips Konzern und ging aus den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen von Philips und der U-L-M Photonics, einem Spin-out der Universität Ulm hervor. Das Unternehmen produziert bereits seit dem Jahr 2000 Laserdioden und ist eigenen Angaben zufolge ein Marktführer für die Herstellung von VCSEL-Technologien (vertical-cavity surface emitting laser – vertikal emittierende Laser-Dioden) für den Einsatz in Smartphones, Industrieanlagen, Fahrzeugen, in der ultraschnellen, optischen Datenübertragung per Glasfaserkabel sowie in thermischen Prozessen in der Fertigung (z. B. dem Verschweißen von Kunststoffen und Bearbeitung von Halbleitern) (PHILIPS 2016).

Die 1987 gegründete **Manz AG** mit Hauptsitz in Reutlingen ist ein weltweit agierender Technologieanbieter zur Herstellung von elektronischen Bauteilen und Geräten, von Lithium-Ionen-Batterien sowie von Solarmodulen. Mit der „CIGSfab“ ist Manz der weltweit einzige Anbieter einer voll integrierten, schlüsselfertigen Produktionslinie zur Herstellung von CIGS-Dünnschicht-Solarmodulen. Seit 2017 besteht ein Forschungs-Joint-Venture mit der Shenhua Group, Shanghai Electric und der Beijing Future Science Park Development Group, das nach eigenen Angaben künftig die weltweit führende Forschungseinrichtung im

Bereich der CIGS-Dünnschicht-Technologie darstellen wird (MANZ AG o. J.).

Der **NARVA Warenzeichenverband e. V.** hat fünf Mitgliedsunternehmen (NARVA e. V. 2017):

- Lumileds Germany GmbH (<http://www.narva-light.com/>)
- Narva Lichtquellen GmbH + Co. KG (<http://www.narva-bel.de/>)
- Narva Trade Solartechnik (http://www.narva-bel.de/de/NARVA_Solarthermie_1749.html)
- G. L. E. mbH (<http://narva-gle.com/>)
- Vosla GmbH (<https://www.vosla.de/>)

Die Marke Narva ist ein gemeinsamer Markenname der Produkte der im Warenzeichenverband Narva organisierten Mitgliedsunternehmen und ging 1963 aus der Kollektivmarke der Betriebe des damaligen Kombinates NARVA in der ehemaligen DDR hervor.

Lumileds Germany GmbH produziert in Aachen Autolampen. Des Weiteren werden im dort ansässigen Forschungs- und Entwicklungszentrum weiße LEDs erforscht und entwickelt. Lumileds Germany ist ein Mitgliedsunternehmen im Mitteldeutschen Warenzeichenverband Narva e. V. Lumileds, 1999 als Joint Venture zwischen Philips Lighting und Agilent gegründet, war zwischen 2005 und 2015 unter dem Namen Philips Lumileds Lighting Company aktiv. 2017 wurden 80,1 % des Unternehmens an Apollo Global Management verkauft. 2015 gingen die Rechte an der Marke NARVA für Fahrzeugbeleuchtung an Lumileds (ehemals Philips Group) (NARVA e. V. o. J.).

Händler, die Gallium in ihrem Portfolio angeben, sind:

Die **TRADIUM GmbH** mit Sitz in Frankfurt/Main ist ein Metallhändler, der sich auf den Vertrieb mit Rohstoffen aus den Bereichen Technologiemetalle, Seltene Erden und Edelmetalle spezialisiert hat. An Rohstoffen aus dem Bereich Gallium umfasst das Portfolio der TRADIUM GmbH Galliummetall in Reinheiten bis maximal 7N, Galliumnitrat (min. 99 %), Galliumchlorid (max. 5N) und Galliumoxid (bis 5N). Die TRADIUM GmbH ist ein weltweit agierendes Unternehmen und unterhält Kooperationen mit internationalen Geschäftspartnern. Im

Bereich Gallium ist es die chinesische Beijing Jiya Semiconductor Material Co. Ltd.

Auer-Remy mit Sitz in Hamburg ist seit 2008 ein Teil der Lehvoss Unternehmensgruppe, einem Handelshaus für chemische und mineralische Produkte. Zur Produktpalette gehört neben einer Reihe von weiteren anorganischen Verbindungen u. a. Galliumoxid der Reinheiten 99,0–99,9999 % (AUER-REMY o. J.).

Die **GMH Stachow-Metall GmbH** ist ein auf die Beschaffung, den Handel und die Aufbereitung von NE-Metallen und deren Abfällen und Rückständen spezialisiertes Unternehmen mit Sitz in Goslar. Der Handel mit Gallium ist insbesondere auf den Ankauf von Galliumarsenid, Kristallbruch, Gallium-Wafer und Galliumoxid ausgerichtet (GMH STACHOW-METALL GMBH o. J.).

Die **Haines & Maassen Metallhandelsgesellschaft mbH** mit Sitz in Bonn ist auf den Handel von Neben- und Sondermetallen und Legierungen ausgerichtet. Die lieferbaren Galliumspezifikationen umfassen die Reinheiten 99,99–99,9999 % sowie Gallium-Indium(76Ga 24In)- und Gallium-Indium-Zinn(62Ga 22In 16Sn)-Legierungen (HAINES & MAASSEN o. J.).

Die **Projector GmbH** ist ein international tätiges Handelsunternehmen mit Sitz in Duisburg. Zum Kerngeschäft gehört der Handel mit Chemikalien und NE-Metallen, u. a. Galliummetall.

Das Unternehmen **JK Minerals & Metals** ist seit seiner Gründung 1996 auf den Bezug, Handel und Vertrieb von NE-Metallen und deren Schrotten, u. a. Galliummetall (4–6N) und Galliumschrott, fokussiert.

Zum Liefersortiment der Firma **Osnabruegge GmbH & Co. KG** in Pforzheim gehören neben Galliummetall auch Galliumlegierungen für den Einsatz in der Dünnschichttechnik (OSNABRUEGGE o. J.).

Dr. Ihme ist ein Handelsunternehmen mit Sitz in Berlin. Das Liefersortiment umfasst neben den Industrie-, Leicht- und Edelmetallen die Elektronikmetalle Gallium, Germanium, Indium u. a.

Die **Johnson Matthey GmbH** ist ein international agierendes Unternehmen in der Spezialche-

mie-, Umwelttechnologie- und Edelmetallbranche. Ursprünglich gegründet als Goldhandelshaus ist das Unternehmen heute ein Hersteller von Katalysatoren sowie ein Raffinade-, Recycling- und Verarbeitungsunternehmen von Edelmetallen wie den Platingruppenelementen, Gold und Silber. Zum Lieferumfang des Unternehmens gehört u. a. Pallabraze 880Ga, eine Palladium-Silber-Gallium-Legierung mit etwa 9 % Galliumanteil, welche als Zusatzwerkstoff in hartgelöteten Metallverbindungen eingesetzt wird (JOHNSON MATTHEY o. J.).

Das in Düsseldorf ansässige Unternehmen **Metherma KG** ist ein Handelshaus für eine Reihe von Refraktär- und Sondermetallen. Der Handel mit Gallium ist auf Galliummetall und -chemikalien ausgerichtet (METHERMA o. J.).

2.3 Derzeitige Marktdeckung

Aus der Differenz von Angebot (primär und sekundär) und Nachfrage ergibt sich die Marktdeckung. Für das Angebot stehen die geschätzten Zahlen der Primärproduktion zur Verfügung; für die weltweite Sekundärproduktion wurde angenommen, dass 40 % des Bedarfs aus Recyclingmaterial gedeckt wurden. Veröffentlichte Sekundärproduktionszahlen liegen lediglich vereinzelt für Japan vor. In den vorliegenden Daten zur Galliumnachfrage sind ebenfalls Primär- als auch Sekundärgallium enthalten, eine Trennung ist nicht möglich. Seit dem Jahr 2011 übersteigt alleine die Primärproduktion die Nachfrage (Tab. 12).

Für den Zeitraum 2004 bis 2009 lag die Galliumnachfrage (von Primär- und Sekundärgallium) über dem Angebot (Primär- und Sekundärgallium); das Angebotsdefizit lag im Jahr 2004 bei geschätzten 66 t (46 % des Angebots), 2009 bei 34 t (22 %). Seit dem Jahr 2010 übersteigt das Angebot die Nachfrage und seit 2011 gibt es ein hohes Überangebot (Tab. 12, Abb. 17). Allein die Primärgalliumproduktion ist deutlich höher als die Nachfrage. Im Jahr 2015 lag der Angebotsüberschuss bei ca. 277 t bzw. 46 %. Basierend auf diesen Annahmen ist die Marktdeckung für das Jahr 2015 als unbedenklich zu bewerten.

Für das Jahr 2016 liegen keine Nachfragezahlen vor. Allerdings ist aufgrund des niedrigen Preises für 4N-Gallium (99,99 %) davon auszugehen, dass es ebenfalls ein Überangebot gab.

Tab. 12: Angebot und Nachfrage von Gallium (Datenquellen: ROSKILL 2014, USGS versch. Jahre a, ICMLR, pers. Mitteilung, FENG 2017, BGR o. J.).

Angebot/ Nachfrage	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	[Tonnen]										
Primärproduktion ¹	73	95	111	79	182	292	383	348	438	469	274
Raff.-Produktion	105	135	150	122	140	150	160	170	160	180	180
Recyclingprodukt.- Kapazität	73	78	78	78	141	198	198	200	200	200	270
Recyclingproduktion Japan	90	96	93	83	k. A.	k. A.	65	k. A.	82	75	k. A.
Recyclingproduktion bei 40 %-Anteil	94	88	76	75	83	87	92	115	120	128	k. A.
Angebot (Primär + Recycling)	167	183	187	154	265	379	475	463	558	597	k. A.
Nachfrage (Primär + Recycling)	234	221	190	188	207	218	230	286	300	320	k. A.
Marktdeckung	[Tonnen]										
Primärproduktion – Nachfrage	-161	-126	-79	-109	-25	74	154	62	138	149	k. A.
Angebot – Nachfrage	-68	-38	-3	-34	58	161	245	176	258	277	k. A.
	[%]										
Marktdeckung (Primär) (% des Angebots)	-221	-133	-71	-138	-14	25	40	18	31	32	k. A.
Marktdeckung (% des Angebots)	-41	-21	-2	-22	22	43	52	38	46	46	k. A.

¹ USGS; k. A. = keine Angaben

2.4 Handel

Daten über den globalen Handel mit Gallium sind schwer zu erhalten, oft unvollständig und teilweise widersprüchlich. Internationale Handlungscodesysteme wie das „Harmonisierte System“ (HS) der Weltzollorganisation (WCO o. J.) fassen Gallium mit anderen Elementen zusammen (z. B. HS-Code 811292: „Hafnium, Niob, Rhenium, Gallium, Indium, Vanadium und Germanium, in Rohform; Pulver sowie Abfälle und Schrott, aus diesen Metallen (ausg. Aschen und Rückstände, derartige Metalle enthaltend)“) und nur wenige nationale Statistiken liefern weitere Einzelheiten durch Erweiterung der HS-Codes in nationale Unter-codes (z. B. 81129289 im System der Europäischen Kombinierten Nomenklatur (KN): „Gallium in Rohform; Pulver aus Gallium“). Sowohl das HS-System als auch die nationalen Systeme tren-

nen nicht zwischen Roh-, Raffinade- und Sekundärgallium. Eine Zuordnung ist daher nur indirekt, z. B. über Produktionsmengen oder -kapazitäten der einzelnen Länder, möglich.

Über diese länderspezifischen Warencodes, die für fast alle Länder der Europäischen Union sowie auch für China, Südkorea, Russland (nur Exporte), Kasachstan (nur Exporte), die USA und Kanada (beide nur Importe) vorlagen, konnte der Handel mit Gallium für die meisten Liefer- bzw. Empfängerländer, die bei der Galliumproduktion und Weiterverarbeitung eine wichtige Rolle spielen, grob abgeleitet werden („Reverse Trade“).

Zwischen den Angaben von Importen und korrespondierenden Exporten bestehen teilweise große Diskrepanzen. Beispielsweise hat Deutschland 2016 laut deutscher Handelsstatistik (DESTATIS

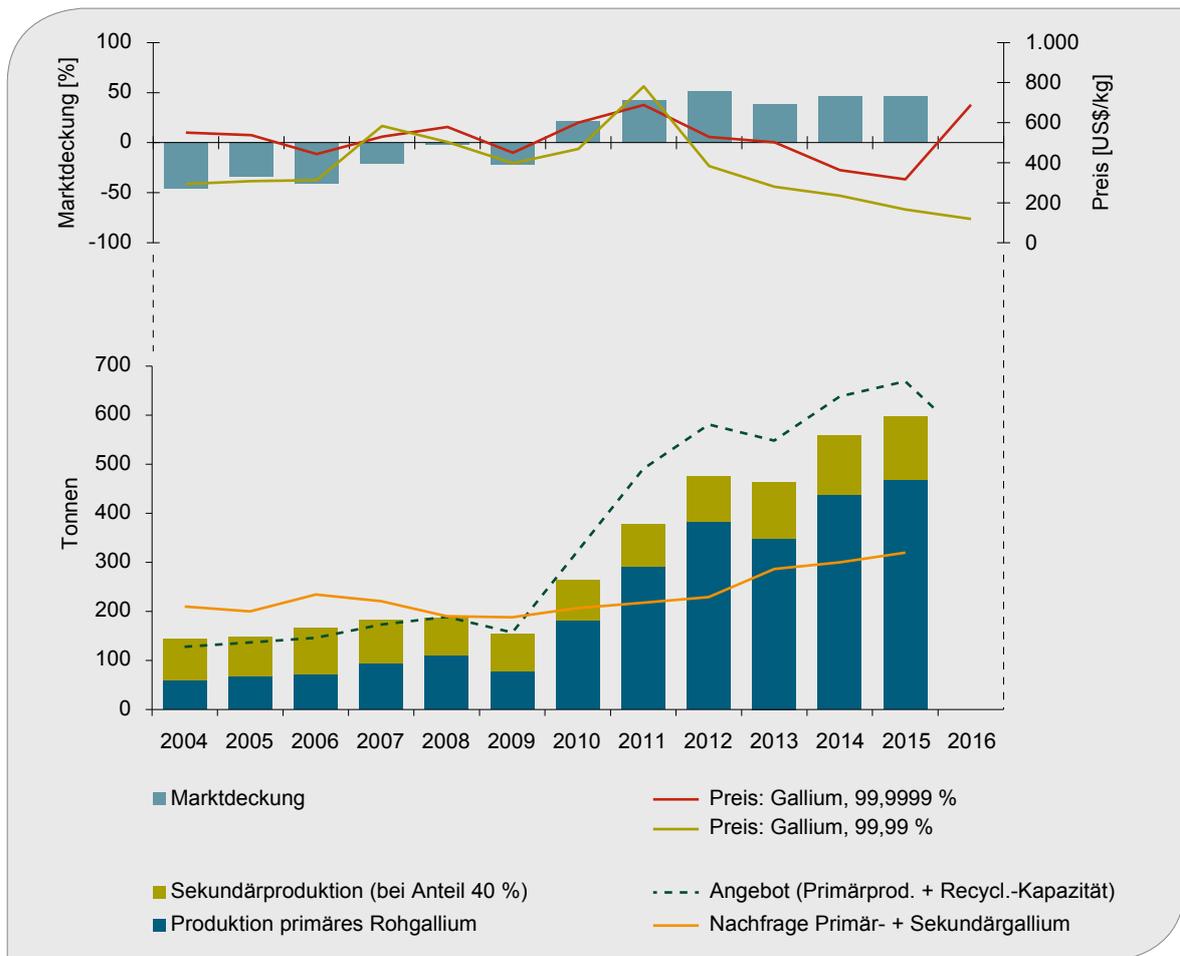


Abb. 17: Entwicklung von Angebot und Nachfrage sowie der Marktdeckung.

2018) 26 t Gallium aus Großbritannien importiert. Großbritannien gibt für 2016 für die gleiche Warengruppe, aber nur Gesamtexporte von 22 t an, wovon nach Deutschland nur 13 t gingen. Große Abweichungen existieren auch zwischen den chinesischen Handelsstatistiken zu den Galliumexporten und den von den Empfängerländern gemeldeten Importen aus China. Beispielsweise gingen laut chinesischer Handelsstatistik 2016 20 t Gallium nach Deutschland. Deutschland gibt aber nur chinesische Importe in Höhe von 11,7 t an; 29 t wurden 2016 nach chinesischen Angaben nach Südkorea exportiert. Südkorea führte nur Importe von 5 t Gallium aus China ein. Ein weiteres Problem sind Durchgangsländer. So werden in der Exportstatistik von Russland für 2016 10 t Gallium gelistet, die in die Niederlande gingen. In der Importstatistik der Niederlande werden diese nicht geführt. Vermutlich waren die Niederlande nur Durchgangsländer.

In den Jahren 2012 bis 2016 wurden jährlich weltweit zwischen ca. 160 und 195 t Gallium exportiert (Tab. 13). Hauptexporteur war China gefolgt von Deutschland, Großbritannien und, in wechselnder Reihenfolge, die Slowakei, Südkorea, Russland und die USA. Die erfassten globalen Galliumimporte lagen im gleichen Zeitraum bei 160–210 t/Jahr. Hauptimporteure waren Deutschland, Japan, Südkorea, Großbritannien und die USA (Tab. 14) (GTIS 2018, DESTATIS 2018, ASIAN METAL versch. Jahre).

Im Jahr 2016 wurden weltweit Galliumexporte in Höhe von 187 t ermittelt. Größter Exporteur war China, gefolgt von Deutschland und Großbritannien (Tab. 13).

- **China** hat seine Exporte zwischen 2012 und 2016 mehr als verdoppelt. Die chinesischen Exporte gingen 2016 nach Japan (36 t), Südkorea (29 t), Deutschland (20 t bzw. 11,5 t

Tab. 13: Globale Galliumexporte (HS 811292XX) (GTIS 2018, DESTATIS 2018, USGS versch. Jahre, ASIAN METAL versch. Jahre).

	2012	2013	2014	2015	2016
	[Tonnen]				
China	46	77	94	98	100
Deutschland	40	37	15	10,5	23
Großbritannien	21	14	25	25	22
Russland	3	6	4	1	11
Südkorea	9	14	18	8	10
Slowakei (Reverse Trade)	12	23	9	9	10
USA (Reverse Trade)	22	7	9	8	6
Niederlande	1	0	0	3	2
Japan (Reverse Trade)	4	1	4	2	2
Ukraine (Reverse Trade)	1	3	0	0	1
Kasachstan	3	13	0	1	0
Belgien	0	0	0	2	0
Ungarn	0	0	1	0	0
Summe	163	195	178	168	187
HHI	1.870	2.231	3.211	3.738	3.243
GLR	0,66	0,28	0,28	0,24	0,23

Tab. 14: Globale Galliumimporte (HS 811292XX) (GTIS 2018, DESTATIS 2018, USGS versch. Jahre).

	2012	2013	2014	2015	2016
	[Tonnen]				
Deutschland	33	39	39	41	48
Japan (aus Reverse Trade)	24	35	31	52	48
Südkorea	5	5	14	33	11
Großbritannien	35	72	41	4	26
USA	58	35	54	29	11
Slowakei	4	16	0	4	4
Kanada	1	2	4	1	3
Niederlande	1	0	0	2	2
China	6	5	4	7	2
Frankreich	1	0	0	0	1
Italien	0	0	0	1	1
Polen	0	0	0	0	1
Belgien	0	0	0	2	0
Summe	168	209	187	176	158

- nach deutscher Importstatistik), Belgien (6 t), Großbritannien (5 t) und Kanada (3 t) sowie in die USA und die Slowakei (je 1 t). China produziert Roh- und Raffinadegallium sowohl aus Primär- als auch aus Sekundärquellen. Die Primär- und Sekundärproduktion des Landes lag bei etwa 310 t Gallium. Eine genauere Zuordnung des exportierten Galliums ist deshalb nur eingeschränkt möglich.
- **Deutschland** belieferte hauptsächlich Großbritannien (16 t) und die Slowakei (4,8 t). Nach Großbritannien ging vermutlich Rohgallium und in die Slowakei Sekundärgallium (s. u. Handelsdaten Deutschlands).
 - **Großbritannien** exportierte größtenteils nach Deutschland (13 t bzw. 26 t nach deutscher Importstatistik) und Japan (7 t). In Großbritannien gibt es keine Primärproduktion. Es wird Rohgallium aufgereinigt, daher handelt es sich bei dem exportierten Material wahrscheinlich um Raffinadegallium.
 - Die Exporte **Russlands** gingen laut russischer Erfassung überwiegend in die Niederlande (10 t). Russland ist ein Primärproduzent von Gallium. Von den Niederlanden werden allerdings keine Importe aus Russland angezeigt und auch die anderen Galliumimporteure melden keine Importe aus Russland bzw. den Niederlanden in dieser Größenordnung.
 - Die Exporte von **Südkorea** gingen nach Japan (4 t), China (4 t) und die Niederlande (2 t). Südkorea ist Primärproduzent.
 - Die **Slowakei** exportierte 6,8 t nach Deutschland (laut Einfuhrstatistik Deutschlands); Exportdaten aus der Slowakei liegen nicht vor. Die Slowakei ist kein Primärproduzent, bereitet aber Sekundärgallium auf und veredelt es.
 - Die **USA** exportierten nach Großbritannien, China und Kanada (laut Einfuhrstatistiken der importierenden Länder). In den USA wird importiertes Rohgallium (z. B. aus Deutschland) sowie Sekundärgallium veredelt; eine Primärproduktion findet nicht statt.
 - Die **Niederlande** belieferten Deutschland und die Slowakei. Es ist allerdings keine Galliumproduktion oder Veredelung in den Niederlanden bekannt.
 - **Japan** exportierte nach Südkorea. Japan ist sowohl ein Primär- als auch bedeutender Sekundär- und auch Raffinadeproduzent.
 - Die **Ukraine** exportierte laut deutscher Einfuhrstatistik ca. 1 t nach Deutschland; originäre Handelsdaten aus der Ukraine liegen nicht vor. Die Ukraine ist ein Primärproduzent, Produktionszahlen für 2016 sind aber nicht bekannt. Das Primärgalliumwerk in der Ukraine hat einen russischen Betreiber, daher ist anzunehmen, dass ein Teil der Produktion nach Russland geht. Importdaten von Russland für Gallium liegen allerdings nicht vor.
- Die Galliumimporte lagen 2016 bei 158 t. Die größten Importeure waren Deutschland, Japan, Südkorea, Großbritannien und USA (Tab. 14).
- **Deutschland** bezog das Gallium hauptsächlich aus Großbritannien (26 t), China (11,5 t bzw. laut chinesischer Exportstatistik 20 t), Slowakei (6,8 t), Taiwan (1,2 t), Ukraine (1 t) sowie Ungarn (0,8 t).
 - **Japan** importierte aus China (36 t), Großbritannien (7 t), Südkorea (4 t) und Russland (1 t).
 - **Südkorea** kaufte in China (5 t bzw. laut chinesischer Exportstatistik 29 t), Großbritannien (4 t) und Japan (2 t) ein.
 - **Großbritannien** führte Gallium aus Deutschland (16 t), China (6 t), USA (3 t) und Kanada (1 t) ein.
 - Die **USA** importierten aus China (4 t), Deutschland (4 t), Großbritannien (1 t) und Frankreich (2 t).
 - Die **Slowakei** importierte aus Deutschland (3 t), China (1 t) und Hongkong (1 t).

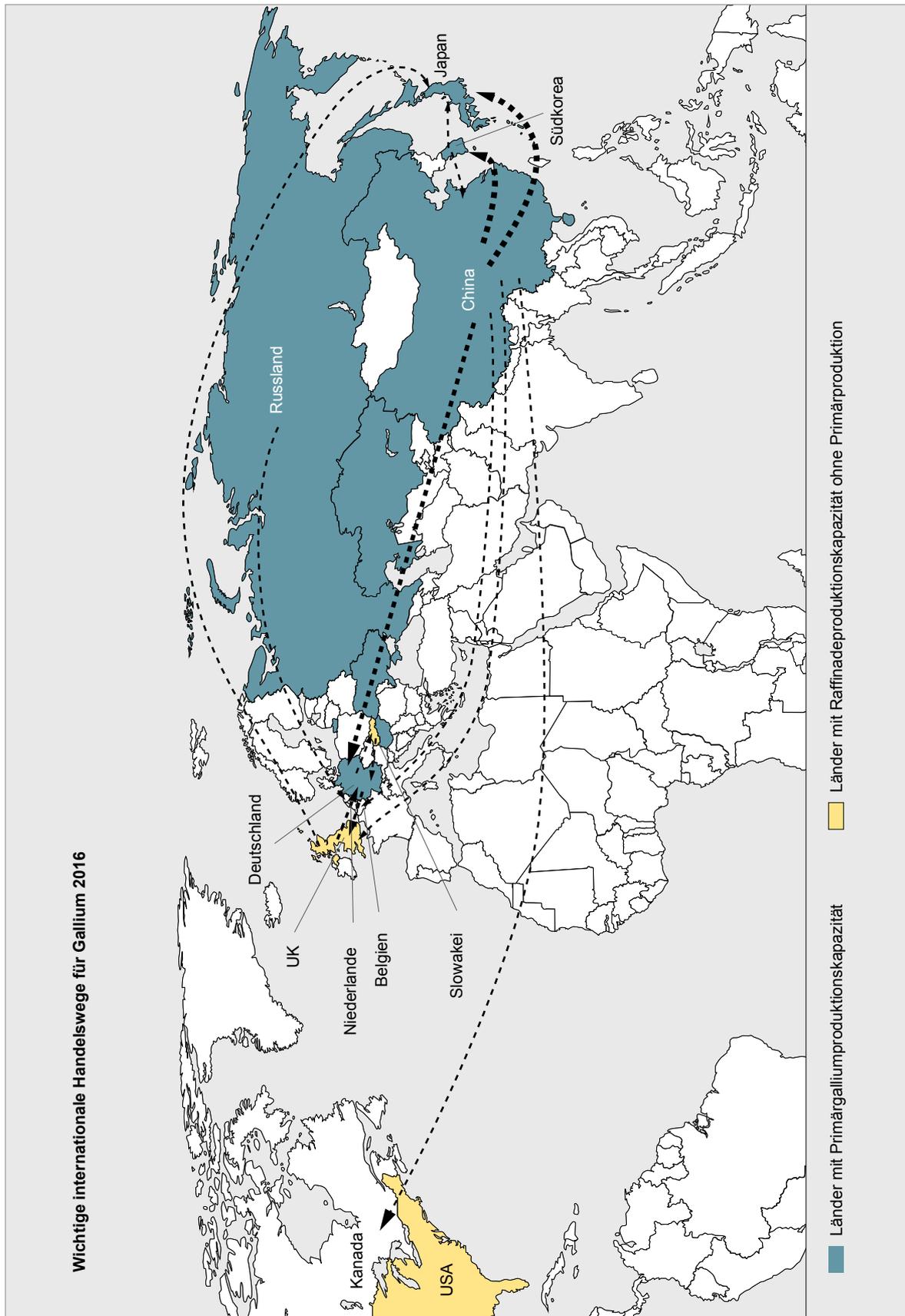


Abb. 18: Die wichtigsten Handelsströme für Gallium im Jahr 2016
 (Datenquellen: GTIS 2018, DESTATIS 2018).

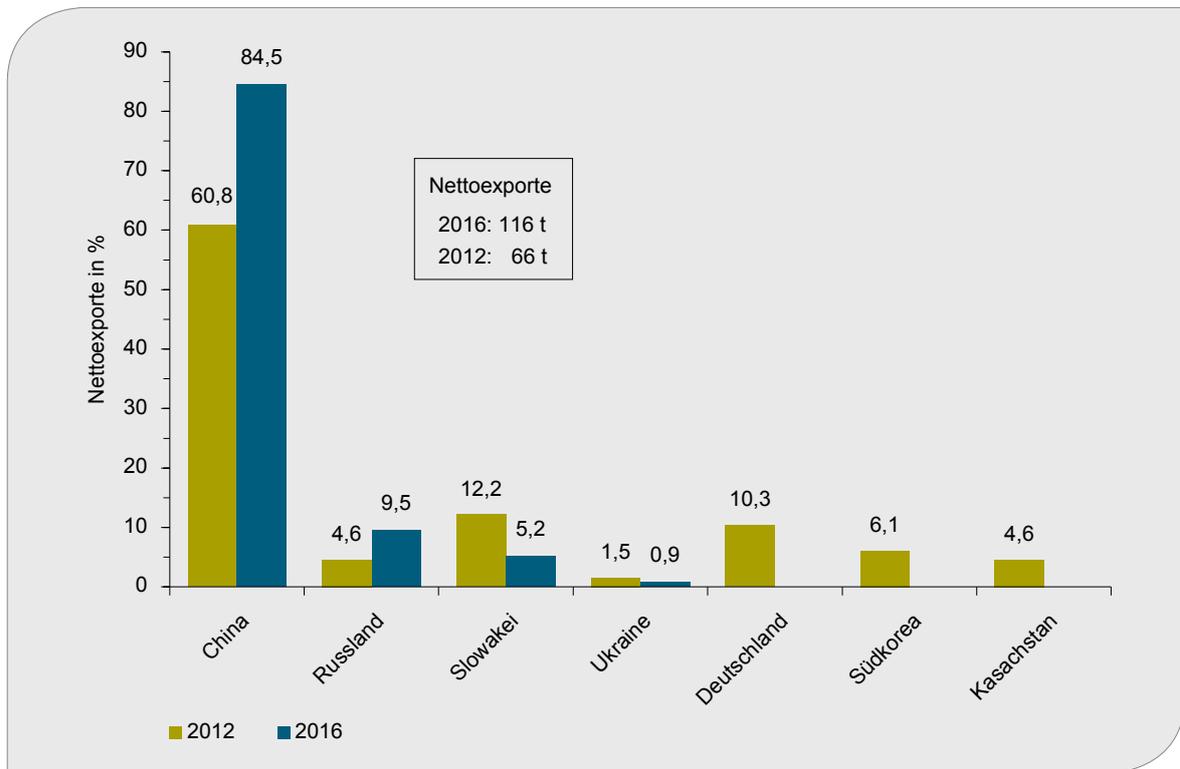


Abb. 19: Nettoexporte von Gallium für die Jahre 2012 und 2016
(Datenquellen: GTIS 2018, DESTATIS 2018).

Nettoexporte

Mit China (98 t, 84,5 % Weltanteil), Russland (11 t, 9,5 % Weltanteil), der Slowakei (6 t, 5,2 % Weltanteil) und der Ukraine (1 t, 0,9 % Weltanteil) gab es 2016 nur vier Gallium-Nettoexporteure (Abb. 19). Die Summe der positiven Nettoexporte³ (NX > 0) lag bei etwa 116 t Gallium.

Im Jahr 2012 lag die Summe der positiven Nettoexporte bei 66 t Gallium. Die Diversifizierung der Nettoexporte war gegenüber 2016 deutlich höher. Nettoexporteure waren 2012 China (40 t), die Slowakei (8 t), Deutschland (7 t), Südkorea (4 t), Kasachstan (3 t), Russland (3 t) und die Ukraine (1 t).

Länderkonzentration und gewichtetes Länderrisiko der globalen Exporte

Die globalen Exporte sind hoch konzentriert, das bei weitem größte Exportland China hatte alleine einen Anteil von 53 % der globalen Exporte; der Anteil der drei größten Exportländer deckte 77,5 % ab. Die mithilfe des Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) berechnete Länderkonzentration der Exporte von Gallium lag im Jahr 2016 mit einem Wert von 3.243 im bedenklichen Bereich. Gegenüber 2012 (1.870) haben der HHI und damit die Länderkonzentration deutlich zugenommen. Das gewichtete Länderrisiko (GLR) ist mit 0,23 als mäßig bedenklich zu bewerten. Von den neun erfassten Exporteuren im Jahr 2016 wurde China (Länderrisiko: -0,42) als gerade noch mäßig risikoreiches Land zur Grenze risikoreich eingestuft, Russland (LR: -0,73) und die Ukraine (LR: -0,75) werden als risikoreich bewertet, die anderen Länder gelten als unbedenklich. Im Jahr 2012 lag das gewichtete Länderrisiko noch bei 0,66 und damit im unbedenklichen Bereich.

³ Nettoexporte sind die Differenz von Exporten und Importen einer Volkswirtschaft. Nettoexporte können sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Betrachtet wurden nur die positiven Nettoexporte, da der Fokus auf der Angebotsseite liegt. Negative Nettoexporteure sind hingegen Verbraucherländer. Anhand der Nettoexporte können Doppelzählungen weitgehend eliminiert bzw. Länder ausgeschlossen werden, die vorrangig als Warenumsschlagplätze auftreten.

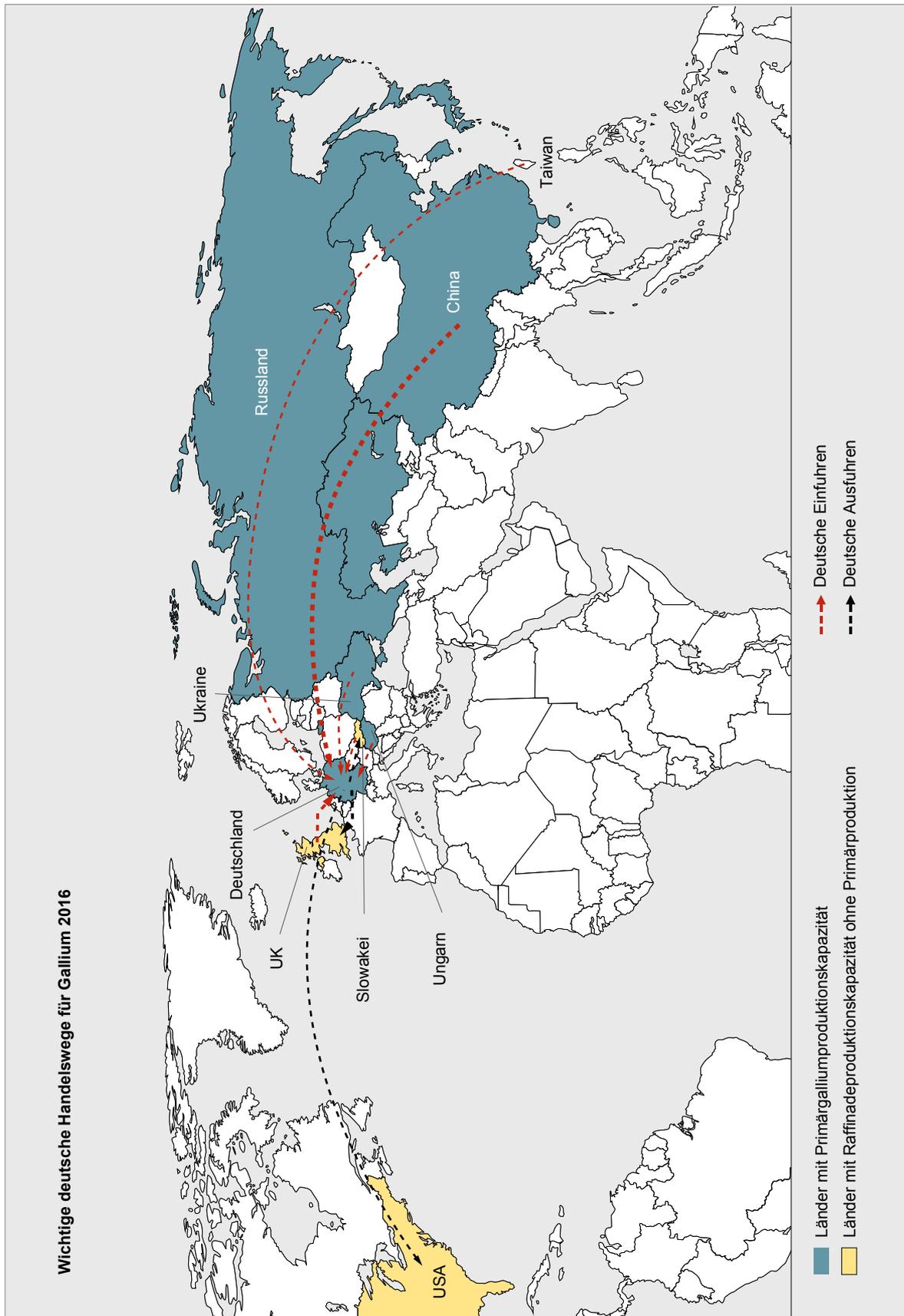


Abb. 20: Die größten Import- und Exportländer von Deutschland für Gallium im Jahr 2016 (Datenquelle: DESTATIS 2016).

Handelsdaten Deutschlands

Deutschland exportierte im Jahr 2016 rund 23 t Gallium (HS-Code 81129289) im Wert von 2,8 Mio. €; dies entsprach 121 €/kg. Hauptempfänger waren Großbritannien (16 t) und die Slowakei (4,8 t). Im Jahr 2017 lagen die Exporte bei nur noch 5,8 t mit den Hauptzielen Schweiz (1 t), Südkorea (0,7 t), (Frankreich (0,7 t), Großbritannien (0,7 t), Italien (0,6 t) und USA (0,3 t) (DESTATIS 2018).

Die deutschen Galliumimporte beliefen sich im Jahr 2016 auf 48 t mit einem Gesamtwarenwert von 6,7 Mio. € (140 €/kg). Damit war Deutschland der weltweit größte Galliumimporteur. Der Anteil der deutschen Importe an den weltweiten Gesamtimporten von 158 lag bei knapp 30 %. Das meiste Gallium wurde aus Großbritannien (26,2 t), China (11,5 t), der Slowakei (6,8 t), Taiwan (1,2 t) und der Ukraine (1 t) eingeführt (DESTATIS 2018).

Im Gegensatz zur deutschen Importstatistik berichtet die chinesische Exportstatistik für das Jahr 2016 Exporte nach Deutschland von fast 20 t. Demnach wurden über 18 t von dem Unternehmen Nanjing Jinmei Gallium Co., Ltd. und 1,3 t von Zhuhai Special Economic exportiert. China hat sich seit 2013 zu einem bedeutenden Gallium-Lieferland für Deutschland entwickelt.

Taiwan liefert erst seit 2015/2016 Gallium nach Deutschland. Vermutlich handelt es sich um

Tab. 15: Galliumimporte und -exporte für die Jahre 2012 und 2016 (Datenquellen: DESTATIS 2018, GTIS 2018).

	Gallium HS 81129289 ¹	
	2012	2016
Importe Global	168 t	158 t
Importe Deutschland	33,4 t	48,2 t
Anteil Deutschland	20 %	30 %
Weltrang Deutschland	3	1
Exporte Global	162 t	187 t
Exporte Deutschland	40,2 t	23,2 t
Anteil Deutschland	25 %	12 %
Weltrang Deutschland	2	2

¹ Gallium in Rohform, Pulver aus Gallium

Sekundärgallium, das in Deutschland aufbereitet und zu GaAs weiterverarbeitet wird.

Aus Großbritannien und der Slowakei wird vermutlich Raffinadegallium importiert. Beide Länder haben keine Primärproduktion, veredeln aber sowohl primäres Roh- als auch Sekundärgallium, welches teilweise aus Deutschland eingeführt wurde.

Im Jahr 2017 wurden 37,5 t Gallium im Wert von 5,6 Mio. € (= 149 €/kg) von Deutschland importiert. Die Slowakei (11,7 t), China (8,6 t), Großbritannien (4,6 t), die USA (11,1 t) und Taiwan (0,9 t) waren die größten Lieferländer.

Von 2002 bis 2011 sind die deutschen Galliumimporte und auch die -exporte gestiegen. Während die Importe sich seitdem auf hohem Niveau halten, sinken die Galliumexporte seit 2011 deutlich (Abb. 21). Bei Letzterem ist der Grund in den ständig sinkenden Produktionszahlen des deutschen Rohgalliumproduzenten Ingal Stade infolge fallender Preise seit Mitte 2011 zu sehen. Ingal Stade exportierte seine Produktion zur Veredelung zu den Mutterfirmen in die USA und Großbritannien. Bei den deutschen Galliumimporten dagegen handelt es sich im Wesentlichen um Raffinadegallium der weiterverarbeiteten Industrie.

Länderkonzentration und gewichtetes Länderrisiko der deutschen Importe

92 % der deutschen Importe stammten 2016 aus drei Ländern. Diese hohe Importkonzentration spiegelt sich in einem HHI von 3.737 wider und liegt im bedenklichen Bereich. Großbritannien ist mit über 50 % das Hauptlieferland, die Risikobewertung für dieses Land sowie der Slowakei und Taiwan ist unbedenklich; von den nach Deutschland exportierenden Ländern wurde 2016 nur China als mäßig risikoreich bewertet (-0,42). Insgesamt liegt das gewichtete Länderrisiko (GLR) der Importe nach Deutschland mit 0,80 im unbedenklichen Bereich.

Insgesamt ist für das Jahr 2016 die Importabhängigkeit Deutschlands für Gallium basierend auf den Indikatoren HHI und GLR als mäßig bedenklich zu bewerten.

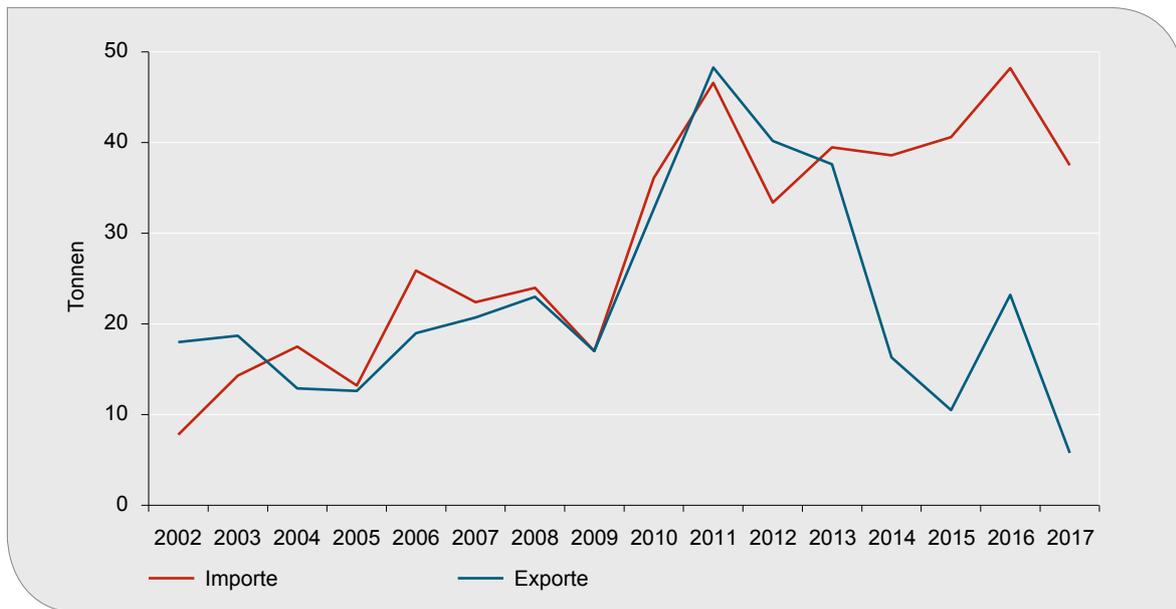


Abb. 21: Galliumimporte und -exporte Deutschlands im Zeitraum 2002–2017
(Datenquelle: DESTATIS 2018).

2.4.1 Handelsbeschränkungen

Für Länder der EU ist der Export von Gallium nach Nordkorea verboten. Weitere Handelsbeschränkungen für den Rohstoff Gallium liegen nicht vor. In dem OECD-Verzeichnis der Ausfuhrbeschränkungen für Rohstoffe (OECD o. J.) sind für das Jahr 2014 zwar für die Gruppe „Hafnium, Niob, Rhenium, Gallium, Indium, Vanadium und Germanium, in Rohform; Pulver sowie Abfälle und Schrott, aus diesen Metallen“ für China und Russland Ausfuhrbeschränkungen (Exportsteuern, Exportquoten und eine Lizenzierung für den Export) aufgeführt, speziell für die Untergruppe Gallium (China HS-Code 81129990, Russland HS-Code 8112928900) werden allerdings keine Exportbeschränkungen gelistet.

2.5 Angebots- und Nachfragetrends

2.5.1 Vorräte

Von Interesse für die Galliumgewinnung sind in erster Linie Bauxiterze. Für 2017 sind Bauxitreserven in Höhe von 26,1 Mrd. t ausgewiesen (USGS). Bei einem durchschnittlichen Galliumgehalt von 50 ppm und einer Ausbringung des Galliums von 30 % liegen die Galliumreserven in den Bauxiten

bei 392.000 t. Bei der aktuellen Primärproduktion würden diese Reserven die Versorgung für über 1.000 Jahre sichern. Die größten Bauxitreserven befinden sich in Guinea, Australien, Brasilien, Jamaika, China und Indonesien.

KRAMER (1988) errechnete aus 21,589 Mrd. t Bauxitreserven mögliche Galliumreserven von 400.000 t basierend auf eine Ausbringung von 40 %. Australien besaß mit 106.560 t Gallium das höchste Potenzial. Grund waren nicht nur die hohen Bauxitreserven, sondern auch die hohen durchschnittlichen Galliumgehalte von 60 ppm in den dortigen Bauxiten. Ebenfalls enorme Galliumreserven wiesen demnach Guinea (67.200 t bei einem Gehalt von 30 ppm), Brasilien (56.000 t; 50 ppm), Jamaika (48.000 t; 60 ppm), Indien (28.000 t; 50 ppm), Suriname (18.400 t; 80 ppm), Guyana (14.000 t; 50 ppm), Indonesien (12.000 t; 40 ppm) und China (10.880 t; 60 ppm) auf.

SCHULTE & FOLEY (2014) kalkulierten die Spannweite von geologisch verfügbarem Gallium in den weltweiten Bauxit-Vorkommen (Ressourcen) auf Werte zwischen 30 und 82.720 t. Insgesamt wurde abgeschätzt, dass in den weltweiten Bauxitvorkommen (57 Mrd. t Bauxit) etwa 700.000 t Gallium enthalten sind (bei einem Ausbringen von 30 % wären es 210.000 t).

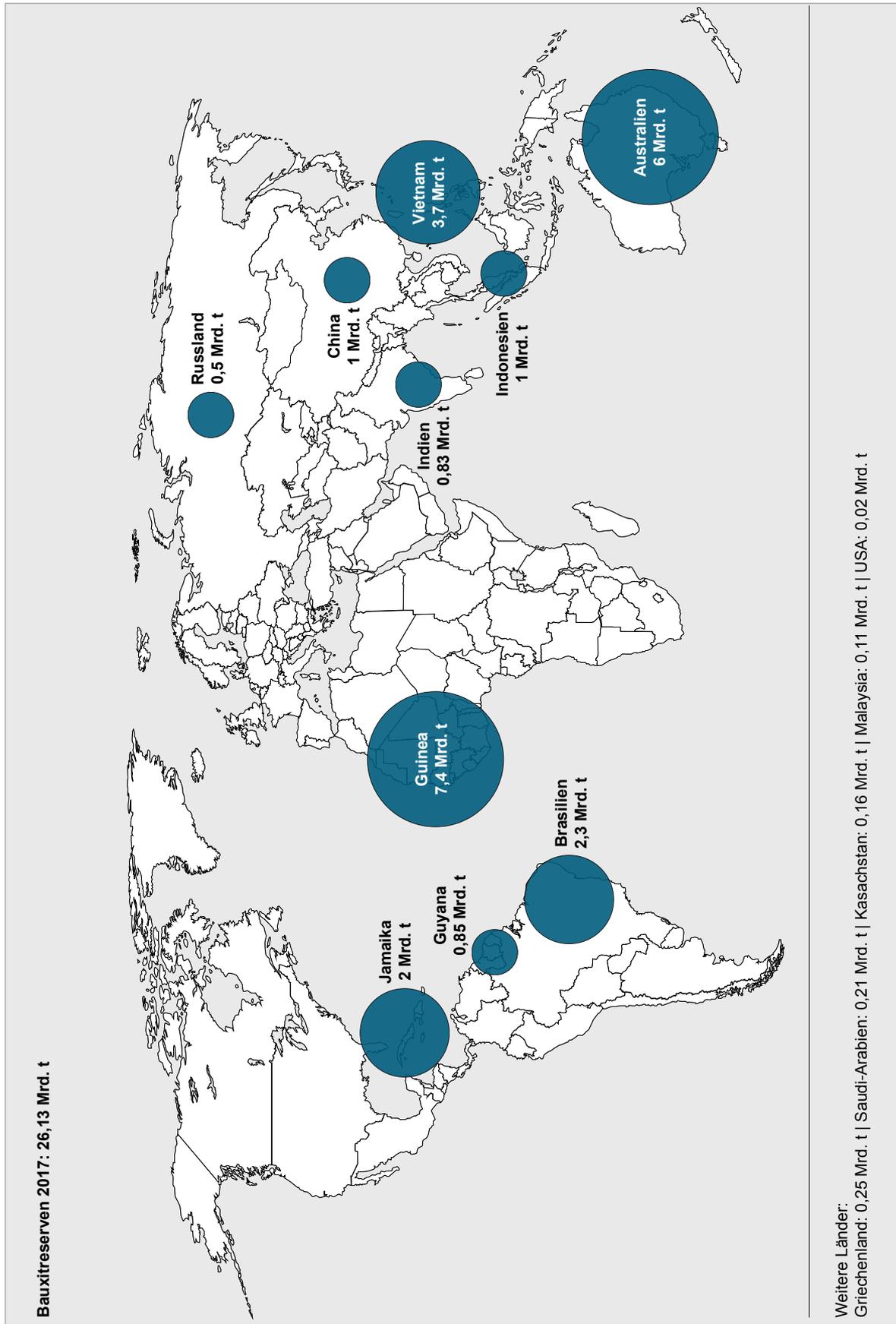


Abb. 22: Verteilung der Bauxitreserven. Stand Januar 2018 (Datenquelle: USGS versch. Jahre b).

Gallium wird auch aus Zinkerzen gewonnen. Die Spannweite des in Zinkerzen enthaltenen Galliums ist allerdings sehr groß. BUTCHER & BROWN (2014) nehmen Galliumgehalte von 10 bis 320 ppm an. Die bekannten Zinkreserven belaufen sich im Jahr 2017 auf 233,7 Mio. t. (USGS versch. Jahre b), demnach können einige 1.000 t Gallium in den Zinkreserven enthalten sein.

2.5.2 Potenziale

Gallium wird aus der Natronlauge, die beim Bayer-Prozess bei der Tonerdeproduktion eingesetzt wird, gewonnen. Die größten Galliumpotenziale liegen in der Erweiterung dieser Beiprodukt-Gewinnung aus Bauxit.

Im Jahr 2016 wurden 275 Mio. t Bauxit gefördert. Diese hätten bei einem durchschnittlichen Galliumgehalt von 50 ppm und einer Ausbringungsrate von 30 % ein theoretisches Potenzial für die Gewinnung von über 4.000 t Gallium. Die tatsächliche Rohgalliumproduktion lag bei 200 – 274 t (Abb. 23, Tab. 2), sodass lediglich 5–7 % dieses Potenzials ausgeschöpft wurden.

Im Jahr 2016 wurden etwa 119,6 Mio. t Aluminiumoxid und -hydroxid produziert. Die größten Produzentenländer von Tonerde waren China (etwa 61 Mio. t, 51 % Weltanteil), Australien (etwa 20,6 Mio. t, 17 % Weltanteil), Brasilien (etwa 11 Mio. t, 9,1 % Weltanteil), Indien (etwa 6 Mio. t, 5 % Weltanteil), Russland (2,7 Mio. t, 2,2 % Weltanteil) und die USA (etwa 2,5 Mio. t, 2,1 % Weltanteil). Deutschland besaß mit einer Jahresproduktion von rund 1 Mio. t etwa 0,8 % Weltanteil. Außer in China und Russland wird aktuell jedoch in keinem dieser Länder Primärgallium produziert, Produktionskapazitäten sind zusätzlich nur noch in Deutschland vorhanden. Durch den Bau weiterer Galliumprimärproduktionsanlagen im Bereich eines der großen Tonerdewerke ließe sich die weltweite Kapazität für die Primärproduktion erhöhen.

Auch kann eine Verbesserung der Technologie beim Gewinnungsprozess die Ausbringungsrate steigern.

Weitere, nicht unbedeutende Potenziale liegen in der Beiproduktgewinnung bei der Zinkelektrolyse und der Gewinnung aus Kohlen bzw. Kohleflugaschen.

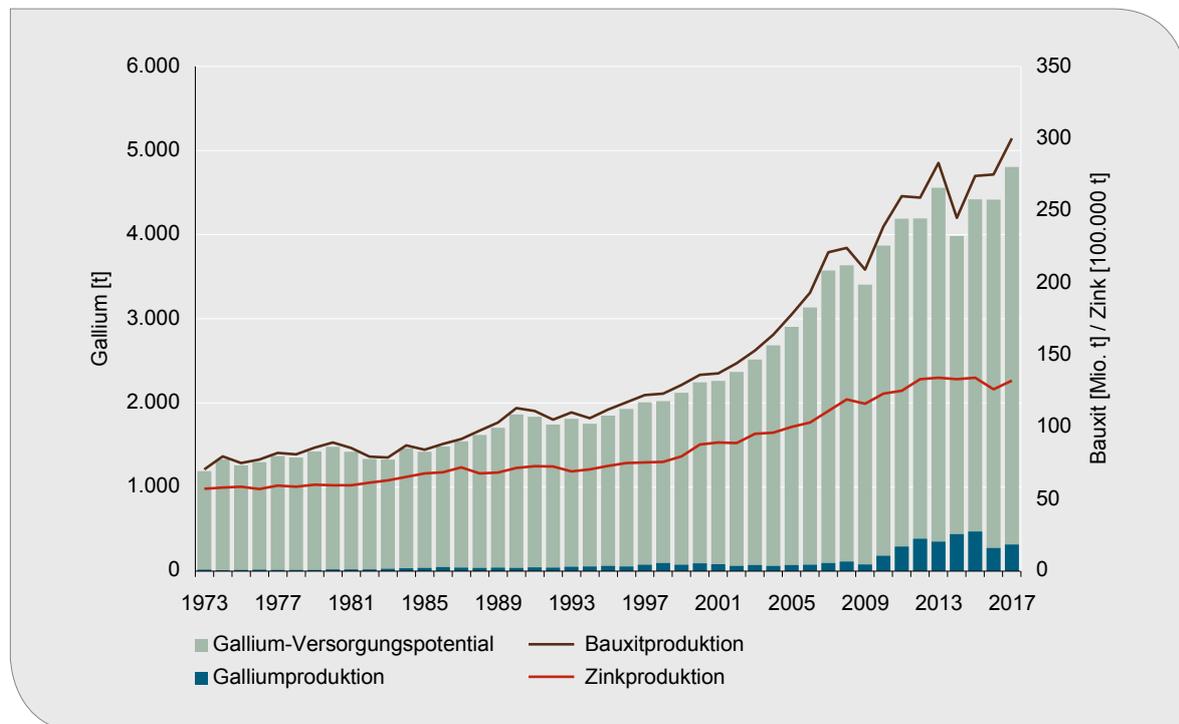


Abb. 23: Potenzial der primären Rohgalliumgewinnung aus den weltweit geförderten Bauxiten und Zinkerzen bei einem durchschnittlichen Galliumgehalt von 50 ppm im Erz und einer Ausbringungsrate von 30 % (gerechnet nach FRENZEL et al. 2016a).

Bisher wird Gallium als Beiprodukt aus der Zinkelektrolyse nur in sehr geringem Maße gewonnen (z. B. in Japan). Je nach Gehalt in den Zinkerzen (Sphalerite) könnte diese Produktion durch den Bau neuer Galliumproduktionsanlagen deutlich erhöht werden.

Die Gewinnung von Gallium aus Kohleflugaschen bietet ebenfalls ein enorm großes Potenzial und gewinnt insbesondere in China an Bedeutung (s. Kap. 2.5.3).

Ebenfalls gibt es noch große Potenziale bei der Rückgewinnung aus galliumhaltigen Sekundärrohstoffen. Durch Recycling von Prozessschrotten, die bislang nicht wiedergewonnen werden, kann das Galliumangebot enorm erweitert werden. Beispielsweise fallen nicht nur bei den Waferproduzenten große Mengen an Prozessschrotten an, sondern auch bei den Chipherstellern.

Aktuelle Forschung zu Galliumpotenzialen in deutschen Lagerstätten und zur Rückgewinnung galliumhaltiger Sekundärrohstoffe

Im Rahmen der Fördermaßnahme „r⁴ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe“, die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit rund 60 Mio. € finanziert wird, werden deutsche Galliumvorräte in primären und sekundären Lagerstätten neu bewertet sowie effiziente Verfahren zum Recycling von Gallium entwickelt. Vier der insgesamt 40 r⁴-Verbundprojekte mit Partnern aus Forschung, Industrie und Behörden adressieren Gallium in ihren Arbeiten als wichtigen Zielrohstoff.

Im Verbundprojekt HTMET erfolgt eine systematische Abschätzung der Rohstoffpotenziale von sulfidischen Buntmetallmineralisationen in Deutschland und angrenzenden Regionen für eine wirtschaftliche Nutzung aller Lagerstätteninhalte unter besonderer Berücksichtigung von Anreicherungen hochtechnologierelevanter Spurenelemente wie Gallium im Erz. Basierend auf Untersuchungen an Sammlungsbeständen wird ein geochemisch-mineralogisch-wirtschaftsökonomisches Kataster der „HT-Metall-Höflichkeit“ von Erzen nach genetischen

Typen entwickelt. Ein neues multikriterielles Bewertungskonzept identifiziert hoffige Lagerstättendistrikte und Cluster von Vorkommen, wo standortbezogene Indikatoren analysiert und bewertet werden. Erhöhte Galliumgehalte konnten u. a. im Schwarzwald, im Ruhrgebiet und in Lautenthal (Oberharz) nachgewiesen werden. In Aufbereitungstests mit galliumhaltigem Erz aus Lautenthal konnte mittels Flotation ein Galliumausbringen von 95 % bei einer Anreicherung des Galliums auf über 100 ppm erzielt werden.

Rückstände der Erzaufbereitung des früheren Bergwerkes Rammelsberg im Harz wurden über Jahrzehnte in Bergeteichen gesammelt. Diese enthalten nach Ergebnissen des Verbundprojektes REWITA neben großen Mengen an Baryt, Kupfer, Zink, Blei, Kobalt und Indium auch 165 t Gallium. In dem Verbundvorhaben wird untersucht, ob eine Gewinnung dieser Elemente unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten möglich ist. Hierzu werden neue Abbau- und Aufbereitungsverfahren entwickelt und erprobt. Begleitet werden die technologischen Entwicklungen von Planungen zur Infrastrukturgestaltung eines künftigen Rohstoffgewinnungsbetriebes, zur Klärung von Genehmigungsfragen und weiteren für die wirtschaftliche und ökologische Gesamtbewertung erforderlichen Parametern. Neueste Projektergebnisse haben allerdings gezeigt, dass Gallium im Gegensatz zu Kobalt und Indium nicht an Sulfide, sondern an die silikatische Matrix gebunden ist. Somit ist eine wirtschaftliche Aufbereitung nach derzeitigem Stand nicht möglich.

Ziel des Verbundprojektes EcoGalN ist es, Gallium möglichst vollständig aus Produktionsabfällen der Halbleiterindustrie zu gewinnen und in den Produktionskreislauf zurückzuführen. Derzeit gehen durch nicht nutzbare galliumhaltige Fertigungsrückstände rund 50 % des Galliums verloren. Die Projektidee von EcoGalN besteht darin, Gallium aus unterschiedlichen Industrieabfällen, wie Prozesswässern und Prozessschlammern der Wafer- und Chipproduktion, abzutrennen und zu gewinnen. Für diese Stoffströme existieren bis heute noch keine technisch anwendbaren Aufbereitungsverfahren. Im Projekt werden u. a. Trennmethode, wie die Dialyse, und Anreicherungsverfahren, wie

die selektive Sorption von Gallium mithilfe von Mikroorganismen, getestet.

gagendta+ plant die Entwicklung einer modularen Prozesskette, mit der Hochtechnologie-metalle aus Elektro- und Elektronikgeräten dezentral zurückgewonnen werden. Kernkomponenten sind die Vorbehandlung des Inputmaterials, die thermochemische Stofftrennung, die mechanische Aufbereitung des festen Pyrolyseprodukts und die Metallfraktionierung durch Biosorption und -fällung sowie über wässrige Elektrolyse. Die Zielmetalle Gallium, Germanium, Neodym und Tantal werden als Reinform oder Legierung zurückgewonnen. Mit der Prozesskette wird eine Steigerung der Rückgewinnung von derzeit unter 1 % mit konventionellen Methoden auf 10 % der im Inputstrom einer EAG-Aufbereitungsanlage befindlichen Zielmetalle angestrebt.

Weitere Informationen zu diesen sowie allen weiteren Projekten der Fördermaßnahme r⁴ sind unter www.r4-innovation.de zusammengefasst. Hier sind auch die an den Projekten beteiligten Firmen und Forschungseinrichtungen aufgelistet.

Auch in der 2016 abgeschlossenen Vorgängerfördermaßnahme r³ des BMBF (siehe www.r3-innovation.de) wurde die Rückgewinnung von Gallium untersucht. Das Projekt Rotschlamm befasste sich mit der ganzheitlichen Verwertung der gleichnamigen Rückstände aus der Aluminiumindustrie. Hierfür wurden drei aufeinanderfolgende Prozessschritte entwickelt, die sich bis zum Projektende teilweise noch im Labormaßstab, in manchen Schritten bereits in der frühen Phase einer Pilotanlage befanden (JASPERT et al. 2016). Mit dem ersten Prozessabschnitt, der optimierten Drucklaugung, konnte ein sehr feines Aluminiumhydroxid gewonnen werden. Anschließend wurde im zweiten Prozessabschnitt, dem Ofenprozess, eine Eisenphase für die Stahlindustrie und eine optimierte Schlacke hergestellt, welche in der Glasfaserherstellung optimal eingesetzt werden kann. Im dritten Prozessabschnitt wurde das in der Bayer-Lösung angereicherte Gallium mithilfe einer aufwendigen Solventextraktion gewonnen. Die Galliumausbeute liegt bei 75–80 %. Aus der untersuchte Rotschlammdeponie in Lünen

könnten somit rund 333 t Gallium gewonnen werden (JASPERT et al. 2016).

Das Projekt Photorec untersuchte u. a. die thermische und selektive Rückgewinnung von Gallium und Indium aus Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid(CIGS)-Dünnschichtsolarmodulen. Aufgrund der geringen Gehalte von Indium und Gallium (< 0,1 Gew. %) basieren bisherige Recyclingmethoden auf aufwendigen hydro-metallurgischen Prozessschritten. Im Projekt wurde zur ressourceneffizienten Trennung der Funktionsschichten eine Mikrowellen-Vakuum-Destillationsanlage (MVD) entwickelt, die nach einer ebenfalls neu entwickelten mechanischen Vorbehandlungskette (um Kunststoffe und Folien vor dem Mikrowelleneinsatz zu entfernen) angewendet wurde. Bei den CIGS-Modulen stellte sich allerdings das Trägerglas als limitierender Faktor heraus. Beim Erreichen einer kritischen Temperatur (ca. 600 °C) wirkt das Glas als Mikrowellensuszeptor, schmilzt und schließt Wertmetalle wie Gallium mit ein. Eine Prozessoptimierung wird für folgende Forschungsarbeiten angestrebt (WEYHE et al. 2016).

2.5.3 Zukünftiges Angebot

Die Primärproduktion von Gallium wird für 2016 auf 274 t und für 2017 auf etwa 315 t geschätzt. Für die Jahre 2016 und 2017 werden Primärproduktionskapazitäten von jeweils etwa 718 t Gallium angenommen. Die Kapazitätsauslastung lag in den Jahren 2010 bis 2015 zwischen 65 und 75 %, infolge des Preisverfalls 2016 und 2017 und den dadurch erfolgten Produktionskürzungen, insbesondere in China, sank die Auslastung auf Werte teilweise unter 50 % (Abb. 9). Eine Angebotserhöhung des Primärgalliums auf über 700 t ist also ohne Kapazitätserweiterungen kurzfristig möglich. Darüber hinaus gibt es einige wenige, teilweise veraltete Informationen über den Ausbau vorhandener bzw. die Errichtung neuer Kapazitäten:

- In dem chinesischen Kohlerevier Zhungee (Innere Mongolei, Unternehmen China Shenhua Overseas Development & Investment Co. Ltd.) gibt es in zwei Lagerstätten Kohleflöze, die Durchschnittsgehalte von 25 ppm Gallium und 10 % Aluminium enthalten. Aus der Flug-

- asche wird als Nebenprodukt bereits Aluminiumoxid gewonnen, geplant ist eine Aufbereitung auch des Galliums. Beabsichtigt ist der Aufbau einer Kapazität von 600 t Gallium pro Jahr, womit Zhungee (Shenhua Group) zum größten Galliumwerk weltweit aufsteigen würde (SHENHUA GROUP, pers. Mitteilung).
- Nach Angaben des Indian Bureau of Mines gibt es auch bei indischen Tonerdeproduzenten Überlegungen zur Galliumproduktion (IMY 2018). Demnach plant die National Aluminium Company (NALCO) in ihrem Tonerdewerk Damanjodi im Bundesstaat Odisha die Errichtung einer Anlage zur Extraktion von 4N-Gallium mit einer Jahreskapazität von 10 t. Die Vedanta Aluminium Co. Ltd. (VAL) hat Angebote der japanischen Nippon Aluminium Co zur Produktion von Gallium mit einer Jahreskapazität von 50 bis 60 t im VAL-Tonerdewerk in Lanjigarh/Odisha (IMY 2018).
 - Nach CÔTÉ et al. 2012 bzw. ORBITE TECHNOLOGIES 2016 hat das kanadische Cleantech-Unternehmen Orbite Aluminae Inc. ein neues Verfahren („Orbite Process“) zur Tonerdeproduktion aus Al-haltigen Tonen, Bauxit, Kaolin, aber auch Flugaschen bzw. Rotschlamm in seinem Tonerdewerk in Cap Chat, Quebec entwickelt. Neben Tonerde enthalten diese Abfälle auch andere Wertmetalle wie Seltene Erden und Gallium. Orbite plant pro Jahr jeweils 1 Mio. t Rotschlamm und Flugaschen mit zu verarbeiten und erwartet eine jährliche Ausbeute von 90 t Gallium. Ob und wann diese Kapazitäten zur Verfügung stehen wer-

den, ist jedoch offen (ORBITE TECHNOLOGIES 2016).

- In einer Pressemitteilung aus dem Jahr 2011 berichtete die kanadische 5N Plus über die Unterzeichnung eines „Memorandum of Understanding MOU“ (MOU) mit Rio Tinto Alcan zur Erschließung neuer Quellen zur Extraktion von Primärgallium im Rahmen der Tonerdeproduktion im Werk in Vaudreuil, Quebec, das von Rio Tinto Alcan betrieben wird (5N PLUS 2011). Auch hierzu liegen keine aktuellen Informationen vor.

Neben den vorhandenen Kapazitäten von 718 t könnten in den nächsten Jahren rund 600–700 t aus neuen Projekten hinzukommen. Insbesondere die kanadischen Projekte haben allerdings eher den Charakter von zukünftigen Potenzialen als von konkreten Planungen.

Sollten die geplanten Kapazitäten den Markt erreichen, würde dies eine Verdoppelung der heutigen Kapazitäten bedeuten.

Im Jahr 2026 könnten die Kapazitäten für die Primärproduktion von Gallium bei 718 bis 1.470 t liegen.

Recycling von Neuschrott stellt ebenfalls ein wichtiges Angebot dar. Für 2016 wird von einer Jahreskapazität für Sekundärgallium von 270 t ausgegangen, die Produktion kann gut 40–50 % der Nachfrage ausmachen. Recycling von Neuschrott wird zukünftig vermutlich weiter ausgebaut.

Tab. 16: Zusätzliche mögliche Jahreskapazität für Primärgallium 2026.

	2016	2026 (Angebotsszenario 1)	2026 (Angebotsszenario 2)
	[Tonnen]		
In Betrieb:	718	718	718
Projekte:			
Zhungee		0	600
NALCO		0	10
VAL		0	50–60
Orbite		0	90
Summe	718	718	1.468

2.5.3.1 Länderkonzentration und gewichtetes Länderrisiko des zukünftigen Angebots

In der näheren Zukunft ist keine Diversifizierung der Länderkonzentration zu erwarten (Abb. 24). Die Länderkonzentration wird auch in den nächsten Jahren bedenklich sein. Auch wird das gewichtete Länderrisiko weiterhin von der Bewertung für China abhängen. Ein Ausbau der Kapazitäten für die Primärgalliumproduktion wird vermutlich am ehesten in China stattfinden. Eine Wiederaufnahme der Produktion oder eine Erweiterung der Kapazität außerhalb Chinas wird nur erfolgen, wenn der Galliumpreis längerfristig auf über 300 US\$/kg steigt.

2.5.4 Zukünftige Nachfrage

Die Galliumnachfrage stieg zwischen 2004 und 2015 im Jahresdurchschnitt um 3,9 %. Das höchste

Nachfragewachstum wurde zwischen dem Nachfragetief 2009 und dem bisher höchsten Nachfragewert im Jahr 2015 mit durchschnittlich 9,2 % pro Jahr erreicht. Für die Zukunft wird geschätzt, dass ein steigender Bedarf in allen Sektoren des Halbleitermarktes weiterhin zu einer steigenden Nachfrage führen wird. So schätz z. B. ROSKILL (2014), dass im Zeitraum von 2014 bis 2020 die Nachfrage nach Gallium im jährlichen Durchschnitt (CAGR) um 5,9 % wächst.

Für den LED-Markt, speziell für die Allgemeinbeleuchtung, wird das größte Wachstumspotenzial angenommen. Die größte Zunahme wird in der Region Ostasien erwartet, insbesondere in China. Beispielsweise stieg 2017 die LED-Fertigungskapazität in Asien aufgrund der von der chinesischen Regierung eingeführten Anreize zur Steigerung der LED-Produktion deutlich an. Auf China entfielen 2017 54 % der weltweiten LED-Fertigungskapazitäten, das ist ein Anstieg von 5 % gegenüber 49 % im Jahr 2016 (JASKULA 2018a).

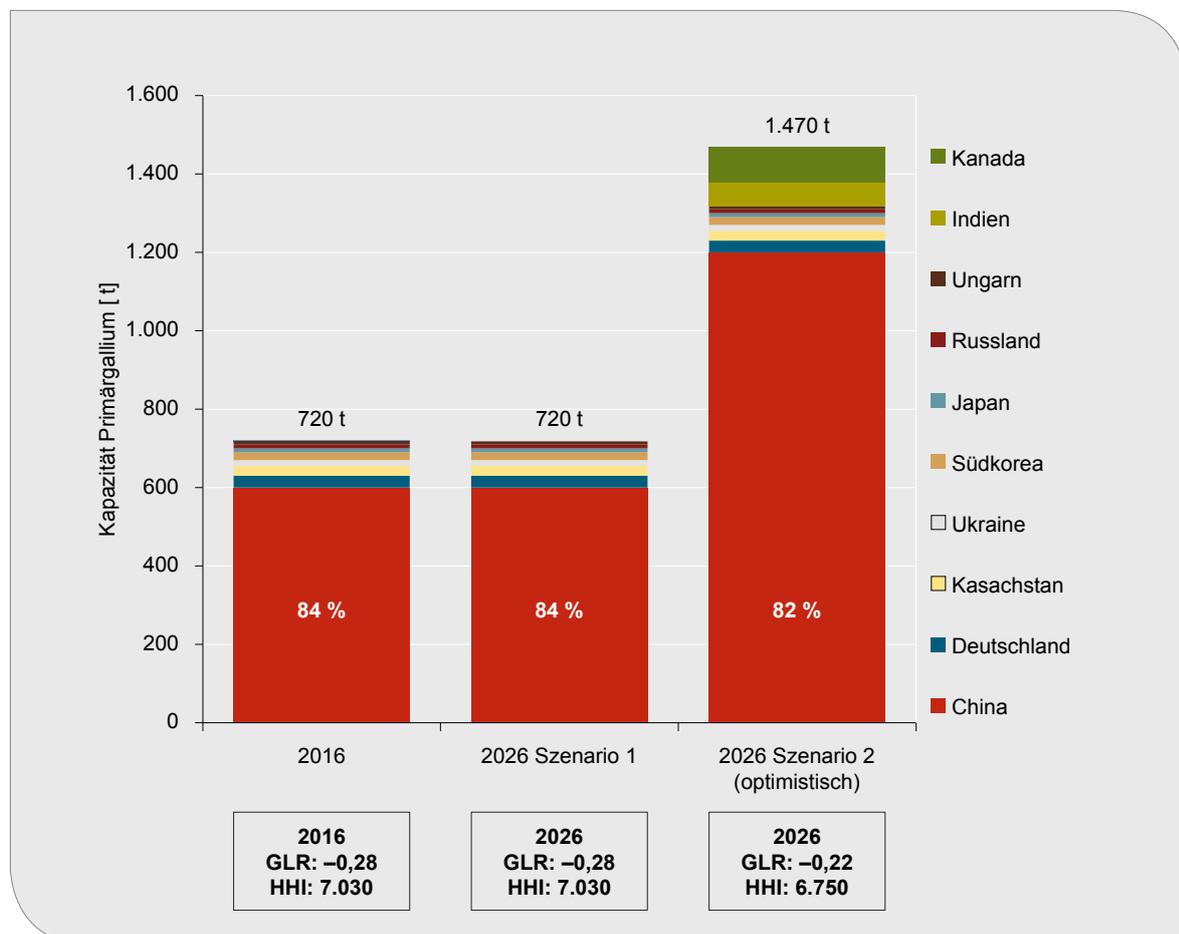


Abb. 24: Veränderung der Länderkonzentration der Primärproduktionskapazitäten bis 2026.

Aufgrund der erheblichen Ausweitung der LED-Produktionskapazität, der Preissenkungen und der staatlichen Anreize wird erwartet, dass der globale LED-Markt zwischen 2016 und 2020 um durchschnittlich 17 % jährlich wächst. Die Allgemeinbeleuchtung wird voraussichtlich das größte Segment des LED-Marktes bleiben, gefolgt von Hintergrundbeleuchtung und Automobilbeleuchtung (JASKULA 2017b). Für den Zeitraum von 2014 bis 2020 schätzt ROSKILL (2014), dass der Sektor Allgemeinbeleuchtung mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 16,3 % steigt.

Für den Bereich der Hochfrequenzbauteile (MMICs, FETs) schätzt ROSKILL (2014), dass die Nachfrage nach Gallium (GaAs und GaN) zwischen 2014 und 2020 um 3,2 % im jährlichen Durchschnitt steigt. Grund ist eine zunehmende Produktion insbesondere von Smartphones, Tablet-Computern und modernen LCD-TVs. Größte Wachstumsregion ist auch hier Asien und speziell China. Beispielsweise werden neue WLAN-Anwendungen sowie die Installation von 3G- und 4G-Mobilfunknetzen in Indien und der Republik Korea zu einem weiteren Anstieg der GaAs-Nachfrage führen (JASKULA 2017b).

Die Entwicklung des Hochgeschwindigkeits-5G-Netzwerks wird die Galliumnachfrage, sowohl nach GaAs und speziell GaN, in den nächsten Jahren kontinuierlich stimulieren. Ab 2020 soll der neue Mobilfunkstandard für eine schnellere Datenübertragung sorgen, diese ist für Funkkommunikation in Echtzeit nötig und wird für Technologien wie beispielsweise autonomes Fahren, erweiterte Realität (AR) und Internet der Dinge (IoT) gebraucht. Für Basisstationen und Empfänger werden Hochfrequenzbauteile aus GaAs- und GaN-Halbleitern benötigt.

Für den Markt der Hochfrequenz-GaN-Komponenten wird zwischen 2016 und 2022 ein jährliches Wachstum von 14 % vermutet, da die GaN-Technologie in drahtlosen Infrastruktur- und Verteidigungsanwendungen verstärkt eingesetzt wird und ab etwa 2019 neue Netze der fünften Generation (5G) eingeführt werden. Hochfrequenz-Anwendungen über 3,5 Gigahertz, einschließlich militärischer Radar- und elektronischer Kriegsführungssysteme, kommerzieller drahtloser Telekommunikations- und Kabelfernseh-Anwendungen (CATV),

erfordern die Hochspannungs- und Hochleistungskapazitäten von GaN (Yole Développement 2016 in JASKULA 2017b). Immer mehr Chiphersteller steigen in den Bereich der GaN-Halbleiter ein. Zunehmend kommen dabei Kombinationen wie GaN-on-Si oder GaN-on-SiC und viele weitere auf den Markt.

Im Anwendungsbereich der Photovoltaik ist für CIGS-Dünnschichtsolarzellen (Kupfer-Indium-Gallium-Selen-Dünnschichtsolarzellen), insbesondere in China, eine steigende Nachfrage zu erwarten. So hat das chinesische Staatsunternehmen China National Building Material (CNBM) in China (Bengbu) eine CIGS-Fabrik mit Produktionskapazitäten von 300 MW/Jahr fertiggestellt. Abhängig von den Marktbedingungen ist eine Erhöhung der Kapazitäten auf 1,5 GW/Jahr in den nächsten Jahren geplant. In China gibt es weitere Planungen für Produktionsstätten, die sich z. T. bereits im Bau befinden; Datong Coal Mine Group und Hanergy starteten im Dezember 2017 ein 50MW-Projekt und die Shenhua Gruppe und Shanghai Electric im Januar 2018 eine 306MW-Anlage. Theoretisch verbraucht 1 GW 43 t Indium, 64,2 t Selen und 21 t Gallium pro Jahr (METAL BULLETIN 2017, ARGUS 2018).

ROSKILL (2014) nimmt für den Anwendungsbereich Photovoltaik (CIGS) zwischen 2014 und 2020 eine durchschnittliche Wachstumsrate von 4 % pro Jahr an.

Für Trimethylgallium (TMG), dessen Jahresproduktion für 2015 auf 61 t geschätzt wird, wird in den nächsten Jahren nur eine sehr leichte Steigerung auf 64 t im Jahr 2022 erwartet (JASKULA 2017b).

2015 lag der Bedarf an Gallium bei 320 t. Sollte die Nachfrage um 3,9 % steigen, wie zwischen 2004 und 2015 geschehen, würde 2026 der Galliumbedarf bei rund 490 t liegen. Auf Grundlage einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 5,9 %, wie sie von ROSKILL (2014) prognostiziert wurde, würde die Nachfrage nach Gallium im Jahr 2026 etwa 600 t betragen, eine Verdoppelung gegenüber 2015. Bei der Annahme, dass der Bedarf um durchschnittlich 9,2 % jährlich wächst, läge der Bedarf 2026 bei 845 t Gallium.

2.5.5 Zukünftige Marktdeckung

Für die zukünftige Marktdeckung wurden zwei Angebotsszenarien erstellt.

Angebotsszenario 1

Die bestehenden Kapazitäten für Primärgallium und Sekundärgallium bleiben unverändert. Gegenwärtig wird die Kapazität allein für die Produktion von Primärgallium auf etwa 718 t/Jahr geschätzt. Hinzu kommt eine Recyclingkapazität von etwa 270 t. Zusammen sind es Angebotskapazitäten von 988 t Rohgallium bis 2026.

Für die zukünftige Galliumnachfrage werden drei Entwicklungen dargestellt:

- Die Nachfrage steigt im jährlichen Durchschnitt um 3,9 %, wie zwischen 2004 und 2015 geschehen.
- Die Nachfrage steigt im jährlichen Durchschnitt um 7,4 %, was der maximal möglichen Nachfrage im Jahr 2026 entspricht und die durch die heutigen Kapazitäten abgedeckt wäre.
- Die Nachfrage steigt im jährlichen Durchschnitt um 9,2 %, wie es zwischen 2009 und 2015 vorgekommen ist.

Die aktuellen Angebotskapazitäten sind doppelt so hoch wie eine mögliche Nachfrage von 490 t (bei Nachfragewachstum von 3,9 %/Jahr). Bei einer jährlichen Nachfragesteigerung von 9,2 % läge die Nachfrage im Jahr 2026 mit 845 t immer noch rund 14 % unter den Angebotskapazitäten von Primär-

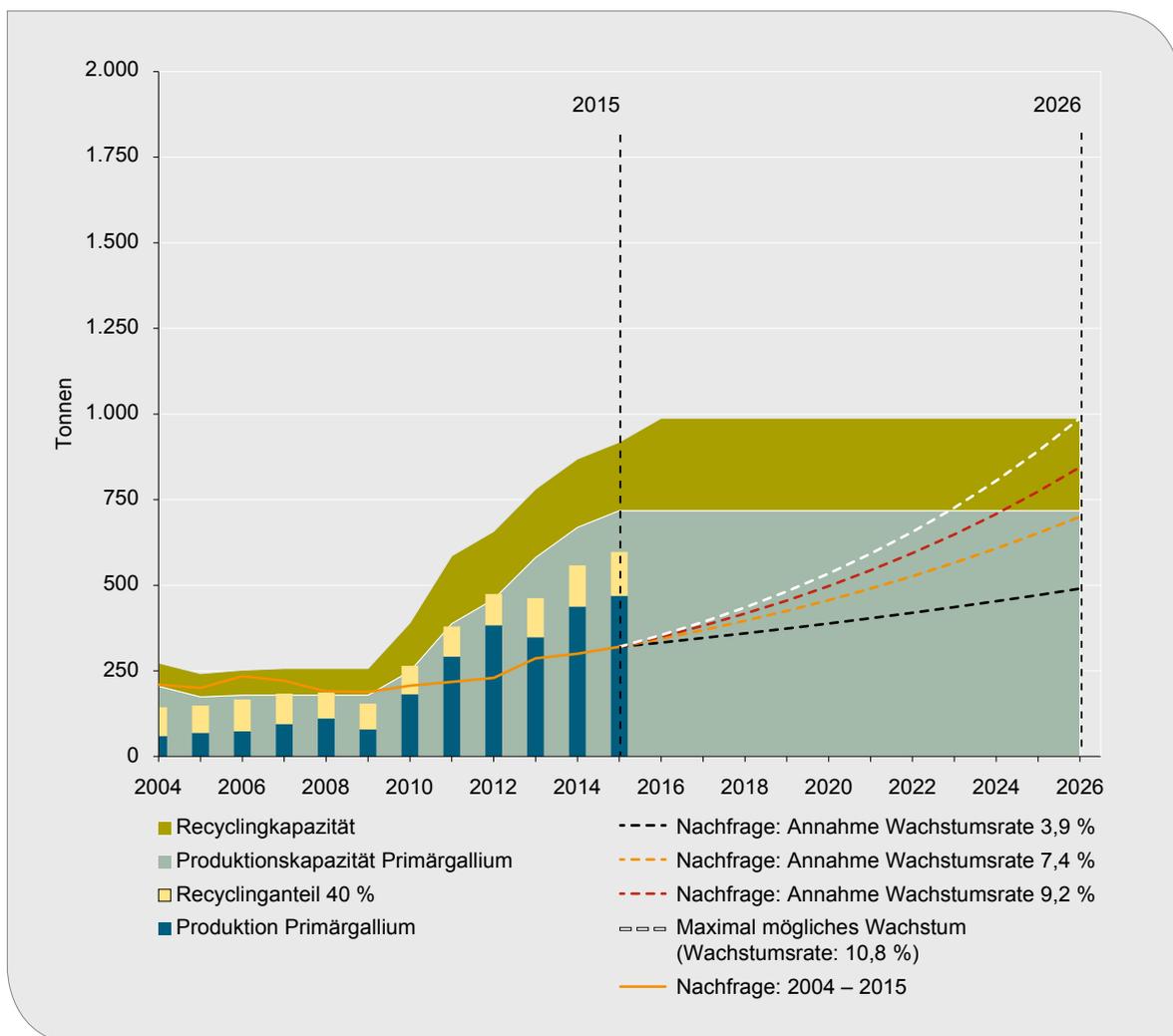


Abb. 25: Entwicklungsszenario von Angebot und Nachfrage von Gallium bis 2026 (Angebotsszenario 1) (Datenquellen: BGR o. J., USGS versch. Jahre a).

und Sekundärgallium des Jahres 2016. Maximal wäre ein Nachfragewachstum von 10,8 % jährlich bedienbar.

Angebotsszenario 2

Sollte die Nachfrage unerwartet hoch steigen und die vorhandenen Kapazitäten übertreffen (Nachfragewachstum von über 10,8 % jährlich), ist davon auszugehen, dass neue Produktionskapazitäten aufgebaut werden. Das eher unrealistische Angebotsszenario 2 bezieht die Kapazitäten der bekannten Projekte (750 t, s. zukünftiges Ange-

bot) mit ein. Der Status dieser Projekte ist allerdings ungewiss. In diesem Fall ständen dem Markt 2026 Kapazitäten für die Primärgalliumgewinnung von 1.468 t zur Verfügung. Hinzu kommen die Recyclingkapazitäten von mind. 270 t. Insgesamt wären es Produktionskapazitäten von mindestens 1.738 t; ein Nachfragewachstum von maximal 16 % könnte damit bedient werden.

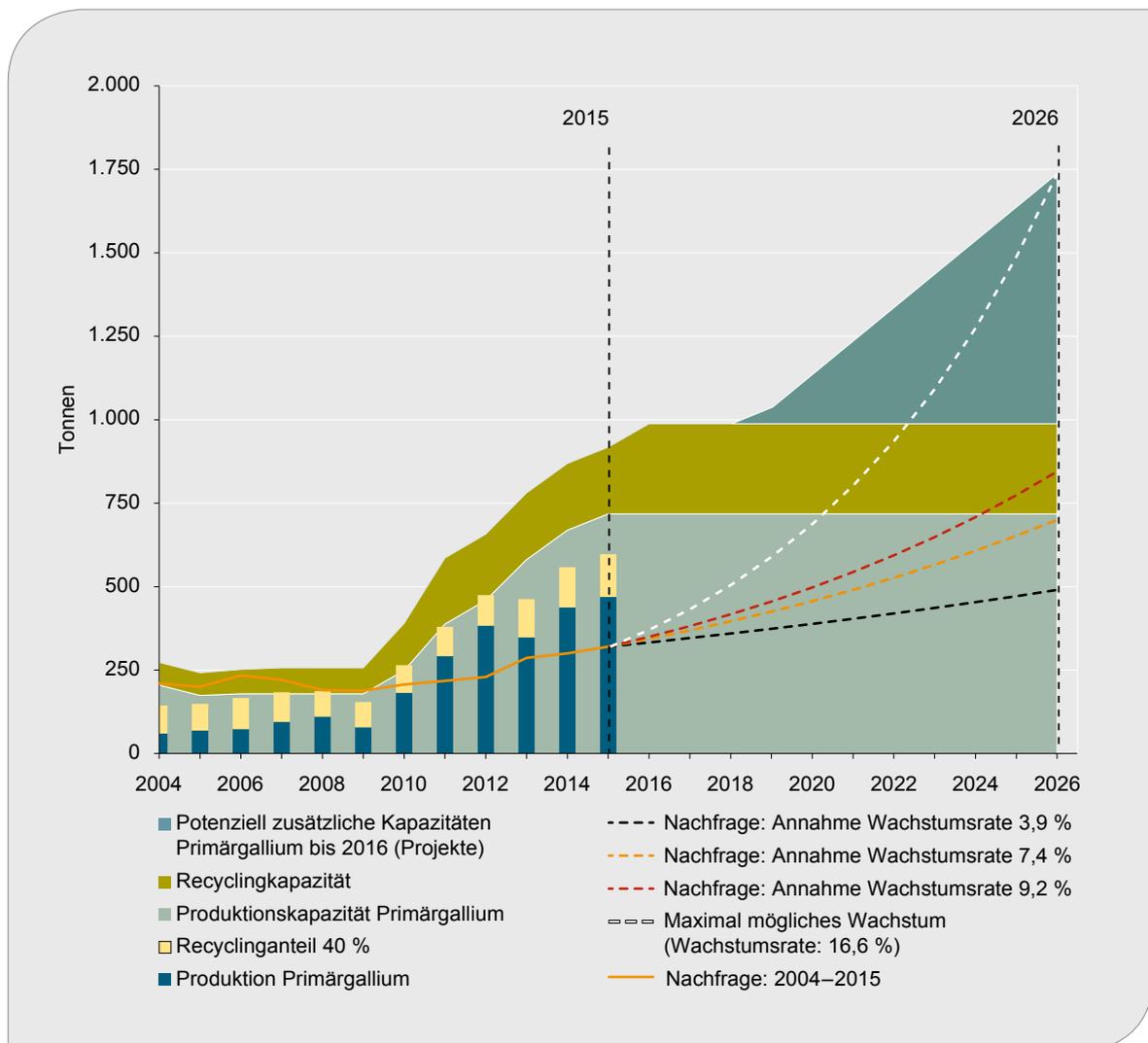


Abb. 26: Entwicklungsszenario von Angebot und Nachfrage von Gallium bis 2026 (Angebotsszenario 2) (Datenquellen: BGR o. J., USGS versch. Jahre a).

3 Fazit

Gallium ist ein wichtiges Elektronikmetall, vor allem im Bereich der Mikro- bzw. Optoelektronik, das in den letzten Jahrzehnten in der Hightech-Industrie und für Zukunftstechnologien unverzichtbar wurde. Für Gallium wird daher weiterhin ein steigender zukünftiger Bedarf angenommen.

Gallium wird sowohl primär als auch sekundär gewonnen. Die Primärgewinnung von Gallium erfolgt nur als Beiprodukt im Zuge der Herstellung von Tonerde/Aluminium und untergeordnet von Zink. Die Sekundärproduktion von Gallium findet nahezu ausschließlich aus Produktionsrückständen (Neuschrott) statt und deckt etwa 40–45 % des Bedarfs ab.

Seit den letzten zehn Jahren hat vor allem China seine Produktionskapazitäten massiv erhöht und verfügt heute über mehr als 80 % der weltweiten Primärgalliumkapazitäten. Diese enorme Angebotserweiterung führte zu einer Überproduktion und einem Preisverfall. In den Jahren 2010 bis 2015 lag die Kapazitätsauslastung für Primärgallium meist zwischen 65 und 75 %, infolge des Preisverfalls 2016 und 2017 und den dadurch erfolgten Produktionskürzungen, insbesondere in China, sogar unter 50 %.

Der Preisverfall der letzten Jahre führte zu Produktionskürzungen bzw. zur Einstellung der Galliumproduktion auch in Ländern außerhalb Chinas, was zu einer weiteren Konzentrierung auf dem Galliummarkt führte. So verfügt Deutschland nicht nur über eine bedeutende weiterverarbeitende Industrie, sondern ist außerhalb Chinas das Land mit der höchsten Kapazität für die Produktion von Rohgallium. Die niedrigen Preise der letzten Jahre führten allerdings zur Einstellung der Produktion im Jahr 2016.

Derzeit ist nicht mit einer wesentlichen Steigerung von Produktionskapazitäten zu rechnen. 2017 lagen diese bei etwa 988 t Rohgallium aus Primär- und Recyclingquellen. Eine Steigerung der Nachfrage ist aber durch eine höhere Auslastung der vorhandenen Kapazitäten ohne Probleme abzufedern, so übersteigen die Kapazitäten eine mögliche Nachfrage von 490 t (bei Nachfragerwachstum von 3,9 %/Jahr) bis 845 t (bei Nachfragerwachstum von 9,2 %/Jahr) deutlich und können somit die Nachfrage bis 2026 bedienen; maximal reichen

die Kapazitäten für ein Nachfragerwachstum von 10,8 % jährlich.

Eine höhere Nachfrage (über 988 t) könnte durch zusätzliche Kapazitäten bedient werden. Langfristig ließe sich die Angebotskapazität leicht erhöhen, so wird das Potenzial zur Primärgewinnung von Gallium nach den heute gängigen Methoden bei weitem nicht ausgeschöpft. Es gibt eine Reihe zusätzlicher Potenziale und einige bekannte Projekte, allerdings müsste für den Ausbau neuer Kapazitäten der Preis langfristig steigen. Bei der Tiefpreissituation, wie sie seit den letzten Jahren anhält, wird, insbesondere außerhalb Chinas, nicht in neue Anlagen investiert werden.

Außerhalb Chinas ist darüber hinaus anzunehmen, dass Produktionskapazitäten von Anlagen, die schon länger nicht mehr produzieren, endgültig aufgegeben werden. Dies betrifft z. B. die Anlagen in Ungarn, Kasachstan oder auch Deutschland.

Trotz der massiven Überkapazitäten ist für die Zukunft anzunehmen, dass die Preise steigen, da bei den Niedrigpreisen der letzten Jahre die Produktionskosten kaum gedeckt werden können. Ob die Galliumpreise steigen, hängt aber vor allem von der Nachfrage- und Angebotsentwicklung ab.

Die Produktion von Gallium ist sehr stark auf China konzentriert. Für die Zukunft wird keine Konzentrationsabnahme, sondern eher eine Zunahme erwartet. Für Gallium hat China keine Ausfuhrbeschränkungen. Allerdings hat China in der Vergangenheit für diverse Rohstoffe Handelsbeschränkungen wie beispielsweise Exportlizenzen, -quoten oder auch Produktionsquoten eingeführt. Unternehmen, die Gallium in ihrer Produktion einsetzen, sollten daher die Entwicklungen in China im Blick behalten und sich gegebenenfalls um eine Rohstoffsicherung und Lieferalternative auch unabhängig von China bemühen.

Sollte es zu einem längerfristigen Lieferengpass von Gallium aus China kommen, könnten neue Kapazitäten bei Tonerdewerken außerhalb Chinas in wenigen Jahren (3–4 Jahre) aufgebaut werden. Die Gefahr durch die starke Konzentration auf China wird dadurch relativiert.

4 Literaturverzeichnis

5N PLUS (2011): 5N Plus and Rio Tinto Alcan in Discussions Regarding Development of New Primary Gallium Source. – URL: http://www.5nplus.com/files/investor_news/Eng_5NPlus__RioTinto-Alcan.pdf, [Stand 22.07.2015].

5N PLUS (2016): 5N Plus Inc. Announces Footprint Optimization Initiatives. – Press Release 29.09.2016. – URL: http://www.5nplus.com/files/14/Press%20Release_Optimization_2016-09-29-08-47.pdf [Stand 05.02.2017].

ANGERER, G., ERDMANN, L., HANDKE, V., LÜLLMANN, A., MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F., MARWEDE, M. & SCHARP, M. (2009): Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien. – Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie: 383 S.; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI & Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung IZT gGmbH; Karlsruhe-Berlin.

ARGUS – ARGUS MEDIA GROUP (2016): Gallium: Rusal plant raises production. – Argus Direct 10.05.2016: 12–13.

ARGUS – ARGUS MEDIA GROUP (2017a): Potential Fanya metal auctions would raise spot supply. – Argus Direct 19.12.2017.

ARGUS – ARGUS MEDIA GROUP (2018): In: China's CNBM doubles CIGS capacity. – Argus Direct 14.05.2018: 2.

ASIAN METAL (versch. Jahre): Gallium Metal Market Report. – URL: <http://www.asianmetal.com/> [Stand 31.03.2018].

ASIAN METAL (2017a): Gallium Metal Market Report February 2017. – 5 S., URL: <http://www.asianmetal.com/> [Stand 31.03.2018].

ASIAN METAL (2017b): Gallium Metal Market Report Nov 2017. – 5 S., URL: <http://www.asianmetal.com/> [Stand 31.03.2018].

ASIAN METAL (2018): Monthly Gallium Markets Report Jan 2018. – 5 S., URL: <http://www.asianmetal.com/> [Stand 17.04.2018].

AUER-REMY (o. J.): Firmen-Webseite – Produkte. – URL: <http://www.auer-remy.de/de/produkte/weitere-anorganische-verbindungen/> [Stand 10.02.2018].

AVANCIS GMBH (o. J.): Firmen-Webseite. – URL: <http://www.avancis.de/> [Stand 10.02.2018].

AXT (2015): Joint Venture Operations in China. – URL: <http://www.axt.com/site/index.php?q=node/9>, [Stand 17.07.2015].

AZURSPACE SOLAR POWER GMBH (o. J.): Firmen-Webseite. – URL: <http://www.azurspace.com/index.php/en/> [Stand 10.02.2018].

BAUTISTA, R. G. (2003): Processing to obtain High-Purity Gallium. – JOM – Journal of Metals, März 2003, Volume 55, Issue 3: 23–26; Springer Verlag.

BEIJING JIYA SEMICONDUCTOR MATERIAL (2018): Firmen-Website – about JIYA. – URL: <http://www.jy-semi.com/en/about/?90.html> [Stand 18.04.2018].

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (o. J.): Fachinformationssystem Rohstoffe. – unveröff.; Hannover.

BGS – BRITISH GEOLOGICAL SURVEY (BGS) (2018): World mineral statistics data. – URL: <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/wms.cfc?method=searchWMS> [Stand 05.03.2018].

BROUHIER, O. (1976): Gallium und Gallium-Verbindungen. – In: Ullmanns Enzyklopädie der Technischen Chemie, Band 12: 67–72; Verlag Chemie, Weinheim.

BUTCHER, T. & BROWN, T. (2014): Gallium. – In: GUNN, G. (ed.): Critical Metals Handbook: 150–176; John Wiley & Sons, Oxford.

CHALCO – ALUMINIUM CORPORATION OF CHINA LTD. (2018a): Firmenwebsite. – URL: http://www.chalco.com.cn/zlgfen/gywm/gsjj/A030101web_1.htm [Stand 02.02.2018].

- CHALCO – ALUMINIUM CORPORATION OF CHINA LTD. (2018b): Gallium and related Products. – URL: <http://www.chalco.com.cn/chalcoen/ywycp/products/webinfo/1481241757816278.htm> [Stand 02.02.2018].
- CHALCO – ALUMINIUM CORPORATION OF CHINA LTD. (2017): Annual Report on Form 20-F for Fiscal Year 2016 of Aluminium Corporation of China. – URL: http://www.chalco.com.cn/chalcoen/tzzgx/pr/A130308web_1.htm [Stand 07.04.2018].
- CHALCO – ALUMINIUM CORPORATION OF CHINA LTD. (2016): Annual Report on Form 20-F for Fiscal Year 2015 of Aluminium Corporation of China. – URL: <http://www.chalco.com.cn/zlqfen/rootfiles/2016/04/16/1460751495912426-1460751495914893.pdf>, [Stand 07.07.2016].
- CHALCO – ALUMINIUM CORPORATION OF CHINA LTD. (2015): Annual Report on Form 20-F for Fiscal Year 2014 of Aluminium Corporation of China. – URL: <http://www.chalco.com.cn/zlqfen/rootfiles/2015/04/16/1429129794801861-1429129794803213.pdf>, [Stand 07.07.2015].
- CMK, s.r.o. (o. J.): Firmen-Website. – URL: <http://cmk.sk/> [Stand 17.01.2018].
- CNGE – CHINA GERMANIUM Co., LTD. (2015): Nanjing Jinmei Gallium Industry Co., Ltd. – URL: <http://www.cnge.com.cn/En/about.aspx?IntroCateId=1688&CateID=1688>, [Stand 17.07.2015].
- CONZEMIUS, R., WELCOMER, T. D. & SVEC, H. (1984): Elemental Partitioning in Ash Depositories and Material Balances for a Coal Burning Facility by Spark Source Mass Spectrometry. – Environ. Sci. Technol. 1994, 18 (1): 12–18; American Chemical Society.
- CS – COMPOUND SEMICONDUCTOR (2001): Gallium producers ramp up capacity to cope with explosive demand (Headline News). – URL: <http://www.compoundsemiconductor.net/article/82183-gallium-producers-ramp-up-capacity-to-cope-with-explosive-demand-%28headline-news%29.html>, [Stand 05.08.2015].
- DESTATIS (2018): Erhebungsportal. – URL: <https://erhebungsportal.estatistik.de/Erhebungsportal/> (passwortgeschützter Zugang), [Stand 16.08.2018].
- DEUTSCHE CHEMISCHE GESELLSCHAFT (Hrsg.) (1936): Gallium. – Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie, 8. Aufl., System-Nummer 36: 100 S.; Verlag Chemie; Berlin.
- DOWA – DOWA METALS & MINING Co., LTD (2015): Dowa Metals & Mining: Overview of Operations. – URL: http://www.dowa.co.jp/en/jigyometalmine_summary.html [Stand 23.07.2015].
- EAST HOPE MIANCHI GALLIUM INDUSTRY (东方希望 澠池鑛業) (2012): chinesische Firmen-Website. – URL: <http://www.smx.gov.cn/jryw/jjyw/61530.htm> [Stand 20.04.2018].
- ECHA – European Chemicals Agency (2018a): <https://echa.europa.eu/de/home> [Stand 17.01.2018].
- ECHA – European Chemicals Agency (2018b): Gallium arsenide. – <https://echa.europa.eu/de/registration-dossier/-/registered-dossier/13885> [Stand 17.01.2018].
- ECPLAZA (2016): Beijing ZhuoLongYuan Technology Co.,Ltd. – URL: <https://bjzly.en.ecplaza.net/> [Stand: 11.01.2018].
- EMEI – EMEI SEMICONDUCTOR MATERIAL FACTORY & INSTITUTE (2012): Firmeneintrag. – URL: <http://gqy739.en.made-in-china.com/company-Emei-Semiconductor-Material-Factory-Institute.html>, [Stand 22.07.2015].
- EMEI – EMEI SEMICONDUCTOR MATERIAL FACTORY & INSTITUTE (2016): URL: <http://www.emb739.com/yjshtml/products/03/bandaotigongsijianjie/> [Stand 18.12.2016].
- ENRC – EURASIAN NATURAL RESOURCES CORPORATION PLC (2014): Financial & Operational Reports: Quarterly Production Data – Q2 2013. – URL: <http://www.enrc.com/investors/financial-operational-reports> [Stand 13.06.2014].
- FANG, Z. & GESSER, H.D. (1996): Recovery of gallium from coal fly ash. – Hydrometallurgy 41 (1996): 187–200; Elsevier.
- FANYA METAL EXCHANGE (2015): Inventory Information. – Online: <http://www.fyme.cn/english/>, [Stand 13.08.2015]

- FCM – FREIBERGER COMPOUND MATERIALS GMBH (o. J.): Firmen-Website. – URL: <http://www.fcm-germany.com/> [Stand 05.07.2017].
- FENG, J. (2017): China's Minor Metals Market and the Supply and Demand of Gallium, Selenium and Tellurium. – Präsentation auf der MMTA 26. April 2017 in Dublin: 24 Folien; China Nonferrous Metals Industry Association (CNIA).
- FOLEY, N. & JASKULA, B. (2013): Gallium – A smart metal. – U.S. Geological Survey Fact Sheet 2013–3006: 2 S. – URL: <http://pubs.usgs.gov/fs/2013/3006> [Stand 10.05.2016].
- FOLEY, N. K., JASKULA, B. W., KIMBALL, B. E., SCHULTE & R. F. (2017): GALLIUM. – IN: SCHULZ, K. J., DEYOUNG, J. H., SEAL, R. R., BRADLEY D. C. (2017): Critical Mineral Resources of the United States. – Professional Paper 1802-H: 35 S., U.S. Geological Survey.
- FRAUNHOFER IISB (2014): Neues Anlagenkonzept für die Galliumnitrid-Herstellung. – http://www.iisb.fraunhofer.de/en/press_media/press_releases/pressearchiv/archiv_2014/FraunhoferTHM_FCM-Freiberg_HVPE-GaN.html [Stand 05.07.2015].
- FRENZEL, M., KETRIS, M. P., SEIFERT, T. & GUTZMER, J. (2016a): On the current and future availability of gallium. – Resource Policy 47: 38–50. – URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420715001233> [Stand 05.07.2016].
- FRENZEL, M., KETRIS, M. P., SEIFERT, T. & GUTZMER, J. (2016b): On the current and future availability of gallium - Appendix A - Analytical databases. – Resource Policy 47: 3 Tabellenblätter. – URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420715001233> [Stand 05.07.2016].
- GAO, S., LUO, T.-C., ZHANG, B.-R., ZHANG, H.-F., HAN, Y.-W., ZHAO, Z.-D. AND HU, Y.-K. (1998): Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. – Geochimica et Cosmochimica Acta 62: 959–975.
- GERATHERM MEDICAL AG (o. J.): Firmen-Website. – URL: <http://geratherm.de/> [Stand 16.04.2018].
- GMH STACHOW-METALL GMBH (o. J.): Firmen-Website. – URL: <http://www.stachow-metall.com/typo/home.html> [Stand 05.02.2018].
- GREBER, J. F. (2012): Gallium and Gallium Compounds. – In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: 335–340; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; Weinheim.
- GTIS – GLOBAL TRADE INFORMATION SERVICES INC. (2018): Global Trade Atlas. – URL: <https://www.gtis.com/gta> [Stand 10.03.2018].
- HAINES & MAASSEN (o. J.): Firmen-Webseite. – URL: <http://www.haines-maassen.de> [Stand 05.02.2018].
- IMY – INDIAN MINERALS YEARBOOK (2018): Gallium. – Indian Minerals Yearbook 2017, 56nd Edition: 7.1-7.4; Nagpur.
- INFINEON – Infineon Technologies AG (o. J.): Firmen-Website. – URL: <https://www.infineon.com/cms/de/about-infineon/company/> [Stand 02.02.2018].
- JACQUIN, O., FAUX-MALLET, S., COTE, G. & BAUER, D. (1987): The Recovery of Gallium(III) from Acid Leach Liquors of Zinc Ores Using Selective Ion Exchange Resins. – in: Recent Developments in Ion Exchange: 213–220; Paris.
- JAPAN METAL BULLETIN (2009): JOGMEC to Purchase 5 National Stockpiling Rare Metals. – URL: <http://www.japanmetalbuletin.com/?p=7023>: JOGMEC to Purchase 5 National Stockpiling Rare Metals [Stand 02.02.2018].
- JASKULA, B. W. (2010a): Gallium [Advance Release]. – U.S. Geological Survey, Minerals Yearbook 2008: 27.01 – 27.10; Reston.
- JASKULA, B. W. (2011a): Gallium. – U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries January 2011: 58–59.
- JASKULA, B. W. (2011b): Gallium. – U.S. Geological Survey, Minerals Yearbook 2009: 27.01–27.10; Reston.
- JASKULA, B. W. (2013): Gallium. – U.S. Geological Survey, Minerals Yearbook 2011: 27.01–27.10; Reston.

- JASKULA, B. W. (2016a): Gallium. – U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries January 2016: 65–66. – URL: <http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/mcs-2016-galli.pdf> [Stand 05.07.2016].
- JASKULA, B. W. (2016b): Gallium. – U.S. Geological Survey, Minerals Yearbook 2014: 27.01 – 27.09; Reston. – URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/myb1-2014-galli.pdf> [Stand 05.12.2016].
- JASKULA, B. W. (2017a): Gallium. – U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries January 2017: 64–65. – URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/mcs-2017-galli.pdf> [Stand 01.10.2017].
- JASKULA, B. W. (2017b): Gallium. – U.S. Geological Survey, Minerals Yearbook 2015: 27.01–27.09; Reston. – URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/myb1-2015-galli.pdf> [Stand 18.12.2017].
- JASKULA, B. W. (2018): Gallium. – U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries January 2018: 64–65. – URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/mcs-2018-galli.pdf> [Stand 01.02.2018].
- JASPERT, B.; MEHRINGSKÖTTER, M.; FRIEDRICH, B.; KAUSSEN, F. (2016): Rotschlamm – Rückbau und Vermeidung von Rotschlammdeponien. – In: DÜRKOOP, A.; BRANDSTETTER, C. P.; GRÄBE, G.; RENTSCH, L. (Hrsg.): Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien. Ergebnisse der Fördermaßnahme r³: 237–252; Fraunhofer Verlag, Stuttgart.
- JOHNSON MATTHEY (o. J.): Firmen-Webseite – Orobraze and Pallabraze. – URL: <https://matthey.com/products-and-services/precious-metal-products/metal-joining/joining/orobraze-and-pallabraze-brazing-filler-metals> [Stand 18.02.2018].
- KOREA INVESTMENT & SECURITIES CO., LTD, (2012): Korea Zinc (010130). – 20 S.; URL: https://www.boom.com/portfolio/research/Korea/010130_120306.pdf [Stand 25.08.2014].
- KRAMER, D. A. (1988): Gallium and Gallium Arsenide: Supply, Technology, and Uses. – Information Circular 9208: 25 S.; U.S. Department of Interior, Bureau of mines; Pittsburgh.
- KRAMER, D. A. (1992): Gallium. – U.S. Bureau of Mines, Mineral Commodity Summaries 1991, p. 57-5; Washington D.C.
- KRAMER, D. A. (2000): Gallium. – U.S. Geological Survey, Minerals Yearbook 1999: 29.01–29.06; Reston.
- KRAMER, D. A. (2002): Gallium. – U.S. Geological Survey, Minerals Yearbook 2001: 29.01–29.07; Reston.
- KRAMER, D. A. (2007): Gallium. – U.S. Geological Survey, Minerals Yearbook 2006: 27.01–29.11; Reston.
- KRAUSS, U., KRUSZONA, M., SCHMIDT, H., WAGNER, H., BIEHLER, W. & BOOS, R. (1989): Sondermetalle. – Untersuchungen über Angebot und Nachfrage mineralischer Rohstoffe XXII: 322 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Prognos AG Europäisches Zentrum für Angewandte Wirtschaftsforschung (Hrsg.).
- LAHIRI, S., Meyappan, RM & Varadharaj, A. (1996): Gallium recovery – Technological alternatives. – Bulletin of Electrochemistry 12(5-6): 342–345; Central Electrochemical Research Institute (India).
- LØVIK, A. N., RESTREPO, E., MÜLLER, D. B. (2015): The Global Anthropogenic Gallium System: Determinants of Demand, Supply and Efficiency Improvements. – Environmental Science & Technology 2015, 49: 5704–5712; American Chemical Society.
- MAL – HUNGARIAN ALUMINIUM PRODUCTION AND TRADE CO, LTD (2014): Product Brochure. – 13 S., URL: http://english.mal.hu/resource.aspx?ResourceID=MAL_PRODUCT_CATALOG_2011 [Stand 16.06.2014].
- MANZ AG (o. J.): Firmen-Website. – URL: <https://www.manz.com/de/> [Stand 20.03.2018].

MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F., LANGKAU, S., HUMMEN, T., ERDMANN, L., TERCERO ESPINOZA, L., ANGERER, L., MARWEDE, M & BENECKE, S. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. – DERA Rohstoffinformationen 28: 353 S.; Berlin.

METHERMA (o. J.): Firmen-Webseite. – URL: <http://www.metherma.de/metherma.html> [Stand 18.02.2018].

METAL BULLETIN (2009): MCP Group forms gallium joint venture in China. – 10.08.2009.

METAL BULLETIN (2013): Gallium price falls as overcapacity minimises impact of SRB buying 50 tonnes. – URL: <http://www.metalbulletin.com/Article/3290225/Gallium-price-falls-as-overcapacity-minimises-impact-of-SRB-buying-50-tonnes.html#axzz3ifqO0zt> [Stand 13.08.2015].

METAL BULLETIN (2016): Gallium smelters in China plan to restart as prices rise. – Metal Bulletin Daily Nr: 9486.5 [Stand 02.12.2016].

METAL BULLETIN (2017): GLOBAL MINOR METALS FORUM: Gallium market buoyed by increasing demand, output cuts. – Metal Bulletin Daily Nr: 9538.3 [Stand 06.12.2017].

MOLYCORP INC. (2012): Molycorp to Acquire Leading Rare Earth Processor Neo Material Technologies in \$1.3 Billion Deal. – URL: <http://www.molycorp.com/molycorp-to-acquire-leading-rare-earth-processor-neo-material-technologies-in-1-3-billion-deal/> [Stand 30.07.2015].

MOLYCORP INC. (2015a): About Molycorp. – URL: <http://www.molycorp.com/about-us/about-molycorp/>, [Stand 29.07.2015].

MOLYCORP INC. (2015b): 2014 Annual Report. – URL: <http://www.molycorp.com/investors/> [Stand 30.07.2015].

MOLYCORP INC. (2015c): 2013 Annual Report. – URL: <http://www.molycorp.com/investors/> [Stand 30.07.2015].

NANJING JINMEI (2017): Firmen-Website - Capability. – URL: http://www.jm-gallium.com/?en/About_en/Capability_en/ [Stand 20.12.2017].

NARVA e. V. (o. J.): Webseite - History. – URL: <http://www.narva-light.com/en/history> [Stand 20.02.2018].

NARVA e. V. (2017): Webseite - Mitgliedsunternehmen. – URL: <http://www.narva.de/home.html> [Stand 20.02.2018].

NAUMOV, A. V. (2014): Modern State of the World Market of Gallium. – Russian Journal of Non-Ferrous Metals (Izvestiya VUZ, Tsvetnaya Metallurgiya), Vol. 55, No. 3: 270–276; Moskau.

NEO PERFORMANCE MATERIALS (2018): Annual information form, Neo Performance Materials inc., for the year ended December 31, 2017. – 62 S.; URL: http://www.neomaterials.com/wp-content/uploads/2018/03/Neo-AIF_09March18_FINAL.pdf [Stand 22.04.2018].

NICHIA CORPORATION (o. J.): Firmen-Website. – URL: http://www.nichia.co.jp/de/about_nichia/info.html [Stand 27.01.2018]

NRM – NIPPON RARE METAL, INC. (o. J.): Firmen-Website. – URL: <http://www.nrm-inc.co.jp/english/index.html> [Stand 27.07.2015]

OECD (o. J.): Inventory of Restrictions on Exports of Industrial Raw Materials. – URL: https://qdd.oecd.org/subject.aspx?Subject=ExportRestrictions_IndustrialRawMaterials [Stand 16.04.2018].

ORBITE TECHNOLOGIES (2016): AGM Management Presentation. – URL: http://s2.q4cdn.com/622589029/files/doc_presentations/2016/ORT_AGM_Presentation_2016_web.pdf. [Stand 04.05.2018].

OSNABRUEGGE (o. J.): Firmen-Website. – URL: <http://www.os-materials.com/produkte/hochreine-metalle--targets/pvd-duennschichttechnik/index.html> [Stand 02.02.2018].

OSRAM GROUP (o. J.): Firmen-Website. – URL: <http://www.osram-group.de/de-DE> [Stand 16.04.2018].

- PHILIPS (2016): Philips investiert in den Ausbau des Forschungs- und Produktionsstandorts für Laser-Dioden in Ulm. – Nachrichten 17. November 2016. – URL: <https://www.philips.de/a-w/about/news/archive/standard/news/unternehmen/20161117-photronics-laser-dioden-in-ulm.html> [Stand 07.02.2018].
- PPM – PPM PURE METALS (2015): Firmen-Website. – URL: <http://www.pmpuremetals.de/company/about-ppm/> [Stand 07.08.2015]
- PPM – PPM PURE METALS (2017): Gallium. – URL: <http://www.pmpuremetals.de/products/gallium/?lang=de> [Stand 07.03.2017].
- QIN, S., SUN, Y. LI, Y., WANG, J., ZHAO, C. & GAO, K. (2015): Coal deposits as promising alternative sources for gallium. – *Earth-Science Reviews* 150 (2015): 95–101, Elsevier.
- RLJ – ROSKILL'S LETTERS FROM JAPAN (2007): Gallium: Prices Rise by 23 % in January. – RLJ Number 366, February 2007; London
- RLJ – ROSKILL'S LETTERS FROM JAPAN (2009): Gallium: Japan accounts for two-thirds of world demand. – RLJ Number 395, July 2009: 1–2; London.
- RLJ – ROSKILL'S LETTERS FROM JAPAN (2010): Bismuth and Gallium: Bismuth Shipments rise by 10 %. – RLJ Number 406, June 2010: 11–12; London.
- RLJ – ROSKILL'S LETTERS FROM JAPAN (2012): Gallium: 7 % Growth Forecast for 2012. – RLJ Number 430, June 2012; London.
- ROSKILL – ROSKILL INFORMATION SERVICES LTD (2002): *The Economics of Gallium*. – 7th ed.: 117 S.; London.
- ROSKILL – ROSKILL INFORMATION SERVICES LTD (2014): *Gallium: Global Industry Markets and Outlook*. – 9th ed.: 121 S.; London.
- SCHULTE, R. F. & FOLEY, N. K. (2014): *Compilation of Gallium Resource Data for Bauxite Deposits*. – U.S. Geological Survey Mineral Resource Program, Open-File Report 2013-1272: 14 S.; Reston. – URL: <http://pubs.usgs.gov/of/2013/1272/> [Stand 05.05.2018].
- SEMICONDUCTORTODAY (2009): Neo Material to acquire Recapture Metals. – URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2009/AUG/NEO_270809.htm, [Stand 30.07.2015]
- SOLIBRO GMBH (o. J.): Firmen-Website. – URL: <http://solibro-solar.com/de/start/> [Stand 16.04.2018].
- STELTER, M. & ZEIDLER, O. (2013): Recycling von Gallium aus Prozessrückständen. – 471–480; In: Thomé-Kozmiensky, K. J. & Goldmann, D.: *Recycling und Rohstoffe*, Band 6: 711 S; TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin.
- TDJYFW (o. J.): Firmeneintrag zu Guangxi Tiandongjinxin Rare Metal. – URL: <http://www.tdjyfw.com/company/index.php?c=show&id=126> [Stand 10.04.2018].
- THE INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE (2017): *Bauxite Residue Management*. – URL: <http://bauxite.world-aluminium.org/refining/bauxite-residue-management/> [Stand 10.12.2017].
- UMICORE (2017): Umicore eröffnet innovative Produktionsanlage für Trimethylgallium. – URL: <http://www.unicore.de/de/presse/news/unicore-eroffnet-innovative-produktionsanlage-fur-trimethylgallium/> [Stand 10.02.2018].
- U.S. DEPARTMENT OF JUSTICE AND THE FEDERAL TRADE COMMISSION (2010): *Horizontal Merger Guidelines*. – URL: <http://www.justice.gov/atr/public/guidelines/hmg-2010.pdf> [Stand 12.09.2014].
- USGS – U.S. GEOLOGICAL SURVEY (verschiedene Jahre a): *Gallium Statistics and Information*. – Minerals Information. – URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/> [Stand 08.01.2018].
- USGS – U.S. GEOLOGICAL SURVEY (verschiedene Jahre b): *Commodity Statistics and Information*. – National Minerals Information Center. – URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/> [Stand 08.01.2018].
- VITAL MATERIALS (2013): *Vital Materials & Hangzhou Jinjiang Group form a venture*. – URL: <http://www.vitalchem.com/en/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=49&id=3> [Stand 20.07.2015]

VITAL MATERIALS (2017): Vital Materials & Hangzhou Jinjiang Group form a venture. – URL: <http://www.vitalchem.com/en/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=10> [Stand 20.07.2017]

WCO – WORLD CUSTOMS ORGANIZATION (o. J.): What is the Harmonized System (HS)? – URL: <http://www.wcoomd.org/en/topics/nomenclature/overview/what-is-the-harmonized-system.aspx> [Stand 27.10.2017].

WELLMER, F.-W., DALHEIMER, M. & WAGNER, M. (2008): Economic Evaluations in Exploration. – 2. Aufl., 250 S.; Springer.

WEYHE, R.; MELBER, A.; FRIEDRICH, B.; BARTOSINSKI, M.; MALLAH, M.; MUSIOL, L. (2016): Photorec – Rückgewinnung von seltenen Metallen aus EOL Dünnschicht-PV-Modulen. – In: DÜRKOOP, A.; BRANDSTETTER, C. P.; GRÄBE, G.; RENTSCH, L. (Hrsg.): Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien. Ergebnisse der Fördermaßnahme r³: 43–55; Fraunhofer Verlag, Stuttgart.

WORLD BANK (2017): Worldwide Governance Indicators. – URL: <http://info.worldbank.org/governance/WGI/#home> [Stand 15.11.2017].

XINGAN – XIAOYI XINGAN GALLIUM CO., LTD (2015): Firmen-Website – Products. – URL: <http://www.xinganga.com/web/index/31/products.htm> [Stand 20.07.2015].

ZHAO, Z., YANG, Y., XIAO, Y. & FAN, Y. (2012): Recovery of gallium from Bayer liquor: A review. – Hydrometallurgy, Vol. 125-126, p. 115–124; Amsterdam.

ZHUHAI FANGYUAN (2016): Firmenwebsite. – URL: <http://www.fygallium.com/en/Default.aspx> [Stand 01.07.2016].

ZZK – ZHUZHOU KENENG NEW MATERIAL (2015): Products: Gallium. – URL: <http://www.zzkeneng.com/en/en/product.asp?bianhao=248&Action=show> [Stand 07.08.2015]

ZEIDLER, O. (2016): Rückgewinnung von Gallium aus Prozessabwässern mit Dialyseverfahren. – 88 S.; Dissertation an der TUB Freiberg.

Anhang

Indikatoren und Risikobewertung für Gallium

Indikator	Ergebnisse (Datenbasis 2016)	Bewertung		
		unkritisch	mäßig	bedenklich
Angebot und Nachfrage				
<p>Recyclingrate (EOL-RR):</p> <p>End of life recycling rate der UNEP: Quotient aus der Menge des zum Recycling eingesammelten Altschrotts und der Gesamtmenge an anfallendem Altschrott</p> <p><i>Bewertungsskala:</i> < 10 % = <i>bedenklich</i> 10 % – 50 % = <i>mäßig</i> > 50 % = <i>unkritisch</i></p>	<p>End of life recycling rate EOL-RR < 1 %</p>	<p>EOL – RR < 1 %</p>		
<p>Recyclingrate (RC):</p> <p>Recycled content rate der UNEP: Quotient aus dem Eingesetzten Sekundärmetall (Alt- und Neuschrott) und der eingesetzten Gesamtmenge für die Metallproduktion</p> <p><i>Bewertungsskala:</i> < 10 % = <i>bedenklich</i> 10 % – 50 % = <i>mäßig</i> > 50 % = <i>unkritisch</i></p>	<p>Recycled Content RC > 25–50 %</p>	<p>RC > 25 – 50 %</p>		
<p>Derzeitige Marktdeckung (Md):</p> <p>Quotient aus Nachfrage zu Angebot. Md gibt den Anteil von Angebotsüberschuss oder -defizit in Prozent an.</p> <p><i>Bewertungsskala:</i> < 0 % = <i>bedenklich</i> 0 % – 10 % = <i>mäßig</i> > 10 % = <i>unkritisch</i></p>	<p>Derzeitige Marktdeckung: Md = 46 % (2015)</p>	<p>Derzeitige Marktdeckung: Md = 46 %</p>		

Indikator	Ergebnisse (Datenbasis 2016)	Bewertung		
		unkritisch	mäßig	bedenklich
Geopolitische Risiken und Marktmacht				
<p>Länderkonzentration der Produktion (HHI):</p> <p>Summe der quadrierten Anteile an der Primärproduktionskapazität</p> <p>Gewichtetes Länderrisiko der Produktion (GLR):</p> <p>Summe der Anteile der Primärproduktionskapazität multipliziert mit dem Länderrisiko</p> <p><i>Bewertungsskala HHI:</i> 10.000–2.500 = <i>bedenklich</i> 2.500–1.500 = <i>mäßig</i> <1.500 = <i>unkritisch</i></p> <p><i>Bewertungsskala GLR:</i> –2,5 bis –0,5 = <i>bedenklich</i> –0,5 bis 0,5 = <i>mäßig</i> 0,5 bis 2,5 = <i>unkritisch</i></p>	<p>Kapazitäten der Primärproduktion: HHI = 7.030</p> <p>Kapazitäten der Primärproduktion: GLR = –0,28</p>	<p>Produktion: HHI = 7.030</p> <p>Produktion: GLR = –0,28</p>		
<p>Diversifizierung der globalen Exporte (HHI):</p> <p>Summe der quadrierten Anteile der Exportländer</p> <p>Gewichtetes Länderrisiko der globalen Exporte (GLR):</p> <p>Summe der Anteile der Exporte multipliziert mit dem Länderrisiko der Exportländer</p>	<p>Globale Exporte: HHI = 3.243</p> <p>Globale Exporte: GLR = 0,23</p>	<p>Globale Exporte: HHI = 3.243</p> <p>Globale Exporte: GLR = 0,23</p>		

Indikator	Ergebnisse (Datenbasis 2016)	Bewertung		
		unkritisch	mäßig	bedenklich
Geopolitische Risiken und Marktmacht				
<p>Diversifizierung der Importe Deutschlands (HHI):</p> <p>Summe der quadrierten Anteile der deutschen Importe</p> <p>Gewichtetes Länderrisiko der Importe Deutschlands (GLR):</p> <p>Summe der Anteile der Importe multipliziert mit dem Länderrisiko der Lieferländer</p> <p><i>Bewertungsskala HHI:</i> 10.000 – 2.500 = <i>bedenklich</i> 2.500 – 1.500 = <i>mäßig</i> < 1.500 = <i>unkritisch</i></p> <p><i>Bewertungsskala GLR:</i> –2,5 bis –0,5 = <i>bedenklich</i> –0,5 bis 0,5 = <i>mäßig</i> 0,5 bis 2,5 = <i>unkritisch</i></p>	<p>Importe Deutschlands: HHI = 3.737</p> <p>Importe Deutschlands: GLR = 0,80</p>	<p>Importe Deutschlands: HHI = 3.737</p> <p>Importe Deutschlands: GLR = 0,80</p>		
<p>Wettbewerbsverzerrungen:</p> <p><i>Qualitative Bewertung</i></p>	<p>Ga = unbedenklich (qualitativ)</p>	<p>Wettbewerbsverzerrungen: Ga = unbedenklich</p>		
<p>Firmenkonzentration (HHI):</p> <p>Summe der quadrierten Anteile der Bergwerksförderung/Weiterverarbeitung einzelner Firmen</p> <p><i>Bewertungsskala HHI:</i> 10.000 – 2.500 = <i>bedenklich</i> 2.500 – 1.500 = <i>mäßig</i> < 1.500 = <i>unkritisch</i></p>	<p>Primärproduzenten: HHI = 1.193</p>	<p>Primärproduzenten: HHI = 1.193</p>		

Indikator	Ergebnisse (Datenbasis 2016)	Bewertung			
		unkritisch	mäßig	bedenklich	
Angebot- und Nachfragetrends					
<p>Länderkonzentration der zukünftigen Produktion (HHI):</p> <p>Summe der quadrierten Anteile an den angenommenen Primärproduktionskapazitäten im Jahr 2026</p> <p>Gewichtetes Länderrisiko der zukünftigen Produktion (GLR):</p> <p>Summe der Anteile der möglichen Primärproduktionskapazitäten 2026 multipliziert mit dem Länderrisiko von 2017</p> <p><i>Bewertungsskala HHI:</i> 10.000 – 2.500 = <i>bedenklich</i> 2.500 – 1.500 = <i>mäßig</i> < 1.500 = <i>unkritisch</i></p> <p><i>Bewertungsskala GLR:</i> –2,5 bis –0,5 = <i>bedenklich</i> –0,5 bis 0,5 = <i>mäßig</i> 0,5 bis 2,5 = <i>unkritisch</i></p>	<p>2026: Angebotsszenario 1: HHI = 7.030</p>	<p>Angebotszenario 1: HHI = 7.030</p>			
	<p>Angebotszenario 1: GLR = –0,28</p>	<p>Angebotszenario 1: GLR = –0,28</p>			
	<p>2026: Angebotsszenario 2: HHI = 6.750</p>	<p>Angebotszenario 2: HHI = 6.750</p>			
	<p>Angebotszenario 2: GLR = –0,22</p>	<p>Angebotszenario 2: GLR = –0,22</p>			
	<p>Zukünftige Marktdeckung (Mz) bis 2026:</p> <p>Quotienten aus einer angenommenen Nachfrage zu einem angenommenen Angebot im Jahr 2026. Mz gibt den Anteil von Angebotsüberschuss oder -defizit in Prozent an</p> <p><i>Bewertungsskala:</i> < 0 % = <i>bedenklich</i> 0 % – 10 % = <i>mäßig</i> > 10 % = <i>unkritisch</i></p>	<p>Angebotszenario 1: Mz = +50 % (a) Mz = +14 % (b)</p> <p>a: Nachfragewachstum 3,9 % pro Jahr b: Nachfragewachstum 9,2 % pro Jahr</p>	<p>Angebotszenario 1: Mz = +50 % (a)</p>		
			<p>Angebotszenario 1: Mz = +14 % (b)</p>		

Glossar

Marktdeckung	Die Marktdeckung ergibt sich aus dem Quotienten der Nachfrage und des Angebots.
Diversifizierung der Importe	Die Diversifizierung der Importe errechnet sich mithilfe des HHI, wobei die mengenmäßigen Anteilswerte am Import auf Länderebene herangezogen werden.
Firmenkonzentration	Die Firmenkonzentration wird mithilfe des HHI berechnet, wobei Anteilswerte an der weltweiten Gesamtproduktion der Bergbaufirmen herangezogen werden.
Gewichtetes Länderrisiko der Produktion	Das gewichtete Länderrisiko (GLR) der Produktion errechnet sich aus den Anteilswerten der Länder an der Produktion multipliziert mit dem jeweiligen Länderrisiko (LR). Die Summe ergibt das GLR und liegt in der Regel in einem Intervall zwischen +2,5 und –2,5. Bei Werten über 0,5 wird das Risiko als niedrig eingestuft, zwischen +0,5 und –0,5 liegt ein mäßiges Risiko vor und Werte unter –0,5 gelten als kritisch.
Herfindahl-Hirschman-Index (HHI)	Der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) ist eine Kennzahl, die die unternehmerische Konzentration in einem Markt angibt. Er wird durch das Summieren der quadrierten Marktanteile aller Wettbewerber errechnet. Die Bewertungsskala für den HHI richtet sich nach den Vorgaben der U.S. Department of Justice und der Federal State Commission, die einen Markt bei einem HHI unter 1.500 als niedrig, zwischen 1.500 und 2.500 Punkten als mäßig konzentriert definieren. Bei einem Indexwert über 2.500 gilt der Markt als hoch konzentriert.
Länderkonzentration	Die Länderkonzentration wird mithilfe des HHI berechnet, wobei jahresbezogene Anteilswerte der Produktion auf Länderebene herangezogen werden.
Länderrisiko	Das Länderrisiko (LR) ergibt sich aus der Aggregation der sechs „Worldwide Governance Indicators“ der Weltbank, die jährlich die Regierungsführung 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.
Länderrisiko der Importe	Das Länderrisiko der Importe errechnet sich aus der Summe der Anteilswerte an den Ländern, aus denen Deutschland importiert, multipliziert mit dem Länderrisiko.
Lebensdauer-kennziffer	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 in welchem Maße zukünftig Explorationsaktivitäten notwendig sind. Die Kennziffer sagt nichts über den Erschöpfungszeitpunkt eines Rohstoffes aus.
Preisvolatilität	Die Berechnung der Preisvolatilität erfolgt mittels Standardabweichung der Differenz (Rendite) der logarithmierten Monatsdurchschnittspreise. Die Volatilität wird für zwölf Monate gleitend berechnet. Die Annualisierung erfolgt durch Multiplikation mit $\sqrt{12}$.
Recyclingrate (EOL-RR)	Die Recyclingrate (EOL-RR, End of life recycling rate) ist der Quotient aus der Menge des zum Recycling eingesammelten Altschrotts und der Gesamtmenge an anfallendem Altschrott.
Recyclingrate (RC)	Die Recyclingrate (RC, recycled content) ist der Quotient aus dem eingesetzten Sekundärmetall (Alt- und Neuschrott) und der eingesetzten Gesamtmenge (Primär- und Sekundärmetall) für die Metallproduktion.
Reserven	Reserven sind die zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbaren Rohstoffmengen.

Wachstumsraten CAGR	Die jährlichen durchschnittlichen Wachstumsraten (engl.: Compound Annual Growth Rate, CAGR) stellen den durchschnittlichen Prozentsatz dar, um den der Anfangswert einer Zeitreihe auf hypothetische Folgewerte für die Berichtsjahre wächst, bis der tatsächliche Endwert der Berichtsperiode erreicht ist. Tatsächliche Ausschläge der Folgejahre in der Zwischenzeit wirken sich dabei nicht aus.
Zukünftige Marktdeckung	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: 978-3-943566-50-5 (Druckversion)
ISBN: 978-3-943566-51-2 (PDF)
ISSN: 2193-5319