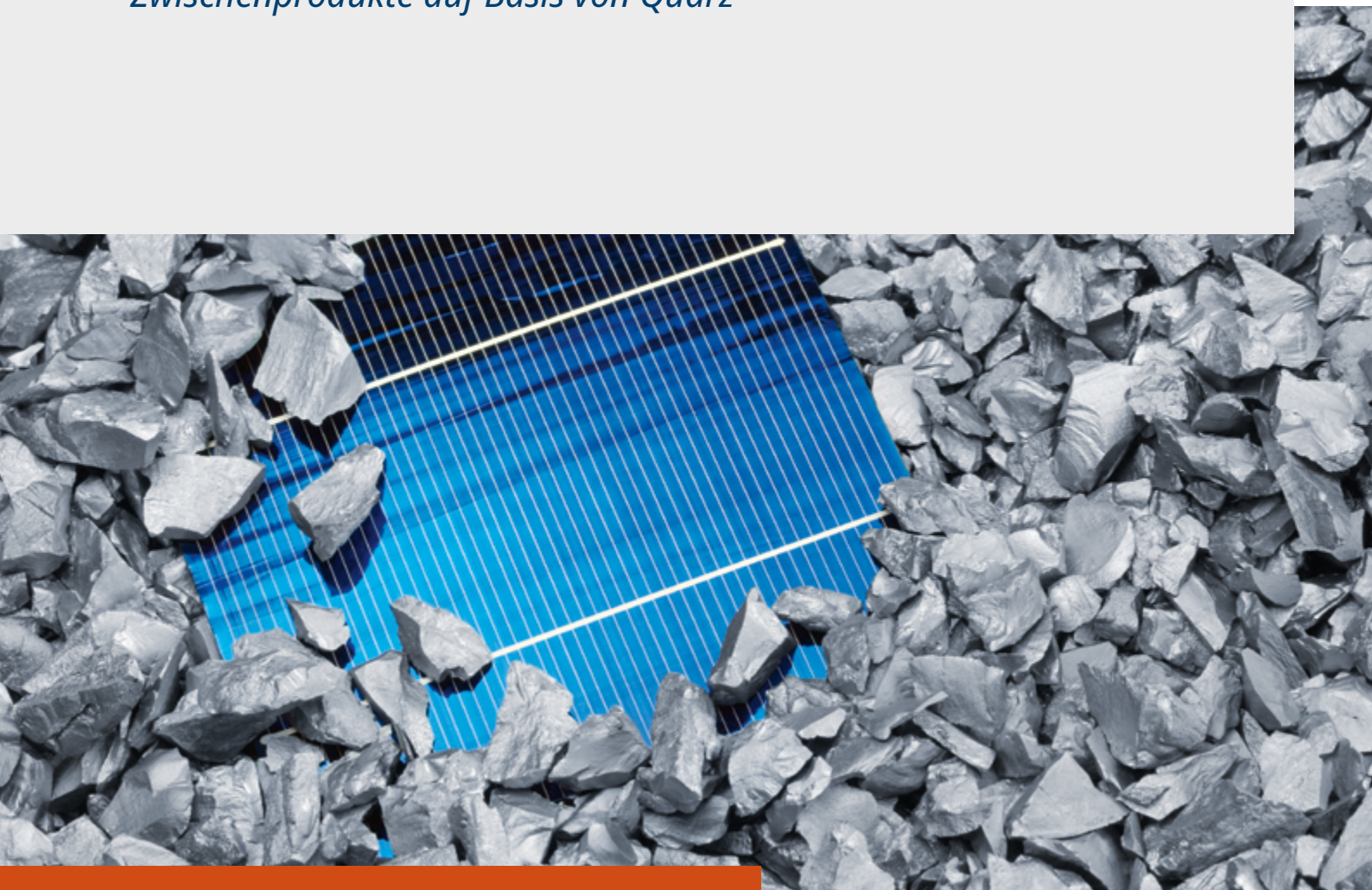


# 59 DERA Rohstoffinformationen

**Rohstoffrisikobewertung – Silizium und Ferrosilikolegierungen**

*Zwischenprodukte auf Basis von Quarz*



## Impressum

### Herausgeberin:

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der  
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)  
Wilhelmstraße 25–30  
13593 Berlin

### Autoren:

Dr. Harald Elsner und Evelyn Schnauder

unter Mitarbeit von:  
Maren Liedtke

### Kontakt:

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

Bildnachweise: © Wacker Chemie AG (Titelbild)  
Layout: deckermedia GbR, Graal-Müritz

Zitierhinweis: DERA – Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2023): Silizium und Ferrosilikolegierungen – Zwischenprodukte auf Basis von Quarz. – DERA Rohstoffinformationen 59: 238 S., Berlin.

Datenstand: Oktober 2023

ISBN Druckversion: 978-3-948532-88-8

ISBN PDF: 978-3-948532-89-5

ISSN: 2193-5319

# **Rohstoffrisikobewertung – Silizium und Ferrosilikolegierungen**

Zwischenprodukte auf Basis von Quarz



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	5
Tabellenverzeichnis .....	8
Zusammenfassung .....	12
Danksagung .....	15
<b>1. Einführung .....</b>	<b>16</b>
<b>2. Silizium und Quarz .....</b>	<b>18</b>
2.1 Silizium .....	18
2.2 Quarz .....	18
<b>3. Verwendung und Anforderungen .....</b>	<b>21</b>
3.1 Aufbereitung und Raffination .....	21
3.1.1 Silizium .....	21
3.1.2 Polysilizium .....	29
3.1.3 Solar- und Halbleitersilizium .....	32
3.1.4 Ferrosilizium .....	38
3.1.5 Ferrosilikomangan .....	39
3.1.6 Ferrosilikomagnesium .....	39
3.1.7 Ferrosilikochrom .....	39
3.2 Anforderungen an Quarzrohstoffe und Quarzlagerstätten .....	40
3.3 Verwendung und Spezifikationen von Silizium .....	45
3.3.1 Silikone und Silane .....	46
3.3.2 Al-Legierungen .....	48
3.3.3 (Polysilizium) Solar- und Halbleitersilizium .....	50
3.3.4 Andere Verwendungsbereiche .....	51
3.4 Verwendung und Spezifikationen von Ferrosilizium .....	52
3.4.1 Stahl .....	55
3.4.2 Eisenguss .....	56
3.4.3 Magnesium .....	56
3.4.4 Andere Verwendungsbereiche .....	57
3.5 Verwendung und Spezifikationen von Ferrosilikomangan .....	58

3.6	Verwendung und Spezifikationen weiterer Ferrosilikolegierungen .....	58
3.6.1	Ferrosilikomagnesium .....	58
3.6.2	Ferrosilikochrom .....	58
3.6.3	Ferrosilikoaluminium .....	58
3.7	Toxizität .....	59
3.8	Menschenrechtsrisiken .....	59
3.9	Recycling .....	63
3.10	Substitution .....	64
<b>4.</b>	<b>Nachfrage .....</b>	<b>66</b>
4.1	Silizium .....	66
4.2	Polysilizium .....	67
4.3	Ferrosilizium .....	68
<b>5.</b>	<b>Angebot .....</b>	<b>69</b>
5.1	Silizium .....	69
5.2	Polysilizium .....	74
5.3	Ferrosilizium .....	80
5.4	Ferrosilikomangan .....	83
5.5	Ferrosilikomagnesium .....	83
5.6	Ferrosilikochrom .....	83
5.7	Ferrosilikoaluminium .....	83
5.8	Lagerbestände .....	83
5.9	Handelsbeschränkungen .....	85
<b>6.</b>	<b>Bilanz von Angebot und Nachfrage .....</b>	<b>87</b>
6.1	Rückblick .....	87
6.2	Ausblick .....	88
<b>7.</b>	<b>Preisentwicklung .....</b>	<b>92</b>
<b>8.</b>	<b>Handel .....</b>	<b>97</b>
<b>Literatur</b>	<b>.....</b>	<b>102</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>109</b>
	Länderprofile .....	110
	Indikatoren und Risikobewertung .....	236
	Glossar .....	238

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Abstich von flüssigem Rohsilizium in der Siliziumhütte der PCC BakkiSilicon hf auf Island .....	14
Abb. 2:	Ausguss von flüssigem Rohsilizium zum Erkalten in der Hütte der SIMCOA Operations Pty Ltd. in Kemerton/Australien .....	15
Abb. 3:	Gangquarz aus dem Bayerischen Pfahl .....	20
Abb. 4:	Quarzkies aus Frankreich .....	20
Abb. 5:	Rezeptabhängige automatische Zufuhr von Kohle, Quarz und Holzkohle in einen der beiden Schmelzöfen der norwegischen Siliziumhütte Thamshavn der Elkem ASA. ....	22
Abb. 6:	Ansicht des Zufuhrbereichs eines der Schmelzöfen in der Siliziumhütte der RW silicium GmbH in Pocking .....	23
Abb. 7:	Graphitelektroden auf dem Werkgelände der RW silicium GmbH in Pocking .....	23
Abb. 8:	Ausguss von Tiegeln mit flüssigem Rohsilizium direkt aus dem Schmelzofen der PCC BakkiSilicon hf zum Erkalten .....	24
Abb. 9:	Erkaltender Siliziumbarren in der Hütte der RW silicium GmbH in Pocking .....	25
Abb. 10:	Gebrochenes Rohsilizium, fertig zum Versand, in der Siliziumhütte der RW silicium GmbH in Pocking .....	25
Abb. 11:	Das von der RW silicium GmbH in Pocking hergestellte Mikrosilika zählt zu den qualitativ hochwertigsten weltweit .....	26
Abb. 12:	Gewaschene, aschearme Kohle aus Kolumbien .....	27
Abb. 13:	Holzkohle unterstützt in vielen Siliziumhütten Kohle als Reduktionsmittel .....	27
Abb. 14:	Der Einsatz von Holz hackschnitzeln ist zur Optimierung der Gasdurchströmung im Möller unverzichtbar .....	27
Abb. 15:	Die nach dem Siemens-Verfahren gewachsenen Stäbe aus Polysilizium werden sichtbar, nachdem die Stahlkappe des Abscheidereaktors abgehoben wurde .....	30
Abb. 16:	Gebrochenes, nach dem Siemens-Verfahren produziertes Polysilizium .....	31
Abb. 17:	Körniges bzw. granulares, nach dem FBR-Verfahren produziertes Polysilizium aus einem Werk der GCL Technology Holdings Ltd. in China .....	32
Abb. 18:	Monokristalliner Impfkristall aus Reinstsilizium .....	33
Abb. 19:	Anfangskonus eines Einkristalls aus Reinstsilizium mit 300 mm Durchmesser .....	34
Abb. 20:	300 kg schwerer Einkristall aus Reinstsilizium mit 300 mm Durchmesser aus der Produktion des türkischen Unternehmens Kalyon PV .....	35
Abb. 21:	Montage von Solarzellen zu Solarmodulen im Werk Chemnitz der Heckert Solar GmbH .....	37
Abb. 22:	Detailaufnahme eines Solarmoduls .....	37
Abb. 23:	Quarzit aus Tana in Nordnorwegen .....	41
Abb. 24:	Entladung von Quarzkies aus Spanien für die Rohsiliziumproduktion im norwegischen Werk Holla der Wacker Chemie AG .....	42
Abb. 25:	Quarzkies aus dem benachbarten Österreich ist der bevorzugte Siliziumrohstoff der RW silicium GmbH in ihrer Siliziumhütte im grenznahen Pocking .....	43

Abb. 26:	Die chinesischen Qualitätsbezeichnungen für Silizium haben sich weltweit durchgesetzt wie hier an einer Lagerbox für die Sorte 2202, die in der Produktion von Aluminiumlegierungen Verwendung findet .....	46
Abb. 27:	Silikonöle werden unter anderem in der Kosmetik- und Konsumgüterindustrie verwendet .....	48
Abb. 28:	Weltweite historische Nachfrage (2005 – 2022) bzw. Vorhersage der weltweiten Nachfrageentwicklung (2023 – 2027) nach Rohsilizium .....	66
Abb. 29:	Entwicklung der weltweiten Rohsiliziumproduktion im Zeitraum 2005 – 2022 .....	73
Abb. 30:	Entwicklung der anteiligen weltweiten Rohsiliziumproduktion im Zeitraum 2005 – 2022 .....	74
Abb. 31:	Entwicklung der weltweiten Polysiliziumproduktion im Zeitraum 2005 – 2022 .....	79
Abb. 32:	Entwicklung der anteiligen weltweiten Polysiliziumproduktion im Zeitraum 2005 – 2022 .....	79
Abb. 33:	Entwicklung der weltweiten Ferrosiliziumproduktion im Zeitraum 2005 – 2022 .....	82
Abb. 34:	Entwicklung der anteiligen weltweiten Ferrosiliziumproduktion im Zeitraum 2005 – 2022 .....	82
Abb. 35:	Lagerbestände von Rohsilizium bei Produzenten in China .....	84
Abb. 36:	Angebot und Nachfrage nach Rohsilizium (in kt) im Zeitraum 2005 bis 2002 .....	87
Abb. 37:	Angebot und Nachfrage nach Polysilizium (in t) im Zeitraum 2005 bis 2002 .....	88
Abb. 38:	Prognosen der Entwicklung der weltweiten Nachfrage, der Produktion sowie der weltweiten Produktionskapazitäten von Rohsilizium bis zum Jahr 2027 .....	89
Abb. 39:	Prognose der Entwicklung der weltweiten Nachfrage nach Polysilizium in der Halbleiter- und PV-Industrie sowie der weltweiten Produktionskapazitäten bis zum Jahr 2027 .....	90
Abb. 40:	Preisentwicklung von Rohsilizium der Qualität 4-4-1 .....	93
Abb. 41:	Preisentwicklung von Ferrosilizium mit min. 75 % Si (FeSi 75 %) (in €/t) seit Januar 2005 .....	93
Abb. 42:	Preisentwicklung von Polysilizium der Qualität 9N (Solarqualität) (in US\$/kg) seit März 2021 .....	94
Abb. 43:	Preisentwicklung von Ferrosilikomangan mit min. 65 % Mn/min. 17 % Si (Mn65Si17) (in €/t) seit Januar 2005 .....	95
Abb. 44:	Kartendarstellung der wichtigsten internationalen Handelswege von Rohsilizium im Jahr 2022 .....	98
Abb. 45:	Kartendarstellung der Im- und Exporte von Rohsilizium durch Deutschland im Jahr 2022 .....	99
Abb. 46:	Kartendarstellung der wichtigsten internationalen Handelswege von Polysilizium im Jahr 2022 .....	100
Abb. 47:	Kartendarstellung der Im- und Exporte von Polysilizium durch Deutschland im Jahr 2022 .....	101
Abb. 48:	Aus Moora angeliefertes Kieselgestein auf dem Betriebsgelände der SIMCOA Operations Pty Ltd. in Kemerton, Western Australia .....	115
Abb. 49:	Blick auf die Siliziumhütte der RW silicium GmbH in Pocking in Niederbayern .....	155
Abb. 50:	Überblick über den Steinbruch Bukowa Góra .....	178
Abb. 51:	Aufbereitungsanlage Bukowa Góra .....	178



Abb. 52: Gemisch aus Quarzit und Quarzkiesen aus verschiedenen Ländern für die Siliziumproduktion im hochmodernen Werk Holla der Wacker Chemie AG in Norwegen .....	196
Abb. 53: Abstich von flüssigem Rohsilizium aus dem weltgrößten Siliziumofen (47 MW) im Werk Holla der Wacker Chemie AG .....	197

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Grundlegende Anforderungen an die chemische Zusammensetzung von Quarzrohstoffen für die Produktion von Silizium bzw. Ferrosilizium .....	40
Tab. 2:	Spezifikationen von Quarzit aus Tana/Nordnorwegen für die Produktion von Silizium (Si) bzw. Ferrosilizium (FeSi) .....	41
Tab. 3:	Spezifikationen von Quarz bzw. Quarzkiesen aus Spanien für die Produktion von Silizium .....	42
Tab. 4:	Spezifikationen von Quarzkiesen aus Frankreich (Département Dordogne) für die Produktion von Silizium .....	43
Tab. 5:	Typische Qualitätseinstufungen von Rohsilizium in den USA .....	45
Tab. 6:	Mindestanforderungen an Rohsilizium in Brasilien .....	45
Tab. 7:	Qualitätsanforderungen an Rohsilizium in China .....	45
Tab. 8:	Typische Qualitäten und Verwendungsbereiche von Ferrosilizium in den USA .....	53
Tab. 9:	Mindestanforderungen an Ferrosilizium in Brasilien .....	53
Tab. 10:	Qualitätsgarantien von Ferrosilizium verschiedener brasilianischer Produzenten .....	53
Tab. 11:	Qualitätsanforderungen an Ferrosilizium in China .....	54
Tab. 12:	Qualitätsanforderungen an Ferrosilizium 75 % HP .....	54
Tab. 13:	Mindestanforderungen an Ferrosilikomangan in Brasilien .....	58
Tab. 14:	Mindestanforderungen an Ferrosilikochrom in Brasilien. ....	58
Tab. 15:	Rohsiliziumproduktion und -kapazitäten (in t) in China in den Jahren 2021 und 2022 ..	69
Tab. 16:	Unternehmen mit den weltweit größten Siliziumproduktionskapazitäten (in tpa) (Stand: Ende 2022) sowie deren Produktionsmengen (in t) im Jahr 2022 .....	70
Tab. 17:	Unternehmen mit angekündigten Siliziumproduktionskapazitätserweiterungen (in tpa) (Stand: Mitte 2023) in Reihung ihrer Gesamtgröße .....	71
Tab. 18:	Polysiliziumproduktion (in t) in China in den Jahren 2021 und 2022 sowie 2023 (Vorhersage) .....	75
Tab. 19:	Unternehmen mit den weltweit größten Produktionskapazitäten für Polysilizium (in tpa) (Stand: Ende 2022) sowie deren Produktionsmengen (in t) im Jahr 2022 .....	76
Tab. 20:	Unternehmen mit angekündigten neuen Polysiliziumwerken oder Ausbau bestehender Polysiliziumwerke (in tpa) (Stand: Mitte 2023) in Reihung ihrer Gesamtgröße .....	77
Tab. 21:	Unternehmen mit den weltweit größten Produktionskapazitäten für Ferrosilizium (in tpa) (Stand: Ende 2022) sowie deren Produktionsmengen (in t) im Jahr 2022 .....	81
Tab. 22:	Chinesische Handelsbeschränkungen auf Importe von Polysilizium aus den USA und Südkorea .....	86
Tab. 23:	Produktion (in t) von Ferrosilizium (FeSi) in Ägypten seit 2005 .....	111
Tab. 24:	Produktion (in t) von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in Argentinien seit dem Jahr 2005 .....	113
Tab. 25:	Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Argentinien seit dem Jahr 2005 .....	113

Tab. 26:	Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Aserbaidshan seit dem Jahr 2018 .....	114
Tab. 27:	Produktion und Einsatz von Kieselgestein zur Siliziumproduktion aus Moora und Produktion von Silizium (Si) in Kemerton (in t), sowie Exporte von Silizium (Si) bzw. weltweite Importe von Ferrosilikomangan (FeSiMn) aus Australien (in t) seit dem Jahr 2005 .....	116
Tab. 28:	Produktion von Ferrosilikomangan (FeSiMn) in Australien (in t) sowie weltweite Importe von Ferrosilikomangan (FeSiMn) aus Australien (in t) seit dem Jahr 2005 .....	117
Tab. 29:	Produktion (in t) von Ferrosilizium und Auslastung (in %) des Schmelzofens der Druk Ferro Alloys Ltd. ....	119
Tab. 30:	Produktion (in t) von Ferrosilizium und Auslastung (in %) des Schmelzofens der Druk Wang Alloys Ltd .....	120
Tab. 31:	Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi), Ferrosilikomangan (FeSiMn) und Ferrosilikomagnesium (FeSiMg) (in t) aus Bhutan seit dem Jahr 2005 ...	120
Tab. 32:	Produktion (in t) von Ferrolegerungen in Bosnien-Herzegowina seit dem Jahr 2008 ..	121
Tab. 33:	Weltweite Importe von Silizium (Si) und Ferrosilizium (FeSi) (in t) aus Bosnien-Herzegowina seit dem Jahr 2005 .....	121
Tab. 34:	Produktion (in t) von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) 75 %, Ferrosilikomangan (FeSiMn), Ferrosilikomagnesium (FeSiMg) und Ferrosilikochrom (FeSiCr) in Brasilien seit dem Jahr 2000 .....	126
Tab. 35:	Produktion (in t) und Produktionskapazitäten (in Mio. t) von Rohsilizium in China ....	147
Tab. 36:	Produktion und Produktionskapazitäten (in Mio. t) von Rohsilizium .....	148
Tab. 37:	Produktion und Produktionskapazitäten (in t) von Polysilizium in China 2010 – 2020 .....	148
Tab. 38:	Produktion und Produktionskapazitäten (in t) von Polysilizium in China .....	149
Tab. 39:	Exporte von Rohsilizium (in t) aus China in ausgewählte Zielländer .....	149
Tab. 40:	Importe von Polysilizium (in t) durch China aus den wichtigsten Herkunftsländern ...	149
Tab. 41:	Liste der größten chinesischen Ferrosiliziumproduzenten .....	151
Tab. 42:	Produktion und Produktionskapazitäten (in Mio. t) von Ferrosilizium in China .....	152
Tab. 43:	Exporte von Ferrosilizium (in t) aus China in die größten Zielländer .....	152
Tab. 44:	Produktion und Produktionskapazitäten (in Mio. t) von Ferrosilikomangan in China .	153
Tab. 45:	Produktion von Silizium (Si) und Ferrosilizium (FeSi) (in t) in Deutschland .....	156
Tab. 46:	Importe von Rohsilizium (in t) durch Deutschland seit 2015 .....	156
Tab. 47:	Exporte von Polysilizium (in t) aus Deutschland .....	157
Tab. 48:	Produktion von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in Frankreich .....	161
Tab. 49:	Weltweite Importe von Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Gabun seit dem Jahr 2003 .....	162
Tab. 50:	Produktion von Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in Georgien .....	163
Tab. 51:	Produktionskapazitäten (in tpa) von Ferrosilikomangan nach Bundesstaaten .....	164
Tab. 52:	Produktionskapazitäten (tpa) von Ferrosilizium nach Bundesstaaten .....	167
Tab. 53:	Produktion von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in Indien seit dem Wirtschaftsjahr 2005/2006 .....	170

Tab. 54:	Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Indien seit dem Jahr 2005 .....	171
Tab. 55:	Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Indonesien seit dem Jahr 2005 .....	174
Tab. 56:	Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) (in t) aus dem Iran seit dem Jahr 2003 ....	175
Tab. 57:	Produktion (P) von Silizium (Si) (in t) durch die PCC BakkiSilicon hf und von Ferrosilizium (FeSi) (in t) in Island seit dem Jahr 2005 sowie Exporte (E) von Silizium (Si) und Ferrosilizium (FeSi) (in t) aus Island seit dem Jahr 2005 .....	179
Tab. 58:	Japan: Produktion bzw. Importe von Rohsilizium (Roh-Si), polykristallinem (Poly-Si) und monokristallinem (Mono-Si) Silizium (in t), Produktion von Silizium-wafern (in Tausend m <sup>2</sup> ), Lagerbestände von Polysilizium (in t) zum Jahresende, Recycling von Silizium (in t) .....	183
Tab. 59:	Produktion in bzw. Exporte von Silizium (Si) und Ferrosilizium (FeSi) (in t) aus Kanada seit dem Jahr 2005 .....	185
Tab. 60:	Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi), Ferrosilikomangan (FeSiMn) und Ferrosilikochrom (FeSiCr) (in t) aus Kasachstan seit dem Jahr 2005 .....	187
Tab. 61:	Exporte von Silizium (Si, < 99,99 % Si) und Silizium (Poly-Si, > 99,99 % Si) (in t) aus Katar seit dem Jahr 2005 .....	188
Tab. 62:	Weltweite Importe von Silizium (Si) (in t) aus Laos seit dem Jahr 2005 .....	189
Tab. 63:	Produktion von Ferrosilizium (FeSi) und Mn-Legierungen (in t) durch die OM Materials (Sarawak) Sdn. Bhd. ....	190
Tab. 64:	Weltweite Importe von Silizium (Si), Polysilizium (Poly-Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Malaysia seit dem Jahr 2014 .....	191
Tab. 65:	Produktion von Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in Mexiko .....	192
Tab. 66:	Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Mexiko seit dem Jahr 2005 .....	193
Tab. 67:	Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Nordkorea seit dem Jahr 2005 .....	194
Tab. 68:	Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Nordmazedonien seit dem Jahr 2005 .....	195
Tab. 69:	(Roh-)Produktion von Rohsilizium (in t) durch Wacker Chemical Norway AS seit dem Jahr 2013 .....	196
Tab. 70:	(Roh-)Produktion (in t) von Elkem ASA in Norwegen seit dem Jahr 2013 .....	199
Tab. 71:	Produktion von Solarsilizium (in t) durch REC Solar Norway AS in Kristiansand seit dem Jahr 2013 .....	200
Tab. 72:	(Roh-)Produktion von Ferrosilizium (in t) durch Finnfjord AS in Norwegen seit dem Jahr 2013 .....	200
Tab. 73:	(Roh-)Produktion von Ferrosilikomangan (in t) durch Eramet Norway AS seit dem Jahr 2017 .....	200
Tab. 74:	(Roh-)Produktion von Silizium (Rohsilizium und Siliziumstaub) (Si), Ferrosilizium (FeSi), Ferrosilikomangan (FeSiMn) sowie Ferrosilikomagnesium (FeSiMg) in Norwegen seit dem Jahr 2013 .....	201
Tab. 75:	Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) (in t) aus Paraguay seit dem Jahr 2018 ....	202
Tab. 76:	Weltweite Importe von Silizium (Si) (in t) aus den Philippinen seit dem Jahr 2005 .....	203

Tab. 77:	Produktion von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in Polen ...	204
Tab. 78:	Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Rumänien seit dem Jahr 2005 .....	205
Tab. 79:	Produktion und weltweite Importe von Rohsilizium (in t) aus Russland .....	206
Tab. 80:	Produktion von Ferrosilizium (FeSi) (in t) in Bratsk durch Mechel OAO .....	207
Tab. 81:	Produktion von Ferrosilizium (FeSi) (in t) in Russland .....	208
Tab. 82:	Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Sambia seit dem Jahr 2005 .....	209
Tab. 83:	Weltweite Importe von Polysilizium (Poly-Si) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Saudi-Arabien seit dem Jahr 2005 .....	210
Tab. 84:	Produktion von Ferrolegierungen (in t) nach Firmenberichten der OFZ a.s. ....	212
Tab. 85:	Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus der Slowakei seit dem Jahr 2005 .....	212
Tab. 86:	Produktion von Rohsilizium (Si) in Sabón und Ferrosilikomangan (FeSiMn) in Monzón bzw. Boo durch Ferroglobe plc (in t) in Spanien .....	214
Tab. 87:	Exporte von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi), Ferrosilikomangan (FeSiMn) und Ferrosilikochrom (FeSiCr) (in t) aus Südafrika seit dem Jahr 2005 .....	216
Tab. 88:	Importe von Silizium (Si) sowie Im- und Exporte von Polysilizium (Poly-Si) (in t) nach bzw. aus Südkorea seit dem Jahr 2005 .....	218
Tab. 89:	Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Thailand seit dem Jahr 2005 .....	221
Tab. 90:	Produktion von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in kt) der ukrainischen Unternehmen in den Jahren 2012 – 2020 .....	224
Tab. 91:	Produktion von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in der Ukraine .....	224
Tab. 92:	Produktion von Polysilizium (Poly-Si) bzw. Halbleitersilizium (Halbleiter-Si) (in t) durch REC Silicon ASA in den USA nach Firmenberichten .....	227
Tab. 93:	Produktion von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi), Ferrosilikolegierungen (FeSiX) sowie Polysilizium (Poly-Si) (in t) in den USA .....	229
Tab. 94:	Weltweite Importe von Silizium (Si) und Ferrosilizium (FeSi) (in t) aus Usbekistan seit dem Jahr 2005 .....	230
Tab. 95:	Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Venezuela seit dem Jahr 2005 .....	232
Tab. 96:	Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Vietnam seit dem Jahr 2005 .....	235
Tab. 97:	Weltweite Exporte von Rohsilizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) nach Vietnam seit dem Jahr 2005 .....	235

## Zusammenfassung

**Silizium** (Rohsilizium, Siliziummetall, metallurgisches Silizium) wird bei hohen Temperaturen von ca. 2.000 °C aus Quarz (Quarzit, Quarzkies) und Reduktionsmitteln = Kohlenstoffträgern (Kohle, Holzkohle, Petrolkoks, Holzhackschnitzel) mithilfe von Elektroden in großen Lichtbogenöfen (Schmelzreduktionsöfen) erschmolzen. Dieser Prozess ist sehr energieintensiv, wobei zur Produktion von 1 t Rohsilizium rund 12.500 kWh Strom benötigt werden. Nicht die Rohstoffkosten, sondern der regionale Strompreis hat somit entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Siliziumproduktion.

Silizium fand im Jahr 2022 zu 38 % Verwendung in der Produktion von Silanen und Siloxanen als Ausgangsstoffe zur Produktion von Silikonen, zu 35 % in der Herstellung von Aluminiumlegierungen, zu 25 % in der Produktion von Polysilizium als Ausgangsrohstoff für die Produktion von Solar-silizium (PV-Industrie) und Halbleitersilizium (Elektronikindustrie) sowie zu 2 % in anderen Anwendungen.

Im Jahr 2022 wurde Silizium in 17 Ländern in einer Menge von ca. 4,31 Mio. t produziert. Mit einem Anteil von ca. 75 % war China der größte Produzent, mit weitem Abstand gefolgt von Norwegen (6,3 %), Brasilien (5,1 %) und den USA (3,0 %). In Deutschland war die Siliziumhütte der RW silicium GmbH in Pocking, Niederbayern, in Betrieb, die einen Weltmarktanteil von 0,6 % besaß.

Die weltweiten Kapazitäten zur Siliziumproduktion lagen im Jahr 2022 bei 7,23 Mio. tpa, davon betrug der chinesische Anteil ca. 79 %. Der weltgrößte Produzent von Silizium, das chinesische Unternehmen Hoshine Silicon Industry Co., Ltd., verfügte zum Jahresende 2022 über eine Produktionskapazität von 1,22 Mio. tpa Silizium, was 16,9 % der globalen Kapazität bzw. das Doppelte der gesamteuropäischen Kapazität entsprach. Es trug im Jahr 2022 mit einer Produktionsmenge von 841.500 t mit ca. 19,5 % zur Weltproduktion von Rohsilizium bei. Diesen Kapazitäten bzw. Produktionsmengen stand im Jahr 2022 eine weltweite Nachfrage nach Silizium in Höhe von 3,90 Mio. t gegenüber.

Bis Ende des Jahres 2027 sind Projekte mit zusätzlichen Produktionskapazitäten von 4,79 Mio. tpa Silizium angekündigt, davon fast alle innerhalb Chinas. Einer weltweiten Produktionskapazität von dann 12,02 Mio. tpa Silizium stünde eine vermutete globale Nachfrage von 5,22 Mio. t gegenüber. Die Kapazitäten zur Herstellung von Rohsilizium würden also weiter stark anwachsen und im Jahr 2027 mehr als doppelt so hoch sein wie die weltweite Nachfrage. Damit würde auch die derzeitige weltweite Auslastungsquote der Siliziumhütten von durchschnittlich 59,6 % wieder absinken und würden die derzeit niedrigen Siliziumpreise kaum steigen.

**Polysilizium** wird durch das Siemens-Verfahren oder im Wirbelschichtreaktor über den Zwischenschritt der Trichlorsilanproduktion aus Rohsilizium hergestellt, wobei Reinheiten von 9N bzw. 11N – 12N gefordert werden. Polysilizium in 9N-Qualität besitzt einen Marktanteil von 95 % und dient als Ausgangsrohstoff für die Herstellung von monokristallinem Solarsilizium für die Produktion von Wafern für die Photovoltaikindustrie. Polysilizium in der Qualität 11N – 12N (5 % Marktanteil) wird derzeit nur durch vier Unternehmen in Deutschland, den USA, Südkorea und Japan produziert und dient der Herstellung von monokristallinem Halbleitersilizium für die Produktion von Wafern für die Halbleiterindustrie.

Im Jahr 2022 wurde Polysilizium in einer Menge von ca. 978.000 t in sieben Ländern produziert. Hiervon war China mit einem Anteil von 83 % der mit Abstand größte Produzent, mit weitem Abstand gefolgt von Deutschland (Wacker Chemie AG, 7 %) und den USA (6 %).

Die offiziellen weltweiten Kapazitäten zur Produktion von Polysilizium, vorwiegend in Solarqualität, lagen im Jahr 2022 bei knapp 1,35 Mio. tpa, davon betrug der chinesische Anteil 86 %. Der weltgrößte Produzent von Polysilizium, das chinesische Unternehmen GCL Technology Holdings Ltd., verfügte zum Jahresende 2022 über eine Produktionskapazität von ca. 459.000 tpa Polysilizium (inkl. Beteiligungen), was 34,1 % der offiziellen globalen Kapazität bzw. dem 5,7-Fachen der offiziellen Gesamtkapazität der Wacker Chemie AG entsprach. GCL Technology Holdings Ltd. trug im Jahr 2022 mit einer Produktionsmenge von 129.556 t Polysilizium (inkl. Beteiligungen) mit ca. 13 % zur Weltproduktion von Polysilizium bei. Diesen Kapazitäten bzw. Produktionsmengen stand im Jahr 2022 eine weltweite Nachfrage nach Polysilizium in Höhe von ca. 670.000 t gegenüber.

Bis Ende des Jahres 2027 sind Projekte mit zusätzlichen Produktionskapazitäten von 4,54 Mio. tpa Polysilizium angekündigt, davon fast alle innerhalb Chinas. Einer weltweiten Produktionskapazität von 5,89 Mio. tpa Polysilizium stünde dann im Jahr 2027 eine vermutete globale Nachfrage von 1,3 – 1,4 Mio. t gegenüber. Die Kapazitäten zur Herstellung von Polysilizium würden dementsprechend im Jahr 2027 die weltweite Nachfrage um mehr als das Vierfache übertreffen und die derzeit niedrigen Preise für Polysilizium nicht steigen.

**Ferrosilizium** wird ähnlich Silizium, jedoch unter Zugabe eines Eisenträgers (Eisenerzpellets, Stahlschrott, Walzzunder), ebenfalls in Schmelzreduktionsöfen produziert. Der Energiebedarf ist mit ca. 8.600 kWh Strom (für die bedeutendste Sorte mit 72 – 75 % Silizium) etwas geringer. Je geringer der Siliziumgehalt im Ferrosilizium, desto geringer der Energiebedarf zu dessen Produktion.

Ferrosilizium fand im Jahr 2022 Verwendung zu rund 72 % in der Stahlindustrie, zu 16 % in der Guss-eisenindustrie, zu 12 % in der Herstellung von Magnesium, dies fast ausschließlich in China, sowie nur sehr untergeordnet in anderen Anwendungen.

Ein sehr schnell und stark wachsender Verwendungszweck von hochreinem Ferrosilizium innerhalb der Stahlindustrie ist die Herstellung von Elektroblechen/Elektrobändern für Einsätze in der Photovoltaik-, Wind-, Wasserkraft- und Biomasseenergiegewinnung sowie für Motoren von Elektrofahrzeugen. Hochreines Ferrosilizium stellt somit einen für die E-Mobilität bzw. die Umsetzung der Energiewende kritischen Ausgangsrohstoff dar.

Im Jahr 2022 wurde Ferrosilizium in 33 Ländern in einer Menge von ca. 8,08 Mio. t produziert. Mit einem Anteil von rund 70 % war China der größte Produzent, mit weitem Abstand gefolgt von Russland (7,2 %), Norwegen (4,0 %) und Brasilien (3,0 %). In Deutschland war die Ferrosiliziumhütte der ASK Chemicals Metallurgy GmbH in Hart an der Alz, Oberbayern, in Betrieb, die einen Weltmarktanteil von 0,2 % besaß. Hochreines Ferrosilizium wird nur in Brasilien, Island, China, Frankreich, im Iran und in den USA produziert. Die Produktionsmengen sind nicht bekannt.

Die weltweiten Kapazitäten zur Ferrosiliziumproduktion lagen im Jahr 2022 bei 13,48 Mio. tpa. Der weltgrößte Produzent von Ferrosilizium, Inner Mongolia Erdos Resources Co., Ltd. aus China, verfügte zum Jahresende 2022 über eine Produktionskapazität von 1,81 Mio. tpa Ferrosilizium, was 13,4 % der weltweiten Kapazität bzw. dem 2,5-Fachen der gesamteuropäischen Kapazität entsprach.

**Weitere Ferrosilikolegierungen** von Bedeutung sind

- Ferrosilikomangan (Silikomangan): Produktionsmenge 2022: 10,2 Mio. t in 26 Ländern, Anteil China: 68 %, globale Kapazität: 22,2 Mio. tpa
- Ferrosilikomagnesium: Produktion 2022 vermutlich in zehn Ländern angeführt von Norwegen und den USA, Menge und Kapazitäten unbekannt
- Ferrosilikochrom: Produktion 2022 vermutlich in acht Ländern angeführt von Kasachstan, Menge und Kapazitäten unbekannt
- Ferrosilikoaluminium: Produktion 2022 vermutlich in vier Ländern angeführt von Kasachstan, Menge und Kapazitäten unbekannt



**Abb. 1: Abstich von flüssigem Rohsilizium in der Siliziumhütte der PCC BakkiSilicon hf auf Island, Foto: BGR.**



## Danksagung

Die Autoren dieser Studie danken den Unternehmen

- RW Silicium GmbH in Pocking
- ASK Chemicals Metallurgy GmbH in Hart an der Alz
- PCC SE in Duisburg
- PCC BakkiSilicon hf in Husavik/Island
- Wacker Chemie AG in München
- Wacker Chemicals Norway AS in Kyrksæterøa/Norwegen
- Elkem Silicones Germany GmbH in Lübeck
- Elkem Island in Akranes/Island
- Elkem ASA in Thamshavn/Norwegen
- SIMCOA Operations Pty Ltd. in Kemerton/Australien
- Siltronic AG in München
- Heckert Solar GmbH in Chemnitz
- Meyer Burger Technology AG in Berlin
- Silicon Products Bitterfeld GmbH & Co. KG in Bitterfeld-Wolfen
- Kalyon PV in Ankara/Türkei

sowie den folgenden Personen

- Joscha Müller, Deutsche Energieagentur (DENA) in Berlin
- Prof. Axel Müller, University of Oslo in Oslo/Norwegen
- Jürgen Wallstabe, German-Australian Chamber of Industry and Commerce in Sydney/Australien
- Johannes Bernreuter, Bernreuter Research in Würzburg
- Marcus Sommerfeld, RWTH Aachen in Aachen
- Dr. Rainer Haus, Dorfner Anzaplan GmbH in Hirschau
- Prof. Laura Murphy, Sheffield Hallam University in Sheffield/UK
- Eva Stocker und Kuerban Haiyuer, World Uyghur Congress in Berlin

für vielfältige Diskussionen, Informationen und zum Teil auch Möglichkeiten zu Werksbesichtigungen.



**Abb. 2: Ausguss von flüssigem Rohsilizium zum Erkalten in der Hütte der SIMCOA Operations Pty Ltd. in Kemerton/Australien, Foto: BGR.**

# 1. Einführung

Im Oktober 2010 wurde innerhalb der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), einer Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) gegründet. Zu den Aufgaben der DERA zählen die Analyse und Bewertung der internationalen Rohstoffmärkte sowie die Beratung deutscher Unternehmen zu möglichen Preis- und Lieferrisiken bei der Versorgung mit mineralischen Rohstoffen.

Im Rahmen dieser Aufgaben hat die DERA deutsche Unternehmen bereits durch die Herausgabe zahlreicher Länder- und Rohstoffstudien sowie die Ausrichtung von Industrieworkshops zu Seltenen Erden (Februar 2011), Zirkon (Dezember 2012), Kupfer (April 2013), Antimon (Juni 2013), Wolfram (Oktober 2013), Zinn (Januar 2014), Zink (Januar 2015), Platingruppenmetallen (April 2015), Tantal (April 2018), Gallium (Juni 2018), Kobalt (Juli 2018), Magnesium (Januar 2019), China (September 2019), Nickel (Juni 2021), Graphit (November 2021), Sicherung der Rohstoffversorgung (Mai 2022) sowie Lithium (Juni 2017 und 2022) beraten.

Während zu einigen der von der DERA untersuchten Rohstoffe sonst kaum belastbare Informationen vorliegen, ist das bei Silizium nicht der Fall. Da Silizium aus einem der häufigsten Minerale auf der Erde – Quarz – gewonnen wird, gibt es hierzu zahlreiche Untersuchungen und Bücher. Hartnäckig hält sich zudem zumindest in deutschen Medien das Gerücht, dass Silizium aus Quarzsand gewonnen wird, was großtechnisch jedoch nicht möglich ist.

Heute stehen bezüglich Silizium vor allem Fragen zur ausreichenden Verfügbarkeit von Polysilizium – als Grundlage für die Herstellung von Solarsilizium für Solarzellen – sowie Halbleitersilizium – für Computerchips – und damit zu möglichen Einschränkungen des weltweiten Ausbaus der regenerativen Energiegewinnung

aus Solarenergie und der Computerindustrie im Vordergrund. Gibt es bei den vorhergesagten riesigen Zubaumengen an Photovoltaik überhaupt genug und qualitativ geeigneten Quarz? Und stehen ausreichend Kapazitäten zur Produktion von Rohsilizium aus diesem Quarz zur Verfügung? Denn Rohsilizium ist ja die Grundlage zur Produktion von Polysilizium.

Da sich ein Großteil der Siliziumindustrie und auch der Photovoltaikindustrie in China konzentriert, kommen in den letzten Jahren vermehrt Fragen zur Abhängigkeit Deutschlands und der EU von China und den dort vermuteten Menschenrechtsverletzungen hinzu. An Bedeutung gewinnt auch die Umweltbelastung bei der Produktion von Silizium und Polysilizium.

Im Gegensatz zum Siliziummarkt ist eine Betrachtung des Marktes der Ferrosilikolegierungen, darunter an erster Stelle Ferrosilizium, weniger aufregend. Ferrosilikolegierungen wurden in dieser Studie zuerst nur mitberücksichtigt, weil sie ebenfalls Quarz als Rohstoff benötigen, aber auch weil Hütten zur Produktion von Ferrosilikolegierungen häufig schnell auf die Produktion von Rohsilizium umgestellt werden können. Diese Möglichkeit könnte erhebliche Auswirkungen auf das möglicherweise knappe Angebot von Silizium haben. Ein Produzent von Ferrosilizium machte die Co-Autorin und den Autor dieser Studie auf eine besondere Qualität dieser Legierung – Ferrosilizium high-purity – aufmerksam, die einen weiteren kritischen Rohstoff für die Energiewende darstellt.

Im Zuge der Erstellung dieser Studie wurden zahlreiche Marktteilnehmer entlang der gesamten Siliziumwertschöpfungskette in Deutschland, Island, Norwegen und Australien sowie Branchenverbände in China und Brasilien besucht bzw. befragt. Zudem wurde versucht, möglichst genaue Rohdaten aus den Produktionsländern von Silizium, Polysilizium, aber auch den verschiedenen Ferrosilikolegierungen zu

erhalten. Diese Daten und ihre Interpretation stehen teils im Widerspruch zu den Ergebnissen kommerzieller Analysen. Diese Studie möge daher als „second opinion“ gelten, zur unabhängigen Meinungsbildung aller Marktteilnehmer beitragen und die Markttransparenz erhöhen.

## 2. Silizium und Quarz

### 2.1 Silizium

Silizium (engl.: silicon), vom lateinischen *silicia* = „Kieselerde“ bzw. *silex* = „Kieselstein“, „Fels“, chemisches Symbol Si, ist ein Halbmetall mit der Ordnungszahl 14 im Periodensystem der Elemente. Dort steht es in der 14. Gruppe (Kohlenstoffgruppe), nahe den anderen Halbmetallen Bor (B) und Arsen (As).

Silizium ist wie die im Periodensystem benachbarten Elemente Germanium (Ge), Gallium (Ga), Phosphor (P) und Antimon (Sb) ein Elementhalbleiter, d. h., die elektrische Leitfähigkeit von Silizium liegt mit  $5 \times 10^{-4} \text{ S/m}$  zwischen der von elektrischen Leitern ( $> 10^6 \text{ S/m}$ ) und der von Nichtleitern ( $< 10^{-8} \text{ S/m}$ ). Durch Dotierung mit geeigneten Dotierelementen wie beispielsweise Bor (B) oder Arsen (As) kann die Leitfähigkeit von Silizium um den Faktor 106 gesteigert werden.

Reines, elementares Silizium besitzt eine grauschwarze Farbe und weist einen typisch metallischen, oftmals bronzenen bis bläulichen Glanz auf.

In der Erdkruste ist Silizium nach Sauerstoff mit einem Anteil von ca. 25,8 % das zweithäufigste Element, auf der gesamten Erde nach Sauerstoff und Eisen mit ca. 17 % das dritthäufigste Element und im Sonnensystem nach Wasserstoff, Helium, Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Neon und Magnesium das achthäufigste Element.

Aufgrund seiner großen Häufigkeit findet sich Silizium auf der Erde

- in gediegener Form (elementar),
- in Form von monomerer Kieselsäure gelöst in den Weltmeeren,
- zusammen mit Sauerstoff in Form von Siliziumdioxid (Quarz, s. u.) sowie

- in Form zahlreicher Silikatminerale (Silikate, z. B. Glimmerminerale, Tonminerale, Feldspäte u. v. a. m.). Derzeit sind 1.437 verschiedene Siliziumminerale bekannt.

Silizium ist unter Normalbedingungen fest, schmilzt bei  $1.410 \text{ °C}$  und siedet bei  $3.260 \text{ °C}$ . Seine Dichte bei  $20 \text{ °C}$  liegt bei  $2,336 \text{ g/cm}^3$  und seine Mohshärte bei 6,5. Von Silizium sind 23 Isotope bekannt, von denen drei natürlich und stabil sind. Hiervon kommt  $^{28}\text{Si}$  mit einer Häufigkeit von 92,23 %,  $^{29}\text{Si}$  mit einer Häufigkeit von 4,67 % und  $^{30}\text{Si}$  mit einer Häufigkeit von 3,10 % in der Natur vor.

Silizium löst sich vollständig in den meisten Metallschmelzen unter Bildung von Siliciden (z. B. Calcium –  $\text{Ca}_2\text{Si}$ , Eisen –  $\text{Fe}_2\text{Si}$ , Wolfram –  $\text{WSi}_2$ , Kobalt –  $\text{CoSi}_2$  oder Nickel –  $\text{Ni}_2\text{Si}$ ) mit Ausnahme von Aluminium, Antimon, Arsen, Bismut, Cadmium, Quecksilber, Blei, Thallium, Silber, Thorium und Zink, die keine Silicide bilden.

### 2.2 Quarz

Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) ist das mit Abstand häufigste Siliziummineral auf der Erde und setzt sich rechnerisch (stöchiometrisch) aus 46,74 % Silizium (Si) und 53,26 % Sauerstoff (O) zusammen.

Quarz ist im Normalfall eine sehr reine Verbindung und baut andere Elemente nur in Spuren in sein Kristallgitter ein. Natürliche Quarze können zwischen 13 und 15.000 ppm (meist aber nur einige 100 ppm) Al, zwischen 9 und 1.400 ppm Na, zwischen 3 und 300 ppm K sowie geringere Mengen an Fe, Ti, P, H und Li enthalten. Neben dem Einschluss von Fremdmineralen (= Verunreinigungen) ist der Einbau von Metallionen, teils im Zusammenspiel mit ionisierender Strahlung, verantwortlich für die verschiedenen Farben der Quarzvarietäten (s. u.).

Quarze können jedoch auch mikroskopische Einschlüsse von Flüssigkeiten und Gasen enthalten, die den ansonsten völlig transparenten und farblosen Quarz milchig trüb erscheinen lassen. Eine Quelle möglicher Verunreinigungen von Quarz sind weiterhin Überzüge bzw. Krusten von Tonmineralen (z. B. Kaolinit) oder Eisenmineralen (z. B. Goethit), die jedoch bei der Aufbereitung durch Waschen oder Abtrennung farbauffälliger Komponenten (photoelektrische Sortierung, händisches Klauben) größtenteils und leicht entfernt werden können.

Die Dichte von Quarz liegt bei 2,60–2,65, im Mittel 2,62 g/cm<sup>3</sup>. Seine Mohshärte beträgt 7. Quarz besitzt keine Spaltbarkeit und bricht muschelrig.

Die mechanischen Eigenschaften des Quarzes werden von seiner Form, dem Vorhandensein von Einschlüssen oder Verunreinigungen (s. o.), Fehlern an der Oberfläche sowie dem Alter des Gesteins bestimmt.

Quarz zeichnet sich durch einen geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ( $5,5 \times 10^{-7}$  cm/cm°C) und eine hervorragende thermische Stabilität im Vergleich zu traditionellen Gläsern aus. Wenn Quarz konstant eine Stunde lang auf 1.100 °C erhitzt wird, verändert das Mineral nicht seine Farbe.

Genauso hervorragend ist seine Widerstandsfähigkeit gegen Wärmeschocks; wenn er dreimal auf 1.100 °C erhitzt und danach abrupt auf 20 °C abgekühlt wird, weist er keine Anzeichen von Bruch auf.

Quarz hat keinen spezifischen Schmelzpunkt (andere Quellen: Schmelzpunkt bei 1.723 °C), er wird jedoch ab 1.630 °C weich und verhält sich dann wie ein formbares Material (Quelle: [www.heliosquartz.com](http://www.heliosquartz.com)).

Quarz kommt in verschiedenen

- Mineralmodifikationen (Coesit, Christobalit, Stishovit, Tridymit u. a.),
- Bildungsarten (Kieselgestein (engl.: chert), Gangquarz (engl.: vein quartz), Quarzit u. a.)

- Korngrößen (Quarzsand, Quarzkies) sowie
- Farb-/Schmucksteinvarietäten (Achat, Amethyst, Karneol, Chalzedon, Chrysopras, Citrin, Jaspis, Bergkristall, Rauchquarz, Rosenquarz u. a.)

vor.

Von Bedeutung für die Gewinnung von Silizium aus Festgesteinsquarzlagerstätten sind hauptsächlich die chemische Reinheit sowie die mechanische und thermische Stabilität des Quarzes (vgl. Kapitel 3.2), die im Wesentlichen durch die Bildung (Genese) der Lagerstätte bedingt werden. Hierbei sind folgende Quarzlagerstätten zu unterscheiden:

- Gangquarzlagerstätten enthalten Quarz in Form von Quarzgängen, die aus heißen hydrothermalen Lösungen entstanden. Gangquarze sind meist besonders rein und trotz ihrer gelegentlichen Brüchigkeit deshalb bevorzugter Ausgangsrohstoff für die Siliziumgewinnung. Die Vorräte in den einzelnen Quarzgängen sind zwar begrenzt, in Feldern von Quarzgängen jedoch meist ausreichend.
- Pegmatitquarze stammen aus Pegmatitkörpern, die die Restschmelze magmatischer Schmelzen bilden und deshalb neben seltenen Mineralen bzw. Elementen durch ihre sehr langsame Abkühlung häufig Riesenkristalle von Quarz, Feldspat und Glimmer enthalten. Abbauwürdige Pegmatite treten nur in wenigen Ländern auf. Soweit bekannt, dienen sie nur in Brasilien als Ausgangsmaterial für die Siliziumproduktion.
- Bei den Quarziten unterscheidet man Felsquarzite und Zementquarzite. Felsquarzite entstehen durch Umwandlung (Metamorphose) von Quarzsanden und Quarzsandsteinen. Felsquarzite treten vorzugsweise dickbankig im Bereich von (alten) Gebirgen auf und bilden häufig sehr große Vorkommen, die aber für eine Siliziumgewinnung nicht immer ausreichend qualitativ hochwertig genug sind. Zementquarzite (sog. Findlings- oder Tertiärquarzite) sind dagegen mit gelöstem SiO<sub>2</sub> gebundene Quarzsande, deren

Bindemittel („Zement“) feinstkörnig rekristallisierte. Zementquarzite bilden stets nur begrenzte Vorkommen, sind aber zumeist von sehr hoher Qualität.

- Kieselgesteine (Hornstein) sind sehr feinkörnige, sedimentär-diagenetische Bildungen, die weit überwiegend aus mikro-/kryptokristallinem  $\text{SiO}_2$  bestehen. Sie entstanden zumeist durch Ausfällung von Mikrofossilien aus Kieselsäure in den Weltmeeren. Kiesel-

gesteinslagerstätten können vereinzelt hohe Mächtigkeiten und Reinheiten aufweisen. Ein Vorkommen in Westaustralien wird für die dortige Rohsiliziumproduktion abgebaut.

Quarzsande sind für die Herstellung von Siliziummetall oder Ferrosilizium aus technischen Gründen nicht geeignet (s. Kapitel 3.2). Quarzsandsteine besitzen nicht die benötigte mechanische Stabilität und stellen damit ebenfalls keine geeigneten Quarz Ausgangsrohstoffe dar.



**Abb. 3:** Gangquarz aus dem Bayerischen Pfahl, hier auf einer Vorratshalde der RW silicium GmbH in Pocking, ist zwar optisch rein, enthält aber häufig zu hohe Al-Gehalte, Foto: BGR.



**Abb. 4:** Quarzkies aus Frankreich sieht zwar optisch nicht sehr rein aus, wird aber wegen seiner geringen Gehalte an Verunreinigungen in verschiedenen europäischen Siliziumhütten, wie hier bei der PCC BakkiSilicon auf Island, sehr gerne als Quarzrohstoff eingesetzt, Foto: BGR.

## 3. Verwendung und Anforderungen

Quarz findet Verwendung

- als Schmuckstein
- in Form von Quarzsand als wichtiges Industriemineral, z. B. als Rohstoff für die Glasherstellung (ELSNER 2016)
- in Form von Quarzsand für die Produktion von Siliziumkarbid (SiC) nach dem Acheson-Verfahren
- in hochreiner Form (eng.: high-purity quartz) für Schmelztiigel für die Herstellung von monokristallinem Silizium (s. u.), optischen Glasfasern und Linsen, Halogenleuchten sowie Hochtemperaturleuchtröhren (EXAWATT & ANZAPLAN 2021)
- künstlich gezogen aufgrund seiner piezoelektrischen Eigenschaften als Schwingquarz
- bei der Produktion von Phosphor aus Phosphaten, indem diese in einem elektrischen Schmelz-Reduktionsofen zusammen mit Quarzkies auf 1.450 °C erhitzt und so zu weißem Phosphor umgesetzt werden. Das Siliziumdioxid des Quarzes dient hierbei als Schlackebildner. Die entsprechende Formel ist:  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 3\text{SiO}_2 + 5\text{C} \rightarrow 3\text{CaSiO}_3 + 5\text{CO} + 2\text{P}$
- als Siliziumrohstoff in zwei von zahlreichen Varianten zur Produktion von Calciumsiliciden ( $\text{CaSi}$ ,  $\text{Ca}_2\text{Si}$ ,  $\text{CaSi}_2$  u. a.), die als starke Desoxidationsmittel in der Stahlindustrie verwendet werden. Die entsprechenden Formeln sind: Calciumcarbid-Methode:  $2\text{SiO}_2 + 2\text{C} + \text{CaC}_2 \rightarrow \text{CaSi}_2 + 4\text{CO}$  Branntkalk-Methode:  $2\text{SiO}_2 + \text{CaO} + 5\text{C} \rightarrow \text{CaSi}_2 + 5\text{CO}$
- als Siliziumrohstoff in der Produktion von Siliziummetall (Si) sowie dessen Weiterverarbeitung vor allem zu Aluminiumlegierungen (Kapitel 3.3.1), Siliziumchemikalien (Kapitel 3.3.2) oder Poly- bzw. Solar- und Halbleitersilizium (Kapitel 3.3.3)
- als Siliziumrohstoff in der Produktion von Ferrosilizium (FeSi) vor allem für dessen Nutzung in der Stahlproduktion (Kapitel 3.4.1), in der Eisengussindustrie (Kapitel 3.4.2) sowie in der Magnesiummetallproduktion (Kapitel 3.4.3)

- als direkter oder indirekter Siliziumrohstoff für die Produktion von Ferrosilikolegierungen, wie Ferrosilikomangan (FeSiMn, Kapitel 3.5) oder Ferrosilikomagnesium (FeSiMg), Ferrosilikochrom (FeSiCr), Ferrosilikoaluminium (FeSiAl) u. a. (Kapitel 3.6) für den Einsatz in der Eisengussindustrie bzw. in der Stahlherstellung

Nur die Nutzung von Quarz als Siliziumrohstoff für die Produktion von Siliziummetall, Ferrosilizium und anderer Ferrosilikolegierungen ist Gegenstand dieser Studie.

### 3.1 Aufbereitung und Raffination

#### 3.1.1 Silizium

Die kommerzielle Herstellung von Siliziummetall (Si) (= Rohsilizium, metallurgisches Silizium) erfolgt in Schmelz-Reduktionsöfen bei Temperaturen von ca. 2.000 °C. Hierbei wird Siliziumdioxid (Quarz) mit einem Reduktionsmittel (Kohlenstoffträger) zu Silizium reduziert. Die entsprechende vereinfachte Formel ist:  $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ . Dieser Prozess ist sehr energieintensiv, wobei zur Produktion von 1 t Rohsilizium zwischen 12.500 und 13.000 kWh Strom benötigt werden.

Im Vergleich werden zur Herstellung von 1 t Ferrosilizium mit einem Anteil von 45 % Silizium (FeSi 45 %) ca. 4.200 kWh, zur Herstellung von 1 t Ferrosilizium mit einem Anteil von 75 % Silizium (FeSi 75 %) ca. 8.600 kWh, zur Herstellung von 1 t Ferrosilikomangan (FeSiMn) ca. 4.300 kWh, zur Herstellung von 1 t Ferrosilikochrom (FeSiCr) ca. 8.100 kWh und zur Herstellung von 1 t Ferrosilikozirkonium (FeSiZr) ca. 12.000 kWh Strom benötigt (VON KRUGER 2009).

Ein Schmelz-Reduktionsofen besteht aus einem mehrere Meter (bei 47 MW-Anschlussleistung bis zu 12 m) breiten, mit Graphit oder Feuerfestbeton ausgekleidetem Stahltiegel, in den drei zusammengeschaubte und dann durchschnittlich je 15 m lange und 20 t schwere Elektroden aus Kohlenstoff (Söderberg-Elektroden, vorgebackene Elektroden) hineintauchen. Bei Zuschaltung des Stroms wird ein Lichtbogen (Lichtbogenofen, Elektrolichtbogenofen) zwischen der Spitze der Elektroden und dem Boden des Tiegels erzeugt. Dieser besitzt Temperaturen zwischen 3.000 °C an den Elektrodenspitzen und 700 °C an der Tiegelwand. Der Boden des Tiegels ist die Hauptreaktionszone mit Tempe-

raturen von > 1.820 °C. Das kontinuierlich von oben zugeführte Gemisch bzw. Schmelzgut („Möller“) aus Quarz und Reduktionsmitteln schmilzt in diesem Bereich auf und das Siliziumdioxid wird hier zu metallischem Silizium reduziert. Das entstehende Siliziummetall wird meist kontinuierlich abgezogen, so dass ein Schmelz-Reduktionsofen rund um die Uhr in Betrieb ist. Der Verbrauch der Elektroden liegt bei 80 – 100 cm pro Tag, die kontinuierlich von oben nachgeführt werden. Rund 40 % der zur Schmelze von Quarz benötigten Energie wird über die Elektroden durch Strom eingebracht, der Rest stammt aus der in den Reduktionsmitteln (s. u.) gespeicherten fossilen Energie (CSIRO 2022).



**Abb. 5: Rezeptabhängige automatische Zufuhr von Kohle, Quarz und Holzkohle in einen der beiden Schmelzöfen der norwegischen Siliziumhütte Thamshavn der Elkem ASA. Die Holzhackschnitzel werden aufgrund ihres großen Volumens erst später bzw. direkt dem Möller zugeführt, Foto: BGR.**





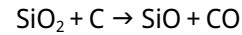
Abb. 6: Ansicht des Zufuhrbereichs eines der Schmelzöfen in der Siliziumhütte der RW silicium GmbH in Pocking, Foto: BGR.



Abb. 7: Graphitelektroden auf dem Werkgelände der RW silicium GmbH in Pocking, Foto: BGR.

Das erschmolzene Rohsilizium wird in großen Wannen aufgefangen und erkaltet darin über mehrere Stunden, bevor es ausreichend spröde wird und dann herausgelöst werden kann. Zum Teil wird auch der nur außen erkaltete Siliziumbarren aufgebrochen, so dass das darin noch flüssige Silizium ausläuft und dadurch verschiedene Qualitätsstufen von Silizium gewonnen werden können. Nach völliger Abkühlung wird das Rohsilizium in Stücke gebrochen, fraktioniert und ist damit bereit zum Verkauf bzw. zur Weiterverwendung.

Die Reduktion des Quarzes im Schmelz-Reduktionsofen erfolgt in mehreren Teilschritten. Bei dem ersten werden gasförmiges Siliziummonoxid und Kohlenstoffmonoxid erzeugt:



Das Siliziummonoxid reagiert weiter mit dem Kohlenstoff zu festem Siliziumkarbid:

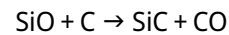


Abb. 8: Ausguss von Tiegeln mit flüssigem Rohsilizium direkt aus dem Schmelzofen der PCC BakkiSilicon hf zum Erkalten, Foto: BGR.

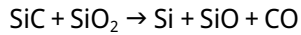


Abb. 9: Erkaltender Siliziumbarren in der Hütte der RW silicium GmbH in Pocking, Foto: BGR.



Abb. 10: Gebrochenes Rohsilizium, fertig zum Versand, in der Siliziumhütte der RW silicium GmbH in Pocking, Foto: BGR.

Das Siliziumkarbid reagiert darauf mit geschmolzenem Quarz zu elementarem Silizium sowie weiterem Siliziummonoxid und Kohlenstoffmonoxid:



Ein Überangebot von Quarz im Ofen stellt sicher, dass kein überschüssiges Siliziumkarbid verbleibt. Verbleibendes Siliziummonoxid steigt (zusammen mit CO, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>) auf, oxidiert in der Luft zu Siliziumdioxid und wird in Abluftfiltern in Form von amorphem Quarzstaub (Mikrosilika) aufgefangen. Je Tonne Silizium und Ofenparametern fallen meist zwischen 300 und 400 kg Mikrosilika an. In einem gut eingestellten Ofen werden bis zu 85 % des theoretisch umsetzbaren Siliziums als Siliziummetall ausgebracht.

Das Mikrosilika (engl.: silica fume, silica dust) stellt ein hochwertiges Beiprodukt in Hütten

dar, die Rohsilizium oder auch Ferrosilizium 75 % produzieren. Es findet aufgrund seiner geringen Schüttdichte, seiner guten Fließfähigkeit sowie der großen Oberfläche der feinen Partikel (0,1 – 0,5 µm) Verwendung als Binder und Füller vor allem in der Zementproduktion, aber auch in der Produktion von Spezialbetonen sowie in der Keramik-, Feuerfest- und Gummiindustrie. Besonders das von der RW silicium GmbH hergestellte sehr helle Mikrosilika ist ein gesuchter Rohstoff in der Feuerfestindustrie. Das Unternehmen Elkem ASA vertreibt zudem erfolgreich Mikrosilika in der Erdölindustrie als Zusatz für Bohrspülungen und die Zementation von Bohrlöchern.

Die am besten geeigneten Reduktionsmittel (Kohlenstoffträger) sind die, die am leichtesten mit dem Quarz reagieren, aber einen hohen elektrischen Widerstand besitzen. Holzkohle und Kohle mit niedrigem Aschegehalt gelten für die Siliziumproduktion als besonders gut



Abb. 11: Das von der RW silicium GmbH in Pocking hergestellte Mikrosilika zählt zu den qualitativ hochwertigsten weltweit und erzielt überdurchschnittlich hohe Preise, weswegen es absichtlich in großen Mengen produziert wird, Foto: BGR.



**Abb. 12:** Gewaschene, aschearme Kohle aus Kolumbien zählt in den europäischen Siliziumhütten derzeit als das am besten geeignete Reduktionsmittel, Foto: BGR.



**Abb. 13:** Holzkohle unterstützt in vielen Siliziumhütten Kohle als Reduktionsmittel, Foto: BGR.



**Abb. 14:** Der Einsatz von Holz hackschnitzeln ist zur Optimierung der Gasdurchströmung im Möller unverzichtbar, Foto: BGR.

geeignet. Kohle mit hohem Aschegehalt ist dagegen nicht geeignet, da durch sie zu viele Verunreinigungen in das Rohsilizium eingebracht werden würde (vgl. Kapitel 3.2). Produzenten, die niedrigaschige Kohle verwenden, setzen zudem häufig Holzhackschnitzel als zusätzlichen Kohlenstoffträger hinzu. Die Holzhackschnitzel (aber auch der Einsatz von Holzkohle statt Kohle) erhöhen zudem die Porosität des Möllers und erleichtern dadurch die Gasdurchströmung. Ein wichtiges Reduktionsmittel, v. a. in China, ist auch Petrolkoks. Hochofenkoks wird dagegen weder zur Produktion von Rohsilizium noch von Ferrosilizium eingesetzt.

Weltweit wurden jedoch auch schon viele andere potenzielle Reduktionsmittel getestet. SOMMERFELD & FRIEDRICH (2021) nennen:

- Holz (Sägespäne, Reisig, Äste, Nadeln, Zapfen und Borke)
- Bioabfälle (Fruchtfleisch von Oliven, Stroh, Hülsen, Schalen, Spreu, Mark)
- Verkohlte Bioabfälle (Fruchtfleisch verkohlter Oliven, Maisspindeln, Bioabfälle, Stroh, Fruchthackschnitzel)
- Holzkohle aus Schalen (Kokosnussschalen, Palmkernschalen)
- Klassische Holzkohle (Bambus, Zypresse, Weißkopfmimose, Kiefer, Fichte, Eukalyptusbaum, Eukalyptusstrauch)
- Kohle (Steinkohle, Anthrazitkohle, Mischkohle, Bitumen)
- Koks (Braunkohlenkoks, Schwelkoks, Petrolkoks, Feinkoks)

Zu ergänzen sind Bioabfälle aus dem Zuckerrohranbau und der Zuckerproduktion, wie sie in großen Mengen vor allem in Brasilien anfallen. Viele potenzielle Reduktionsmittel auf biologischer Basis besitzen aber ungewünschte Eigenschaften wie geringe Energiedichte, geringe Schüttdichte, wechselnde Zusammensetzung

oder einen geringen Kohlenstoffgehalt, was zu hohen Transport- und Lagerkosten führt. Hinzu kommen oft schlechte mechanische Eigenschaften wie hohe Bröckeligkeit und hohe Zerdrückbarkeit (SOMMERFELD & FRIEDRICH 2021).

Nach LINDSTAD et al. (2007) werden bei der Produktion von 1 t Silizium mit fossilen Reduktionsmitteln (Kohle, Koks) durchschnittlich 5,0 t CO<sub>2</sub>, bei der Produktion von 1 t Ferrosilizium 65 % ca. 3,6 t CO<sub>2</sub>, bei der Produktion von 1 t Ferrosilizium 75 % ca. 4,0 t CO<sub>2</sub> und bei der Produktion von 1 t Ferrosilikomangan ca. 1,4 t CO<sub>2</sub> erzeugt. Durch die zumindest teilweise Nutzung von Reduktionsmitteln auf biologischer Basis können diese CO<sub>2</sub>-Austräge deutlich reduziert werden.

Die Nutzung von Wasserstoff statt Kohlenstoff zur Reduktion von SiO<sub>2</sub> ist dagegen sehr schwierig, da Silizium eine besonders hohe Sauerstoffaffinität (= SiO<sub>2</sub>) besitzt. Wasserstoff hat eine geringere Affinität zu Sauerstoff (= H<sub>2</sub>O) als Kohlenstoff (= CO), weswegen Kohlenstoff das wesentlich bessere Reduktionsmittel ist (M. Sommerfeld, RWTH Aachen, frdl. schriftl. Mitt.). Zudem bedürfte die Umstellung von Kohlenstoff auf Wasserstoff als Reduktionsmittel erheblicher Investitionen und des vollständigen Umbaus zahlreicher Hütten weltweit (SOMMERFELD & FRIEDRICH 2021).

Ein hohes Energieeinsparpotenzial sehen SOMMERFELD & FRIEDRICH (2021) dagegen in der Schmelze des Möllers durch fokussierte Solarenergie statt durch Strom aus fossilen Energieträgern. Hierzu sind aber noch weitergehende Forschungen notwendig. Auch nutzen viele Silizium- und Ferrosiliziumhütten weltweit schon jetzt alternative Energien, v. a. Wasserkraft, aber auch Windenergie und Geothermie (Island), als Stromquelle.

Nach ASIAN METAL liegt der durchschnittliche Energie- bzw. Rohstoffbedarf zur Produktion von 1 t Rohsilizium (der Spezifikation 5-5-3, s. Kapitel 3.3) in China bei 12.500 kWh Strom, 100 kg Graphitelektroden, 2,8 t Quarz, 0,84 t Petrolkoks, 0,5 t gewaschener Kohle sowie 0,5 t Holzhackschnitzeln.

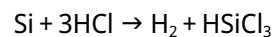
Das Unternehmen Ferroglobe plc spezifiziert in seinen Umweltberichten den Rohstoffbedarf zur Produktion von 1 t Rohsilizium in seiner Siliziumhütte Sabón in Spanien (s. dort) auf 2,65 – 2,74 t Quarz, 2,99 – 3,18 t Reduktionsmittel (Kohle, Holz) sowie 30 – 37 kg Kalkstein. Kalkstein wird in den meisten Siliziumhütten dem Möller als Schlackebildner zugegeben.

Die ungefähre weltweite Kostenverteilung bei der Produktion von Rohsilizium nach Roskill (2014) ist wie folgt: 32 % Personal und Verwaltung (inkl. Abschreibungen, Instandhaltung, Vertrieb und F&E), 26 % Strom, 20 % Reduktionsmittel, 15 % Elektroden und 7 % Quarz. Anders als bei der Produktion anderer Metalle spielen bei der Produktion von Rohsilizium (und auch Ferrosilizium, s. Kapitel 3.1.4) die Kosten des wichtigsten Rohstoffs, Quarz, also eine nur sehr untergeordnete Rolle. Ausschlaggebend sind vielmehr die Personal- und Verwaltungskosten, der Wechselkurs zwischen der nationalen Währung und dem US-Dollar sowie besonders der Preis für Industriestrom. Dieser ist derzeit im weltweiten Vergleich nach Dänemark in Deutschland, Spanien und Großbritannien am höchsten und auch in 18 weiteren Ländern, davon mehrere Länder mit Siliziumproduktion (Deutschland, Spanien, Australien, Brasilien, Frankreich, USA, Südafrika), deutlich höher als in China. Soweit recherchiert werden konnte, war im Sommer 2023 der Industriestrom in Mittelnorwegen und in Brasilien mit 2–3 ct/kWh am niedrigsten unter allen Ländern mit Siliziumproduktion weltweit. In Yunnan/SW-China kostete Industriestrom 5 ct/kWh, in Island 6–7 ct/kWh und in Deutschland 10–12 ct/kWh. Rund 40 % der zur Schmelze von Quarz benötigten Energie wird durch Strom eingebracht, der Rest stammt aus der in den Reduktionsmitteln gespeicherten fossilen Energie. Erste Unternehmen haben in ihren Siliziumhütten Energierückgewinnungsanlagen (aus den heißen Abgasen und dem Kühlwasser) installiert, die bis zu 40 % des benötigten Primärstrombedarfs ersetzen können.

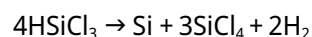
### 3.1.2 Polysilizium

Die Herstellung von Polysilizium ist nach zwei Verfahren möglich, dem Siemens-Prozess und dem Wirbelschichtreaktor-Prozess. Nur der Siemens-Prozess lässt jedoch die Herstellung von hochreinem Polysilizium zu, das auch in der Halbleiterindustrie Verwendung finden kann.

Das **Siemens-Verfahren** wurde in den 1950er Jahren von der Firma Siemens zusammen mit dem Unternehmen Wacker Chemie entwickelt und von Wacker weltweit auch als Erstes eingesetzt. Es besitzt heute einen weltweiten Marktanteil von >90 %. Ausgangsmaterial ist stückiges Rohsilizium mit 98–99 % Reinheit, das aufgemahlen und danach mit gasförmigem Chlorwasserstoff (HCl) bei Temperaturen von 300 bis 350 °C in einem Reaktor zu einem gasförmigen Silan-Gemisch umgesetzt wird, welches hauptsächlich aus Trichlorsilan (TCS) (HSiCl<sub>3</sub>) besteht.



In mehreren hochkomplexen und energieaufwendigen Destillationsschritten werden andere Silane und Fremdstoffe (z. B. Dotierstoffe und Metalle) vom Trichlorsilan abgetrennt. Das dabei entstehende gasförmige Enddestillat zeichnet sich durch seine extrem hohe Reinheit aus und muss in Folgeschritten wieder in festes Silizium überführt werden. Dafür nutzt man die chemische Gasphasenabscheidung. Bei dieser wird das Enddestillat in Abscheidereaktoren mit Wasserstoff über auf 1.100 °C elektrisch erhitzte, wenige Millimeter dünne und hochreine Siliziumstäbe geleitet. Das dann gasförmige TCS zersetzt sich auf der Oberfläche der heißen Siliziumstäbe, auf denen es sich als polykristallines Silizium abscheidet.



Da sich das TCS an den heißen Siliziumstäben an jeder beliebigen Stelle abscheiden kann, sind die gesamten Stäbe dann nicht monokristallin, sondern bestehen aus sehr vielen winzigen Kristallen. Daher heißt das so produzierte Silizi-

um polykristallines Silizium (Polysilizium). Nach etwa einer Woche sind die Siliziumstäbe auf die gewünschte Größe (15 – 20 cm Durchmesser) gewachsen, so dass sie geerntet werden können. In diesem sog. Batchverfahren liegt einer der gravierendsten Nachteile des Verfahrens: Es kann nicht kontinuierlich betrieben werden. Weiterhin erfordert die Herstellung 1 t polykristallinen Siliziums 70 bis 160 MWh elektrische Energie. Während der Abscheidung fallen

große Mengen Siliziumtetrachlorid (STC) ( $\text{SiCl}_4$ ), aber auch Wasserstoff und Chlorwasserstoff an, welche dem Kreislauf nach aufwendigen Recyclingschritten wieder zugeführt werden. Die Rückumwandlung von STC zu TCS erfolgt in sog. Konvertern, welches anschließend in den Abscheidereaktor zurückgeführt wird. Durch die Wiederverwendung von ungenutzten Prozessmedien und Umwandlung von Reaktionsnebenprodukten können die Prozesseffizienz und



Abb. 15: Die nach dem Siemens-Verfahren gewachsenen Stäbe aus Polysilizium werden sichtbar, nachdem die Stahlkappe des Abscheidereaktors abgehoben wurde, Foto: SILICON PRODUCTS BITTERFELD GMBH & CO. KG (mit frdl. Genehmigung).



-nachhaltigkeit sehr stark gesteigert werden. Zur Produktion von 1 t Polysilizium werden ca. 1,1 t Rohsilizium benötigt.

Das stabförmig abgeschiedene hochreine Polysilizium muss in Folgeschritten auf eine gut handhabbare Bruchstückgröße zerkleinert werden, damit die Verbraucher (Monokristallzüchter) ihre Tiegel befüllen können. Durch die Zerkleinerung werden unweigerlich wieder Verunreinigungen auf die Oberfläche des Polysiliziums aufgebracht. Wenige Produzenten weltweit sind aufgrund ihres Know-hows in der Lage, die Kontamination so gering zu halten, dass das Material ohne weitere Oberflächenbehandlung direkt von Halbleiter- und Solarkunden verwendet werden kann.

Je nachdem, wie gründlich das TCS destilliert wurde und wieweit Verunreinigungen auf der Oberfläche der Polysiliziumstäbe (speziell nach Beendigung des Kristallwachstums auf der Polysiliziumstaboberfläche anhaftender Siliziumstaub) (mit hochkonzentrierten Fluss- und Salpetersäuren) weggeätzt werden, können daraus später unterschiedliche Reinheiten von Silizium erzeugt werden:

- Solarqualität für multikristalline (polykristalline) Solarzellen mit 99,99999 % Si (7N) bis 99,9999999 % Si (9N) (Anm.: Auf dem Markt wird polykristallines Silizium derzeit nicht mehr nachgefragt, s. u.)



**Abb. 16: Gebrochenes, nach dem Siemens-Verfahren produziertes Polysilizium, Foto: WACKER CHEMIE AG (mit frdl. Genehmigung).**

- Solarqualität für monokristalline Solarzellen mit 99,9999999 % Si (9N) bis 99,99999999 % Si (10N) Weitere Anforderungen: < 5 ppb Fe, < 0,5 ppb Ni, < 0,5 ppb Cr, < 0,3 ppb P, < 0,1 ppb B
- Elektroqualität für Halbleiter mit 99,99999999 % Si (10N) bis zumeist 99,9999999999 % Si (12N) Weitere Anforderungen: Dotierstoffe wie P, B, As, Al: im Bereich weniger ppt; Metalle wie Fe, Cr, Ni: im Bereich weniger 10 ppt; C: im Bereich von 10 ppb

Nach Berechnungen von SMM-SHANGHAI METALS MARKET (TINGTING 2023) wurde Polysilizium nach dem Siemens-Verfahren für Solaranwendungen (geringe Reinheitsanforderungen) in China im Mai 2023 mit Kosten von umgerechnet 6,23 €/kg produziert. (Anm.: Im gleichen Monat wurde chinesisches Polysilizium 9 N für ca. 9 €/kg, außerhalb Chinas produziertes Polysilizium dagegen für ca. 30 €/kg gehandelt, vgl. Kapitel 7.)

Ein alternativer Produktionsweg für Polysilizium ist der **Wirbelschichtreaktor** (engl.: fluidized-bed-reactor, FBR). Im Gegensatz zum Siemens-Prozess handelt es sich hierbei um einen kontinuierlichen Prozess mit dem Potenzial zu Energieeinsparungen von bis 90 %. Beim FBR-Verfahren wird sehr feinkörniges, granulares Polysilizium in einen beheizten Reaktorbehälter geblasen und anschließend durch ständig zuströmendes Wasserstoffgas in der Schwebelage gehalten. Dies ist das sog. „Wirbelbett“ aus Siliziumpartikeln und Wasserstoff. Jetzt werden hochreine Silangase wie TCS ( $\text{HSiCl}_3$ ) oder Monosilan ( $\text{SiH}_4$ ) in den Reaktor eingedüst. Bei Temperaturen von 650 bis 700 °C (Monosilan) bzw. 1.000 °C (TCS) zersetzen sich die Silangase und Silizium beginnt sich auf den feinkörnigen Siliziumpartikeln abzuscheiden, die als Keimlingspartikel wirken. Auf diese Weise beginnen die kleinen Siliziumpartikel bis auf eine Größe von wenigen Millimetern anzuwachsen (sog. Granulat). Sobald sie eine bestimmte Größe und ein bestimmtes Gewicht erreichen, fallen sie durch den Gastrom nach unten und können am Boden des Reaktorbehälters gesammelt und von dort kontinuierlich abgetrennt werden.



**Abb. 17: Körniges bzw. granulares, nach dem FBR-Verfahren produziertes Polysilizium aus einem Werk der GCL Technology Holdings Ltd. in China, Foto: BGR.**

Nach Berechnungen von SMM-SHANGHAI METALS MARKET (TINGTING 2023) konnte Polysilizium im Wirbelschichtreaktor in China im Mai 2023 für umgerechnet 4,99 €/kg produziert werden.

Nach Analysen von FISCHER et al. (2023) betrug der weltweite Marktanteil der FBR-Technologie im Jahr 2022 ca. 6 %, soll jedoch bis 2023 (v. a. durch chinesische Produzenten, vgl. Anhang – Länderprofil China) auf ca. 20 % steigen.

Nach BERNREUTER RESEARCH bzw. BERNREUTER (2020) verhinderten bisher im Wesentlichen vier Gründe den kommerziellen Durchbruch der Wirbelschichtreaktortechnologie:

1. Die Technologie ist durch zahlreiche Patente geschützt.
2. Die komplexen fluiddynamischen Prozesse im FBR erfordern einen hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand sowie viel Erfahrung, um diese im großmaßstäblichen Umfang einzusetzen.
3. Der Prozess erfordert eine teure Auskleidung des Reaktors (meist mit hochreinem Quarz oder SiC), um zu verhindern, dass die Reak-

torwände die entstehenden Polysiliziumkörner verunreinigen.

4. Der Vorteil niedrigen Energieverbrauchs wird durch den hohen Anfall (10 – 15 %) nicht-nutzbaren Siliziumstaubs wieder wettgemacht.

Weitere Herausforderungen sind (WACKER CHEMIE AG, frdl. schriftl. Mitt.):

5. Nach dem FBR-Verfahren hergestelltes Polysilizium besitzt gegenüber Polysilizium nach dem Siemens-Verfahren eine geringere Reinheit.
6. Das Produkt besitzt eine hohe Staubbelastung, die vom Granulat vor der weiteren Verwendung entfernt werden muss.
7. Beim Aufschmelzen des Materials kommt es zu Problemen beim Kristallziehen. FBR-Granulat neigt dazu, dabei aufzuplatzen und entsprechend zu Spritzern zu führen. Dies steht vermutlich in Verbindung mit den im Produkt vorhandenen Prozessgasen, in erster Linie dem Wasserstoff bzw. Spannungen in der Grenzfläche der Partikel.

Als möglicher Lösungsansatz kann FBR-Granulat teilweise in Verbindung mit klassisch nach dem Siemens-Verfahren hergestelltem Polysilizium verwendet werden. Der Weltmarktführer GCL Technology Holdings Ltd. betont jedoch in seinen Pressemitteilungen, dass sein FBR-Granulat mittlerweile zumindest zur Produktion von monokristallinem Solarsilizium auch sehr gut geeignet ist.

### 3.1.3 Solar- und Halbleitersilizium

In der Halbleiter- und in der Photovoltaikindustrie wird fast ausschließlich monokristallines Silizium verwendet (Marktanteil monokristallines Silizium 2023 in der PV-Industrie 97 %, s. u.). Monokristallines Silizium (engl.: monocrystalline silicon „mono c-Si“ oder single-crystal silicon „sc-Si“) besitzt ein kontinuierliches Kristallgitter, in dem die Siliziumatome im gesamten Kristall in der Diamantstruktur geordnet vorliegen. Es ist frei von Korngrenzen. Für die Herstellung von monokristallinem Silizium gibt es verschie-

dene Verfahren. Das am weitesten verbreitete ist das nach seinem Entdecker benannte Czochralski-Verfahren, das sowohl in der Halbleiter- als auch in der PV-Industrie verwendet wird.

Im **Czochralski-Verfahren** (Schmelztiegelverfahren, CZ-Kristallzucht) wird das polykristalline Silizium in einem dreiwandigen Tiegel, davon die innere Tiegelwand aus hochreinem Quarz (> 99,997 %  $\text{SiO}_2$  bzw. > 99,999 %  $\text{SiO}_2$  nach EXAWATT & ANZAPLAN 2021), unter einer Schutzgasatmosphäre (Argon) aufgeschmolzen. Für die Herstellung eines Siliziumeinkristalls aus dieser Siliziumschmelze wird ein monokristalliner Impfkristall senkrecht eingetaucht. Die Schmelze wird nun auf eine Temperatur, die sehr geringfügig über dem Kristallisationspunkt ( $1410^\circ\text{C}$ ) von Silizium liegt, abgekühlt. Die Temperatur des Impfkristalls wird so eingestellt, dass sie knapp unter dem Kristallisationspunkt liegt und deshalb flüssiges Silizium am

Impfkristall anfriert. Zu Beginn wird mit einer hohen Ziehgeschwindigkeit ein sog. Dünnhals (engl.: dash neck) von 3 bis 5 mm Durchmesser gezogen. Dieser dient dazu, Versetzungen aus dem Kristall zu entfernen. Durch anschließendes langsames Ziehen des Impfkristalls vergrößert sich nach und nach der Durchmesser des Siliziumstabes bis zur gewünschten Größe (heutzutage meist 300 mm). Dann folgt eine leichte Erhöhung der Ziehgeschwindigkeit, so dass der Durchmesser konstant gehalten wird und ein monokristalliner, zylinderförmiger Einkristall aus dem Tiegel gezogen wird. Während des Ziehens rotiert der Kristall gegenläufig zum Quarztiegel. Die Ziehgeschwindigkeiten und die damit verbundenen Ziehdauern zwischen Halbleiter- und PV-Industrie unterscheiden sich dabei deutlich. Für CZ-Kristalle in der Photovoltaik werden mit entsprechenden Kristallziehvorrichtungen (engl.: crystal puller) Ziehgeschwindigkeiten von mehr als 1,5 mm/min erreicht. Die Kristalllänge



**Abb. 18: Monokristalliner Impfkristall aus Reinstsilizium für die Herstellung eines monokristallinen Siliziumeinkristalls nach dem Czochralski-Verfahren. Die glänzende Spitze wird in das aufgeschmolzene Polysilizium eingetaucht und dient als Impfkristall. Am anderen Ende eine Nut zur Befestigung der Ziehvorrichtung. Der gesamte Impfkristall wiegt 30 g, ist ca. 14 cm lang und besitzt einen Durchmesser von 1,2 cm, Foto: WARUT ROONGUTHAI/Wikipedia.**



**Abb. 19: Anfangskonus eines Einkristalls aus Reinstsilizium mit 300 mm Durchmesser, der an dem Impfkristall in einer Ziehanlage hängt. Im Hintergrund ein Mitarbeiter mit Schutzausrüstung, Foto: SILTRONIC AG (mit frdl. Genehmigung).**

hängt von den Anlagen und dem gewünschten Dotierprofil ab. Dabei werden in der Photovoltaik meist mehrere Kristalle nacheinander aus einem Tiegel gezogen. In der Halbleiterindustrie sind die Ziehgeschwindigkeiten aufgrund der höheren Anforderungen hinsichtlich der Kristallqualität deutlich niedriger (< 1 mm/min).

Für die Verwendung von Siliziumkristallen in der Solar- wie auch in der Elektronikindustrie ist ein Dotieren des Siliziums mit Fremdatomen erforderlich, welche der Schmelze zugegeben und dann beim Ziehen in den Kristall eingebaut werden. Diese Fremdatome erlauben den Elektronentransport im Siliziumgitter und können fünfwertige Elemente aus der V. Hauptgruppe des Periodensystems (**Phosphor (P)**, **Arsen (As)**, oder **Antimon (Sb)**) = n-Halbleiter) oder dreiwertige Elemente aus der III. Hauptgruppe des Periodensystems (**Gallium (Ga)**, **Bor (B)**) = p-Halbleiter) sein. Gleichzeitig erfolgt im Czochralski-Verfahren aber auch ein Einbau von unerwünschten anderen Elementen, wie Sauer-

stoff (O), Kohlenstoff (C) und Metallen, in den Siliziumeinkristall. Sauerstoff und Metalle lösen sich unter anderem aus dem Tiegel, wohingegen Kohlenstoff hauptsächlich aus der Anlage stammt, die mit Graphitbauteilen ausgestattet ist (z. B. Graphit-Heizer). In der Halbleiterindustrie werden deswegen teilweise bei der Kristallzucht von Siliziumeinkristallen mit großen Durchmessern (300 mm) starke Magnetfelder im Bereich des Tiegels angelegt, mit denen die Zirkulation der Siliziumschmelze im Quarztiegel positiv beeinflusst werden kann. So können der Sauerstoffgehalt und die Verteilung von anderen Verunreinigungen und Kristalldefekten kontrolliert und reduziert werden und kann die Kristallqualität verbessert werden.

Nach dem Kristallisieren und Abkühlen werden die Siliziumstäbe mit Diamantdrahtsägen zu je nach Durchmesser und Verwendungszweck unterschiedlich dicken (Solarwafer derzeit zwischen 150 µm bei p-Typ und 130 bis 110 µm bei n-Typ, Halbleiterwafer derzeit meist 775 µm)

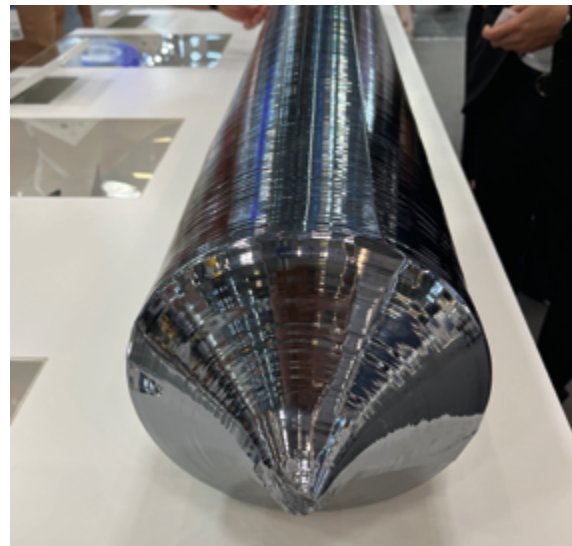
Scheiben, den sog. Wafern, zersägt und diese dann über mehrere Zwischenschritte (Rundschleifen, Kantenverrundung, Lasermarkierung, Läppen/Abschleifen, Reinigen und Ätzen, Polieren, Säubern) und Folgeschritte (s. u.) letztendlich zu Solarzellen oder zu Halbleiter-Elementen weiterverarbeitet.

Die Produktion von Stäben (engl.: ingots) aus Solar- oder Halbleitersilizium auf Basis von Polysilizium und die Weiterverarbeitung zu Wafern erfolgt weltweit mit sehr wenigen Ausnahmen stets zusammen an einem Standort.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, für Halbleiteranwendungen die polierten Siliziumwafer mit einer zusätzlichen, einkristallinen Siliziumschicht zu überziehen (epitaxierte Wafer). Hierdurch können Wafer erzeugt werden, die im Wafersubstrat und in der Epitaxieschicht unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Dies ist in vielen Fällen für die Funktion eines Halbleiterbauteils unverzichtbar.

Die technologischen Entwicklungen im Czochralski-Verfahren erlaubten es, Kristalle mit immer größerem Durchmesser herzustellen. Lag der Durchmesser in den 70er Jahren bei 50 mm, so sind seit 2001 300 mm Kristalle in der Produktion (CHALAMALA 2018). Aus jeder Vergrößerung des Durchmessers ergeben sich neue Schwierigkeiten im Kristallherstellungsverfahren, aber auch in den Folgeprozessen. Speziell in der Chipherstellung wäre der Investitionsaufwand in neue Produktionslinien für größere Waferdurchmesser (> 300 mm) enorm. Die hohen Investitionskosten und technischen Herausforderungen bei der Einführung von 450 mm Wafern führten schließlich dazu, dass die Bestrebungen zu deren Herstellung, trotz möglicher höherer Effizienzen und geringerer Herstellungskosten pro Chip, eingestellt wurden (WACKER CHEMIE AG, frdl. schriftl. Mitt.).

Die Photovoltaik führte zu einer eigenständigen Weiterentwicklung der Kristallzucht durch einen hohen Kostendruck. So sind hier Anlagen für deutlich höhere Ziehgeschwindigkeiten und Kristalle mit über 800 kg Gewicht üblich. Dies



**Abb. 20: 300 kg schwerer Einkristall aus Reinstsilizium mit 300 mm Durchmesser aus der Produktion des türkischen Unternehmens Kalyon PV, ausgestellt auf der Fachmesse InterSolar 2023 in München, Foto: BGR.**

wird neben immer höheren Einwaagen im Tiegel (bis über 1 t) auch durch Nachchargieren erreicht.

Alternativ zum Czochralski-Verfahren wird – in deutlich geringerem Umfang, aber u. a. für zukunftssträchtige Hochspannungsanwendungen wie z. B. Elektromobilität und Power-Management – das Zonenschmelzverfahren (engl.: float zone „FZ“) industriell praktiziert.

Das Zonenschmelzverfahren weist zwei prinzipielle Unterschiede zum Czochralski-Verfahren auf, aus denen sich originäre Vorteile für bestimmte elektronische Bauelemente ergeben (WACKER CHEMIE AG, frdl. schriftl. Mitt.):

1. Tiegelfreies Umkristallisieren eines Polysilizium-Stabs in einen monokristallinen Stab. Das aufgeschmolzene, flüssige Silizium ist beim FZ-Verfahren **nicht** in Kontakt mit Oberflächen wie Schmelztiegeln. Somit liefert dieses Verfahren Monokristalle mit besonders hoher Reinheit bis 12N, wie sie von der Halbleiterindustrie bevorzugt werden. Insbeson-

dere ist der Sauerstoffgehalt deutlich niedriger als beim CZ-Verfahren. Diese Eigenschaft erleichtert die Herstellung von Hochspannungsbaulementen, wie sie z. B. in Elektrofahrzeugen verbaut werden, wesentlich.

2. In Gegensatz zum Czochralski-Verfahren (komplettes Aufschmelzen des gesamten Polysiliziums) findet beim Zonenschmelzverfahren ein sukzessives Aufschmelzen eines geringen Schmelzvolumens statt, zudem erfolgt die Dotierung über Einblasen von Dotiergas und kann somit besser geregelt werden. Dies erlaubt die Herstellung von Monokristallen mit (über die Länge des Kristalls betrachtet) homogenerem elektrischen Widerstand als beim CZ-Verfahren. Auch diese Eigenschaft erleichtert die Herstellung von Hochspannungsbaulementen maßgeblich.

Zwei gravierende Nachteile des Zonenschmelzverfahrens sind jedoch, dass dieses wesentlich teurer ist als das Czochralski-Verfahren und momentan nur die Herstellung von Wafern bis zu 200 mm Durchmesser erlaubt.

Zur Produktion von 1 t monokristallinem Halbleitersilizium wurden vor einem Jahrzehnt noch ca. 1,7 t Polysilizium benötigt (ROSKILL 2011). Mittlerweile ist dieser Wert, je nach Kundenspezifikation und Ziehverfahren, auf 1,0 bis 1,5 t (SILTRONIC AG, frdl. schriftl. Mitt.), für diese Studie angenommen durchschnittlich 1,2 t gesunken. Bei der Produktion von monokristallinem Silizium aus Polysilizium treten dagegen kaum Produktionsverluste auf (SILICON PRODUCTS BITTERFELD GMBH & CO. KG, frdl. mdl. Mitt.).

Für die Herstellung eines 10,1 g schweren monokristallinen M6 Wafers (166,0 mm x 166,0 mm) wurden im Jahr 2022 ca. 14 g Polysilizium benötigt. Dieser Wert soll bis 2033 auf knapp über 10 g Polysilizium fallen (FISCHER et al. 2023).

Nach Fraunhofer ISE (2022) liegt der Bedarf zur Produktion von Siliziumstäben mit einer Kapazität von 1 MWp bei derzeit 3,15 t Rohsilizium bzw. 2,8 t Polysilizium.

Aufgrund der erreichbaren höheren Effizienzen von monokristallinen Solarzellen (derzeit bis 26,7 %) im Vergleich zu günstigeren multikristallinen Solarzellen (maximal 24,4 %) ist monokristallines CZ-Silizium inzwischen mit 97 % Marktanteil (FISCHER et al. 2023) das dominierende Material in der Solarindustrie. Die Antireflexbeschichtungen zur besseren Einkopplung des Sonnenlichts führen zum typischen dunkelblauen bis schwarzen Erscheinungsbild. Dazu sind die Solarzellen im Modul in einem Polymer verkapselt und liegen in der Regel unter einer Glasfrontseite. Bei der Rückseite der Module gibt es sowohl Varianten mit Glas als auch Polymerfolien. Die Leistungsgarantien vieler Hersteller beziehen sich auf 30 Jahre, was der erwarteten Modullebensdauer entspricht.

Typische Prozessschritte in der Weiterverarbeitung von Wafern zu Solarzellen sind Texturieren der Oberfläche, Erzeugung eines dotierten Emitters, Ätzen, Aufbringen von Passivierungs- und Antireflexschichten, Drucken der Metallfinger und Feuern der Kontakte. Zum Schluss werden jeweils 60, 72 oder 80 Zellen (bzw. neuerdings 120, 144 oder 160 Halbzellen) zu einem Solarmodul verbunden, das dann beispielsweise für ein Solarkraftwerk verwendet bzw. auf einem Dach montiert werden kann. Der Wirkungsgrad der Solarzellen hängt ganz entscheidend von der Qualität der verwendeten Materialien und Bauteile ab. Für das Ausgangsmaterial Polysilizium bedeutet dies, dass der Wirkungsgrad einer Solarzelle mit dem Reinheitsgrad des verwendeten Polysiliziums steigt.

Frühere Bestrebungen einiger Siliziumproduzenten, über verschiedene metallurgische Verfahren statt über den aufwendigen Umweg Polysilizium direkt hochreines, zumindest für die Solarindustrie geeignetes Siliziummetall (engl.: upgraded-metallurgical-grade silicon metal (UMG-Si)) mit 99,9 % Si (3N), besser 99,999 % Si (5N), idealerweise 99,99999 % Si (7N) zu erzeugen, werden aus Kosten- und Qualitätsgründen nicht weiterverfolgt. In vielen dieser Verfahren musste das Rohsilizium aufwendig mit Calcium und Säuren behandelt werden, um die enthaltenen Verunreinigungen zu entfernen. Aus durch-



Abb. 21: Montage von Solarzellen zu Solarmodulen im Werk Chemnitz der Heckert Solar GmbH, Foto: BGR.

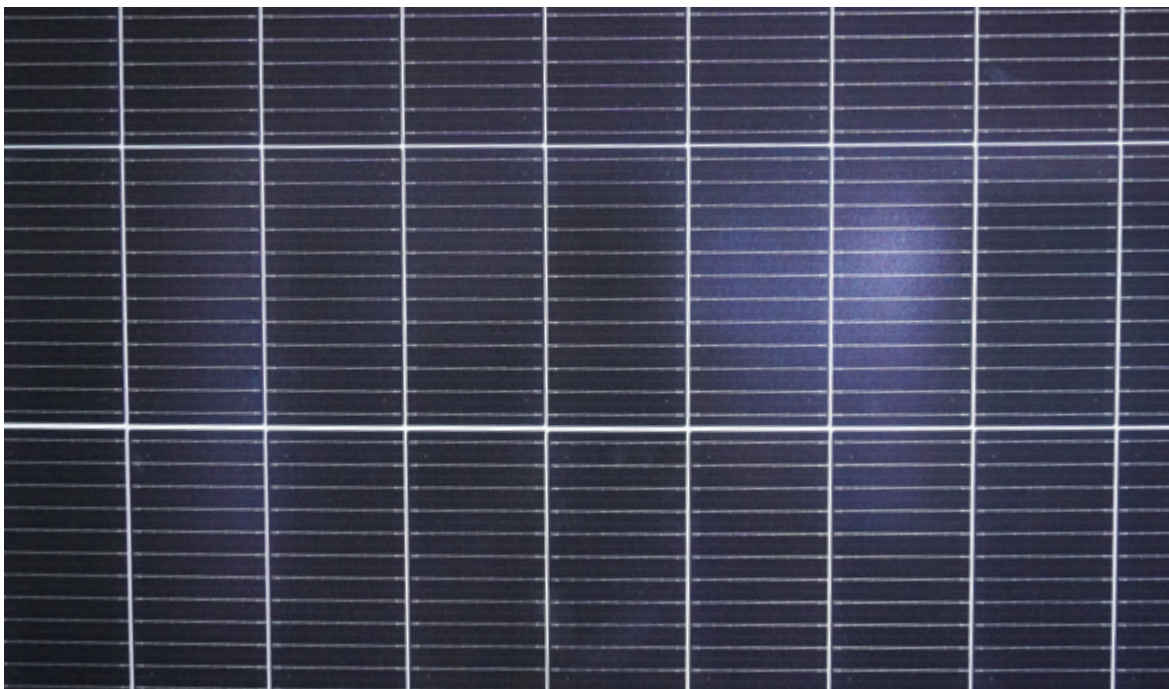


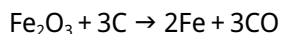
Abb. 22: Detailaufnahme eines Solarmoduls, hier das PV-Modul NEMO® 4.2 80 M mit bis zu 400 Wp Nennleistung und einer Effizienz von bis zu 20,5 % aus der Produktion der Heckert Solar GmbH in Chemnitz, bestehend aus 80 monokristallinen G12 Zellen im Halbzelldesign unter 3,2 mm hochtransparentem, antireflexbeschichtetem ESG-Glas, Foto: BGR.

schnittlich 2 t Rohsilizium wurde 1 t UMG-Si erzeugt. UMG-Si wurde z. B. durch Dow Corning Corp. und Solsil Inc./Globe Speciality Metals Inc. in den USA sowie Bécancour Silicon Inc. in Kanada produziert. Dow Corning war auch das erste Unternehmen, das 2006 kommerziell UMG-Si produzierte, in dem es Rohsilizium mit Polysilizium legierte. Bis heute hat sich jedoch auch kein anderes Verfahren für die UMG-Si Produktion kommerziell durchgesetzt, obwohl verschiedene Solarunternehmen, wie in der Frühphase Blue Square Energy oder CaliSolar, Inc. in den USA, Q-Cells AG in Malaysia oder Trina Solar Ltd. verkündeten, in die Produktion von UMG-Si einsteigen zu wollen.

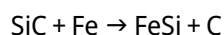
### 3.1.4 Ferrosilizium

Die Produktion von Ferrosilizium (FeSi) erfolgt sehr ähnlich der von Siliziummetall, nur unter Zugabe von Eisen und unter Verwendung wesentlich günstigerer Kohle-Pasteelektroden. Diese enthalten zum Teil Verunreinigungen, die bei der Produktion von Ferrosilizium oder Ferrosilikomangan eher tolerierbar sind als bei der Herstellung von Siliziummetall. Als Eisenträger werden Eisenerzpellets oder untergeordnet auch Stahlschrott oder Walzzunder verwendet. Eisen erleichtert die Reduktion von Quarz durch Kohlenstoff, wodurch auch der spezifische Energiebedarf (s. o.) deutlich sinkt. Je geringer der Siliziumgehalt im Ferrosilizium, desto geringer der Energiebedarf zu dessen Produktion.

Im Schmelzprozess wird das eingebrachte Eisenerz nach der Formel



zu flüssigem Eisen reduziert. Dieses reagiert mit dem während der Schmelze des Siliziums entstehenden festen Siliziumkarbid nach der Formel



Zudem verbinden sich auch in der Reaktionszone das flüssige Silizium (Si) und das flüssige

Eisen (Fe) zu flüssigem Ferrosilizium (FeSi), aber auch zu anderen, wesentlich weniger beständigen Eisensiliciden wie  $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{Fe}_5\text{Si}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{Si}$ .

Das am häufigsten eingesetzte Reduktionsmittel bei der Produktion von Ferrosilizium ist Koks bzw. Kokskohle, obwohl bei einigen speziellen Sorten untergeordnet auch niedrigaschige Kohle, Holzkohle und Holzhackschnitzel verwendet werden können. Nur in Brasilien wird ausschließlich Holzkohle, größtenteils aus Eukalyptusbäumen, zur Produktion von Ferrosilizium genutzt.

Je Tonne Ferrosilizium 75 % fallen bei der Abgasreinigung zwischen 200 und 300 kg Mikrosilika an, das als Binder und Füller genutzt wird (s. Kapitel 3.1.3). Das beim Brechen und Sieben des Ferrosiliziums entstehende Feingut wird zu Pulver aufgemahlen, mit einem Bindemittel versetzt und in Brikettform vertrieben. Zudem wird aufgemahlene und fein zerstäubtes Ferrosiliciumpulver angeboten.

Nach VAISH (1999) betrug der durchschnittliche Energie- und Rohstoffeinsatz zur Produktion von 1 t FeSi 65 % in einer Hütte in der Sowjetunion in einem Ofen mit 21 MVA-Anschlussleistung 7.639 kWh Strom, 1.678 kg Quarz, 765 kg Kokskohle und 402 kg Eisenspäne.

Nach ASIAN METAL lag der durchschnittliche Energie- bzw. Rohstoffbedarf zur Produktion von 1 t Ferrosilizium (FeSi 72 %, s. Kapitel 3.4.) in der chinesischen Provinz Ningxia in einem Ofen mit 25,5 MVA-Anschlussleistung bei (von RMB im Dezember 2022 in € umgerechnete Preise) ca. 8.000 kWh Strom (@ 7 ct/kWh), 35 kg Elektrodenmaterial (@ 673 €/t), 1,7 t Quarz (@ 26,40 €/t frei Hütte), 1,1 t Kokskohle (@ 237,50 €/t frei Hütte) sowie 330 kg Eisenerz/Schrott (> 70 % Fe) (@ 198 €/t frei Hütte). Durch zusätzliche Personal- und Verwaltungskosten in Höhe von 66 €/t ergab sich so im Dezember 2022 ein Gesteigungspreis für 1 t FeSi 72 % von umgerechnet 1.041 €. (Anm.: Das Unternehmen Ferroglobe plc geht von einem Durchschnittsverbrauch von 65 kg Elektrodenmaterial pro Tonne Ferrosilizium aus.)



Für die Produktion von FeSi 75 % ergab sich bei äquivalenten Mengen bzw. Preisen und bei einem Energiebedarf von ca. 8.300 kWh Strom im Dezember 2022 ein Gestehungspreis für 1 t FeSi 75 % von umgerechnet 1.072 €. Im gleichen Monat lag der Durchschnittspreis für FeSi 75 % in China bei umgerechnet 1.256 €/t bzw. 2.200 €/t in Europa (s. Kapitel 7).

Die ungefähre weltweite Kostenverteilung bei der Produktion von Ferrosilizium nach ROSKILL (2014) ist wie folgt: 28 % Personal und Verwaltung, 39 % Strom, 20 % Reduktionsmittel, 6 % Eisen, 5 % Quarz und 2 % Elektrodenmaterial.

### 3.1.5 Ferrosilikomangan

Ferrosilikomangan (FeSiMn), häufig auch nur als Silikomangan (SiMn) bezeichnet, wird zumeist aus den Ausgangsrohstoffen eisenreiche Manganschlacke, stückiges Ferrosilizium, Quarzkies bzw. Quarz und Koks bzw. niedriggaschige Kohle produziert. In Elektroniederschachtöfen werden diese Rohstoffe unter hohen Temperaturen (tief eingetauchte Söderberg-Elektroden) aufgeschmolzen und wird die dabei entstehende Legierung diskontinuierlich abgezogen.

Je nach gewünschter Zusammensetzung der Legierung werden nach Asian Metal in China pro t FeSiMn zwischen 500 und 2.000 kg Quarz, 400 und 2.500 kg Manganschlacke, 500 und 700 kg Koks bzw. Kohle, 10 und 50 kg Graphitelektroden sowie 6.900 und 11.000 kWh Strom benötigt. Die verbleibende Schlacke enthält zumeist viel Quarz (30 – 50 %), aber auch CaO (15 – 30 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9 – 30 %), MgO (3 – 15 %) sowie MnO<sub>2</sub> (2 – 17 %) und findet zumeist im Straßenbau Verwendung.

Nach KRUGER (2009) werden in Brasilien zur Produktion von 1 t FeSiMn im Durchschnitt 2.890 kg Manganerz, 647 kg Manganschlacke, 330 kg Quarz, 228 kg Kalkstein und 540 kg Hüttenkoks eingesetzt.

### 3.1.6 Ferrosilikomagnesium

Zur Herstellung von Ferrosilikomagnesium (FeSiMg) stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, wobei aufgrund seiner weiten Verfügbarkeit und seines niedrigen Preises meist gesinterter Dolomit als günstigste Magnesiumquelle sowie Ferrosilizium 75 % als Quelle für zugleich Eisen und Silizium gewählt werden. In einem Elektrolichtbogenofen oder Induktionsofen reagieren diese beiden Ausgangsrohstoffe über das Zwischenprodukt Magnesiumsilicid (Mg<sub>2</sub>Si) zu Ferrosilikomagnesium der gewünschten Zusammensetzung (meist mit 4 – 6 % Mg) sowie Siliziumdioxid als Beiprodukt. Bei diesem silikothermischen Prozess werden häufig Flussspat und Kalkstein als Flussmittel, Bauxit als Aluminiumträger sowie Ceroxid als Katalysator zugesetzt.

Wahlweise und teurer können auch Siliziummetall, Quarz, Holzkohle, Eisenerz (Hämatit) und Magnesiummetall in einem Elektrolichtbogenofen miteinander zu Ferrosilikomagnesium verschmolzen werden (Carbothermischer Prozess).

### 3.1.7 Ferrosilikochrom

Als Rohstoffe zur Herstellung von Ferrosilikochrom (FeSiCr) kommen Chromiterz, Quarz, Eisen und Koks zum Einsatz, die in einem Elektrolichtbogenofen in Form eines gut durchmischten Möllers kontinuierlich aufgeschmolzen werden.

Nach WEITZ (2015) liegt der Energie- bzw. Rohstoffbedarf zur Produktion von 1 t FeSiCr (@ 40 % Cr, 18 % Fe, 42 % Si) in Südafrika bei 1.145 – 1.208 t Chromiterz (@ 48 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 678 – 701 kg Koks (@ 83,5 % C), 1.323 – 1.401 kg Quarzit (@ 99,0 % SiO<sub>2</sub>), 53 kg Roheisenbarren sowie 6.638 kWh Strom. Je höher der Si-Anteil im FeSiCr, desto geringer ist sein Kohlenstoffgehalt und damit desto besser auch seine spätere Eignung zur Herstellung von niedrig-kohlenstoffhaltigem Ferrochrom (LCFeCr).

Sowohl das bei ca. 1.600 °C entstehende Ferrosilikochrom als auch die in verhältnismäßig gro-

Ben Mengen anfallende Schlacke (792 kg pro t FeSiCr nach WEITZ (2015); aus dem Chromiterz) werden in regelmäßigen Zeitabständen durch eine gemeinsame Öffnung abgezogen, wobei die Schlacke aufgrund ihrer niedrigeren Dichte aufschwimmt und später in ein Schlackenloch überläuft. Die abgekühlte FeSiCr-Legierung wird gebrochen und nach Kundenwunsch fraktioniert. Alternativ ist ein flüssiger Transport direkt in ein angeschlossenes Stahlwerk bzw. eine Ferrochromhütte möglich.

Bei der Reduktion von Siliziumdioxid zu Silizium im Rahmen der Ferrosilikochromherstellung entsteht sehr viel Kohlenmonoxid (1.384 kg CO pro t FeSiCr nach WEITZ 2015), das den Einsatz einer porösen Abdeckschicht, z. B. aus Gaskoks, und von halbgeschlossenen bis geschlossenen Öfen mit einem geeigneten Energierückgewinnungssystem notwendig macht. Zur Reduktion der Belastung mit Chrom(VI)-Oxiden wird in den meisten Ländern bei der Ferrosilikochrom- bzw. Ferrochromproduktion jedoch sowieso der ausschließliche Einsatz von geschlossenen Öfen gefordert (CUSANO et al., 2017).

### 3.2 Anforderungen an Quarzrohstoffe und Quarzlagerstätten

Die Herstellung von Siliziummetall und auch Ferrosilizium ist ein weitgehend schlackenfreies Verfahren, d. h. fast alle Verunreinigungen der Rohstoffe, sofern sie nicht in der Gasphase mit dem Reaktionsgas entweichen oder in geringen Mengen doch verschlacken (meist 1,5 – 2 Vol.-%), gehen in das Rohmetall bzw. die Legierung ein. Dort finden sich dann auch ca. 60 % des mit den Ausgangsrohstoffen eingebrachten Aluminiums bzw. Calciums, ca. 70 % des Phosphors und 90 – 100 % der Schwermetalle, z. B. Titan und Chrom.

TVEIT & MYRHAUG (2000) konnten allerdings nachweisen, dass ein Großteil der Schwermetalle, wie Arsen, Cadmium, Blei oder Kupfer, nicht durch den Quarz, sondern durch die Elektroden (und die eingesetzten Reduktionsmittel) in das Silizium eingebracht werden.

**Tab. 1: Grundlegende Anforderungen an die chemische Zusammensetzung von Quarzrohstoffen für die Produktion von Silizium bzw. Ferrosilizium (Quelle: verschiedene Literaturquellen und Produzentenangaben). Je nach Kundenspezifikation des Endproduktes sind auch niedrigere oder auch deutlich höhere Anforderungen möglich.**

	Rohsilizium	Ferrosilizium
SiO <sub>2</sub>	> 98,5 %, gewünscht > 99,0 %	> 96,0 %, gewünscht > 97,0 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,40 %, gewünscht < 0,30 %	< 0,4 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,20 %, gewünscht < 0,04 %	-
CaO	gewünscht < 0,20 %	gewünscht < 0,5 %
MgO	gewünscht < 0,20 %	-
TiO <sub>2</sub>	gewünscht < 0,01 %	möglichst gering
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	möglichst gering	< 0,1 %
B	möglichst gering	möglichst gering
As, S	möglichst gering	möglichst gering
LOI	< 0,20 %	-
Gleichbleibende chemische Zusammensetzung über einen langen Zeitraum		

Tab. 2: Spezifikationen von Quarzit aus Tana/Nordnorwegen für die Produktion von Silizium (Si) bzw. Ferrosilizium (FeSi), Quelle: ELKEM ASA (frdl. schriftl. Mitt.). TSI = Elkem Thermal Strength Index.

	Si-Grade 5005	FeSi-Grade 6010	FeSi-Grade 6045	FeSi-Grade 7045	FeSi-Grade 7010
SiO <sub>2</sub>	99,5 %				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤ 0,50 %	≤ 0,60 %	≤ 0,60 %	< 0,70 %	≤ 0,70 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤ 0,05 %	≤ 0,10 %	≤ 0,45 %	< 0,45 %	≤ 0,10 %
CaO	≤ 0,01 %	≤ 0,015 %	≤ 0,03 %	< 0,03 %	≤ 0,03 %
MgO	typisch 0,01 %				
TiO <sub>2</sub>	≤ 0,035 %	≤ 0,04 %	≤ 0,05 %	< 0,05 %	≤ 0,045 %
K <sub>2</sub> O	typisch 0,12 %	≤ 0,18 %	≤ 0,18 %	< 0,18 %	≤ 0,18 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	typisch 0,01 %				
B	typ. 4,9 ppm				
TSI	89,5				
Korngröße	30 – 100 mm	30 – 100 mm	30 – 100 mm	15 – 50 mm	15 – 50 mm



Abb. 23: Quarzit aus Tana in Nordnorwegen, selbst in Si-Qualität 5005, wird aufgrund seines erhöhten Ti-Gehaltes nur in wenigen Hütten zur Siliziumproduktion eingesetzt, Foto: ELKEM ISLAND für BGR. Stattdessen gilt derzeit Quarzit aus Ägypten, gefolgt von Quarzit aus der Türkei als qualitativ hochwertigster in Europa verfügbarer Siliziumrohstoff (ELKEM ISLAND, frdl. mdl. Mitt.).

Eine erhöhte Schlackenbildung führt zu einer Erhöhung des auch ansonsten bei der Erzeugung schon sehr hohen Energieverbrauchs und zusätzlich zu einem sinkenden Ausbringen.

Erhöhte und störende Anteile von Verunreinigungen, vorzugsweise Aluminium, Calcium und teilweise Magnesium, können aus anhaftenden Feinanteilen, Krusten oder auch aus

Tab. 3: Spezifikationen von Quarz bzw. Quarzkiesen aus Spanien für die Produktion von Silizium, Quelle: ERIMSA/ELKEM ASA (Firmenhomepage). TSI = Elkem Thermal Stress Index.

	Si 1705 Quarzkies	Si 1806 Quarzkies	LTQ-2560 Gangquarz
SiO <sub>2</sub>		typisch 99,7 %	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤ 0,17 %	≤ 0,18 %	≤ 0,60 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤ 0,05 %	≤ 0,06 %	typisch 0,036 %
CaO	typisch 0,007 %	typisch 0,015 %	typisch 0,004 %
TiO <sub>2</sub>	typisch 55 ppm	typisch 55 ppm	≤ 25 ppm
K <sub>2</sub> O	typisch 0,024 %	typisch 0,04 %	typisch 0,67 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	typisch 18 ppm	typisch 45 ppm	typisch 11 ppm
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	typisch 6 ppm	typisch 45 ppm	typisch 3 ppm
TSI	65	85	65
Korngröße	20 – 120 mm	20 – 120 mm	20 – 120 mm



Abb. 24: Entladung von Quarzkies aus Spanien für die Rohsiliziumproduktion im norwegischen Werk Holla der Wacker Chemie AG, Foto: BGR.

**Tab. 4: Spezifikationen von Quarzkiesen aus Frankreich (Département Dordogne) für die Produktion von Silizium, Quelle: IMERYS CERAMICS FRANCE.**

	Quarzkies
SiO <sub>2</sub>	typisch 99,8 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,5 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,05 %
CaO	< 0,01 %
TiO <sub>2</sub>	< 0,035 %
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	typisch 0,028 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	typisch 11 ppm
B	typisch 8 ppm
Korngröße	20 – 100 mm

der petrographischen Zusammensetzung der Siliziumrohstoffe resultieren. Feinkörnige Anteile (schluffig-sandig bis feinkiesig) verbacken leicht und erschweren dadurch mit zunehmendem Anteil die Entgasung des Ofens, stören damit den Ofengang und führen ebenfalls zu einem erhöhten spezifischen Energieverbrauch. Quarzsand ist dementsprechend zur Produktion von Silizium völlig ungeeignet.

Im Vergleich enthält der hydrothermale Quarz der norwegischen Lagerstätte Nasafjell (s. Anhang – Länderprofil Norwegen) durchschnittlich <0,01 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,06 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,001 % TiO<sub>2</sub>, <0,01 % MgO, 0,06 % CaO und 0,001 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ist also von besserer Qualität.

Zudem gelten folgende weitere Anforderungen:

Korngröße: 16 – 100 mm, gewünscht 40 – 120 mm, bei Öfen mit hoher Anschlussleistung (> 20 MW) auch 100 – 300 mm möglich Der Einsatz kleiner Fraktionen, z. B. von Quarzkiesen der Fraktion 8 – 40 mm, erfordert einen erhöhten Einsatz von Reduktionsmitteln Unter Kornanteil: < 5 %, besonders kritisch alle Fraktionen < 2 mm Abschlämbbare Bestandteile: < 0,05 %

Hohe mechanische Stabilität des Quarzes gegenüber Zerbröseln. Ideal: Formstabilität > 950 °C.

Hohe thermische Beständigkeit des Quarzes gegenüber Zerplatzen. Ideal: Temperaturbeständigkeit > 1.700 °C.

Für einen guten Ofengang sind besonders von Bedeutung:



**Abb. 25: Quarzkies aus dem benachbarten Österreich ist der bevorzugte Siliziumrohstoff der RW silicium GmbH in ihrer Siliziumhütte im grenznahen Pocking, Foto: BGR.**

- eine stetige und gleichmäßige Zusammensetzung des Möllers aus Quarzrohstoffen (Quarz, Quarzkies, Quarzit) und Kohlenstoffträgern (Kokskohle, Holzkohle, Holzhackschnitzel o. Ä.)
- die Vermeidung von hohen Feingutanteilen (kein Quarzsand, kein Kohlenstaub) im Möller
- die Einhaltung der optimalen Reaktionsflächenverhältnisse zwischen Quarz und Holzkohle/Koks
- die Gewährleistung eines hohen elektrischen Widerstands der Reaktionsgemenge
- eine hohe Trockenheit der Reduktionsmittel

Nach Auswertungen im Rahmen dieser Studie befinden sich die Silizium- bzw. Ferrosiliziumhütten versorgenden Quarzlagerstätten häufig weit entfernt von den Werksstandorten. Entfernungen von mehreren Hundert Kilometern sind keine Seltenheit. Rekordwerte von über 1.000 km Entfernung werden bei der Versorgung der Siliziumhütten auf Island aus der Türkei (8.200 km), Polen (3.200 km) und Nordnorwegen (2.300 km), alles per Schiff, sowie der Versorgung der Siliziumhütte in Ohio aus Alabama (1.100 km) per Zug erreicht. Die geringsten Entfernungen zwischen Quarzlagerstätten und Werken liegen in Polen (20 km) und Deutschland (60 km).

Zur Produktion von 1 t Rohsilizium werden zwischen 2,5 und 3,0 t Quarz (im Durchschnitt 2,7 t Quarz) und für die Produktion von 1 t Ferrosilizium je nach Qualität zwischen 1,5 und 2,0 t Quarz (im Durchschnitt 1,7 t Quarz) benötigt. Geht man von einer typischen durchschnittlichen Jahresproduktion einer Hütte von 40.000 t Rohsilizium bzw. 60.000 t Ferrosilizium aus, und soll deren Versorgung aus einem Quarzvorkommen für mindestens zehn Jahre sichergestellt werden, müssen geeignete Quarzvorkommen gewinnbare Vorräte von mindestens 1,1 Mio. t Quarz enthalten. Diese Vorratsmengen stehen in vielen Vorkommen (z. B. SIMCOA/Australien > 6 Mio. t, Ferroglobe/Mauretanien 2,2 Mio. t) zur Verfügung.

Aus einigen Ländern (Spanien, Frankreich, Polen, Provinz Xinjiang/China, USA) liegen dennoch Unternehmensberichte von unzureichenden Quarzrohstoffen vor, zum Teil in Bezug auf die verfügbaren Vorräte, häufiger jedoch hinsichtlich der Qualität des regionalen Quarzes. In diesen Fällen sind die Unternehmen gezwungen, aus weiter entfernten Regionen den benötigten Quarz zu beziehen (z. B. Kanada nach USA, Frankreich nach Island oder Mauretanien (ursprünglich geplant) nach Spanien). Eine weltweite Verknappung von Quarz als Rohstoff für die Siliziumproduktion wird nach übereinstimmenden Aussagen von Marktteilnehmern in Europa, China und Brasilien (frdl. mdl. Auskunft) jedoch nicht gesehen.

Wesentlich kritischer ist die Verfügbarkeit von hochreinem Quarz (> 99,997 % SiO<sub>2</sub> bzw. < 50 ppm Verunreinigungen) für die Herstellung der inneren Schicht der Tiegel zur Herstellung von monokristallinem Silizium nach dem Czochralski-Verfahren (EXAWATT & ANZAPLAN 2021). Hier gibt es z. B. derzeit in China nur drei Anbieter, davon zwei mit Bezugsquelle Spruce Pine in North Carolina/USA: Unimin/Sibelco und Quartz Corporation (JV Imerys/Norsk Mineral) sowie mit Hauptbezugsquelle Indien: Jiangsu Pacific Quartz Co., Ltd. Aufgrund der Kritikalität von hochreinem Naturquarz wird die Forschung zur Produktion von Schmelztiegeln aus synthetischem Quarz als Alternative deshalb nicht nur in China vorangetrieben. EXAWATT & ANZAPLAN (2021) weisen allerdings darauf hin, dass synthetischer Quarz wesentlich teurer ist als hochreiner Naturquarz selbst der höchsten Qualität und dass Tiegel nur aus synthetischem Quarz bei hohen Temperaturen instabil sind. Nach SILTRONIC AG (frdl. mdl. Mitt.) kommen dennoch bereits heute Tiegel vorwiegend aus Naturquarz oder wahlweise künstlichem Quarz zur Herstellung von monokristallinem Quarz zum praktischen Einsatz.

### 3.3 Spezifikationen und Verwendung von Silizium

Die Qualitätseinstufungen von Silizium, genauer Rohsilizium, richten sich sowohl nach dem minimalen Gehalt an Si im Metall (> 98,5 % Si, meist > 99 % Si) als auch den maximalen Gehal-

ten an Verunreinigungen (Fe, Ca, Al). Aus den sich hieraus ergebenden Si-Qualitäten leiten sich gemäß den häufigsten Verwendungsbereichen Qualitätsbezeichnungen wie „metallurgische Qualität“ (meist mit niedrigen Fe-Gehalten), „Aluminiumqualität“, „chemische Qualität“ (meist mit niedrigen Al-Gehalten), „elektronische Qualität“ oder auch „hochreine Qualität“ ab. Keine dieser Qualitätsbezeichnungen ist

Tab. 5: Typische Qualitätseinstufungen von Rohsilizium in den USA, nach ROSKILL (2014).

	Si (%) min.	Fe (%) max.	Ca (%) max.	Al (%) max.
Chemische Qualität	98,5	0,50	0,07	0,20
Primäre Aluminiumqualität	98,5	0,35	0,07	-
Sekundäre Aluminiumqualität	98,5	1,00	0,40	-
Hochreine Qualität	98,5	0,10	0,07	0,20

Tab. 6: Mindestanforderungen an Rohsilizium in Brasilien, nach VON KRUGER (2009).

	Si (%) min.	Fe (%) max.	Ca (%) max.	Al (%) max.
Rohsilizium	98,0	0,70	0,50	0,80

Tab. 7: Qualitätsanforderungen an Rohsilizium in China, nach ASIAN METAL.

Qualität	Si (%) min.	Fe (%) max.	Al (%) max.	Ca (%) max.	Typischer Verwendungszweck
Si1101 (1-1-01)	99,79	0,10	0,10	0,01	Al-Legierungen
Si2202 (2-2-02)	99,58	0,20	0,20	0,02	Al-Legierungen
Si3303 (3-3-03)	99,37	0,30	0,30	0,03	Al-Legierungen
Si4110 (4-4-1)	99,40	0,40	0,10	0,10	Silikone
Si4210 (4-2-1)	99,30	0,40	0,20	0,10	Silikone, Polysilizium
Si4410 (4-4-1)	99,40	0,40	0,40	0,10	Al-Legierungen, Polysilizium
Si5210 (5-2-1)	99,20	0,50	0,20	0,10	Al-Legierungen, Polysilizium
Si5530 (5-5-3)	98,70	0,50	0,50	0,30	Al-Legierungen, Polysilizium

Rohsilizium der Qualitäten Si1101, Si2202 und Si3303 darf zudem max. 0,003 % P, 0,03 % Ni, 0,03 % Mn und 0,02 % Ti (Si3303 max. 0,03 % Ti) enthalten. Rohsilizium der Qualitäten Si4410 und Si5530 darf max. 0,004 % P enthalten.



**Abb. 26: Die chinesischen Qualitätsbezeichnungen für Silizium haben sich weltweit durchgesetzt wie hier an einer Lagerbox für die Sorte 2202, die in der Produktion von Aluminiumlegierungen Verwendung findet, Foto: BGR.**

jedoch definiert. Sie können von Land zu Land und von Produzent zu Produzent variieren (s. Tab. 5 – 7)!

Rohsilizium der Qualitäten Si1101, Si2202 und Si3303 darf zudem max. 0,003 % P, 0,03 % Ni, 0,03 % Mn und 0,02 % Ti (Si3303 max. 0,03 % Ti) enthalten. Rohsilizium der Qualitäten Si4410 und Si5530 darf max. 0,004 % P enthalten.

Siliziumpulver finden Verwendung in der Feuerfest-, Keramik-, Chemie- und Halbleiterindustrie. Sie benötigen Reinheiten von > 99,99 % Si und < 0,01 % Fe, Al bzw. Ca. Die tolerierbaren Gehalte an P, C, S, Cr, Cu, Zn, Ni und Pb liegen zwischen 0,03 und 0,0003 %.

### 3.3.1 Silane und Silikone

Die Produktion von Chemikalien auf Siliziumbasis (Silikone, Silane u. v. a. m.) war nach CRU INTERNATIONAL LTD. (2023) mit einem Anteil von 36,4 % (bzw. knapp 1,4 Mio. t) im Jahr 2022 der größte Verwendungsbereich für Siliziummetall

weltweit. Vorhergesagt wird bis 2027 ein Mengenwachstum von 19,8 % bzw. einem deutlich reduzierten weltweiten Verbrauchsanteil von 28,3 %.

SMM – Shanghai Metals Market nennt in seinen Webinaren einen Anteil von ca. 38 % des weltweit produzierten Rohsiliziums, das im Jahr 2022 in der Silikonproduktion Verwendung fand.

Zum Vergleich schätzte das Unternehmen FerroGlobe plc (s. o.) im Jahr 2022 den weltweiten Verwendungsanteil von Silizium für die Silikonproduktion wesentlich höher auf ca. 48 %. Hier von entfielen je ca. 25 % auf den Automobilsektor (s. u.) und den Medizin-/Kosmetikbereich (s. u.), je ca. 20 % auf den Bausektor (s. u.) und den Elektronikbereich (s. u.) sowie 10 % auf andere Sektoren (s. u.) (FERROGLOBE 2022).

Der Marktbegleiter Elkem ASA kommt auf einen noch höheren Verwendungsanteil von ca. 50 % des weltweit produzierten Siliziums für die Silikonherstellung. Der Gesamtmarkt für Silikone wird auf 20 Mrd. US\$ geschätzt (frdl. mdl. Mitt.).



MALVEDA et al. (2020) berechneten für das Jahr 2019 eine weltweite Silikonachfrage in Höhe von rund 2,5 Mio. t. Für die kommenden Jahre bis 2024 sagten sie ein Wachstum der weltweiten Silikonachfrage von 23,2 % auf rund 3,1 Mio. t vorher. Die jährliche Wachstumsrate in diesem Zeitraum soll bei 4,2 % liegen.

Nach ASIAN METAL (2023) lag in China der Verwendungsanteil von Silizium für die Produktion von Silikonen im Jahr 2022 bei 42,6 %.

Nach überschlägigen Berechnungen der DERA lag der weltweite Verwendungsanteil von Silizium für die Herstellung von Silanen und Silikonen im Jahr 2022 bei ca. 38 % und wird bis 2027 bei einem Wachstum von 4,2 % pa bei diesem relativen Anteil verbleiben.

Silane sind im Gegensatz zu Siloxanen Moleküle auf Si-H-Basis, die chemisch instabil sind, leicht brennen oder sogar in Kontakt mit dem Sauerstoff aus der Luft explodieren. Silane sind in der Lage, synthetische Harze mit mineralischen Füllstoffen unter Bildung eines wasserdichten Produktes zu verbinden und werden deshalb bevorzugt in der Produktion von Anstrich- und Klebmitteln, Dichtungs- und Gummimassen, Thermoplasten sowie glasfaserverstärkten Kunststoffen eingesetzt.

Siloxane sind chemische Verbindungen, in denen im Gegensatz zu den Silanen die Siliziumatome nicht untereinander, sondern durch genau ein Sauerstoffatom mit ihrem benachbarten Siliziumatom verknüpft sind. Oligomere (mehrfach verknüpfte) oder polymere (vielfach verknüpfte) Siloxane mit organischen Molekülgruppen (Aliphate, Aromate, Epoxid- oder Aminogruppen u. v. a. m.) heißen Silikone. Das am häufigsten verwendete Silikon ist Polydimethylsiloxan.

Silikone werden je nach ihrem Molekulargewicht, dem Ausmaß ihrer Verknüpfung und der Art und Anzahl ihrer organischen Molekülgruppen in drei Gruppen unterteilt (MALVEDA et al. 2020). Hierbei gilt: je länger die Kettenlänge der Silikone, desto größer ihre Viskosität. Die Unterteilungen der Silikone sind:

- Fluide (43 % Marktanteil) mit < 3.000 Dimethylsiloxanstrukturen, weiter unterteilbar in hochviskose Fluide, niedrigviskose Fluide sowie Gummiharze, im Wesentlichen für medizinisch-pharmazeutische (Brustimplantate, Dentaltechnik), kosmetische (Make-up) und Körperpflegeartikel (Haarpflegeprodukte, Deodorants, Hand- und Körperlotionen), aber auch für Polituren, Kühlmittel, Schmiermittel, hydraulische Flüssigkeiten, Beschichtungen, Netzmittel, Trennmittel, Entschäumer u. v. a. m. Silikonfluide sind die Grundlage zur Fertigung von Emulsionen, Dispersionen, Fetten und Gemischen.
- Silikonharze (48 % Marktanteil) mit 3.000 – 10.000 Dimethylsiloxanstrukturen als Ausgangsprodukte für Silikonelastomere, im Wesentlichen für Anwendungen in der Bau- und Automobilindustrie im Temperaturbereich zwischen -90 °C und +300 °C.
- Harze (9 % Marktanteil) mit > 10.000 Dimethylsiloxanstrukturen, weit vorwiegend für Einsatzzwecke in der Bauindustrie (z. B. wasserabweisende Oberflächenbeschichtungen), aber auch in der Elektroindustrie (Isolatoren).

Silikone besitzen hervorragende technische Eigenschaften, was ihre chemische und physikalische Reaktionsträgheit, thermische Stabilität, geringe Veränderung ihrer Viskosität bei sich ändernden Temperaturen oder Drücken, geringe Oberflächenspannung, Beständigkeit gegenüber Sauerstoff, Verhalten bei niedrigen Temperaturen, elektrische Isolierung, wasserabweisende Wirkung sowie hohe Verdichtbarkeit angeht. Silikone können zudem leicht chemisch durch Austausch ihrer organischen Molekülgruppen, aber auch von Wasserstoff oder Hydroxidgruppen variiert werden, um so unterschiedliche Eigenschaften für unterschiedliche Anwendungszwecke zu generieren. Schätzungen gehen von weit über 10.000 Produkten aus, in denen Silikone der unterschiedlichsten Art enthalten sind.

Die Produktion von Silikonen erfolgt zumeist durch die Müller-Rochow-Synthese, die 1940



**Abb. 27: Silikonöle werden unter anderem in der Kosmetik- und Konsumgüterindustrie verwendet, Foto: WACKER CHEMIE AG (mit frdl. Genehmigung).**

fast gleichzeitig in Deutschland und in den USA entwickelt wurde. Sie beruht auf einer Reaktion von Siliziumpulver (50 – 500 µm) mit Chlormethan (Methylchlorid) in einem Wirbelschichtreaktor bei Temperaturen von 260 bis 320 °C und Drucken von 0,1 bis 0,5 MPa. Zur Produktion von 1 t Silikon werden durchschnittlich 0,45 t Silizium eingesetzt. Als Produkt der Synthese bildet sich eine Silanmischung aus Dimethyldichlorsilan (ca. 74 %), aber auch Methyltrichlorsilan (ca. 9 %), Trimethylchlorsilan (ca. 6 %), Dimethyltetrachlordisilan und anderen Silanen. Die einzelnen Silane müssen durch Rektifikation voneinander getrennt werden, wonach die unerwünschten Silane durch gezielte Reaktionen möglichst ebenfalls in Dimethyldichlorsilan umgewandelt werden. Das Dimethyldichlorsilan wird danach zu Dimehylsilanediol hydrolysiert, das dann in lineare und zyklische Polysiloxane kondensiert.

Die weltweit größten Produzenten von Silikon sind nach MALVEDA et al. (2020) die Unternehmen

- Dow Silicones Corporation/USA (drei Siloxanwerke, 18 Silikonwerke)
- Elkem Silicones/Frankreich (zwei Siloxanwerke, acht Silikonwerke)
- Wacker Chemie AG/Deutschland (drei Siloxanwerke: Burghausen, Nünchritz und Zhangjiagang, 15 Silikonwerke, teils als JV)
- Momentive Performance Materials Inc./USA (drei Siloxanwerke, 13 Silikonwerke)
- Shin-Etsu Chemical Company Ltd./Japan (zwei Siloxanwerke, 13 Silikonwerke)

In China sind die Unternehmen Hoshine Silicon Industry Co., Ltd. (nach Menge weltweit #1) und Zhejiang Xin'an Chemical Group Co., Ltd. (Wynca-Gruppe, nach Menge in China #2) in der Silikonproduktion führend.

In Deutschland gehören zu den Silikonproduzenten neben der Wacker Chemie AG mit Standorten in Burghausen und Nünchritz noch die Evonik Industries AG in Essen und Geesthacht, die Schill & Seilacher Chemie GmbH in Hamburg und Pirna, die Dow Silicones Deutschland GmbH in Wiesbaden, die Momentive Performance Materials GmbH in Leverkusen, die CHT Germany GmbH in Kirchberg, Dusslingen, Oyten und Geretsried, die Kömmerling Chemische Fabrik GmbH in Pirmasens, die Gummiwerk KRAIBURG GmbH & Co. KG in Waldkraiburg, die Henkel AG & Co. KGaA an verschiedenen Produktionsstandorten, die Elkem Silicones Germany GmbH in Lübeck, die Hermann Otto GmbH in Fridolfing, die PCI Augsburg GmbH in Augsburg sowie die Tremco CPG Germany GmbH in Bodenwöhr.

### 3.3.2 Aluminiumlegierungen

Der über viele Jahrzehnte vorherrschende, aber im Vergleich zu den beiden anderen großen Verwendungsbereichen weniger stark wachsende Verwendungszweck für Rohsilizium ist die Produktion von Al-Si-Legierungen, mit Aluminium entweder aus Bauxit (Primäraluminium) oder aus Recyclingmaterial (Sekundäraluminium). Hatte dieser Verwendungszweck im Jahr 2000 noch einem weltweiten Marktanteil von 59 %,

war er bis zum Jahr 2013 auf ca. 47 % gefallen (ROSKILL 2014). Für das Jahr 2022 berechnete CRU (CRU INTERNATIONAL LTD., 2023) den weltweiten Marktanteil des Einsatzes von Si für die Produktion von Al-Legierungen auf 31,7 % und geht für das Jahr 2027 bei einem Mengenanstieg von zwar 14,2 % dann von einem weltweiten Marktanteil von nur noch 23,4 % aus. Dies bedeutet, dass die beiden anderen Hauptverwendungsbereiche von Silizium in den kommenden Jahren wesentlich stärker wachsen werden (s. u.).

Zum Vergleich schätzte Ferroglobe plc, einer der weltweit führenden Silizium- und Ferrosiliziumproduzenten, im Jahr 2022 den weltweiten Verwendungsanteil von Silizium für Al-Legierungen auf ca. 35 %. Hiervon entfielen ca. 75 % auf den Automobilsektor (s. u.), 10 % auf den Bau-sektor (s. u.) und 15 % auf andere Sektoren (s. u.) (FERROGLOBE 2022). Der Marktbegleiter Elkem ASA geht von einem weltweiten Verwendungsanteil von Silizium für Al-Legierungen von ca. 30 % aus. SMM – Shanghai Metals Market nennt in seinen Webinaren einen Verwendungsanteil von ca. 27 % des im Jahr 2022 weltweit produzierten Siliziums für Al-Legierungen.

Nach ASIAN METAL (2023) betrug in China der Verwendungsanteil von Silizium für Al-Legierungen im Jahr 2022 37,5 %.

Nach überschlägigen Berechnungen der DERA lag der weltweite Verwendungsanteil von Silizium für Al-Legierungen im Jahr 2022 bei ca. 35 % und wird bis 2027 trotz leichten Wachstums von 2,6 % pa auf ca. 33 % fallen.

Die meisten Al-Legierungen beinhalten Silizium. Silizium erhöht die Fließfähigkeit von Al-Legierungen und reduziert die Schrumpfung, was zu einer verbesserten Gießbarkeit und Schweißbarkeit führt. Silizium muss dabei dem flüssigen Aluminium als Metall zugefügt werden, da ein Gehalt von mehr als 1 % Fe den Al-Guss gefährdet. Weder die Zugabe von Quarz noch von Ferrosilizium sind also Alternativen. Ein nicht zu hoher Anteil von Eisen im Rohsilizium ist zu beachten. Da Al-Legierungen geringe Festigkeiten und Formbarkeiten besitzen, werden ihnen

häufig noch andere Metalle, besonders Magnesium und Kupfer, hinzulegiert, um diese Eigenschaften zu verbessern.

Der Si-Gehalt in Al-Legierungen variiert zwischen 0 und 23 % und liegt im weltweiten Durchschnitt bei 2,9 %. Alle Al-Legierungen mit einem erhöhten Si-Anteil sind Al-Gusslegierungen mit einem weltweiten Durchschnittsgehalt von 8 % Si. Al-Legierungen für eine geschmiedete oder stranggepresste Verarbeitung haben dagegen einen wesentlich geringeren Si-Gehalt zwischen 0 und 1 % bzw. im weltweiten Durchschnitt 0,5 %. Zwar macht Gussaluminium nur rund 25 % der Weltaluminiumproduktion aus, ist aber vorwiegend für die Si-Nachfrage in diesem Sektor verantwortlich (ROSKILL 2014).

Mit zunehmender Verwendung von Sekundär-aluminium sinkt der Bedarf an Silizium, da dieses schon in den in den Markt zurückfließenden Al-Legierungen enthalten ist.

Die Al-Legierungen mit dem höchsten Si-Anteil sind bisher diejenigen für Getriebe und den Motorblock von Fahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsmotoren. Sie werden mengenmäßig angeführt von der Al-Legierung A356, die durchschnittlich 7 % Si enthält und die regelmäßig im Guss von Zylinderköpfen, Krümmern und Rädern zum Einsatz kommt. Noch höhere Si-Gehalte enthalten die Al-Legierungen A380 (bis 9,5 % Si, für den Guss von Halterungen, Gehäusen, Motorenteilen und Lenkgetrieben) sowie A383 (bis 11,5 % Si, für den Guss von Motorblöcken, Getriebegehäusen und -teilen sowie Kraftstoffmessgeräten).

Bei Elektroautos besitzen von den in China gefertigten Fahrzeugen derzeit nur 43 % ein Batteriegehäuse aus Aluminium, davon nur 7 % mit einer Schale aus Al-Guss. Und auch für zukünftige Batteriewannen sowie Festkörperbatterien wird kein erhöhter Al-Bedarf vorausgesagt. Es verbleibt die Verwendung von Aluminium für die Karosserien von Elektroautos, die das Fahrzeuggewicht deutlich reduzieren helfen, die aber nicht gegossen werden. Die entsprechenden Al-Legierungen enthalten nur 0,6 – 0,8 % Si.

Nach der Automobilindustrie ist der Maschinen- und Anlagenbau der weltweit zweitgrößte Konsument von Silizium für Al-Legierungen, jedoch nur mit einem Marktanteil von ca. 15 %. Im Maschinen- und Anlagenbau werden Al-Legierungen mit einem erhöhten Si-Anteil für den Guss von Bauteilen für Heizkörper, Verdampfer, Klimaanlage, Kühlgeräte, Kühlleitungen und -motoren verwendet.

Nach ROSKILL (2014) entfielen im Jahr 2013 von den damals in der Al-Legierungsherstellung verwendeten rund 1,1 Mio. t Siliziummetall (nach CRU waren es im Jahr 2023 ca. 1,2 Mio. t Siliziummetall) ca. 60 % auf den Transportsektor (Automobilindustrie, sehr weit untergeordnet auch Eisenbahnbau, Flugzeugbau und Schiffsbau), 13 % auf den Maschinen- und Anlagenbau, je 7 % auf die Bereiche Haushaltsgüter/Küchengeräte (z. B. Waschmaschinen), Elektronik (Leitungen und Kabel) sowie Baugewerbe (z. B. Tür- und Fensterrahmen), 3 % auf den Containerbau und 3 % auf andere Bereiche (Stahlherstellung, Produktion von Calciummetall, Sportgeräte, Batterien, Waffen).

### 3.3.3 (Polysilizium) Solar- und Halbleitersilizium

Der Verwendungsbereich von Silizium, für den allgemein das stärkste Wachstum vorausgesagt wird, ist die Veredelung von Rohsilizium zu Polysilizium und dessen Weiterverarbeitung zu Reinsilizium für die Solar- und Halbleiterindustrie. Lag nach ROSKILL (2014) der Verwendungsanteil von Silizium für die Polysiliziumproduktion im Jahr 2010 noch bei 3 %, erreichte er im Jahr 2013 15 % und lag nach CRU INTERNATIONAL LTD. im Jahr 2022 bereits bei 31,9 % (inkl. der Herstellung von Zwischenprodukten wie TCS). Für das Jahr 2027 sagt CRU bei einem Mengenwachstum von 233,6 % für diesen Sektor einen weltweiten Verbrauchsanteil von 48,3 % voraus. Damit würde die Polysiliziumproduktion der mit Abstand weltweit bedeutendste Verwendungsbereich von Siliziummetall werden.

SMM – Shanghai Metals Market nennt in seinen Webinaren für das Jahr 2022 einen Anteil von ca. 27 % des weltweit produzierten Siliziums, der in der Polysiliziumproduktion Verwendung findet.

Zum Vergleich schätzte das Unternehmen Ferroglobe plc (s. o.) im Jahr 2022 den weltweiten Verwendungsanteil von Silizium für die Weiterverarbeitung zu Polysilizium jedoch nur auf ca. 15 %. Hiervon wurden rund 90 % zu Solarsilizium und 10 % zu Halbleitersilizium veredelt (FERROGLOBE 2022). Das Unternehmen Elkem ASA ging ähnlich davon aus, dass im Jahr 2022 rund 10 % des Siliziums in der Produktion von Polysilizium Verwendung fand.

Nach EU (2020) lag im Jahr 2019 der weltweite Verwendungsanteil von Silizium für die Herstellung von Halbleitersilizium bei 1,3 % und für Solarsilizium bei 9,0 %.

Nach ASIAN METAL (2023) betrug im Jahr 2022 der Verwendungsanteil von Silizium für die Polysiliziumherstellung in China 19,8 %.

Unter Annahme einer weltweiten Polysiliziumproduktion in Höhe von 978.000 t im Jahr 2022 (s. Kapitel 5.2) und einem Durchschnittsbedarf von ca. 1,1 t Rohsilizium zur Herstellung von 1 t Polysilizium (WACKER CHEMIE AG, frdl. schriftl. Mitt.) ergibt sich für diesen Sektor ein Siliziumbedarf von ca. 1,08 Mio. t, entsprechend ca. 25,0 % der gesamten, in diesem Jahr produzierten Rohsiliziummenge.

Polysilizium in Rohform dient der Produktion multikristalliner (polykristalliner) Solarzellen, die derzeit aber kaum noch nachgefragt werden. In wesentlich größerem Umfang findet Polysilizium nach Veredelung nach den im Kapitel 3.1.3 beschriebenen Verfahren als Reinsilizium zur Herstellung von Wafern für die Solar- oder auch Halbleiterindustrie Verwendung. Lag nach Schätzungen des U.S. Geological Survey im Jahr 2002 der relative Anteil von Halbleitersilizium zu Solarsilizium noch bei 71 %, war dieser Anteil im Jahr 2007 bereits auf 43 %, im Jahr 2010 auf 17 %, im Jahr 2011 auf 11 % und im

Folgejahr auf 7 % gesunken. Für das Jahr 2013 schätzte ROSKILL (2014) den Anteil jedoch wieder auf 24 %. Gegenwärtig gehen Marktteilnehmer pauschal davon aus, dass ca. 10 % des weltweit produzierten Polysiliziums nach Veredelung in der Produktion von Wafern für die Halbleiterherstellung Verwendung finden. Dieser Wert ist aufgrund des starken Wachstums der Solarindustrie jedoch zu hoch und liegt nach Berechnungen der DERA bei nur 5 %.

Nach einer Faustformel liegt der (seit Jahren ständig sinkende) Bedarf zur Produktion von 1 Watt Solarstrom bei (derzeit) ca. 2,6 g (andere Quellen: 2,2 – 2,9 g) Polysilizium. Nach Statistiken der International Renewable Agency (IRENA 2023) sind im Jahr 2022 weltweit rund 189 GWp PV-Kapazität zugebaut worden, was einem Polysiliziumbedarf von rund 490.000 t entsprechen würde. Im gleichen Jahr lag die weltweite Polysiliziumproduktion jedoch bei knapp 980.000 t und die weltweite Polysiliziumkapazität bei rund 1,35 Mio. t. Für 2023 wird ein weltweiter Zubau von mindestens 350 GWp PV-Kapazität erwartet (vgl. Kapitel 6).

### 3.3.4 Andere Verwendungsbereiche

Neben den drei genannten Hauptverwendungsbereichen Produktion von Silikonen, Herstellung von Aluminiumlegierungen und Veredelung von Polysilizium zu Solar- und Halbleitersilizium hat Siliziummetall noch weitere, allerdings wesentlich unbedeutendere Anwendungen. Zu diesen zählen:

- In der Eisen- und Stahlindustrie wird Silizium, natürlich noch in wesentlich größerem Umfang Ferrosilizium (s. Kapitel 3.4.1) als Legierungselement eingesetzt. Silizium wirkt als Desoxidations- und Reduktionsmittel im Stahl und verbessert dessen Zugfestigkeit, Streckgrenze und Härte sowie dessen elektrischen Eigenschaften. Bei der Gusseisenherstellung reduziert Silizium die Stabilität des Eisencarbids und unterstützt die Bildung von Kohlenstoff in Graphitform. Hierdurch

wird das Gusseisen geschmeidiger und fließfähiger und lässt sich leichter bearbeiten.

- In der Produktion von Superlegierungen wird Silizium gegenüber Ferrosilizium bevorzugt, weil Rohsilizium wesentlich weniger, ggf. unerwünschte Nebenmetalle enthält. Die Einsatzmengen sind jedoch sehr gering und selbst hoch Si-haltige Superlegierungen enthalten maximal 2,75 % Si.
- Pyrogenes Silizium (engl.: fumed silica) ist ein amorphes Siliziumdioxid im Korngrößenbereich 7 – 20 nm. Zur Herstellung wird Silizium mit Salzsäure zu Siliziumtetrachlorid halogenisiert und dieses danach mit Knallgas bei > 1.500 °C pyrolysiert. Die sich kettenartig aneinanderlagernden und dreidimensional verzweigenden Nanopartikel aus Siliziumdioxid besitzen eine extrem niedrige Schüttdichte bei gleichzeitig sehr großer Oberfläche. Aufgrund des Fehlens metallischer Verunreinigungen besitzen sie zudem einen hohen elektrischen Widerstand. Das entstandene pyrogene Silizium ist hydrophil, muss aber vor seiner Hauptverwendung als Füllstoff in Silikonelastomeren noch mit Silanen hydrophobiert werden. Zudem dient pyrogenes Silizium, das jährlich von nur wenigen Unternehmen in einer Menge von ca. 300.000 t produziert wird, als Hochleistungstixotropierungsmittel in Harzen, Beschichtungen sowie Kleb- und Dichtstoffen (WIETLISBACH et al. 2021).
- Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) ist eine in den 1960er Jahren entwickelte, sehr leistungsstarke (und teure) technische Keramik, die in Hochtemperaturanwendungen mit Schockbeeinflussung (z. B. in Wendeschneidplatten oder Laufringen in Lagern), aber auch in der Halbleitertechnik zum Einsatz kommt. Ein wachsendes Anwendungsgebiet wird in der Ableitung von Hitze und Isolierung von Hochspannungen im Rahmen der Elektromobilität gesehen. Siliziumnitrid wird meist durch direkte Reaktion zwischen Siliziummetallpulver mit Stickstoff bei Temperaturen zwischen 1.000 und 1.400 °C und bei sehr hohen Drucken

von 2 kbar hergestellt, wobei die sich dabei entwickelnde, stark exotherme Reaktion nur schwer kontrollierbar ist.

- Sialone sind hochfeuerfeste Spezialkeramiken, die aus Siliziumnitrid, Aluminium, Aluminiumnitrid, Quarz und teils Seltenerd-Oxiden hergestellt werden. Sie besitzen hohe Wärmeleit- und Verschleißfestigkeit sowie eine hohe mechanische Festigkeit. Sialone werden in großem Umfang in der Nichtmetall- und dort v. a. in der Aluminiumindustrie verwendet. Auch in der Erdöl- und Erdgasindustrie sowie mit Seltenen Erden dotiert in der LED-Herstellung kommen sie zum Einsatz.
- In der Pyro- und Sprengtechnik findet Siliziumpulver zusammen mit Bleioxid und Polymethylmethacrylat als Verzögerungssatz Anwendung. Die pyrotechnische Mischung brennt so langsamer und mit definierter Geschwindigkeit ab.
- Silizium lässt, ähnlich wie Germanium, infrarotes Licht im Wellenbereich zwischen 1,2 und 7  $\mu\text{m}$  durch, ist aber kostengünstiger in der Herstellung und besitzt ein geringeres Gewicht. Es findet daher Einsatz in der Spektroskopie, in mittelwelligen Infrarot-Lasersystemen (MWIR-Laser) und in der Terrahertz-Bildgebung.
- In Lithium-Ionen-Batterien soll Silizium – in amorpher Form bzw. als Nanopulver – zukünftig Graphit als Anodenmaterial ersetzen. Silizium (in Verbindung mit Kohlenstoff) bietet dabei u. a. die Vorteile geringerer  $\text{CO}_2$ -Emissionen bei der Produktion (bei Nutzung regenerativer Energien), höherer Speicherkapazität (= größere Reichweite), wesentlich kürzerer Ladezeiten, erhöhter Zyklenstabilität (= Langlebigkeit des Anodenmaterials in Batteriezellen) sowie verbesserter Sicherheit.

### 3.4 Verwendung und Spezifikationen von Ferrosilizium

Nach ROSKILL (2014) wurden im Jahr 2013 rund 64 % des weltweit produzierten Ferrosiliziums in der Stahlindustrie, untergeordnet auch in der Gusseisenindustrie (25 %) und zur Herstellung von Magnesium (10 %) eingesetzt. Nur geschätzt ca. 1 % des Ferrosiliziums fand Verwendung in anderen Bereichen. Im Jahr 2000 gingen 59 % des produzierten Ferrosiliziums in die Stahlindustrie und 36 % in die Gusseisenindustrie, im Jahr 2005 waren es 57 % bzw. und im Jahr 2010 62 %.

Zum Vergleich schätzte Ferroglobe plc, einer der weltweit führenden Silizium- und Ferrosiliziumproduzenten, im Jahr 2022 den weltweiten Verwendungsanteil von Ferrosilizium in der Stahlindustrie auf rund 60 % und in der Gusseisenindustrie auf ca. 40 % (FERROGLOBE 2022).

Nach ASIAN METAL (2023b) betrug im Jahr 2022 in China der Verwendungsanteil von Ferrosilizium für die Stahlproduktion 78 %, für die Eisengussherstellung 5 % und für die Produktion von Magnesiummetall 17 %.

Basierend auf den o. g. Einzeldaten und der Produktion in den Ländern ergibt sich nach Berechnungen der DERA, dass Ferrosilizium im Jahr 2022 weltweit zu rund 72 % in der Stahlindustrie, zu 16 % in der Gusseisenindustrie, zu 12 % in der Magnesiumherstellung sowie nur sehr untergeordnet in anderen Bereichen Verwendung fand.

Die Qualitätseinstufungen von Ferrosilizium richten sich nach dem Gehalt an Silizium in der Legierung, wobei die weltweit am häufigsten produzierten Ferrosiliziumqualitäten „Standard Ferrosilizium 75 %“ (FeSi 75 % mit 72 – 75 % Si, max. 1,5 – 2,0 % Al, max. 0,1 – 0,2 % C), mit großem Abstand gefolgt von Ferrosilizium 65 % (FeSi 65 %) und Ferrosilizium 45 % (FeSi 45 %) sind. Letztere Qualitäten sind vor allem in den Staaten der ehemaligen Sowjetunion noch weit

Tab. 8: Typische Qualitäten und Verwendungsbereiche von Ferrosilizium in den USA, nach U. S. GEOLOGICAL SURVEY.

	Si (%)	Si (% , durchschnittlich)	Verwendungszweck
Silvery pig iron	5 – 24	18	Eisenguss
FeSi 50 %	22 – 55	48	Eisenguss, untergeordnet für niedrig-legierte Karbonstähle
FeSi 75 %	56 – 95	76	Eisenguss, Stahlproduktion

Tab. 9: Mindestanforderungen an Ferrosilizium in Brasilien, nach VON KRUGER (2009).

	Si (%) min.	Ca (%) max.	Al (%) max.	C (%) max.	S (%) max.	P (%) max.	Ti (%) max.
FeSi 90 %	89	–	3,0		0,02	0,03	–
FeSi 75 %	74 – 78	1,0	2,5	0,1	0,03	0,05	0,2
FeSi 45 %	41 – 47	–	2,0		0,03	0,05	–

Tab. 10: Qualitätsgarantien von Ferrosilizium verschiedener brasilianischer Produzenten, aus ROSKILL (2011).

Qualität	Si (%) min.	Al (%) max.	Ca (%) max.	C (%) max.	S (%) max.	P (%) max.
FeSi90Al1,5	87,0 – 95,0	1,50	1,50	0,20	0,020	0,04
FeSi90Al3,0	87,0 – 95,0	3,00	1,50	0,20	0,020	0,04
FeSi 75 % high purity	74,0 – 80,0	0,03	0,02	0,03	0,003	0,02
FeSi 75 %	73,0	0,15	0,10	0,02	0,0002	0,03
FeSi 75 %	73,0	0,08	0,06	0,02	0,004	0,04
FeSi 75 %	75,5	1,40	0,20	0,03	0,020	0,04
FeSi 75 %	73,5	1,80	0,50	0,10	0,020	0,03
FeSi75Al2,0	74,0 – 80,0	2,00	1,00	0,10	0,020	0,035
FeSi 72 %	72,0	1,50 – 2,00	–	0,20	0,04	0,04
FeSi 70 – 75 %	70,0	1,50 – 2,00	–	0,20	0,04	0,04
FeSi 65 %	63,0	0,15	–	–	–	0,03
FeSi 65 %	63,0	0,08	0,10	0,01	0,004	0,03
FeSi 65 %	65,0	1,70	–	–	–	0,03
FeSi 45 %	44,0	1,00	–	–	–	0,03
Silvery pig iron	5,0 – 24,0	–	–	–	–	–

Tab. 11: Qualitätsanforderungen an Ferrosilizium in China, nach chinesischem Standard GB2277-87 (2009).

Qualität	Si (%)	Al (%) max.	Ca (%) max.	Mn (%) max.	Cr (%) max.	P (%) max.	S (%) max.	C (%) max.
FeSi90Al1,5	87,0 – 95,0	1,5	0,5	0,4	0,2	0,04	0,02	0,2
FeSi90Al3	87,0 – 95,0	3,0	0,5	0,4	0,2	0,04	0,02	0,2
FeSi75Al10,5-A	74,0 – 80,0	0,5	1,0	0,4	0,3	0,035	0,02	0,1
FeSi75Al10,5-B	72,0 – 80,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,04	0,02	0,2
FeSi75Al1,0-A	74,0 – 80,0	1,0	1,0	0,4	0,3	0,035	0,02	0,1
FeSi75Al1,0-B	72,0 – 80,0	1,5	1,0	0,5	0,5	0,04	0,02	0,2
FeSi75Al1,5-A	74,0 – 80,0	1,5	1,0	0,4	0,3	0,035	0,02	0,1
FeSi75Al1,5-B	72,0 – 80,0	1,5	1,0	0,5	0,5	0,04	0,02	0,2
FeSi75Al12,0-A	74,0 – 80,0	2,0	1,0	0,4	0,3	0,035	0,02	0,1
FeSi75Al12,0-B	74,0 – 80,0	2,0	1,0	0,4	0,3	0,04	0,02	0,1
FeSi75Al12,0-C	72,0 – 80,0	2,0	–	0,5	0,5	0,04	0,02	0,2
FeSi75-A	74,0 – 80,0	–	–	0,4	0,3	0,035	0,02	0,1
FeSi75-B	74,0 – 80,0	–	–	0,4	0,30	0,04	0,02	0,1
FeSi75-C	72,0 – 80,0	–	–	0,5	0,5	0,04	0,02	0,2
FeSi65	65,0 – 72,0	–	–	0,6	0,5	0,04	0,02	–
FeSi45	40,0 – 47,0	–	–	0,7	0,5	0,04	0,02	–

Tab. 12: Qualitätsanforderungen an Ferrosilizium 75 % HP, nach Firmeninformationen. UHP = Ultra High Pure. Daten der weiteren Produzenten von FeSi 75 % HP (FERBASA/Brasilien, Rima/Brasilien, FerroGlobe/Frankreich, chinesische Unternehmen) sind nicht publiziert.

Qualität	Si (%)	Al (%) max.	Ca (%) max.	Ti (%) max.	Cr (%) max.	P (%) max.	S (%) max.	C (%) max.
CC Metals and Alloys USA <sup>1</sup>	74 – 79	0,10	0,10	0,04	0,30	0,035	0,025	0,03
CC Metals and Alloys USA (HP low Ti) <sup>1</sup>	74 – 79	0,10	0,03	0,032	0,30	0,035	0,025	0,03
Libra Ligas Brasilien	74 – 79	0,10	0,10	0,040	–	0,040	0,025	0,10
Minasligas Brasilien	75 – 78	0,04	0,02	0,020	0,030	0,020	0,003	–
Elkem Island <sup>2</sup>	75 – 77	0,03	–	0,015	–	0,015	0,003	0,02
Iran Ferroalloys Iran (HP)	73 – 77	0,10	0,05	0,02	–	0,02	0,01	0,03
Iran Ferroalloys Iran (UHP)	73 – 77	0,05	0,03	0,02	–	0,02	0,01	0,02
Lanzhou Sunrising Ferro-alloy (China)	75	0,5	–	0,05	–	0,04	0,02	0,02

<sup>1</sup> < 0,01 % B, < 0,40 % Mn, < 0,10 % Ni, < 0,10 % Cu, <sup>2</sup> Ca, Mn, Cr, Ni, V u. a. nach Kundenspezifikation (ElekSil™)



verbreitet. Alle anderen Ferrosiliziumqualitäten wie FeSi 25 % – FeSi 55 % besitzen nur in der Gusseisenindustrie Bedeutung. Ein Nischenprodukt ist FeSi 15 %, das als Schweremedium (Flotationshilfsmittel) in der Eisenerzaufbereitung Verwendung findet (s. u.).

Ferrosilizium mit höheren Anforderungen an die Verunreinigungen wird als Ferrosilizium „speciality“ bezeichnet und in die Gruppen Ferrosilizium „high purity“ (HP) (FeSi 75 %, FeSi 65 %, FeSi 50 % mit sehr niedrigen Gehalten an Ti, Al und C), Ferrosilizium „low-aluminium“ und Ferrosilizium „low-carbon“ untergliedert. Ferrosilikomagnesium (FeSiMg) wird wegen seines geforderten niedrigen Aluminiumgehalts von ca. 1,2 % zum Teil zum Ferrosilizium „low-aluminium“ gezählt, in dieser Studie jedoch getrennt behandelt.

Impfmittel aus Ferrosilizium basieren zumeist auf FeSi 75 %, die mit verschiedenen Nebemetallen (Mg, Ca, Ba, B, Mn, Sr, Ti, Zr, Ce) angereichert sind, um im Graueisenguss bzw. Sphäroguss die gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

Ähnlich wie bei Silizium unterscheiden sich die Qualitätsanforderungen an Ferrosilizium von Land zu Land und von Produzent zu Produzent (s. Tab. 8 – 11).

Ferrosilizium wird je nach Verwendungszweck in verschiedenen Korngrößen als Pulver (< 100 µm) über körnig (< 3 mm Durchmesser) und stückig (50 – 100 mm Durchmesser) bis brockig (engl.: lumpy) (bis 25 kg Gewicht) angeboten.

### 3.4.1 Stahl

Über alle Stahlsorten hinweg beträgt der Si-Gehalt im Stahl ca. 0,3 %, obwohl es auch Stahlsorten gibt, die deutlich höhere Gehalte an Si enthalten. Als Siliziumstähle werden bereits diejenigen Stähle bezeichnet, die > 0,4 % Si enthalten. Sie zeichnen sich durch einen relativ hohen elektrischen Widerstand und ein niedriges Hys-

tereseverhalten unter magnetischen Einflüssen aus, so dass sie in Hochspannungsanwendungen zum Einsatz kommen.

In der Stahlproduktion dient Silizium (meist in Form von Ferrosilizium) als:

- Desoxidationsmittel – zur Reduzierung der Reaktion zwischen Kohlenstoff und Sauerstoff (da der Sauerstoff mit exothermer Reaktion bevorzugt mit Silizium reagiert), während der Erstarrung in beruhigten und halb-beruhigten Stählen.
- Reduktionsmittel – zur Reduzierung der Entstehung von Metalloxiden in der Schlacke, die ansonsten als Metalle, z. B. Chrom, absinken und recycelt werden können.
- Legierungselement – zur Verbesserung der elektrischen Eigenschaften und Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, Streckgrenze, Härte) des Stahls. Bei Gehalten > 14 % Si ergeben sich Stähle mit sehr guter chemischer Widerstandskraft, aber grober und körniger Struktur, die nicht mehr geschmiedet werden können.
- zur Graphitausscheidung in Karbon-/Kohlenstoffstählen – zur Verbesserung von dessen elektrischen Eigenschaften.

Typische Gehalte von Silizium in verschiedenen Stahlsorten sind (ROSKILL 2011):

- Maschinenbaustähle: durchschnittlich 0,3 % Si, maximal 5 % Si
- Weichmagnetische Stähle: 0,5 – 8,0 % Si
- Hochlegierte Stähle: 0,15 – 0,4 % Si
- Federstähle: 1,4 – 2,0 % Si
- Ventilstähle: max. 3,3 % Si
- Hochfeste, niedriglegierte Stähle: 0,3 – 0,35 % Si, max. 0,7 % Si
- Schnellarbeitsstähle: max. 0,45 % Si
- Eisenbahnstähle: 0,55 – 0,8 % Si
- Schnellstähle: 0,15 – 0,3 % Si
- Warmarbeitsstähle: 0,25 – 1,0 % Si
- Kaltarbeitsstähle: 0,3 – 1,4 % Si
- Karbonstähle: 0,1 – 0,3 % Si, max. 0,6 % Si
- Rostfreie Stähle: durchschnittlich 1,6 % Si
- Austenitische Stähle: max. 1,0 % Si, selten bis 3,0 % Si

Hochreines Ferrosilizium (FeSi 50 % HP, FeSi 65 % und FeSi 75 % HP) wird traditionell in der Herstellung von Stählen mit sehr niedrigen Schwermetall- und Kohlenstoffgehalten verwendet. Diese Stähle dienen zur Produktion von Kugellagern, Ventilen, Formteilen für den Kunststoffguss und Stahlcordreifen.

Ein weiterer, sehr schnell und stark wachsender Verwendungszweck von FeSi 65 % HP und FeSi 75 % HP ist die Herstellung von Elektroblechen/Elektrobändern (engl: electrical steel) in 0,1 – 1 mm Stärke und mit 3,2 – 3,5 % Si (zur Erhöhung des elektrischen Widerstands) in Form von

- a) kornorientierten Elektroblechen für Transformatoren, Stromwandler und Generatoren (Einsatz in der Photovoltaik-, Wind-, Wasserkraft- und Biomasseenergiegewinnung).
- b) nicht-kornorientierten Elektroblechen für die Herstellung von Rotoren und Statoren in Motoren für Elektrofahrzeuge, für die Industrie, für Haushaltsmaschinen und Elektrowerkzeuge, Wärmepumpen, Kompressoren, Drosseln oder Umwälzpumpen. Für die Produktion eines Motors für ein typisches Elektrofahrzeug werden ca. 4 kg FeSi 75 % HP benötigt (ELKEM ASA, frdl. schriftl. Mitt.).

FeSi 75 % HP (bzw. FeSi 65 % HP) stellt also einen für die E-Mobilität bzw. Umsetzung der Energiewende kritischen Ausgangsrohstoff dar.

### 3.4.2 Eisenguss

Über alle Eisengussorten hinweg liegt der durchschnittliche Si-Gehalt bei ca. 1,5 %, mit einer Streubreite zwischen 0,5 und 3,0 %.

Beim Eisenguss dient Silizium (in Form von Ferrosilizium) zur

- Verringerung der Abschreckung und Reduzierung der Stabilität des sich bildenden Eisencarbids, ohne dadurch die perlitische Stabilität zu beeinflussen,

- Unterstützung der Bildung von Kohlenstoff in Graphitform geringer Größe,
- Vergrößerung des Verhältnisses von Zugfestigkeit zu Härte,
- Glättung des Eisens und dadurch Verbesserung seiner Bearbeitbarkeit.

Typische Gehalte von Silizium in verschiedenen Gusseisensorten sind (ROSKILL 2011):

- Weißes Gusseisen: 0,5 – 1,9 % Si
- Graues Gusseisen (Grauguss): 1,0 – 3,0 % Si
- Gusseisen mit Temperkohle: 0,9 – 1,9 % Si
- Gusseisen mit Kugelgraphit: 1,8 – 2,8 % Si
- Gusseisen mit Vermiculargraphit: 1,0 – 3,0 % Si

Die Gusseisenindustrie setzt im Gegensatz zur Stahlindustrie vorwiegend Ferrosilizium mit niedrigeren Siliziumgehalten, d. h. FeSi 25 % – FeSi 55 % ein. Dagegen ist die Verwendung von silvery pig iron (FeSi 5 % – FeSi 24 %) deutlich zurückgegangen. In der Gusseisenindustrie findet es heute nur noch Verwendung als Ofenblock und als Zugabe für die anfängliche Desoxidation. Sein geringer Siliziumgehalt macht es ungeeignet als Zugabe im Gusstiegel, wo es den Guss extrem abschrecken würde.

Ein Substitut für Ferrosilizium in der Eisengussindustrie ist Siliziumcarbid metallurgischer Qualität.

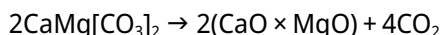
### 3.4.3 Magnesium

Magnesium ist ein bedeutendes Leichtmetall, dessen Primärproduktion zu 84 % in China konzentriert ist (SCHMITZ 2018). Die Produktion dort, aber auch in der Türkei, erfolgt mittels thermischer Reduktion aus Dolomit ( $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ ). Vereinfacht dargestellt wird beim thermischen Reduktionsprozess der Dolomit kalziniert (gebrannt), um das  $\text{CO}_2$  des Karbonats abzutrennen. Danach erfolgt die thermische Reduktion des verbleibenden Magnesiumoxids.

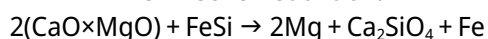
Der bedeutendste thermische Produktionsprozess ist der 1941 entwickelte Pidgeon-Prozess, benannt nach Dr. L. M. Pidgeon des ehemali-

gen kanadischen Magnesiumunternehmens Dominion Magnesium Ltd. Hierbei wird der gebrannte Dolomit ( $\text{CaO} \times \text{MgO}$ ) mittels eines Reduktionsmittels, meist Ferrosilizium, reduziert und es entstehen Magnesium und eisenhaltige Kalziumsilikat-Schlacke:

Kalzination:



Thermische Reduktion:



Die Kalzinierung des gemahlenden Dolomits erfolgt in Drehrohr- oder Schachtöfen. Der gemahlene Dolomit wird dann mit Ferrosilizium gemischt und die entstehenden Rohstoff-Briketts werden mit Kohle, Kohle-Wasser-Gemischen oder Koks- bzw. Schwelgas bei ca. 1.100 °C gebrannt. Das Ferrosilizium reduziert das Magnesiumoxid, wobei das Magnesium in eine Dampfphase übergeht. Mittels Wasserkühlung wird der Dampf abgekühlt und das Magnesium kondensiert. Das entstandene Magnesium wird dann mit einem Flussmittel aufgeschmolzen und zu Barren (> 99,98 % Mg) gegossen (SCHMITZ 2018).

Für die Produktion von 1 t Magnesiummetall werden bei diesem Prozess ca. 10,4 – 10,8 t Dolomit, 1,05 – 1,08 t FeSi 75 %, etwa 5,0 – 6,0 t Steinkohleeinheiten sowie ca. 1,0 – 1,4 MWh Energie benötigt (ROSKILL 2014). Anschließend wird das Magnesium noch einmal erschmolzen und mithilfe eines Flussmittels aufgereinigt.

Der Pidgeon-Prozess ist sehr einfach umzusetzen und vergleichsweise kostengünstig, was den Aufstieg Chinas zum bedeutendsten globalen Magnesiumproduzenten ermöglichte. Es weist jedoch auch die höchsten Treibhausgasemissionen aller kommerziell eingesetzten Verfahren auf, insbesondere auch aufgrund der Verwendung des energieaufwendig zu produzierenden Ferrosiliziums (SCHMITZ 2018).

Das eingesetzte Ferrosilizium macht ca. 50 % der Produktionskosten der chinesischen Magnesiumproduzenten aus. Nicht nur die Magnesium-, sondern auch die Ferrosiliziumproduktion ist zudem sehr energieintensiv, weshalb auch die regional und jahreszeitlich schwankenden Energiepreise den Magnesiumpreis beeinflussen. Teilweise führte die Verteuerung und Verknappung von Ferrosilizium vor einigen Jahren dazu, dass verschiedene chinesische Magnesiumproduzenten zwischenzeitlich ihre Magnesiumproduktion einstellten und ihr noch vorhandenes Ferrosilizium lieber verkauften (SCHMITZ 2018).

### 3.4.4 Andere Verwendungsbereiche

Neben seinen Hauptverwendungsbereichen Stahlindustrie, Eisengussindustrie und zumindest in China auch Magnesiumherstellung wird Ferrosilizium eingesetzt

- in Cr-Ni-Mn-Superlegierungen, wo der Zusatz spezieller Ferrosiliziumqualitäten wahlweise zur Bildung oder auch Reduzierung der Bildung von Mn- und Mg-Silikaten mit entsprechenden Änderungen der Eigenschaften führt,
- zur Reduktion von Vanadiumoxid (aus Vanadiumkonzentraten und Vanadium-haltiger Schlacke) mit Branntkalk in Elektrolichtbogenöfen bei 1.850 °C zu Ferrovanadium (FeV 35 – 60 %) nach der vereinfachten Formel:  $2\text{V}_2\text{O}_5 + 5\text{FeSi} + 10\text{CaO} \rightarrow 4\text{FeV} + 5\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ,
- für die silikothermische Produktion von Ferrosilikonickel aus Nickelerzen,
- zur Produktion kleinerer Mengen von Wasserstoff (s. u. in militärische Anwendungen) aus einer 40 %igen Natronlauge nach der Formel:  $2\text{NaOH} + \text{Si} \text{ (aus FeSi)} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + 2\text{H}_2$ .

### 3.5 Verwendung und Spezifikationen von Ferrosilikomangan

Ferrosilikomangan (FeSiMn) findet einerseits Verwendung direkt als Ferrolegierung und dient andererseits durch die hohe Affinität von Silizium und Mangan zu Sauerstoff zugleich als starkes Desoxidationsmittel in der Stahlproduktion (durchschnittlich 4,5 kg FeSiMn/t Stahl) sowie regional auch in der Gusseisenindustrie (durchschnittlich 2,3 kg FeSiMn/t Gusseisen). Die nach der Desoxidation entstehenden Produkte  $\text{FeSiO}_3\text{Mn}$  und  $\text{FeSiO}_4\text{Mn}$  besitzen zudem günstige Eigenschaften, wie niedrige Schmelzpunkte von 1.270 °C bzw. 1.327 °C, große Partikelgrößen und schwimmen auf, wodurch sie leicht von der Schmelze abgeschöpft werden können.

Zudem ist FeSiMn aber auch nur ein Zwischenprodukt bei der Herstellung von Ferromangan mit niedrigen und mittleren Kohlenstoffgehalten (LCFeMn und MCFeMn).

Tab. 13: Mindestanforderungen an Ferrosilikomangan in Brasilien, nach von KRUGER (2009).

	Mn (%) min.	Si (%) min.	P (%) max.	S (%) max.
FeSiMn	65	12 – 20	0,2	0,03

### 3.6 Verwendung und Spezifikationen weiterer Ferrosilikolegerungen

#### 3.6.1 Ferrosilikomagnesium

Im Gegensatz zu allen anderen Ferrosilikolegerungen kommt Ferrosilikomagnesium (FeSiMg) praktisch nur in der Gusseisenindustrie zum Einsatz (durchschnittlich 15 kg FeSiMg/t Gusseisen), wo es, häufig in eine Legierung mit

leichten Seltenen Erden (0,5 – 10 %), als Mittel zur Umwandlung des Flockengraphits in Kugelgraphit mit zugleich starken Desoxidations- und Entschwefelungseigenschaften dient. Die sich beim Einsatz bildenden Beiprodukte Magnesiumoxid und Magnesiumsulfid unterstützen als Kristallisationskeime die Bildung von Kugelgraphit und verhindern zugleich die Bildung anderer Graphitarten. Gusseisen mit Kugelgraphit besitzt erhöhte Festigkeit und Dehnbarkeit, gute mechanische Verarbeitbarkeit und zugleich eine wesentlich geringere Spröde als normales Gusseisen.

#### 3.6.2 Ferrosilikochrom

Ferrosilikochrom (FeSiCr) dient als Reduktionsmittel und ist ein Zwischenprodukt in der Herstellung von Ferrochrom mit niedrigem Kohlenstoffgehalt (LCFeCr). Entscheidend ist hierbei ein möglichst niedriger Kohlenstoffgehalt im LCFeCr, der wiederum maßgeblich vom Kohlenstoffgehalt im Vorprodukt FeSiCr bedingt ist. Ferrosilikochrom dient aber auch als Desoxidationsmittel und Chromträger in der Produktion von chromhaltigen Edelstählen.

Tab. 14: Mindestanforderungen an Ferrosilikochrom in Brasilien, nach von KRUGER (2009).

	Cr (%)	Si (%)	C (%)	P (%) max.	S (%) max.
FeSiCr	30–45	18–40	0,1–3,0	0,06	0,04

#### 3.6.3 Ferrosilikoaluminium

Ferrosilikoaluminium (FeSiAl) ist ebenfalls ein starkes Desoxidationsmittel und ein Substitut für Aluminium in der Spezialstahlherstellung. In der Gusseisenindustrie schätzt man seine geringe Dichte, seine guten Guss- und Verschleiß-eigenschaften und seinen niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten.

### 3.7 Toxizität

Elementares Silizium ist ein inertes Material, von dem angenommen wird, dass es Lungenfibrose verursachen kann. Beweise hierfür liegen jedoch bisher nicht vor. Siliziumstaub hat nur sehr geringe nachteilige Wirkung auf die Lungenfunktion und hat keine bedeutende organische Krankheit oder giftigen Effekte zur Folge, wenn die Belastung unter den üblichen Grenzwerten für inerte Industriestäube liegt.

Auch mögliche Umweltschädigungen durch Silizium wurden bisher nicht bekannt. Gleiches gilt für Polysilizium, Ferrosilizium und die meisten weiteren Ferrosilikolegerungen.

Anders sieht es bei allen Silanen aus, die Zwischenprodukte in der Produktion von Polysilizium und Silikonen darstellen. Silane sind hochreaktive Chemikalien. Sie sind ätzend, hochentzündlich und reagieren heftig mit Wasser unter Bildung gefährlicher Zersetzungsprodukte wie CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und HCl. Gemische von Silanen und der Luft sind explosibel. Eine schnelle Verdampfung von Silanen verursacht Erfrierungen. Silane sind giftig beim Verschlucken, Einatmen und bei Berührung mit der Haut. Sie verursachen Verätzungen und sind tränenreizend. Ihre Inhalation kann infolge Lähmung, Entzündung und Ödem von Kehlkopf und Bronchien sowie Lungenentzündung zum Tode führen. Nach Kontakt können folgende Symptome auftreten: Hitzegefühl, Husten, Atemnot, Kehlkopfentzündung, Kurzatmigkeit, Kopfschmerzen, Übelkeit und Erbrechen.

Silane sind schwach wassergefährdend (WGK 1) und in die UN-Gefahrenklasse 2.1 eingestuft.

Die im Januar 2011 in China verabschiedeten „Polysilicon Industry Access Standards“ verbieten den Betrieb von Polysiliziumwerken (aufgrund der Herstellung und Verarbeitung von Trichlorsilan) in einem Umkreis von 1.000 km um Naturschutzgebiete, Flusseinzugs- sowie Wohngebiete (ROSKILL 2011).

In Sinich bei Meran führte die Sicherung und Sanierung eines kleinen, bereits Jahre zuvor stillgelegten Polysilizium-Werkes aufgrund der zu entleerenden und abzutransportierenden Behälter mit einer Restmenge von 260 t Trichlorsilan zu Sonderkosten von über 30 Mio. € (RAI 2020).

Nicht-modifizierte Siloxane (Silikone), die zwar aus Silanen hergestellt werden, aber ja eigentlich nur aus Siliziumdioxid, Kohlenstoffdioxid und Wasser bestehen, sind chemisch relativ beständig und daher nur gering gesundheitsgefährdend (KOPP & FROMME 2010).

### 3.8 Menschenrechtsrisiken

Nachhaltigkeitsaspekte in Bezug auf Umwelt, Soziales und Governance (ESG) gewinnen entlang der Wertschöpfungskette von Silizium global an Bedeutung. Verschiedene Risiken entlang der Wertschöpfungskette vom Quarzabbau bis zur Produktion von Polysilizium betreffen etwa Umweltauswirkungen, Klima und CO<sub>2</sub>-Ausstoß, Arbeits- und Gesundheitsschutz oder – wie hier im Fokus – Menschenrechtsaspekte.

Als Reduktionsmittel für die Herstellung von Silizium wird meist Steinkohle eingesetzt. Siliziumhütten in Europa beziehen Steinkohle hauptsächlich aus Kolumbien (s. Kapitel 3.1.1). In den kolumbianischen Kohlerevieren weisen Menschenrechtsorganisationen seit Jahren auf Menschenrechtsverletzungen und Umweltschäden hin (AMNESTY INTERNATIONAL 2023). Dazu gehören gesundheitliche Gefahren durch Kohlefeinstaub, Zwangsumsiedelung, (paramilitärische) Gewalt und die Bedrohung, Einschüchterung und Ermordung von Personen, die sich für Menschenrechte oder Umweltschutz einsetzen (MISEREOR 2022). Betroffen sind nach NGO-Angaben insbesondere afrokolumbianische und indigene Gemeinden (ebd.).

In der Silizium- und Solarwertschöpfungskette steht vor allem Zwangsarbeit im öffentlichen politischen Interesse. Insbesondere im rohstoffwirtschaftlich dominanten Produktions-

land China (s. Anhang – Länderprofile) werden im Uigurisch autonomen Gebiet Xinjiang (XUAR) schwerwiegende Menschenrechtsverletzungen gegen die uigurische Minderheit sowie gegen kasachische und andere muslimische Bevölkerungsgruppen dokumentiert (UN 2022). Dazu gehört die systematische, staatliche Förderung von Zwangsarbeit, von der potenziell alle Agrar- und Industriesektoren der Region, auch die Silizium- und Solarwirtschaft, profitieren. Die Vorwürfe haben politische und wirtschaftliche Auswirkungen auf die gesamte Silizium- und Solarlieferkette weltweit.

### **Zwangsarbeit**

Zwangsarbeit ist ein globales Phänomen. Im Jahr 2021 leisteten weltweit rund 27,6 Millionen Menschen Zwangsarbeit, so Schätzungen der Internationalen Arbeitsorganisation (International Labour Organisation, ILO 2022). Eine viertel Million Erwachsene ist nach ILO-Angaben gezwungen, in Bergwerken und Steinbrüchen zu arbeiten (ILO 2022; s. auch BGR 2016). Als Zwangsarbeit gilt „jede Art von Arbeit oder Dienstleistung, die von einer Person unter Androhung irgendeiner Strafe verlangt wird und für die sie sich nicht freiwillig zur Verfügung gestellt hat“ (ILO 1930). Die Freiheit von bzw. der Schutz vor Zwangsarbeit ist als Menschenrecht in unterschiedlichen internationalen und völkerrechtlichen Konventionen festgehalten. Dazu gehören Artikel 23 der UN-Menschenrechtskonvention (UN 1948), die Grundprinzipien der ILO und die daraus hervorgehenden Kernarbeitsnormen sowie der Internationale Pakt über bürgerliche und politische Rechte (International Covenant on Civil and Political Rights, ICCPR 1966, Art 8, *Freedom from Forced and Compulsory Labour*). Die ILO benennt elf Indikatoren, die die „häufigsten Anzeichen darstellen, die auf das mögliche Vorliegen eines Falls von Zwangsarbeit hindeuten“ (ILO 2012).

### **Die Siliziumproduktion in Xinjiang und der Verdacht systematischer Zwangsarbeit**

Das Uigurische autonome Gebiet Xinjiang (XUAR) liegt im Nordwesten Chinas und ist die größte Provinz des Landes. Mit einer Fläche von 1.640.320 km<sup>2</sup> ist Xinjiang rund 4,5-mal so groß

wie die Bundesrepublik Deutschland. 25,85 Mio. Menschen leben in Xinjiang. Die Region ist reich an Rohstoffen wie u. a. Kohle, Gas, Öl, Lithium, Zink und Quarz. Für die Siliziumproduktion ist Xinjiang deshalb ein bedeutender Standort (s. Anhang – Länderprofile).

2022 ratifizierte die chinesische Regierung die ILO-Konventionen 30 und 105 zur Abschaffung von Zwangsarbeit (UN 2022, ILO 2022). Die Vorwürfe staatlich geförderter, systematischer Zwangsarbeit in Xinjiang beziehen sich auf staatliche Beschäftigungsprogramme zur Armutsreduzierung, die insbesondere die uigurische Bevölkerung sowie kasachische und andere muslimische Minderheiten betreffen (UN 2022, ILO 2022). Der sogenannte Sheffield Report „In Broad Daylight: Uyghur Forced Labour and Global Solar Supply Chains“ von MURPHY & ELIMÄ (2021) arbeitet basierend auf öffentlich zugänglichen (Regierungs-)Dokumenten die Vorwürfe gegen die chinesische Regierung und den Zusammenhang mit Silizium- und Solarwertschöpfungsketten auf. Im Zentrum steht der Verdacht der systematischen Zwangsumsiedelung, Internierung, Umerziehung und Zwangsarbeit durch staatlich gestützte sogenannte „Arbeitstransfer“- und „Ausbildungsprogramme“ sowie durch den als paramilitärisch eingestuften Firmenkomplex *Xinjiang Produktion- und Konstruktionskorps (XPCC)*, der u. a. Industrieparks betreibt.

Seit 2018 gibt es Hinweise auf Verbindungen der Programme mit Anti-Terrormaßnahmen der Regierung und der „Prävention von religiösem Extremismus“ sowie zu den zugehörigen Haftanstalten und Internierungslagern (MURPHY & ELIMÄ 2021 und UN 2022). Es bestehen staatliche Anreizsysteme für Unternehmen bei Übernahme von Arbeitskräften aus den Programmen wie bspw. Subventionszahlungen (UN 2022). Uigurische Interessenvertretungen, Menschenrechtsorganisationen und UN-Institutionen berichten von rassistisch geprägter Diskriminierung und in Folge der staatlichen Anti-Terror- und Sicherheitsmaßnahmen von Verbrechen gegen die Menschlichkeit, von willkürlichen Massenverhaftungen, geschlechterbasierter Gewalt, Folter

- **„Ausbildungs- und Arbeitstransferprogramme“** werden von der chinesischen Zentralregierung als Instrument der Armutsminderung in verschiedenen Regionen Chinas eingesetzt, so auch in Xinjiang. Nach Regierungsangaben wurden 2020 2,6 Mio. Angehörige von Minderheiten in landwirtschaftliche Betriebe und Fabriken in der Region vermittelt (MURPHY & ELIMÄ 2021).
- **Das Xinjiang Produktion- und Konstruktionskorps (XPCC)** ist als „China Xinjiang Group“ mit 14 Unternehmen an der Börse notiert und mit Tausenden weiteren direkten und indirekten Beteiligungen wirtschaftlich aktiv. XPCC betreibt Industrieparks, in denen auch Silizium- und Polysiliziumwerke angesiedelt sind. In zehn Städten und 37 Ortschaften verwaltet XPCC die Regierungsaufgaben. XPCC wird vorgeworfen, Umerziehungslager und Gefängnisse zu unterhalten sowie Arbeitstransferprogramme durchzuführen (MURPHY & ELIMÄ 2021).

und Tod in der Haft oder von dem Verschwindenlassen von Personen (HRW 2021 und AMNESTY INTERNATIONAL 2021). MURPHY & ELIMÄ (2021) zeigen, dass die Ausbildungs- und Arbeitstransferprogramme die ILO-Indikatoren für das Vorliegen von Zwangsarbeit erfüllen.

Gegen zahlreiche Unternehmen der Silizium- und Solarindustrie in Xinjiang besteht der Verdacht, in unterschiedlichem Maße von Zwangsarbeit und anderen Menschenrechtsverletzungen zu profitieren bzw. damit in direkter Verbindung zu stehen. Als Indikatoren dafür gelten u. a. die Teilnahme der Unternehmen an Kampagnen und „Arbeitstransfer-“ bzw. „Ausbildungsprogrammen“, die unmittelbare geographische Nähe zu Internierungslagern sowie wirtschaftliche Beziehungen zum XPCC. Durch die systematische Verbreitung staatlich gestützter „Arbeitstransfer-Programme“ in Xinjiang ist nicht auszuschließen, dass darüber hinaus weitere Hersteller von zwangsarbeitsbezogenen Menschenrechtsrisiken betroffen sind (MURPHY & ELIMÄ 2021).

#### **Auswirkungen auf die weltweite Solar-/Siliziumwertschöpfungskette**

Die genannten Berichte über Menschenrechtsverletzungen durch staatlich geförderte Zwangsarbeit in Xinjiang haben Auswirkungen auf die gesamte Silizium- und Solarlieferkette innerhalb und außerhalb Chinas.

**Politische Reaktionen und gesetzliche Rahmenbedingungen:** Im Juni 2021 verhängte die US-Regierung ein Import-Verbot gegenüber

Silizium-basierten Produkten des Rohsiliziumherstellers Hoshine Silicon Industry Co., Ltd (CBP 2021). Im Dezember des gleichen Jahres wurde mit dem *Uyghur Forced Labor Prevention Act* (UFLPA) ein grundsätzliches Import-Verbot für unter Zwangsarbeit hergestellte Produkte verabschiedet (UFLPA 2021). Der Act geht davon aus, dass alle abgebauten Rohstoffe und produzierten Güter aus Xinjiang potenziell Produkte aus Zwangsarbeit sind, außer es ist das Gegenteil bewiesen. Insbesondere diese faktische Umkehrung der Beweislast sticht bei dem Importverbot heraus: Unternehmen müssen bei der Einfuhr nachweisen, dass ihre Produkte nicht durch Zwangsarbeit in Xinjiang hergestellt wurden (UFLPA 2021, SEC.3(b)(2)). Zusätzlich führt der Act eine Liste sanktionierter Unternehmen, die als direkt involviert eingeschätzt werden und deren Produkte unter den UFLPA fallen, auch wenn sie nicht in Xinjiang hergestellt sind (ebd.). Für das Jahr 2022 wurden nach Einschätzungen von BERNREUTER (2023) ca. 2 GW Solarpanels festgehalten, wobei 41 % aller zurückbehaltenen Lieferungen freigegeben und 0,8 % endgültig zurückgewiesen wurden.

Auch die EU-KOMMISSION (2022) legte einen Vorschlag für eine entsprechende Verordnung vor, deren endgültige Verabschiedung zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Studie nach wie vor aussteht (s. auch EPRS 2023). In Kraft treten soll das EU-Verbot von Produkten aus Zwangsarbeit 24 Monate nach seiner Verabschiedung. Der Entwurf sieht vor, dass nationalstaatliche Behörden Untersuchungen für die Produkte einleiten können, für die ein begründeter Ver-

dacht besteht, dass sie in Zwangsarbeit hergestellt wurden. Bei Bestätigung des Verdachts wird die Rücknahme der Produkte angeordnet beziehungsweise werden deren Inverkehrbringen und Ausfuhr untersagt (EU KOMMISSION 2022). Anders als der UFLPA spezifiziert der Entwurf weder Regionen noch Produkte, sondern ist breiter gefasst und enthält keine Beweisumkehr.

In Deutschland verpflichtet das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz (LkSG) seit 2023 Unternehmen dazu, menschenrechtliche und umweltbezogene Sorgfaltspflichten in ihrem eigenen Geschäftsbereich und bei unmittelbaren Zulieferern nachzuhalten. Bei dem Hinweis auf begründeten Verdacht von Menschenrechtsverletzungen in ihrer Lieferkette sind Unternehmen verpflichtet, anlassbezogen diesem Verdacht auch bei mittelbaren Zulieferern nachzugehen (BAFA 2023). Auf europäischer Ebene befindet sich ebenfalls eine EU-Lieferkettenrichtlinie mit ähnlichem Inhalt in der Abstimmung (EC 2022).

#### **Unternehmerische Sorgfaltspflichten, Standards, Initiativen und deren Umsetzung**

Viele Unternehmen der Silizium- und Solarindustrie in Europa und Deutschland sehen sich durch ihre Nachhaltigkeitsbestrebungen und bestehende Monitorings von Sorgfaltspflichten gut gegen Menschenrechtsrisiken in der Wertschöpfungskette abgesichert. Einige erhoffen sich Marktinstrumente und -mechanismen, die Umwelt- und Sozialstandards zu einem Wettbewerbsvorteil gegenüber der dominierenden Marktmacht Chinas werden lassen. Dies auch vor dem Hintergrund aktueller Diversifizierungsbestrebungen wie bspw. dem Wiederaufbau der Solarindustrie in Deutschland und Europa.

International führende Unternehmen der Silizium- und Solarindustrie haben im Zuge der Gesetzesänderungen, insbesondere des UFLPA, ihre Photovoltaik-Lieferkette entsprechend umgestellt, um die notwendige Dokumentation zur Einfuhr in die USA zu erfüllen. Einige (chinesische) Unternehmen bieten teilweise explizit „Xinjiang-freie“ Produkte für den US-ame-

rikanischen Markt an (COCKAYNE 2022, 2022a). Branchenverbände wie der Bundesverband Solarwirtschaft (BSW) oder der European Solar Manufacturing Council (ESMC) sehen auf verschiedene Weisen Politik und Unternehmen in der Verantwortung und plädieren für eine Förderung eigener Produktionskapazitäten in Europa (GEINITZ 2022; PREKER & SCHULTZ 2021; BELLINI & DIERMANN 2023). Nach Angaben europäischer und deutscher Unternehmen der Solar- und Siliziumindustrie wurden/werden die Lieferketten auf die Vorwürfe hin überprüft und stehen im Einklang mit dem LkSG und, wo in die USA exportiert wird, mit dem UFLPA. Nach Informationen von deutschen Marktteilnehmern (frdl. mdl. Mitt.) geschieht die Überprüfung der eigenen Lieferkette mithilfe bestehender Instrumente des Risikomanagements wie durch das Einholen der Bestätigung über die Erbringung seiner Sorgfaltspflicht beim direkten Zulieferer, der entsprechende schriftliche Zusicherungen vorlegt.

Handlungsleitend für die Unternehmen sind neben übergeordneten Rahmenwerken wie der „UN Global Compact“ und die „UN Sustainable Development Goals“ (SDG) vor allem variierende selbstverpflichtende Standards und deren Code of Conduct je nach Industrie wie die „Together for Sustainability Initiative“ oder die „Responsible Business Alliance“. Darüber hinaus setzen sich verschiedene Industrieinitiativen in der Solarbranche wie die Solar Stewardship Initiative (SSI) in der EU oder die Solar Energy Industries Association (SEIA) in den USA nach eigenen Angaben auf Basis freiwilliger Selbstverpflichtung für bessere Nachverfolgbarkeit und Transparenz in den Lieferketten ihrer Mitgliedsunternehmen ein.

#### **Ausblick**

Der politischen Nachfrage nach Transparenz und Nachverfolgbarkeit in der Solar-Wertschöpfungskette steht eine effektiv zunehmende Intransparenz gegenüber: „The lack of transparency is amplified by a blind spot in the industry regarding the most upstream segments of the supply chain, which are mining quartz rock for conversion to MGS and producing polysilicon



from the MGS“ (CRAWFORD & MURPHY 2023: S. 3). Nach wie vor ist es von außen nicht möglich, genau festzustellen, ob ein bestimmtes Solarmodul Silizium enthält, das in Zwangsarbeit in Xinjiang hergestellt wurde (CRAWFORD & MURPHY 2023).

Kritik an der Wirksamkeit bestehender Instrumente wie Zertifikate oder Audits zur Einhaltung und Umsetzung von Sorgfaltspflichten bezieht sich in diesem Kontext unter anderem auf

- fehlende Möglichkeiten einer tatsächlich unabhängigen Überprüfung vor Ort,
- den Umstand, dass eine solche Überprüfung das Risiko systematischer, staatlich geförderter Zwangsarbeit in Verbindung mit Armutsreduzierungs-Programmen nicht unbedingt zu erfassen vermag (COCKAYNE 2022b), sowie
- die hohe Konzentration entscheidender Produktionsschritte in einem Land. Beispielhaft hierfür steht das „Nadelöhr Waferproduktion“ (2021 wurden 97,3 % aller weltweiten Wafer in China produziert): Das heißt, auch Polysilizium, das von Zell- und Modulherstellern außerhalb Chinas eingekauft wurde, wird in China zu Wafern weiterverarbeitet. Auch hier verlässt man sich bisher auf die „Due Diligence“-Zusagen der entsprechenden Zulieferfirmen, dass es zu keiner Vermischung mit Vorprodukten aus Xinjiang kommt.

Bestehende Ansätze für die Regulierung der Wertschöpfungskette wie Importverbote konzentrieren sich auf Endprodukte und weniger auf Rohmaterialien. Nach offiziellen Handelsdaten (Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER) nehmen zum Beispiel die von China in die USA exportierten Mengen an Silizium selbst eher wieder zu (508 t im Jahr 2020, 151 t im Jahr 2021, 435 t im Jahr 2022 und 252 t allein bis zum September 2023). Forschungen sehen darüber hinaus die Gefahr eines global geteilten Marktes, in dem Länder mit Importverboten Ware mit dem Label „frei von Zwangsarbeit“ erhalten, während unter Zwangsarbeit produzierte Güter womöglich der gleichen Firmen die übrigen Märkte, bspw. in-

nerhalb Chinas, bedienen (COCKAYNE et al. 2022, COCKAYNE 2022a, MURPHY & CRAWFORD 2023). Letztere sind groß und wachsen weiter: Allein in China wurden im Jahr 2021 nach Angaben der China Photovoltaic Industry Association (CPIA) zusätzliche 54,88 GWp installierte Kapazität PV-Leistung an das chinesische Stromnetz angeschlossen (13,9 % mehr als im Vorjahr), für 2022 wird mit einer Neuinstallation von über 75 GWp gerechnet, was zu einer kumulierten Kapazität von ca. 383 GWp führt (CPIA 2021 – 2022). Laut Internationaler Energie Agentur (IEA) gehen Prognosen davon aus, dass China das für 2030 angestrebte Ziel von 1200 GWp Gesamtkapazitäten von Wind- und Solaranlagen schon fünf Jahre früher erreichen wird (IEA 2022a). Gleichzeitig macht die Solar- und Elektronikindustrie nur einen Anteil von ca. 25 % der weltweiten Siliziumproduktion aus. 38 % gehen stattdessen in die Produktion von Silikonem und 35 % in die Herstellung von Aluminiumlegierungen und werden hierfür weltweit gehandelt. So sind Chinas Hauptabnehmer von Silizium Japan, Südkorea, Indien, Malaysia, die Vereinigten Arabischen Emirate, die Niederlande, Bahrain, Thailand, Katar und Mexiko (in absteigender Reihenfolge), die USA liegen lediglich auf Rang 35 (Global Trade Tracker 2023). Während sich der politische und öffentliche Fokus also auf Polysilizium richtet, erfahren die anderen siliziumbasierten Industrien und Märkte in Bezug auf Menschenrechtsrisiken bisher keine Aufmerksamkeit. Intransparenz und Risiken bei Produktion und Handel von Rohsilizium und beim Quarzabbau bleiben bestehen.

### 3.9 Recycling

Silizium wird im Regelfall nicht recycelt, da es meist dissipativ eingesetzt wird. Das bisherige Potenzial bestand ausschließlich in Form metallischer Schrotte, wie Al-Legierungen, Gusseisen und Stahl, aus denen die Rückgewinnung von Silizium im Vergleich zu den anderen Metallen jedoch sowohl von der Menge als auch vom Wert her nur sekundär war und ist. Zum Teil wird Silizium aber intern in Hütten recycelt, wenn Produkte, die nicht den Normen entsprechen („off-

grade“), erneut aufgeschmolzen werden. Auch geben Siliziumhütten ihre „off-grade“-Produkte an Ferrosilizium- oder Ferrosilikomanganhütten zur dortigen Nutzung ab.

Die in der Siliziumindustrie bei der Herstellung von Stäben und Wafern für die Halbleiterindustrie anfallenden Siliziumabfälle sind so rein, dass sie problemlos als Sekundärrohstoffe in der PV-Industrie eingesetzt werden können (EU 2020).

Der beim Sägen von Polysiliziumstäben und -wafern anfallende Sägeschlamm („kerf“, mit Si-Flocken < 0,1 µm Dicke), der ca. 30 % der Ausgangsmenge an Polysilizium ausmacht, wird vom norwegischen Unternehmen REC Solar Norway AS eingeschmolzen und als Sekundärrohstoff zur Produktion von Reinsilizium in Solarqualität bzw. Wafern daraus genutzt.

Die International Renewable Energy Agency (IRENA) geht für das Jahr 2050 bei ca. 6,7 Mio. t Solarmodulen, die neu installiert werden, und einer ungefähren Lebensdauer eines Solarpanels von 30 Jahren von einer jährlichen Abfallmenge in Höhe von 5,5 bis 6 Mio. t Solarmodulen aus (IRENA 2016). Das industrielle Recycling von Solarmodulen ist aufgrund ihrer zahlreichen Komponenten (Rahmen, Folien, Glas, Elektroden, Solarzellen, Lötmittel, Kabelverbindungen, elektronische Bauteile) allerdings noch nicht weit fortgeschritten. In mehreren Ländern existieren jedoch Projekte zum Recycling von Solarmodulen bzw. deren Vorstufen in der PV-Wertschöpfungskette. Das norwegische Unternehmen ReSiTec AS produziert bereits jährlich mehr als 500 t hochreines Siliziumpulver aus Siliziumwafern (EU 2020). Die Dresdner FLAXRES GmbH plant im Rahmen des EU-Forschungsprojektes ReproSolar die Trennung der Komponenten innerhalb der Solarmodule als Vorstufe für die weitere Aufbereitung. Das französische Start-up-Unternehmen ROSI Solar errichtet in Grenoble im Rahmen von ReproSolar eine industrielle Anlage zur pyrolytischen Aufbereitung eines Teils dieser Komponenten und zur Rückgewinnung von Silizium, Silber und Kupfer aus diesen.

Das bei der Silikonherstellung nicht aufgebrauchte Chlorsilan wird verbrannt und daraus wird Mikrosilika produziert. Das bei der Produktion anfallende HCl wird recycelt, um daraus nach Reaktion mit Methanol Methylchlorid als Grundstoff für die weitere Chlorsilanproduktion herzustellen.

### 3.10 Substitution

Nach einer Untersuchung der EU (2020) besteht in folgenden Verwendungsbereichen von Silizium ein Substitutionspotenzial:

Silikone:

- in 5 % der Verwendungszwecke durch Thermoplaste (PVC, TPE)
- in 5 % der Verwendungszwecke durch Gummi

Al-Legierungen:

- Theoretisch durch Silber statt Silizium, das jedoch wesentlich teurer ist
- (Ergänzung: auch durch Magnesium, Kupfer oder Zink, wodurch sich die Eigenschaften der Al-Legierung aber zum Teil deutlich ändern)

Polysilizium (Solar- bzw. Halbleiterindustrie)

- in 1 % der Verwendungszwecke durch Germanium
- in 1 % der Verwendungszwecke durch Galliumphosphid (GaP)
- in 1 % der Verwendungszwecke durch Galliumarsenid (GaAs)
- in 1 % der Verwendungszwecke durch Galliumantimonid (GaSb)
- in 1 % der Verwendungszwecke durch Indiumphosphid (InP)
- in 1 % der Verwendungszwecke durch Indiumarsenid (InAs)
- in 1 % der Verwendungszwecke durch Indiumantimonid (InSb)

Die Herstellung von PV-Modulen ist nicht nur auf der Basis von Solarzellen aus Silizium, sondern auch aus Cadmiumtellurid (CdTe), Kupfer-Indium-Diselenid (CuInSe<sub>2</sub>) (CIS), Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (Cu(In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)Se<sub>2</sub>) (CIGS)

oder Kohlenwasserstoffverbindungen (organische Solarzellen) möglich.

Bei der Nutzung von Ferrosilizium in der Stahlindustrie ist eine Substitution als Desoxidationsmittel durch Verwendung von Aluminium oder anderer Elemente möglich, wenn auch mit höheren Kosten oder unerwünschten Nebeneffekten. Auch Ferrosilikomangan kann Ferrosilizium in einigen Anwendungsbereichen ersetzen.

## 4. Nachfrage

### 4.1 Silizium

Daten zur weltweiten Nachfrage nach Rohsilizium wurden zwar bis zum Jahr 2017 von Roskill Information Services Ltd. publiziert, jedoch standen für diese Studie nur Daten von Roskill bis zum Jahr 2013 zur Verfügung (ROSKILL 2014).

Im Vergleich dazu liegen weltweite und auch regionale sowie sektorbezogene Nachfrage- daten nach Rohsilizium von CRU International Ltd. nicht nur für den hier betrachteten histo- rischen Zeitraum 2005 – 2022, sondern auch für den Vorhersagezeitraum 2023 – 2028 vor (CRU 2023). Der Bericht zu Silizium erscheint zumeist halbjährlich. Wie bei CRU üblich, werden bei je- dem neuen Bericht nicht nur die Vorhersageda- ten aktualisiert, sondern auch die historischen Daten ohne Angabe einer Begründung über- schrieben.

Für das Jahr 2023 sagt CRU eine Erhöhung der weltweiten Nachfrage nach Silizium um 514.152 t (+13,5 %) auf 4.327.179 t gegenüber dem Jahr 2022 voraus. Bis 2027 soll die globale Gesamtnachfrage nach Silizium auf 5.884.849 t ansteigen (CRU 2023). Die DERA hat keine eige- ne Nachfrageentwicklung bis 2027 modelliert (vgl. jedoch Kapitel 6). Die aktuellsten Nachfra- gedaten von CRU (Stand Mai 2023) sowie der historischen Nachfragedaten von Roskill bis 2013 sind in Abb. 28 dargestellt.

Von Bedeutung ist, dass eine steigende Nach- frage nach Rohsilizium nicht nur durch Inbe- triebnahme gestundeter oder neuer Hütten bzw. Öfen gedeckt werden kann, sondern in vielen Hütten weltweit auch durch Umstellung bestehender Öfen zur Produktion von Ferro- silizium oder Ferrosilikomangan auf Silizium (und natürlich auch umgekehrt!). Ausschlag-

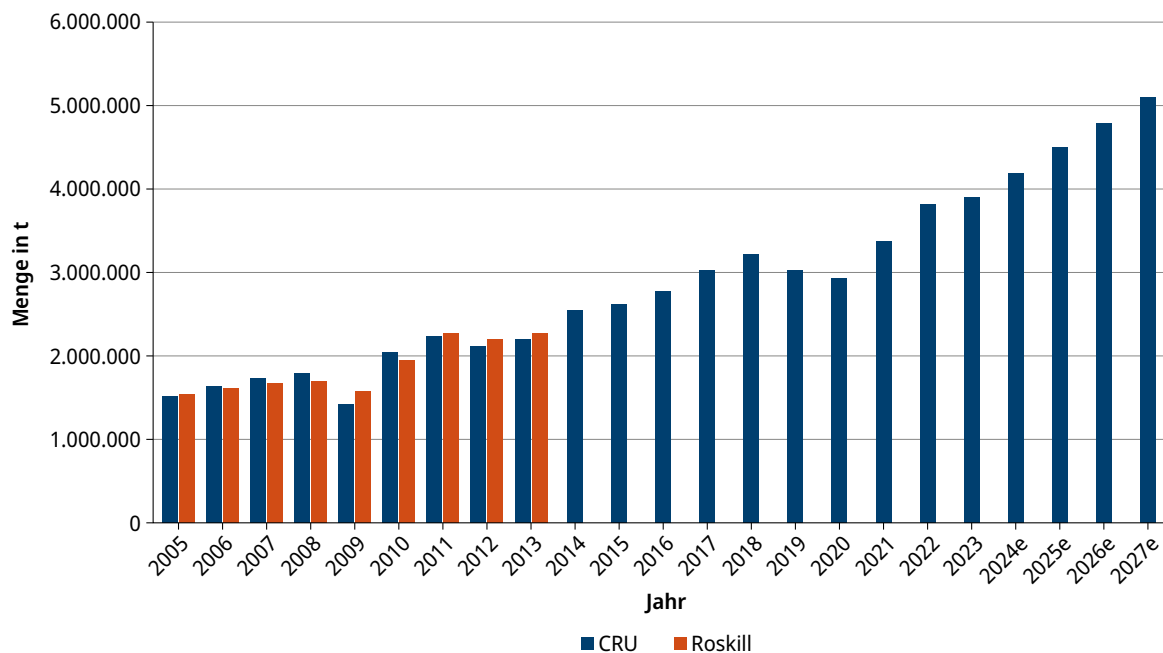


Abb. 28: Weltweite historische Nachfrage (2005 – 2022) bzw. Vorhersage der weltweiten Nach- frageentwicklung (2023 – 2027) nach Rohsilizium nach Roskill Information Services Ltd. (ROSKILL 2014) und CRU International Ltd. (CRU 2023).

gebend sind hierbei nach CRU besonders das Ofendesign und der Typ der genutzten Elektroden. BOISVERT & KSINSIK (2000) erläutern die technischen Möglichkeiten des zeitlich schnellen Wechsels der Produktion von Ferrosilizium zu Silizium und umgekehrt in der Siliziumhütte von Bécancour Silicon Inc. in Kanada. Ähnliche Möglichkeiten bestehen auch in der Hütte der Companhia Ferroligas Minas Gerais (Minasligas) in Pirabora/Brasilien und in den Hütten des Unternehmens Ferroglobe plc in Beverly/USA, Laudun/Frankreich, Sabon/Spanien sowie eMalaheni/Südafrika. Auch aus China liegen von Asian Metal und FerroAlloyNet immer wieder Erwähnungen über Produktionsumstellungen (engl.: transfer) von Silizium zu Ferrosilizium oder Ferrosilikomangan und umgekehrt vor.

## 4.2 Polysilizium

Daten zur weltweiten Nachfrage nach Polysilizium wurden – leider mit Unterbrechungen – für den Zeitraum 2016–2021 in Roskill's Letter from Japan (versch. Monate) publiziert. Diese waren: 2016: 344.000 t, 2017: 440.000 t, 2019: 484.000 t bzw. 2021: 653.000 t. Auch chinesische Presseberichte enthalten immer wieder Daten zur weltweiten Nachfrage nach Polysilizium in den letzten Jahren – die sich jedoch alle widersprechen.

Alternativ betrug nach HALLAM et al. (2002) der Bedarf an Polysilizium für die PV-Industrie im Jahr 2020 452.000 t und im Jahr 2021 549.000 t. Addiert man den Bedarf für die Halbleiterindustrie (s. u.), ergibt sich eine weltweite Nachfrage nach Polysilizium in Höhe von ca. 495.000 t im Jahr 2020 und ca. 595.000 t im Jahr 2021.

Die Nachfrage nach Polysilizium setzt sich aus der Nachfrage nach Halbleitersilizium sowie nach Solarsilizium zusammen. Die Nachfrage nach Halbleitersilizium ist nicht publiziert, wird jedoch von der SILTRONIC AG (frdl. mdl. Mitt.) auf ca. 36.000 t im Jahr 2020 und rund 40.000 t im Jahr 2022 geschätzt. Für die Herstellung von 40.000 t Halbleitersilizium wurden ca. 48.000 t

Polysilizium benötigt. Der Wafermarkt und damit die Nachfrage nach Halbleitersilizium wächst jährlich um 5–6 %.

Die Nachfrage nach Solarsilizium in absoluten Mengen ist dagegen im Zeitraum 2001–2020 kaum gestiegen, da trotz stark steigender Nachfrage nach Solarzellen/-modulen der spezifische (Poly)Siliziumbedarf (in g) pro Solarzellenleistung (in Watt peak) im gleichen Zeitraum von ca. 16 g/Wp auf ca. 3,5 g/Wp stark gesunken ist (BERNREUTER RESEARCH). Heute liegt der durchschnittliche Siliziumbedarf noch niedriger und beträgt nach IEA (2022b) 2,9 g/Wp, nach HALLAM et al. (2022) ca. 2,8 g/Wp, nach JÄGER-WALDAU (2023) ca. 2,6 g/Wp und nach TRUBE (2022) bzw. FISCHER et al. (2023) je nach Solarzellentyp sogar nur noch 2,1 g–2,3 g/Wp. Bis 2032 wird mit einer weiteren Abnahme auf 1,6 g/Wp gerechnet (TRUBE 2022). Zu dieser relativen Siliziumeinsparung trugen nach BERNREUTER RESEARCH

- die Reduzierung der Waferstärke,
- der Wechsel von traditionellen Drahtsägen zu Diamantdrahtsägen, die dünner sind und weniger Siliziumschlamm (engl.: kerf) produzieren,
- eine steigende Solarzelleneffizienz,
- ein steigender Anteil (derzeit 97 %) von monokristallinen Solarzellen, die effizienter sind als multikristalline Solarzellen sowie
- halbierte Zellen zur Reduktion des Widerstandsverlusts auf der gesamten miteinander verbundenen Kette von Solarzellen eines Moduls und dadurch Verbesserung des Verhältnisses von Zell- zu Modulleistung bei.

Nach Statistiken der International Renewable Energy Agency (IRENA 2023) sind im Jahr 2021 weltweit rund 144 GWp PV-Kapazität und im Jahr 2022 rund 189 GWp PV-Kapazität zugebaut worden, was für das Jahr 2022 bei einem Durchschnittswert von 2,6 g/Wp (s. o.) einem Polysiliziumbedarf von ca. 490.000 t entsprechen würde. Für 2023 erwarten Analysten einen weltweiten Zubau von rund 350 GWp PV-Kapazität (= Bedarf von ca. 910.000 t Polysilizium).

SOLARPOWEREUROPE (2023) nennt einen Zubau der weltweiten PV-Kapazität von 239 GWp im Jahr 2022 und geht in einem mittleren Szenario von weltweiten Zubauraten von 341 GWp im Jahr 2023, 401 GWp im Jahr 2024, 462 GWp im Jahr 2025, 534 GWp im Jahr 2026 und 617 GWp im Jahr 2027 aus. Ein Zubau von 617 GWp würde bei einem durchschnittlichen Polysiliziumbedarf von dann nur noch 2,0 g/Wp einer weltweiten Nachfrage nach 1,234 Mio. t Polysilizium entsprechen.

### 4.3 Ferrosilizium

Daten zur weltweiten Nachfrage nach Ferrosilizium wurden zwar bis zum Jahr 2017 von Roskill Information Services Ltd. publiziert, jedoch standen für diese Studie ebenfalls nur Daten

von Roskill bis zum Jahr 2013 zur Verfügung (ROSKILL 2014). Im Jahr 2000 lag danach der weltweite Bedarf bei ca. 3,7 Mio. t, im Jahr 2005 bei 5,305 Mio. t, im Jahr 2010 bei 6,953 Mio. t und im Jahr 2013 bei 8,077 Mio. t FeSi.

Daten von CRU International Ltd. zur weltweiten Nachfrage nach Ferrosilizium wurden für diese Studie nicht ausgewertet.

Nach FERROGLOBE (2022) lag die Nachfrage nach Ferrosilizium außerhalb Chinas im Jahr 2022 bei 3,163 Mio. t. Nach Berechnungen von Asian Metal betrug der Bedarf an Ferrosilizium in China im Jahr 2022 5,162 Mio. t. Die weltweite Nachfrage nach Ferrosilizium lag im Jahr 2022 dementsprechend bei ca. 8,325 Mio. t, ein Anstieg um 19,7 % gegenüber dem Jahr 2010, aber nur von 3,1 % gegenüber dem Jahr 2013.

## 5. Angebot

### 5.1 Silizium

Soweit recherchiert werden konnte, wurde Rohsilizium im Jahr 2022 in einer Menge von ca. 1,06 Mio. t in 16 Ländern außerhalb Chinas produziert. China war mit einer Menge von ca. 3,25 Mio. t der mit Abstand größte Produzent (s. u.). Die Produzentenländer in absteigender Reihenfolge ihrer Bedeutung bzw. Produktionsmenge im Jahr 2022 waren (vgl. Abb. 30): China (75 %, s. u.), Norwegen (6,3 %), Brasilien (5,1 %), USA (3,0 %), Frankreich (2,2 %), Malaysia (1,3 %), Kanada (1,2 %), Island (1,1 %), Russland (1,0 %), Australien (1,0 %), Bosnien-Herzegowina (0,7 %), Deutschland (0,6 %), Spanien (0,4 %), Laos (0,3 %), Thailand (0,2 %), Slowakei (0,1 %) und Südafrika (<0,1 %) sowie vermutlich auch Iran und Georgien. Im Jahr 2023 wurde die Produktion in China, in Südafrika und möglicherweise auch im Iran deutlich ausgeweitet.

Gesicherte Daten zur Siliziumproduktion liegen nur aus Norwegen, Brasilien, Russland, Deutschland und der Slowakei sowie für einzelne Jahre aus Australien, Spanien und Island vor (s. Anhang – Länderprofile). Für alle weiteren Länder wurde in dieser Studie auf Handelsdaten der Datenbank GLOBAL TRADE TRACKER (2023) bzw. für Frankreich, Kanada und USA auf Daten von CRU INTERNATIONAL LTD. zurückgegriffen.

Zwischen den von CRU publizierten Produktionsdaten (aktuellster genutzter Stand: Oktober 2023) und den Handelsdaten (weltweite Importe von Silizium <99,99 % Si aus einem Land) gibt es zum Teil erhebliche Unterschiede.

Ähnliches gilt für Brasilien. So gab es in diesem bedeutenden Produktionsland im Jahr 2022 fünf Silizium produzierende Unternehmen mit sieben Hütten. Diese meldeten an ihren Branchenverband Associação Brasileira dos Produtores de Ferroligas e Silício Metálico (ABRAFE) eine Siliziumproduktion in Höhe von 216.939 t in 2021 bzw. 219.196 t in 2022. CRU (2023) nennt für Brasilien eine Siliziumproduktion in Höhe von 212.100 t in 2021 bzw. 221.300 t in 2022.

Unterschiede in den Produktionsdaten aus Norwegen lassen sich dagegen evtl. dadurch erklären, dass die beiden in Norwegen produzierenden Siliziumunternehmen Elkem ASA und Wacker Chemie AG an die Norwegian Environment Agency stets ihre (für diese Studie genutzte) Rohproduktion (engl.: tapped production) melden (2021: 278.410 t bzw. 2022: rund 272.000 t), während CRU (2023) die nicht publizierte, aber möglicherweise direkt in den vier Hütten abgefragte verkaufte Produktionsmenge (engl.: sold production) angibt (2021: 226.150 t bzw. 2022: 229.850 t).

**Tab. 15: Rohsiliziumproduktion und -kapazitäten (in t) in China in den Jahren 2021 und 2022 nach unterschiedlichen Analystenmeinungen (vgl. Anhang – Länderprofil China)**

	2021		2022	
	Produktion	Kapazität	Produktion	Kapazität
Asian Metal	2.028.748	4.040.000	2.281.530	4.280.000
CRU International	2.520.000	5.300.000	3.042.500	5.900.000
CNIA-Silicon Industry Branch	2.700.000	5.000.000	3.250.000	5.700.000
SMM-Shanghai Metals Market	2.910.000	4.990.000	3.500.000	5.710.000
FerroAlloyNet	2.785.490	6.481.680	3.502.570	6.601.670

Wesentlich gravierender sind die Meinungsunterschiede zur Siliziumproduktion (und den Produktionskapazitäten) in China zwischen CRU und den verschiedenen chinesischen Analysten (vgl. Tab. 15), so dass sich auch kein gesicherter Anteil Chinas an der Weltproduktion von Rohsilizium angeben lässt. Dieser lag im Jahr 2022 irgendwo zwischen 69 % und 77 % bzw. vermutlich 75 % bei Annahme einer Produktionsmenge von ca. 3,25 Mio. t.

In den genannten 16 Ländern außerhalb Chinas wurde Silizium im Jahr 2022 durch 24 Unternehmen bzw. Joint Ventures in 37 Hütten mit insgesamt 107 Öfen produziert. Diese besaßen eine Gesamtkapazität von 1,526 Mio. tpa Silizium, waren jedoch nicht alle das ganze Jahr über in Betrieb.

Im Jahr 2023 kam durch Ofenumstellung eine Hütte in Malaysia sowie möglicherweise eine neue Siliziumhütte im Iran hinzu.

In China sollen zwischen 124 (Quelle: ASIAN METAL) und 210 (Quelle: SHANGHAI METALS MARKET) Siliziumhütten existieren. Hiervon sind vor allem die Hütten, die in den südchinesischen Provinzen mit Wasserkraft versorgt werden, aus Produktionskostengründen nur in den regenreichen Sommermonaten in Betrieb (vgl. Anhang – Länderprofil China). Im Vergleich zur o. g. weltweiten Siliziumproduktion außerhalb Chinas verfügt der größte chinesische und zugleich weltgrößte Produzent von Rohsilizium, Hoshine Silicon Industry Co., Ltd., über vier Hütten mit insgesamt 132 (oder 108?) Öfen, von denen im Sommer 2023 jedoch 49 ausgeschaltet waren.

**Tab. 16: Unternehmen mit den weltweit größten Siliziumproduktionskapazitäten (in tpa) (Stand: Ende 2022) sowie deren Produktionsmengen (in t) im Jahr 2022 (soweit publiziert). n. v. = nicht verfügbar, Zusammenstellung: DERA.**

Unternehmen	Land	Kapazität	Produktion
Hoshine Silicon Industry Co., Ltd.	China	1.220.000	841.500
East Hope Group Co., Ltd.	China	550.600	n. v.
Sichuan Hengye Silicon Industry Co., Ltd.	China	360.000	n. v.
Ferroglobe plc	UK	342.490	209.342 (Verkäufe)
Elkem ASA	Norwegen-China	270.000	186.000
Dow Chemical Corporation	USA	201.910	n. v.
Qinghai Lihao Semiconductor Materials Co., Ltd.	China	200.000	n. v.
Chongqing Wujiang Silicon Industry Co., Ltd.	China	130.000 – 140.000	n. v.
Rima Industrial S.A.	Brasilien	120.800	n. v.
Yunnan Yongchang Silicon Industry Co., Ltd.	China	107.000	85.500
Wacker Chemie AG	Deutschland	100.000	85.206
Xinjiang Jingxin Silicon Industry Co., Ltd.	China	100.000	48.500
Sichuan Leshan Xinhe Electricity Comprehensive Development Co., Ltd.	China	98.400	37.000



Hoshine Silicon verfügte zum Jahresende 2022 über eine Siliziumproduktionskapazität von 1,22 Mio. tpa (= 16,9 % der globalen Kapazität bzw. das Doppelte der gesamteuropäischen Kapazität) und trug im Jahr 2022 mit einer Produktionsmenge von 841.500 t Rohsilizium mit ca. 19,5 % zur Weltproduktion von Rohsilizium bei.

In Argentinien, Kasachstan, Philippinen, Nordmazedonien, Usbekistan und Thailand existieren zudem zum Teil seit vielen Jahren gestundete Siliziumhütten mit einer Gesamtkapazität von weiteren 79.000 tpa Silizium. Ob diese Hütten, auch aus technischen Gesichtspunkten, jemals wieder in Produktion gehen werden, ist

**Tab. 17: Unternehmen mit angekündigten Siliziumproduktionskapazitätserweiterungen (in tpa) (Stand: Mitte 2023) in Reihung ihrer Gesamtgröße, Zusammenstellung: DERA.**

Unternehmen	Land	kurzfristig	mittelfristig	langfristig	unbekannt
East Hope Group Co., Ltd.	China	+ 400.000	+ 345.000		
Hoshine Silicon Industry Co., Ltd.	China		+ 710.000		
Qinghai Laidebao New Material Co., Ltd.	China		+ 400.000		
Aksu Hongshi High Purity Crystalline Silicon Co., Ltd.	China	+ 250.000 (2024 und später)			+ 120.000
Zhejiang Juhua Co., Ltd.	China			+ 360.000	
Trina Solar Ltd.	China	+ 100.000 (bis Ende 2023)	+ 200.000 (bis Ende 2025)		
Ningxia Baofeng Energy Group Co., Ltd.	China			+ 350.000	
Daqo New Energy Corp.	China			+ 300.000	
Sichuan Yongxiang Polysilicon Co., Ltd. (Tongwei)	China		+ 80.000 + 200.000 (JV mit LONGi Green Energy Technology)		
Inner Mongolia Tongwei Green Materials Co., Ltd.	China	+ 120.000 (2024)	+ 240.000		
Shaanxi Yulin Energy Group New Energy Technology Co., Ltd.	China		+ 250.000 (bis 2026)		
Xinjiang Qiya Silicon Metal Co., Ltd.	China		+ 200.000 (2025 und später)		
Risen Energy Co., Ltd.	China	+ 100.000 (2024)	+ 100.000 (2026)		

**Rohstoffrisikobewertung – Silizium und Ferrosilikolegerungen**  
**Zwischenprodukte auf Basis von Quarz**

Unternehmen	Land	kurzfristig	mittelfristig	langfristig	unbekannt
Jolywood (Taizhou) Solar Technology Co., Ltd.	China		+ 200.000		
Xinte Energy Co., Ltd.	China			+ 200.000	
Yunnan Yongchang Silicon Industry Co., Ltd.	China			+ 193.000	
Wuxi Shangjij Automation Co., Ltd.	China		+ 150.000		
Xinjiang Jingnuo New Energy Industry Development Co., Ltd.	China	+ 150.000 (2023 und später)			
Jingbian Xinyao New Material Co., Ltd.	China			+ 150.000	
Sichuan Hengye Silicon Industry Co., Ltd.	China	+ 140.000			
Zhejiang Kaihua Yuantong Silicon Industry Co., Ltd.	China	+ 132.500 tpa (Ende 2023)			
Wuwei Rongfeng Silicon Industry Co., Ltd.	China	+ 60.000 (Ende 2023) + 60.000 (Ende 2024)			
Hengfeng Shengtai New Material (Xinjiang) Co., Ltd.	China	+ 50.000 (2024)	+ 50.000 (2026)		
Xinjiang Yaoju Silicon Based New Material Co., Ltd.	China			+ 100.000	
Shaanxi Shenghua Metallurgical Co., Ltd.	China				+ 84.000
PacWest Silicon LLC	USA				+ 73.000
Sica New Materials (Thailand) Co., Ltd.	Thailand			+ 60.000	
Solquartz Pty Ltd.	Australien	+ 52.000 (2023 – 2025)			
Lao Silicon Co., Ltd.	Laos		+ 50.000		
PMB Silicon Sdn. Bhd.	Malaysia	+ 36.000 (Ende 2023)			
ANSA Silicon LLP	Kasachstan				+ 35.000
ARAZ Silicon Industries Co.	Iran		+ 15.000	+ 15.000	
Canadian Metals Inc.	Kanada				+ 22.000

aber unklar. Die Ende 2017 stillgelegte Siliziumhütte in Island gilt als nicht mehr betriebsbereit (PCC BakkiSilicon, frdl. mdl. Mitt.); die ehemalige Siliziumhütte in der Ukraine verfällt seit ihrer Stilllegung im Jahr 2011.

Als Summe wurden insgesamt also Projekte mit neuen Kapazitäten von 7.302.500 tpa Rohsilizium, davon nur 358.000 tpa (4,9 %) außerhalb Chinas, angekündigt:

- kurzfristig (2023 – 2024) Projekte mit Kapazitäten von 1.598.500 tpa
- mittelfristig (2025 – 2027) Projekte mit Kapazitäten von 3.192.000 tpa
- langfristig (nach 2027) Projekte mit Kapazitäten von 2.178.000 tpa
- noch unbekanntem Fertigstellungsdatum Projekte mit Kapazitäten von 334.000 tpa

Diese angekündigten Kapazitäten entsprechen einer Verdoppelung der jetzigen weltweiten

Rohsiliziumkapazitäten. Was davon wirklich umgesetzt wird, wird die Zukunft zeigen.

Ein hoher, nicht genau spezifizierbarer Anteil der weltweiten Siliziumproduktion wird von den produzierenden Unternehmen innerhäusig eingesetzt (engl.: captive use) und dient damit zugleich der Rohstoffabsicherung bzw. Rückwärtsintegration. So ist der weltgrößte Produzent von Rohsilizium, Hoshine Silicon Industry Co., Ltd. aus China, zugleich der vermutlich weltgrößte Produzent von Siloxanen und investiert derzeit auch in die Polysiliziumproduktion. Die Dow Silicones Corporation/USA nutzt das von ihr in Brasilien, in Kanada und in den USA produzierte Silizium vollständig selber. Gleiches gilt für die Wacker Chemie AG, die einen Teil ihres Rohsiliziumbedarfs aus einer eigenen Hütte in Norwegen deckt. Der norwegisch-chinesische Konzern Elkem ASA produzierte zuerst Silikone und stellte erst dann die Vorteile, sogar Notwendigkeit, einer eigenen Rohstoffabsicherung mit Silizium fest (ELKEM ISLAND, frdl. mdl. Mitt.). Ein Gegenbeispiel ist der japanische Konzern Shin-Etsu Chemical Company Ltd., der zwar in

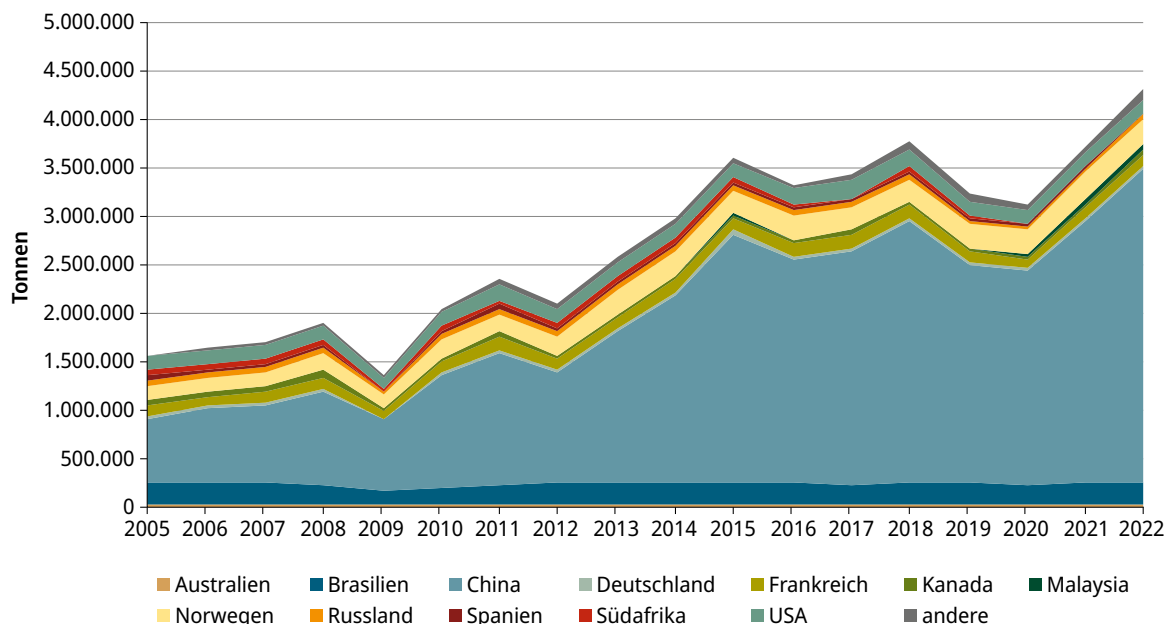


Abb. 29: Entwicklung der weltweiten Rohsiliziumproduktion im Zeitraum 2005 – 2022, Grafik: BGR.

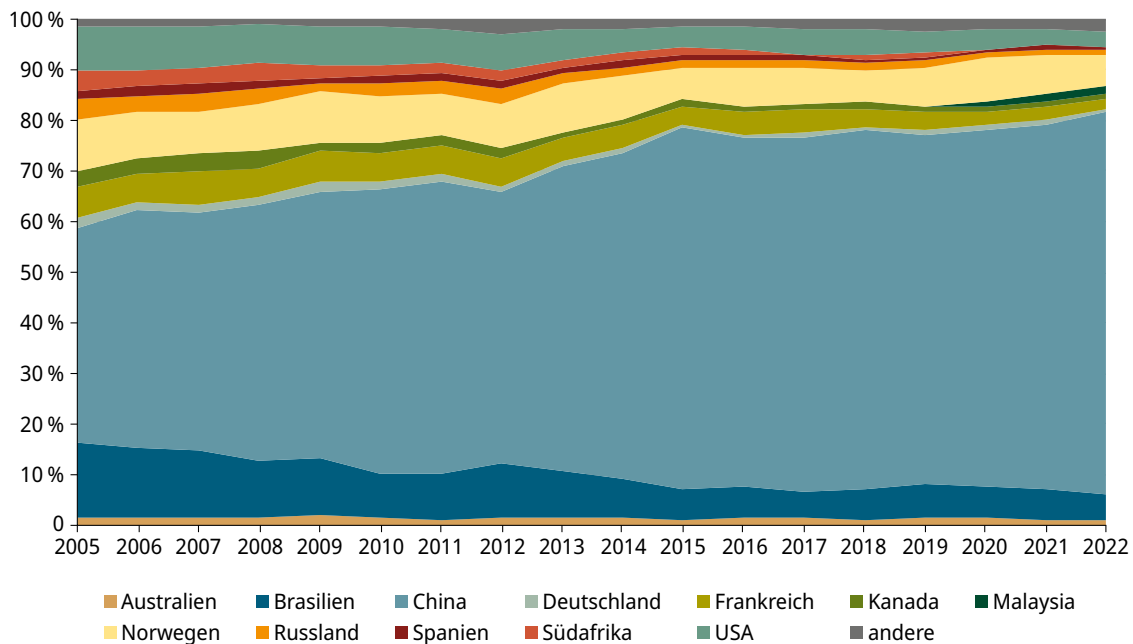


Abb. 30: Entwicklung der anteiligen weltweiten Rohsiliziumproduktion im Zeitraum 2005 – 2022, Grafik: BGR.

Australien durch sein Tochterunternehmen SIMCOA Operations Silizium herstellt, dieses aber soweit bekannt nicht selber für die Produktion seiner eigenen Produkte auf Siliziumbasis nutzt, sondern weltweit vertreibt.

## 5.2 Polysilizium

Im Jahr 2022 wurde Polysilizium in einer Menge von ca. 978.000 t in vermutlich sieben Ländern produziert. Hiervon war China mit einer Menge von ca. 811.000 t der mit Abstand größte Produzent (s. u.). Die Produzenteländer in absteigender Reihenfolge ihrer Bedeutung bzw. Produktionsmenge im Jahr 2022 waren: China (83 %), Deutschland (7 %), USA (6 %), Malaysia (2,5 %), Japan (1 %) sowie Südkorea und möglicherweise auch Katar (jeweils < 1 %).

Gesicherte Daten zur Polysiliziumproduktion liegen nur von einem börsennotierten Hersteller in den USA sowie in der Vergangenheit aus Japan vor. Für China wurde auf Daten der dortigen Branchenverbände und Analysten (s. u.),

für die USA auf Einzelmeldungen US-amerikanischer Behörden und für alle weiteren Länder auf Handelsdaten der Datenbank GLOBAL TRADE TRACKER (2023) zurückgegriffen. Hierbei besitzen die Handelsdaten eine relativ große Bedeutung und Zuverlässigkeit, da in den meisten Produktionsländern von Polysilizium (mit Ausnahme von China) keine bzw. nur eine untergeordnete Weiterverarbeitung stattfindet.

Für China, dem mit Abstand größten Produzenten von Polysilizium mit den weltweit größten Kapazitäten und den weltweit größten angekündigten Kapazitätserweiterungen, ist die Datenlage komplex bzw. nicht eindeutig. Nicht alle chinesischen Produzenten publizieren ihre Produktionsmengen und nicht alle chinesischen Unternehmen ihre Ausbaupläne, vor allem nicht auf Englisch. Zudem werden aufgrund des anhaltenden rasanten Wachstums des chinesischen und globalen PV-Marktes die Polysiliziumausbaupläne ständig angepasst bzw. erweitert. Die in dieser Studie wiedergegebenen Daten geben daher nur einen aktuellen Einblick in den chinesischen Polysiliziummarkt aufgrund

von Datenauswertungen der DERA und können von anderen Analysen im Einzelfall durchaus abweichen.

In den genannten sechs Ländern außerhalb Chinas wurde Polysilizium im Jahr 2022 durch neun Unternehmen in zwölf Werken produziert. Diese besaßen eine publizierte (offizielle) Gesamtkapazität von 186.500 tpa Polysilizium, waren jedoch nicht alle das ganze Jahr über in Betrieb. Aus dieser theoretisch zur Verfügung stehenden Gesamtkapazität von 186.500 tpa Polysilizium können derzeit ca. 155.000 tpa monokristallines Silizium, nach Schätzungen der DERA aufgeteilt in ca. 115.000 tpa Solarsilizium und 40.000 tpa Halbleitersilizium, produziert werden. Das Unternehmen Wacker Chemie AG hat im Juni 2023 angekündigt, seine anteiligen Halbleitersiliziumproduktionskapazitäten im Werk Burghausen bis Anfang 2025 „um deutlich mehr als 50 Prozent“ zu erhöhen. An Solarsilizium stehen zudem jährlich bis zu 10.000 t (Produktionsmenge 2022: 6.663 t) eines norwegischen Unternehmens zur Verfügung, das dieses aus Schleifabfällen herstellt.

CRU International Ltd. (2023) listet 20 Werke, die Ende 2022 in China mit einer Gesamtkapa-

zität von rund 1,3 Mio. tpa Polysilizium herstellen (vgl. auch Tab. 18). Für diese Studie konnten dagegen in China 16 produzierende Unternehmen, teils in Form von Joint Ventures, identifiziert werden, die Ende 2022 in 25 Werken mit einer Gesamtkapazität von 1,60 Mio. tpa Polysilizium produzierten. Diese Gesamtkapazität ist deutlich höher als die Kapazitätsangaben in Tab. 18, jedoch wurde für diese Studie die offizielle Kapazität in Höhe von 1,16 Mio. tpa der China Nonferrous Metals Industry Association (CNIA) Silicon Industry Branch zugrunde gelegt.

Die offizielle Produktionskapazität an Halbleitersilizium in China ist mit ca. 5.000 tpa sehr gering (SILICON PRODUCTS BITTERFELD GMBH & Co. KG, frdl. mdl. Mitt.). Nach Einschätzungen westlicher Marktteilnehmer und Analysten (frdl. mdl. Mitt.) kann aus dem gegenwärtig in China produzierten Polysilizium zumeist kein Halbleitersilizium und in vielen Fällen nicht einmal monokristallines Solarsilizium erzeugt werden.

Der größte chinesische und zugleich weltgrößte Produzent von Polysilizium, GCL Technology Holdings Ltd. (GCL Tech), betreibt drei eigene Polysiliziumwerke und ist an mindestens drei weiteren Werken beteiligt. GCL Tech verfügte

**Tab. 18: Polysiliziumproduktion (in t) in China in den Jahren 2021 und 2022 sowie 2023 (Vorschau) nach unterschiedlichen Analystenmeinungen (vgl. Anhang – Länderprofil China). n. v. = nicht verfügbar**

	2021		2022		2023	
	Produktion	Kapazität	Produktion	Kapazität	Produktion	Kapazität
FerroAlloyNet	n. v.	n. v.	787.900	n. v.	n. v.	n. v.
CRU International	n. v.	621.800	n. v.	1.131.800	n. v.	2.361.800
CNIA Silicon Industry Branch	495.000	520.000	811.000	1.160.000	1.400.000	2.300.000
SMM-Shanghai Metals Market	490.000	660.000	820.000	1.090.000	1.550.000	2.560.000
China Photovoltaic Industry Association (CPIA)	506.000	623.000	827.000	n. v.	1.240.000	n. v.
InfoLink Consulting	n. v.	726.300	n. v.	1.179.100	n. v.	2.171.300

zum Jahresende 2022 über eine Polysiliziumproduktionskapazität von 459.000 tpa (inkl. Beteiligungskapazitäten) (= 34,1 % der offiziellen globalen Kapazität bzw. das 5,7-Fache der Gesamtkapazität der Wacker Chemie AG) und trug im Jahr 2022 mit einer Produktionsmenge von 129.556 t Polysilizium (inkl. dem wichtigsten Beteiligungsanteil) mit ca. 13 % zur Weltproduktion von Polysilizium bei.

In Summe wurden Projekte mit neuen Kapazitäten von 5.932.600 tpa Polysilizium, davon nur 388.100 tpa (6,5 %) außerhalb Chinas, angekündigt:

- kurzfristig (2023 – 2024) Projekte mit Kapazitäten von 860.000 tpa
- mittelfristig (2025 – 2027) Projekte mit Kapazitäten von 3.680.500 tpa

- langfristig (nach 2027) Projekte mit Kapazitäten von 1.154.100 tpa
- noch unbekanntes Fertigstellungsdatum Projekte mit Kapazitäten von 238.000 tpa

Diese angekündigten Kapazitäten entsprechen dem 4,4-Fachen der jetzigen weltweiten Polysiliziumkapazitäten. Was davon wirklich umgesetzt wird, wird auch in diesen Fällen allein die Zukunft zeigen.

Know-how zur Produktion von Siliziumstäben und -wafern als Voraussetzung für die Herstellung von Solarzellen bzw. Halbleiterbauteilen liegt in China (Solar, Halbleiter), Deutschland (Halbleiter), Indien (Solar), Japan (Halbleiter), Malaysia (Solar), Norwegen (Solar), Südkorea (Halbleiter), Türkei (Solar), Vietnam (Solar) und USA (Halbleiter) vor.

**Tab. 19: Unternehmen mit den weltweit größten Produktionskapazitäten für Polysilizium (in tpa) (Stand: Ende 2022) sowie deren Produktionsmengen (in t) im Jahr 2022 (soweit publiziert). n. v. = nicht verfügbar, Zusammenstellung: DERA.**

Unternehmen	Land	Kapazität	Produktion
GCL Technology Holdings Ltd.	China	459.000	129.556
East Hope Group Co., Ltd.	China	247.000	n. v.
Sichuan Yongxiang Polysilicon Co., Ltd.	China	230.000	109.000
Daqo New Energy Corp.	China	206.000	133.812
Xinte Energy Co., Ltd.	China	200.000	125.900
Wacker Chemie AG	Deutschland-USA	80.000	n. v.
Asia Silicon (Qinghai) Co., Ltd	China	50.000	n. v.
Qinghai Lihao Semiconductor Materials Co., Ltd.	China	50.000	n. v.
Hemlock Semiconductor Operations, LLC	USA	42.000	n. v.
OCI Company Ltd.	Südkorea	39.700	n. v.
TCL Zhonghuan Renewable Energy Technology Co., Ltd.	China	36.900	39.668
Inner Mongolia Runyang Yueda New Energy Technology Co., Ltd.	China	30.000	n. v.

**Tab. 20: Unternehmen mit angekündigten neuen Polysiliziumwerken oder Ausbau bestehender Polysiliziumwerke (in tpa) (Stand: Mitte 2023) in Reihung ihrer Gesamtgröße, Zusammenstellung: DERA.**

Unternehmen	Land	kurzfristig	mittelfristig	langfristig	unbekannt
Hoshine Silicon Industry Co., Ltd.	China		+ 710.000		
Ningxia Baofeng Energy Group Co., Ltd.	China	+ 50.000 (Mitte 2023, möglicher- weise gestoppt)	+ 250.000	+ 300.000	
East Hope Group Co., Ltd.	China		+ 78.000 + 275.000	+ 62.500	
Qinghai Lihao Semiconductor Materials Co., Ltd.	China		+ 50.000 + 100.000 (davon 2.000 Halbleiter- qualität) (ab August 2024)	+ 150.000 (davon 2.000 Halbleiter- qualität)	
Wuxi Shangjij Automation Co., Ltd	China		+ 100.000 + 198.000 (30 %)		
Xinte Energy Co., Ltd	China	+ 100.000 (Halbleiter- qualität) (2023)	+ 100.000 (Halbleiter- qualität) + 100.000		
Inner Mongolia Dongli Photovoltaic Electronics Co., Ltd.	China	+ 36.000 (möglicher- weise gestoppt)		+ 200.000	
Xinjiang Central Hoshine Silicon Industry Co., Ltd.	China	+ 100.000	+ 100.000		
Xinyi Silicon Holdings Ltd.	China	+ 60.000	+ 140.000		
Risen Energy Co., Ltd	China	+ 50.000 (2024)	+ 150.000 (2026)		
Aksu Hongshi High Purity Crystalline Silicon Co., Ltd.	China	+ 100.000 (ab Juni 2024)		+ 100.000	
Qinghai Laidebao New Material Co., Ltd.	China		+ 200.000		
Sichuan Yongxiang Polysilicon Co., Ltd.	China			+ 200.000 (51 %)	
Shaanxi Yulin Energy Group New Energy Technology Co., Ltd.	China		+ 200.000 (bis Ende 2026)		

**Rohstoffrisikobewertung – Silizium und Ferrosilikolegerungen**  
**Zwischenprodukte auf Basis von Quarz**

Unternehmen	Land	kurzfristig	mittelfristig	langfristig	unbekannt
Canadian Solar Inc.	Kanada		+ 200.000 (bis Ende 2027)		
GCL Technology Holdings Ltd.	China		+ 207.000		
NN	Indonesien				+ 160.000
Trina Solar Ltd.	China	+ 50.000 (bis Ende 2023)	+ 100.000 (bis Ende 2025)		
Daqo New Energy Corp.	China		+ 120.000 (da- von 20.000 Halb- leiterqualität)		
Xinjiang Jingnuo New Energy Industry Development Co., Ltd.	China	+ 50.000 (Ende 2022)	+ 50.000		
Ningxia Runyang Silicon Material Technology Co., Ltd.	China	+ 50.000 (Ende 2022)	+ 50.000		
Henan Saineng Silicon Industry Co., Ltd	China		+ 100.000		
JA Solar Technology Co., Ltd.	China		+ 100.000		
Jolywood (Taizhou) So- lar Technology Co., Ltd.	China		+ 10.000	+ 90.000	
Geely Technology Group Co., Ltd.	China	+ 8.000	+ 50.000		
Inner Mongolia Runy- ang Yueda New Energy Technology Co., Ltd.	China	+ 50.000 (ab Juni 2024)			
NN	Ägypten				+ 48.000
Qatar Solar Technologies	Katar			+ 41.600	
NN	Indonesien	+ 40.000 (2022)			
OCIM Sdn. Bhd.	Malaysia		+ 10.000 (bis 2025) + 10.000 (Halbleiter- qualität) (2026)	+ 20.000 (bis 2027)	
Adani Group	Indien				+ 30.000
REC Solar Grade Silicon LLC	USA	+ 16.000 (Ende 2023)			
ARAZ Silicon Industries Co.	Iran			+ 10.000	
OCI Company Ltd.	Südkorea		+ 2.500 (Halb- leiterqualität) (bis 2026)		
JV	Saudi-Arab.				offen



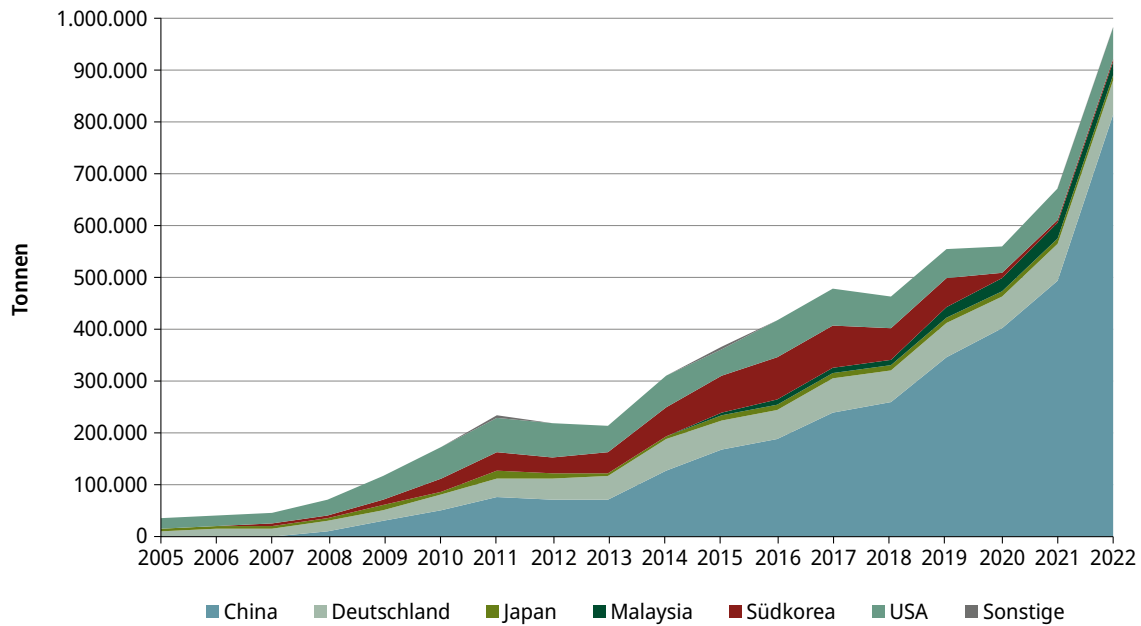


Abb. 31: Entwicklung der weltweiten Polysiliziumproduktion im Zeitraum 2005 – 2022, Grafik: DERA.

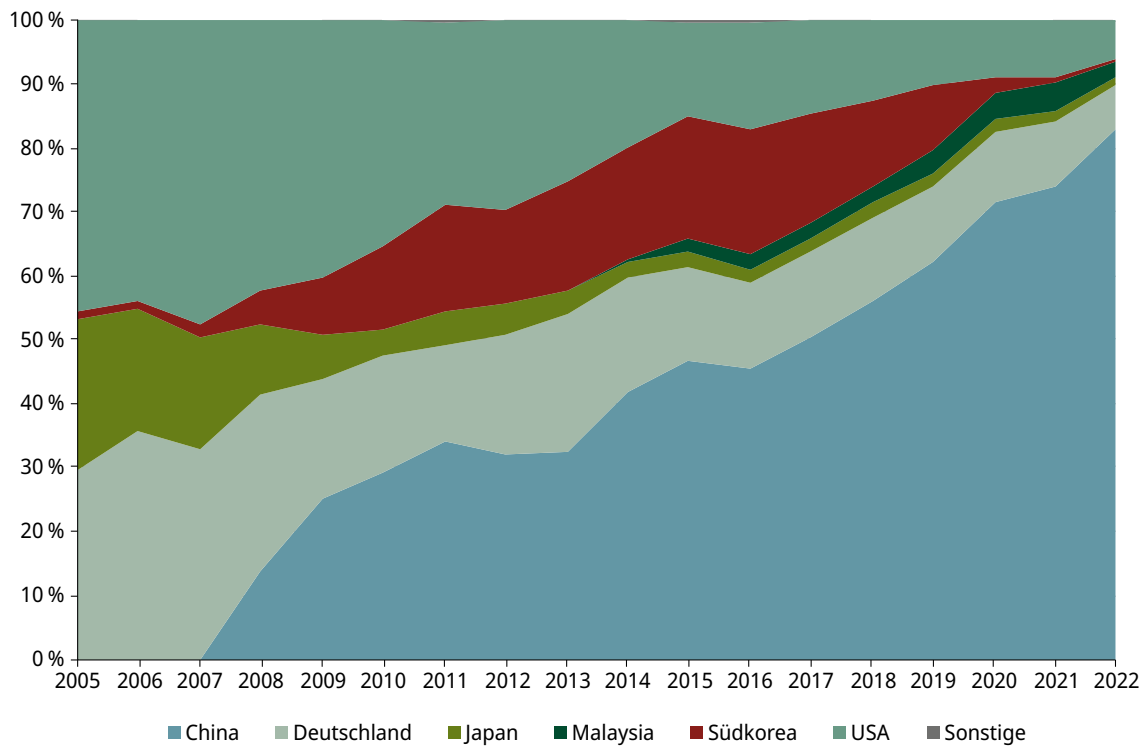


Abb. 32: Entwicklung der anteiligen weltweiten Polysiliziumproduktion im Zeitraum 2005 – 2022, Grafik: DERA.

## 5.3 Ferrosilizium

Die weltweite Produktion von Ferrosilizium im Jahr 2022 lag bei ca. 8,08 Mio. t und verteilte sich auf 33 Länder. Hiervon war China mit einer Produktionsmenge von (vermutlich) 5,66 Mio. t (= 70,1 %) der mit Abstand größte Produzent. Es folgten in absteigender Reihenfolge ihrer Bedeutung bzw. Produktionsmenge (vgl. Abb. 33): Russland (7,2 %), Norwegen (4,0 %), Brasilien (3,0 %), USA (2,0 %), Bhutan (1,4 %), Südafrika (1,4 %), Island (1,2 %), Malaysia (1,1 %), Indien (1,1 %), Kasachstan (0,9 %), Spanien (0,8 %), Kanada (0,8 %), Ägypten (0,7 %), Polen (0,6 %), Iran (0,5 %), Frankreich (0,5 %), Indonesien (0,5 %), Slowakei (0,5 %), Nordkorea (0,5 %), Ukraine (0,2 %), Paraguay (0,2 %), Deutschland (0,2 %), Aserbaidzhan (0,1 %), Thailand (0,1 %), Vietnam (0,1 %), Argentinien (0,1 %), Bosnien-Herzegowina (0,1 %), Sambia (< 0,1 %), Mexiko (< 0,1 %), Nordmazedonien (< 0,1 %), Usbekistan (< 0,1 %) und Rumänien (< 0,1 %).

Gesicherte Daten zur Ferrosiliziumproduktion liegen nur aus Norwegen, Deutschland, der Slowakei, der Ukraine sowie für die Vergangenheit für Brasilien und für einige Firmen aus Bhutan, Malaysia und Russland vor (vgl. Anhang – Länderprofile). Für alle weiteren Länder wurde in dieser Studie auf Handelsdaten der Datenbank GLOBAL TRADE TRACKER (2023) zurückgegriffen.

In den o. g. 30 Ländern (ohne China, Nordkorea und Thailand, s. u.) wurde Ferrosilizium im Jahr 2022 durch 103 Unternehmen in 92 Hütten mit insgesamt ca. 175 Öfen produziert. Die 33 Produzentenländer besaßen eine Gesamtkapazität von ca. 13,48 Mio. tpa Ferrosilizium. Asian Metal geht im Vergleich für das Jahr 2022 von einer weltweiten Ferrosiliziumkapazität von 12,83 Mio. tpa aus.

In China sollen 121 (ASIAN METAL 2023) Hütten zur Produktion von Ferrosilizium existieren. Davon waren im Jahr 2022 90 Hütten in Betrieb. Ihr Gesamtausstoß lag im gleichen Jahr bei 5,66 Mio. t (ASIAN METAL 2023) bzw. 5,91 Mio. t (FERROALLOYNET 2023). Der größte chinesische

und zugleich weltgrößte Produzent von Ferrosilizium, Inner Mongolia Erdos Resources Co., Ltd., verfügt in der Inneren Mongolei über die weltgrößte Hütte mit insgesamt 72 Öfen und ist in einer anderen Provinz an zwei weiteren Hütten zu 65 % beteiligt. Erdos Resources verfügte damit zum Jahresende 2022 über eine Ferrosiliziumproduktionskapazität von 1,81 Mio. tpa (= 13,4 % der weltweiten Kapazität bzw. das 2,5-Fache der gesamteuropäischen Kapazität) und trug im Jahr 2019 (neuere Daten liegen nicht vor) mit einer Produktionsmenge von 1.687.600 t Ferrosilizium mit ca. 22,2 % zur damaligen Weltproduktion von Ferrosilizium bei.

Die Anzahl der Hütten bzw. Öfen zur Produktion von Ferrosilizium in Nordkorea und Thailand ist nicht bekannt; ihre jeweiligen Gesamtkapazitäten können jedoch aufgrund der Handelsdaten geschätzt werden.

In Argentinien, Südafrika und Venezuela existieren zudem weitere, zum Teil seit vielen Jahren gestundete Ferrosiliziumhütten mit einer Gesamtkapazität von zusammen 165.000 tpa. Ob diese Hütten jemals wieder in Produktion gehen werden, ist unklar.

Ferrosilizium 75 % (auch 65 % und 50 %) HP wird in Brasilien (vier Hütten), in China (wenige Hütten) sowie in Island, in den USA sowie im Iran (jeweils eine Hütte) produziert. Weder die Gesamtkapazität noch die Produktionsmengen sind bekannt. Die Produzenten berichten über eine hohe Nachfrage bzw. geplante Kapazitätserweiterungen.

Aufgrund der großen Überkapazitäten von Ferrosilizium auf dem Weltmarkt – im Jahr 2022 betrug die Auslastungsquote über alle Hütten hinweg weltweit nur 60 % – gibt es nur wenige Projekte zur Erhöhung der vorhandenen Kapazitäten. In China wird stattdessen großen Produzenten nahegelegt, kleinere Wettbewerber einfach zu übernehmen. Zudem können viele FeSiMn-, FeMn- oder FeCr-Produzenten ihre Öfen in relativer kurzer Zeit auf die Produktion von FeSi umstellen (ROSKILL 2014).

**Tab. 21: Unternehmen mit den weltweit größten Produktionskapazitäten für Ferrosilizium (in tpa) (Stand: Ende 2022) sowie deren Produktionsmengen (in t) im Jahr 2022 (soweit publiziert). n. v. = nicht verfügbar, Zusammenstellung: DERA.**

Unternehmen	Land	Kapazität	Produktion
Inner Mongolia Erdos Resources Co., Ltd.	China	1.807.500	
JSC „Ural-Siberian Metallurgical Company“	Russland	650.000	
Inner Mongolia Junzheng Chemicals & Energy Group Co., Ltd.	China	503.000	
Ningxia Ruizilian Industrial Co., Ltd.	China	365.000	
Pivat Gruppe	Ukraine	345.000	
Dragon Northwest Ferroalloys Co., Ltd.	China	330.000	
Elkem ASA	Norwegen-China	313.000	313.000
OM Materials (Sarawak) Sdn. Bhd.	Malaysia	308.000	140.355
Ferroglobe plc	UK	306.000	154.972 (Verkäufe)
Ningxia Sanyuan Zhongtai Metallurgical Co., Ltd.	China	260.000	
Ningxia Dazheng Weiye Metallurgy Co., Ltd.	China	240.000	
Ningxia Zhongwei Maoye Metallurgical Co., Ltd.	China	200.000	
Ningxia Zhongwei Shengjin Metallurgy Co., Ltd.	China	180.000	
Hongwei Shengjin Beituo Building Materials Co., Ltd	China	180.000	
YDD Corporation	Kasachstan	180.000	

Nicht-chinesische Unternehmen mit angekündigten Erweiterungen ihrer Ferrosiliziumproduktionskapazitäten (Stand: Mitte 2023) in Reihenfolge ihrer Größe sind:

1. 19 verschiedene/Bhutan: + unbekannt (kurz- bis mittelfristig)
2. Arab Alloy Co./Ägypten: + 48.000 tpa (ab 2026)
3. Pertama Ferroalloy Sdn. Bhd. /Malaysia: + 40.000 tpa (ab 2025)
4. Lionas Metals Co., Ltd./Vietnam: + 12.000 tpa (ab Ende 2023), + 65.000 tpa (mittelfristig)
5. ICMD Holding GmbH/Kasachstan: + unbekannt (langfristig)

Rohstoffrisikobewertung – Silizium und Ferrosiliziumlegierungen  
Zwischenprodukte auf Basis von Quarz

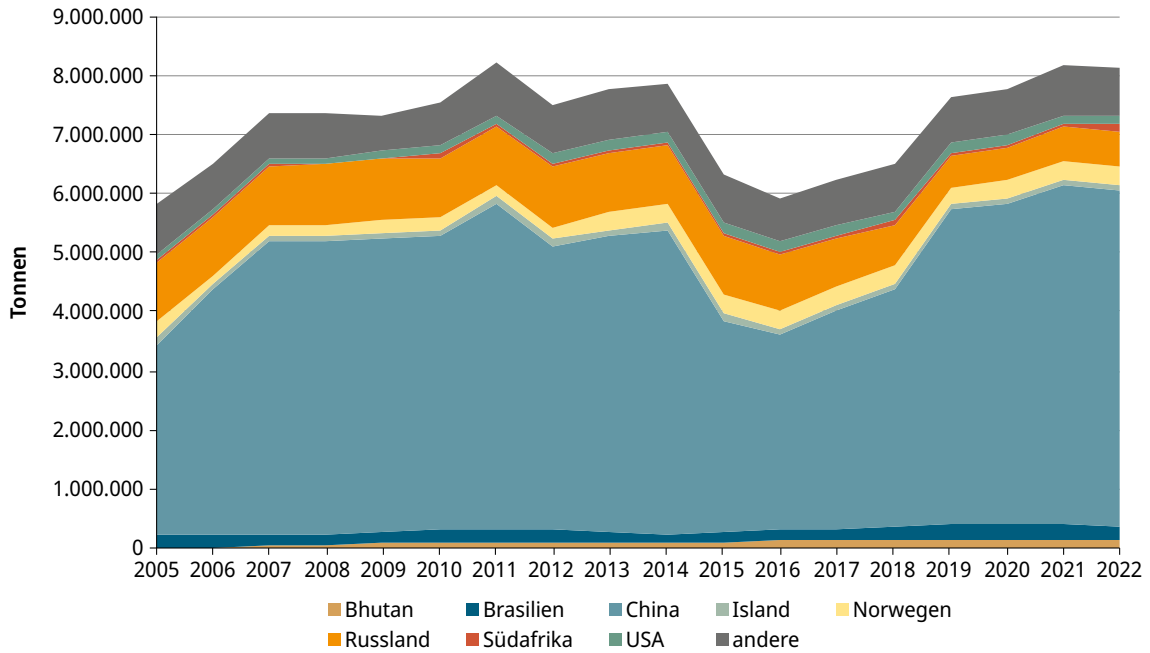


Abb. 33: Entwicklung der weltweiten Ferrosiliziumproduktion im Zeitraum 2005 – 2022. Nach ROSKILL (2014) sind scheinbare Einbrüche in der Ferrosiliziumproduktion, so sie auf China beschränkt sind, häufig durch den zeitweisen Abbau der dortigen enormen Lagerbestände zu erklären, Grafik: DERA.

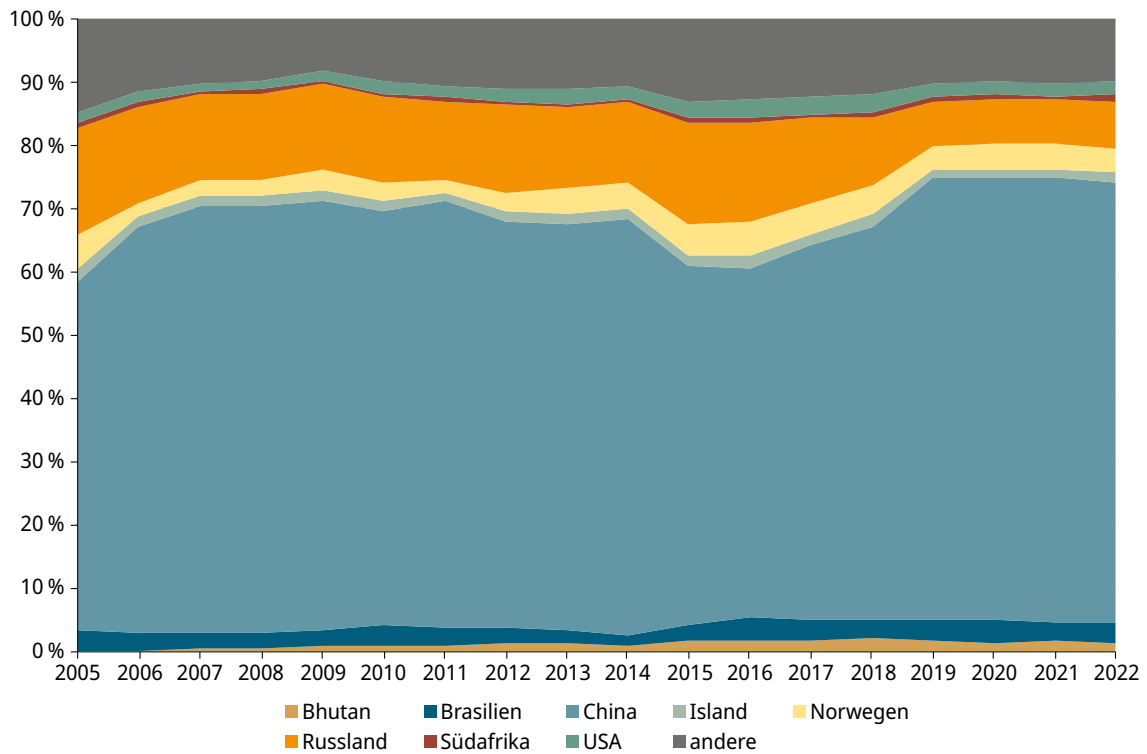


Abb. 34: Entwicklung der anteiligen weltweiten Ferrosiliziumproduktion im Zeitraum 2005 – 2022; Grafik: DERA.

## 5.4 Ferrosilikomangan

Die weltweite Produktion von Ferrosilikomangan im Jahr 2022 lag bei ca. 10,2 Mio. t und verteilte sich auf 26 Länder. Hiervon war China mit einer Produktionsmenge von knapp 7,0 Mio. t (= 68 %) der mit Abstand größte Produzent. Es folgten in absteigender Reihenfolge ihrer Bedeutung bzw. Produktionsmenge: Russland, Indien, Ukraine und Georgien mit jeweils ca. 3 %, Brasilien, Norwegen Mexiko und Südkorea mit jeweils ca. 2 %, USA, Südafrika, Spanien, Sambia, Italien und Australien mit jeweils ca. 1 % sowie Malaysia, Slowakei, Frankreich, Gabun, Kasachstan, Bhutan, Indonesien, Saudi-Arabien, Thailand, Aserbaidzhan und Argentinien mit jeweils < 1 %. Bahrain und Nordmazedonien verfügen ebenfalls über Hütten zur Produktion von FeSiMn; diese waren jedoch im Jahr 2022 offenbar nicht in Betrieb.

Gesicherte Daten zur Produktion von Ferrosilikomangan liegen nur aus Norwegen, der Slowakei, der Ukraine sowie für die Vergangenheit aus Brasilien vor (s. Anhang – Länderprofile). Für alle weiteren Länder wurde in dieser Studie auf Schätzungen bzw. Daten des British Geological Survey (BGS) oder Handelsdaten der Datenbank GLOBAL TRADE TRACKER (2023) zurückgegriffen.

In den o. g. 25 Ländern (ohne China) wurde Ferrosilikomangan im Jahr 2022 durch 127 Unternehmen (davon 72 in Indien) in 136 Hütten mit insgesamt ca. 140 Öfen (ohne Indien) produziert. Die Zahl der zur Produktion von FeSiMn in Indien eingesetzten Öfen ist nicht publiziert. Die 25 Produzenteländer inkl. der im Jahr 2022 nicht produzierenden Länder Bahrain und Nordmazedonien besaßen eine Gesamtkapazität von ca. 6,57 Mio. tpa Ferrosilikomangan.

In China sollen 80 Hütten zur Produktion von Ferrosilikomangan existieren, deren Gesamtkapazität im Jahr 2022 bei 15,577 Mio. tpa lag (ASIAN METAL 2023). Über alle Provinzen hinweg lag die Auslastungsquote der Hütten in China im Jahr 2022 bei 44,72 % (Produktionsmenge: 6,986 Mio. t. FeSiMn) bzw. im Jahr 2021 bei 52,67 % (Produktionsmenge: 8,288 Mio. t FeSiMn).

## 5.5 Ferrosilikomagnesium

Die Datenlage zu den weltweiten Kapazitäten und zur Produktion von Ferrosilikomagnesium ist ungenügend, so dass weder die Kapazitäten oder die jährliche Produktionsmenge noch alle Unternehmen, die Zahl der produzierenden Hütten oder Öfen bekannt sind. Ferrosilikomagnesium wird in Brasilien, Indien, Norwegen, USA und sicherlich auch in China hergestellt. Auch in Argentinien, Bhutan, Iran, Kanada und Mexiko bestehen Kapazitäten.

## 5.6 Ferrosilikochrom

Die Datenlage zu den weltweiten Kapazitäten und zur Produktion von Ferrosilikochrom ist ebenfalls ungenügend, so dass weder die Kapazitäten oder die jährliche Produktionsmenge noch alle Unternehmen, die Zahl der produzierenden Hütten oder Öfen bekannt sind. Der weltweite führende Produzent von Ferrosilikochrom ist vermutlich das Unternehmen TNC Kazchrome JSC in Kasachstan, gefolgt von Eti Elektrometalurji AŞ in der Türkei und Samancor Chrome Ltd. in Südafrika. Auch in Russland, Indien, Brasilien, der Slowakei sowie in Norwegen bestehen zum Teil große Kapazitäten.

## 5.7 Ferrosilikoaluminium

Auch die Datenlage zu den weltweiten Kapazitäten und zur Produktion von Ferrosilikoaluminium ist ungenügend, so dass weder die Kapazitäten oder die jährliche Produktionsmenge noch alle Unternehmen, die Zahl der produzierenden Hütten oder Öfen bekannt sind. Ferrosilikoaluminium wird jedoch nur in Kasachstan und in den USA sowie vermutlich in China und Indien hergestellt.

## 5.8 Lagerbestände

Lagerbestände von Silizium (Ähnliches gilt auch für Polysilizium und Ferrolegierungen) existieren bei Produzenten, in Häfen/in Zolllagern sowie bei Händlern und Verarbeitern. Nach CRU

INTERNATIONAL LTD. schwanken diese Lagerbestände je nach Land, Jahreszeit und Segment, durch Angebot und Nachfrage sowie Spekulationen. In Zeiten hohen Angebots, aber unzureichender Nachfrage bauen die Produzenten Lagerbestände auf. In gegenteiligen Zeiten hoher Nachfrage bauen die Produzenten ihre Lagerbestände ab, während sich die Verarbeiter aus Sorge weiter steigender Preise bevorraten.

Die saisonalen Schwankungen in Lagern in Südwestchina (Kunming/Yunnan, Hafen von Huangpu/Guangdong), in jüngerer Zeit auch in den Häfen von Tianjin/NE-China und Guangzhou/Guangdong, stellt seit langem CRU dar. Erstere schwanken mit wenigen Ausnahmen zwischen ca. 18.000 t und 93.000 t während eines jeden Jahres. In den Sommermonaten, außerhalb der Regenzeit in Südwestchina, in denen aufgrund der dann hohen Strompreise die meisten Siliziumhütten in dieser Region abgeschaltet sind, werden die Lagerbestände immer niedriger. In den Spätherbst- und Wintermonaten, in denen die meisten Siliziumhütten in dieser Region ihre

Kapazitäten voll ausnutzen, werden die Lager wieder aufgefüllt.

Einen monatlichen Überblick über die gesamtchinesischen Lagerbestände bei den Produzenten, auch aufgesplittet in die wichtigsten Provinzen Xinjiang, Yunnan und Sichuan (zu Beginn der Analysen auch Gansu und Fujian) sowie neuerdings auch in einzelne Siliziumqualitäten, gibt seit August 2020 zudem Asian Metal (s. Abb. 35). Hierbei ist seit November 2021 ein Anstieg der Lagerbestände von Rohsilizium in der Provinz Xinjiang und damit auch in ganz China festzustellen. Im März 2023 nahm der Anstieg noch einmal deutlich zu, da Xinjiang Central Hoshine Silicon Industry Co., Ltd. mit dem Bau eines ersten eigenen Polysiliziumwerks begonnen hat (vgl. Anhang – Länderprofil China), das nach Firmenaussagen nach Produktionsaufnahme sofort mit einer ausreichenden Menge an selbst hergestellten Rohsilizium versorgt werden soll. Den starken Rückgang der Lagerbestände in Xinjiang ab August 2023 erklärt Asian Metal mit Spekulanten und Händlern, die

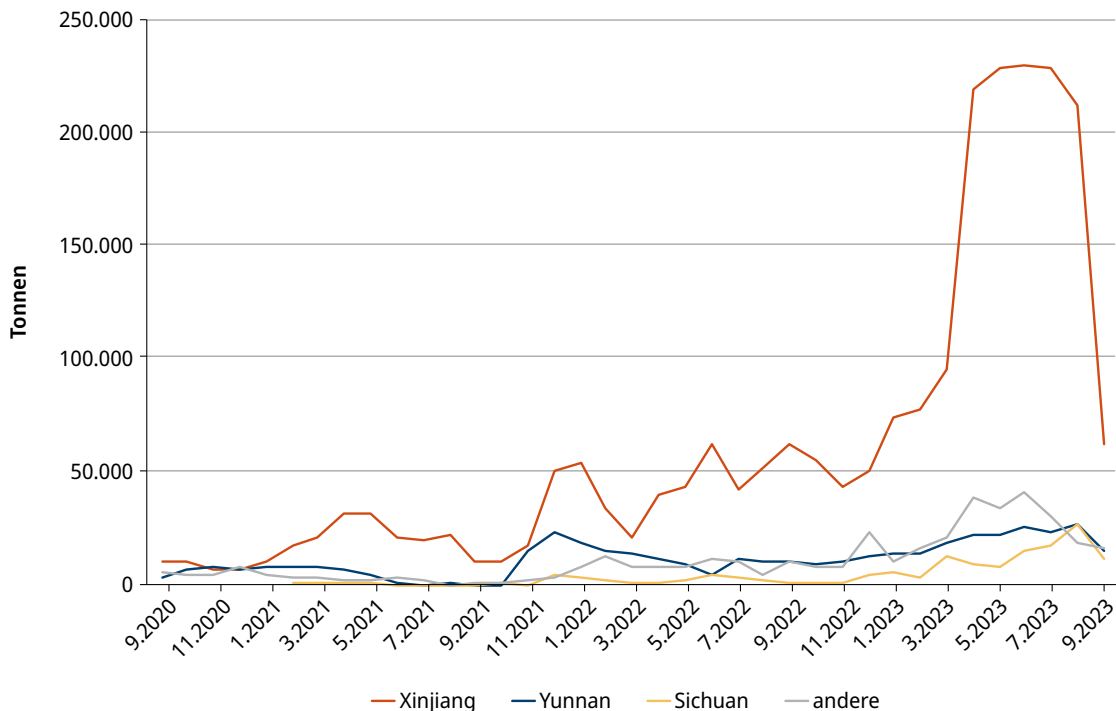


Abb. 35: Lagerbestände von Rohsilizium bei Produzenten in China, Quelle: ASIAN METAL MONTHLY SILICON METAL MARKET REPORTS (versch. Monate).

alle Lagerbestände der weiteren Produzenten in dieser Provinz aufgekauft hätten.

Informationen zu Lagerbeständen von anderen Produzenten oder aus anderen Ländern sind nicht publiziert. Für die USA liegen nur Informationen zu den aggregierten Lagerbeständen von Silizium, Ferrosilizium und Ferrolegierungen vor, die dadurch ohne Aussagekraft sind.

## 5.9 Handelsbeschränkungen

Zum Schutz der Interessen ihrer einheimischen Produzenten haben mehrere Länder gegen Siliziumimporte aus anderen Ländern Handelsbeschränkungen erlassen. Hierbei zeichneten sich in der Vergangenheit besonders die US-amerikanischen Produzenten durch die Beantragung von Importbeschränkungen gegen ausländische Wettbewerber aus. In den meisten Fällen kam die U.S. International Trade Commission dabei ihren Anträgen nach.

Aktuell gibt es seitens der USA folgende Handelsbeschränkungen bzgl. Rohsilizium:

- China: seit 1991 Antidumpingzoll in Höhe von 139,49 % (alle)
- Russland: seit 2003 Antidumpingzoll in Höhe von 79,42 % (Bratsk Aluminiumhütte und andere) bzw. 56,11 % (ZAO Kremny/Sual-Kremny-Ural Ltd.)
- Bosnien-Herzegowina: seit 2021 Antidumpingzoll in Höhe von 21,41 % (R-S Silicon d.o.o und andere)
- Island: seit 2021 Antidumpingzoll in Höhe von 47,54 % (PCC BakkiSilicon hf) bzw. 37,83 % (andere Produzenten)
- Malaysia: seit 2021 Antidumpingzoll in Höhe von 12,27 % (PMB Silicon Sdn. Bhd. und andere)

sowie bzgl. Ferrosilizium

- Venezuela: seit 2014 Antidumpingzoll in Höhe von 27,27 % (FerroAtlantica de Venezuela und andere)

sowie bzgl. Ferrosilikomangan

- Australien: seit 2016 Antidumpingzoll in Höhe von 12,03 % (Tasmanian Electro Metallurgical Company Pty Ltd. und andere)
- Indien: seit 2022 Antidumpingzoll in Höhe von 15,32 % (Nava Bharat FerroAlloys, Ltd.), 20,53 % (Universal Ferro and Allied Chemicals, Ltd.) bzw. 17,74 % (andere)
- Kasachstan: seit 2022 Antidumpingzoll in Höhe von 247,88 % (Alloy 2000, S.A. und andere)
- Venezuela: seit 2022 Antidumpingzoll in Höhe von 24,62 % (Hornos Electricos de Venezuela, S.A. und andere)

Die EU hat folgende (derzeit gültige) Handelsbeschränkungen erlassen:

Silizium

- China: seit 2016 Antidumpingzoll in Höhe von 16,8 % (alle) mit Ausnahme von Datong Jinneng Industrial Silicon Co., Ltd. (16,3 %)

Ferrosilizium

- China: seit 2016 Wertzoll auf Importe in Höhe von 15,6 % (Erdos Xijin Kuangye Co., Ltd.), 29,0 % (Lanzhou Good Land Ferroalloy Factory Co., Ltd.) bzw. 31,2 % (andere)
- Russland: seit 2026 Wertzoll auf Importe in Höhe von 17,8 % (Bratsk Ferroalloy Plant) bzw. 22,7 % (andere)

Handelsbeschränkungen gegen Importe von Rohsilizium aus China bestehen z. B. auch in:

- Kanada: seit 2013 in Höhe von 235 % auf den Exportwert bzw. 1.945 RMB/t auf Importe durch Rio Tinto Procurement (Singapore) Pte Ltd., Mangshi Sinice Silicon Industry und Xiamen ITG Group Corp., Ltd.
- Australien: seit 2020 in Höhe von 55,5 % (Antidumpingzoll und Ausgleichsabgabe)

Bis heute große Auswirkungen auf den weltweiten Polysiliziummarkt und damit die gesamte PV-Wertschöpfungskette hatte die Entscheidung Chinas im Juli 2013, Strafzölle auf Importe von Polysilizium aus den USA und aus Südkorea

zu erlassen (vgl. Tab. 22). In den beiden Jahren zuvor mussten in China 36 kleine und mittelgroße Polysiliziumwerke aufgrund der wachsenden Konkurrenz in den USA und Südkorea schließen, so dass das chinesische Handelsministerium (MOFCOM) darauf reagierte. Nachdem US-Behörden ankündigten, evtl. Importe von Solarzellen und -modulen aus China und Taiwan mit Handelsbeschränkungen zu belegen, traten die chinesischen Strafzölle auf Polysilizium im Januar 2014 in Kraft.

Andererseits schloss die EU mit China im Jahr 2013 ein Mindestpreisabkommen über die Importe chinesischer Solarmodule. Zudem han-

deltete der größte europäische Produzent von Polysilizium, die Wacker Chemie AG, direkt mit dem chinesischen Handelsministerium ein Abkommen aus, worin sich das Unternehmen verpflichtete, in Deutschland hergestelltes Polysilizium in China nicht unter einem festgesetzten Mindestpreis zu verkaufen. Mit Wirkung zum 01.05.2014 schloss das chinesische Handelsministerium daraufhin Importe aus den deutschen Polysiliziumwerken der Wacker Chemie AG von allen Handelsbeschränkungen aus. Mittlerweile sind alle Polysiliziumimporte aus der EU von Strafzöllen in China befreit – allerdings ist die Wacker Chemie AG der einzige Polysiliziumproduzent in der EU.

**Tab. 22: Chinesische Handelsbeschränkungen auf Importe von Polysilizium aus den USA und Südkorea, Quelle: DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY (2022).**

	Antidumpingzoll	Ausgleichsabgabe	Gesamt
<b>US-amerikanische Produzenten</b>			
REC Solar	57,0 %	0,0 %	57,0 %
Hemlock Semiconductor	53,3 %	2,1 %	55,4 %
MEMC/SunEdison (stillgelegt)	53,6 %	0,0 %	53,6 %
AE Polysilicon (stillgelegt)	57,0 %	2,1 %	59,1 %
andere (inkl. Wacker USA)	57,0 %	2,1 %	59,1 %
<b>Südkoreanische Produzenten</b>			
Woongjin Polysilicon (erloschen)	12,3 %		
OCI	4,4 %		
Hanwha (stillgelegt)	8,9 %		
SKSS (?)	9,5 %		
KCC/Korean Advanced Materials/ Innovation Silicon (erloschen)	113,8 %		
andere	88,7 %		



## 6. Bilanz von Angebot und Nachfrage

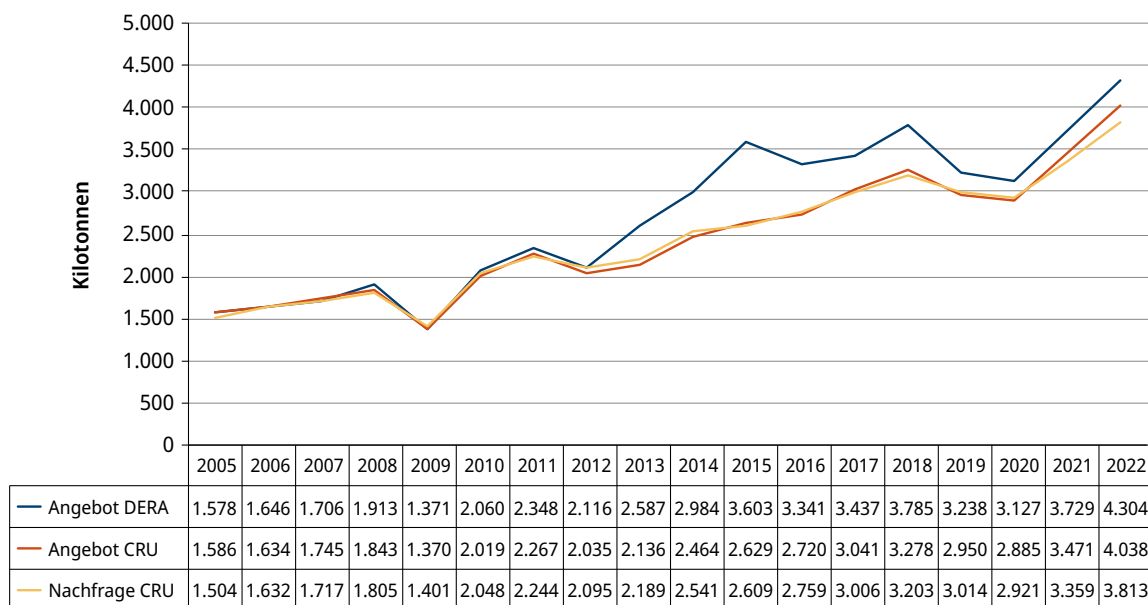
### 6.1 Rückblick

Für eine historische Bilanz von Angebot und Nachfrage nach Rohsilizium (Marktdeckung) wurden in Abb. 36 die historischen Nachfrage- und Angebotsdaten von CRU International Ltd. (s. Kapitel 4.1 und 5.1) den von der DERA für diese Studie zusammengetragenen Angebotsdaten (s. Kapitel 5.1) gegenübergestellt.

Die Daten von CRU zeigen im Zeitraum 2005 bis 2020 nicht nur ein mehr oder weniger ständig steigendes Wachstum des Weltsiliziummarktes (mit Ausnahme der Finanzmarktkrise im Jahr 2009), sondern auch ein ständiges Wechselspiel zwischen eng beieinanderliegenden Nachfrage- oder Angebotsüberschüssen. Erst ab dem Jahr 2021 übersteigt das Angebot etwas deutlicher die Nachfrage mit einer Differenz im Jahr 2022 von 225.000 t.

Auf der anderen Seite übersteigen die von der DERA ermittelten Produktionsmengen, also das weltweite Angebot an Rohsilizium, seit 2010 konstant die von CRU publizierten Produktionsmengen. Die größte Differenz wurde bzw. wird im Jahr 2015 mit knapp 1 Mio. t erreicht. Diese Differenzen im weltweiten Angebot lassen sich in allen Jahren vorwiegend auf die Produktion in China zurückführen, die nach übereinstimmender Auffassung aller chinesischen Analysten stets deutlich größer war, als von CRU angenommen (vgl. Kapitel 5.1).

Ob das von CRU postulierte enge zeitliche Wechselspiel zwischen Angebot und Nachfrage daher in der Vergangenheit wirklich so stattfand, muss bezweifelt werden. Vermutlich sind daher auch die von CRU angenommenen Nachfragemengen nicht korrekt.



**Abb. 36: Angebot und Nachfrage nach Rohsilizium (in kt) im Zeitraum 2005 bis 2022, nach Daten (Angebot/Nachfrage) von CRU INTERNATIONAL LTD. (2023) sowie der DERA (nur Angebot).**

Für eine historische Bilanz von Angebot und Nachfrage nach **Polysilizium** wurden in Abb. 37 die wenigen historischen Nachfragedaten von Roskill's Letter from Japan (s. Kapitel 4.2) den von der DERA für diese Studie zusammengetragenen Angebotsdaten (s. Kapitel 5.2) gegenübergestellt.

Aus der Abb. 37 wird deutlich, dass das Angebot an Polysilizium ständig und vor allen in den letzten Jahren sehr stark gestiegen ist. Mit Ausnahme weniger Jahre – nach Bernreuter Research 2007/2008 und 2021/2022 (vgl. Kapitel 7) – überstieg das Angebot stets die Nachfrage bzw. entsprach dieser.

## 6.2 Ausblick

Ein Ausblick auf die zukünftige mögliche weltweite Versorgungslage mit **Rohsilizium** bis zum Jahr 2027 ist unter Annahme folgender Parameter möglich:

Angebot:

- Produktionsprognose nach CRU INTERNATIONAL LTD, Stand Oktober 2023
- Bestehende Kapazitäten zzgl. angekündigte Kapazitätserweiterungen (s. Kapitel 5.1)

Bedarf:

- Nachfrageprognose nach CRU INTERNATIONAL LTD, Stand Oktober 2023
- Möglichst unter Nutzung anderer Quellen als CRU: Nachfrageentwicklung von Silizium für Al-Legierungen (Kapitel 3.3.1), zzgl. Nachfrageentwicklung von Silizium für Silane/Silikone (Kapitel 3.3.2), zzgl. Nachfrageent-

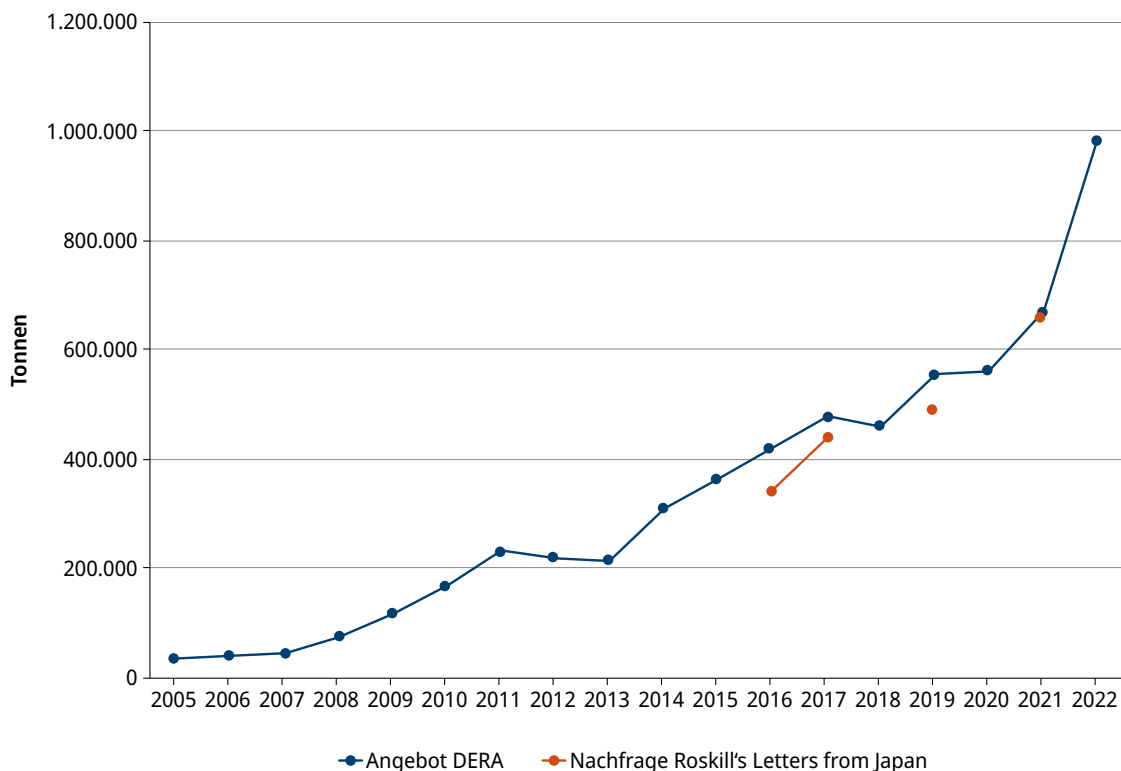


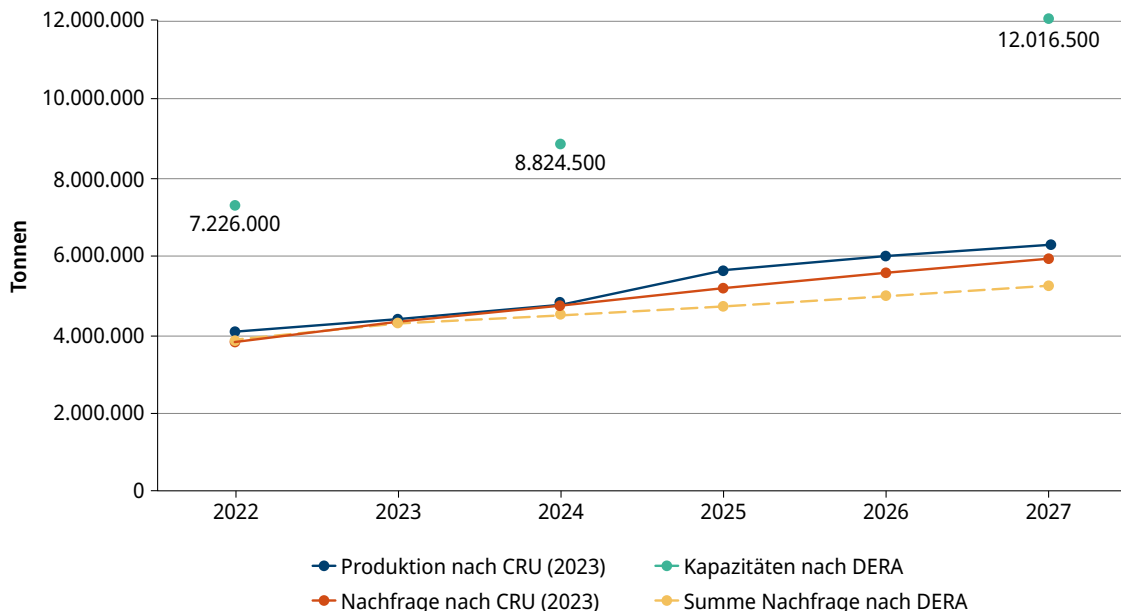
Abb. 37: Angebot und Nachfrage nach Polysilizium (in t) im Zeitraum 2005 bis 2022, nach Daten von ROSKILL'S LETTER FROM JAPAN (Nachfrage) sowie der DERA (Angebot).

wicklung von Silizium für Polysilizium (s. u.), zzgl. Nachfrageentwicklung für sonstige Anwendungen (Kapitel 3.3.4)

Aus den der Abb. 38 zugrundeliegenden Daten ergab sich für das Jahr 2022 eine Weltproduktion von Rohsilizium in Höhe von 4,31 Mio. t (CRU: 4,03 Mio. t), der eine weltweite Kapazität von 7,23 Mio. tpa gegenüberstand. Dies entspricht einer Auslastungsquote der Hütten weltweit von durchschnittlich 59,6 %. Dieser Wert wurde maßgeblich von den chinesischen Hütten bestimmt, für die chinesische Analysten (s. Anhang – Länderprofil China) eine Auslastungsquote zwischen 50 und 57 % im Jahr 2022 ermittelten. Diesen Kapazitäten bzw. Produktionsmengen stand im Jahr 2022 eine weltweite Nachfrage nach Rohsilizium in Höhe von 3,90 Mio. t (CRU: 3,81 Mio. t) gegenüber.

Bis Ende des Jahres 2024 wird die Nachfrage nach Rohsilizium vermutlich um ca. 15 % auf 4,48 Mio. t (CRU: 4,75 Mio. t) steigen. Die Nachfrage soll nach CRU das Angebot sogar um 1.300 t übersteigen. Gleichzeitig ist nach derzeitigen Ankündigungen mit einer Erhöhung der Kapazitäten um 22,1 % auf 8,83 Mio. tpa Rohsilizium zu rechnen.

Bis Ende des Jahres 2027 wird sich dieser Trend des Ausbaus der weltweiten, d.h. vor allem der chinesischen Überkapazitäten noch deutlich verstärken. Die Nachfrage nach Rohsilizium wird gegenüber 2024 vermutlich um weitere rund 16 % auf 5,22 Mio. t (CRU: 5,88 Mio. t) steigen. Die Produktionsmenge nach CRU soll die Nachfrage um 43.000 t übertreffen. Gleichzeitig ist nach derzeitigen Ankündigungen mit einer Erhöhung der Kapazitäten gegenüber 2024 um weitere knapp 36 % auf 12,02 Mio. tpa Rohsilizium zu rechnen. Die Kapazitäten zur Herstellung



**Abb. 38: Prognosen der Entwicklung der weltweiten Nachfrage (CRU, DERA), der Produktion (CRU) sowie der weltweiten Produktionskapazitäten (DERA) von Rohsilizium bis zum Jahr 2027.** Für die Nachfrage nach Al-Legierungen wurde eine anteilige Verwendungsmenge der Weltsiliziumproduktion im Jahr 2022 von 35 % sowie ein jährliches Wachstum von 2,6 %, für die Nachfrage für Silane/Silikone entsprechend von 38 % bzw. 4,2 % und für die Nachfrage in sonstigen Anwendungen von 2 % bzw. 8 % (Batterieproduktion!) angenommen. Bzgl. Polysilizium s. u.

von Rohsilizium werden also im Jahr 2027 mehr als doppelt so hoch sein wie die weltweite Nachfrage.

Als Bilanz ergibt sich für den Rohsiliziummarkt bei steigender Nachfrage und auch Produktion eine noch viel stärker steigende Kapazität der weltweiten Siliziumhütten und damit eine abnehmende Auslastungsquote bei vermutlich auch langfristig nicht deutlich steigenden Siliziumpreisen.

Ein Ausblick auf die zukünftige mögliche weltweite Versorgungslage mit **Polysilizium** bis zum Jahr 2027 ist unter Annahme folgender Parameter möglich:

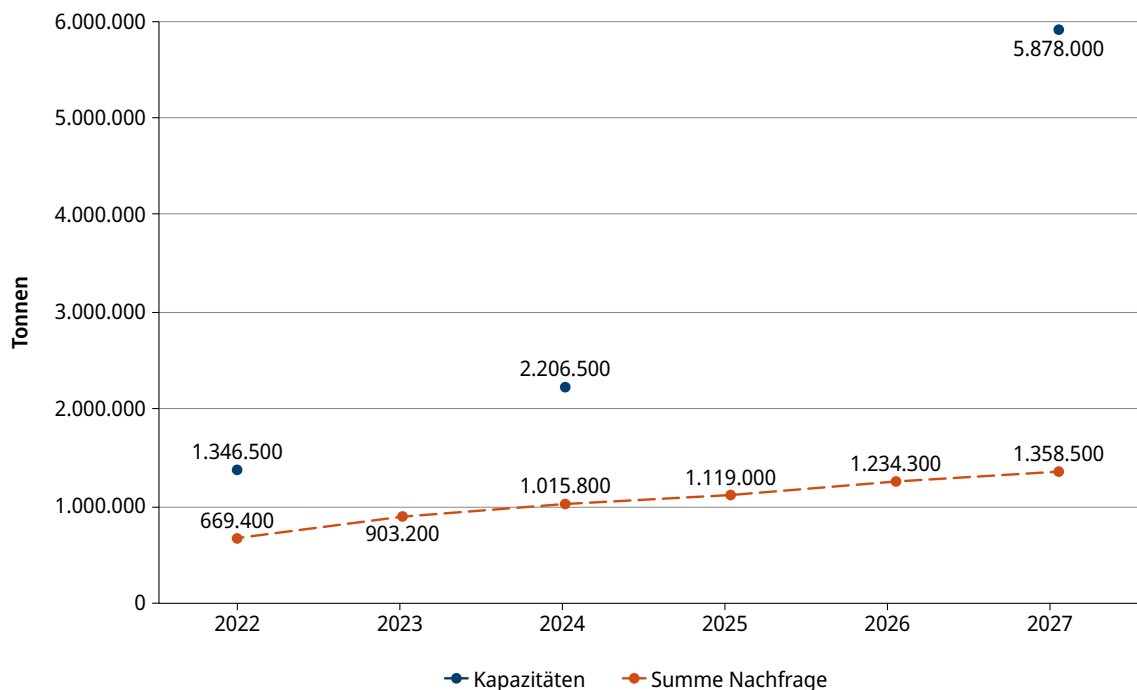
**Angebot:**  
Bestehende Kapazitäten zzgl. angekündigter Kapazitätserweiterungen (s. Kapitel 5.2)

**Bedarf:**

Prognose der Nachfrageentwicklungen nach Halbleitersilizium zzgl. Solarsilizium (s. Kapitel 3.3.3 und 4.2)

Im Jahr 2022 wurden weltweit rund 980.000 t Polysilizium hergestellt. Dieser Menge stand eine Nachfrage von nur ca. 670.000 t, aber eine offizielle Kapazität von 1.346.500 tpa gegenüber. Dies entsprach für das Jahr 2022 einer Auslastungsquote aller Polysiliziumwerke von durchschnittlich 72,7 %.

Bis Ende des Jahres 2024 wird die Nachfrage nach Polysilizium vermutet um ca. 52 % auf rund 1,0 Mio. t wachsen. Gleichzeitig ist nach derzeitigen Ankündigungen mit einer Erhöhung der weltweiten Kapazitäten um rund 64 % auf 2,2 Mio. tpa Polysilizium zu rechnen.



**Abb. 39: Prognose der Entwicklung der weltweiten Nachfrage nach Polysilizium in der Halbleiter- und PV-Industrie sowie der weltweiten Produktionskapazitäten bis zum Jahr 2027. Für den Bedarf in der PV-Industrie wurde ein Durchschnittsbedarf von 2,6 g/Wp im Jahr 2022 und eine Abnahme um 0,1 g/Wp pro Folgejahr angenommen. Für die Halbleiterindustrie wurde ein Bedarf von durchschnittlich 1,2 t Polysilizium pro t Halbleitersilizium sowie ein jährliches Wachstum von 5,5 % angenommen; Grafik: DERA.**

Bis Ende des Jahres 2027 wird sich noch stärker als bei Rohsilizium auch bei Polysilizium der Trend des Ausbaus der weltweiten, d. h. auch in diesem Fall vor allem der chinesischen Überkapazitäten deutlich verstärken. Die Nachfrage nach Polysilizium wird gegenüber 2024 vermutet um weitere knapp 34 % auf 1,3 – 1,4 Mio. t steigen. Gleichzeitig ist nach derzeitigen Ankündigungen gegenüber 2024 mit einer Erhöhung der Kapazitäten um weitere 266 % auf knapp 5,9 Mio. tpa Polysilizium zu rechnen. Die Kapazitäten zur Herstellung von Polysilizium werden dementsprechend die weltweite Nachfrage um mehr als das Vierfache übertreffen.

Als Bilanz ergibt sich für den Polysiliziummarkt bei zwar stark steigender Nachfrage und sicherlich auch Produktion eine noch viel stärker steigende Kapazität der chinesischen (= weltweiten) Polysiliziumwerke. Diese Werke werden mit geringer Auslastungsquote und sehr niedrigen Polysiliziumpreisen zu kämpfen haben und deswegen sicherlich nicht alle überleben.

Das starke Überangebot von Polysilizium auf dem chinesischen Markt wird auch die westlichen Hersteller von Polysilizium betreffen. Diese können zwar höhere Preise erzielen, welche aber dennoch nicht auskömmlich sind und vermutlich auch langfristig nicht steigen werden (vgl. Kapitel 7).

## 7. Preisentwicklung

In den Abb. 40 und 41 sind die Preisentwicklungen in Europa und China (umgerechnet von Renminbi in Euro), von **Rohsilizium** (der Qualität 4-4-1, wie sie typischerweise für die Produktion von Silikon verwendet wird) und von **Ferrosilizium** (der am häufigsten zum Einsatz kommenden Qualität FeSi 75 %) seit Januar 2005 dargestellt.

Leicht erkennbar und vor allem durch den Frachtkostenaufwand zwischen China und Europa begründbar ist, dass Silizium und Ferrosilizium auf dem heimischen chinesischen Markt günstiger sind als in Europa. Für Rohsilizium lag die Preisdifferenz zuletzt bei ca. 400 – 600 €/t, bei Ferrosilizium bei knapp 600 €/t. Nach CRU INTERNATIONAL LTD. liegen die äquivalenten Preise in Japan im Regelfall unter denen in der EU, dafür die in den USA noch über denen in der EU. Hierbei spielen allerdings auch die hohen US-amerikanischen Antidumpingzölle auf Importe von Rohsilizium (vgl. Kapitel 5.9) eine große Rolle.

Der Preis für Rohsilizium in Europa lag im langjährigen Mittel zwischen Januar 2005 und Januar 2021 bei 1.918 €/t. Zum Oktober 2021 stieg der Preis auf 7.995 €/t stark an, um danach bis August 2023 fast ebenso stark auf 2.187 €/t wieder zurückzufallen. Eine sehr ähnliche Entwicklung für Rohsilizium ist in China mit langjährigen Durchschnittspreisen zwischen Januar 2005 und Januar 2021 von (umgerechnet) 1.475 €/t, einem Preisanstieg im Oktober 2021 auf (umgerechnet) 8.522 €/t und einem Preisrückgang bis Juli 2023 bis (umgerechnet) 1.812 €/t zu beobachten. Seit Juli 2023 steigt der Preis für Rohsilizium in China wieder langsam an, da der Marktführer Hoshine Silicon Industry Company Ltd. deutlich gemacht hat, dass er unter seinem derzeitigen Mindestgestehungspreis von 1.800 €/t kein Silizium mehr verkaufen wird (ASIAN METAL 2023).

Nach CRU INTERNATIONAL LTD. ist der extreme Preisanstieg im Jahr 2021 für Rohsilizium in Chi-

na auf eine dort sehr hohe Nachfrage im Chemiebereich, verbunden mit einem reduzierten Angebot aufgrund von Energie- und Rohstoffmängeln sowie niedrigen Lagerbeständen, zu begründen. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt die DERA (2021) für den Rohstoff Magnesium. Im Jahr 2021 kam es nach CRU erstmals nach fast zehn Jahren in China wieder zu regionalen Stromausfällen, zum Höhepunkt im Sommer 2021 verbunden mit angeordneten Elektrizitätseinsparungen in 19 der insgesamt 34 Provinzen und Stadtregionen. Gleichzeitig wurden aus Umweltschutzgründen immer wieder Hütten in China temporär, wenige auch für immer zwangsweise stillgelegt.

Dass diese Stromkürzungen die wesentliche Ursache für den Preisanstieg von Rohsilizium in China im Jahr 2021 waren, ist daran erkennbar, dass auch der Preis für das nur mit ähnlich hohem Energieaufwand zu produzierende Ferrosilizium in China innerhalb eines Jahres um mehr als das Vierfache anstieg. Auch in Europa, wo es nur wenige Länder mit nennenswerter Ferrosiliziumproduktion gibt, stieg der Strompreis im Jahr 2021 deutlich und damit verbunden der Ferrosiliziumpreis um das 4,5-Fache an.

CRU INTERNATIONAL LTD. geht davon aus (Stand: Oktober 2023), dass die weltweite Nachfrage vor allem nach Solarsilizium kurzfristig so stark ansteigen wird, dass selbst die zahlreichen Kapazitätserweiterungen und neuen Hütten in China diese nicht werden befriedigen können. Hierdurch soll zwischen 2024 und 2026 der Siliziumpreis deutlich ansteigen. Zumindest dieser Angebots-Nachfrage-Prognose von CRU kann seitens der DERA nicht gefolgt werden (s. Kapitel 6).

Preise für **Polysilizium**, teils in unterschiedlichen Qualitäten, werden von verschiedenen kommerziellen Analysten wie PVinsights/Taiwan, EnergyTrend/Taiwan, InfoLink Consulting/Taiwan, SunSirs Commodity Data Group/China,

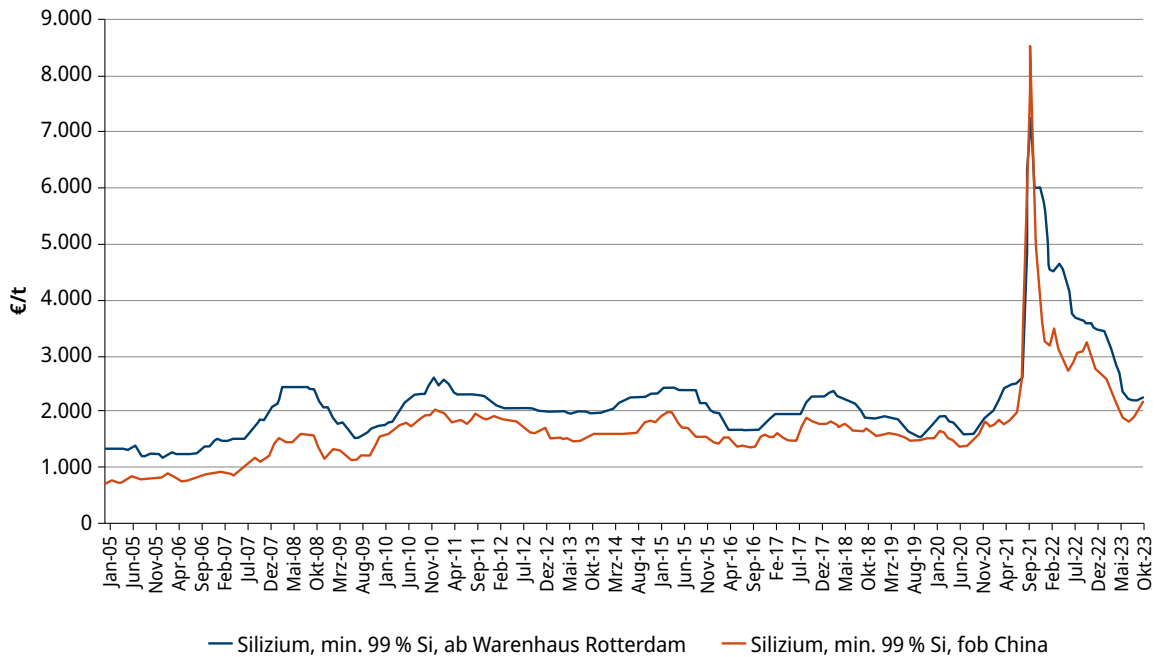


Abb. 40: Preisentwicklung von Rohsilizium der Qualität 4-4-1 (vgl. Kapitel 3.3) (umgerechnet in €/t) seit Januar 2005 ab Warenhaus Rotterdam (FASTMARKETS METAL BULLETIN) bzw. fob China (ASIAN METAL).

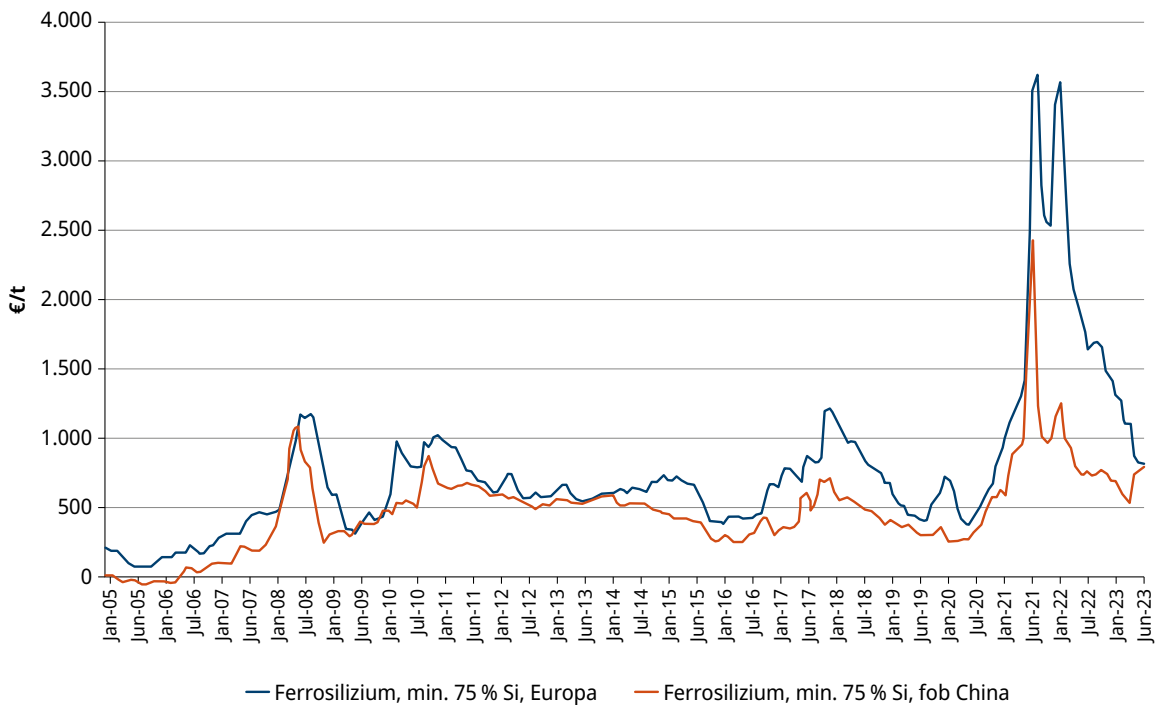
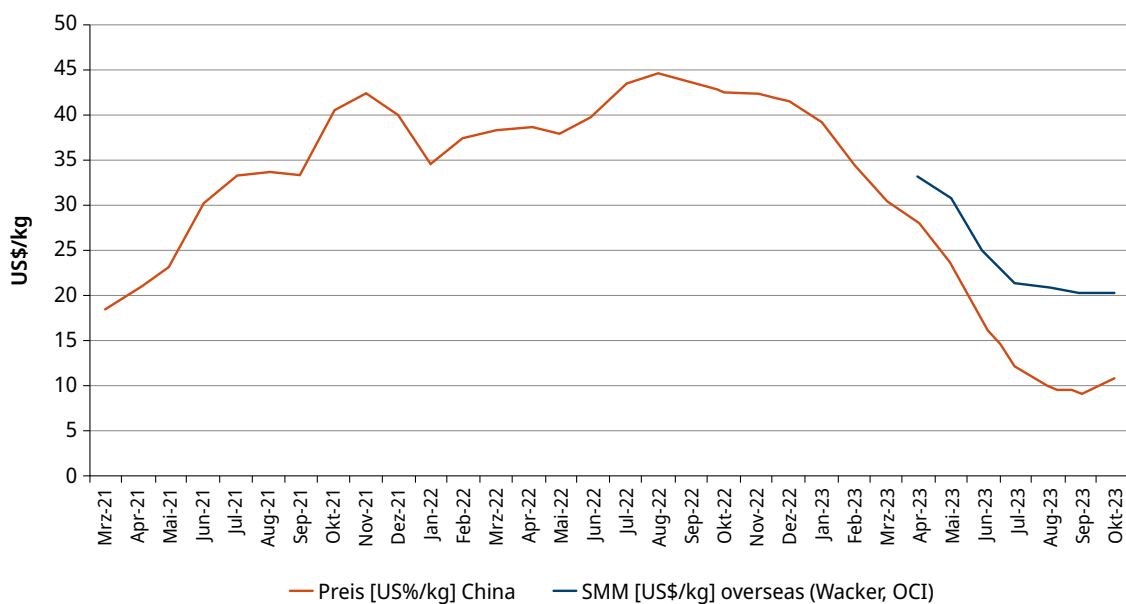


Abb. 41: Preisentwicklung von Ferrosilizium mit min. 75 % Si (FeSi 75 %) (in €/t) seit Januar 2005 frei Europa (FASTMARKETS METAL BULLETIN) bzw. fob China (FERROALLOYNET).

Singapore Solar Exchange/Singapur, Asian Metal/China, Shanghai Metals Market/China u. a. publiziert bzw. kostenpflichtig angeboten. Auf der Homepage von BERNREUTER RESEARCH ist eine Bewertung einiger dieser Analysten und ein kostenfreier, sehr ausführlicher Rückblick auf die Entwicklung der Polysiliziumpreise seit 1981 zu finden.

Für diese Studie wurden ausschließlich die Preisdaten von Asian Metal (Polysilizium 9N, Herkunft China) sowie Shanghai Metals Market (Polysilizium 9N, Solarqualität, Übersee, Hersteller: Wacker und OCI) ausgewertet. Zwischen 2009 und 2015 publizierte Asian Metal zudem Preise für Polysilizium 11N aus den USA sowie zwischen 2012 und 2021 Preise für Polysilizium 6N aus China. Shanghai Metals Market nennt zudem, teils seit 2017, Preise für Polysilizium 6N der Varietäten „recharging polysilicon“, „dense polysilicon“, „popcorn polysilicon“, „N-polysilicon“, „St-partiales“ sowie einen Preisindex, basierend auf „dense polysilicon“.

Abb. 42 zeigt nur den letzten Preisanstieg von Polysilizium seit Anfang 2021 und den jüngsten Preisverfall seit Anfang 2023. Nach BERNREUTER RESEARCH stellt diese Preisentwicklung einen Abschnitt eines typischen „Schweinezyklus“ mit zeitlichen wechselnden Perioden des Überangebots und von Knappheiten dar, wie er bei vielen Rohstoffen und so auch bei Polysilizium immer wieder vorkommt. Der Preisanstieg von 11 US\$/kg im Januar 2021 auf rund 34 US\$/kg im August 2021 erfolgte durch eine das Angebot deutlich übersteigende Nachfrage, verstärkt durch Spekulationsaktivitäten chinesischer Händler. Die stark steigenden Rohsiliziumpreise im Spätherbst 2021 (s. o.) gaben die Polysiliziumhersteller schnell weiter und erhöhten ihre Preise bis 43 US\$/kg im November 2021. Trotz deutlichen Rückgangs der Rohsiliziumpreise, aber bei weiterhin hoher Nachfrage, bewegte sich der Polysiliziumpreis im Jahr 2022 auf hohem Niveau zwischen 35 und 45 US\$/kg. Ende 2022 waren dann jedoch die Lagerbestände an Produkten der Solarzellen- und Solarmodulproduzenten so groß geworden, dass diese kein



**Abb. 42: Preisentwicklung von Polysilizium der Qualität 9N (Solarqualität, vgl. Kapitel 3.1.2) (in US\$/kg) seit März 2021 frei China (ASIAN METAL) bzw. produziert durch Wacker Chemie AG oder OCI Company Ltd. außerhalb Chinas (SMM – SHANGHAI METALS MARKET).**

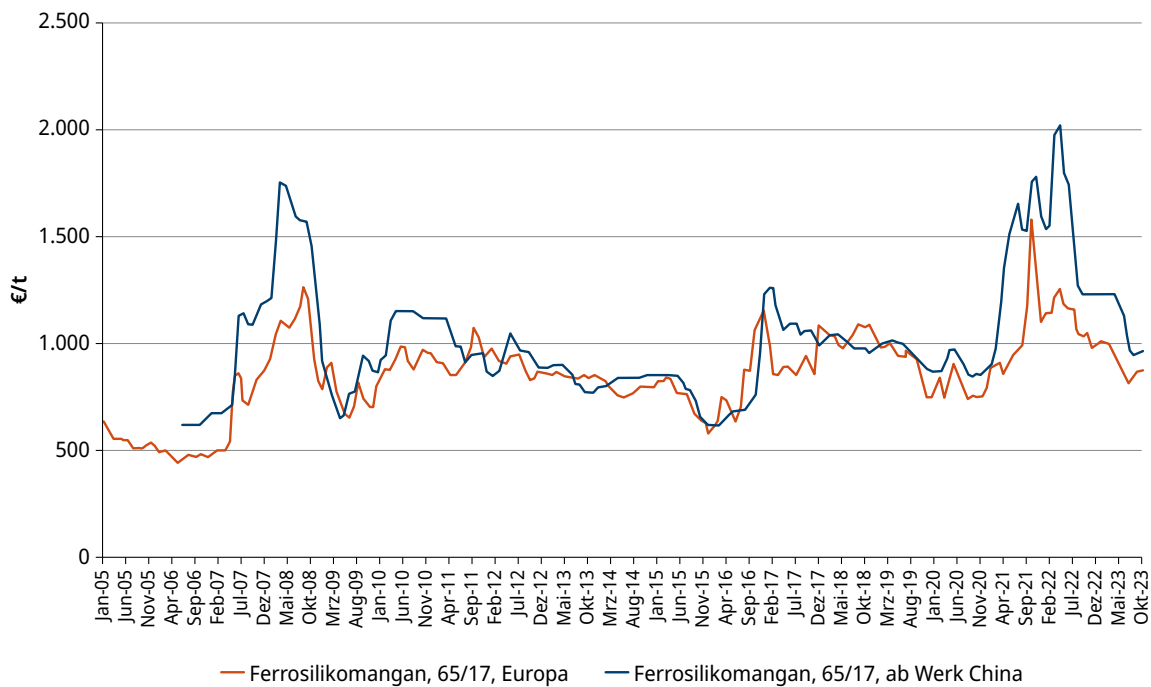


weiteres Polysilizium mehr zukaufen. Aufgrund der daraufhin einbrechenden Polysiliziumpreise zogen sie auch Nachbestellungen so lange wie möglich hinaus, um maximal von den vermutlich weiterhin fallenden Preisen zu profitieren. Das immer deutlicher werdende Überangebot an Polysilizium ließ den Preis weiter auf knapp unter 10 US\$/kg im August 2023 einbrechen. Der derzeitige Gestehungspreis für Polysilizium in China liegt jedoch noch tiefer (s. Kapitel 3.1.2).

Durch die hohen Polysiliziumpreise in den Jahren 2021/22 angeregt und durch die Prognosen zum Zubau der weltweiten PV-Kapazitäten in ihren Analysen verstärkt, entschlossen sich zahlreiche chinesische Polysiliziumhersteller zu einem starken Ausbau ihrer Kapazitäten. Nach Bernreuter Research haben mindestens zwei Unternehmen ihre diesbezüglichen Ausbaupläne mittlerweile gestoppt. Die nachgelagerten Produzenten entlang der PV-Wertschöpfungskette beginnen jedoch bereits wieder Polysilizium nachzukaufen.

Nicht in China produziertes Polysilizium in Solarqualität wird derzeit mit durchschnittlich 10 US\$/kg höher gehandelt als chinesisches Polysilizium. Der Grund liegt aufgrund der US-amerikanischen Einfuhrbeschränkungen gegenüber mit Polysilizium aus der Xinjiang-Provinz hergestellten Solarzellen (s. Kapitel 3.8) in dem Bemühen westlicher Solarzellenhersteller, sich mit nicht-chinesischem Polysilizium abzusichern, in dessen Lieferkette kein Risiko von Menschenrechtsverletzungen besteht.

**Ferrosilikomangan** der wichtigen Qualität Mn65Si17 kostet derzeit in China mit (umgerechnet) 843 €/t rund 100 €/t weniger als in Europa (September 2023: 938 €/t). Dies entspricht ungefähr der langjährigen Preisdifferenz zwischen China und der EU von 120 €/t, die aber durchaus auch auf 650 €/t, wie im April 2008, oder sogar 770 €/t, wie im April 2022, ansteigen kann. Andererseits kann aber in der EU Ferrosilikomangan auch günstiger sein als in China, so zuletzt im Juli 2019 (s. Abb. 43). Dies liegt da-



**Abb. 43: Preisentwicklung von Ferrosilikomangan mit min. 65 % Mn/min. 17 % Si (Mn65Si17) (in €/t) seit Januar 2005 frei Europa bzw. ab Werk China (ASIAN METAL).**

ran, dass China zwar (im Jahr 2022 mit 68,5 %) weltgrößter Produzent von Ferrosilikomangan ist, die EU sich aber weitgehend innereuropäisch (Frankreich, Norwegen, Italien) sowie aus Indien und der Ukraine mit dieser für die Stahlindustrie wichtigen Ferrolegierung versorgt. In diesen für die EU wichtigen Lieferländern können ganz andere rohstoffwirtschaftliche Bedingungen herrschen als in China. Zudem wirkt auf den Ferrosilikomanganpreis weit weniger der

Siliziumpreis ein als der Weltmanganpreis, der für diese Studie nicht untersucht wurde.

Der starke Preisanstieg für Ferrosilikomangan in China auf (umgerechnet) 1.570 €/t im Oktober 2021 bzw. in Europa auf 2.014 €/t im April 2022 ist dagegen auf die Energieverknappungen (s. o.) bzw. die stark gestiegenen Energiepreise in diesen beiden Regionen zurückzuführen.

## 8. Handel

Die Auswertung der globalen Handelsdaten von Rohsilizium (HS-Code 280469, definiert als Silizium < 99,99 % Si) sowie Polysilizium (HS-Code 280461, definiert als Silizium > 99,99 % Si) auf Grundlage der Handelsdatenbank GLOBAL TRADE TRACKER (2023) lässt die Erstellung von Karten der wichtigsten weltweiten Handelswege (Abb. 44 und 46) sowie der Stellung von Deutschland als Import- und Exportland (Abb. 45 und 47) dieser beiden Rohstoffe zu.

Die größten Exportnationen von Rohsilizium waren im Jahr 2022 China (ca. 691.000 t), gefolgt von Norwegen (ca. 222.000 t) und Brasilien (ca. 196.000 t). Mit weitem Abstand folgten Frankreich (ca. 86.000 t) sowie etwa gleichauf Kanada (ca. 52.000 t), Island (ca. 50.000 t), Australien und Malaysia (je ca. 42.000 t). Chinesisches Rohsilizium war weltweit gefragt mit den Hauptimportländern Japan und Südkorea. Mit Abstand folgten Indien, VAE, Thailand, Malaysia und danach erst die EU, die Silizium über die Häfen von Rotterdam und Amsterdam erreichte. Hauptabnehmer von norwegischem Rohsilizium war Deutschland (53 %), gefolgt von den Niederlanden und Frankreich (je 12 %). Geringe Mengen norwegisches Silizium wurden auch nach Japan und in die USA exportiert. Ähnlich wie chinesisches Rohsilizium war auch brasilianisches Silizium weltweit gefragt mit den Hauptabnehmerländern USA (28 %), gefolgt von Deutschland (12 %), Großbritannien (15 %) und China (12 %). Hauptzielland des in Frankreich produzierten Rohsiliziums war mit 55 % ebenfalls Deutschland. Drei Viertel des in Kanada produzierten Rohsiliziums wurden in die USA exportiert. Australien lieferte größtenteils Silizium nach Japan und Thailand. Island dagegen belieferte fast ausschließlich die EU und dies wiederum über die Häfen von Amsterdam und Rotterdam (Abb. 44).

Deutschland importierte ca. 50 % der im Jahr 2022 importierten Gesamtmenge in Höhe von 256.920 t Rohsilizium aus Norwegen, ca. 20 % aus Frankreich, ca. 13 % aus Brasilien, je 4 %

aus den Niederlanden bzw. China und je 2 % aus Malaysia, Australien und Island. Ebenfalls im Jahr 2022 exportierte Deutschland 18.706 t Rohsilizium, davon ca. 31 % nach Polen, ca. 15 % nach Belgien, ca. 12 % nach Österreich, je ca. 9 % nach Spanien und Italien, ca. 8 % nach Tschechien sowie je ca. 6 % in die Niederlande und in die USA (Abb. 45).

Da es nur sieben Länder gibt, in denen Polysilizium hergestellt wird, und von denen Katar und Südkorea aufgrund geringer Produktionsmengen praktisch keine Rolle als Exporteur besitzen, ist die Welthandelskarte von Polysilizium relativ übersichtlich (s. Abb. 46). Aufgrund von Handelsbeschränkungen findet zudem kaum Handel von Polysilizium zwischen China und den USA statt (vgl. Kapitel 5.9). Die größten Exportnationen von Polysilizium waren im Jahr 2022 Deutschland (ca. 66.000 t), gefolgt von den USA (ca. 45.000 t) sowie mit weitem Abstand Malaysia (ca. 25.000 t), China (ca. 12.000 t) und Japan (ca. 11.000 t). Deutschland exportierte ca. 72 % des hier produzierten Polysiliziums, wohl größtenteils in Solarqualität, nach China, den Rest, wohl größtenteils in Halbleiterqualität, vorwiegend in die südostasiatischen Nachbarländer Vietnam, Japan und Taiwan. Auch die USA versorgen im Wesentlichen die gleichen südostasiatischen Länder mit Polysilizium, dies wohl vorwiegend ebenfalls in Halbleiterqualität. 92 % der Exporte von Polysilizium aus Malaysia hatten China als Ziel, während das aus Japan exportierte Polysilizium im Wesentlichen zwischen Taiwan (49 %) und China (31 %) aufgeteilt wurde. China ist zwar der weltgrößte Produzent von Polysilizium, dies jedoch zu 98,5 % für den heimischen Bedarf. Von der geringen verbleibenden Exportmenge gelangten im Jahr 2022 9.977 t (= 80,5 %) nach Norwegen. Es handelte sich dabei sicherlich um Polysiliziumschleifabfälle (engl.: kerf), die dort von der Firma REC Solar Norway AS zur Produktion von Solarsilizium genutzt wurden (s. Anhang – Länderprofil Norwegen).

Deutschland importierte im Jahr 2022 5.098 t Polysilizium und dies zu 90 % aus den USA. Die deutschen Exporte in Höhe von 65.722 t Poly-

silizium gingen im gleichen Jahr zu 72 % nach China sowie zu 20 % in die Nachbarstaaten Vietnam, Japan, Taiwan und Südkorea (Abb. 47).

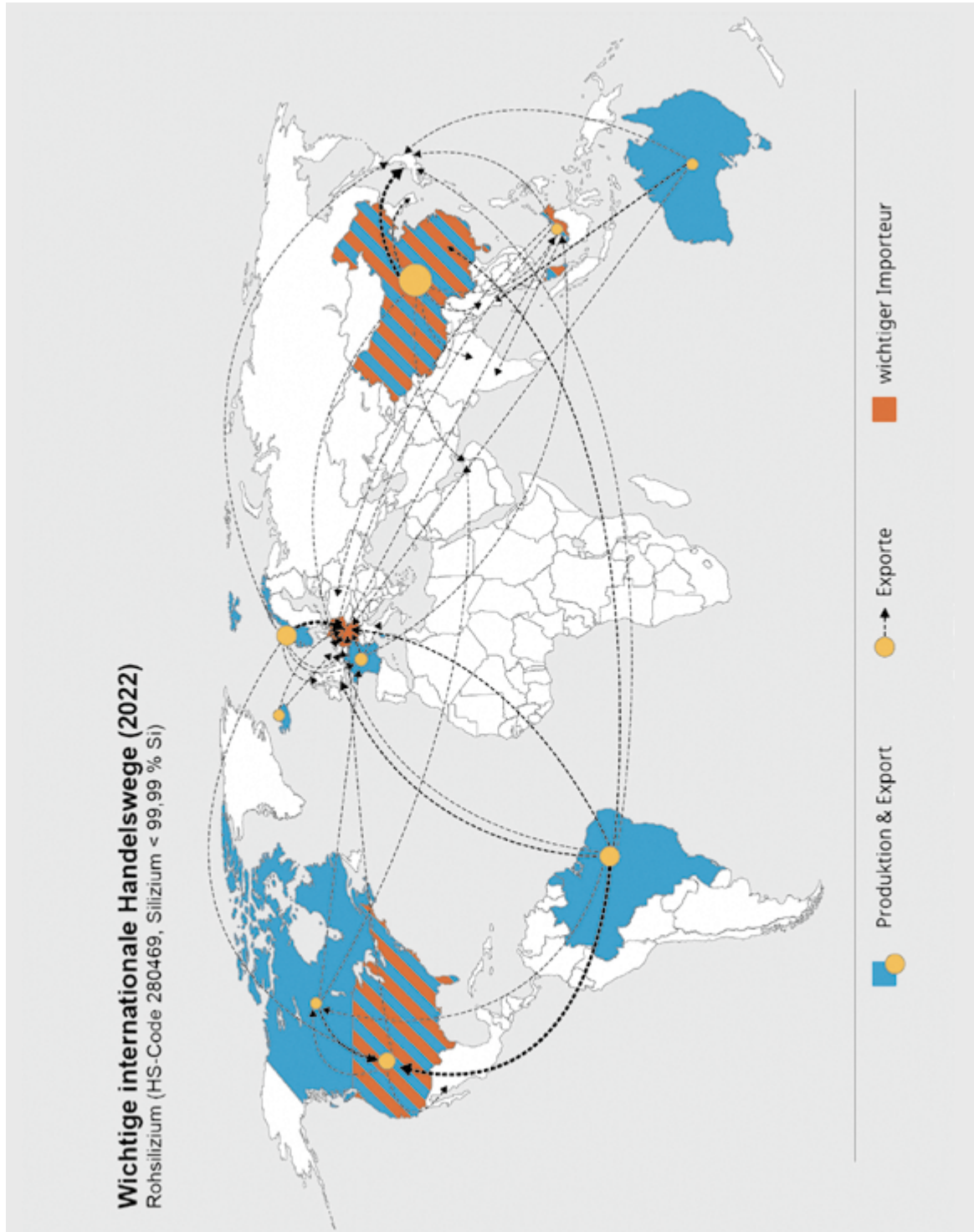


Abb. 44: Kartendarstellung der wichtigsten internationalen Handelswege von Rohsilizium im Jahr 2022 nach Auswertung der Handelsdatenbank GLOBAL TRADE TRACKER (2023), Grafik: DERA.

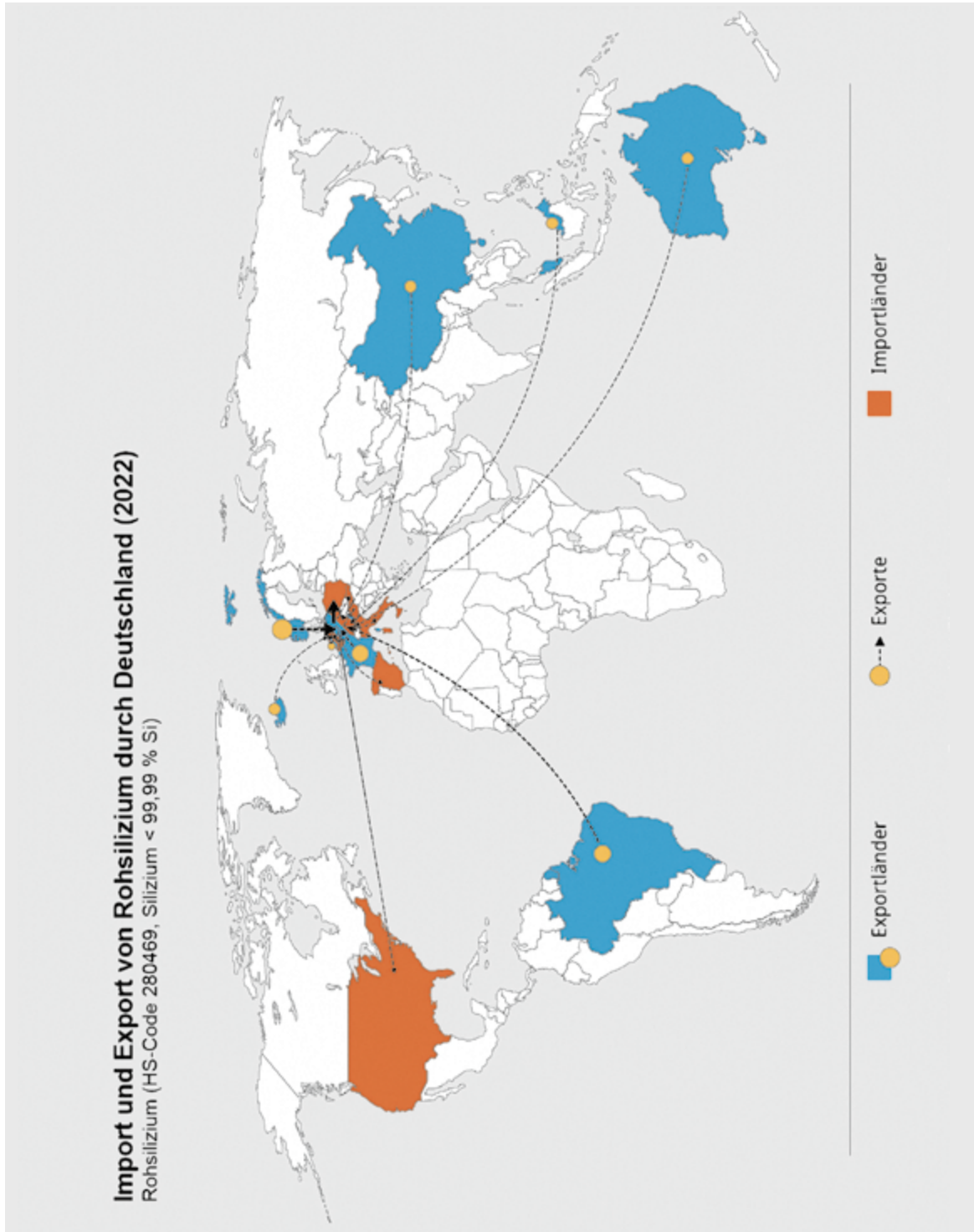


Abb. 45: Kartendarstellung der Im- und Exporte von Rohsilizium durch Deutschland im Jahr 2022 nach Auswertung der Handelsdatenbank GLOBAL TRADE TRACKER (2023), Grafik: DERA.

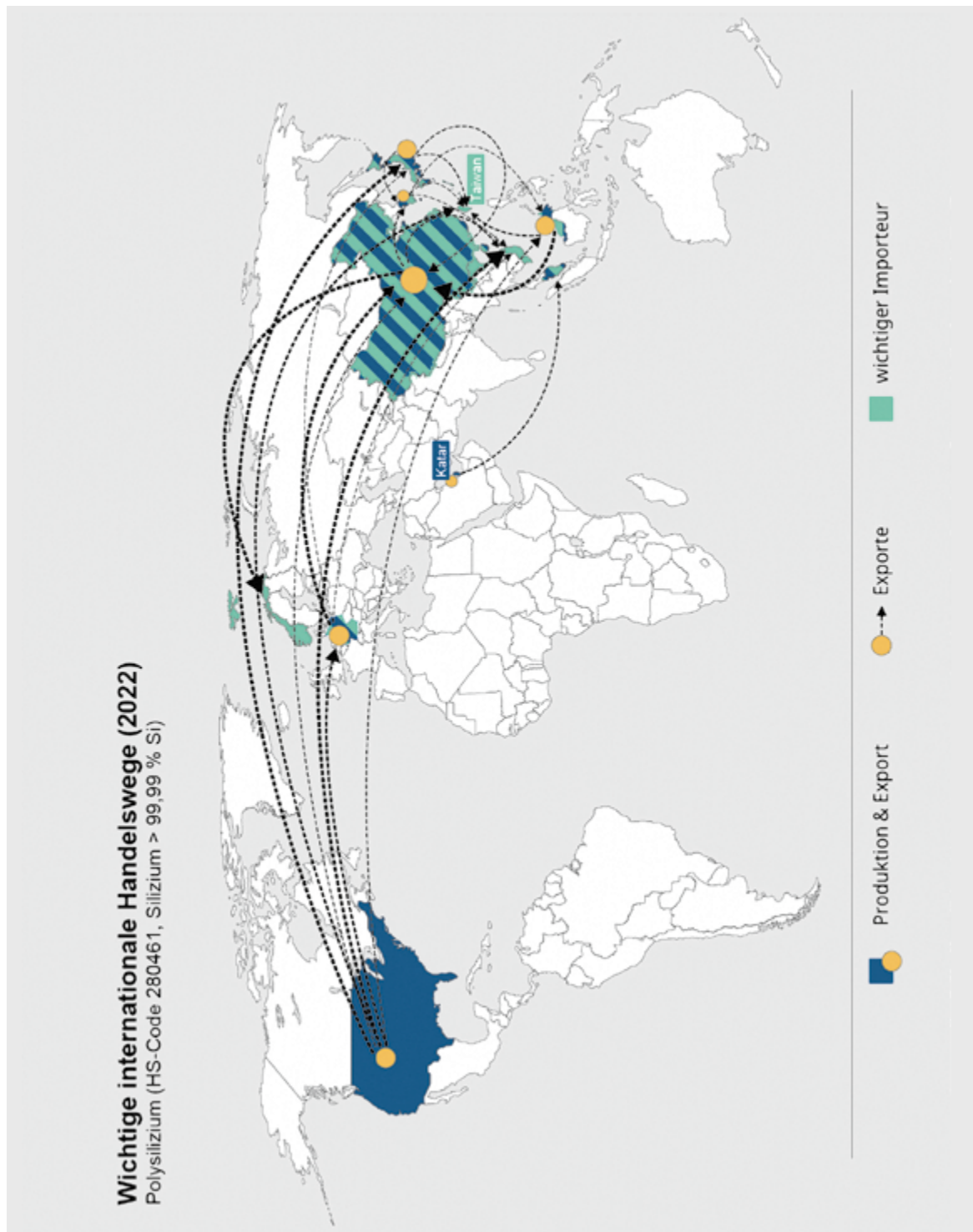


Abb. 46: Kartendarstellung der wichtigsten internationalen Handelswege von Polysilizium im Jahr 2022 nach Auswertung der Handelsdatenbank GLOBAL TRADE TRACKER (2023), Grafik: DERA.

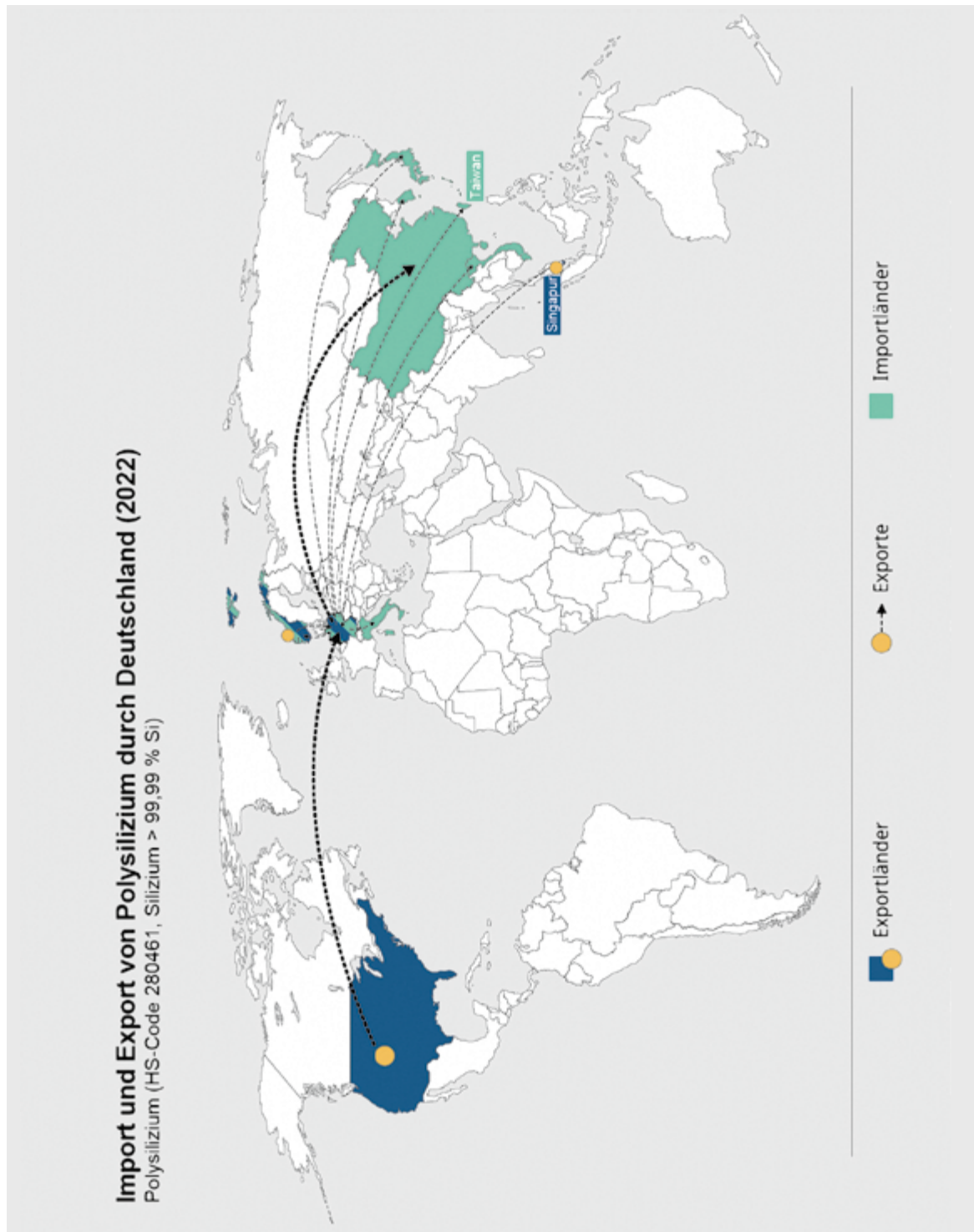


Abb. 47: Kartendarstellung der Im- und Exporte von Polysilizium durch Deutschland im Jahr 2022 nach Auswertung der Handelsdatenbank GLOBAL TRADE TRACKER (2023), Grafik: DERA.

## Literatur

AMNESTY INTERNATIONAL (2021): „Like we were enemies in a war“ China's Mass Internment, Torture and Persecution of Muslims in Xinjiang: London (URL: [ASA\\_17\\_4137-2021\\_Full\\_report\\_ENG.pdf](#)).

AMNESTY INTERNATIONAL (2023): Kolumbien: Bundesregierung muss Menschenrechte ins Zentrum von Klimabündnis stellen, 14.06.2023; Berlin (URL: <https://www.amnesty.de/informieren/aktuell/kolumbien-bundesregierung-menschenrechte-klimabuendnis#:~:text=In%20Kolumbiens%20Steinkohle-Gebieten%20werden%20regelm%C3%A4%C3%9Fig%20Menschenrechte%20verletzt%2C%20Umwelt,Millionen%20Tonnen%20und%20drei%20Mal%20mehr%20als%202021.>).

ASIAN METAL (2023): Silicon Metal Industry Annual Report 2022: 35 S., zahlr. Abb. und Tab.; Beijing (URL: <https://www.asianmetal.com/news/1908358/Silicon-Metal-Industry-Annual-Report-2022/13>).

BAFA – BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE (2023): Überblick Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz: Borna (URL: [https://www.bafa.de/DE/Lieferketten/Ueberblick/ueberblick\\_node.html](https://www.bafa.de/DE/Lieferketten/Ueberblick/ueberblick_node.html)).

BELLIN & DIERMANN (2023): ESMC fordert von der EU Gesetze gegen Zwangsarbeit in der Photovoltaik-Industrie: PV magazine, 22.09.2023; Berlin (URL: <https://www.pv-magazine.de/2023/09/22/esmc-fordert-von-der-eu-gesetze-gegen-zwangsarbeit-in-der-photovoltaik-industrie>).

BERNREUTER, J. (2020): Fluidized bed reactor technology review.- Bernreuter Research: 17 S., 10 Abb., 3 Tab.; Würzburg.

BERNREUTER, J. (2023): U.S. customs detained more than 2GW of solar panels in 2022. Bernreuter Research: 29.03.2023, Augsburg (URL: <https://www.bernreuter.com/newsroom/polysilicon-news/article/us-customs-detained-more-than-2-gw-of-solar-panels-in-2022>).

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2016): Human Rights Risks in Mining. A Baseline Study. – 156 S.; Hannover (URL: [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Downloads/R&E\\_Menschenrechtsstudie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Downloads/R&E_Menschenrechtsstudie.pdf?__blob=publicationFile&v=1)).

BOISVERT, R. & KSINSIK, D. D. (2000): The SKTEC process.- Proceedings of the Congress „Silicon for the Chemical Industry V“ Tromsø, Norway, May 29 – June 2, 2000: 41–50, 6 Abb.; Trondheim, Norwegen.

CBP – U.S. CUSTOMS AND BORDER PROTECTION (2021): The Department of Homeland Security Issues Withhold Release Order on Silica-Based Products Made by Forced Labor in Xinjiang, 24.06.2021; Washington, DC (URL: <https://www.cbp.gov/newsroom/national-media-release/department-homeland-security-issues-withhold-release-order-silica>).

CHALAMALA, B. (2018): Manufacturing of Silicon Materials for Microelectronics and Solar PV. Sandia National Laboratories, SAND2018 – 1390PE: 56 Folien; Albuquerque, NM (URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1497235>).



COCKAYNE, J.; HERTA E. R. & BURCU, O. (2022): „The Energy of Freedom?“ Solar energy, modern slavery and the Just Transition: 63 S.; Nottingham (University of Nottingham) (URL: <https://www.nottingham.ac.uk/research/beacons-of-excellence/rights-lab/resources/reports-and-briefings/2022/march/the-energy-of-freedom-full-report.pdf>).

COCKAYNE, J. (2022a): Making Xinjiang sanctions Work: Policy Brief No. 9 – Solar: 4 S.; Nottingham (University of Nottingham) (URL: <https://www.xinjiangsanctions.info/wp-content/uploads/2022/07/Policy-Brief-No-9-Solar.pdf>).

COCKAYNE, J. (2022b): Making Xinjiang sanctions work. Addressing forced labour through coercive trade and finance measures: 81 S.; Nottingham (University of Nottingham) (URL: <https://www.xinjiangsanctions.info/wp-content/uploads/2022/07/Making-Xinjiang-Sanctions-Work-FINAL.pdf>).

CPIA – CHINA PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION (2021-2022): China PV Industry Development Roadmap: 49 S.; Beijing (URL: <http://www.chinapv.org.cn/Uploads/File/2023/01/12/u63bfa8011acf0.pdf>).

CRAWFORD, A. & MURPHY, L. T. (2023): Overexposed: Uyghur Region Exposure Assessment for Solar Industry Sourcing: 55 S.; zahlr. Abb.; Sheffield, UK (Sheffield Hallam University) (URL: <https://www.shu.ac.uk/helena-kennedy-centre-international-justice/research-and-projects/all-projects/over-exposed>).

CRU – CRU INTERNATIONAL LTD. (2023): Silicon Metal Market Outlook – Statistical Review October 2023: 30 Tab.; Pittsburgh.

CSIRO – COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION (2022): Australian Silicon Action Plan: 39 S.; Canberra (URL: <https://www.csiro.au/en/research/natural-environment/critical-minerals/australian-silicon-action-plan>).

CUSANO, G., GONZALO, M. R., FARRELL, F., REMUS, R., ROUDIER, S. & SANCHO, L. D. (2017): Best available techniques (BAT). Reference document for the main non-ferrous metals industries.- Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control): 1178 S., 196 Abb., 573 Tab.; Sevilla (URL: [https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC107041\\_NFM\\_bref2017.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC107041_NFM_bref2017.pdf)).

DERA – DEUTSCHE ROHSTOFFAGENTUR (2021): Rohstoff-Engpass: Chinas Magnesium-Metallexport eingebrochen – Versorgung auf dem Weltmarkt bleibt angespannt.- Pressemitteilung vom 29.10.2021: 1 S.; Berlin (URL: [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/DERA/dera-bgr-2021-10-29\\_chinas\\_magnesium\\_metallexport\\_eingebrochen.html?jsessionid=695A3AA16681B62E3DF47538D96DC0BF.internet961?nn=1544712](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/DERA/dera-bgr-2021-10-29_chinas_magnesium_metallexport_eingebrochen.html?jsessionid=695A3AA16681B62E3DF47538D96DC0BF.internet961?nn=1544712)).

DOE – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (2022): Solar Photovoltaics. Supply Chain Deep Dive Assessment U.S. Department of Energy Response to Executive Order 14017, “America’s Supply Chains”: 104 S., 79 Abb., 6 Tab.; Washington, DC (URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Solar%20Energy%20Supply%20Chain%20Report%20-%20Final.pdf>).

EC – EUROPEAN COMMISSION (2022): Corporate sustainability due diligence. Fostering sustainability in corporate governance and management systems: Brussels (URL: [https://commission.europa.eu/business-economy-euro/doing-business-eu/corporate-sustainability-due-diligence\\_en](https://commission.europa.eu/business-economy-euro/doing-business-eu/corporate-sustainability-due-diligence_en)).

EPRS – EUROPEAN PARLIAMENTARY RESEARCH SERVICE (2023): Proposal for a ban on goods made using forced labour: European Union (URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/739356/EPRS\\_BRI\(2023\)739356\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/739356/EPRS_BRI(2023)739356_EN.pdf)).

EXAWATT & ANZAPLAN (2021): The global market for high-purity quartz.- 41 S., 32 Abb., 10 Tab.; Sheffield-Hirschau (Exawatt Ltd. & DORFNER Analysenzentrum und Anlagenplanungsgesellschaft mbH).

EU – EUROPEAN UNION (2020): Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020). – Critical Raw Materials Factsheets (Final): Silicon Metal: 706 – 722, 16 Abb., 7 Tab.; Luxemburg (URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8dabb4c1-f894-11ea-991b-01aa75ed71a1>).

EU-KOMMISSION (2022): Kommission verbannt in Zwangsarbeit hergestellte Produkte vom EU-Markt: 14. September 2022, Brüssel (URL: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip\\_22\\_5415](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_22_5415)).

FERROGLOBE (2022): Ferroglobe plc Investor Day Presentation July 12th, 2022: 112 S.; London (URL: <https://www.ferroglobe.com/static-files/165350da-996c-4543-b354-057aafcc12e3>).

FISCHER, M., WOODHOUSE, M., BALIOZIAN, P. & TRUBE, J. (2023): International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), Results 2022, Fourteenth Ed.: 77 S., 85 Abb.; Frankfurt a.M.

FRAUNHOFER ISE – FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS, ISE WITH SUPPORT OF PSE PROJECTS GMBH (2022): Photovoltaics Report, 22.09.2022: 53 Folien; Freiburg.

GEINITZ, C. (2022): Schmutzige Solarzellen: FAZ, Frankfurt, 29.06.2022 (URL: <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/klima-nachhaltigkeit/photovoltaik-wird-ein-rohstoff-in-china-durch-zwangsarbeit-gewonnen-18135166.html>).

GLOBAL TRADE TRACKER (2023): Kostenpflichtige Datenbank der ZEN Innovations AG; Kehrsatz, CH. (URL: <https://www.globaltradetracker.com>).

HALLAM, B., KIM, M., UNDERWOOD, R, DRURY, S., WANG, L. & DIAS, P. (2022): A polysilicon learning curve and the material requirements für broad electrification with photovoltaics by 2050.- Solar RRL, 6, 10: 8 S., 3 Abb.; Weinheim (URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/solr.202200458>).

HRW – HUMAN RIGHTS WATCH (2021): „Break Their Lineage, Break Their roots“. -Human Rights Watch: 19. April 2021, New York (URL: [https://www.hrw.org/sites/default/files/media\\_2021/04/china0421\\_web\\_2.pdf](https://www.hrw.org/sites/default/files/media_2021/04/china0421_web_2.pdf)).

ICCPR – INTERNATIONAL COVENANT ON CIVIL AND POLITICAL RIGHTS (1966): International Covenant on Civil and Political Rights: 26 S.; New York (URL: <https://www.ohchr.org/sites/default/files/ccpr.pdf>).

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2022a): Renewables 2022: IEA, Paris (URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2022/executive-summary>).

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2022b): Special Report on Solar PV Global Supply Chains: 124 S., zahlr. Abb. und Tab.; Paris (URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2ee601d-6b1a-4cd2-a0e8-db02dc64332c/SpecialReportonSolarPVGlobalSupplyChains.pdf>).

ILO – INTERNATIONAL LABOUR ORGANISATION (1930): Übereinkommen 29. Übereinkommen über Zwangs- oder Pflichtarbeit: Genf (URL: [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_norm/---normes/documents/normativeinstrument/wcms\\_c029\\_de.htm](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_norm/---normes/documents/normativeinstrument/wcms_c029_de.htm)).

ILO – INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION (2012): ILO Indicators of Forced Labour. –Special Action Programme to Combat Forced Labour: 26 S.; Genf (URL: [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_norm/---declaration/documents/publication/wcms\\_203832.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_norm/---declaration/documents/publication/wcms_203832.pdf)).

ILO – INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION (2022): Global Estimates of Modern Slavery. Forced Labour and Forced Marriage: 144 S.; Genf (URL: [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_norm/---ipecc/documents/publication/wcms\\_854733.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_norm/---ipecc/documents/publication/wcms_854733.pdf)).

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2016): End-Of-Life Management. Solar Photovoltaic Panels: 100 S.; Abu Dhabi (URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA\\_IEAPVPS\\_End-of-Life\\_Solar\\_PV\\_Panels\\_2016.pdf?rev=49a75178e38c46288a18753346fb0b09](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf?rev=49a75178e38c46288a18753346fb0b09)).

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2023): Renewable Energy Statistics 2023: 426 S.; Abu Dhabi (URL: [https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jul/IRENA\\_Renewable\\_energy\\_statistics\\_2023.pdf?rev=7b2f44c294b84cad9a27fc24949d2134](https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2023.pdf?rev=7b2f44c294b84cad9a27fc24949d2134)).

JÄGER-WALDAU, A. (2023): Snapshot of photovoltaics – May 2023.- EPJ Photovoltaics, 14, 23: 9 S., 4 Abb., 1 Tab.; Les Ulis (URL: <https://www.epj-pv.org/articles/epjpv/pdf/2023/01/pv230020.pdf>).

KOPP, E. K. & FROMME, H. (2010): Vorkommen und gesundheitliche Bewertung von Siloxanen.- Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, Materialien zur Umweltmedizin, 21: 152 S., 10 Abb., 37 Tab.; Erlangen (URL: <https://repository.publisso.de/resource/frl:3903616-1/data>)

LEGEMZA, J., FINDORÁK, R., BUFKO, B. & BRIANČIN, J. (2021): New Approach in research of quartzes and quartzites for ferroalloys and silicon production.- Metals, 11, 4, 670: 23 S., 13 Abb., 10 Tab., Basel (URL: <https://doi.org/10.3390/met11040670>).

LINDSTAD, T., OLSEN, S. E., TRANELL, G., FÆRDEN, T. & LUBETSKY, J. (2007): Greenhouse gas emissions from ferroalloy production.- Proceedings of the 11th International Ferroalloys Congress, INFACON XI, New Delhi, India, 18 – 21 February 2007: 457 – 466, 8 Tab., 1 Anh.; New Delhi. (URL: <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXI/457-Lindstad.pdf>).

MALVEDA, M., SESTO, B., PASSARARAT, S. & ZHANG, W. (2020): Silicones.- IHS Markit Chemical Economics Handbook: 119 S.; zahlr. Tab. und Abb.; London.

MISEREOR (2022): Steinkohle aus Kolumbien. Factsheet: 2 S.; Aachen (URL: [https://www.kolko.net/wp-content/uploads/2022/10/MRKK\\_2022-10\\_factsheet\\_Kolumbien\\_Steinkohle\\_WEB.pdf](https://www.kolko.net/wp-content/uploads/2022/10/MRKK_2022-10_factsheet_Kolumbien_Steinkohle_WEB.pdf)).

MURPHY, L. T. & ELIMÄ, N. (2021): In Broad Daylight: Uyghur Forced Labour and Global Solar Supply Chains: 68 S., zahlr. Abb., 1 Anh.; Sheffield, UK (Sheffield Hallam University) (URL: <https://www.shu.ac.uk/helena-kennedy-centre-international-justice/research-and-projects/all-projects/in-broad-daylight>).

PREKER, A. & SCHULTZ, S. (2021): „Teilweise unter dem Verdacht der Zwangsarbeit“: Der Spiegel, 02.07.2021; Hamburg (URL: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/solarenergie-zwangsarbeit-in-lieferketten-deutscher-solkonzerne-a-00b3c596-d62c-4be4-9a0b-2349db4016f7>).

RAI – RADIOTELEVISIONE ITALIANA SPA (2020): Solland Silicon hat bisher 30 Millionen Euro verschlungen.- Pressemeldung vom 29.7.2020; Rom (URL: <https://www.rainews.it/tgr/tagesschau/articoli/2020/07/tag-solland-geld-30-millionen-euro-bisher-kompatscher-e325dabb-584e-4ce3-8570-cfaadba2cdd6.html>).

ROSKILL – ROSKILL INFORMATION SERVICES LTD. (2011): Silicon and Ferrosilicon: Global industry markets and outlook, 13th Edition 2011: 268 S., 86 Abb., 123 Tab.; London.

ROSKILL – ROSKILL INFORMATION SERVICES LTD. (2014): Silicon and Ferrosilicon: Global industry markets and outlook, 14th Edition 2014: 297 S., 116 Abb., 110 Tab., 1 Anh.; London.

SCHMITZ, M. (2019): Rohstoffrisikobewertung – Magnesium (Metall). – DERA Rohstoffinformationen, 38: 68 S., 12 Abb., 17 Tab., 1 Anh.; Berlin (URL: [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-38.pdf;jsessionid=E0F6B41F3AF778D226C4A90690F69870.internet002?blob=publicationFile&v=10](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-38.pdf;jsessionid=E0F6B41F3AF778D226C4A90690F69870.internet002?blob=publicationFile&v=10)).

SCHÖNE, J. (1980): Ergebnisbericht „Studie Ferro- und Reinsilizium“. – IfR – Institut für mineralische Rohstoff- und Lagerstättenwirtschaft Dresden.- BGR Archiv-Nr.: 2020604: 107 S., 9 Anl.; Dresden (unveröffentlicht).

SCHÖNE, J. & LANGE, W. (1982): Ergebnisbericht „Hochwertige Si-Rohstoffe für Sonderanwendungen“ (Bearbeitungszeitraum 1981 – 1982).- IfR – Institut für mineralische Rohstoff- und Lagerstättenwirtschaft Dresden.- BGR Archiv-Nr.: 2021179: 104 S., 4 Anl.; Dresden (unveröffentlicht).

SOLARPOWER EUROPE (2023): Global Market Outlook for Solar Power 2023-2027: 146 S., zahlr. Abb.; Brüssel (URL: [https://api.solarpowereurope.org/uploads/Global\\_Market\\_Outlook\\_2023\\_2027\\_report\\_18b86a4568.pdf](https://api.solarpowereurope.org/uploads/Global_Market_Outlook_2023_2027_report_18b86a4568.pdf)).

SOMMERFELD, M. & FRIEDRICH, B. (2021): Replacing fossil carbon in the production of ferroalloys with a focus on bio-based carbon: a review.- Minerals, 11, 1286: 39 S., 18 Abb., 8 Tab.; Basel (URL: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/11/1286>).

TINGTING, M. (2023): Analysis of main and auxiliary materials in PV industry chain.- SMM-Shanghai Metals Market, May 2023: 18 Folien; Shanghai.

TRUBE, J. (2022): Photovoltaic supply chain in Europe. – Präsentation der Fachabteilung Photovoltaik Produktionsmittel im VDMA vom 20.09.2022: 14 Folien; Frankfurt a. M.

TVEIT, H. & MYRHAUG, E. (2000): Important sub-processes in the silicon process. The behaviour of trace elements. – Proceedings of the Congress „Silicon for the Chemical Industry V“ Tromsø, Norway, May 29 – June 2, 2000: 23–30, 4 Abb., 3 Tab.; Trondheim, Norwegen.

UFLPA – UYGHUR FORCED LABOR PREVENTION ACT (2021): Uyghur Forced Labor Prevention Act. –US Customs and Border Protection: Washington D.C. (URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-117publ78/pdf/PLAW-117publ78.pdf>).

UN – UNITED NATIONS (1948): Allgemeine Erklärung der Menschenrechte: New York (URL: <https://un-ric.org/de/allgemeine-erklaerung-menschenrechte>).

UN – UNITED NATIONS (2022): OHCHR Assessment of human rights concerns in the Xinjiang Uyghur Autonomous Region, People's Republic of China: 48 S.; Genf (URL: <https://www.ohchr.org/sites/default/files/documents/countries/2022-08-31/22-08-31-final-assesment.pdf>).

VAISH, A. K. (1994): Production of ferro-silicon and calcium silicon alloys: Annual Report 1993 – 1994 of the National Metallurgical Laboratory of India: 6.1–6.17, 4 Abb., Jamshedpur (URL: <https://eprints.nmlindia.org/5785/1/6.01-6.17.PDF>).

WEITZ, H. (2015): Evaluation of the furnace method for the production of low carbon ferrochrome.- MSc. Thesis, Department of Materials Sciences and Metallurgical Engineering, University of Pretoria: 125 S., 49 Abb., 55 Tab.; Pretoria (URL: [https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/57231/Weitz\\_Evaluation\\_2015.pdf;jsessionid=2CC795E54ED86ED1FAC503130AF40A25?sequence=1](https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/57231/Weitz_Evaluation_2015.pdf;jsessionid=2CC795E54ED86ED1FAC503130AF40A25?sequence=1)).

WIETLISBACH, S., GAO, A., FUNANDA, C. & HELD, H. (2021): Silicates and Silicas. – IHS Markit Chemical Economics Handbook: 231 S.; zahlr. Tab. und Abb.; London.



# Anhang

Länderprofile	110
Indikatoren und Risikobewertung	236
Glossar	238

## Länderprofile



### Ägypten

In Ägypten sind zahlreiche Vorkommen hochwertiger Quarzsande und in der östlichen Wüste an mindestens 38 Lokalitäten auch Vorkommen von Quarzgängen bekannt, die das dort stark metamorph überprägte Grundgestein in Form von Gängen oder Dykes durchschneiden. Die ermittelten Quarzvorräte in den wirtschaftsgeologisch wichtigsten Lokalitäten übersteigen 1 Mrd. t bei Quarzgehalten zwischen 98 und 99,3 %  $\text{SiO}_2$ , z. T. auch bis 99,98 %  $\text{SiO}_2$  (IBRAHIM 2000).

Nach ELKEM ASA (frdl. mdl. Mitt.) ist ägyptischer Quarz besonders hochwertig und für die Produktion aller Si- und FeSi-Qualitäten sehr gut geeignet.

Zwei Unternehmen produzieren derzeit in Ägypten Ferrosilizium:

Die **Egyptian Ferroalloys Company (EFACO)**, eines der 15 Tochterunternehmen der 1983 gegründeten staatlichen Metallurgical Industries Holding Company, produziert seit 1987 auf einem rund 50 ha großen Industriegelände bei Edfu, am östlichen Nilufer, Ferrosilizium. Zur Stromversorgung seiner vier Öfen mit je 21,5 MVA-Anschlussleistung nutzt es günstige Hydroenergie aus dem nahen Assuan Staudamm. Der benötigte Quarz stammt aus dem Umm Hegleg Steinbruch in 110 km Entfernung. Der Abtransport des Ferrosiliziums und des als Beiprodukt gewonnenen Mikrosilikas erfolgt per Lkw, per Schiff über den Nil sowie per Bahn über einen eigenen Gleisanschluss. Ein Großteil der Produkte wird exportiert. Die Gesamtkapazität des Werkes liegt bei 48.800 tpa Ferrosilizium (FeSi 75 % in verschiedenen Korngrößen) bzw. 18.000 tpa Mikrosilika. Nach ROSKILL (2011) produzierte EFACO in den Geschäftsjahren 2006/2007 53.364 t FeSi und 19.030 t Mikrosilika bzw. 2007/2008 53.631 t FeSi und 19.901 t

Mikrosilika bzw. 2008/2009 48.803 t FeSi und 19.447 t Mikrosilika.

Ein weiterer Produzent von Ferrosilizium in Ägypten ist die 1956 gegründete **Egyptian Chemical Industries (KIMA) S.A.E.**, eine Mehrheitsbeteiligung der staatlichen Chemical Industries Holding Company. Auch dieses Unternehmen mit Sitz in Aswan nutzt zur Produktion die günstige Wasserkraft aus den Assuan Staudamm. Zu den Hauptprodukten des Unternehmens zählen diverse Stickstoffchemikalien und -düngemittel sowie Gase und Säuren. Hergestellt werden seit 1967 aber auch Ferrosilizium in verschiedenen Qualitäten bis zu FeSi 65–75 % und in verschiedenen Korngrößen sowie Mikrosilika. Die Jahreskapazität von Ferrosilizium liegt bei 7.000 tpa, die Produktionsmenge ist nach ROSKILL (2011) vermutlich wesentlich geringer.

Zur Förderung der heimischen Ferrosiliziumproduktion hat das ägyptische Wirtschaftsministerium Antidumping-Zölle gegen Einfuhren von Ferrosilizium aus China, Indien und Russland verhängt. Auf der anderen Seite ist der Bedarf der ägyptischen Stahlindustrie an Ferrosilizium größer als die heimische Produktion und jährlich wird Ferrosilizium FeSi > 55 % im Wert von umgerechnet bis zu 13 Mio. € (2022) importiert. Die extra zu diesem Zweck gegründete nicht-staatliche Arab Alloy Co. hat daher im Jahr 2021 verkündet, ab 2026 auf einem 40 ha großen Industriegelände in der Suez Canal Economic Zone (SCZone) ebenfalls jährlich bis zu 48.000 t Ferrosilizium produzieren zu wollen. Die Produktion soll zusätzlich Silizium für die Aluminiumgussherstellung sowie Ferromangan und Ferrosilikomangan für die Eisen- und Stahlindustrie umfassen und zu 85 % Umfang dem heimischen Absatzmarkt dienen.

Zudem gibt es in Ägypten immer wieder Pläne mit verschiedenen ausländischen Partnern, früher aus Indien und derzeit aus China, zum Aufbau einer kompletten Wertschöpfungs-



kette vom Rohstoff Quarz über die Produktion von Polysilizium (geplante Kapazität derzeit 48.000 tpa) bis hin zur Produktion von PV-Modulen. Bisher haben sich jedoch alle diesbezüglichen Projekte zerschlagen.

**Literatur:**

IBRAHIM, S. S. (2000): The Egyptian silicas, current status and profitable trends. – Industrial Minerals, 412: 16 S., 8 Tab.; London.

**Tab. 23: Produktion (in t) von Ferrosilizium (FeSi) in Ägypten seit 2005 (Verkäufe bis Ende des Geschäftsjahres, d. h. 30.06.), Quelle: BRITISH GEOLOGICAL SURVEY WORLD MINERAL PRODUCTION (versch. Jahre).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FeSi	55.000	50.000	48.464	59.192	78.355	25.516	52.421	54.930	49.060
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSi	56.794	54.767	65.089	63.719	60.500	60.500	60.000	60.000	n. v.



## Argentinien

In Argentinien sind derzeit zwei Unternehmen in der Produktion von Silizium, Ferrosilizium und teils auch Ferrosilikomangan tätig.

Die **Electrometalurgica Andina S.A.I.C.** mit Sitz in Buenos Aires geht mit ihren Anfängen auf das Jahr 1948 zurück, als es von dem damaligen französischen Industriekonzern Pechiney gegründet wurde. Im Folgejahr erbaute das Unternehmen ein Wasserkraftwerk am Dique de Ullum und sein Hauptchemiewerk im nahen Chimbas Industriepark in der Provinz San Juan. Dort wurde dann zwei Jahre später zum ersten Mal Calciumcarbid, weiterhin das Hauptprodukt der Unternehmensgruppe, produziert. Im Jahr 1982 wurde Electrometalurgica Andina von argentinischen Investoren übernommen und produziert nach Zukäufen mittlerweile auch in Großbritannien und Südafrika Calciumcarbid sowie in Argentinien auch Calciumsilikat, Ferrosilizium, Silizium, künstlichen Graphit und verschiedene weitere Produkte für metallurgische Anwendungen. Im Jahr 2008 wurden alle Aktivitäten in Form der Andina-Gruppe mit Sitz in Spanien zusammengefasst.

Das Werk von Electrometalurgica Andina im Industriepark von Chimbas umfasst einen 4,5 MVA-Drehofen mit einer Kapazität von 3.000 tpa FeSi 75 % oder 4.500 tpa FeSi 50 %, einen 12 MVA-Drehofen mit einer Kapazität von 9.000 tpa FeSi 75 % sowie einen 12 MVA-Drehofen zur Produktion von bis zu 5.000 tpa Silizium. Zudem wird bedarfsabhängig auch Ferromangan, Ferrosilikomangan und natürlich auch Calciumcarbid produziert. Nach ROSKILL (2016) stammt der zur Produktion benötigte Quarz aus einem 380 km entfernten Steinbruch nahe Serrezuela, Provinz Córdoba. Das Werk verfüge zudem mittlerweile über fünf Öfen mit einer Gesamtanschlussleistung von 60 MVA, soll aber schon seit längerem (Stand 2011) nur noch Calciumcarbid und Calciumsilikat produzieren.

**Globe Metales, S.A.** ist ein Tochterunternehmen der US-amerikanischen Ferroglobe plc,

eines der weltweit führenden Unternehmen mit zahlreichen Produktionsstätten für Silizium und Ferrolegierungen. Globe Metales produziert an seinem argentinischen Standort Luján de Cuyo in der Mendoza Provinz mithilfe von Wasserkraft Calciumsilizide, Ferrosilizium, Ferrosilikomagnesium (Kapazität: 58.300 tpa) sowie weitere Legierungen (z. B. Ferromolybdän, Ferrovanadium) für die Stahl- und Gussindustrie. Das Unternehmen wurde im Jahr 1965 als Stein Ferroaleaciones S.A. gegründet und im November 2006 von Globe Specialty Metals Inc. (im Jahr 2015 umbenannt in Ferroglobe plc) für 36,4 Mio. US\$ übernommen. Der Standort Luján de Cuyo besaß ursprünglich eine Produktionskapazität von bis zu 3.000 tpa FeSi 50 % und 1.800 tpa FeSi 75 %, ist aber inzwischen um einen dritten Elektroreduktionsofen mit 18 MVA-Anschlussleistung und damit auf eine Gesamtkapazität von 25.000 tpa FeSi erweitert worden. Der eingesetzte Quarz stammt aus einem firmeneigenen Steinbruch nahe des in 420 km Entfernung gelegenen Dorfes Achiras, Provinz Córdoba, jedoch verfügt Ferroglobe auch über ein Quarzvorkommen im benachbarten Venezuela.

Auch die **Manferro S.A.** mit Produktionsstätte in El Nihuil, Department San Rafael, Mendoza Provinz, wird durch kostengünstige Wasserkraft mit dem benötigten Strom versorgt. Das Unternehmen wurde ursprünglich unter dem Namen Carbometal S.A. im Jahr 1949, ähnlich der benachbarten Industrias Siderurgicas Grassi S.A., von dem argentinischen Ingenieur und Unternehmer Luis Grassi gegründet und über viele Jahrzehnte als Familienunternehmen geführt. Es produzierte mit zwei Öfen Calciumcarbid vornehmlich für den Export. Das Werk wurde im Februar 1992 geschlossen, im März 1995 wieder in Betrieb genommen, dann aber im Februar 1997 endgültig stillgelegt. Im Jahr 2012 wurde die Produktionsstätte von dem Unternehmen Manferro aus Buenos Aires für einen Zeitraum von 20 Jahren angemietet und mit Investitionen von 12 Mio. US\$ zur Produktion von bis zu 12.000 tpa FeSi umgebaut. Im August 2014 ging dann der erste Ofen tatsächlich in Produktion, machte aber v. a. erst einmal durch seine er-

hebliche Luftverschmutzung Schlagzeilen. Im September 2015 erfolgte wegen eines Nachfrageeinbruchs und aufgrund von Währungsturbulenzen bereits wieder die Schließung. Seitdem wartet das Werk auf seine erneute Inbetriebnahme.

Auch in Argentinien gibt es mit dem Solar San Juan Projekt seit längerem ein Projekt zum Aufbau einer integrierten Wertschöpfungskette vom Rohstoff Quarz bis hin zur Solarmodulproduktion. Als Teil dieses Projektes sollen jährlich 567 t Silizium verarbeitet und PV-Module mit einer Leistung von 71 MWp produziert wer-

den. Im Jahr 2013 wurde die SCHMID Group aus Freudenstadt mit der Umsetzung des Projekts beauftragt, die damals noch vom Beginn der PV-Modulproduktion in Argentinien ab Oktober 2015 ausging.

Weder die genauen Höhen der Silizium- noch der Ferrosilizium- oder Ferrosilikomanganproduktion in Argentinien sind bekannt. Die Schätzungen des U.S. Geological Survey, die denen des British Geological Survey sehr gut entsprechen, sind in Tab. 24 aufgeführt. Die weltweiten Importe von Silizium und Ferrosilizium sind in Tab. 25 gegenübergestellt.

**Tab. 24: Produktion (in t) von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in Argentinien seit dem Jahr 2005, Quelle: U.S. GEOLOGICAL SURVEY MINERALS YEAR-BOOK (versch. Jahre). n. v. = nicht verfügbar.**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	8.000	8.000	8.000	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
FeSi	25.700	24.400	15.000	10.400	11.300	11.000	11.000	11.000	11.000
FeSiMn	13.290	9.268	8.917	9.172	6.644	10.900	11.000	11.000	11.000
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
FeSi	17.000	12.700	12.000	13.000	13.000	13.000	11.200	13.000	n. v.
FeSiMn	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.

**Tab. 25: Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Argentinien seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	0	0	1	< 1	100	43	0	0	1
FeSi	19.243	17.391	10.990	7.443	6.962	12.321	10.348	10.398	9.996
FeSiMn	1.255	1.773	1.252	1.858	1.526	1.298	379	662	0
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	0	< 1	0	0	0	72	0	0	1
FeSi	10.384	8.449	6.971	5.451	7.121	5.284	3.537	6.425	5.192
FeSiMn	0	0	0	7	0	1	0	16	24



## Aserbaidtschan

Im November 2018 eröffnet Ilham Aliyev, der Präsident von Aserbaidtschan, das neue Ferrolegerungswerk der **Baku Non Ferrous and Foundry Company LLC (BNFFC)** im Chemieindustriepark Sumgayit, nördlich von Baku. Dieses Werk besitzt mit derzeit einem Ofen eine Kapazität von 18.000 tpa FeSi 75 %, FeSi 70 % und FeSi

65 % und soll mittelfristig auf die Produktion von Ferrochrom sowie einen zweiten Ofen erweitert werden. Langfristig könnten auch FeMn mit einer Kapazität von 38.000 tpa sowie FeSiMn mit einer geplanten Kapazität von 50.000 tpa erzeugt werden. Nach Firmenangaben lagen die Produktionsmengen im Jahr 2019 bei rund 10.000 t FeSi (Exportquote 60 %), im Jahr 2020 bei 11.100 t FeSi (Exportquote 80 %), im Jahr 2021 bei 13.120 t FeSi und im ersten Halbjahr 2022 bei 7.316 t FeSi.

Tab. 26: Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Aserbaidtschan seit dem Jahr 2018, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).

	2018	2019	2020	2021	2022
FeSi	61	4.674	8.400	11.838	10.963
FeSiMn	0	0	0	0	48



## Australien

**SIMCOA Operations Pty Ltd.**, seit 1996 ein Tochterunternehmen der japanischen Shin-Etsu Chemical Corporation, baut seit 1989 nördlich von Moora, 204 km nördlich von Perth, Western Australia, in einem ca. 20 m tiefen Tagebau jährlich bis zu 160.000 t hochreines proterozoisches Kieselgestein (engl.: chert) ab. Die Lagerstätte enthält nachgewiesene Reserven von > 2 Mio. t zzgl. Ressourcen von > 4 Mio. t Gestein @ 99,3 %  $\text{SiO}_2$  (< 0,10 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , < 0,30 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , < 0,03 %  $\text{TiO}_2$ , < 0,01 %  $\text{P}_2\text{O}_5$ ). Ein Großteil des Kieselgesteins wird von SIMCOA in der eigenen Siliziumhütte in Kemerton (Abb. 44) rund 160 km südlich Perth zur Produktion von derzeit jährlich bis zu 52.000 t Rohsilizium @ 99,0 – 99,4 % Si in mittlerweile drei Elektrolichtbogenöfen mit je 27 MVA-Anschlussleistung genutzt. Eine Erhöhung der Produktion von ursprünglich 32.000 tpa auf die jetzige Kapazität erfolgte im Jahr 2012, eine weitere auf die bereits zugelassene Maximalkapazität von 64.000 tpa (durch dann vier Öfen) ist seit

langem angekündigt. Das hergestellte Rohsilizium wird zu 98 % exportiert – zwischen 5.000 tpa und über 16.000 tpa nach Deutschland. Das aus den Abgasfiltern rückgewinnbare Mikrosilika, rund 13.000 tpa, findet als Feuerfestrohstoff und hochwertiger Zuschlag für Spezialbetone Verwendung. Das nicht zur Siliziumproduktion nutzbare Gestein aus Moora wird nach Zerkleinerung im Landschaftsbau und als Betonzuschlagstoff eingesetzt (SIMCOA, frdl. mdl. Mitt.).

Einziger Produzent von Ferrosilikomangan in Australien ist die **Tasmanian Electro Metallurgical Company Pty, Ltd.** (TEMCO) mit ihrer ursprünglich von BHP Pty Ltd. errichteten Hütte in Bell Bay nahe George Town in Tasmanien. Im Mai 1962 ging an diesem Standort aufgrund der dort verfügbaren günstigen Wasserkraft ein erster Elektroreduktionsofen mit einer Anschlussleistung von 13,2 MVA zur Herstellung von FeMn oder FeSiMn in Produktion. Im Jahr 1966 folgte ein zweiter Ofen mit 16 MVA-Anschlussleistung. 1976 kam ein 45 MVA-Ofen, dieser damals ausschließlich zur Produktion von FeSi 75 %, sowie 1977 ein weiterer 27 MVA-



Abb. 48: Aus Moora angeliefertes Kieselgestein auf dem Betriebsgelände der SIMCOA Operations Pty Ltd. in Kemerton, Western Australia, Foto: BGR.

**Tab. 27: Produktion und Einsatz von Kieselgestein zur Siliziumproduktion aus Moora und Produktion von Silizium (Si) in Kemerton (in t), Quelle: SIMOCOA OPERATIONS PTY LTD. ANNUAL COMPLIANCE ASSESSMENT REPORTS (versch. Jahre) sowie Exporte von Silizium (Si) bzw. weltweite Importe von Ferrosilikomangan (FeSiMn) aus Australien (in t) seit dem Jahr 2005, nach: GLOBAL TRADE TRACKER (2023). n. v. = nicht verfügbar.**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Produktion Kieselgestein	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	84.900	89.680	104.575	18.474	126.102
Einsatz Kieselgestein	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	79.526	80.503	78.326	90.031	122.343
Produktion Si	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	32.442	32.661	31.787	35.922	48.125
Exporte Si	26.175	27.997	28.890	28.357	30.312	31.453	28.545	36.192	49.568
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Produktion Kieselgestein	131.228	129.285	127.930	53.088	160.293	130.078	110.788	105.965	n. v.
Einsatz Kieselgestein	119.061	128.831	116.847	120.555	117.642	122.919	118.212	113.546	n. v.
Produktion Si	47.745	49.575	47.093	50.775	48.680	46.826	44.087	43.802	n. v.
Exporte Si	51.260	48.382	47.986	46.650	41.529	42.343	43.149	43.169	41.612

Ofen hinzu. Mittlerweile werden in den vier Öfen und einer Sinteranlage jährlich bis zu 150.000 t Ferromangan und 120.000 t Ferrosilikomangan produziert, von denen rund 80 % in den Export (v. a. USA und Taiwan) gehen bzw. 11 % in australischen und neuseeländischen Stahlhütten eingesetzt werden. Die ehemalige Produktion von Ferrosilizium wurde dagegen eingestellt – eingesetzt wurden hierfür als Ausgangsrohstoff ein Quarzit mit 98,5 % SiO<sub>2</sub> aus Beaconsfield in Tasmanien und ein Gangquarz mit 98 % SiO<sub>2</sub> aus Whyalla in South Australia. TEMCO wurde zwischenzeitlich mehrfach verkauft und befindet sich seit Anfang 2021 im Besitz der britischen GFG Alliance unter Verwaltung ihres Tochterunternehmens LIBERTY Steel Group.

Im November 2022 publizierte das Consultingunternehmen PricewaterhouseCoopers (PwC) im Auftrag der australischen Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) den „Australian Silicon Action Plan“, mit

dem der Aufbau einer Wertschöpfungskette in Australien bis hin zur Produktion von Solarsilizium gefordert wird (CSIRO 2022).

Schon zuvor veröffentlichten zudem mehrere Unternehmen Pläne, sich im Aufbau einer inländischen Wertschöpfungskette für Solarsilizium zu engagieren, z. B. in Queensland:

- RTE Energy zum Aufbau einer Solarzellenfabrik nahe Townsville, die Ende 2022 erbaut und bis März 2024 in volle Produktion gehen soll
- Solquartz Pty Ltd. zur Produktion von 52.000 tpa Rohsilizium und 9.100 tpa Mikrosilika in einer neu zu errichtenden Hütte in Lansdown, deren erste Phase 2023 und deren zweite Phase 2025 in Produktion gehen soll

Am Standort Clayton, VIC, stellt Bosch seit dem Jahr 2000 Wafer und Bauteile für die Halbleiterindustrie her. Die 2006 gegründete Silanna Group Pty, Ltd. fertigt Halbleiter in Sydney, NSW.

**Tab. 28: Produktion von Ferrosilikomangan (FeSiMn) in Australien (in t) nach: BRITISH GEOLOGICAL SURVEY WORLD MINERAL PRODUCTION (versch. Jahre) sowie weltweite Importe von Ferrosilikomangan (FeSiMn) aus Australien (in t) seit dem Jahr 2005, nach: GLOBAL TRADE TRACKER (2023). n. v. = nicht verfügbar.**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Produktion	96.575	103.207	105.800	126.600	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
Importe	57.697	47.275	69.323	71.181	65.837	85.117	105.306	36.725	94.548
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Produktion	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
Importe	92.107	100.750	109.894	129.996	122.536	90.778	112.282	76.371	90.223

#### Literatur

ABEYSINGHE, P. B. (2003): Silica resources of Western Australia. – Western Australia Geological Survey, Mineral Resources Bulletin, 21: 228 S., 149 Abb., 93 Tab., 2 Anh.; Perth.

CSIRO-COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION (2022): Australian Silicon Action Plan: 39 S.; Canberra (URL: <https://www.csiro.au/en/research/natural-environment/critical-minerals/australian-silicon-action-plan>).

OLSEN, A. H. (1983): Two decades of manganese alloy smelting in Tasmania, Australia. – INFACON

’83: 13 S., 6 Abb., 2 Tab.; Tokyo (URL: <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconIII/103-Olsen.pdf>).

SZYMKOWSKI, C. J. & BULTITUDE-PAULL, J. M. (1992): The production of high-quality silicon metal at SIMCOA. – INFACON 6: Proceedings of the 6th Ferroalloys International Congress Cape Town, 1: 185–191, 5 Abb., 5 Tab; Johannesburg (URL: <https://www.pyro.co.za/InfaconVI/1185-Szymkowski.pdf>).



## Bahrain

Im Hidd Industriegebiet von Bahrain ging im Jahr 2008 mit dem Werk der sechs Jahre zuvor gegründeten **Bahrain Ferro Alloy B.S.C.** die bisher einzige Produktionsstätte für Ferrolegierungen im Königreich Bahrain in Betrieb. Kernstück der Hütte ist ein 24 MVA-Elektrolichtbogenofen mit einer Kapazität von 50.000 tpa HCFeMn bzw. 30.000 tpa FeSiMn und der Option, je

nach Bedarf zwischen diesen beiden Produkten zu wechseln. Die Stromversorgung erfolgt durch ein eigenes Gaskraftwerk mit 50 MVA-Anschlussleistung.

Den weltweiten Importdaten von Ferrolegierungen aus Bahrain zufolge war die Hütte offensichtlich nur bis 2017 in Betrieb, wobei jährlich zwischen 273 t und 6.814 t FeSiMn bzw. zwischen 369 t und 7.100 t HCFeMn exportiert wurden.





## Bhutan

Für das Königreich Bhutan im Himalaya stellt Ferrosilizium das wichtigste Exportgut dar, das in diesem Land vollständig mithilfe der günstig verfügbaren Wasserkraft erzeugt wird. Mit rund 92 % Anteil wird fast die gesamte Produktionsmenge an Unternehmen der Eisen- und Stahlindustrie in Indien verkauft. Da dieser Absatzmarkt jedoch zunehmend gesättigt erscheint, versuchen die bhutanischen Unternehmen zunehmend ihre Geschäftsbeziehungen nach Europa (v. a. Italien und Niederlande) auszubauen und auch Ferrosilikomangan anzubieten.

Derzeit (Stand: Ende 2022) sind elf Öfen durch neun Unternehmen zur Produktion von Ferrosilizium in Betrieb, drei im Bau, sechs Neubauten genehmigt und zehn neue Anträge gestellt. Die Produktionsmenge wird demnach auch in Zukunft weiter stark wachsen. Von den elf Öfen produzieren zehn verteilt auf acht Unternehmen im Pasakha Industriepark von Phuentsholing, der aber mittlerweile ausgelastet ist. Er liegt nur 15 km von der indischen Staatsgrenze entfernt. Neue Öfen sollen daher im Motanga Industriepark mit derzeit nur einem Ofen (bzw. einem Unternehmen) sowie auch in den Samdrupjongkhar und Jigmeling Industrieparks in Sarpang errichtet werden.

Der für die Produktion benötigte Quarz stammt weiterhin größtenteils aus Indien, wobei besonders der hochwertige und günstige Quarz aus

dem in 670 km Entfernung gelegenen Bankura in West Bengalen geschätzt wird. Als dort im Frühjahr 2017 alle illegalen Steinbrüche geschlossen wurden, führte dies in Bhutan schnell zu Versorgungsengpässen. Die dortigen Ferrosiliziumproduzenten mussten für einige Zeit auf teureren, aber qualitativ schlechteren Quarz ausweichen, der aus Jharkhand, Meghalaya und Andhra Pradesh stammte. Mittlerweile wurden jedoch auch in Butan erste Quarzsteinbrüche aufgeschlossen.

Die bekanntesten Unternehmen mit Produktion von Ferrosilizium in Bhutan sind:

**Bhutan Ferro Alloys Ltd. (BFAL)** wurde 1990 als Gemeinschaftsunternehmen des privaten bhutanischen Firmenkonglomerats Tashi Group of Companies des Königshauses von Bhutan, des japanischen Handelshauses Marubeni Corporation und damals noch der Japan International Development Organisation gegründet. Im Jahr 1995 ging der erste 28,5 MVA-Ofen des Unternehmens in Produktion. Ende 2006 wurde die Hütte um einen zweiten Ofen mit 18 MVA-Anschlussleistung erweitert und dadurch die Kapazität auf 34.500 tpa FeSi sowie 7.000 tpa Mikrosilika gesteigert. Zudem können bei Bedarf weitere Ferrolegierungen, besonders FeSiMg und FeSiAl, aber mit Kapazitäten von je 6.000 tpa auch Silizium und Calciumsilikat produziert werden.

Die Gründung des Unternehmens **Druk Ferro Alloys Ltd. (DFAL)** erfolgte im Jahr 2005. Es besitzt mit seinem 18 MVA-Lichtbogenreduktions-

**Tab. 29: Produktion (in t) von Ferrosilizium und Auslastung (in %) des Schmelzofens der Druk Ferro Alloys Ltd., Quelle: Firmenberichte (versch. Jahre). n. v. = nicht verfügbar**

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Produktion	12.780	12.687	13.847	11.979	12.866	13.012	14.225	13.962	10.645
Auslastung	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	80,64
	2021	2022							
Produktion	12.326	9.788							
Auslastung	93,38	74,15							

ofen eine Kapazität von 13.200 tpa FeSi 70 – 75 % sowie 1.700 tpa Mikrosilika (vgl. Tab. 29).

Auch **Druk Wang Alloys Ltd.** wurde bereits im Jahr 2005 gegründet, ging im Jahr 2009 in Produktion und betreibt einen 18 MVA-Lichtbogenreduktionsofen im Pasakha Industriepark. Die offizielle Kapazität dieses Unternehmens beträgt 12.000 tpa FeSi 70 – 75 % sowie 3.200 tpa Mikrosilika (s. Tab. 30).

**Ugyen Ferro Alloys Private Ltd.** (UFAPL) wurde im Jahr 2006 gegründet. Das Unternehmen betreibt einen 18 MVA-Lichtbogenreduktionsofen und verfügt über eine Kapazität von 13.800 tpa FeSi 70 – 75 % sowie FeSi 75 – 80 %.

**Pelden Enterprise Ltd.** wurde im Jahr 2007 noch

als **Bhutan Ferro Industries Ltd.** gegründet und besitzt eine Jahreskapazität von 15.300 t FeSi. Das Werk verfügt über zwei Lichtbogenreduktionsofen je 9 MVA-Anschlussleistung.

Die Gründung von **S.D Eastern Bhutan Ferro-Silicon Pvt. Ltd.** (SDEBFSPL) erfolgte im Jahr 2004. Das Unternehmen verfügt ebenfalls über zwei 9 MVA-Öfen zur Produktion verschiedenster Qualitäten von FeSi sowie von FeSiMg. Die Kapazität des Unternehmens beträgt 12.000 tpa FeSi.

Die Höhe der Produktion von Ferrolegierungen und Silizium in Bhutan ist nicht publiziert. Da jedoch die gesamte Produktion exportiert wird, kann durch die weltweiten Importdaten gut auf die Produktion in diesem Land rückgeschlossen werden (vgl. Tab. 31).

**Tab. 30: Produktion (in t) von Ferrosilizium und Auslastung (in %) des Schmelzofens der Druk Wang Alloys Ltd., Quelle: Firmenberichte (versch. Jahre).**

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Produktion	9.703	12.819	13.936	12.620	13.758	14.282	14.614	14.144	14.256
Auslastung	67,38	89,02	96,65	87,63	95,54	99,18	101,49	98,22	99,00
	2018	2019	2020	2021	2022				
Produktion	14.941	15.193	15.047	12.867	13.994				
Auslastung	103,76	105,51	104,49	89,35	93,29				

**Tab. 31: Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi), Ferrosilikomangan (FeSiMn) und Ferrosilikomagnesium (FeSiMg) (in t) aus Bhutan seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	0	0	0	0	0	141	0	0	1
FeSi	0	219	25.663	30.990	68.693	72.947	80.212	82.123	83.018
FeSiMn	0	0	0	266	0	0	0	0	0
FeSiMg	0	0	0	0	0	0	0	0	40
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	607	4.607	2.571	495	28	0	0	0	0
FeSi	80.244	95.979	106.367	111.273	125.211	140.648	103.903	130.723	116.379
FeSiMn	23	216	0	0	0	0	654	19.873	29.416
FeSiMg	60	165	0	0	0	0	22	0	0



## Bosnien- Herzegovina

In Bosnien-Herzegovina gibt es zwei Werke, die Rohsilizium produzieren. Beide gehören zum italienischen Familienunternehmen **Metalleghhe S.p.A.**, das seit 1980 in der Produktion und dem Handel mit verschiedenen Ferrolegierungen, Siliziumcarbid und Kohle/Anthrazit für die Eisen- und Stahlindustrie aktiv ist. Im Jahr 2004 übernahm Metalleghe erst einen älteren bosnisch-herzegowinischen Siliziumproduzenten (B.S.I. d.o.o.) und eröffnete dann mit Investitionskosten von 42 Mio. € 2015 durch sein Tochterunternehmen R-S Silicon d.o.o. eine weitere Siliziumhütte. Im Jahr 2022 wurden beide Unternehmen unter dem Firmennamen Metalleghe Silicon Bosnia fusioniert. Die gesamte Produktionsmenge an Silizium bzw. Ferrosilizium wird exportiert, größtenteils nach Italien, aber auch in andere europäische Länder.

Die ehemalige **B.S.I. d.o.o.** in Jajce produziert Rohsilizium mittels drei Lichtbogenreduktionsöfen je 8,5 MVA-Anschlussleistung und besitzt eine Kapazität von rund 18.000 tpa Si bzw. FeSi zzgl. Mikrosilika. Das Unternehmen geht auf das deutsch-österreichische Unternehmen Elektro-bosna zurück, das bereits 1897 unter Nutzung der lokal ausreichend verfügbaren Wasserkraft zur Produktion von SiC gegründet wurde. Seit dem Jahr 1908 wurde erst nur Ferrosilizium und später mit der Inbetriebnahme neuer Öfen zwischen 1962 und 1967 auch zunehmend Rohsilizium produziert. Der Betriebsteil des im Jahr 1991 privatisierten und mittlerweile in „Elektro-bosna-N“ d.o.o. Jajce umbenannten Unternehmens wurde nach seiner Übernahme im Jahr 2004 durch Metalleghe S.p.A. vollständig überholt und danach ab Juni 2018 vornehmlich zur Produktion von Silizium genutzt. Der zur Produktion eingesetzte Quarz stammt vermutlich aus einem Steinbruch am Berg Vitreusa in ca. 90 km Entfernung.

**Tab. 32: Produktion (in t) von Ferrolegierungen in Bosnien-Herzegovina seit dem Jahr 2008, Quelle: BRITISH GEOLOGICAL SURVEY WORLD MINERAL PRODUCTION (versch. Jahre). n. v. = nicht verfügbar.**

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Fe-Leg.	14.216	10.242	17.972	17.527	15.874	16.707	18.383	18.716	28.138
	2017	2018	2019	2020	2021	2022			
Fe-Leg.	30.473	31.460	31.911	14.641	35.920	n. v.			

**Tab. 33: Weltweite Importe von Silizium (Si) und Ferrosilizium (FeSi) (in t) aus Bosnien-Herzegovina seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	7.788	14.543	10.334	12.651	8.059	12.287	17.253	15.051	14.658
FeSi	15.538	3.175	911	2.323	654	867	1.832	2.265	2.236
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	12.766	11.807	8.713	23.262	23.371	27.818	23.951	37.385	28.278
FeSi	1.821	1.362	2.664	2.726	6.914	3.816	1.114	3.965	4.452

Die ehemalige, im Jahr 2012 gegründete **R-S Silicon d.o.o.** betreibt in Mrkonjić Grad in der bosnischen Republik Srpska, 25 km nordwestlich von Jajce, eine Siliziumhütte mit einem deutlich modernen Lichtbogenofen. Dieser verfügt über eine Kapazität von 16.000 tpa Si zzgl. Mikrosilika.

Ab Januar 2023 sollen beide Siliziumhütten in Bosnien-Herzegowina aufgrund zu hoher Energiepreise gestundet gewesen sein.



## Brasilien

Brasilien ist seit rund 20 Jahren einer der weltweit bedeutendsten Produzenten von Rohsilizium und Ferrolegierungen. Dies liegt bei Rohsilizium an

- den großen Reserven hochreinen Quarzes (Pegmatitquarz, Gangquarz, Quarzite und Quarzkiese) als Ausgangsrohstoff,
- der guten Verfügbarkeit von Holzkohle als Reduktionsmittel bei der Herstellung,
- dem niedrigen, wenn auch steigenden Strompreis (> 60 % der Energie des Landes wird durch Wasserkraft, ca. 10 % durch Windkraft und ca. 10 % durch Biomasse erzeugt),
- der hohen Nachfrage durch die Aluminiumindustrie im Land sowie
- der Unterstützung der Regierung bei Planung und Genehmigung entsprechender Hütten.

Bei Ferrolegierungen kommen die Verfügbarkeit von Eisen- und Manganerzen im Land sowie die sehr hohe Nachfrage durch die heimische Eisen- und Stahlindustrie hinzu.

Im Jahr 2007, am Ende einer Konsolidierungsphase nach zuvor fast unbegrenztem Wachstum, gab es in Brasilien immer noch 21 Unternehmen, davon viele familiengeführt, die in sieben Bundesstaaten insgesamt 30 Werke mit 100 Öfen betrieben und damit 225.120 t Rohsilizium erzeugten. Hiervon waren 203.900 t für den Export bestimmt (VON KRUGER 2009).

Bis zum Jahr 2013 war die Zahl der Unternehmen auf fünf gefallen, die in zwei Bundesstaaten zusammen sieben Werke mit 23 Öfen betrieben (ROSKILL 2014). Sie produzierten rund 230.000 t Rohsilizium, von denen 144.400 t exportiert wurden.

Im Jahr 2022 gab es in Brasilien weiterhin fünf Silizium produzierende Unternehmen mit sieben Werken und 24 Öfen. Die Exportmenge lag bei 196.000 t Rohsilizium. Hinzu kamen neun Unternehmen, die Ferrosilizium produzierten. 148.000 t Ferrosilizium wurden exportiert.

Das in Brasilien produzierte Rohsilizium wird weltweit besonders geschätzt, da es sehr rein und damit für alle Verwendungsbereiche problemlos einsetzbar ist. Im Jahr 2022 lag die Exportquote bei 58 %.

Die US-amerikanische **The Dow Chemical Corporation** ist über ihre Tochterfirma Dow Brasil S.A. an zwei Standorten in Brasilien in der Produktion von Rohsilizium tätig. Das Rohsilizium wird an andere internationale Dow-Standorte zur Produktion von Silikonem, v. a. nach Großbritannien und in die USA, exportiert, jedoch wird auch die heimische Dow-Silikonfabrik in Hortolândia, Bundesstaat São Paulo, mit Rohsilizium versorgt.

- Die Siliziumhütte in Breu Branco, Region Tucuruí, Bundesstaat Pará, liegt im Amazonas Regenwald und wurde nach mehreren vorherigen Eigentümerwechseln im Jahr 2009 von Dow Chemical erworben. Sie arbeitet mit vier offenen Reduktionsöfen mit je 18 MVA-Anschlussleistung und besitzt eine Kapazität von 43.600 tpa Rohsilizium zzgl. Mikrosilika. Der Hütte sind drei eigene Quarzgruben angeschlossen. Die wichtigste, die Moju-Mine, liegt fünf Fahrminuten von der Fabrik entfernt. Die anderen sind die Sororó-Mine, in der Gemeinde São Geraldo do Araguaia im Süden von Pará, und die Mine von Ourém in der Gemeinde gleichen Namens im Nordosten des Bundesstaates. Die zur Reduktion verwendeten Holzhackschnitzel und -kohle stammen zum Teil aus eigener Landwirtschaft und werden zudem von lokalen Plantagen hinzugekauft. Die Energie wird von einem nahen Wasserkraftwerk bezogen.

- Das Werk der Cia Brasileira Carbureto de Calcio (CBCC) gehört seit März 2000 zu Dow Chemical. Die Hütte liegt in Santos Dumont,

Bundesstaat Minas Gerais und produziert mit fünf Öfen mit einer Gesamtanschlussleistung von 117 MVA. Nach Einstellung der ehemaligen Teilproduktion von Ferrosilizium ebenfalls auf Silizium beträgt die Kapazität nun 58.000 tpa Rohsilizium zzgl. Mikrosilika. Der Quarz stammt aus der Region; Holzkohle wird von regionalen Partnern bezogen.

**Rima Industrial S.A.** ist ein 1987 gegründetes Privatunternehmen, das in Brasilien u. a. in der Produktion von Rohsilizium, wie auch Ferrosilizium, an drei Standorten aktiv ist. Die Rima-Gruppe verfügt zudem über ein Netzwerk von Quarz- und Dolomitsteinbrüchen sowie eigenen Plantagen zur Produktion der von ihr benötigten Holzkohle. Nach eigenen Angaben ist Rima der größte Produzent von Silizium in Brasilien und der viertgrößte in der Welt (vgl. USA).

- Die 1975 eröffnete Hütte in Varzea de Palma im Bundesstaat Minas Gerais verfügt über sechs offene Drehstromöfen mit einer Gesamtanschlussleistung von 56 MVA, von denen drei der Produktion von Rohsilizium, zwei der Produktion von Calciumsiliciden und einer zum Erschmelzen von FeSiMg aus FeSi dient. Die Kapazität liegt bei 28.000 tpa Silizium und 4.000 tpa FeSiMg.
- Die Hütte in Bocaiuva arbeitet mit einem 18,5 MVA-Ofen zur Produktion von bis zu 18.000 tpa FeSi 75 % und FeSi 75 % HP. Das Ferrosilizium 75 % dient größtenteils als Reduktionsmittel im Magnetherm-Magnesium-Produktionsprozess, mit dem in Bocaiuva seit 1996 aus Dolomit Magnesium v. a. für die Automobilindustrie hergestellt wird. Nur das überschüssige FeSi wird vermarktet bzw. im Werk Varzea de Palma zu FeSiMg umgeschmolzen. Das FeSi 75 % HP kommt in der Produktion von rostfreien Edelstählen und Elektroblechen zum Einsatz.
- Die Hütte am Standort Capitão Enéas in Minas Gerais wurde von der Electrosilex S.A. erworben und enthält drei Öfen mit einer Gesamtanschlussleistung von 80 MVA. Es wird ausschließlich Rohsilizium in nicht pub-

lizierter Höhe, jedoch mit einer Kapazität von 64.000 tpa (frdl. schriftl. Mitt.) produziert.

**Companhia Ferroligas Minas Gerais (Minasligas)** wurde 1971 als Familienunternehmen gegründet und begann im März 1980 am Standort Pirapora, rund 350 km nördlich von Belo Horizonte im Bundesstaat Minas Gerais, mit der Produktion von Ferrosilizium in damals noch einem Reduktionsofen. Die Anfangskapazität lag bei 12.000 tpa FeSi 75 %. Bis Ende 2011 kamen sukzessive sieben weitere offene Lichtbogenreduktionsöfen mit einer Gesamtanschlussleistung von nun 150 MVA hinzu. Dadurch stieg die Gesamtkapazität auf die heutigen 120.000 tpa FeSi 75 % inkl. FeSi 75 % HP (vier Öfen) und 80.000 tpa Rohsilizium in verschiedenen Qualitäten (vier Öfen) zzgl. Mikrosilika. Das FeSi 75 % HP dient der Produktion von Elektroblechen. Auch zwei der Siliziumöfen könnten wahlweise Ferrosilizium produzieren. Der Quarz stammt von Lieferanten aus der Region. Neben einer Holzhackschnitzelproduktion verfügt Minasligas auch über eine eigene Aufforstungs- und Holzkohleproduktion.

**Rotavi Industrial Ltda.** (bis Ende 2008 Italmagnésio Nordeste S.A.) betreibt eine große Hütte in Várzea da Palma, Bundesstaat Minas Gerais, die über sechs Öfen zur Produktion von FeSi 75 % (fünf Öfen mit 66 MVA-Anschlussleistung) sowie Sonderlegierungen wie FeSiMg oder CaSi (ein Ofen mit 12 MVA-Anschlussleistung) bzw. eine Gesamtkapazität von 72.000 tpa Ferrolegierungen verfügt. Der benötigte Quarz stammt aus eigenen Lagerstätten in der Region, ebenso wie ein Großteil der eingesetzten Holzkohle selber hergestellt wird. Das im Werk produzierte FeSi 75 % wird entweder direkt als Ferrosilizium verkauft oder zu einer weiten Palette von Impfmitteln mit Zusatz von Zr, Ca, SE oder Mg verarbeitet.

**Ligas de Alumino S.A. (LIASA)** ist ein im Jahr 1966 vom Bergmann und Metallurgen Dr.-Ing. José Patrus de Sousa gegründetes Unternehmen, ebenfalls mit Produktionsstandort Pirapora, Bundesstaat Minas Gerais. Sein Werk war zugleich die erste Hütte zur Produktion von

Rohsilizium in Lateinamerika. Heute verfügt sie über vier Öfen mit einer Gesamtanschlussleistung von 125 MVA und einer Kapazität von 46.400 tpa Silizium zzgl. Mikrosilika. Der eingesetzte Quarz stammt von Lieferanten aus der Umgebung sowie den Regionen Diamantina und Bahia. Das Unternehmen verfügt über eine eigene Aufforstungs- und Holzkohleproduktion sowie eine Produktion von Holzhackschnitzeln. Ein Großteil der Siliziumproduktion von LIASA ist für den Export bestimmt.

**Ligas Gerais Indústria e Comércio Ltda.** wurde im Jahr 1999 gegründet und betreibt eine Hütte in São João del Rei im Bundesstaat Minas Gerais. Sie verfügte ursprünglich nur über einen offenen 16 MVA-Dreiphasenofen zur Produktion von FeSi 75 % und mit einer Kapazität von 11.000 tpa. Mittlerweile wurde ein zweiter Ofen installiert, wodurch sich die Gesamtanschlussleistung auf 30 MVA und die Kapazität auf 26.400 tpa Ferrosilizium und Rohsilizium (15.400 tpa?) erhöhte. Zudem werden SiAl-Barren produziert.

**Companhia de Ferro Ligas de Bahia (FERBASA)** wurde 1961 gegründet und befindet sich zu 50,1 % im Besitz einer gemeinnützigen Gesellschaft. FERBASA ist der größte Produzent von Ferrolegierungen in Brasilien mit einer Hütte in Pojuca, Bundesstaat Bahia. Die aktuelle Kapazität der Hütte mit ihren insgesamt 14 Öfen liegt bei 2229.000 tpa FeCr verschiedenster Qualitäten (HCFeCr, LCFeCr, FeSiCr) (acht Öfen) sowie bei 113.000 tpa FeSi 75 % inkl. 50.000 t FeSi 75 % HP (sechs Öfen) zzgl. Mikrosilika. Eine Kapazitätserhöhung auf 60.000 tpa FeSi 75 % HP ab 2023 ist angekündigt. Ein Großteil der Produkte wird nach Japan exportiert. FERBASA besitzt zwei eigene Chromitbergwerke und die Rechte an 85 % der brasilianischen Chromitreserven. Der eingesetzte Quarz stammt aus verschiedenen Orten (u. a. Tucano und Rafael Jambeiro) im ganzen Bundesstaat, wobei die Quarzreserven Bahias die größten der Welt sein sollen. Ferrosilizium wird seit 1986 produziert. Im Jahr 2022 betrug die Produktion von FERBASA 205.371 t FeCr (2021: 213.729 t) und 96.256 t FeSi 75 % (2021: 96.015 t), davon 43.355 t FeSi 75 % HP (2021: 49.951 t). Im

Jahr 2019 waren 27.042 t FeSi 75 % HP und im Jahr 2020 38.855 t FeSi 75 % HP produziert worden.

**Nova Era Silicon S.A. (NES)** ist seit 1984 eine gemeinsame Beteiligung der japanischen Unternehmen JFE Steel Corporation (74,5 %) und Mitsubishi Corporation (25,5 %). Die Firma betreibt seit 1986 eine Hütte am Standort Nova Era, Bundesstaat Minas Gerais, und produziert dort in drei offenen Drehstromöfen mit einer Gesamtanschlussleistung von 75 MVA jährlich bis zu 48.000 t FeSi 75 %. Alle Ausgangsrohstoffe, bis auf die eingesetzte Holzkohle, werden zugekauft. Die große Mehrheit des hergestellten Ferrosiliziums wird in den japanischen Stahlwerken der Eigner zur Produktion eingesetzt.

**Ligas do Brasil SA (LIBRA)** wurde im Jahr 1987 als Tochterfirma der Carbomil-Bergbaugruppe zur Produktion von Ferrosilizium gegründet. Es betreibt seitdem am Standort Banabuiú im Bundesstaat Ceara eine kleine Hütte mit einem Ofen mit 16 MVA-Anschlussleistung. Die Produktionskapazität liegt bei 12.000 tpa FeSi 45 %, FeSi 75 % und FeSi 75 % HP. Das FeSi 75 % HP findet Verwendung in der Produktion von Elektroblechen und Stahlcordreifen. Zusätzlich werden auf Basis von FeSi verschiedene Speziallegierungen (FeSiCaBa, FeSiCaBaLa, FeSiCaAl, FeSiSr, FeSiMg) für die Eisengussindustrie hergestellt. Der Quarz stammt aus eigenen Lagerstätten in Solonópole und auch die eingesetzte Holzkohle wird selber produziert.

**Inonibras Inoculantes e Ferro Ligas Nipo Brasileiros S.A. (Inonibrás)** wurde 1973 durch die japanische Osaka Special Alloy Co., Ltd. gegründet, ist aber heute ein Unternehmen der brasilianischen LIMA S.A. Seit 1983 produziert Inonibrás in Pirapora, im Bundesstaat Minas Gerais, in einer Hütte mit zwei Öfen jährlich bis zu 11.000 t FeSi (weiterhin ausschließlich) für den Export nach Japan.

**Bozel Mineração S.A.** ist einer der weltgrößten Produzenten von Calciumsiliciden und seit 2011 ein Tochterunternehmen der Japan Metals & Chemicals Co., Ltd. (JMC). Bozel produziert seit

1977 in Brasilien ebenfalls am Standort São João del Rei im Bundesstaat Minas Gerais. Die dortige Hütte verfügt über einen dreiphasigen offenen Ofen mit 13 MVA-Anschlussleistung und zwei Öfen mit 21 MVA-Anschlussleistung. Die Gesamtkapazität der Hütte liegt bei ca. 27.000 tpa CaSi, CaSiMn und CaSiBa sowie FeSi 75 % (ca. 10.000 tpa). Der eingesetzte Quarz stammt aus der Region und aus Pedro Leopoldo.

Produzenten weiterer Ferrolegerungen in Brasilien sind:

- **Grupo Maringá**, seit 2011 ein Unternehmen der São Eutiquiano Participações S.A., am Standort Itapeva, Bundesstaat São Paulo, wo seit 1977 in einer Hütte mit zwei Öfen

und einer Kapazität von 100.000 tpa (2021: 99.786 t) FeSiMn in verschiedenen Qualitäten sowie HCFeMn produziert werden.

- **Granha Ligas Ltda.** ist seit dem Jahr 2000 am Standort São João Del Rei im Bundesstaat Minas Gerais in der Produktion von FeSiMn und HCFeMn tätig.
- **ELETROLIGAS Ltda.** mit einer Hütte am Standort São Gotardo, Minas Gerais, wo seit 1983 HCFeMn und FeSiMn in verschiedenen Qualitäten hergestellt werden.
- **Fermar Indústria Ferro Ligas Marabá Ltda.** (FERMAR), seit dem Jahr 2004 mit einer Hütte in Marabá im Bundesstaat Pará zur Produk-

**Tab. 34: Produktion (in t) von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) 75 %, Ferrosilikomangan (FeSiMn), Ferrosilikomagnesium (FeSiMg) und Ferrosilikochrom (FeSiCr) in Brasilien seit dem Jahr 2000, Quelle: ABRAFE – Associação Brasileira dos Produtores de Ferroligas e Silício Metálico, zitiert in: VON KRUGER (2009) bzw. ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO SETOR METALÚRGICO, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (versch. Jahre). n. v. = nicht verfügbar.**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	166.344	112.123	133.390	180.937	219.813	229.813	226.380	225.120	219.598
FeSi 75	188.735	159.345	145.910	156.824	177.245	199.856	196.814	196.403	182.790
FeSiMn	171.304	180.235	182.731	261.658	285.629	341.600	292.400	225.373	238.128
FeSiMg	9.658	11.032	14.552	14.040	37.031	n. v.	n. v.	30.221	30.808
FeSiCr	7.990	5.899	10.522	8.151	11.560	n. v.	n. v.	12.943	13.674
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Si	154.115	184.149	210.438	225.000	230.000	230.000	n. v.	206.196	183.067
FeSi 75	174.467	247.306	210.910	203.881	158.000	127.000	n. v.	n. v.	n. v.
FeSiMn	109.500	218.656	218.590	241.705	227.652	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
FeSiMg	18.300	33.623	20.950	21.200	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
FeSiCr	1.745	13.115	11.638	18.890	13.184	10.403	18.046	n. v.	n. v.
	2018	2019	2020	2021	2022				
Si	230.193	214.051	203.940	216.939	219.196				
FeSi 75	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.				
FeSiMn	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.				
FeSiMg	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.				



tion von FeMn verschiedener Qualitäten sowie FeSiMn.

- **Nexus Manganes S.A.** (Nexus Ligas) mit zwei Hütten im Bundesstaat Minas Gerais an den Standorten Barbacena (seit 1967, Kapazität 66.000 tpa) und Ouro Preto (seit 1981, Kapazität 64.000 tpa), wo FeSiMn, HCFeMn und LCFeMn produziert werden.
- **Ferro Liga Ltda.** (FERLIG) ist ein 1986 gegründetes Unternehmen mit Produktionsstandort in Passa Tempo, Minas Gerais. Es fertigt mit drei Lichtbogenöfen FeSiMn.

#### Literatur

VON KRUGER, P. (2009): Cadeia de Ferroligas.- Ministério de Minas e Energia (MME) & Banco Mundial, Produto 34, Relatório Técnico 60: 112 S., zahlr. Abb. und Tab.; Brasília (URL: [https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/relatorios-de-apoio-ao-pnm-2030-projeto-est-1/a-transformacao-mineral-no-brasil/documentos/p34\\_rt60\\_perfil\\_de\\_ferroligas.pdf/view](https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/relatorios-de-apoio-ao-pnm-2030-projeto-est-1/a-transformacao-mineral-no-brasil/documentos/p34_rt60_perfil_de_ferroligas.pdf/view)).



## China

China ist seit vielen Jahren nicht nur der weltgrößte Produzent von Rohsilizium, Polysilizium und allen Ferrolegierungen, sondern auch der weltgrößte Verbraucher dieser Metalle bzw. Legierungen. Schätzungen vor einigen Jahren gingen von bis zu 200 Silizium- bzw. 1.000 Ferrosiliziumhütten im Land aus, die eine Gesamtkapazität von ca. 5,4 Mio. tpa Silizium bzw. 11 Mio. tpa Ferrosilizium besaßen. Inzwischen ist durch staatliche Zwangsschließungen von Hütten mit unrentablen, d. h. zu kleinen Öfen (< 12,5 MVA-Anschlussleistung für Si), die (offizielle) Anzahl der Siliziumhütten auf mittlerweile 124 (Stand: Ende 2022) deutlich gesunken. Dennoch gibt es weiterhin kleinere Hütten, die meist Silizium in besonders hoher bzw. gesuchter Qualitäten produzieren. Andere Quellen (z. B. Shanghai Metals Market) vermuten, dass alle kleinen Hütten weiterhin produzieren, so dass gegenwärtig bis zu 210 Hütten in Produktion stehen sollen.

Auch in China findet Rohsilizium Verwendung in der Produktion von Al-Legierungen (Sekundäraluminium in China, Kapazität Ende 2020: 8,1 Mio. tpa, Produktion in 2020: 3,9 Mio. t), Silikon (Produktion organischer Silikonmonomere in China 2020: 2,45 Mio. t in rund 20 Werken) sowie Polysilizium (Produktion 2022: 811.000 t, s. Tab. 37, in 19 Werken).

Die Produktion von Rohsilizium verteilte sich im Jahr 2022 auf folgende Provinzen (Quelle: ASIAN METAL):

- Xinjiang (offiziell: Uigurisches Autonomes Gebiet Xinjiang): 875.400 t in 16 Hütten (2021: 779.600 t in 16 Hütten)
- Yunnan: 485.200 t in 45 Hütten (2021: 400.300 t in 44 Hütten)
- Sichuan: 253.100 t in 21 Hütten (2021: 224.200 t in 21 Hütten)
- Innere Mongolei (offiziell: Autonome Region Innere Mongolei): 98.000 t
- Chongqing: 92.200 t

- Fujian: 55.500 t
- Guizhou: 35.400 t
- Hunan: 27.500 t
- Guangxi: 18.800 t
- Andere (v. a. Heilongjiang, Zhejiang, Gansu, Shanxi, Shaanxi und Qinghai): 523.600 t in 42 Hütten (2021: 219.100 t in 41 Hütten)
- SUMME: 2.464.500 t (2021: 2.028.748 t)

Die Analysten von FERROALLOYNET (2023) gehen von folgender, wesentlich höherer Siliziumproduktion in den einzelnen Provinzen im Jahr 2022 aus:

- Xinjiang: 1.004.450 t (2021: 1.163.200 t)
- Yunnan: 710.280 t (2021: 523.270 t)
- Sichuan: 518.900 t (2021: 436.900 t)
- Innere Mongolei: 142.330 t (2021: 106.820 t)
- Fujian: 117.620 t (2021: 90.490 t)
- Chongqing: 67.450 t (2021: 75.930 t)
- Guizhou: 72.890 t (2021: 73.780 t)
- Hunan: 50.120 t (2021: 60.930 t)
- Gansu, Qinghai, Shaanxi: 241.920 t (2021: 181.880 t)
- Guangxi, Henan: 72.970 t (2021: 41.550 t)
- Andere (NE-China): 107.640 t (2021: 30.740 t)
- SUMME: 3.502.570 t (2021: 2.785.490 t)

Nach FerroAlloyNet lag die Auslastungsquote der chinesischen Siliziumhütten im Jahr 2022 zwischen 51 % und 69 %.

Die Geschichte der Siliziumproduktion reicht am längsten in den südchinesischen Provinzen Yunnan und Sichuan, aber auch Guangxi, Hunan, Fujian, Guizhou, Hunan und Chongqing zurück, da hier die in den regenreichen Sommermonaten von April/Mai bis Oktober/November reichlich und günstig verfügbare Wasserkraft die Produktion energieintensiver Betriebe schon immer erleichterte. In den trockenen Wintermonaten von November bis März/April können aufgrund der dann wesentlich höheren Energiepreise nur die Unternehmen im Südwesten Chinas weiterproduzieren, die über eigene Wasserkraftwerke verfügen.

Im Jahr 2011 dominierte Yunnan mit seinen großen Quarzreserven in den Gebieten Zhao-

tong, Baoshan, Dehong, Nujiang und weiteren Städten im Westen der Provinz noch die chinesische Siliziumproduktion mit einer Menge von rund 700.000 t bei einer Gesamtkapazität von 1,25 Mio. tpa in insgesamt 68 Hütten. Dies entsprach damals rund 40 % der gesamtchinesischen Kapazitäten. Inzwischen hat jedoch Xinjiang (s. u.) Yunnan an Bedeutung weit überholt. Als Reduktionsmittel bei der Siliziumproduktion in Yunnan dient weiterhin vorzugsweise Holzkohle, in Xinjiang dagegen hochqualitative bituminöse Steinkohle mit niedrigen Aschegehalten.

In der Inneren Mongolei, in Heilongjiang und auch in **Xinjiang** stammt der benötigte Strom praktisch ausschließlich aus Kohlekraftwerken. Dies erlaubt eine Produktion über das gesamte Jahr hinweg. Aus Xinjiang (40 % der chinesischen Kohlereserven) sind zudem große und hochwertige Gangquarzvorkommen bekannt, so dass sich die chinesische Regierung entschloss, auch durch steuerliche Vergünstigungen die Ansiedlung von Siliziumhütten und von Betrieben der weiteren Wertschöpfungskette von Silizium in dieser Provinz zu erleichtern.

Der chinesischen Zentralregierung werden im Uigurischen Autonomen Gebiet Xinjiang Menschenrechtsverletzungen gegen die Uigurische Minderheit und andere muslimische Bevölkerungsgruppen vorgeworfen (UN 2022, siehe ausführlich dazu in Kapitel 3.8). Gegen zahlreiche Unternehmen der Silizium- und Solarindustrie in Xinjiang besteht der Verdacht, in unterschiedlichem Maße von Zwangsarbeit und anderen Menschenrechtsverletzungen zu profitieren bzw. damit in direkter Verbindung zu stehen.

Der erste größere Produzent von Polysilizium in China war das Unternehmen **GCL Technology Holdings** (GCL Tech), das im Jahr 2007 in Xuzhou in der ostchinesischen Provinz Jiangsu mit der Produktion begann und bis zum Jahr 2013 zum weltweit führenden Produzenten von Polysilizium aufstieg. **Sichuan Yongxiang**, eine Tochterfirma der Tongwei Solar Company, startete ihre Polysiliziumproduktion im Jahr 2008

und ist mittlerweile das Unternehmen mit den größten Kapazitäten weltweit. **Daqo New Energy** folgte im Jahr 2009, ebenso wie TBEA Silicon Industry Company (im Jahr 2012 umbenannt in Xinte New Energy Company, heute **Xinte Energy Co., Ltd.**), ein Tochterunternehmen der Tebian Electric Apparatus Stock Co., Ltd. (TBEA).

Nachdem die chinesische Regierung im Jahr 2013 die bis heute geltenden Einfuhrzölle auf Polysilizium aus den USA erhoben hatte, expandierte die Polysiliziumproduktion in China stark. Hierbei war die heutige Xinte Energy Co., Ltd. das erste Unternehmen, das seinen Firmensitz am Rand von Urumqi, der Hauptstadt der Provinz Xinjiang, nahm. Im Jahr 2009 eröffnete Xinte Energy sein eigenes Kohlekraftwerk in der „Wirtschafts- und technologischen Entwicklungszone von Zhundong“ (s. u.). Gleichzeitig investierte das Unternehmen stark in ein regionales Industrie- und Logistikzentrum für seine in der Provinz Xinjiang geplanten weiteren Aktivitäten. Das Unternehmen Daqo New Energy verlagerte seine gesamte Polysiliziumproduktion im Zeitraum 2011/2012 von Chongqing in Zentralchina nach Shihezi, Provinz Xinjiang, um näher an der dortigen subventionierten Rohmaterialbasis (Quarz, Kohlestrom) zu sein. Die Intensivierung der Silizium- und Solarindustrie in der Region war im „13. Fünf-Jahresplans der nationalen und ökonomischen Entwicklung von Xinjiang“ angestrebt, der auch den „Transfer“ von Arbeitskräften in die Region sowie „Trainingsprogramme“ und Subventionen für Unternehmen als mögliche staatliche Unterstützungsmaßnahmen hierfür zitiert. Im Jahr 2017 entschied die Regierung von Xinjiang, dass es in der Provinz zwei designierte Gebiete zum Aufbau einer Siliziumwertschöpfungskette geben sollte:

- den „Shanshan Stein Industriepark“ im Kreis Turpan zur Gewinnung von Quarz und Produktion von Rohsilizium. Der Industriepark ist Teil der 72,6 km<sup>2</sup> großen „Shihezi Wirtschafts- und technologischen Entwicklungszone“, die bereits 1992 durch die paramilitärische 8. Division des XPCC zusammen mit der Stadt Shihezi gegründet wurde.

- die 15.500 km<sup>2</sup> große „Wirtschafts- und technologische Entwicklungszone von Zhundong“ vornehmlich zur Produktion von Polysilizium.

Das Unternehmen GCL Tech erbaute daraufhin im Jahr 2018 in einem Joint Venture mit der damaligen Zhonhuan Semiconductor Co., Ltd. (s. u.), dem weltweit zweitgrößten Produzenten von Wafern für die Solarindustrie, ein Polysiliziumwerk am Rande der Zone von Zhundong. Im Wucaiwan Industriepark, der ebenfalls in dieser Zone liegt, errichtete das Unternehmen East Hope New Energy kurzfristig eine Siliziumhütte. Xinte Energy vergrößerte seine Aktivitäten durch den Bau eines Werkes der Crystalline Silicon Company wenige Kilometer von Zhundong entfernt. JinkoSolar, der weltweit zweitgrößte Produzent von Solarmodulen, nahm in der Präfektur Ili ein Werk zur Produktion von Siliziumstäben in Betrieb.

#### Rohsiliziumproduktion in Xinjiang

**Hoshine Silicon Industry Co., Ltd.** wurde im Jahr 2005 von der Ningbo Hoshine Gruppe aus Zhejiang gegründet und ist heute der mit Abstand weltgrößte Produzent von Rohsilizium (Kapazität Ende 2022: 1,22 Mio. tpa Si in 132 (oder 108?) Öfen, davon im Juli 2023 49 gestundet, Produktionsmenge 2020: 494.900 t Si, Produktionsmenge 2021: 790.800 t Si, Produktionsmenge 2022: 841.500 t Si) und ist möglicherweise auch der weltgrößte Produzent von Siloxanen (Kapazität: 980.000 tpa). Der Firmensitz von Hoshine Silicon befindet sich in der Stadt Jiaxing, Provinz Zhejiang. Die größte Siliziumhütte des Unternehmens und zugleich die (derzeit noch) weltgrößte ist die der 2016 gegründeten Xinjiang Eastern Hoshine Silicon Industry Co., Ltd. im „Siliziumbasierten Neue Materialien Wirtschaftskreislauf-Industriepark der Hoshine Silicon Industry“ im „Shanshan Stein Industriepark“ (s. o.). Nach im Frühjahr 2022 abgeschlossener Erweiterung liegt ihre Kapazität nun mit 32 Öfen je 33 MVA-Anschlussleistung bei rund 400.000 tpa Si. An diesem Standort werden auch Siloxane produziert. Weitere Siloxan- bzw. Siliziumwerke befinden sich in Heihe, Provinz Heilongjiang (Heihe Hoshine Silicon Industry Co., Ltd., Inbetriebnahme 2006, Kapazität 144.000 tpa Si), im

„Nord Industriepark“ der Stadt Shihezi (Xinjiang Western Hoshine Silicon Industry Co., Ltd., Siliziumhütte, Inbetriebnahme 2010) und in der „Ganquanbao Wirtschafts- und technologischen Entwicklungszone“ am Rande der Stadt Urumqi (Xinjiang Middle Hoshine Silicon Industry Co., Ltd., im Bau, Kapazität 400.000 tpa Si, geplante Inbetriebnahme 2024). Außerhalb der Provinz Xinjiang betreibt das Unternehmen zudem noch Siloxanwerke in der Stadt Pinghu, Provinz Zhejiang (Hoshine Silicon (Jiaxing) Industry Co., Ltd.) und in der Stadt Luzhou, Provinz Sichuan (Hoshine Silicon (Luzhou) Industry Co., Ltd., Inbetriebnahme 2016). In Zhaotong, Provinz Yunnan, plant das Unternehmen eine Siliziumhütte mit einer Kapazität von 800.000 tpa (erste Phase 400.000 tpa durch 32 Öfen je 33 MVA-Anschlussleistung), um mittelfristig eine Rohsiliziumkapazität von 1,93 Mio. tpa zu erreichen. Im Februar 2022 kündigte Hoshine Silicon zudem an, in der „Ganquanbao Wirtschafts- und technologischen Entwicklungszone“ noch einmal umgerechnet 2,75 Mrd. US\$ investieren zu wollen, um dort bereits nach beschleunigtem Bau ab 2023 durch die Xinjiang Central Hoshine Silicon Industry Co., Ltd. auch Polysilizium mit einer Anfangskapazität von 100.000 tpa (später 200.000 tpa) herstellen zu können.

Das Polysiliziumwerk von **Xinjiang East Hope** (s. u.) wird zum Teil durch die Siliziumhütte des Tochterunternehmens **Changji Jisheng New Construction Materials Co., Ltd.** versorgt, das in direkter Nachbarschaft produziert. Die Siliziumhütte dieses Unternehmens verfügt über 17 Öfen je 33 MVA-Anschlussleistung und eine Kapazität von 285.600 tpa Si. Im Jahr 2019 produzierte diese Hütte rund 130.000 t Si, im Jahr 2020 114.800 t Si, im Jahr 2021 246.900 t Si und im Jahr 2022 220.300 t Si, v. a. der Qualitäten 5-5-3 und 4-4-1 (vgl. Tab. 7).

Weitere Rohsiliziumproduzenten, zumeist mit eigenem Quarzsteinbruch, in der Provinz Xinjiang sind

- **Xinjiang Jingxin Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte mit acht Öfen à 15 MVA- und vier Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität:

- 100.000 tpa Si (in 2021 noch 69.000 tpa Si), Produktionsmenge 2019: ca. 70.000 t Si, 2020: ca. 60.000 t Si, 2021: 36.960 t, 2022: 48.500 t Si (v. a. der Qualitäten 4-4-1 und 4-2-1),
- **Xinjiang Zhongsi Technology Co., Ltd.** mit Hütte im Yili Jingang Industriepark und einer Produktion von ca. 64.000 t Si in 2022,
  - **Xinjiang Jingheyuan New Materials Co., Ltd.**, 2021 eröffnete Hütte im Camel Circle Industriepark der 2014th Division des Xinjiang Hami Corps mit vier Öfen à 25,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 60.000 tpa Si, Produktion: 22.850 t Si im Jahr 2022 (v. a. der Qualitäten 5-5-3 und 4-2-1),
  - **Xinjiang China Silicon Technology Co., Ltd.** mit einer Produktionsmenge von 46.400 t Si im Jahr 2020 bzw. 80.200 t Si im Jahr 2021,
  - **Xinjiang Yugui Technology Co., Ltd.**, Hütte mit zwei Öfen à 25,5 MVA- und zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 51.840 tpa Si, Produktionsmenge 2020: 31.200 t Si, 2021: 28.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1),
  - **Xinjiang Guopeng Technology Co., Ltd.**, Produktionsmenge 2020: 31.200 t Si, 2021: 13.970 t Si,
  - **Xinjiang Jingweike New Energy Development Co., Ltd.**, Hütte mit drei Öfen à 15 MVA- und zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 46.000 tpa Si, Produktionsmenge 2020: 25.000 t Si, 2021: 28.500 t Si, 2022: 32.000 t Si v. a. für die Silikon- und Polysiliziumproduktion,
  - **Xinjiang Jagesen New Energy Materials Co., Ltd.**, Hütte mit vier Öfen à 13,5 MVA- und zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 51.000 tpa Si, Produktionsmenge 2019: 33.000 t Si, 2020: 28.800 t Si, 2021: 32.850 t Si und 2022: 24.000 t Si (v. a. der Qualitäten 5-5-3 und 4-2-1) für die Silikon- und Polysiliziumproduktion, 2021 aufgrund minderwertigen Quarzes aber im Wesentlichen für die Al-Herstellung,
  - **Xinjiang Yu Silicon Technology Co., Ltd.** mit Hütte im Xinjiang Yili Gongliu County 8rd Regiment Jingang Industriepark, Produktionsmenge 2021: 26.000 t Si, 2022: 23.700 t Si,
  - **Xinjiang Jierong Silicon Industry Co., Ltd.** (möglicherweise erloschen), Produktionsmenge 2020: 19.850 t Si,
  - **Xinjiang Xintao Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte mit 12 Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Produktionsmenge in 2020: 19.600 t Si, in 2021: 20.900 t Si, in 2022: 22.250 t Si
  - **Xinjiang Jiagson New Energy Materials Co., Ltd.**, Produktionsmenge in 2022: 19.650 t Si,
  - **Xinjiang Jinteng Silicon Industry Co., Ltd.**, Produktionsmenge 2020: 16.350 t Si, 2021: 14.200 t Si,
  - **Xinjiang Jihong Silicon Industry Science and Technology Development Co., Ltd.** (möglicherweise erloschen), Hütte mit zwei Öfen à 16,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 25.000 tpa Si (v. a. der Qualitäten 4-2-1, 4-4-1 und 5-5-3),
  - **Yili Jinjing Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte mit drei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 23.000 tpa Si, Produktionsmenge 2020: 16.000 t Si, 2021: 21.250 t Si, 2022: 19.900 t Si,
  - **Yili Jihong Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte mit zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktionsmenge 2021: 12.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1),
  - **Xinjiang Ruishi Silicon Industry Co., Ltd.**, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktionsmenge 2021: 8.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1),
  - **Xinjiang Minwang Silicon Industry Co., Ltd.**, Produktionsmenge 2021: 13.600 t Si,

- **Xinjiang California Silicon Industry Co., Ltd.**, Produktionsmenge 2021: 12.980 t Si.

Im Yidong Industriepark des Kreises Yinning, Provinz Xinjiang, errichtet die **Hengfeng Shengtai New Material (Xinjiang) Co., Ltd.** mit Investitionskosten von umgerechnet 1,3 Mrd. US\$ bis Mitte 2026 eine Siliziumhütte mit einer Endkapazität von 100.000 tpa Si. In einer ersten Phase sollen ab Mitte 2024 dort bereits bis zu 50.000 tpa Rohsilizium produziert werden.

Auch gibt es Überlegungen zum Bau weiterer Siliziumhütten in Xinjiang, z. B. durch die **Aksu Hongshi High Purity Crystalline Silicon Co., Ltd.** in der „Wirtschafts- und technologischen Entwicklungszone von Kuqa“, wo eine Siliziumhütte mit acht Öfen à 33 MVA-Anschlussleistung und einer Kapazität von 120.000 tpa errichtet werden soll. Im März 2023 feierte die Hongshi-Gruppe im Zero-Carbon Industriepark im Hehuang New District von Haidong, Provinz Qinghai, aber erst einmal die Grundsteinlegung eines Werkskomplexes zur Produktion von 250.000 tpa Rohsilizium sowie 200.000 tpa Polysilizium. Die erste Phase dieses Projektes soll im Juni 2024 abgeschlossen sein.

**Xinjiang Qiya Silicon Metal Co., Ltd.** legte im Juli 2023 seine Umweltverträglichkeitsstudie für eine Hütte mit einer geplanten Kapazität von 200.000 tpa Rohsilizium vor. Diese soll innerhalb von 18 Monaten mit Investitionskosten von umgerechnet 351 Mio. US\$ im Zhundong Industriepark der Provinz Xinjiang entstehen und mit 16 Öfen je 33 MVA-Anschlussleistung ausgestattet werden. Auch **Xinjiang Yaoju Silicon Based New Material Co., Ltd.** plant gemäß einer im September 2023 vorgelegter Umweltverträglichkeitsstudie eine Siliziumhütte mit sechs 33 MVA-Lichtbogenöfen und einer Kapazität von 100.000 tpa Rohsilizium im „Neue Materialien Industriepark Ushtala“ der Autonomen Mongolen Präfektur Bayingolin, Provinz Xinjiang.

Trotz dieses wachsenden Interesses von Rohsiliziumproduzenten an den Möglichkeiten in Xinjiang berichten erste alteingesessene Be-

triebe über deutlich zurückgehende Qualitäten des zur Verfügung stehenden Quarzes (Quelle: Asian Metal).

#### **Polysiliziumproduktion in Xinjiang**

Das im Jahr 2008 in Chongqing gegründete und an den Börsen von Shanghai und New York notierte Unternehmen **Daqo New Energy Corp.** begann im Jahr 2011 mit dem Bau eines Polysiliziumwerks in der Stadt Shihezi. Dieses Werk der Xinjiang Daqo New Energy Co., Ltd. ging zwar ein Jahr später bereits in Produktion, erreichte aber erst Ende 2022 durch sukzessive Erweiterungen seine heutige offizielle Kapazität von 105.000 tpa. Im Jahr 2020 produzierte Daqo in Shihezi 77.288 t, im Jahr 2021 86.587 t und im Jahr 2022 133.812 t Polysilizium. Zusätzlich errichtet die Inner Mongolia Daqo New Energy Co., Ltd. derzeit im Jinshan Industriepark der Stadt Baotou, Innere Mongolei, ein weiteres Werk mit einer Kapazität von 200.000 tpa Polysilizium für die Solar- und weiteren 21.000 t Polysilizium für die Elektronikindustrie. Mit Abschluss der ersten Konstruktionsphase ging das Werk mit einer Anfangskapazität von 100.000 tpa (Solarqualität) bzw. 1.000 tpa (Halbleiterqualität) Polysilizium im März 2023 in Produktion. Dieses Werk in Baotou soll zudem letztendlich durch eigene Rohsiliziumhütten mit einer Kapazität von 300.000 tpa versorgt werden. Auch sollen an diesem Standort zukünftig Silikone in einem Werk mit einer Kapazität von 200.000 tpa produziert werden. Für 2023 erwartet Daqo New Energy eine gruppeneigene Polysiliziumproduktion in Höhe von 190.000 bis 195.000 t.

Das heutige Unternehmen **GCL (Golden Concord Holdings Ltd.) Technology Holdings Ltd.** (GCL Tech) (bis 2022 GCL-Poly Energy Holdings Ltd.) wurde im Jahr 2006 in Hongkong gegründet und ist dort sowie an mehreren weiteren internationalen Börsenplätzen notiert. GCL Tech produziert Polysilizium und Wafer für die weltweite Solarindustrie und baut und betreibt Solarparks. In Xinjiang verfügt GCL Tech Ende 2019 über eine auf 38,5 % reduzierte Beteiligung (weiterer ursprünglicher Anteilseigner: Tianjin Zhonghuan Semiconductor Co., Ltd., mittlerweile umbenannt in TCL Zhonghuan Renewa-

ble Energy Technology Co., Ltd. (s. u.) an einem Werk in der „Wirtschafts- und technologischen Entwicklungszone von Zhundong“ (Xinjiang GCL New Energy Materials Technology Co., Ltd., Kapazität 62.000 tpa). In anderen Provinzen ist GCL Tech auch mit eigenen Polysiliziumwerken vertreten, so in der Provinz Jiangsu am Standort Xuzhou (Jiangsu Zhongneng Polysilicon Technology Development Co., Ltd., Kapazität 60.000 tpa Polysilizium in verschiedenen Qualitäten (darunter 5.000 tpa FBR grade mit Monosilan als Ausgangsrohstoff), in der Provinz Sichuan am Standort Leshan (Leshan GCL New Energy Technology Co., Ltd., Kapazität 220.000 tpa FBR-grade) sowie in der Inneren Mongolei am Standort Baotou (Inner Mongolia Xinyuan Silicon Material Technology Co., Ltd., Kapazität 102.000 tpa FBR-grade, später geplant 300.000 tpa). Zusätzlich werden in Hohhot, Innere Mongolei, seit Ende 2022 in einem Joint Venture mit TCL Zhonghuan Renewable Energy Technology Co., Ltd. (s. u.) ebenfalls bis zu 100.000 tpa Polysilizium FBR-grade für die Solarindustrie und 1.000 tpa Polysilizium für die Halbleiterindustrie (Ausbauplan: 10.000 tpa) hergestellt. Das GCL-Tochterunternehmen Jiangsu Zhongneng Polysilicon Technology Development Co., Ltd. wiederum ist Hauptaktionär des Polysiliziumproduzenten Jiangsu Xinhua Semiconductor Technology Co., Ltd., dem es im September 2017 erstmals gelang, auch in China in kommerziellen Mengen (Kapazität: 5.000 tpa) Polysilizium in Halbleiterqualität zu erzeugen. Im Jahr 2022 produzierte GCL Tech in all seinen Werken 104.723 t Polysilizium (2017: 74.818 t, 2018: 61.785 t, 2019: 57.394 t, 2020: 42.189 t, 2021: 47.610 t, vornehmlich FBR grade) sowie zusätzlich 64.501 t (2021: 56.896 t) Polysilizium in seinem Beteiligungswerk in Xinjiang und auch Wafer für die Solarindustrie mit einer Leistung von 46,7 GWp (2020: 31,4 GWp, 2021: 38,1 GWp).

TBEA Co., Ltd. ist ein auf die gesamte Wertschöpfungskette in der Solarindustrie spezialisiertes Unternehmen aus Xinjiang, das durch sein im Jahr 2008 gegründetes und an der Börse von Hongkong notiertes Tochterunternehmen **Xinte Energy Co., Ltd.** bzw. dessen Untergesellschaften durch zahlreiche unterschiedliche

Werke in der „Wirtschafts- und technologische Entwicklungszone von Zhundong“ vertreten ist. Die Kapazität des dortigen, im Jahr 2017 in der „Ganquanbao Wirtschafts- und technologischen Entwicklungszone“ in Betrieb genommenen Polysiliziumwerks von Xinte Energy liegt mittlerweile bei 100.000 tpa. Im East Junngar Industriepark von Changji, ebenfalls in der „Wirtschafts- und technologische Entwicklungszone von Zhundong“ errichtet das Unternehmen zudem derzeit ein weiteres Werk zur Herstellung von Polysilizium für die Elektronikindustrie. Das Werk soll mit einer Anfangskapazität von 100.000 tpa im Sommer 2023 in Produktion gehen, die Endkapazität dieses Werkes soll jedoch bei 200.000 tpa liegen. Weiterhin betreibt Xinte Energy seit dem Jahr 2022 ein Polysiliziumwerk bei Baotou in der Inneren Mongolei mit einer Anfangskapazität von ebenfalls 100.000 tpa (geplante Endkapazität: 200.000 tpa). Dieses wird durch regenerative Energien mit einer Leistung von 5 GWp (spätere Planung 10 GWp) versorgt. Zudem soll in Damao Banner, nördlich von Baotou, eine Siliziumhütte mit einer Kapazität von 200.000 tpa entstehen, die durch regenerative Energien mit einer Leistung von 5 GWp versorgt werden soll. Im Jahr 2022 produzierte Xinte Energy in seinen beiden Werken 125.900 t Polysilizium. Im Jahr 2021 waren es 78.200 t. Für 2023 geht das Unternehmen von einer Polysiliziumproduktion zwischen 230.000 und 240.000 t aus.

Das Unternehmen East Hope Group Co., Ltd. aus Shanghai investiert seit dem Jahr 2010 in der Provinz Xinjiang. Es ist dort vor allem durch seine Tochterfirmen Xinjiang East Hope Nonferrous Metals Co., Ltd., Xinjiang East Hope Photovoltaic Technology Co., Ltd. und **Xinjiang East Hope New Energy Co., Ltd.** vertreten. Ein weiteres Tochterunternehmen, Changji Jisheng New Building Materials Company (s. o.), ist der zweitgrößte Produzent von Rohsilizium in Xinjiang. Unternehmensziel soll sein, zwar nicht das qualitativ hochwertigste, aber das weltweit günstigste Polysilizium zu produzieren. Derzeit liegt die offizielle Kapazität des Werkes in Xinjiang bei 122.000 tpa, die aber mittelfristig auf 200.000 tpa erhöht werden soll. Im Lanzhou

New District Chemiepark der Stadt Lanzhou, Provinz Gansu, begann im August 2023 die Probeproduktion in der ersten eigenen Siliziumhütte der Unternehmenstochter Lanzhou Dongjin Silicon Industry Co., Ltd. mit einer geplanten Endkapazität von 400.000 tpa. Zudem hat East Hope im August 2023 in Shizuishan, Autonomes Gebiet Ningxia, eine Siliziumhütte mit einer Anfangskapazität von 145.000 tpa (Ausbauziel 490.000 tpa) und ein angeschlossenes Polysiliziumwerk mit einer Anfangskapazität von 125.000 tpa (Ausbauziel 400.000 tpa) in Betrieb genommen. Weiterhin sollen in Shizuishan in einer ersten Phase Siliziumstäbe, Wafer und Zellen für die Solarindustrie mit einer Kapazität von jeweils 10 GWp sowie Solarmodule mit einer Kapazität von 25 GWp hergestellt werden. Die Errichtung eines dritten Polysiliziumwerks in der Stadt Wuhai, Innere Mongolei, ist in Planung. Hier sollen in einer ersten Ausbauphase 62.500 tpa Polysilizium produziert werden, aber auch Kapazitäten von je 10 GWp Siliziumstäbe, Wafer, Zellen und Module entstehen. East Hope plant nach eigenen Angaben bis Ende 2023 eine Polysiliziumkapazität von 600.000 tpa zu erreichen und in diesem Jahr 500.000 t Polysilizium zu produzieren. Die bisher durch East Hope realisierten Produktionsmengen an Polysilizium wurden bisher jedoch nicht publiziert.

Nach offiziellen Statistiken lag die insgesamt in der Provinz Xinjiang vorhandene Rohsiliziumkapazität im Jahr 2021 bei 1,65 Mio. tpa und die Polysiliziumkapazität bei 296.000 tpa (Produktionsmenge 2021: 270.400 t) bzw. im Jahr 2022 bei 351.000 tpa (+18,5 %).

#### **Rohsiliziumproduktion in anderen Provinzen**

Auch in China wird Rohsilizium nur zum Teil in der Produktion von Polysilizium eingesetzt, so dass es über das ganze Land verteilt zahlreiche Siliziumhütten für andere Verwendungsbereiche gibt. Eine Auswahl der wichtigsten hiervon sind:

- Chongqing Wujiang Industry Group Trade Co., Ltd. wurde im Jahr 2004 in Chongqing gegründet und ist vor allem im Metallhandel tätig. Über sein Tochterunternehmen

**Chongqing Wujiang Silicon Industry Co., Ltd.** bzw. deren Töchterunternehmen Chongqing Wuling Silicon Co., Ltd. und Chongqing Wuling Photovoltaic Silicon Co., Ltd. betreibt das Unternehmen zudem zwei eigene Siliziumhütten mit einmal acht bzw. einmal zehn Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung und einer Gesamtkapazität von 130.000 bis 140.000 tpa Si.

- **Yunnan Yongchang Silicon Industry Co., Ltd.**, ein Tochterunternehmen der staatlichen Yunnan Metallurgical Group Co., Ltd., betreibt eine große Siliziumhütte in Baoshan, Provinz Yunnan, die zugleich die größte Hütte in Yunnan ist. Diese verfügt derzeit über fünf 25,5 MVA- und zwei 12,5 MVA-Elektrolichtbogenöfen, eine Energierückgewinnungsanlage mit einer Kapazität von 12 MWp sowie einer Kapazität von 107.000 tpa Si. Langfristig ist eine Erhöhung der Kapazität der Hütte auf 300.000 tpa Si geplant. Im Jahr 2020 lag die Produktion bei 67.000 t Si, im Jahr 2021 bei 82.700 t Si und im Jahr 2022 bei 85.500 t Si, das vollständig in der Silikonherstellung Verwendung fand.
- **Sichuan Leshan Xinhe Electricity Comprehensive Development Co., Ltd.**, betreibt am Fluss Dadu in der Provinz Sichuan zwei große Wasserkraftwerke und nutzt die dadurch verfügbare günstige Hydroenergie zur Produktion von Ferrochrom sowie in einer Siliziumhütte mit zehn Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung auch zur Produktion von Rohsilizium (Kapazität: 98.400 tpa Si). Im Jahr 2021 wurden 38.000 t Si produziert, im Jahr 2022 rund 37.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1).
- **Zhejiang Xin'an Chemical Group Co., Ltd.**, ein Tochterunternehmen der Wynca-Gruppe, wurde im Jahr 1991 gegründet und ist seit dem Jahr 1998 in der Produktion von Silikon aktiv. Das Unternehmen gilt mittlerweile als zweitgrößter Produzent von Silikon in China mit einem jährlichen Eigenbedarf von ca. 120.000 t Rohsilizium. Bereits ab dem Jahr 2000 erfolgte daher die Rückwärtsintegration durch Investitionen in mittlerweile drei



Siliziumhütten, die durch das Tochterunternehmen **Zhejiang Kaihua Yuantong Silicon Industry Co., Ltd.** aus Quzhou, Provinz Zhejiang, verwaltet werden und eine Gesamtkapazität von ca. 77.000 tpa Si aufweisen. **Mangshi Yonglong Ferroalloy Co., Ltd.** verfügt in seiner Siliziumhütte in Dehong, Provinz Yunnan, über vier Öfen à 15 MVA-Anschlussleistung und damit über eine Kapazität von 42.000 tpa Si. **Aba Xilong Industrial Silicon Co., Ltd.** besitzt eine Siliziumhütte im Kreis Wenchuan, Provinz Sichuan, mit zwei 12,5 MVA- und einem 16,5 MVA-Elektrolichtbogenöfen und einer Kapazität von 25.000 tpa Si. **Heihe Yuantai Silicon Industry Co., Ltd.** ist eine 60 %ige Beteiligung und betreibt eine Siliziumhütte in Heihe, Provinz Heilongjiang. Diese Hütte verfügt über zwei 8 MVA-Öfen und eine Kapazität von 10.000 tpa Si. Für das Mutterunternehmen ist dies unzureichend, so dass es derzeit im Kreis Yanjin eine Siliziumhütte mit einer geplanten Kapazität von 100.000 tpa Si und im Kreis Pingwu, ebenfalls Provinz Yunnan, eine weitere Siliziumhütte mit einer Kapazität von 32.500 tpa Si errichten lässt. Beide Hütten sollen bis Ende 2023 in Betrieb gehen. Zudem erwarb Zhejiang Xin'an von der Yunnan Jingcheng Group Co., Ltd. die Siliziumhütte dessen Tochterunternehmens Ruili Jingcheng Silicon Industry Co., Ltd. Diese Hütte im Kreis Ruili, Provinz Yunnan, war zwischen 2012 und 2016 in Betrieb und seitdem gestundet. Sie besitzt acht Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung und eine Kapazität von 54.000 tpa Si.

- **Xiamen K Metal Co., Ltd.** ist ein Tochterunternehmen der Xiamen Youli Holdings Co., Ltd. und damit der Linan Group Co., Ltd., die in den Provinzen Fujian und Sichuan vier Siliziumhütten mit insgesamt sieben Öfen betreibt. Die Produktionsmenge des Unternehmens liegt zwischen 60.000 und 80.000 t Si jährlich.
- **Yunnan Zhenkang Huihua Silicon Industry Co., Ltd.** ist ein Tochterunternehmen der Fujian Huihua Group Co., Ltd. mit mehreren eigenen Wasserkraftwerken und zwei Sili-

ziumhütten. Die größere Hütte befindet sich im Huihua Industriepark im Kreis Zhenkang, Provinz Yunnan, und verfügt über sechs Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung und eine Kapazität von 69.000 tpa Si. Im Jahr 2021 lag die Produktion bei ca. 22.000 t Si, v. a. der Qualität 5-5-3, das für die gruppeneigene Fertigung von Al-Gussteilen für die Automobilindustrie benötigt wird. Die kleinere Hütte der Fujian Huihua Group Xikou Photovoltaic Materials Co., Ltd. befindet sich in Sanming, Provinz Fujian. Sie verfügt über zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung und eine Kapazität von 17.300 tpa Si. Im Jahr 2021 wurden dort 4.200 t Si, v. a. der Qualität 4-2-1, produziert, das als Grundlage für die eigene Polysiliziumproduktion in Fujian (Kapazität nicht publiziert) dient.

- **Longling Yonglong Ferroalloy Co., Ltd.** ist ein großer Siliziumproduzent in Boshan, Provinz Yunnan, und betreibt dort eine Hütte mit zwei Öfen je 33 MVA- und zwei Öfen je 18,5 MVA-Anschlussleistung. Die durchschnittliche Kapazität des Unternehmens liegt bei 65.000 tpa Si, wobei zur Produktion von 1 t Si durchschnittlich 13.000 MWh Strom benötigt werden, der im Juni 2023 0,38 RMB/kWh (umgerechnet 0,05 €/kWh) kostete.
- **Lushui Kanghua Kangnan Silicon Industry Co., Ltd.** betreibt eine Siliziumhütte in Lushui, Provinz Yunnan, die über sieben Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung und eine Kapazität von 60.400 tpa Si verfügt. Im Jahr 2020 produzierte das Unternehmen dort 44.000 t Si, im Jahr 2021 ca. 35.000 t Si und im Jahr 2022 40.000 t Si (v. a. der Qualität 4-4-02 und 4-2-1).
- **Maoxian Panda Silicon Industry Co., Ltd.** ist Rechtsnachfolger der ehemaligen, im Jahr 1999 gegründeten Wenchuan Panda Silicon Industry Co., Ltd., deren Werk bei dem großen Sichuan-Erdbeben am 12.05.2008 zerstört wurde. Die Firma errichtete daraufhin eine neue Siliziumhütte mit drei 33 MVA-Öfen, einer Energierückgewinnungsanlage und einer Kapazität von 60.000 tpa Si im Kreis Mao, Provinz Sichuan.

- **Sunshine Wanfeng Industrial Co., Ltd.** betreibt in der Provinz Guizhou eine Siliziumhütte mit zwei Öfen je 33 MVA-Anschlussleistung und einer Gesamtkapazität von 50.000 tpa Si (v. a. der Qualität 4-2-1).
  - **Gansu Sanxin Silicon Industry Co., Ltd.** betreibt eine über die Jahre stetig erweiterte Siliziumhütte in Guazhou, Provinz Gansu, mit derzeit vier Öfen à 33 MVA-Anschlussleistung und einer Kapazität von 57.600 tpa Si. Im Jahr 2019 lag die Produktion bei rund 38.000 t Si, im Jahr 2020 bei 30.000 t Si und im Jahr 2021 bei 32.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1).
  - **Lushui Jinzhi Jinrui Silicon Industry Co., Ltd.** verfügt über eine Siliziumhütte in Lushui, Provinz Yunnan. Sie ist mit sechs Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung ausgestattet und besitzt eine Gesamtkapazität von 51.840 tpa Si. Die Produktion im Jahr 2019 lag bei 34.000 t Si, im Jahr 2020 bei 40.000 t Si und im Jahr 2021 bei rund 20.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1).
  - **Si-True Silicon Co., Ltd.**, vormals Zhejiang Zhongcheng Silicon Co., Ltd., mit Firmensitz in Shaoxing, Provinz Zhejiang, ist Eigentümer einer Siliziumhütte mit fünf 12,5 MVA-Öfen im Kreis Yingjiang in der Provinz Yunnan, die eine Kapazität von 50.000 tpa Si besitzt. In den Städten Urumchi und Wujiaqu in der Provinz Xinjiang betreibt das Unternehmen zudem Siliziummühlen mit einer Gesamtkapazität von 53.000 tpa.
  - **Elkem Silicon Materials (Lanzhou) Co., Ltd.** (Yongdeng Silicon) ist eine der beiden operativen Gesellschaften der im Jahr 2011 mehrheitlich von der China National Bluestar (Group) Co., Ltd. übernommenen norwegischen Elkem ASA. Die Tochtergesellschaft betreibt im Kreis Yongdeng der Stadt Lanzhou, Provinz Gansu, eine im Jahr 2002 von der Produktion von Calciumcarbid auf Rohsilizium umgerüstete Hütte mit einer Kapazität von 50.000 tpa Si. Dieses findet ausschließlich in der gruppeneigenen Silikonproduktion Verwendung.
  - **Sichuan Jinyang Kangning Silicon Industry Co., Ltd.** betreibt eine Siliziumhütte in Leshan, Provinz Sichuan, die über vier Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung verfügt. Die Kapazität des Unternehmens liegt bei 49.000 tpa Si. Die Produktion im Jahr 2019 betrug 25.000 t Si, im Jahr 2020 20.000 t Si und im Jahr 2021 18.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1).
  - **Sichuan Linhe Silicon Industry Co., Ltd.** betreibt eine Siliziumhütte in Ebian, Provinz Sichuan, die mit einem Ofen à 25,5 MVA- und zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung ausgestattet ist. Die Kapazität des Unternehmens liegt bei 48.000 tpa Si. Die Produktion im Jahr 2021 lag bei rund 25.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1).
  - **YETOP Energy Co., Ltd.** betreibt eine Siliziumhütte in Dechang, Provinz Sichuan, die mit zwei Öfen à 12,5 MVA- und zwei Öfen à 16,5 MVA-Anschlussleistung ausgerüstet ist. Die Kapazität des Unternehmens liegt bei 45.000 tpa Si (der Qualitäten 4-2-1, 5-2-1 und 5-5-3).
  - **Yunnan Changning Zhengyuan Silicon Smelting Co., Ltd.** kann auf eine Siliziumhütte in Baoshan, Provinz Yunnan, mit fünf 12,5 MVA-Öfen zurückgreifen und produziert dort Rohsilizium v. a. der Qualität 4-2-1. Die Kapazität der Hütte liegt bei 43.200 tpa Si, in den Jahren 2020 und 2021 wurden jeweils rund 20.000 t Si produziert.
- Weitere kleinere Marktteilnehmer (Auswahl) sind:
- **Inner Mongolia Jingke Silicon Technology Co., Ltd.**, Hütte in Hinggan, Innere Mongolei, ein Ofen à 25,5 MVA- und zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 35.000 tpa Si, Produktion 2021: 25.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
  - **Lianghe ZhongYa Silicon Co., Ltd.**, Hütte in Lianghe, Provinz Yunnan, vier Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 34.500 tpa Si, Produktion 2021: 30.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)

- **Jaco Metal Ltd.**, Firmensitz in Xiamen, Provinz Fujian, 1999 gegründet, drei Hütten in der Provinz Fujian, Gesamtkapazität: 30.000 tpa Si
- **Leshan Yanghejia Metal Material Co., Ltd.**, Hütte in Leshan, Provinz Sichuan, ein Ofen à 16,5 MVA- und zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 28.800 tpa Si, Produktion 2021: 14.400 t Si (v. a. der Qualität 4-4-1)
- **Leshan Yanghejia Metal Material Co., Ltd.**, Hütte in Leshan, Provinz Sichuan, ein Ofen à 16,5 MVA- und zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 26.600 tpa Si, Produktion 2021: 14.000 t Si, 2022: 9.000 t Si
- **Nujiang Guoma Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte im Bezirk Nujiang, Provinz Yunnan, drei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 25.920 tpa Si, Produktion 2021: 12.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
- **Yingjing Jiangyan Metals Co., Ltd.**, Hütte in Jiangyan, Provinz Sichuan, drei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 24.000 tpa Si, Produktion 2021: 14.200 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
- **Aba Tianhe Silicon Industry (Group) Co., Ltd.**, Hütte in der Provinz Sichuan, zwei Öfen à 16,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 22.080 tpa Si, Produktion 2021: 14.000 t Si (v. a. der Qualität 5-5-3)
- **Ganiu Fengxin Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in der Provinz Sichuan, zwei Öfen mit insgesamt 25 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 20.400 tpa Si, Produktion 2021: 11.000 t Si, 2022: 11.000 t Si (v. a. der Qualität 5-5-3)
- **Dajiang Huayang Optoelectronics Co., Ltd.**, Hütte in der Provinz Shanxi, zwei Öfen à 15 MVA- und ein Ofen à 16,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 20.400 tpa Si, Produktion 2019: 20.000 t Si (v. a. der Qualität 2-2-02)
- **Jiangxi Gangyuan Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte im Industriepark von Fengyuan in Yichun, Provinz Jiangxi, mit zwei 8 MVA- und zwei 12,5 MVA-Öfen, Kapazität: 20.000 tpa Si
- **Qingliu Boxin Photoelectric Material Co., Ltd.**, Hütte in der Provinz Fujian, zwei Öfen à 15 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 20.000 tpa Si, Produktion 2019: 10.000 t Si., 2020: 12.000 t Si, 2021: 8.000 t Si (v. a. der Qualitäten 2-2-02 und 3-3-03)
- **Xiamen Zhong He Xun Silicon Co., Ltd.**, gegründet 2011, zwei Hütten in den Provinzen Fujian (Fujian Zhenghe Yongshun Silicon Industry Co., Ltd.) und Yunnan (Yunnan Zhongxun Silicon Industry Co., Ltd.), Gesamtkapazität: 20.000 tpa Si
- **Longling Shunkang Silicon Smelting Co., Ltd.**, Hütte im Kreis Longling, Provinz Yunnan, mit zwei 12,5 MVA-Öfen, Kapazität: 17.200 tpa Si (v. a. der Qualität 3-3-03)
- **Mayang Hengyuan New Energy Materials Co., Ltd.**, Hütte in Huaihua, Provinz Hunan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.300 tpa Si, Produktion 2021: 8.200 t Si, 2022: 9.000 t Si
- **Yingjiang Haixi Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Yingjiang, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.300 tpa Si, Produktion 2020: 8.000 t Si, 2021: 8.500 t Si, 2022: 9.700 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
- **Yingjiang Anyu Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Yingjiang, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.300 tpa Si, Produktion 2021: 8.500 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
- **Qinghai AVIC Silicon Materials Co., Ltd.**, Hütte in der Provinz Qinghai, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.300 tpa Si, Produktion 2021: 13.000 t Si für die Silikonherstellung

- **Yingjiang Mingliang Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Yingjiang, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.300 tpa Si, Produktion 2021: 7.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
- **Luodian Mingsheng Mining Co., Ltd.**, Hütte in Luodian, Provinz Guizhou, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.300 tpa Si, Gestehungskosten ca. 2.840 US\$/t, Produktion 2020: 11.400 t Si, 2021: 9.000 t Si (v. a. der Qualität 4-4-02)
- **Yunnan Yongde Hengchang Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte im Kreis Yongde, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.300 tpa Si, Produktion 2020: 6.400 t Si, 2021: 8.500 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
- **Mayang Hengyuan New Energy Materials Co., Ltd.**, Hütte in Huaihua, Provinz Hunan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.300 tpa Si, Produktion 2021: 8.200 t Si (v. a. der Qualität 5-5-3)
- **Nujiang Dingsheng Smelting Co., Ltd.**, Hütte in Lushui, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.300 tpa Si, Produktion 2020: 13.200 t Si, 2021: 12.000 t Si (v. a. der Qualitäten 4-2-1 und 4-4-02)
- **Hunan Taian Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Mayang, Provinz Hunan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.300 tpa Si, Produktion 2021: 8.000 t Si (v. a. der Qualität 4-4-02)
- **Shanxi Jiniong Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in der Provinz Shanxi, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2021: 5.200 t Si (v. a. der Qualität 4-4-1)
- **Sanjiang County Shenzhou Silicon Co., Ltd.**, Hütte in Danzhou, Provinz Hainan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2021: 4.100 t Si (v. a. der Qualität 3-3-01)
- **Yingjiang Liangda Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Yingjiang, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2020: 7.000 t Si, 2021: 8.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
- **Longchuan Jingzhun Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte im Kreis Longchuan, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2021: 6.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
- **Yingjiang Zhongdian Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Yingjiang, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2020: 8.000 t Si, 2021: 8.200 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
- **Chongqing Zhengshen Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Chongqing, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2021: 11.000 t Si (v. a. der Qualität 5-5-3)
- **Yingjiang Longteng Silicon Co., Ltd.**, Hütte in Yingjiang, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2020: 7.100 t Si, 2021: 8.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
- **Nandan Haolong Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte im Kreis Nandan, Provinz Guangxi, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2021: 5.000 t Si (v. a. der Qualität 4-4-02)
- **Yingjiang Longhui Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Yingjiang, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2020: 7.000 t Si, 2021: 8.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
- **Mangshi Heishi Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Mangshi, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2020: 8.000 t Si, 2021: 5.000 t Si (v. a. der Qualität 3-3-03)

- **Longling Xingxin Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Longshan, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2021: 14.000 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
- **Xinde Xinsilicon Technology Co., Ltd.**, Sitz in Beijing, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa, Produktion 2020: 10.000 t Si, 2021: 11.000 t Si, 2022: 9.500 t Si (v. a. der Qualität 5-5-3)
- **Lianghe Wanxin Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte im Kreis Lianghe, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2021: 7.200 t Si, 2022: 11.000 t Si (v. a. der Qualität 4-4-02)
- **Lushui Jinrui Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Lushui, Provinz Yunnan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2021: 9.300 t Si, 2022: 11.000 t Si für die Silikonherstellung
- **Ebian Jinkaiyi Electrometallurgy Co., Ltd.**, Hütte in Ebian, Provinz Sichuan, zwei Öfen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 17.280 tpa Si, Produktion 2020: 9.000 t Si, 2021: 6.000 t Si, 2022: 9.200 t Si (v. a. der Qualität 5-5-3)
- **Shaanxi Shenghua Metallurgical Co., Ltd.**, Hütte in Hanzhong, Provinz Shaanxi, ein Ofen à 33 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 16.000 tpa Si (Erweiterung auf 100.000 tpa geplant) (v. a. der Qualität 4-2-1) als Grundlage für die Eigenproduktion von Calciumsiliciden
- **Wulat Qianqi New Longtai Ferroalloy Co., Ltd.**, Hütte im Vorderen Urad-Banner der Stadt Bayan Nur, Innere Mongolei, zwei Öfen à 10 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 15.000 tpa Si, Produktion 2021: 4.000 t Si (v. a. der Qualität 4-4-1)
- **Zhangzhou Longtrust Silicon Industrial Co., Ltd., ehemals Fujian Zhengda Silicon Industry Co., Ltd.**, gegründet 2005, Hütte in der „Nanjing Hochtechnologiezone“ von Zhangzhou, Provinz Fujian, mit drei Öfen à 8 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 12.000 tpa Si verschiedener Qualitäten
- **Shimian Xiangshun Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte im Kreis Shimian, Provinz Sichuan, ein Ofen à 16,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 11.000 tpa Si, Produktion 2021: 6.200 t Si, 2022: 4.500 t Si (v. a. der Qualität 5-5-3)
- **Xiushan Yongfa Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte im Kreis Xiushan, Chongqing, zwei Öfen mit zusammen 10 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 8.640 tpa Si, Produktion 2021: 5.300 t Si (v. a. der Qualität 5-5-3)
- **Liancheng Hongyuan Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte im Kreis Liancheng, Provinz Fujian, ein Ofen mit 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 8.640 tpa Si, Produktion 2020: 3.100 t Si, 2021: 5.000 t Si (v. a. der Qualitäten 2-2-02 und 4-2-1)
- **Tongdao Pengcheng Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Tongdao, Provinz Hunan, ein Ofen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 8.640 tpa Si, Produktion 2021: 4.000 t Si, 2022: 2.300 t Si (v. a. der Qualität 4-4-02)
- **Fujian Zhanggang Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Zhanggang, Provinz Fujian, ein Ofen à 16,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 8.640 tpa Si, Produktion 2020: 3.000 t Si (v. a. der Qualität 2-2-02)
- **Barkam Huiyuan Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Barkam, Provinz Sichuan, ein Ofen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 8.640 tpa Si, Produktion 2020: 4.000 t Si, 2021: 3.000 t Si (v. a. der Qualität 5-5-3, zukünftig 4-2-1)
- **Chongqing Longyang Silicon Co., Ltd.**, Hütte in Chongqing, zwei Öfen mit zusammen 10 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 8.640 tpa Si, Produktion 2021: 5.300 t Si (v. a. der Qualität 5-5-3)

- **Yingjiang Chengyi Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte im Kreis Yingjiang, Provinz Yunnan, ein Ofen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 8.640 tpa Si, Produktion 2020: 4.500 t Si, 2021: 4.500 t Si (v. a. der Qualität 4-2-1)
- **Sanjiang County Shenzhen Silicon Co., Ltd.**, Hütte in Danzhou, Provinz Hainan, ein Ofen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 8.640 tpa Si, Produktion 2020: 5.000 t Si, 2021: 4.100 t Si (v. a. der Qualität 4-4-02)
- **Yingjiang Mengyuan Hongda Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte im Kreis Yingjiang, Provinz Yunnan, ein Ofen à 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 8.600 tpa Si, Produktion 2020: 4.000 t Si, 2021: 4.100 t Si, 2022: 4.400 t Si (v. a. der Qualität 5-5-3)
- **Taining Sanjing Photoelectricity Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Taining, Provinz Fujian, ein Ofen mit 12,5 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 8.600 t Si, Produktion 2021: 6.000 t Si (v. a. der Qualität 2-2-02)
- **Tongdao Hongteng Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Tongdao, Provinz Hunan, ein Ofen mit 10 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 7.200 tpa Si, Produktion 2020: 4.300 t Si, 2021: 5.700 t Si (v. a. der Qualität 4-4-02)
- **Xing'an Meng Tongxing Silicon Co., Ltd.**, Hütte in der Region Hinggan, Innere Mongolei, ein Ofen mit 10 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 7.000 tpa Si, Produktion 2021: 4.000 t Si (v. a. der Qualität 4-4-1)
- **Changde Xiangnan Silicon Industry Co., Ltd.**, Hütte in Changde, Provinz Hunan, ein Ofen mit 6,3 MVA-Anschlussleistung, Kapazität: 4.360 t Si, Produktion 2020: 2.300 t Si, 2021: 3.200 t Si, 2022: 2.800 t Si (v. a. der Qualität 3-3-03)

An noch nicht festgelegtem Ort plant auch der Chemiekonzern Zhejiang Juhua Co., Ltd. aus Quzhou, Provinz Zhejiang, eine große Siliziumhütte mit 28 Öfen à 33 MVA-Anschlussleistung und einer Kapazität von 360.000 tpa Si zu errichten.

Chinesische Quellen berichten über eine Verknappung hochreinen Quarzes in China, der besonders in den Provinzen Jiangxi und Hubei in vielen kleinen Bergwerken abgebaut wird. Trotz einzelner Beschwerden von Unternehmen in Xinjiang stehen aber in dieser Provinz und auch in Yunnan (noch) ausreichende Mengen an geeigneten Quarzrohstoffen für die Rohsiliziumproduktion zur Verfügung.

#### **Polysiliziumproduktion in anderen Provinzen**

Nicht in der Provinz Xinjiang tätig, aber vermutlich auch Abnehmer von dort durch die Hoshine Silicon Industry (s.o.) produziertem Rohsilizium ist die **Tongwei Solar Co., Ltd.** aus der Provinz Sichuan. Tongwei Solar produziert Solarzellen in großen Fertigungswerken in Hefei, Provinz Anhui (seit 2013), Shuangliu, Provinz Sichuan (seit 2016), Meishan, Provinz Sichuan (seit 2021) und Jintang, Provinz Sichuan (seit 2022). Ein fünftes Werk in Tonghe, Provinz Heilongjiang, ist im Aufbau. Die derzeitige Zellenkapazität des Unternehmens liegt bei 70 GWp und soll Ende 2023 102 GWp erreichen. Selbst produziert Tongwei Solar Polysilizium durch seine im Jahr 2002 gegründete Tochterfirma **Sichuan Yongxiang Polysilicon Co., Ltd.** mit Sitz in Leshan, Provinz Sichuan. Dort wird seit 2008 durch die Sichuan Yongxiang New Energy Co., Ltd. und zudem seit 2018 auch in Baotou in der Inneren Mongolei durch die Inner Mongolia Tongwei High-Purity Crystalline Silicon Co., Ltd. und seit 2020 auch am Standort Baoshan, Provinz Yunnan, in einem Joint Venture mit der LONGi Green Energy Technology Co., Ltd. durch die Yunnan Tongwei High Purity Crystal Silicon Co., Ltd. Polysilizium hergestellt. In Leshan in der Provinz Sichuan begann Sichuan Yongxiang Energy Technology Ltd. im Juli 2022 mit der Errichtung einer Siliziumhütte mit einer geplanten Endkapazität von 200.000 tpa Rohsilizium (erste Phase 120.000 tpa). Im September 2023 begann die Inner Mongolia Tongwei Green Materials Co., Ltd. mit den Bauarbeiten für die erste Stufe (Kapazität: 120.000 tpa Si) einer Siliziumhütte in der Inneren Mongolei mit einer geplanten Endkapazität von 360.000 tpa Si. Dieses Werk soll 2024 in Betrieb gehen. Zudem soll langfristig in Guangyuan/Provinz Sichuan eine Siliziumhütte

mit einer Kapazität von 400.000 tpa entstehen. Auch existiert seit November 2022 ein Joint Venture zwischen Sichuan Yongxiang Polysilicon (51 %) und LONGi Green Energy Technology (49 %) zum Zwecke des Baus einer Siliziumhütte in der Provinz Yunnan mit einer Kapazität von 200.000 tpa Rohsilizium. Die Produktionskapazität von Sichuan Yongxiang Polysilicon ist von 30.000 tpa Ende 2017 über 180.000 tpa Ende 2021 auf 230.000 tpa Ende 2022 angewachsen. Bis Ende 2023 soll die Kapazität 350.000 tpa und bis Ende 2026 1 Mio. tpa Polysilizium erreichen. Hierfür soll u. a. ein zweites Polysiliziumwerk am Standort Leshan mit einer Kapazität von 200.000 tpa sorgen. Anteilseigner dieses Werkes sind Sichuan Yongxiang Polysilicon mit 51 % sowie die beiden Marktbegleiter JYT Corporation mit 34 % und Jinko Solar Co., Ltd. mit 15 %, die sich dadurch mit Polysilizium als Vorprodukt absichern. Im Jahr 2021 produzierte Sichuan Yongxiang Polysilicon rund 109.000 t Polysilizium.

Sichuan Yongxiang Polysilicon bezieht sein zur Polysiliziumproduktion benötigtes Rohsilizium bisher vor allem von der im Jahr 2004 gegründeten Sichuan Hengye Silicon Industry Co., Ltd., die über Siliziumhütten in Leshan, Provinz Sichuan (Kapazität: 200.000 tpa), Xining, Provinz Qinghai (Kapazität: 100.000 tpa) und Boashan, Provinz Yunnan (Kapazität: 60.000 tpa) verfügt. Die Rohsiliziumkapazität in Boashan soll aber baldmöglichst auf 200.000 tpa erhöht werden.

Eine Auswahl weiterer im Weltmaßstab bedeutender, im chinesischen Vergleich jedoch eher kleinerer Polysiliziumproduzenten sind:

- **Asia Silicon (Qinghai) Co., Ltd.** mit Sitz und Werk in Xining, Provinz Qinghai. Das Unternehmen wurde im Jahr 2006 gegründet und eröffnete sein Werk im Jahr 2008 mit einer Kapazität von 1.000 tpa, die sukzessive auf 20.000 tpa und mittlerweile auf 50.000 tpa Polysilizium FBR-grade auf der Basis von Dichlorsilan als Ausgangsrohstoff erhöht wurde. Das Polysilizium soll sowohl in der Solar- als auch speziell in der Halbleiterindustrie Verwendung finden. Das Tochterunternehmen Asia Silicon (Qinghai) Solar Energy Co., Ltd. produziert Solarmodule mit einer Jahreskapazität von 200 MWp. Ein weiteres Tochterunternehmen, Qinghai Asia Silicon Jinyuan New Energy Co., Ltd., fertigt Aluminiumrahmen und weiteres Zubehör für die Installation dieser Module.
- **Inner Mongolia Dongli Photovoltaic Electronics Co., Ltd.** betreibt ein Werk in Dongli in der Inneren Mongolei, das derzeit von seiner ursprünglichen Kapazität von 12.000 tpa auf 48.000 tpa Polysilizium zzgl. der Fertigung von Solarzellen und -modulen mit einer Kapazität von je 7,5 GWp erhöht wird. Nach Bernreuter Research wurde diese Kapazitätserhöhung jedoch mittlerweile gestoppt. Zudem plant Dongli ein Werk in Wuhan, Provinz Hubei, das nach Fertigstellung eine Kapazität von 200.000 tpa Polysilizium besitzen soll. Im Jahr 2022 produzierte Dongli knapp 11.700 t Polysilizium (J. Bernreuter, frdl. schriftl. Mitt.).
- **Shaanxi Non-Ferrous Tian Hong REC Silicon Materials Co., Ltd.** wurde offiziell im Jahr 2014 als Joint Venture der Shaanxi Non-Ferrous Tian Hong New Energy Co., Ltd. (derzeit 84,94 %), einer Tochterfirma der Shaanxi Non-Ferrous Metals Holding Group Co., Ltd., und der US-amerikanischen REC Silicon Inc. (derzeit 15,06 %) gegründet. REC Silicon Inc. gibt an, keine Kontrolle über die Vorgänge bei seiner chinesischen Beteiligungsfirma zu haben und hat das Investment abgeschrieben. Diese Firma betreibt ein Polysiliziumwerk in der Stadt Yulin, Shaanxi Provinz, mit einer Kapazität von 18.000 tpa Polysilizium nach der FBR-Methode (Solarqualität) und 1.000 tpa Polysilizium nach der Siemens-Methode (Halbleiterqualität). Im Jahr 2020 betrug die Gesamtpolysiliziumproduktion 8.436 t.
- **Risen Energy Co., Ltd.**, ein chinesischer Hersteller von Solarmodulen, erwarb Ende 2020 das Polysiliziumwerk der damaligen Inner Mongolia Dunan Photovoltaic Science and Technology Co., Ltd. in der Stadt Bayan Nur in der Inneren Mongolei. Es besaß damals eine

Kapazität von 12.000 tpa, wird aber derzeit modernisiert und erweitert. Ende 2021 kündigte Risen Energy zudem an, mit Investitionskosten von umgerechnet rund 4 Mrd. US\$ bis 2026 in der Inneren Mongolei einen Solarsiliziumkomplex errichten zu wollen, bestehend aus einer Rohsiliziumhütte (Kapazität: 200.000 tpa), einem Polysiliziumwerk (Kapazität: 150.000 tpa), einem Solarwaferwerk (Kapazität: 10 GWp) und einer Solarmodulfabrik (Kapazität: 3 GWp) sowie zu deren Stromversorgung einen Solarpark (Leistung: 3,5 GWp) und einen Windkraftpark (Leistung: 1,6 GWp). Die erste Phase des Projekts soll im Sommer 2024 mit einer Rohsiliziumkapazität von 100.000 tpa und einer Polysiliziumkapazität von 50.000 tpa abgeschlossen werden.

- **Qinghai Lihao Semiconductor Materials Co., Ltd.** ist ein chinesisches Start-up-Unternehmen und wurde im Jahr 2021 mit finanzieller Unterstützung zahlreicher Investoren aus der Industrie gegründet. Im Oktober 2022 nahm es im Nanchuan Industriepark nahe Xining, Provinz Qinghai, die erste Phase seines dortigen, mit Gesamtinvestitionen von umgerechnet 2,67 Mrd. US\$ erbauten neuen Werkes mit einer Kapazität von 200.000 tpa Rohsilizium sowie 50.000 tpa (später geplant 100.000 tpa bzw. 200.000 tpa) Polysilizium in Solarqualität und 2.000 tpa Polysilizium in Halbleiterqualität in Betrieb. Zudem verabredete das Unternehmen im Januar 2023 gemeinsam mit der Stadtregierung von Yibin, Provinz Sichuan, vertreten durch die Yibin Development Venture Capital Co., Ltd., in dieser Stadt ein Polysiliziumwerk zu bauen, das August 2024 in Produktion gehen und eine Kapazität von 100.000 tpa Polysilizium in Solarqualität und 2.000 tpa Polysilizium in Halbleiterqualität besitzen soll.
- **Inner Mongolia Runyang Yueda New Energy Technology Co., Ltd.** ist eines der vielen Tochterunternehmen des Energiekonzerns Shanghai Yueda New Industrial Group Co., Ltd. Das Tochterunternehmen produziert im Otog Front Banner, Innere Mongolei, in seinem Werk derzeit jährlich bis zu 30.000 t

Polysilizium für die gruppeneigene Solarzellenfertigung in der Provinz Jiangsu, will das Werk aber bis Juni 2024 auf eine Kapazität von 80.000 tpa Polysilizium ausbauen.

- **Guodian Inner Mongolia Jingyang Energy Co, Ltd.** wurde im Jahr 2006 in Nei Mongol Zizhiqu in der Inneren Mongolei als lokales Energieversorgungsunternehmen gegründet und zählt zu den ältesten Polysiliziumproduzenten in China. Die Kapazität des Unternehmens liegt bei 8.000 tpa Polysilizium, wobei daraus auch selbst monokristallines Solarsilizium hergestellt wird.
- **Geely Technology Group Co., Ltd.**, ein Tochterunternehmen des Automobilkonzerns Zhejiang Geely Holding Group Co. Ltd. aus Hanzhou, Provinz Zhejiang, nahm im Mai 2022 die erste Phase (Kapazität: 2.000 tpa) seines in der Stadt Xiangyang, Provinz Hubei, neu errichteten Polysiliziumwerks in Betrieb. Die Umsetzung der Phase II (10.000 tpa) hat begonnen und Phase III (50.000 tpa) ist in Planung. Das Werk produziert Polysilizium in 6N-Qualität für die Solarindustrie.

#### Weitere angekündigte Polysiliziumprojekte

- **Ningxia Baofeng Energy Group Co., Ltd.** ist ein an der Börse von Shanghai notierter Produzent von Chemikalien auf Kohlebasis. Auch dieses Unternehmen kündigte an, baldmöglichst in das vermeintlich lukrative Solarindustriegeschäft einsteigen zu wollen. Hierfür soll in einem neuen Industriepark in der Stadt Jiuquan, Provinz Gansu, ein Solarsiliziumkomplex mit einer Kapazität von 350.000 tpa Rohsilizium, 300.000 tpa Polysilizium (später geplant 600.000 tpa), 50 GWp Solarwafern sowie 30 GWp Solarzellen und -modulen errichtet werden, der durch Solarparks und Windkraftanlagen mit einer Leistung von 15 GWp mit Strom versorgt werden soll. In einer ersten Phase sollen bis Mitte 2023 Werke mit einer Kapazität von 50.000 tpa Polysilizium (nach Bernreuter Research wurde dieser Plan gestoppt), 2,5 GWp Wafern, 2,5 GWp Solarzellen sowie 2,5 GWp Solarmodulen in Betrieb gehen. Diese sollen durch benach-



barte Solarparks mit 0,5 GWp Leistung und Windkraftanlagen mit 1,75 GWp Leistung mit Strom versorgt werden.

- **Wuxi Shangij Automation Co., Ltd.** mit Firmensitz in Wuxi, Provinz Jiangsu, ist über sein Tochterunternehmen Hongyuan New Materials Co., Ltd. ein Produzent von monokristallinen Siliziumwafern in Baotou, Innere Mongolei, und besitzt an diesem Standort eine Kapazität von 30 GWp. Mit Investitionskosten von umgerechnet 1,87 Mrd. US\$ soll das dortige Werk um eine Siliziumhütte mit einer Kapazität von 150.000 tpa und ein Polysiliziumwerk mit einer Kapazität von 100.000 tpa erweitert werden. Zudem hat sich Wuxi Shangij an der Erweiterung der Kapazität des GCL Tech-Polysiliziumwerks in Baotou (s. o.) auf 300.000 tpa mit 35 % beteiligt. Mit einem weiteren Investment von umgerechnet 2,2 Mrd. US\$ wird derzeit in Xuzhou, Provinz Jiangsu, ein Werk zur Produktion von monokristallinen Siliziumwafern (25 GWp) und Solarzellen (24 GWp) errichtet, das im Jahr 2025 in Betrieb gehen soll.
- **Xinjiang Jingnuo New Energy Industry Development Co., Ltd.** wurde im Jahr 2021 als Tochterunternehmen der Hangzhou Jinjiang Group Co., Ltd., eines Industriekonglomerats aus Hangzhou, Provinz Zhejiang, gegründet. Es plant in Huyanghe in der Provinz Xinjiang bis Ende 2022 eine Siliziumhütte mit einer Endkapazität von 150.000 tpa Rohsilizium (zehn Öfen à 33 MVA-Anschlussleistung) und ein Polysiliziumwerk mit einer Kapazität von anfangs 50.000 tpa, später 100.000 tpa zu errichten.
- **Qinghai Laidebao New Material Co., Ltd.** feierte Ende Mai 2023 die Grundsteinlegung für ein umgerechnet 4,92 Mrd. US\$ teures Siliziumprojekt in Delingha, im Norden der Provinz Qinghai. Dieses Projekt umfasst geplante Werke zur Produktion von 400.000 tpa Rohsilizium, 200.000 tpa Polysilizium, GWp Siliziumstäbe und 60 GWp monokristallines Solarsilizium.
- **Xinyi Silicon Holdings Ltd.**, ein Unternehmen der Xinyi Glass Holdings Ltd. aus Hongkong, will noch im Jahr 2023 nach Investitionen von umgerechnet rund 885 Mio. US\$ die erste Phase (60.000 tpa) eines neuen Polysiliziumwerks im Industriepark von Quijing, Provinz Yunnan, in Betrieb nehmen. Bei Gesamtinvestitionskosten von umgerechnet 2,95 Mrd. US\$ soll dieses Werk nach Fertigstellung bis zu 200.000 tpa Polysilizium für die Halbleiterindustrie produzieren.
- **Shaanxi Yulin Energy Group New Energy Technology Co., Ltd.** kündigte Ende 2022 an, im Kreis Mianning, Provinz Sichuan, bis Ende 2026 umgerechnet 2,8 Mrd. US\$ investieren zu wollen, um dort in einem neuen Werk 250.000 tpa Rohsilizium und darauf aufbauend 200.000 tpa Polysilizium herzustellen.
- **Jolywood (Taizhou) Solar Technology Co., Ltd.** kündigte im März 2022 an, in der Stadt Gujiao, Provinz Shanxi, mit Investitionen von umgerechnet 2 Mrd. US\$ ein Werk zur Produktion von Rohsilizium mit einer Kapazität von 200.000 tpa und Polysilizium mit einer Kapazität von 100.000 tpa (Phase I: 10.000 tpa) bauen zu wollen.
- **Henan Saineng Silicon Industry Co., Ltd.** begann offiziell im Februar 2022 mit dem Bau seines Polysiliziumwerks, das nach Fertigstellung umgerechnet 1,5 Mrd. US\$ gekostet haben wird und eine Kapazität von 100.000 tpa Polysilizium besitzen soll.

Generell erreichen nur wenige der chinesischen Polysiliziumproduzenten die für die Produktion von monokristallinen Solarzellen notwendige Qualität. China ist daher weiterhin auf Importe von hochwertigem Polysilizium weitestgehend der Unternehmen Wacker Chemie aus Deutschland und USA sowie OCI aus Südkorea und Malaysia zur Produktion monokristalliner Solarzellen angewiesen. Noch gravierender betrifft dies die Produktion von Halbleitersilizium, das in der von den internationalen Chipherstellern geforderten Qualität größtenteils (noch) nicht in China hergestellt werden kann.

### Produzenten von Solarwafern, -zellen und -modulen

In China gibt es im ganzen Land zahlreiche Produzenten von Komponenten entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Solarindustrie. Im Jahr 2021 wurden 97,3 % aller Wafer (357 GWp) für die Solarindustrie, rund 78 % aller Solarzellen (318 GWp) und 82,3 % aller Solarmodule (288,7 GWp) in China gefertigt. Viele chinesische Produzenten sind auch in Deutschland durch Forschungslabore und/oder Verkaufsbüros vertreten. Auch in China steigt der Ausbau der regenerativen Energiegewinnung sehr stark. So betrug der Zubau im Jahr 2021 fast 101 GWp, verteilt auf 47,6 GWp durch Windkraftanlagen und 53,0 GWp durch Solarenergie. Ende 2021 betrug die chinesische Solarenergiekapazität 306,0 GWp, verteilt auf 198,5 GWp in Solarparks und 107,5 GWp auf Kleinanlagen. Durch den weltweiten Ausbau der Solarenergie waren bisher alle chinesischen Silizium-/Solar-Produzenten sehr gut ausgelastet, schrieben hohe Gewinne und investierten große Summen in den Ausbau ihrer Kapazitäten.

Besonders viele und große Fertigungsanlagen für Wafer, Solarzellen und -module, häufig mit vorgelagerter Produktion von Polysilizium, entstehen derzeit rund um die Industriestadt Baotou in der Inneren Mongolei. Hier werden Werke aber anscheinend nur noch genehmigt, wenn sie den benötigten Strom selber aus regenerativen Energiequellen gewinnen.

In der Provinz Xinjiang sollen die Fertigungsanlagen von Solarwafern, -zellen und -modulen dagegen leistungsarm und veraltet und daher mittlerweile vollständig außer Betrieb sein. Das heißt, soweit bekannt, fertigt außer Jinko Solar (s. u.) derzeit kein chinesisches Unternehmen mehr in dieser Provinz.

Eine Auswahl der derzeit bedeutendsten chinesischen Marktteilnehmer in der Solarindustrie ist:

- **LONGi Green Energy Technology Co., Ltd.** wurde im Jahr 2000 noch als Xi'an Longi Silicon Materials Corporation gegründet, hat seinen Unternehmenssitz in Xi'an, Provinz Shaanxi,

und ist seit 2012 an der Börse von Shanghai gelistet. LONGi fertigt an sieben Produktionsstätten in China und jeweils einer in Vietnam und Malaysia. Ein weiteres Werk in China und eines in Indien sind zudem in Planung, auch ist LONGi seit dem Jahr 2021 im Wasserstoffbereich aktiv. Ende 2022 lag die globale Kapazität von LONGi bei 133 GWp (Nummer 1 in China) bei Siliziumwafern, 50 GWp bei Solarzellen und 85 GWp bei Solarmodulen.

- **TCL Zhonghuan Renewable Energy Technology Co., Ltd.** wurde im Jahr 2020 vom Heim-elektronikhersteller TCL Industries Holdings Co., Ltd. erworben, dessen Anfänge selbst auf das Jahr 1958 zurückgehen und das dadurch eines der 13 ältesten chinesischen Unternehmen ist. TCL Zhonghuan mit Sitz in Tianjin fertigt an verschiedenen Standorten in China Solarwafer und -zellen und besaß Ende 2021 eine Waferkapazität von 84 GWp. Nach Inbetriebnahme eines neuen Werks in der Region Ningxia soll die Waferkapazität bis Ende 2023 auf 135 GWp (Nummer 2 in China) steigen. Das Unternehmen ist einer der größten Verbraucher von Polysilizium in China, ist an einem Polysiliziumwerk in der Provinz Xianjing beteiligt und neuerdings auch in einem Joint Venture mit GCL-Tech (s. o.) an einem Polysiliziumwerk in Hohhot, Innere Mongolei. An diesem Standort betreibt TCL Zhonghuan bereits ein Werk für monokristalline Siliziumstäbe und Wafer mit einer Kapazität von jeweils 25 GWp.
- **Jinko Solar Co., Ltd.** ist ein im Jahr 2006 gegründetes und mittlerweile an den Börsen von Shanghai und New York gelistetes Unternehmen mit derzeit 14 Produktionsstätten in China (darunter bis zum Verkauf im Mai 2023 in der Provinz Xinjiang auch ein Werk zur Fertigung von Siliziumstäben, s. o.), den USA, Malaysia und Vietnam. Ende 2022 verfügte das Unternehmen über eine effektive Produktionskapazität von 65 GWp bei monokristallinen Siliziumwafern, 55 GWp bei Solarzellen und 70 GWp bei Solarmodulen. Weiterhin betreibt das Unternehmen auf der ganzen Welt Solarparks.

- **JA Solar Technology Co., Ltd.** hat seinen Unternehmenssitz in Beijing, wo es im Jahr 2005 gegründet wurde. JA Solar fertigt derzeit an zehn Standorten in China sowie in Vietnam und Malaysia Siliziumstäbe, Wafer, Solarzellen und -module. Die Kapazitäten von JA Solar lagen Ende 2022 bei Stäben bei ca. 40,7 GWp (Produktion: 36,0 GWp), bei Wafern bei 38,9 GWp (Produktion 35,1 GWp), bei Solarzellen bei ca. 33,9 GWp (Produktion: 32,2 GWp) und bei Solarmodulen bei ca. 41,6 GWp (Produktion: 40,4 GWp). Im Januar 2023 kündigte JA Solar an, in der Inneren Mongolei einen Solarsiliziumkomplex errichten zu wollen, in dem neben Siliziumstäben und -wafern (20 GWp), Solarzellen (30 GWp), Solarmodulen (10 GWp) als Vorprodukt auch 100.000 tpa Polysilizium produziert werden sollen.
- **Trina Solar Ltd.** wurde im Jahr 1997 gegründet und produziert in fünf Werken in China, Thailand und Vietnam. Zudem entwickelt es Solarparks weltweit (auch in der Provinz Xinjiang). Das Hauptquartier des Unternehmens, das derzeit nur noch an der Börse von Shanghai notiert ist, befindet sich in Changzhou, Provinz Jiangsu. Ende 2022 lag die Kapazität des Unternehmens bei Solarzellen bei 50 GWp und bei Solarmodulen bei 65 GWp. Im Sommer 2022 kündigte auch Trina Solar an, in der Provinz Qinghai bis Ende 2025 in zwei Phasen einen integrierten Solarsiliziumkomplex bauen zu wollen. In der ersten Phase (bis Ende 2023) sollen dort 100.000 tpa Rohsilizium, 50.000 tpa Polysilizium, 20 GWp Siliziumstäbe sowie jeweils 5 GWp Wafer, Zellen und Module erzeugt und in einer Phase (bis Ende 2025) dann noch 200.000 tpa Rohsilizium, 100.000 tpa Polysilizium, 15 GWp Siliziumstäbe sowie jeweils 5 GWp Wafer, Zellen und Module hinzukommen.
- **Canadian Solar Inc.** ist zwar ein kanadisches, im Jahr 2001 gegründetes und an der NASDAQ notiertes Unternehmen mit Hauptsitz in Guelph, Ontario, fertigt jedoch einen Großteil seiner Stäbe, Wafer, Zellen und Module in China. Das Unternehmen verfügt weltweit über 17 Produktionsstätten, neben China (in den Provinzen Jiangsu, Zhejiang, Henan und Innere Mongolei) auch in Kanada, Vietnam, Brasilien und Thailand. Canadian Solar besaß Ende 2022 eine Siliziumstabkapazität von 20,4 GWp, Waferkapazität von 20,0 GWp, eine Zellkapazität von 19,8 GWp und eine Modulkapazität von 32,2 GWp. In Haidong, Provinz Qinghai, erbaut das Unternehmen bis Ende 2027 mit Investitionskosten von umgerechnet 8,9 Mrd. US\$ zudem einen Werkskomplex zur Produktion von Polysilizium (Kapazität: 200.000 tpa) sowie Solarmodulen (Kapazität: 10 GWp). Auch werden weltweit Solarparks entwickelt.
- Die an der Börse von Hongkong notierte Shunfeng International Clean Energy Ltd. ist über mehrere, auch internationale Tochterunternehmen, in der Wertschöpfungskette der Solarindustrie tätig. In China fertigt die im Jahr 2007 gegründete **Zhenjiang Rietech New Energy Science Technology Co., Ltd.** mono- und polykristalline Siliziumwafer in den Städten Zhenjiang und Yangzhou, beide Provinz Jiangsu. **Jiangsu Shunfeng Photovoltaic Technology Co., Ltd.** ist ein weiteres, im Jahr 2005 gegründetes Tochterunternehmen, das in der Stadt Changzhou, Provinz Jiangsu, Solarzellen produziert. **Wuxi Suntech Power Co., Ltd.** ist ein im Jahr 2001 gegründetes Unternehmen aus Wuxi, Provinz Jiangsu, das im Jahr 2014 von der Shunfeng Photovoltaic Holdings Co., Ltd., ein weiteres Tochterunternehmen der Shunfeng International Clean Energy Ltd., übernommen wurde. Es fertigt Zellen und Solarmodule an zwei Standorten in China und auch in Indonesien. Ein weiteres Modulwerk in Fengyang, Provinz Anhui, mit einer geplanten Kapazität von 10 GWp ist im Bau. Die derzeitige jährliche Modulkapazität von Wuxi Suntech liegt bei 15 GWp. Das Schwesterunternehmen **Shunfeng Optoelectronics Investment (China) Co., Ltd.** baut und betreibt Solarparks in aller Welt, darunter auch in der Provinz Xinjiang.

- **Qinghai Gaojing Solar Energy Technology Co., Ltd.**, ein Tochterunternehmen der Guangdong Gaojing Solar Technology Co., Ltd., wurde im Jahr 2019 gegründet und betreibt im Nanchuan Industriepark nahe Xining, Provinz Qinghai, ein Siliziumwaferwerk mit einer Kapazität von 50 GWp. Dieses Werk trägt wesentlich zur von Guangdong Gaojing geplanten Gesamtwaferskapazität von 80 GWp (Nummer 3 in China) bei. Zur Versorgung mit dem zur Waferproduktion benötigten großen Mengen an Polysilizium wurden Lieferverträge mit Xinte Energy und Sichuan Yongxiang Polysilicon geschlossen.
- **Tongwei Solar Co., Ltd.** (s. o. Sichuan Yongxiang Polysilicon Co., Ltd.)
- **Risen Energy Co., Ltd.** mit Sitz in Ningbo, Provinz Zhejiang, wurde im Jahr 2002 gegründet. Das Unternehmen fertigt Solarmodule an vier Standorten in China sowie in Malaysia, will sich aber zunehmend rückwärtsintegrieren (s. o.). Mitte 2022 lag seine Kapazität im Bereich Solarmodule bei 22,1 GWp.
- Die 1984 gegründete, im gesamten Energiebereich tätige CHINT-Gruppe aus Yueqing, Provinz Zhejiang, ist seit dem Jahr 2006 über ihr Tochterunternehmen **Astroenergy Co., Ltd.** (Chint New Energy Technology Co., Ltd.) auch in der Solarindustrie tätig und hat sich auf die Entwicklung von Solarparks und die Herstellung von Zellen und PV-Modulen spezialisiert (derzeitige Modulkapazität 8 GWp). Bis Ende 2023 soll die Zellkapazität auf 44 GWp und die Modulkapazität auf 49 GWp ansteigen und bis Ende 2025 sogar 60 GWp bzw. 70 GWp übersteigen. Derzeit fertigt das Unternehmen in vier Produktionsstätten in China (in den Provinzen Zhejiang, Jiangsu, Gansu und Jilin) sowie auch in Thailand.
- **Jiangsu Runergy New Energy Technology Co., Ltd.** wurde im Jahr 2013 gegründet und ist nach eigenen Angaben der weltweit drittgrößte Produzent von Solarzellen mit einer Kapazität von derzeit 21 GWp. Das Unternehmen investiert nun auch in die Polysiliziumherstellung und errichtet durch seine extra hierfür gegründete Tochterfirma Ningxia Runyang Silicon Material Technology Co., Ltd. derzeit ein Werk in Shizhuishan, Provinz Ningxia, mit einer Anfangskapazität von 50.000 tpa (später geplant 100.000 tpa) Polysilizium. Es sollte Ende 2022 in Produktion gehen, zugleich mit einer dortigen weiteren Solarzellenfabrik mit einer Kapazität von 5 GWp.
- **ZNShine PV-Tech Co., Ltd.** (ZNShine Solar) mit Sitz in Jin Tan, Provinz Jiangsu, wurde im Jahr 1988 als Handelsunternehmen gegründet und stieg dann im Jahr 2006 selbst in die Produktion von Solarmodulen ein. Mit drei Fertigungsstätten in China sowie in Südafrika und Japan besitzt das Unternehmen mittlerweile eine Modulkapazität von 60 GWp.
- **Jiangsu Seraphim Solar System Co., Ltd.** wurde im Jahr 2011 in Changzhou, Provinz Jiangsu, gegründet und besitzt mit mehreren Fertigungsstätten in China sowie in Vietnam, den USA (SEG Solar) sowie Südafrika eine weltweite Modulkapazität von derzeit 12 GWp.
- **Shuangliang Eco-Energy Systems Co., Ltd.** ist ein im Jahr 1982 gegründeter Anlagenhersteller aus Jiangyin, Provinz Jiangsu. Durch sein Tochterunternehmen Shuangliang Silicon Materials (Baotou) Co., Ltd. hat es Ende 2022 in einem neu errichteten Werk in der „Seltene Erden Hochtechnologiezone“ von Baotou, Innere Mongolei, die Produktion von Siliziumstäben und -wafern mit einer Anfangskapazität von jeweils 20 GWp aufgenommen. Mittelfristig sollen diese Kapazitäten jedoch verdoppelt werden.
- Der weltweit tätige Elektroautoproduzent **BYD (Build Your Dreams) Co., Ltd.** produziert in seinen beiden Werken in Beijing und Campinas in Brasilien auch Solarmodule mit einer Gesamtkapazität von derzeit 1,5 GWp.
- **Jiangsu Sunport Power Corp., Ltd.** mit Sitz in Wuxi, Provinz Jiangsu, wurde im Jahr 2011 gegründet. Das Unternehmen produziert

in fünf Werken an drei Standorten in China Solarzellen und -module mit einer Modulkapazität von derzeit 4 GWp.

- **Yingli Green Energy Holding Co., Ltd.** (Yingli Solar) hat seinen Unternehmenssitz in Baoding in der Provinz Hebei und ist seit 1998 im Solarenergiebereich tätig. Im Jahr 2010 begann es mit der kommerziellen Produktion von Solarmodulen und besitzt derzeit eine Modulkapazität von ca. 4 GWp, die sich aber im Ausbau befindet. Zudem errichtet und betreibt das Unternehmen Solarparks.
- **Shanghai Aiko Solar Energy Co., Ltd.** wurde Ende des Jahres 2009 in Foshan, Provinz Guangdong, gegründet und fertigt in vier Werken in China Solarzellen mit einer derzeitigen Kapazität von 36 GWp.
- **Zhongli Talesun Solar Co., Ltd.** ist ein Tochterunternehmen der Jiangsu Zhongli Group Co., Ltd., die optische Kabel produziert. Zhongli Talesun wurde im Jahr 2010 in Suzhou, Provinz Jiangsu, gegründet und baut und betreibt weltweit Solarparks (auch in der Provinz Xinjiang). Zudem fertigt es selbst in sechs Werken in China, aber auch in Thailand und Südafrika und besitzt derzeit eine

Solarzellenkapazität von 16 GWp und eine PV-Modulkapazität von 20 GWp.

- Die im Jahr 2002 gegründete **Beijing Jingyuntong Technology Co., Ltd.** (Beijing JYT Corp.) ist über eine Vielzahl von Tochterunternehmen in der Herstellung von Anlagen für die Siliziumindustrie und darauf aufbauende Industrien, aber auch selbst in der Herstellung von Siliziumstäben und -wafern tätig. Sein im Jahr 2017 gegründetes Tochterunternehmen **Wuhai Jingyuntong New Materials Technology Co., Ltd.** betreibt eine Waferfertigung in Wuhia, Innere Mongolei. Im Rahmen seiner Rückwärtsintegration hat sich Beijing JYT zudem an einem neuen Polysiliziumwerk der Sichuan Yongxiang Polysilicon am Standort Leshan beteiligt (s. o.).

Aus den Daten in Tab. 35 ergibt sich eine Auslastungsquote der chinesischen Siliziumhütten in Höhe von 47,9 % im Jahr 2020, 50,2 % im Jahr 2021 und 57,6 % im Jahr 2022.

FERROALLOYNET berechnete eine Produktion von 2.221.460 t Rohsilizium im Jahr 2020, eine Produktion von 2.785.490 t bei einer Kapazität von 6.481.680 tpa im Jahr 2021 und eine Produktion von 3.502.570 t bei einer Kapazität von

**Tab. 35: Produktion (in t) und Produktionskapazitäten (in Mio. t) von Rohsilizium in China, 2005 – 2006 nach CRU (Silicon Metal Market Outlook), 2007–2015 nach ROSKILL'S LETTERS FROM JAPAN (versch. Monate), ab 2016 nach ASIAN METAL (Silicon Metal Industry Annual Reports, versch. Jahre). n. v. = nicht verfügbar.**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Produktion	672.500	770.000	800.000	960.000	720.000	1.150.000	1.360.000
Kapazität	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	3,00
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Produktion	1.130.000	1.450.000	2.570.000	2.400.000	2.281.800	2.251.800	2.334.550
Kapazität	3,36	3,81	3,85	5,00	5,32	5,39	5,48
	2019	2020	2021	2022			
Produktion	2.072.100	1.950.400	2.028.748	2.464.500			
Kapazität	4,98	4,07	4,04	4,28			

**Tab. 36: Produktion und Produktionskapazitäten (in Mio. t) von Rohsilizium (inkl. Recyclingsilizium und Silizium off-grade, d. h. Si 97 %) in China, nach SMM-SHANGHAI METALS MARKET (frdl. schriftl. Mitt.).**

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Produktion	1,30	1,55	1,30	1,50	1,69	2,15	2,25
Kapazität	2,75	3,29	3,70	3,45	4,11	4,89	4,84
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023e
Produktion	2,41	2,67	2,24	2,20	2,91	3,50	4,00
Kapazität	5,44	5,63	5,06	5,17	4,99	5,71	7,00

6.601.670 tpa im Jahr 2022. Hieraus ergibt sich eine Auslastungsquote der chinesischen Siliziumhütten in Höhe von 43,0 % im Jahr 2021 und 53,1 % im Jahr 2022.

Wie die Berechnungen von FerroAlloyNet und die Tabellen 30 und 31 zeigen, unterscheiden sich die Meinungen zur Produktion und zu den Kapazitäten der Rohsiliziumproduktion in China selbst nach chinesischen Analysen zum Teil erheblich. In einem weiteren Vergleich dazu geht die CHINA NONFERROUS METALS INDUSTRY ASSOCIATION (CNIA) Silicon Industry Branch (frdl. mdl. Mitt.) von einer Siliziumproduktion in China im Jahr 2021 von 2,7 Mio. t bei einer Kapazität von 5 Mio. tpa und im Jahr 2022 von einer Produktion von 3,25 Mio. t bei einer Kapazität von 5,7 Mio. tpa aus. Hieraus ergibt sich eine Auslastungsquote der chinesi-

schen Siliziumhütten in Höhe von 54 % im Jahr 2021 und 57 % im Jahr 2022.

Die von CRU International Ltd. für China angenommenen Produktionsdaten liegen deutlich unter denen von FerroAlloyNet, SMM und CNIA und lagen bis 2019 sogar noch deutlich unter den von Asian Metal (vgl. Tab. 15).

Aus den Daten in Tab. 37 ergibt sich eine Auslastungsquote der chinesischen Polysiliziumwerke in Höhe von 95,2 % im Jahr 2021, 69,9 % im Jahr 2022 und geschätzt 60,9 % im Jahr 2023.

Aus den Daten in Tab. 38 ergibt sich eine Auslastungsquote der chinesischen Polysiliziumwerke in Höhe von 74,2 % im Jahr 2021, 75,2 % im Jahr 2022 und geschätzt 60,5 % im Jahr 2022.

**Tab. 37: Produktion und Produktionskapazitäten (in t) von Polysilizium in China, 2010–2020 nach Asian Metal bzw. ab 2021 nach CHINA NONFERROUS METALS INDUSTRY ASSOCIATION (CNIA) SILICON INDUSTRY BRANCH (frdl. mdl. Mitt.) n. v. = nicht verfügbar.**

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Produktion	n. v.	79.000	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
Kapazität	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023e <sup>1</sup>
Produktion	n. v.	259.000	344.000	n. v.	495.000	811.000	1.400.000
Kapazität	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	520.000	1.160.000	2.300.000

<sup>1</sup>nach TINGTING (2023): Vorhersage für 2023: globale Kapazität: 2,54 Mio. t, globale Produktion: 1,54 Mio. t, globale Nachfrage: 1,065 Mio. t

**Tab. 38: Produktion und Produktionskapazitäten (in t) von Polysilizium in China, nach SMM-SHANGHAI METALS MARKET (frdl. schriftl. Mitt.).**

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Produktion	50.000	90.000	70.000	70.000	130.000	170.000	190.000
Kapazität	70.000	160.000	90.000	90.000	160.000	180.000	210.000
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023e
Produktion	240.000	260.000	340.000	400.000	490.000	820.000	1.550.000
Kapazität	260.000	390.000	450.000	490.000	660.000	1.090.000	2.560.000

**Tab. 39: Exporte von Rohsilizium (in t) aus China in ausgewählte Zielländer, nach GLOBAL TRADE TRACKER (2023). RoW = Rest of World.**

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Japan	168.246	161.649	189.183	201.080	164.623	153.376	187.089	146.007
Südkorea	149.574	139.732	149.439	132.665	116.230	80.895	89.409	82.749
VAE	37.723	37.184	50.735	55.772	46.977	28.728	58.656	61.029
Malaysia	21.718	31.721	32.201	36.370	38.816	43.950	55.253	38.991
Deutschland	65.456	41.612	43.220	40.807	29.142	14.118	10.699	5.317
RoW	332.824	302.812	373.170	343.627	298.569	295.535	376.683	316.925
<b>Summe</b>	<b>775.541</b>	<b>714.710</b>	<b>837.948</b>	<b>810.321</b>	<b>694.357</b>	<b>616.602</b>	<b>777.789</b>	<b>651.018</b>

**Tab. 40: Importe von Polysilizium (in t) durch China aus den wichtigsten Herkunftsländern, nach GLOBAL TRADE TRACKER (2023). RoW = Rest of World.**

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Deutschland	31.297	35.676	47.484	45.214	52.678	50.081	51.371	48.223
Malaysia	5.028	9.127	11.130	11.959	21.254	23.036	29.727	22.944
Japan	1.485	1.926	3.087	3.048	4.680	4.707	15.599	6.328
Taiwan	11.224	13.682	17.393	14.253	4.662	3.852	7.226	3.684
USA	13.349	5.691	9.007	7.633	9.228	2.659	4.811	2.785
Südkorea	51.212	71.566	70.986	55.497	48.886	15.351	4.310	1.238
RoW	3.959	4.639	882	2.666	1.967	1.707	2.851	4.119
<b>Summe</b>	<b>117.554</b>	<b>142.307</b>	<b>159.969</b>	<b>140.270</b>	<b>145.355</b>	<b>101.393</b>	<b>115.895</b>	<b>89.321</b>

FERROALLOYNET geht davon aus, dass im Jahr 2022 in China 787.900 t Polysilizium produziert wurden. Die CHINA PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION (CPIA) nennt eine Produktionsmenge von 827.000 t.

CRU INTERNATIONAL LTD. nimmt zum Jahresende 2022 eine chinesische Gesamtpolysiliziumkapazität von 1.198.000 tpa in 19 produzierenden Werken an. Diese soll bis Ende 2023 auf 2.164.800 tpa in dann 26 produzierenden Werken steigen.

### Ferrosilizium

Nach Angaben von Asian Metal lag die weltweite Kapazität zur Produktion von Ferrosilizium im Jahr 2022 bei 12,83 Mio. tpa, wovon China einen Anteil von rund 75 % (9,58 Mio. tpa) besaß. Im ganzen Land gab es 121 Hütten (2021: 120 Hütten), davon standen 90 Hütten (2021: 97 Hütten) in Produktion, die sich wie folgt auf die einzelnen Provinzen verteilen:

- Innere Mongolei (offiziell: Autonome Region Innere Mongolei): 36 Hütten mit einer Gesamtkapazität von 2,73 Mio. tpa FeSi, aktiv 2022: sieben Hütten mit einer Produktion von 1,63 Mio. t FeSi, aktiv 2021: 16 Hütten mit einer Produktion von 1,84 Mio. t FeSi
- Qinghai: 21 Hütten mit einer Gesamtkapazität von 1,82 Mio. tpa FeSi, aktiv 2022: 20 Hütten mit einer Produktion von 1,16 Mio. t FeSi, aktiv 2021: 20 Hütten mit einer Produktion von 1,28 Mio. t FeSi
- Ningxia (offiziell: Autonomes Gebiet Ningxia der Hui-Nationalität): 19 Hütten mit einer Gesamtkapazität von 2,30 Mio. tpa FeSi, aktiv 2022: 18 Hütten mit einer Produktion von 1,14 Mio. t FeSi, aktiv 2021: 18 Hütten mit einer Produktion von 0,91 Mio. t FeSi
- Shaanxi: 27 Hütten mit einer Gesamtkapazität von 1,61 Mio. tpa FeSi, aktiv 2022: 27 Hütten mit einer Produktion von 1,04 Mio. t FeSi, aktiv 2021: 27 Hütten mit einer Produktion von 1,15 Mio. t FeSi

- Gansu: zwölf Hütten mit einer Gesamtkapazität von 0,82 Mio. tpa FeSi, aktiv 2022: zwölf Hütten mit einer Produktion von 0,53 Mio. t FeSi, aktiv 2021: elf Hütten mit einer Produktion von 0,46 Mio. t FeSi
- Andere: sechs Hütten mit einer Gesamtkapazität von 0,27 Mio. tpa FeSi, aktiv 2022: sechs Hütten mit einer Produktion von 0,16 Mio. t FeSi, aktiv 2021: fünf Hütten mit einer Produktion von 0,15 Mio. t FeSi

Über alle Hütten und Provinzen hinweg lag die Auslastungsquote im Jahr 2022 bei 58,21 % bzw. im Jahr 2021 bei 60,49 %.

In China fand Ferrosilizium im Jahr 2022 zu 78 % in der Produktion von Stahl (Produktion 2022: 100,954 Mio. t, Bedarf zur Herstellung ca. 4,03 Mio. t FeSi), zu 17 % in der Produktion von Magnesium (Produktion 2022: 951.930 t, Bedarf zur Herstellung ca. 1,14 Mio. t FeSi) und zu 5 % in der Gusseisenindustrie (Bedarf zur Herstellung ca. 0,15 – 0,2 Mio. t FeSi) Verwendung.

Im Gegensatz zu Rohsilizium mit den ältesten Siliziumhütten in Yunnan und Sichuan konzentrierte sich die chinesische Ferrosiliziumproduktion zu Beginn v. a. auf die Provinz Ningxia. Auch besitzen die Ferrosiliziumhütten meist wesentlich höhere Anschlussleistungen, die bei 33 MVA und 40,5 MVA, sogar 63 MVA, jedoch selten bei 25,5 MVA oder darunter liegen. In der Inneren Mongolei sind Öfen < 25,5 MVA-Anschlussleistung ab Ende 2022 verboten, woraufhin neun Hütten im Jahr 2022 geschlossen haben.

Neu sind Ansiedlungen von Ferrosiliziumproduzenten in der Provinz Xinjiang. So feierte die Xinjiang Jitie Ferroalloy Co., Ltd., ein Tochterunternehmen der Zhongze Holding Group Co., Ltd. aus Shenyang, Provinz Liaoning, im Oktober 2022 in dieser Provinz die Grundsteinlegung ihrer neuen Ferrosiliziumhütte. Diese soll ab Ende 2023 mit acht Öfen à 40,5 MVA-Anschlussleistung jährlich bis zu 2 Mio. t FeSi produzieren.



**Tab. 41: Liste der größten chinesischen Ferrosiliziumproduzenten, ergänzt nach ASIAN METAL (Ferrosilicon Industry Annual Reports, versch. Jahre). Anm.: Andere Quellen, z. B. ROSKILL, nennen zum Teil andere Unternehmen!**

Produzent	Qualität	Öfen	Kapazität
Erdos Xijin Mining and Metallurgy Co., Ltd.	FeSi 75 % FeSi 72 %	72 (12,5 MVA, 25 MVA, 33 MVA, 45 MVA)	1.450.000 tpa
Inner Mongolia Junzheng Chemicals & Energy Group Co., Ltd.	FeSi 75 % FeSi 72 %	10 x 12,5 MVA 6 x 63 MVA	503.000 tpa
Ningxia Ruizilian Industrial Co., Ltd.	FeSi 75 % FeSi 72 %	2 x 16,5 MVA 8 x 40,5 MVA	365.000 tpa
Dragon Northwest Ferroalloys Co., Ltd.	FeSi 75 % FeSi 72 %	3 x 8 MVA, 2 x 12,5 MVA, 4 x 25,5 MVA, 2 x 33 MVA	330.000 tpa
Ningxia Sanyuan Zhongtai Metallurgical Co., Ltd.	FeSi 75 % FeSi 72 %	6 x 25 MVA 2 x 33 MVA	260.000 tpa
Qinghai Baitong High Purity Materials Development Co., Ltd.	FeSi 72 % HP	16 x 14 MVA 2 x 33 MVA	250.000 tpa
Ningxia Dazheng Weiye Metallurgy Co., Ltd.	FeSi 75 % FeSi 72 %	4 x 25,5 MVA 4 x 33 MVA	240.000 tpa
Ningxia Zhongwei Maoye Metallurgical Co., Ltd.	FeSi 75 % FeSi 72 %	5 x 25 MVA, 1 x 40,5 MVA 2 x 63 MVA	200.000 tpa
Ningxia Zhongwei Shengjin Metallurgy Co., Ltd.	FeSi 75 % FeSi 72 %	2 x 25,5 MVA 4 x 33 MVA	180.000 tpa
Hongwei Shengjin Beituo Building Materials Co., Ltd.	FeSi 75 % FeSi 72 %	2 x 25,5 MVA 4 x 33 MVA	180.000 tpa
Ningxia Zhongwei City Yinhe Metallurgical Co., Ltd.	FeSi 72 %	4 x 40,5 MVA	170.000 tpa
Qinghai HuaDian Ferro-Alloy Co., Ltd.	FeSi 75 % FeSi 77 % low Al FeSi	12 x 18,5 MVA 4 x 14 MVA	160.000 tpa
Shaanxi Sanjiang Energy Chemical Co., Ltd.	FeSi 75 %	4 x 45 MVA	160.000 tpa
Ningxia Xinhua Industry Co., Ltd.	FeSi 75 % FeSi 72 %	4 x 25,5 MVA 2 x 33 MVA	160.000 tpa
Minhe Tianli Silicon Industry Co., Ltd.	FeSi 75 % FeSi 72 %	5 x 22 MVA	150.000 tpa
Fugu Jinwantong Magnesium Industry Co., Ltd.	FeSi 75 % FeSi 72 %	2 x 33 MVA 1 x 40,5 MVA	100.000 tpa
Qinghai Kaiyuan Metal Materials Co., Ltd.	FeSi HP	4 x 12,5 MVA 4 x 18,5 MVA	n. v.

Der mit Abstand größte Produzent von Ferrosilizium in China und auch der Welt ist die **Inner Mongolia ERDOS Resources Co., Ltd.** mit Sitz im „Erdos Group Qipanjin Industriepark“ in der Industriestadt Erdos (Ordos) in der Inneren Mongolei, die aus der im Jahr 1979 eröffneten Yikezhaomeng Kaschmirpulloverfabrik hervorging. Auch heute noch stellen die Fertigung und der Handel mit Produkten aus Kaschmirwolle ein wichtiges Standbein der Unternehmensgruppe dar. Im Jahr 2003 wurde als neues Tochterunternehmen die Inner Mongolia **Erdos Power and Metallurgy Group Co., Ltd.** gegründet, an der sich im Jahr 2007 auch der japanische Mischkonzern Mitsui Bussan K.K. mit 25 % beteiligte. Erdos Power and Metallurgy ist in der Kohleaufbereitung sowie durch 16 Tochterunternehmen in der Produktion von FeSi und FeMn verschiedener Qualitäten, FeSiMn, weite-

rer Ferrolegierungen sowie Mikrosilika tätig. Im Jahr 2019 (neue Daten liegen nicht vor) produzierte Erdos Power and Metallurgy 1.587.600 t FeSi und 332.000 t FeSiMn. Als in der Produktion von FeSi operatives Tochterunternehmen agiert in der Inneren Mongolei die **Erdos Xijin Mining and Metallurgy Co., Ltd.** mit Hütte im Qipanjin Industriepark. Diese verfügt derzeit über 72 Öfen, davon 30 Öfen à 25 MVA-, mehr als 20 Öfen à 12,5 MVA-, und ca. zehn Öfen à 33 MVA- oder 45 MVA-Anschlussleistung. Die Kapazität dieser weltgrößten Ferrosiliziumhütte liegt bei ca. 1,45 Mio. tpa FeSi und 150.000 tpa FeSiMn. Weiterhin ist die Erdos Power and Metallurgy seit dem Jahr 2013 mit 65 % an der **Qinghai WuTong (Group) Industry Co., Ltd.** und der **Qinghai Baitong High Purity Materials Development Co., Ltd.** mit Hütten in der Provinz Qinghai beteiligt. Die Gesamtkapazität der

**Tab. 42: Produktion und Produktionskapazitäten (in Mio. t) von Ferrosilizium in China, nach ASIAN METAL (Ferrosilicon Industry Annual Reports, versch. Jahre). Daten vor 2009 sind nicht verfügbar. n. v. = nicht verfügbar.**

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Produktion	4,92	5,52	4,78	n. v.	5,16	3,58	3,26
Kapazität	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	6,46
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Produktion	3,68	4,01	5,32	5,40	5,73	5,66	
Kapazität	6,90	7,01	9,60	8,81	9,34	9,58	

**Tab. 43: Exporte von Ferrosilizium (in t) aus China in die größten Zielländer, nach GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Südkorea	54.337	70.001	86.879	117.696	105.276	77.905	122.390	148.177
Japan	87.186	73.044	135.908	175.514	119.392	64.646	148.445	122.800
Indonesien	2.290	7.544	30.722	64.776	30.634	36.377	81.687	64.327
Indien	6.106	12.379	24.851	45.628	36.597	17.062	16.337	60.770
Türkei	7.786	8.351	7.316	12.214	2.839	6.151	8.086	40.832
Andere	88.234	58.214	123.983	196.216	91.709	74.294	169.767	238.205
<b>Summe</b>	<b>245.939</b>	<b>229.533</b>	<b>409.659</b>	<b>612.044</b>	<b>386.447</b>	<b>276.435</b>	<b>546.712</b>	<b>675.111</b>

beiden Hütten in Qinghai liegt bei 550.000 tpa FeSi, teils werden besondere Qualitäten produziert.

Weiterhin ist die Erdos Gruppe mit 13 Tochterunternehmen im Chemiesektor tätig und besitzt dort nach eigenen Angaben Kapazitäten von 2 Mio. tpa Kalkstein, 1 Mio. tpa Zement, 1,3 Mio. tpa Calciumcarbid, 300.000 tpa Ätznatron, 1,2 Mio. tpa Ammoniak, 2,1 Mio. tpa Harnstoff, 400.000 tpa PVC, 8.000 tpa Polysilizium und 1,05 Mrd. m<sup>3</sup>/Jahr Naturgas.

Zum Vergleich geht FerroAlloyNet für das Jahr 2022 von einer Produktion von 5.915.400 t (2021: 5.859.100 t, 2020: 5.320.990 t) Ferrosilizium in China bei einer gleichzeitigen Kapazität von 10.254.000 tpa aus.

#### Ferrosilikomangan

Nach Angaben von Asian Metal lag die chinesische Kapazität zur Produktion von Ferrosilikomangan im Jahr 2022 bei 15,577 Mio. tpa. Im ganzen Land gab es 80 Hütten, die sich wie folgt auf die einzelnen Provinzen verteilten:

- Innere Mongolei (offiziell: Autonome Region Innere Mongolei): 21 Hütten mit einer Gesamtkapazität von 5,201 Mio. tpa FeSiMn, Produktion 2022: 2,243 Mio. t FeSiMn, 2021: 2,757 Mio. t FeSiMn

- Ningxia (offiziell: Autonomes Gebiet Ningxia der Hui-Nationalität): zwölf Hütten mit einer Gesamtkapazität von 4,466 Mio. tpa FeSiMn, Produktion 2022: 2,166 Mio. t FeSiMn, 2021: 2,459 Mio. t FeSiMn
- Guangxi: 15 Hütten mit einer Gesamtkapazität von 1,853 Mio. tpa FeSiMn, Produktion 2022: 0,713 Mio. t FeSiMn, 2021: 0,836 Mio. t FeSiMn
- Guizhou: neun Hütten mit einer Gesamtkapazität von 1,536 Mio. tpa FeSiMn, Produktion 2022: 0,428 Mio. t FeSiMn, 2021: 0,641 Mio. t FeSiMn
- Andere: 23 Hütten mit einer Gesamtkapazität von 2,521 Mio. tpa FeSiMn, Produktion 2022: 1,437 Mio. t FeSiMn, 2021: 1,595 Mio. t FeSiMn

Über alle Hütten und Provinzen hinweg lag die Auslastungsquote im Jahr 2022 bei 44,72 % bzw. im Jahr 2021 bei 52,67 %.

#### Weitere Ferrosilikolegierungen

Auch alle weiteren Ferrosilikolegierungen, wie FeSiCr oder FeSiMg, werden in großem Umfang in China produziert, doch wurden hierzu keine Daten recherchiert.

**Tab. 44: Produktion und Produktionskapazitäten (in Mio. t) von Ferrosilikomangan in China, nach ASIAN METAL (Manganese Market Annual Report 2022 und China Silico-Manganese Production Market Research Report 2022). Daten vor 2014 sind nicht verfügbar.**

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Produktion	2,926	2,709	3,176	6,000	7,714	8,306	8,288	6,986
Kapazität	6,770	7,457	7,935	12,252	15,247	15,847	15,737	15,577



## Deutschland

In Deutschland gibt es eine Siliziumhütte, eine Ferrosiliziumhütte, zwei Werke zur Herstellung von Polysilizium, zwei Werke zur Fertigung von Siliziumstäben und Wafern für die Halbleiterindustrie sowie mehrere Werke zur Herstellung von Solarzellen bzw. -modulen. Auch Silikone werden in Deutschland durch mehrere Hersteller in großen Mengen produziert. Zudem liegen in Deutschland umfangreiches Know-how und teils auch Fertigungskapazität zum Aufbau von Siliziumhütten, Polysiliziumwerken und zur Weiterverarbeitung von Polysilizium vor.

Die Geschichte der Siliziumproduktion in Deutschland reicht bis in das Jahr 1942 zurück. Damals bauten die Vereinigten Aluminiumwerke (VAW) mithilfe von Fremd- und Zwangsarbeiterinnen und -arbeitern auf dem Gebiet des heutigen Gemeindeteils Indling der Stadt Pocking im niederbayerischen Landkreis Passau ein Siliziumwerk, das wegen seiner Nähe zum Fluss Rott „Rottwerk“ genannt wurde. Bereits 1944 musste die dortige Siliziumproduktion aus Koksmangel jedoch wieder eingestellt werden. Als Ersatz wurde auf dem Werksgelände ein Zerlegebetrieb für beschädigte Flugzeuge eingerichtet. 1947 erhielten die VAW vom Kontrollrat der Alliierten dann die Genehmigung zur Produktion von Ferrosilizium, das dringend in der deutschen Stahlindustrie benötigt wurde. Silizium durfte zunächst nicht erneut hergestellt werden, da es unter die Kategorie „kriegsverwertbar“ fiel. Zwischen 1948 und 1969 produzierten die VAW im Rottwerk (RW) nur Ferrosilizium. Der Standort Pocking war günstig gewählt, da hier die Rott und der Inn vorbeifließen und am Inn günstiger Strom an einer Wasserstufe gewonnen werden konnte. Heute stammt der im Werk benötigte Strom größtenteils aus einem über eine Direktleitung angeschlossenen Wasserkraftwerk am Inn sowie aus den zahlreichen landwirtschaftlichen PV-Anlagen in der Umgebung. Zudem dienen und dienen (in abnehmender Menge) hochwertiger Gangquarz aus Steinbrüchen im Bayerischen Wald („Bayer-

ischer Pfahl“) sowie (in zunehmender Menge) Quarzkiese aus nahen Kiesgruben in Niederbayern, Oberösterreich (derzeit vorwiegend) und Tschechien als Siliziumrohstoff. Als Reduktionsmittel findet derzeit ein Mix aus durchschnittlich 68 % gewaschene Steinkohle aus Kolumbien (z. T. 5 % Petrolkoks), 25 % Holzkohle aus Polen, der Ukraine oder dem Balkan sowie 7 % möglichst grobe Holzhackschnitzel aus verschiedenen Sägewerken Verwendung. Ab 1969 stellten die VAW die Produktion wieder allmählich auf Silizium um. 1998 übernahm die Graphit Kropfmühl AG, seit 2008 ein Unternehmen der niederländischen AMG Advanced Metallurgical Group N.V., das Rottwerk. Heute verfügt die **RW silicium GmbH** in ihrer Hütte in Pocking über vier Elektrolichtbogenöfen mit einer Gesamtanschlussleistung von 62 MW (entsprechend 46,5 MVA) bzw. eine Kapazität von 31.000 tpa Rohsilizium > 98,5 % Si, das v. a. in der Produktion von Silikonen bei der Wacker Chemie AG in Burghausen (s. u.), untergeordnet, aber auch in der Aluminiumherstellung in Deutschland und Österreich Verwendung findet. Zusätzlich können jährlich bis zu 22.000 t sehr hochwertiges Mikrosilika für die internationale Feuerfestindustrie produziert werden.

Die ASK Chemicals GmbH mit Sitz in Hilden, nahe Düsseldorf, entstand im Jahr 2010 durch Zusammenschluss der Gießereiparten der US-amerikanischen Ashland Inc. und der damals noch deutschen Süd-Chemie AG. Im Jahr 2014 wurde die ASK Chemicals an das US-amerikanische Private-Equity-Unternehmen Rhône Group LLC verkauft. Mit Fertigungsstätten in Deutschland, Spanien, Tschechien, Brasilien, China, Japan, Südkorea und den USA ist ASK Chemicals ein globaler Anbieter von industriellen Hochleistungsharzen und -materialien. Die Produkte des Unternehmens kommen hauptsächlich in Gießereien und bei der Herstellung von Schleifmitteln und feuerfesten Materialien, in der Papierimprägnierung, in Beschichtungen, zur Isolierung und in Verbundwerkstoffen zum Einsatz. In Hart an der Alz, Gemeinde Garching an der Alz, im oberbayerischen Landkreis Altötting, produziert die **ASK Chemicals Metallurgy GmbH** in zwei Elektroniederschächten mit je



**Abb. 49: Blick auf die Siliziumhütte der RW silicium GmbH in Pocking in Niederbayern, Foto: BGR.**

12 MVA-Anschlussleistung und einer Gesamtkapazität von 35.000 tpa Ferrosilizium und daraus je nach Kundenwunsch spezielle Vorlegierungen, Impfmittel und Fülldrähte. Als Quarzrohstoffe kommt Quarz aus dem Bayerischen Wald, Österreich und anderen europäischen Ländern zum Einsatz.

Die **Wacker Chemie AG** mit Hauptsitz in München wurde 1914 gegründet und wird seit 2001 wieder mehrheitlich von der Familie Wacker kontrolliert. Das Unternehmen hat seine Aktivitäten in vier Geschäftsbereiche aufgeteilt, die überwiegend von den zwei Hauptrohstoffen Ethylen und Silizium ausgehen. Aufbauend auf Silizium erzeugt der Geschäftsbereich „Polysilicon“ in Burghausen in Bayern, Nünchritz in Sachsen sowie Charleston in Tennessee/USA Chlorsilane und hochreines Polysilizium nach dem Siemens-Verfahren sowohl für die Halbleiter- wie auch für die Solarindustrie. Im Bereich Halbleitersilizium verfügt Wacker über einen weltweiten Marktanteil von rund 50 %. Der Geschäftsbereich „Silicones“ mit Fertigungsstätten in Deutschland (Burghausen und Nünchritz), Tschechien (Pilsen), Norwegen (Holla), Südkorea (Jincheon), China (Zhangjiagang, Jining und Shunde – JV mit Dymatic Chemicals, Inc.), USA (Adrian/Michigan,

Chino/Kalifornien, North Canton/Ohio, Charleston/Tennessee), Brasilien (Jandira), Indien (Kalkutta und Panagarh – JV mit Metroark Chemicals Pvt. Ltd.) und Japan (Tsukuba – JV mit Asahi Kasei Chemicals Corp.) bedient Märkte in den Bereichen Bauindustrie, Automobil, Chemie, Kosmetik, Farben und Lacke, Textilien und Papier, Energie, Elektronik, Medizintechnik. Ausgehend von Ethylen und Essigsäure erzeugt der Geschäftsbereich „Polymers“ die Zwischenstufen VAM (Vinylacetatmonomer) und VAE (Vinylacetat-Ethylen) und stellt daraus VAE-Dispersionen und VAE-Dispersionspulver insbesondere für die Bauindustrie her. Der vierte Geschäftsbereich „Biosolutions“ konzentriert sich auf biotechnologisch hergestellte Produkte.

Bereits kurz nach dem Zweiten Weltkrieg begann Wacker mit Forschungsarbeiten zu Silikonen. Im Jahr 1949 wurde ein erster Silanreaktor in Betrieb genommen und in den nächsten Jahren die Silikonproduktpalette deutlich erweitert. Im Jahr 1953 wurde in Burghausen mit der Produktion von Polysilizium begonnen, seit 1959 im kommerziellen Maßstab mit einer Produktionsmenge von 530 kg im gleichen Jahr. 1960 lag die Kapazität in Burghausen bei ca. 1 tpa Polysilizium, die bis 2004 auf 5.000 tpa Polysilizium

(heute offiziell 40.000 tpa) gesteigert wurde, was damals einem Weltmarktanteil von knapp unter 20 % entsprach. Erst seit dem Jahr 2000 wird von Wacker auch spezielles Solarsilizium (> 11N) hergestellt, während zuvor ausschließlich Polysilizium für die Halbleiterindustrie (12N) produziert wurde. Im Jahr 2023 kündigte Wacker an, seine zur Halbleitersiliziumproduktion notwendigen Ätzkapazitäten im Werk Burghausen ausbauen zu wollen, um damit besser auf eine erhöhte Nachfrage seitens der weltweiten Halbleiterindustrie reagieren zu können. Im 1998 erworbenen Werk Nünchritz begann die Polysiliziumproduktion im Oktober 2011 (offizielle Kapazität: 20.000 tpa); dort wird traditionell Polysilizium für die Solarindustrie hergestellt. Das neue Werk Charleston in Tennessee/USA wurde

im April 2016 (offizielle Kapazität: 20.000 tpa) eröffnet. Rohsilizium zur zumindest teilweisen Eigenversorgung produziert Wacker zudem seit dem Jahr 2010 am norwegischen Standort Holla (s. Norwegen, Kapazität: 100.000 tpa). Die restliche Menge des von Wacker benötigten Rohsiliziums wird gegenwärtig vor allem aus weiteren europäischen Ländern, Kanada, Island, Brasilien, Südafrika und Australien bezogen (CRAWFORD & MURPHY 2023, vgl. Tab. 46).

Ein Großteil des von Wacker produzierten Polysiliziums wird exportiert, über 70 % davon nach China (s. Tab. 47). Der in Deutschland verbleibende Anteil dient v. a. zur Versorgung des Waferproduzenten Siltronic AG (s. u.).

**Tab. 45: Produktion von Silizium (Si) und Ferrosilizium (FeSi) (in t) in Deutschland, Quelle: Firmenberichte und Firmenangaben. n. v. = nicht verfügbar.**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	29.349	29.865	29.379	29.092	27.620	30.105	30.134	28.574	30.283
FeSi	17.733	18.369	18.272	22.379	13.400	11.908	18.859	17.947	15.411
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	29.253	30.548	29.940	31.915	28.058	29.606	30.234	31.318	27.053
FeSi	17.190	18.749	19.592	n. v.	16.577	16.299	11.518	16.109	13.306

**Tab. 46: Importe von Rohsilizium (in t) durch Deutschland seit 2015, nach GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Norwegen	67.790	89.976	77.492	72.276	88.523	104.747	128.063	128.079
Frankreich	46.721	72.131	71.802	73.335	61.320	57.062	60.363	49.888
Brasilien	9.695	30.848	25.549	50.307	24.922	24.044	25.745	33.709
China	68.136	42.321	45.441	43.802	36.895	18.171	10.415	9.420
Malaysia	23	51	0	2	164	638	7.566	5.495
Australien	13.657	10.937	12.065	16.118	6.834	11.576	5.662	5.486
Island	0	0	171	355	4.121	3.023	1.879	4.516
Andere	34.746	45.197	39.609	38.437	32.312	21.643	24.672	25.030
<b>Summe</b>	<b>240.768</b>	<b>291.461</b>	<b>272.129</b>	<b>294.632</b>	<b>255.091</b>	<b>240.904</b>	<b>264.365</b>	<b>256.673</b>

Tab. 47: Exporte von Polysilizium (in t) aus Deutschland, nach GLOBAL TRADE TRACKER (2023).  
Daten vor 2009 sind nicht verfügbar.

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Gesamt	20.378	29.475	33.102	39.032	44.204	54.064	51.866
davon nach China	6.127	9.776	13.146	21.029	23.425	31.481	31.433
Anteil China (%)	30,1	33,2	39,7	53,9	53,0	58,2	60,6
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Gesamt	53.749	60.755	57.566	63.660	60.417	66.008	65.722
davon nach China	36.480	47.061	42.759	49.721	48.118	50.921	47.158
Anteil China (%)	67,9	77,5	74,3	78,1	79,6	77,1	71,8

Die im Jahr 2004 gegründete **Siltronic AG** geht mit ihren Anfängen auf das Jahr 1953 zurück und war zu dieser Zeit noch ein Tochterunternehmen der Wacker Chemie AG. Nach Börsengang der Siltronic AG im Jahr 2015 hält Wacker derzeit noch 30,83 % der Anteile. Siltronic, mit Sitz in München, ist zusammen mit den Marktbegleitern Shin-Etsu Chemical Co., Ltd./Japan, SUMCO Corp./Japan, GlobalWafers Co., Ltd./Taiwan und SK Siltron Inc./Südkorea einer der weltgrößten Produzenten von Wafern für die Halbleiterindustrie. Am Firmengründungsort Burghausen zieht das Unternehmen Einkristalle und fertigt Siliziumwafer mit Durchmesser bis 300 mm. In Singapur fertigt Siltronic 300-mm-Siliziumstäbe sowie 200-mm- und 300-mm-Wafer, im sächsischen Freiberg 300-mm-Einkristalle und auch 300-mm-Wafer. In Portland/Oregon/USA stellen Mitarbeiter auf Basis der in den deutschen Siltronic-Werken gezüchteten Siliziumkristalle 200-mm-Wafer her. Im Jahr 2022 hat das Unternehmen den Rohstoff Polysilizium als seinen wichtigsten Rohstoff definiert und seine Lieferkette detailliert analysiert. Ziel war es sicherzustellen, dass in keiner dieser Stufen ein Unterlieferant für das Unternehmen tätig wird, der an öffentlich bekannten Verletzungen von Menschenrechten beteiligt ist. Dieses ist als Resultat der aufwendigen Analyse gelungen, wobei das Unternehmen Polysilizium sowohl aus deutschen, US-amerikanischen, japanischen

und koreanischen Quellen einsetzt (SILTRONIC AG, frdl. mdl. Mitt.).

Weitere (geplante) Produzenten von Wafern auf Siliziumbasis für die Halbleiterindustrie mit Fertigungsstätten in Deutschland sind:

- Die 1997 noch in der Form einer AG gegründete heutige **SiCrystal GmbH** aus Nürnberg ist seit dem Jahr 2009 ein Tochterunternehmen der japanischen ROHM Co., Ltd. SiCrystal produziert in Nürnberg Wafer aus Siliziumkarbid.
- **NexWafe GmbH** mit Sitz in Freiburg ist ein Start-up-Unternehmen, das im Jahr 2015 aus dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE ausgegliedert wurde. Es plant(e) ab 2022 mit einer neuartigen, patentierten und kostengünstigeren Technik im Bitterfelder Industriepark Siliziumwafer für die Solarindustrie zu erzeugen.

Unternehmen, die aufbauend auf Siliziumwafern in Deutschland Halbleiter herstellen, sind:

- Robert Bosch GmbH in Dresden (Si) und Reutlingen (SiC)
- Diotec Semiconductor AG in Heitingen
- X-FAB Silicon Foundries SE in Dresden und Erfurt

- Nexperia B.V. in Hamburg
- Infineon Technologies AG in Warstein, Regensburg und Dresden
- Global Foundries, Inc. in Dresden
- Littelfuse, Inc. bzw. Littelfuse – IXYS Semiconductor GmbH in Lampertheim
- Elmos Semiconductor SE in Dortmund
- PREMA Semiconductor GmbH in Mainz
- SAW COMPONENTS Dresden GmbH in Dresden
- Vishay Intertechnology, Inc. in Heilbronn, Landshut, Heide und Itzehoe
- Qualcomm, Inc. in München
- Texas Instruments, Inc. in Freising
- TDK-Micronas GmbH in Freiburg
- Geplant: Wolfspeed, Inc. in Ensdorf (SiC)
- Geplant: Intel Corporation in Magdeburg
- Geplant: TSMC in Dresden

Folgende Unternehmen fertigen Solarzellen bzw. -module auf Siliziumbasis in Deutschland:

- Die schweizerische Meyer Burger Technology AG ist seit 1983 in der Photovoltaikindustrie tätig. Im Jahr 2021 eröffnete das Unternehmen durch seine Tochterfirma **Meyer Burger (Industries) GmbH** in Freiberg eine eigene Solarmodulproduktion, die mit einer Jahreskapazität von 400 MWp startete und auf 1 GWp ausgebaut werden soll. Auch die zur Modulproduktion benötigten Zellen kommen seit 2021 aus einem eigenen Werk in Bitterfeld-Wolfen. Dieses soll nach Ausbau (mittlerweile auf unbestimmte Zeit verschoben) eine Kapazität von 1,4 GWp erreichen.
- Seit dem Jahr 2003 fertigt die seit Beginn familiengeführte **Heckert Solar GmbH** am Standort Chemnitz mit einer Kapazität von derzeit 300 MWp Solarmodule. An einem zweiten Produktionsstandort in Langenwetzendorf/Thüringen sollen zukünftig ebenfalls Solarmodule mit einer Kapazität von über 400 MWp entstehen.
- Die **SOLARA GmbH** aus Hamburg fertigt seit dem Jahr 2001 am Standort Wismar Solarmodule für den Einsatz auf Dächern von Wohnmobilen und Ferienhäusern, auf Segelyach-

ten, für Parkscheinautomaten oder andere technische Anlagen. Zudem dienen die SOLARA-Module der Elektrifizierung abgelegener Dörfer und Häuser in Schwellen- und Entwicklungsländern.

- Auch die **CS Wismar GmbH Sonnenstromfabrik** fertigt Solarmodule in Wismar.
- Die Solarwatt Solar Systeme GmbH wurde 1993 gegründet und fertigt als heutige **Solarwatt GmbH** in Dresden Solarmodule, Batteriespeicher und Energiemanagementsysteme.
- Die **Solar Fabrik GmbH** produziert seit über 20 Jahren Solarmodule in Freiburg und seit 2021 auch am Standort Laufach im Spessart.
- Die **aleo solar GmbH** fertigt seit dem Jahr 2001 und seit 2014 in Zusammenschluss mit der Sino-American Silicon Products Inc. aus Taiwan Solarmodule am Standort Prenzlau.
- **AxSun Solar GmbH & Co. KG** produziert seit 2009 Solarmodule in Laupheim-Baustetten.
- Die britische Oxford PV entstand im Jahr 2010 als Spin-off der Universität Oxford. In Brandenburg an der Havel plant die **Oxford PV Germany GmbH** Ende 2023 die weltweit erste Serienfertigung für Perowskit-auf-Silizium-Tandemsolarzellen in Betrieb zu nehmen.

Die **Silicon Products Group** aus Bitterfeld-Wolfen begann im Jahr 2006 mit Planungen zur eigenständigen Produktion von Polysilizium, eröffnete 2008 ein entsprechendes Werk und stellte ein Jahr später dann auch Polysilizium in Solarqualität her. Im Jahr 2013 gelang die Produktion von polykristallinem Ausgangsmaterial für die Herstellung von monokristallinem Silizium nach dem Zonenschmelzverfahren für den Halbleitermarkt. Aufgrund der großen chinesischen Konkurrenz wurde vor einigen Jahren die eigene Produktion von poly- und monokristallinem Silizium jedoch wieder eingestellt. Derzeit stellt das Unternehmen nur noch Siliziumkarbid für die Halbleiterindustrie her. Die Silicon



Products Group ist jedoch auch Anbieter von Forschungs-, Planungs- und Ingenieurdienstleistungen rund um die Produktion von Polysilizium und monokristallinem Silizium sowohl für die Solar- als auch Halbleiterindustrie und berät diesbezüglich Kunden und Produzenten in aller Welt.

Im Zeitraum 1981–1982 ließ das ehemalige Ministerium für Geologie der DDR die Eignung von 14 quartären, tertiären und buntsandsteinzeitlichen Quarzkiesvorkommen der DDR auf ihre Eignung als „Si-Rohstoffe für Sonderanwendungen“ hin überprüfen. Analysiert wurden die chemische Zusammensetzung verschiedener Korngrößenfraktionen (GV,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  und  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), zudem Feuerfestigkeit, Kornform, Reindichte, Verdichtungsverhalten (Schüttdichte, Rütteldichte), Wärmeausdehnung und die „Haltezeit“ bei 1.560 °C. Wirtschaftsgeologisch wurden die Korngrößenzusammensetzung der Rohkiessande, die Petrographie, die Vorräte, die Infrastruktur und die geologische Entstehung mit in die Bewertung einbezogen. Als Ergebnis stellten sich besonders die gröberen und tertiären und davon wiederum die eozänen Quarzkiese als für

die Ferrosilizium- und auch Rohsiliziumproduktion geeignet heraus (SCHÖNE & LANGE 1982). Im schon vor 40 Jahren genannten Kieswerk Nobitz erfolgt auch derzeit zeitweise die Produktion von Quarzkiesen für die Rohsiliziumproduktion.

Auch die Quarzkiese aus den Quarzkiessandvorkommen westlich von Bonn sind nachweislich sehr gut (Prof. Dr. Wotrube, RWTH Aachen, frdl. schriftl. Mitt.) und die Quarzkiese aus den Kiessandvorkommen in Niederbayern, diese nach intensiver Aufbereitung, gut für die Roh- und Ferrosiliziumproduktion geeignet.

In den Steinbrüchen der langjährigen Lieferquelle für die bayerische Siliziumindustrie, dem „Bayerischen Pfahl“ (vgl. ELSNER 2018), lässt die Qualität des abgebauten Quarzes durch Einschlüsse von Kaolin (zu hohe Al-Gehalte) dagegen langsam nach. Zudem sinkt die verfügbare Quarzmächtigkeit, wodurch der Gewinnaufwand (Sprengen, Baggern, Waschen, Abraum) und damit die Abbaukosten steigen. Naturschutzrechtliche Vorgaben beschränken zudem eine Ausweitung der Gewinnung auf neue, noch nicht ausgesteinte Gebiete (Dr. H. Hock, ASK Chemicals GmbH, frdl. schriftl. Mitt.).



## Frankreich

Frankreich ist ein bedeutender Produzent von Rohsilizium, untergeordnet auch Ferrosilizium, wobei vier der ursprünglichen fünf Hütten (das Werk Château-Feuillet wurde im Jahr 2021 stillgelegt) im Jahr 2003 mit dem ehemaligen Industriekonzern Pechiney Électro-Métallurgie zu dem Aluminium-Unternehmen Alcan wechselten. Dieses verkaufte sie zwei Jahre später für 140 Mio. US\$ an die damalige spanische Grupo FerroAtlantico, bzw. dessen Tochterunternehmen FerroPem, weiter. Im Jahr 2015 wiederum schlossen sich die Grupo FerroAtlantico und die US-amerikanische Globe Speciality Metals zur heutigen Ferroglobe plc mit Sitz in Großbritannien zusammen.

Ferroglobe betreibt in Frankreich folgende Hütten:

- Les Clavaux, mit Standort in Gavet, im Tal von La Romanche, Provinz l'Isère, rund 140 km von Genf und Lyon entfernt. Diese Hütte wurde bereits 1898 von der Compagnie Universelle d'Acétylène errichtet und hat in ihrer Geschichte schon verschiedene Ferro- und Siliziumlegierungen geliefert. Seit 1980 produziert sie mit ihren drei Öfen (12 MW-, 26 MW- und 28 MW-Anschlussleistung) und einer Kapazität von 38.000 tpa jedoch fast nur noch Rohsilizium zzgl. Mikrosilika. Zusätzlich ist bei Bedarf die Herstellung von Calciumsiliciden möglich.
- Montricher, mit Werk im Zentrum des Tals von Maurienne, Provinz Savoie, nahe der Grenze zu Italien und ca. 200 km von Genf und Lyon entfernt. Die Hütte wurde im Jahr 1914 von der Société Electrométallurgique de Montricher erbaut und hat ebenfalls schon verschiedenste Arten von Ferrolegierungen produziert. Seit 1984 dienen ihre drei Öfen (25 MW- und 2 × 17 MW-Anschlussleistung) ebenfalls nur noch der Produktion von Rohsilizium (Kapazität: 33.000 tpa) und Mikrosilika. In Montricher soll zukünftig auch reines

Siliziummetall, geplant in den Qualitäten 3N und 4N, erzeugt werden.

- Anglefort, mit Standort in der gleichnamigen Gemeinde im Rhôneal, Provinz l'Ain, ca. 50 km von Chambéry und Genf entfernt. Die Hütte wurde ursprünglich im Jahr 1964 durch die Firma Nobel Boze zur Produktion von Ferrosilizium eröffnet, produziert jedoch seit 1977 mit ihren beiden 33 MW-Öfen nur noch Rohsilizium (Kapazität: 38.000 tpa) und Mikrosilika.
- Laudun, mit Produktionsstandort in Laudun-L'Ardoise, Provinz Gard, rund 100 km von Montpellier, 120 km von Marseille bzw. 200 km von Lyon entfernt. Die Hütte wurde 1958 von der Keller & Leleux Company eröffnet und besitzt mit ihren drei Öfen (16 MW-, 25 MW- bzw. 35 MW-Anschlussleistung) eine Kapazität von 25.000 tpa FeSi inkl. FeSi 75 % HP und seit Umbau eines Ofens im Jahr 2007 zudem auch 14.000 tpa Si zzgl. Mikrosilika. Das in Laudun hergestellte FeSi 75 % HP findet Verwendung hauptsächlich in der Produktion von Stahlcords.
- Pierrefitte, liegt in Pierrefitte Nestalas im Tal von d'Argelès Gazost, Provinz Hautes Pyrénées, rund 200 km von Toulouse, 100 km von Pau und 40 km von Tarbes entfernt, nahe der Grenze zu Spanien. Das Werk wurde im Jahr 1912 durch die Société Pyrénéenne du Silico Manganèse eröffnet und produzierte danach verschiedene Ferro- und Siliziumlegierungen. Im Jahr 1981 spezialisierte sich das Werk auf die Produktion von Impfmitteln für die Stahlproduktion und im Jahr 2011 zusätzlich auf das Umschmelzen und die Veredelung von FeSi und Si. Ein Ofen mit 16 MW-Anschlussleistung dient der Produktion von FeSi-basierten Spezialgusslegierungen, zwei 3 MW-Induktionsöfen zudem der Produktion von Si-basierten Legierungen (Gesamtkapazität 26.000 tpa).

Die französischen Hütten von Ferroglobe plc besitzen nach Unternehmensangaben derzeit zusammen eine Kapazität von 112.000

bis 140.000 tpa Rohsilizium bzw. 45.000 bis 85.000 tpa Ferrosilizium (bzw. FeSi-basierten Legierungen).

Soweit bekannt, dienen in Frankreich vor allem Quarzkiese zur Produktion von Silizium bzw. Ferrosilizium. Bedeutendster französischer Produzent dieser Art von Quarzkiesen ist das Industriemineralunternehmen Imerys S.A. über seine Firmentochter Imerys Ceramics France. Diese betreibt seit mehreren Jahrzehnten im Südwesten Frankreichs, im Département Dordogne, Quarzkiesgruben in den Gemeinden Saint-Jean-de-Côle und Saint-Pierre-de-Côle (Imerys Quartz de Dordogne, Produktion ca. 150.000 tpa) sowie Thédillac (Imerys Quartz et Sables du Lot, Produktion ca. 130.000 tpa). Nach Angaben von Imerys wurden bisher v. a. die Siliziumhütten von Ferroglobe plc, Wacker Chemie AG und Elkem ASA mit Quarzkies aus diesen Gruben beliefert.

Am wichtigsten französischen Stahlstandort Dünkirchen (Dunkerque) ging im Jahr 1978 die Compagnie Universelle d'Acétylène et d'Électro-Métallurgie mit einem Werk für Manganlegierungen in Produktion. Einige Jahre später wurde das Werk von der Pechiney Gruppe erworben, dann von Comilog, einem Manganproduzenten aus Gabun, der wiederum im Jahr 1996 vom französischen Bergbau- und Hüttenkonzern Eramet S.A. übernommen wurde. Die Hütte von Comilog Dunkerque besitzt einen Ofen mit einer Anschlussleistung von 34 MW und eine offizielle Kapazität von 70.000 tpa FeSiMn. Im Jahr 2021 wurden in Dünkirchen rund 68.000 t FeSiMn produziert.

Seit 1990 fertigt die EDF ENR PWT (Photowatt) am Standort Bourgoin-Jallieu im Département Isère aus zugekauftem Polysilizium Siliziumstäbe, daraus Siliziumblöcke, sägt dann daraus Wafer, lässt diese (extern?) zu Zellen fertigen und produziert dann wiederum selbst daraus Solarmodule mit einer Kapazität von 500 MWp.

**Tab. 48: Produktion von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in Frankreich, Quelle: BRITISH GEOLOGICAL SURVEY WORLD MINERAL PRODUCTION (versch. Jahre).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	100.000	100.000	120.000	118.000	80.000	112.000	128.000	110.000	100.000
FeSi	67.000	67.000	31.000	30.000	18.300	27.000	59.000	63.300	49.600
FeSiMn	52.300	63.300	65.400	60.200	54.100	62.400	63.400	68.500	64.900
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	123.000	151.000	80.000	149.000	138.000	105.000	87.000	87.000	n. v.
FeSi	40.000	45.000	45.000	50.000	50.000	48.000	41.000	41.000	n. v.
FeSiMn	64.800	65.100	58.223	58.443	56.652	68.000	62.000	62.000	n. v.



## Gabun

Das französische Bergbau- und Hüttenunternehmen Eramet S.A. betreibt seit 1996 über seine Mehrheitsbeteiligung (Anteil 63,7 %) Com-

pagnie Minière de l'Ogooué S.A. (Comilog) in Gabun die Moanda Manganerzmine, der der Hüttenkomplex Complexe Métallurgique de Moanda (MMC) angeschlossen ist. Dieser verfügt über eine Kapazität von 20.000 tpa Mn-Metall sowie 65.000 tpa Ferrosilikomangan und ging im Dezember 2014 in Produktion.

**Tab. 49: Weltweite Importe von Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Gabun seit dem Jahr 2003, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FeSiMn	0	0	0	14	0	0	36	0	0
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSiMn	1.016	7.286	28.120	25.224	37.213	32.502	47.749	23.390	34.959



## Georgien

Georgien ist seit 1933 ein Produzent von Ferrolegierungen. Produziert werden sie seit dieser Zeit auf dem mehr als 130 ha Fläche umfassenden Werksgelände der Zestafoni Hütte am Ufer des Flusses Kvirila, Region Imereti. Die Hütte liegt in Nachbarschaft der Chiatura Manganerzmine und des Vartsikhe Wasserkraftwerks, das beide mit Strom versorgt. Die Hütte verfügt über zwölf Lichtbogenöfen (Kapazität: 250.000 tpa FeSiMn und 400.000 tpa FeMn), eine Agglomerierungsanlage sowie ein Manganbrikkettwerk. Bergwerk, Hütte, Wasserkraftwerk und eine Handelsgesellschaft befinden sich seit dem Jahr 2013 in Besitz der US-amerikanischen Georgian American Alloys Inc. (GAA), die wiederum ein Unternehmen der ukrainischen Privat-Gruppe ist.

Auch die russische RUSALLOYS Ltd. gehört seit 2005 zu den Produzenten von Ferrosilikomangan in Georgien. Die Hütte dieses Unternehmens liegt in der Industriestadt Rustavi, unweit der Hauptstadt Tbilisi, und ist mit zwei offenen Lichtbogenöfen mit je 9 MVA-Anschlussleistung ausgestattet. Das eingesetzte Manganerz stammt aus eigenen Bergwerken in Westgeorgien bzw. der Aufbereitungsanlage in Terjola. Hergestellt wird FeSiMn mit einer Kapazität von 26.400 tpa.

Weitere Produzenten von Ferrosilikomangan in Georgien sind:

- Ecometall LLC mit einer Hütte, ebenfalls in Zestafoni, die Ende 2007 in Betrieb ging. Ihre Kapazität liegt bei 9.600 tpa FeSiMn, die Produktionsmenge im Jahr 2008 lag bei 4.616 t, im Jahr 2009 bei 12.517 t und im Jahr 2010 bei 4.751 t.
- GTM Group Ltd. mit einer Hütte im Dorf Argveta, Region Imereti. Diese ging im Mai 2007 in Produktion. Weiteres ist nicht bekannt.
- Chiaturmanganum Georgia LLC wurde im Jahr 2008 gegründet und betreibt zwei Hütten an den Produktionsstandorten Rustavi und im Dorf Nakhshirgele. Die Gesamtkapazität beider Hütten liegt bei 40.000 tpa FeSiMn und HCFeMn.
- Georgian Alloys Group Ltd. mit Hütte ebenfalls in der Industriestadt Rustavi, in der FeSiMn, HCFeMn und FeSi produziert werden sollen.

Im Jahr 2022 soll zudem eine Siliziumhütte im Hualing Industriegebiet der Stadt Kutaisi durch die chinesische Hualing Corp. eröffnet worden sein. Die für die Produktion benötigten Rohstoffe sollen vollständig importiert und das Rohsilizium vollständig, v. a. nach Zentralasien und in die Ukraine, exportiert werden. Näheres ist noch nicht bekannt.

**Tab. 50: Produktion von Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in Georgien, Quelle: BRITISH GEOLOGICAL SURVEY WORLD MINERAL PRODUCTION (versch. Jahre).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FeSiMn	109.414	116.945	107.986	123.468	112.016	203.791	242.746	257.421	253.361
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSiMn	256.677	217.300	224.228	289.765	335.013	291.608	223.799	322.877	n. v.



## Indien

Nach INDIAN BUREAU OF MINES (2023a) kommen Quarzadern oder Pegmatite in nahezu allen Bundesstaaten Indiens vor. Quarzitvorkommen sind demnach unter anderem bekannt aus Andhra Pradesh, Bihar, Delhi, Haryana, Karnataka, Kerala, Madhya Pradesh, Rajasthan, Tamil Nadu sowie Uttar Pradesh. Quarze sind dokumentiert aus Gujarat, Uttar Pradesh, Tamil Nadu, Andhra Pradesh, Maharashtra, Madhya Pradesh, Karnataka und Punjab.

Die gesamten Reserven/Ressourcen an Quarz und Quarzsand in Indien werden auf 3,9 Mrd. t geschätzt, von denen 647 Mio. t (17 %) als Reserven ausgewiesen sind, während 3,26 Mrd. t (83 %) Ressourcen darstellen. Die Gesamtvorräte an Quarzit im Land werden auf 1,66 Mrd. t geschätzt, von denen 95 % als Ressourcen klassifiziert sind. Landesweit befinden sich große Ressourcen vor allem in Haryana (53 %), gefolgt von Bihar (17 %), Odisha (8,5 %), Maharashtra (5,5 %), Punjab (5 %) und Jharkhand (2,5 %).

Die indische Stahlindustrie ist die zweitgrößte der Welt nach China. 2019 überholte Indien Japan mit seinem Gesamtoutput an Rohstahl. Entsprechend umfangreich ist auch die Produktion an Ferrolegierungen wie Ferrosilikomangan und Ferrosilizium.

Laut INDIAN BUREAU OF MINES (2023) ist die Ferrolegierungsindustrie in Indien aufgrund hoher Stromkosten nicht voll ausgelastet. 40 bis 70 % der Gesteungskosten gibt die Industrie für ihren Stromverbrauch aus. Die nicht im Inland benötigten Mengen an Ferromangan, Ferrosilikomangan, Ferrosilizium, kohlenstoffreichem Ferrochrom und Chargechrom werden exportiert, was den Hauptanteil der verkauften Mengen ausmacht. Nach Angaben der Indian FERROALLOYS PRODUCERS' ASSOCIATION (IFAPA) liegt die installierte Produktionskapazität für Ferrolegierungen in Indien bei ca. 5,1 Mio. tpa, wobei 50.000 tpa edle Ferrolegierungen sind (Ferromolybdän, Ferrovandium, Ferrowolfram, Ferrosilikomagnesium, Ferrobör, Ferrotitan usw.). Die Kapazitäten für Ferrosilizium liegen nach Indian BUREAU OF MINES (2023) bei ca. 250.000 tpa in 19 Werken, die von Ferrosilikomangan dagegen bei ca. 1,72 Mio. tpa in 60 Werken.

Die meisten Ferrolegierungswerke wurden aufgrund der Rohstoffverfügbarkeit und der ununterbrochenen Energieversorgung in Andhra Pradesh errichtet, ebenso wie in Chhattisgarh, Jharkhand, Karnataka, Madhya Pradesh, Maharashtra, Odisha und Westbengalen. In jüngster Zeit hat sich die Industrie weiter in den Nordosten Indiens verlagert. So sind auch in Meghalaya kleinere Werke zur Herstellung von Ferrosilizium und Ferrosilikomangan entstanden.

**Tab. 51: Produktionskapazitäten (in tpa) von Ferrosilikomangan nach Bundesstaaten**  
(Quelle: INDIAN BUREAU OF MINES (2023). k. A. = keine Angaben.)

Bundesstaat	Unternehmen, Werkstandort	Kapazität (tpa)
Andhra Pradesh	Andhra Ferro-Alloys Ltd., Vizianagaram	20.000
	Facor Alloys Ltd., Vizianagaram	72.500
	Deccan Ferro Alloys Ltd., Vizianagaram	30.000
	Siri Smetters & Energy Pvt. Ltd., Vizianagaram	8.500
	Maithan Alloys Ltd., Visakhapatnam	120.000
	MDA Mineral Dhatu AP Pvt. Ltd., Vizianagaram	11.000
	Srinivasa Ferro Alloys Ltd, Visakhapatnam	26.000

Bundesstaat	Unternehmen, Werkstandort	Kapazität (tpa)
Andhra Pradesh	Sri Raghvendra Ferro Alloys Pvt. Ltd., Nalgonda	18.000
	Sri Balaji Electro Smelters Ltd., Hyderabad	4.650
	Anjaney Alloys Ltd., Visakhapatnam	120.000
Chhattisgarh	Ispat Godawari Power & Ispat Ltd. (GPIL), Raipur	16.500
	Hira Ferro Alloys Ltd. (HFAL), Raipur	61.500
	Indsil Energy & Electro Chemicals Ltd, Raipur	19.200
	Monnet Ispat Ltd., Raipur	50.000
	Tirumala Balaji Alloys Pvt. Ltd., Raigarh	k. A.
	Vandana Global Ferroton, Raipur	36.000
	Alok Ferro-Alloys Ltd., Raipur	18.000 (Ferrolegierungen gesamt)
	Sarda Energy & Minerals Ltd., Raipur	k. A.
	Chhattisgarh Electricity Co. Ltd., Raipur	k. A.
	Nav-chrome Ltd., Raipur	k. A.
	VA Power & Steel Ltd., Raigarh	14.400
	Orion Ferro Alloys, Raigarh	8.000
	Jindal Steel & Power Ltd., Raigarh	k. A.
	Sai Chemicals Pvt. Ltd., Rajnandgaon	10.200
	MSP Sponge Iron Ltd., Raigarh	42.057
	Union Ferro, Raigarh,	k. A.
Prakash Industries, Raigarh	k. A.	
Goa	Karthik Alloys Ltd.	25.500
Gujarat	SAL Steels Ltd., Gandhidham	61890
Jharkhand	Anjaneya Ferro Alloys Ltd. • Mihijam/Jharkhand • Vizag/Andhra Pradesh	41.850
	Gautam Ferro Alloys Ltd.	34.000
	Shivam Iron & Steel Co. Pvt. Ltd • Giridih • Koderma	k. A.
	Adhunik Meghalaya Steels Pvt. Ltd	50.000 (Ferrolegie- rungen gesamt)
	Castron Technologies Ltd., Bokaro Industrial Area	k. A.
Karnataka	Sandur Manganese & Iron Ores Ltd., Ballari	36.000
	Thermit Alloys Pvt. Ltd., Shivamogga	k. A.
	Padmavati Ferrous Ltd., Ballari	5.000
Kerala	The Silcal Metallurgic Ltd., Palakkad	3.600

Rohstoffrisikobewertung – Silizium und Ferrosilikolegerungen  
Zwischenprodukte auf Basis von Quarz

Bundesstaat	Unternehmen, Werkstandort	Kapazität (tpa)
Kerala	Indsil Electros melt Ltd., Palakkad	k. A.
	Indsil Energy & Electro Chemicals Ltd., Palakkad	14.000
	Indsil Hydro Power & Manganese Ltd., Rajakkad	19.200
Madhya Pradesh	Jalan Ispat Castings Ltd., Jhabua	12.000
	S.R Ferro Alloys, Jhabua	8.639
Maharashtra	Chandrapur Ferro Alloys/SAIL, Chandrapur	130.000
	Nagpur Power Ind. Ltd., Kanhan	k. A.
	Natural Sugar & Allied Ind. Ltd., Osmanabad	16.500
Meghalaya	Shyam Century Ltd., Byrnihat	k. A.
	Meghalaya Sova Ispat Ltd.	k. A.
Odisha	Tata Steel Ltd.	
	• Joda	65.000
	• Balasore	25.000
	Jeypore Sugar Co Ltd., Rayagada	22.000
	Nava Ltd., Kharagprasad	50.000
Telangana	VBC Ferro Alloys, Medak	31.500 (Ferro- und Ferrosilikomangan gesamt)
	Shree Raghvendra Ferro Alloys Pvt. Ltd., Nalgonda	15.000
	Nava Ltd., Paloncha	125.000
West Bengalen	Bhaskar Shrachi Alloys Ltd., Durgapur	24.000
	Cosmic Ferro Alloys Pvt. Ltd., Bankura	k. A.
	Dayal Ferro Alloys Ltd., Ramgarh	10.000
	Sri Gayatri Minerals Ltd., Bishnupur	24.000
	Hira Concast Ltd., Burdwan	11.455
	Karthik Alloys Ltd. (I&II), Durgapur	19.000
	Maithan Alloys Ltd., Burdwan	94.600 (Ferro- und Ferrosilikomangan gesamt)
	Monnet Ferro Alloys Ltd., Burdwan	12.500
	Shyam Ferro Alloys Ltd., Burdwan	104.957 (Ferro- und Ferrosilikomangan gesamt)
	Srinivasa Ferro Alloys Ltd., Burdwan	28.800
Modern India Con-Cast Ltd., Bishnupur	22.000 (Ferrolegierungen gesamt)	



Bundesstaat	Unternehmen, Werkstandort	Kapazität (tpa)
West Bengalen	Sharp Ferro Alloys Ltd., Durgapur	42.500
	Nilkantha Ferro Ltd., Bankura	39.960
	Lalwani Ferro Alloys Ltd., Kalkutta	48.780
	Ispat Damodar Pvt Ltd., Purulia	40.000 (Ferrolegerungen gesamt)
	Sonic Thermal Ltd. Ferro Alloy, Bankura	39.500
	Shree Ambry Ispat Pvt Ltd., Bankura	17.400
	Haldia Steels Ltd., Durgapur	k. A.
	Impex Ferro Tech Ltd., Kalyaneswary	k. A.

Tab. 52: Produktionskapazitäten (tpa) von Ferrosilizium nach Bundesstaaten  
(Quelle: INDIAN BUREAU OF MINES (2023). k. A. = keine Angaben.

Provinz	Unternehmen, Werkstandort	Kapazität (tpa)
Andra Pradesh	Facor Alloys Ltd., Vizianagaram	k. A.
	Rhodium Ferro-alloys Pvt. Ltd., Hindupur	8.000
	Sri Mahalakshmi Smelters Pvt. Ltd., Vizianagaram	7.200
	VA Power&Steel Ltd., Raigarh	8.100
Karnataka	Sandur Manganese & Iron Ores Ltd., Ballari	24.000
	Thermit Alloys Pvt. Ltd., Shivamogga	k. A.
	Padmavati Ferrous Ltd., Ballari	2.000
	Indsil Electrosmelts Ltd., Palakkad	k. A.
	Shri Laxmi Electro Smelters Ltd., Erumathala	k. A.
Madhya Pradesh	Crescent Alloys Ltd., Seoni	4.500
Maharashtra	Sunbel Alloys Co of India Ltd., Mumbai	k. A.
Odisha	Indian Metals & Ferro Alloys Ltd., Therubali/Rayagada	61.000
Puducherry	The Silical Metallurgic Ltd.	10.560
	VSK Ferro Alloys Ltd., Thuthipet	3.000
	Snam Alloys Ltd., Kariamanikam	12.000
Sikkim	Akshay Ispat & Ferro Alloys Ltd., Namchi	6.000
Telangana	VBC Ferro Alloys Ltd., Medak	10.000
Uttar Pradesh	Hindustan Alloys Pvt. Ltd., Hamirpur	3.200
West Bengalen	Shree Ambry Ispat Prvt Ltd., Bankura	7.600

Die bedeutendsten indischen Unternehmen mit FeSi- und/oder FeSiMn-Produktion sind:

#### **Andhra Pradesh**

**Nava Ltd.** (ehemals Nava Bharat Ventures Ltd, gegründet 1972) produziert Ferrosilikomangan, untergeordnet auch Ferromangan, in zwei Werken: Das Werk in Paloncha/Telangana verfügt über vier Schmelzöfen (3 x 16,5 MVA-, 1 x 27,6 MVA-Anschlussleistung) und eine Kapazität von 125.000 tpa Manganlegierungen. Mit einer Kapazität von damals 10.000 tpa war das Werk das erste der Unternehmen, das 1975 Ferrosilizium produzierte. Die Hütte in Kharagprasad/Odisha verfügt mit zwei Öfen à 22,5 MVA-Anschlussleistung über eine Kapazität von 50.000 tpa Ferrosilikomangan. Bis November 2022 produzierte es Ferrochrom, wurde dann aber umgerüstet. Beide Werke werden durch unternehmenseigene Kraftwerke mit Strom versorgt.

**Facor Alloys Ltd** in Vizianagaram besteht seit 1955 und präsentiert sich als einer der größten Hersteller und Exporteure von Ferrolegierungen des Landes. Produziert wird in drei Lichtbogenöfen mit jeweils 7,5 MVA-Anschlussleistung sowie zwei Öfen mit 12 MVA- und 8 MVA-Anschlussleistung speziell für Ferrochrom. 1981 ging ein weiterer 16 MVA-Ofen für Ferrochrom in Betrieb. Derzeit verfügt Facor nach eigenen Angaben über eine installierte Produktionskapazität von 72.000 tpa Ferrolegierungen und arbeitet mit einer Auslastung von über 100 % (Produktion nach Indian Minerals Yearbook: 72.500 t). Exportiert wird unter anderem nach Korea, Japan, Italien, Niederlande, USA, Türkei, China und Taiwan.

#### **Chhattisgarh**

**Ispat Godawari Power & Ispat Ltd.** (GPIL) in Raipur/Chhattisgarh gehört seit 1999 zur HIRA Group of Industries (gegründet 1990) und ist ein voll integrierter Stahlhersteller (inkl. eigener Eisenerzmine) mit einer Produktionskapazität von 16.500 tpa Ferrosilikomangan.

**Monnet Ispat Ltd.** besteht seit 1994 und stellt mit der Tochtergesellschaft Tirumaala Balaji

Alloys Pvt. Ltd. (seit 2004) in Raipur/Chhattisgarh Ferrochrom, Ferrosilizium, Ferrosilikomangan sowie Ferromangan her (Produktionskapazität 50.000 tpa Ferrolegierungen in drei Öfen). Für 2021 war der Ausbau der Produktionskapazitäten von Ferrosilikomangan geplant. Außerdem ist Monnet Ispat Ltd. im Besitz der größten Kohlemine Indiens.

**Hira Power & Steels Ltd.** (HPSL) war nach eigenen Angaben 1987 das erste Unternehmen in Indien, das sich auf die Produktion von Ferrosilizium spezialisierte und mit einem kleinen Ofen mit einer Anschlussleistung von 2,5 MVA und einer Kapazität von 3.000 tpa Ferrosilizium in Produktion ging. Heute gehören zur Unternehmensgruppe unter anderem die Firmen Alok Ferro Alloys Ltd., Godawari Power & Ispat Ltd. und Hira Ferro Alloys Ltd. Derzeit verfügt HPSL über einen Ofen mit einer Anschlussleistung von 26 MVA, ein eigenes Kraftwerk mit 20 MWp (Kohle) und Bergwerke in Chindawara/Madhya Pradesh (Dolomit) bzw. Balaghat (Manganerz). Eine Erweiterung der Kapazitäten durch die Inbetriebnahme eines weiteren Ofens mit 20 MVA-Anschlussleistung ist in Planung. Die Gesamtkapazitäten für die Herstellung von Ferrolegierungen gibt HPSL mit 55.000 tpa an.

#### **Jharkhand**

**Anjaneya Ferro Alloys Ltd.**, gegründet 1989, produziert in Mihijam/Jharkhand und Vizag/Andhra Pradesh Ferrosilikomangan und Ferromangan in zwei Werken. Das Indian Minerals Yearbook nennt eine Kapazität von 41.850 tpa Ferrolegierungen. Aus dem Umweltreport des Unternehmens für das Finanzjahr 2021/2022 geht eine Produktionskapazität von 78.300 tpa FeSiMn und FeMn in fünf Öfen je 9 MVA-Anschlussleistung hervor. Für die Herstellung von Ferrosilikomangan wurden demnach im Finanzjahr 2021/2022 36.302.500 t Manganerz, 15.783.974 t Koks und Kohle, 29.590 t Dolomit, 7.673.560 t Quarz und 10.721.031 t Eisenerzschlacke eingesetzt.

**Shivam Iron & Steel Co. Pvt. Ltd.** ist ein Stahlhersteller, der 1998 gegründet, heute an zwei Standorten – Giridih und Koderma/Jhark-

hand – Ferrolegierungen (Ferrosilikomangan und Ferromangan) sowie verschiedene Stahlprodukte vor allem für den Export (Japan, Korea, USA, VAE, Pakistan, Bangladesch, Nepal, China) produziert. Nach offiziellen Unternehmensangaben werden Rohmaterialien wie Manganerz, Eisenerz, Dolomit, Kohle usw. aus verschiedenen Fremdbergwerken bezogen. Außerdem wird Manganerz aus Australien, Indonesien, Südafrika und weiteren afrikanischen Ländern erworben. Das Unternehmen erwägt den Kauf eines eigenen Bergwerkes zur Gewinnung von Mangan- und Eisenerz. Die Güter erreichen die Werksstandorte über die Seehäfen Haldia und Kolkata in rund 300 km Entfernung.

#### Karnataka

Das Unternehmen **Sandur Manganese & Iron Ores Ltd.** in Sandur/Karnataka geht zurück auf die 1954 gegründete Sandur Manganese and Iron Ores Pvt. Ltd. (Smiore). Ab 1907 wurden die Manganerzvorkommen rund um Sandur durch die belgische General Sandur Mining Company abgebaut. Historische Aufzeichnungen gehen von einer Nutzung bereits zu Zeiten von Tipu Sultan (1749 – 1799) aus. Seit 1968 stellt Sandur auch Ferrolegierungen her. In jenem Jahr wurde am Standort Vysanakere ein 15 MVA-Elektroofen zur Herstellung von 36.000 tpa Roheisen errichtet. Dieser Ofen kann alternativ aber auch 30.000 tpa Ferromangan/Ferrosilikomangan produzieren. 1977 und 1980 wurden zwei Öfen mit einer Gesamtkapazität von 24.000 tpa für die Produktion von Ferrosilizium errichtet. Der Betrieb wird durch ein eigenes 32 MW-Wärme-kraftwerk versorgt.

#### Maharashtra

**Chandrapur Ferro Alloys** (zuvor Maharashtra Electros melt Ltd.) in Chandrapur/Maharashtra produziert Ferrosilikomangan und andere Ferrolegierungen und gehört seit 2011 zu SAIL. Laut Indian Minerals Yearbook liegt allein die Kapazität für Ferrosilikomangan bei 130.000 tpa. Zum Werk gehören zwei 33 MVA-Elektrolichtbogenöfen für die Produktion von Ferrolegierungen und ein 1 MVA-Elektrolichtbogenofen für die Herstellung von MC/LC-Ferromangan. Nach Unternehmensangaben ist

geplant mit einer Investition von etwa 185 Mio. Rupien in den nächsten zwei Jahren einen 45 MW-Lichtbogenofen zu errichten, um damit ca. 90.000 tpa HCFeMn oder 70.000 tpa FeSiMn zu produzieren. Außerdem soll mit einer Investition von rund 38 Mio. Rupien ein 4 MW-Kraftwerk (auf der Basis von Ofengas) errichtet werden. Zukünftig sollen dann eigene Kraftwerke den gesamten Strombedarf der Hütte decken.

**Natural Sugar & Allied India Ltd.** in Osmana-bad/Maharashtra ist ein Zuckerhersteller, der neben verschiedenen Zucker-, Destillerie- und Milchprodukten auch Ferromangan und Ferrosilikomangan herstellt. In zwei Öfen mit einer Anschlussleistung von jeweils 6 MVA produziert das Unternehmen täglich 50 – 60 t Ferrolegierungen. Die Jahresproduktion des Ferrolegierungswerks liegt nach Unternehmensangaben bei 10.000 tpa. Im Indian Minerals Yearbook ist die installierte Kapazität für Ferrosilikomangan dagegen mit 16.500 tpa angegeben.

#### Odisha

Die börsennotierte **Tata Steel Ltd.** mit Hauptsitz in Mumbai ist eines der größten Stahlunternehmen der Welt und eine der größten Firmengruppen Indiens mit Standorten weltweit. Gegründet 1907, eröffnete Tata 1958 in Joda/Odisha eines der ersten Ferrolegierungswerke Indiens. Das Werk gilt heute als das älteste durchgehend operierende Werk des Landes und produziert neben anderen Ferrolegierungen Ferrosilikomangan mit einer Kapazität von 65.000 tpa. Die **Tata Steel's Ferro Alloys & Minerals Division** (FAMD) ist heute einer der führenden Manganlegierungshersteller Indiens und unterhält Werke in Indien und Südafrika, die über eine integrierte Wertschöpfungskette verfügen. Medienberichte vom März 2022 bestätigen die Übernahme von **Stork Ferro and Mineral Industries Pvt. Ltd.** (SFML) in Odisha durch Tata für umgerechnet rund 18 Mio. US\$. Die Hütte von SFML in Balasore, Odisha, verfügt über zwei 16,5 MVA-Öfen mit einer Gesamtkapazität von 53.000 tpa FeSiMn. Im Indian Minerals Yearbook 2021 ist eine Kapazität von 25.000 tpa FeSiMn genannt.

**Shyam Ferro Alloys Ltd.** (gegründet 1995, Produktionsstart 1997) präsentiert sich ebenfalls als einer der größten und führenden Hersteller und Exporteure von Ferrolegierungen Indiens (FeCr, FeMn, FeSiMn) mit Produktionsstandorten in Burdwan/West Bengalen (Kapazität: 104.957 tpa FeMn und FeSiMn, laut Indian Minerals Yearbook) und in Vishakhapatnam mit dem 2007 gegründeten Tochterunternehmen **Sundaram Alloys Ltd** (Kapazität: 55.000 tpa FeSiMn und FeMn). Der Standort in Vishakhapatnam liegt in einer Sonderwirtschaftszone, hier bestehen Pläne zum Ausbau der Kapazitäten. Die Gesamtkapazität für die Produktion von Ferrolegierungen und Stahlerzeugnissen gibt Shyam mit 400.000 tpa (125 MVA-Gesamtanschlussleistung der Öfen) an. Seine Rohmaterialien, namentlich Manganerz, bezieht das Unternehmen unter anderem aus Australien, Gabun, Südafrika und Brasilien.

**Indian Metals & Ferro Alloys Ltd.** (IMFA, seit 1961) in Therubali/Odisha hat installierte Kapazitäten für Ferrosilizium von 61.000 tpa. Das Unternehmen gilt als Indiens größter, voll integrierter Hersteller von Ferrolegierungen. Während ursprünglich der Fokus auf Siliziumlegierungen und Quarzabbau lag, dominiert heute die Herstellung von Ferrochrom mit einer Gesamtanschlussleistung der sechs Öfen von 190 MVA bzw. einer Gesamtkapazität von 284.000 tpa FeCr, Stromerzeugungskapazitäten von 204,55 MWp (inkl. 4,55 MWp Solar) und der Chromerzabbau in mehreren eigenen Bergwer-

ken. Produziert wird für die heimische Stahlindustrie sowie für den Export nach Südkorea, Japan, Taiwan und China.

#### Telangana

**VBC Ferro Alloys Ltd.** in Medak besteht seit 1980 und gehört zur VBC Group. Das Unternehmen verfügt über eigene Quarzbergwerke, eine Hüttenkoksanlage und Brennstofflieferverträge mit Kohlebergwerken. Am Standort Medak verfügt VBC über eine installierte Gesamtkapazität für die Herstellung von Ferrosilizium von 10.000 tpa und produziert sowohl für den heimischen Markt als auch den Export.

Die Gründe für die erhebliche Differenz zwischen den offiziellen Produktions- und Exportdaten von FeSiMn sind unbekannt.

Laut INDIAN BUREAU OF MINES (2023) stiegen die Exporte von Ferrolegierungen aus Indien im Jahr 2020/2021 um 7 % auf 1.843.322 t (1.715.919 t im Vorjahreszeitraum) im Wert von umgerechnet rund 1,5 Mrd. US\$ (1,4 Mrd. US\$ im Vorjahreszeitraum) an. Anteilig entfielen hiervon 39 % auf Ferrochrom, 41 % auf Ferrosilikomangan, 18 % auf Ferromangan, 1 % auf Ferrosilizium und 1 % auf andere Ferrolegierungen. Ein Großteil der Exporte erfolgte nach China (19 %), VAE (11 %), Südkorea (9 %) und Japan (7 %).

Die Importe aller Ferrolegierungen ging im Jahr 2020/2021 laut INDIAN BUREAU OF MINES (2023) auf 13 % zurück und betragen 421.980 t

**Tab. 53: Produktion von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in Indien seit dem Wirtschaftsjahr 2005/2006, Quelle: INDIAN MINERALS YEARBOOKS (2005–2021). n. v. = nicht verfügbar.**

	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14
FeSi	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	90.000	90.000
FeSiMn	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	236.541	225.395
	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22	2022/23
FeSi	90.000	90.000	90.000	90.000	90.000	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
FeSiMn	249.691	269.920	300.625	311.326	345.291	320.594	329.295	n. v.	n. v.

Tab. 54: Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Indien seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FeSi	1.197	885	5.832	27.205	16.926	35.271	40.173	20.600	15.994
FeSiMn	86.626	164.789	256.367	308.627	238.582	479.821	689.244	846.557	909.915
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSi	22.246	33.300	7127	8.389	16.289	9.877	5.498	10.046	22.902
FeSiMn	821.361	830.808	536.345	704.161	625.672	543.483	492.792	823.109	910.563

im Vergleich zu 483.127 t im Vorjahreszeitraum, der Wert entsprechend auf umgerechnet rund 665 Mio. US\$ im Vergleich zu 763 Mio. US\$ im Vorjahreszeitraum sinkend. Anteilig entfielen die Importe auf 46 % Ferrosilizium, 15 % Ferromangan, 18 % Ferronickel, 9 % Ferrochrom, 3 % Chargechrom und 9 % andere Ferrolegerungen. Die Herkunftsländer waren vor allem Bhutan (25 %), Indonesien (14 %), Malaysia (12 %), China (11 %) und Südafrika (7 %).

Silizium wird in Indien als ein kritischer Rohstoff für die Energiewende des Landes erachtet, der zwar bisher nicht im Land produziert, dem jedoch hohes Potenzial in Indien zugeschrieben wird (CHADHA & SIVAMANI 2022). Im Jahr 2021 betrug die Solarstromkapazität rund 44 GWp, bis 2030 sollen von den 450 GWp angestrebten Kapazitäten aus erneuerbaren Energien 300 GWp aus der Solarenergie stammen (Chadha & Sivamani 2022). Bisher gibt es keine Produktionskapazitäten für Polysilizium, Siliziumstäbe oder Wafer. Die Produktionskapazitäten für Zellen liegen bei 2,5 GWp bzw. für Module bei 11 GWp. Indien strebt an, die komplette PV-Wertschöpfungskette auszubauen und wird für eine diversifizierte globale Solarlieferkette als mögliche Alternative zu China gesehen. Grundfrage bleibt dabei die Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu China, wie eine gemeinsame Studie des *Institute for Energy Economics and Financial Analysis* und des *JMK Research & Analytics* ausführt (GULIA & GARG 2021). Laut BERNREUTER (2021) gibt es bereits seit 2010 in Indien Bestrebungen zum Aufbau einer Polysilizium- und Waferproduktion.

Die meisten der geplanten Vorhaben wurden bisher jedoch nicht realisiert. Eine von Lanco Solar 2011 in Bau genommene Fabrik mit einer Produktionskapazität von 1.800 tpa Polysilizium ging bspw. nie in Betrieb (BERNREUTER 2021). Der wachsende inländische Solarmarkt könnte jetzt allerdings die Vorzeichen für die indische Solarindustrie ändern (BERNREUTER 2021), ebenso wie neue staatliche Maßnahmen.

Das Ministerium für neue und erneuerbare Energien hat Unterstützungsmechanismen eingerichtet, um die Entwicklung der inländischen PV-Produktion zu fördern. Dazu gehören

1. produktionsorientierte Anreize (Production-Linked Incentives, PLIs),
2. seit April 2022 Importzölle auf Module (40 %) und Zellen (25 %) sowie
3. die Vorschrift, dass bei nahezu allen Ausschreibungen für Solarparks ausschließlich Module von Herstellern der Approved List of Models and Manufacturers (ALMM) bezogen werden dürfen. Die ALMM listet ausschließlich indische Hersteller (ebd. sowie GARG & RISHABH 2022).

Das PLI „*National Programme on High Efficiency Solar PV Modules*“, das im April 2021 verabschiedet wurde, hatte in der ersten Ausschreibung einen Umfang von umgerechnet 600 Mio. US\$ und umfasst die gesamte PV-Wertschöpfungskette (PM India 2021). Angebote von 15 Unter-

nehmen wurden für die PLI gelistet, darunter eines für Dünnschichtmodule (CdTe) und 14 für Siliziummodule. Drei der 14 Unternehmen boten die höchste Kapazität von 4 GWp und eine vollständige Integration von Polysilizium bis zum Modul (SHIRADKAR et al. 2022). Drei Hersteller, die den Aufbau von insgesamt 12 GWp vollintegrierte Solarkapazitäten planen, wurden in die engere Wahl gezogen. Diese sind **Shirdi Sai Electricals Ltd.** (SSE), **Reliance New Energy** and **Adani Infrastructure** (s. u.). Die Regierung hat laut Finanzministerium 2022 zusätzlich umgerechnet 2,4 Mrd. US\$ für eine zweite Runde des PLI-Programms zugesagt, mit dem Ziel, Kapazitäten von 65 GWp in der Solarmodulproduktion zu erreichen (GARG & RISHABH 2022 und Gupta 2022c). Auf der erweiterten PLI-Liste stehen sowohl die führenden Unternehmen, die bereits Solarmodule herstellen und ihre Kapazitäten ausbauen oder „rückwärts“ integrieren wollen wie Tata Power Solar, Emvee, Waaree oder Vikram, aber auch Kraftwerksbetreiber, die in die Produktion einsteigen wollen wie ReNew Power oder L&T Power und „Neueinsteiger“ wie Shirdi Sai, Reliance, Coal India oder First Solar (SHIRADKAR et al. 2022).

Die drei Firmen aus der ersten PLI-Runde sind:

**Shirdi Sai Electricals Ltd.** (SSE) (seit 1994) ist nach eigenen Angaben einer der größten Hersteller von Stromverteiltransformatoren in Indien. Der Hauptsitz ist in Telangana, die zwei Produktionswerke befinden sich in Andhra Pradesh und Uttar Pradesh.

**Reliance New Energy** gehört zu Reliance Industries Ltd. (seit 1966, Hauptsitz Mumbai), der größten Unternehmensgruppe Indiens. Reliance New Energy errichtet nach eigenen Angaben in Jamnagar den Dhirubhai Ambani Green Energy Giga Complex, der auch eine vollständig integrierte Produktionsanlage für Photovoltaik enthalten soll. Im Rahmen dessen wird auch über eine Kooperation zwischen Reliance und der chinesischen Hualu Engineering and Technology Company Ltd. berichtet (CW TEAM 2021). Reliance New Energy hat nach eigenen Angaben außerdem 25 Mio. € in die deutsche Firma

NexWafe für die gemeinsame Entwicklung von „green solar wafers“ investiert, die perspektivisch auch in Indien hergestellt werden sollen.

**Adani Infrastructure** gehört zur Adani Group und betreibt seit 2011 ein 40 MWp-Solarkraftwerk in Bitta/Gujarat sowie in Mundra/Gujarat ein Wärmekraftwerk. Der Plan des von der Adani Green Energy 2016 angekündigten 10.000 tpa Polysiliziumwerks in Mundra/Gujarat als Teil einer vertikal integrierten Solarfabrik wurde 2017 gestoppt (BERNREUTER 2017). Mittlerweile betreibt Adani Solar, der PV-Produktionszweig des Unternehmens, eine 2 GWp-Fabrik für die Produktion von monokristallinen Zellen und Modulen in Gujarat, dessen Kapazität 2025 10 GWp erreichen soll (GUPTA 2022b). Auf der Intersolar India im Jahr 2022 stellte das Unternehmen den ersten in Indien produzierten monokristallinen Siliziumstab vor. Das Unternehmen plant ein 2 GWp-Werk für Siliziumstäbe und -wafer, das im Dezember 2023 in Produktion gehen und bis 2025 ebenfalls eine Kapazität von 10 GWp erreichen soll. Des Weiteren soll ein 30.000 tpa Polysiliziumwerk am Standort in Gujarat entstehen (GUPTA 2022a).

Für eine ausführlichere Analyse der Anreizsysteme der beteiligten Firmen und technologischen Entwicklungen siehe auch SHIRADKAR et al. (2022).

#### Literatur:

BERNREUTER, J. (2017): Indian Adani Group puts polysilicon plans on the backburner. – Bernreuter Research (URL: <https://www.bernreuter.com/newsroom/polysilicon-news/article/indian-adani-group-puts-polysilicon-plans-on-the-backburner>).

BERNREUTER, J. (2021): Will India's plans for the polysilicon production get real this time? – Bernreuter Research (URL: <https://www.bernreuter.com/newsroom/polysilicon-news/article/will-india-s-plans-for-polysilicon-production-get-real-this-time>).

CW TEAM (2021): RIL and Hualu to manufacture polysilicon for solar panels (URL: <https://www.constructionworld.in/energy-infrastructure>).

ture/power-and-renewable-energy/ril-and-hualu-to-manufacture-polysilicon-for-solar-panels/29907).

INDIAN BUREAU OF MINES (2023): Indian Minerals Yearbook 2021. Part II: Metals & Alloys (URL: [https://ibm.gov.in/writereaddata/files/16821603416443bad57364cFerro\\_Alloys\\_2021.pdf](https://ibm.gov.in/writereaddata/files/16821603416443bad57364cFerro_Alloys_2021.pdf)).

INDIAN BUREAU OF MINES (2023a): Indian Minerals Yearbook 2021. Part III: Mineral Reviews. Minor Minerals. 30.20 Quartz & Other Silica Minerals (URL: [https://ibm.gov.in/writereaddata/files/1683715566645b75ee5929620\\_QuartzOther\\_Silica\\_Minerals.pdf](https://ibm.gov.in/writereaddata/files/1683715566645b75ee5929620_QuartzOther_Silica_Minerals.pdf)).

CHADHA, R. & SIVAMANI, G. (2022): Critical Minerals for India: Assessing their Criticality and Projecting their Needs for Green Technologies.- Centre for Social and Economic Progress, CSEP Working Paper 19; New Delhi (URL: [https://csep.org/wp-content/uploads/2022/09/Critical-Minerals-for-Green-Technologies\\_26-Aug-22.pdf](https://csep.org/wp-content/uploads/2022/09/Critical-Minerals-for-Green-Technologies_26-Aug-22.pdf)).

GARG, S. & RISHABH, J. (2022): Making India a Leader in Solar Manufacturing: Ways to Achieve Technology Leadership and Global Competitiveness.- Council on Energy, Environment and Water; New Delhi (URL: [https://www.eqmagpro.com/wp-content/uploads/2022/05/CEEW-Making-India-a-Leader-in-Solar-Manufacturing\\_compressed-1-12.pdf](https://www.eqmagpro.com/wp-content/uploads/2022/05/CEEW-Making-India-a-Leader-in-Solar-Manufacturing_compressed-1-12.pdf)).

GULIA, J. & GARG, V. (2021): Viability Assessment of New Domestic Solar Module Manufacturing Units. Can India Compete Against China in PV Production? – JMK Research & Analytics. – Institute for Energy Economics and Financial Analysis (URL: [https://ieefa.org/wp-content/uploads/2021/01/Viability-Assessment\\_New-Domestic-Solar-Module-Manufacturing-Units\\_January-2021.pdf](https://ieefa.org/wp-content/uploads/2021/01/Viability-Assessment_New-Domestic-Solar-Module-Manufacturing-Units_January-2021.pdf)).

GUPTA, U. (2022): Adani unveils India's first silicon ingot. – PV Magazine, December 09, 2022 (URL: <https://www.pv-magazine-india.com/2022/12/09/adani-unveils-silicon-ingot-at-intersolar-india-2022>).

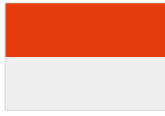
GUPTA, U. (2022a): Adani moves forward with 30.000mt Polysilicon project in India. – PV Magazine, December 16, 2022 (URL: <https://www.pv-magazine.com/2022/12/16/adani-moves-forward-with-30000-mt-polysilicon-project-in-india>).

GUPTA, U. (2022b): Adani targets 10 GW of polysilicon to solar module capacity by 2025. – PV Magazine, September 30, 2022 (URL: <https://www.pv-magazine.com/2022/09/30/adani-targets-10-gw-of-polysilicon-to-solar-module-capacity-by-2025>).

GUPTA, U. (2022c): Indian government approves second phase of solar manufacturing incentive scheme. – PV Magazine, September 22, 2022 (URL: <https://www.pv-magazine.com/2022/09/22/indian-government-approves-second-phase-of-solar-manufacturing-incentive-scheme>).

PM INDIA (2021): Cabinet approves Production Linked Incentive scheme 'National Programme on High Efficiency Solar PV Modules': April 07, 2021 (URL: [https://www.pmindia.gov.in/en/news\\_updates/cabinet-approves-production-linked-incentive-scheme-national-programme-on-high-efficiency-solar-pv-modules](https://www.pmindia.gov.in/en/news_updates/cabinet-approves-production-linked-incentive-scheme-national-programme-on-high-efficiency-solar-pv-modules)).

SHIRADKAR, N., ARYA, R., CHAUBAL, A., DESHMUKH, K., GHOSH, P., KOTTANTHARAYIL, A., KUMAR, S. & VASI, J. (2022): Recent developments in solar manufacturing in India. Solar Compass, Volume 1, 2022 (URL: <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2022.100009>).



## Indonesien

In Indonesien gibt es vermutlich mehrere Unternehmen, die Ferrosilikomangan bzw. untergeordnet auch Ferrosilizium, teils für den heimischen Markt, teils für den Export in die südostasiatischen sowie ostasiatischen Nachbarländer, produzieren. Die wichtigsten dieser Unternehmen sind:

- PT Indotama Ferro Alloys (IFA) mit Sitz in West Java stellt seit 2007 vor allem Ferrosilikomangan her, wobei die Kapazität des Unternehmens mit derzeit zwei Elektrolichtbogenöfen mit je 12,5 MVA-Anschlussleistung bei 60.000 tpa FeSiMn liegt. Produziert wird für den indonesischen Markt und untergeordnet auch für den Export u. a. nach Malaysia, Thailand, Japan, Südkorea, China und Taiwan.
- Im Morowali Industriepark in der Provinz Zentral-Sulawesi produziert die chinesische Eternal Tshingshan Group seit dem Jahr 2020 komplementär zu Edelstahl- und Nickelprodukten auch Ferrosilizium (Kapazität: 60.000 tpa, ein Ofen mit 36 MVA-Anschlussleistung) sowie Ferrosilikomangan (Kapazität: 50.000 tpa) für den Eigenbedarf.

Indonesien verfolgt Pläne zum Ausbau einer eigenen Solarindustrie inklusive der Produktion von Polysilizium. Bis 2030 sollen 5,3 GWp durch Solarenergie gewonnen werden. Hierzu befand sich die Regierung laut Medienberichten Anfang 2022 zufolge auch in Verhandlung mit bisher ungenannten potenziellen Investoren für zwei Polysiliziumwerke. Das erste Werk sollte Ende 2022 nach Investitionen von umgerechnet 800 Mio. US\$ und mit einer Anfangskapazität von 40.000 tpa Polysilizium eröffnet werden. Das zweite Werk in Nord-Kalimantan soll Investitionen von umgerechnet 3,2 Mrd. US\$ erfordern und 160.000 tpa Polysilizium produzieren (ARAB NEWS 2022, zitiert nach LISTIYORINI 2022).

### Literatur

ARAB NEWS (2022): Indonesia to develop \$4bn polysilicon industry to boost solar panel production.- Arab News, January 25, 2022, Riyadh (URL: <https://www.arabnews.com/node/2011521/business-economy>).

LISTIYORINI, E. (2022): Tropical Indonesia wants to start making a key solar panel part. Bloomberg, January 25, 2022 (URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-01-25/tropical-indonesia-wants-to-start-making-a-key-solar-panel-part>).

Tab. 55: Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Indonesien seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FeSi	7	100	0	274	0	198	3.193	2.035	65
FeSiMn	0	0	0	2	3.572	13.895	9.774	17.929	16.686
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSi	428	184	57	23	11	51	2.026	209	27
FeSiMn	32.898	16.785	15.692	5.465	2.144	970	1.801	8.571	4.501





## Iran

Erster Produzent von Rohsilizium im Iran war das Unternehmen **Kani Godakht Tahmin (KGT)**, das nach eigenen Angaben im Jahr 2022 in der Stadt Marvdasht, Provinz Fars, eine Hütte eröffnete. Diese besitzt in ihrer ersten Ausbauphase eine Kapazität von 5.000 tpa Si, soll aber in einer zweiten Phase auf eine Kapazität von 12.000 tpa Si erweitert werden.

Im Jahr 2019 wurde im Iran zudem das Unternehmen **ARAZ Silicon Industries Co.** gegründet, das derzeit im Khoy Industriepark, Provinz West Aserbaidschan, eine Hütte zur Produktion von Rohsilizium errichtet. Das Unternehmen ging davon aus, ab März 2023 mit einer Anfangskapazität in Phase 1 von 15.000 tpa (zwei Öfen) über Phase 2 (vier Öfen) 30.000 tpa und letztendlich in einer Phase 3 ab 2024 mit sechs Öfen eine Kapazität von 45.000 tpa Rohsilizium erreichen zu können. Die erste Produktion von Rohsilizium soll im Sommer 2022 bereits erfolgt sein. Das Silizium soll zur Herstellung von Al-Legierungen (heimischer Bedarf ca. 5.000 tpa), vor allem aber von Solarsilizium dienen. ARAZ Silicon Industries plant dafür, vor Ort auch Polysilizium (Kapazität: 10.000 tpa) und daraus wiederum Wafer (Kapazität: 1,5 GWp) für Solarmodule zu fertigen, die auch in einem eigenen Solarpark verbaut werden sollen.

In Iran produzieren mindestens sechs Unternehmen Ferrosilizium, vor allem für die heimische Eisen- und Stahlindustrie. Alle größeren Unternehmen sind jedoch auch im Export tätig,

wobei die Lieferregionen von Europa über den Nahen und Mittleren Osten bis nach Indien reichen. Soweit bekannt erfolgt die Erzeugung der zur Herstellung benötigten Energie in Gaskraftwerken.

- **Iran Ferroalloys Industries Co. (I.F.I.)** wurde 1986 gegründet und ging mit einer Hütte auf einem 70 ha großen Industriegelände in Azna, Provinz Lorestan, im Februar 2003 in Produktion. Die Hütte verfügt nach sukzessivem Ausbau mittlerweile über drei Öfen zur Produktion von bis zu 60.000 tpa FeSi 75 % und FeSi 75 % HP zzgl. 20.000 tpa Mikrosilika. Das FeSi 75 % HP dient der Produktion von Elektroblechen.
- **Iran Ferrosilice Co. (IFC)** wurde im Jahr 1981 als erster Ferrosiliziumproduzent im Iran gegründet. Später kam die Produktion von FeSiMg hinzu. Mit einem 55 MVA-Ofen beträgt die Kapazität der in der Seman Provinz gelegenen Hütte 25.000 tpa FeSi 75 %, 4.000 tpa FeSiMg und 8.000 tpa Mikrosilika.
- **Ferrosilicon Gharb Pars Co.** ist ein im Jahr 2010 gegründetes Tochterunternehmen der Middle East Mining and Mineral Industries Development Holding Company (MIDCO) mit einer Hütte in Hamadan in der gleichnamigen Provinz. Diese besitzt eine Kapazität von 24.000 tpa FeSi 72 – 78 % zzgl. Mikrosilika.
- **Azarakhsh Ferrosilicon Co.** betreibt eine Ferrosiliziumhütte in der Provinz Kerman. Diese besitzt eine Kapazität von 12.000 tpa FeSi.

Tab. 56: Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) (in t) aus dem Iran seit dem Jahr 2003, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FeSi	2.764	13.387	8.001	1.925	3.855	21.315	13.342	6.261	4.230
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSi	4.154	15.359	25.630	17.642	35.303	41.801	35.960	32.623	43.288

- **HALYCO Ferroalloys Co.** aus Kashan, Provinz Isfahan, wurde im Jahr 2012 gegründet. Die Kapazität der Hütte dieser Firma liegt bei ca. 5.000 tpa FeSi.
- **Eshtehard Alloys Co.** (Aliazhsazan Eshtehard) ist ein sehr kleines Unternehmen und wurde im Jahr 2012 gegründet. Es ging drei Jahre später mit einer Hütte bzw. einem Ofen in der

Industriestadt Eshtehard, Provinz Alborz, in Produktion. Die Kapazität dieser Hütte liegt bei 4.500 tpa FeSi 70 – 75 % zzgl. Mikrosilika.

Bereits jetzt sollen zudem sieben Firmen im Iran Siliziumwafer und Solarmodule für den Ausbau der heimischen Energiegewinnung in PV-Kraftwerken produzieren.



## Island

Obwohl in Island nur bei den dortigen drei Aluminiumhütten eine Nachfrage nach Silizium besteht, ist das Land durch seine günstige Wasserkraft und vor allem geothermische Energie ein interessanter Produktionsstandort für alle energieintensiven metallproduzierenden Unternehmen. So werden in Island nicht nur Aluminium, sondern auch Silizium und Ferrosilizium produziert.

Das erste (Ferro)Silizium produzierende Unternehmen auf Island war Icelandic Alloys Ltd., das im Jahr 1979 in Grundartangi, rund 40 km nördlich von Reykjavik, in Produktion ging. Es war damals noch ein Joint Venture zwischen der Regierung von Island und der norwegischen **Elkem ASA**, die im Jahr 2004 Alleineigentümer des Werkes wurde. Immer wieder hatte Elkem Pläne, einen Teil seiner Ferrosiliziumproduktion (drei Öfen – Björg, Auður und Cleopatra – mit einmal 47 MW- und zweimal 37 MW-Anschlussleistung, Kapazitäten: 120.000 tpa FeSi und 21.000 tpa Mikrosilika) auf Island durch eine Produktion von Silizium zu ersetzen oder um die Produktion von Ferrosilikomangan zu erweitern, doch blieb es bis heute bei der Produktion von FeSi 75 % und FeSi 65 % HP bzw. FeSi 75 % HP (ca. 38.000 tpa). Beliefert werden ausschließlich Kunden aus der Stahlindustrie mit den Schwerpunktregionen Deutschland bzw. EU sowie Japan bzw. zunehmend zur Elektroblechproduktion. Gegenwärtig stammt rund ein Drittel des zur Produktion benötigten Quarzes aus dem Elkem-eigenen Großsteinbruch Tana in Nordnorwegen, aber rund zwei Drittel aus Quarzsteinbrüchen, speziell Karpuzlu, in der Türkei, die geringere Gehalte an Verunreinigungen (besonders Titan) enthalten. Die benötigte Kohle wird vor allem aus Kolumbien, Holzkohle aus Polen, Paraguay und Indonesien sowie Holzhackschnitzel aus Kanada bezogen. Zudem werden Holzhackschnitzel aus isländischem Sperrholz eingesetzt, das aber häufig stark verunreinigt ist.

Auch die ehemalige US-amerikanische Globe Speciality Metals Inc. (seit 2015 Ferroglobe plc) plante ab dem Jahr 2010 zusammen mit einem kanadischen Partner ein Werk zur Produktion von Ferrosilizium auf Island zu eröffnen, doch wurden die Planungen im Jahr 2012 wieder eingestellt.

Zwischen Juli 2014 und Juli 2016 erbaute die Firma United Silicon ehf eine Siliziumhütte in Helguvik, rund 50 km südwestlich von Reykjavik. Die Hütte (ein 32 MW-Ofen, Kapazität 23.000 tpa Si) produzierte mit Unterbrechungen zwischen November 2016 und September 2017, wurde dann aber von der isländischen Umweltschutzbehörde aufgrund der von ihr ausgehenden Luftverschmutzung stillgelegt. United Silicon ging darauf in Insolvenz und auch der Insolvenzbank gelang es bis heute nicht, einen Nachfolger für eine Neueröffnung des Werkes zu finden.

Anfang des Jahres 2010 plante auch die niederländische AMG Advanced Metallurgical Group N.V. über ihre damalige kanadische Beteiligung Timminco Ltd. in Húsavík, 450 km nordöstlich von Reykjavík, eine Siliziumhütte mit einer Anfangskapazität von 54.000 tpa Si zu errichten. Die zu diesem Zweck gegründete Thorsil ehf wurde dann allerdings doch nicht aktiv.

Die im Jahr 1998 in Duisburg gegründete heutige **PCC SE** erwarb im Jahr 2009 die Mehrheit (heute 99,99 %) an dem Quarzit-Steinbruch Bukowa Góra in den Świętokrzyskie Bergen in Polen. Dieser bereits 1975 eröffnete Steinbruch der heutigen PCC Silizium S.A. ist mit einem Gleisanschluss ausgerüstet. Über ihn werden jährlich – mit zurückgehender Menge – rund 60.000 t besonders hochwertige Chargen des quarzischen Sandsteins (Korngrößenfraktion 25 – 100 mm) in Ganzzügen über 650 km zum Hafen von Stettin und von dort über 1.350 Seemeilen per Schiff zum Hafen von Húsavík, im Norden von Island (s. o.) transportiert. Zusätzlich werden aufgrund zurückgehender Vorräte und Qualitäten in Polen bereits jetzt zusätzlich rund 25.000 – 30.000 t Quarzkiese (Korngrößenfraktion 20 – 60 mm) aus Frankreich und Spani-



**Abb. 50: Überblick über den Steinbruch Bukowa Góra, Foto: PCC SILICIUM SA (mit frdl. Genehmigung).**



**Abb. 51: Aufbereitungsanlage Bukowa Góra, Foto: PCC SILICIUM SA (mit frdl. Genehmigung).**

en bzw. ab Sommer 2023 geplant auch Quarzit aus Tana in Nordnorwegen (Si-Qualität 5005) eingesetzt. Durch sog. Trailer Trains erfolgt von Húsavík der Weitertransport zur im Mai 2018 eröffneten (Baubeginn Frühjahr 2015) Siliziumhütte im 2 km entfernten Industriegebiet Bakki. Als Reduktionsmittel kommen dort jährlich ca. 55.000 t gewaschene, aschearme Kohle aus Kolumbien, ca. 62.000 t vor Ort hergestell-

te Holzhackschnitzel aus importierten Baumstämmen aus Spanien und Frankreich sowie 6.000–8.000 t Holzkohle aus Frankreich, Spanien und Polen zum Einsatz. Eine Beteiligung an einem Holzkohleproduzenten in Spanien auf der Basis von dort nachhaltig produziertem Pinien- und Eichenholz ist geplant. Die Siliziumhütte von PCC BakkiSilicon hf (65,4 % PCC SE, 34,6 % Bakkastakkur, ein Zusammenschluss

**Tab. 57: Produktion (P) von Silizium (Si) (in t) durch die PCC BakkiSilicon hf (Quelle: PCC SE (frdl. schriftl. Mitt.)) und von Ferrosilizium (FeSi) (in t) in Island seit dem Jahr 2005 (Quelle: BRITISH GEOLOGICAL SURVEY WORLD MINERAL PRODUCTION (versch. Jahre)) sowie Exporte (E) von Silizium (Si) und Ferrosilizium (FeSi) (in t) aus Island seit dem Jahr 2005 (Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER 2023). n. v. = nicht verfügbar.**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si (P)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FeSi (P)	114.844	113.798	114.886	107.882	112.992	114.230	120.076	131.818	125.204
Si (E)	4	8	15	0	200	0	0	8	13
FeSi (E)	125.646	103.573	124.989	105.868	112.993	114.231	120.076	131.818	125.204
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si (P)	0	0	0	0	6.110	18.101	11.124	18.522	31.222
FeSi (P)	112.657	121.556	128.019	116.811	116.889	120.255	128.187	123.800	n. v.
Si (E)	2	4	299	7.160	7.036	28.398	27.903	28.007	49.759
FeSi (E)	111.906	121.556	128.020	116.811	117.559	99.951	107.227	105.762	101.509

isländischer Pensionsfonds) verfügt über zwei Lichtbogenöfen mit je 24 MW-Anschlussleistung und eine Kapazität von 32.000 tpa Si. Sie ist aber bereits beim Bau für den Betrieb von vier Öfen ausgelegt. Der zur Produktion benötigte Strom stammt aus einem in 25 km Entfernung liegenden Geothermiekraftwerk, das extra zur Versorgung der Si-Hütte errichtet wurde. Über den Hafen von Húsavík bzw. die Häfen von Hamburg, Antwerpen, Rotterdam und Amsterdam erfolgt der Export des Rohsiliziums bzw. die Versorgung der PCC-Kunden (derzeit ca. 60 – 70 % Al-Industrie, ca. 20 % Handelsfirmen,

ca. 20 % Silikone) in Europa. Ein Export des isländischen Siliziums in die USA ist aufgrund von hohen Strafzöllen gegenwärtig nicht möglich.

Warum aus Island seit 2019 jährlich bis zu 18.000 t mehr Rohsilizium exportiert als produziert werden, konnte auch nach Gesprächen vor Ort mit Marktteilnehmern nicht geklärt werden. Die Importe Islands an Rohsilizium, zu zwei Dritteln aus China, liegen seit vielen Jahren bei relativ konstant rund 10.000 t jährlich und dienen der Herstellung von Al-Legierungen in den drei Aluminiumhütten auf Island.



## Italien

In Italien wurde aufgrund der hohen Energiepreise die Produktion von Ferrosilizium bereits im Jahr 1996 und von Rohsilizium im Jahr 2000 eingestellt.

Am Standort Meran in Südtirol existierte mit der Solland Silicon seit 2009 ein Unternehmen bzw. Werk zur Produktion von bis zu 1.000 tpa Polysilizium, das aber im Jahr 2016 geschlossen und inzwischen abgerissen wurde. Das Betriebsgrundstück wurde saniert.

Auf dem Nachbargrundstück in Meran produziert seit 1976 weiterhin die MEMC Electronic Materials S.p.A., seit 2016 ein Tochterunternehmen der taiwanesischen GlobalWafers-Gruppe,

Halbleitersilizium, nun aber aus importiertem Polysilizium. Genauer handelt es sich bei dem Halbleitersilizium aus dem MEMC-Werk um dotiertes, monokristallines Silizium, welches in Novara, wo sich der zweite italienische Betrieb der GlobalWafers-Gruppe befindet, aber auch in den weiteren Produktionsstandorten der Gruppe (Malaysia, Taiwan, Südkorea, Japan), zu Wafern weiterverarbeitet wird.

Bereits im Jahr 1942 zur Produktion von Roheisen gegründet, stieg die Firma ITALGHESE S.p.A. aus Bagnolo Mella, Provinz Brescia in der Lombardei, in den 1960er Jahren in die Produktion von Ferrolegierungen ein und wurde in den 1990er Jahren zum führenden italienischen Hersteller von HCFeMn, MCFeMn und FeSiMn. Die Produktionsmengen oder Kapazitäten dieser Firma sind nicht bekannt.



## Japan

Aufgrund der hohen Energiepreise werden in Japan weder Rohsilizium noch Ferrosilizium produziert. Japan ist jedoch ein bedeutender Importeur von Rohsilizium aus einer Vielzahl von Ländern, seit vielen Jahren angeführt von China mit rund 66 %. In Japan wird das Rohsilizium zur Produktion von Al-Legierungen sowie untergeordnet Silikonen, aber auch Polysilizium genutzt. Das Polysilizium wiederum findet in großem Umfang Verwendung in der Produktion von Wafern (z. T. durch japanische Unternehmen im Ausland) für die Halbleiter-, stark untergeordnet auch die Solarindustrie. Die Wafer wiederum werden zu einem hohen Anteil wieder exportiert.

Die derzeitigen Produzenten von Polysilizium in Japan sind

- **Tokuyama Corporation**, die in ihrer Higachi-Anlage im Werk Tokuyama, Stadt Shunan, Präfektur Yamaguchi, seit 1984 mit einer Kapazität von derzeit 8.500 tpa Polysilizium in Halbleiterqualität (11N) fertigt. Im Jahr 2011 wurde die Higachi-Anlage auf eine Kapazität von 11.000 tpa erweitert, dann jedoch Ende 2013 wieder auf eine Kapazität von 8.500 tpa reduziert, weil Tokuyama ein weiteres Polysiliziumwerk in Malaysia (s. dort) in Betrieb nahm. Dieses konnte dort aufgrund deutlich niedrigerer Energiepreise günstiger produzieren. Angeboten werden auch hochreines Bor zur Dotierung sowie Trichlorsilan, Tetrachlorsilan und hochreine Siliziumdioxidprodukte. Die Ausweitung der Produktpalette auf weitere Si-Chemikalien, beginnend mit Siliziumnitrid, und später auch Silikone ist geplant.
- **Mitsubishi Materials Corporation**, die seit 1967 in ihrem Werk Yokkaichi, Präfektur Mie auf der Hauptinsel Honshū, mit einer Kapazität von 2.800 tpa Polysilizium ebenfalls in Halbleiterqualität (11N) fertigt. Eine weitere Fertigungsstätte befindet sich seit 1996 in

den USA (s. dort). Neben Halbleitersilizium werden auch Silikonabdichtungen für die Halbleiterindustrie angeboten.

- **Osaka Titanium Technologies Co., Ltd.** hat dagegen die Produktion von Polysilizium aufgrund des hohen Wettbewerbsdrucks chinesischer Produzenten, einem weltweiten Überangebot und der damals seit mehreren Jahren fallenden Preise für Polysilizium Ende des Jahres 2018 eingestellt. Osaka Titanium Technologies stellte seit 1960 Polysilizium in seinem Werk in Amagasaki, Präfektur Hyogo, Kapazität 1.400 tpa, sowie seit 2011 auch im Werk Kishiwasa, Präfektur Osaka, Kapazität 2.500 tpa, her. Derzeit produziert das Unternehmen nur noch Siliziummonoxid. Die Einstellung der Polysiliziumproduktion durch Osaka Titanium Technologies führte dazu, dass die Produktionsmengen von Polysilizium und Siliziumwafern in Japan seit dem Jahr 2019 aus Datenschutzgründen nicht mehr veröffentlicht werden (vgl. Tab. 58).

Zu den Produzenten von Siliziumwafern auf Polysilziumbasis in Halbleiterqualität in Japan zählen:

- **Shin-Etsu Chemical Co., Ltd.** ist nicht nur Produzent von Rohsilizium in Australien (s. dort), sondern der weltgrößte Produzent von Wafern auf Siliziumbasis mit mehreren Fertigungsstätten in Japan sowie in den USA, Großbritannien, Malaysia und Taiwan. Zusätzlich ist Shin-Etsu der weltweit viertgrößte Produzent von Silikonen mit drei Fertigungsstätten in Japan (Produktionsbeginn 1953) sowie insgesamt zehn Fertigungsstätten in China, Südkorea, Taiwan, Thailand, USA, den Niederlanden und Ungarn. Auch stellt Shin-Etsu Siliziummonoxid für die Fertigung von Anoden für Lithiumionenbatterien her.
- **SUMCO Corporation** entstand im Jahr 2005 durch Umbenennung der vormaligen Sumitomo Mitsubishi Materials Corporation, einer gemeinsamen Firmengründung der Sumitomo Metals Industries, Ltd. und der Mitsubishi Materials Silicon Corporation im Jahr

2002. SUMCO ist der weltweit zweitgrößte Produzent von Wafern auf Siliziumbasis mit mehreren Werken in Japan und SE-Asien.

- **GlobalWafers Co., Ltd.** ist ein im Jahr 2011 gegründetes, sich im Mehrheitsbesitz des taiwanesischen Unternehmens Sino-American Silicon Products Inc. befindendes Tochterunternehmen, das sich hauptsächlich mit dem Design, der Forschung, der Entwicklung, der Herstellung und dem Vertrieb von Siliziumstäben und -wafern für die Elektronikindustrie beschäftigt. Durch zahlreiche Zukäufe und mit Produktionsstätten in Taiwan, Japan, Südkorea, Malaysia, USA und Italien ist das Unternehmen heute der weltweit drittgrößte Produzent von Wafern für die Halbleiterindustrie auf Siliziumbasis.
- **United Semiconductor Japan Co., Ltd.**, ein Tochterunternehmen der taiwanesischen

United Microelectronics Corporation, fertigt seit dem Jahr 2019 Wafer auch in zwei Fabs in der Stadt Kuwana, Präfektur Mie. Diese wurden in den Jahren 2005 und 2007, damals noch von Fujitsu Semiconductor Ltd., in Betrieb genommen.

- **M. Setek Co., Ltd.**, wurde 1978 gegründet und ist seit 2009 eine Kapitalbeteiligung des taiwanesischen Unternehmens AUO Corporation. Es fertigt auf der Basis importierten Polysiliziums in zwei Fabs in der Stadt Susaki, Präfektur Kochi, Siliziumstäbe und daraus Wafer nicht nur für die Halbleiter-, sondern auch für die Solarindustrie (Kapazität: 1,5 GW).

Das deutsche Unternehmen Wacker Chemie AG bzw. seine Mehrheitsbeteiligung Siltronic AG hat sich dagegen bereits im Jahr 2012 aus der Fertigung von Wafern in Japan zurückgezogen.



Tab. 58: Japan: Produktion bzw. Importe von Rohsilizium (Roh-Si), polykristallinem (Poly-Si) und monokristallinem (Mono-Si) Silizium (in t), Produktion von Siliziumwafern (in Tausend m<sup>2</sup>), Lagerbestände von Polysilizium (in t) zum Jahresende, Recycling von Silizium (in t), nach ROSKILL'S LETTER FROM JAPAN (versch. Monate), ergänzt um Daten der Datenbank GLOBAL TRADE TRACKER (2023). n. v. = nicht verfügbar.

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Produktion</b>							
Poly-Si <sup>1</sup>	8.633	6.806	12.133	10.964	8.000	7.263	8.855
Mono-Si	6.344	8.688	7.379	6.685	6.358	8.051	8.114
Si-Wafer	2.175	3.090	2.852	2.625	2.537	3.002	3.138
<b>Importe</b>							
Roh-Si	149.980	214.993	228.711	182.805	169.925	146.789	189.639
Poly-Si	12.121	15.048	19.666	17.996	16.192	20.500	17.837
Mono-Si	5.863	4.866	5.509	2.980	4.423	4.349	3.970
Lager Si	1.133	1.486	2.670	3.989	2.887	1.833	2.574
Recycling	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	0
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
<b>Produktion</b>							
Poly-Si <sup>1</sup>	9.774	10.749	10.856	n. v.	n. v.	n. v.	
Mono-Si	8.408	9.199	10.034	9.385	9.415	9.855	
Si-Wafer	3.209	3.461	3.876	n. v.	n. v.	n. v.	
<b>Importe</b>							
Roh-Si	188.471	206.487	229.535	190.943	186.725	214.808	
Poly-Si	31.867	28.635	27.093	18.361	14.992	14.895	
Mono-Si	2.371	2.901	3.267	n. v.	n. v.	n. v.	
Lager Si							
Recycling	49	5	7	6	n. v.	n. v.	

<sup>1</sup> Daten 2009 ohne Produktionsmengen für Juni und Juli



## Kanada

Kanada produziert sowohl Silizium als auch Ferrosilizium und Ferrosilikomagnesium, hauptsächlich für den Export in die USA, aber auch in andere Länder. Heimischer Bedarf an Silizium besteht v. a. an Rohsilizium mit niedrigem Eisengehalt zur Herstellung von primären Al-Legierungen.

Im Industriepark von Bécancour, Quebec, rund 160 km nordöstlich von Montreal, liegt seit 1976 die Siliziumhütte von **Bécancour Silicon Inc.**, mittlerweile seit über zehn Jahren ein Joint Venture von Globe Speciality Metals bzw. Ferroglobe plc (51 %) und The Dow Chemical Company (49 %). Das Werk verfügt über drei Öfen (2 x 24 MVA-, 1 x 32 MVA-Anschlussleistung), in denen seit Ende 1997 der SKTEX-Prozess angewandt wird, wonach in gleichen Öfen ohne große zeitliche Unterbrechung wahlweise Si oder FeSi 75 % produziert werden kann. Die Hütte besitzt eine Kapazität von 47.000 tpa Rohsilizium (oder wahlweise Ferrosilizium) zzgl. Mikrosilika. Der zur Produktion benötigte Quarz stammt aus einem Steinbruch der Shabogamo Mining & Exploration (SME) in La Malbaie, 250 km von Bécancour entfernt, während der Strom durch Wasserkraft generiert wird.

Weiterhin wurde im Werk von Bécancour Silicon Inc. über mehrere Jahre auch UMG-Si (Kapazität 2007: 7.200 tpa) produziert. Eine Erhöhung der Kapazität auf 14.400 tpa UMG-Si bis 2009 war angekündigt. Ob dies umgesetzt wurde und ob überhaupt noch UMG-Si produziert wird, ist nicht bekannt.

Auch das Siliziumunternehmen Elkem ASA ist seit 1984 in Quebec mit einem Werk in Chicoutimi, unweit von Saguenay, vertreten. Dieses Werk der **Elkem Metal Canada Inc.** wurde im Jahr 1966 unter der Bezeichnung Les Siliciums de Chicoutimi Ltée durch die damalige Union

Carbide Canada Ltd., die Aluminium Company of Canada, die Montreal Engineering Company und die Royal Securities Corporation Ltd. als Joint Venture zur Produktion von Ferrosilizium gegründet. Es ging im Juli 1967 in Produktion und besitzt mit einem 30 MVA-Lichtbogenofen eine Kapazität von 45.000 tpa FeSi sowie FeSiMg verschiedener Qualitäten. Zum Werk gehört ein eigenes 37 MW-Wasserkraftwerk am Chicoutimi River, aber auch ein Energierückgewinnungssystem.

Die im Jahr 2012 gegründete Canadian Metals Inc. aus Val-d'Or, Québec, plant seit vielen Jahren die Errichtung einer neuen und „technisch modernen“ Siliziumhütte mit (derzeit) einem Elektrolichtbogenofen zur Produktion von (derzeit) bis zu 22.000 tpa Rohsilizium in Baie-Comeau in Quebec. Die Quarzversorgung soll aber auf jeden Fall aus der Langis-Lagerstätte in Quebec erfolgen.

Nahe Golden, British Columbia, liegt der historische Horse Creek Quarzsteinbruch, der gegenwärtig zur Produktion von >1 Mio. tpa Quarz (>99,6 % SiO<sub>2</sub>) zur Versorgung der geplanten Siliziumhütte der kanadischen Firma Sinova Quarz Inc. in Tennessee/USA vorbereitet wird. Auch eine geplante Siliziumhütte in Washington/USA soll mit Quarz aus Golden versorgt werden (s. USA).

Mit dem im Jahr 2001 gegründeten Unternehmen Canadian Solar Inc. besitzt Kanada einen der weltweit führenden Produzenten von Solarmodulen mit derzeit 17 Produktionsstätten in vier Ländern (Kanada – vermutlich gestundet, China, Thailand und Vietnam). Das Unternehmen hat angekündigt, zukünftig in Qinghai, China, jährlich bis zu 50.000 t Polysilizium produzieren zu wollen. In Kanada selbst werden Silikone und auch in mehreren Fabs Chips für die Halbleiter- und Solarindustrie gefertigt, jedoch kein Polysilizium oder Halbleiter-/Solarsilizium als hierfür benötigte Vorprodukte.

Tab. 59: Produktion in bzw. Exporte von Silizium (Si) und Ferrosilizium (FeSi) (in t) aus Kanada seit dem Jahr 2005, Quellen: BRITISH GEOLOGICAL SURVEY WORLD MINERAL PRODUCTION (versch. Jahre) bzw. GLOBAL TRADE TRACKER (2023).

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
<b>Produktion</b>									
Si	30.000	30.000	30.000	50.000	30.000	30.000	30.000	30.000	12.000
FeSi	70.000	70.000	70.000	35.000	25.820	36.786	31.039	31.979	38.817
<b>Exporte</b>									
Si	47.177	47.737	59.756	69.629	25.028	43.670	52.745	42.299	19.646
FeSi	30.583	31.223	38.782	38.429	28.315	42.020	44.052	46.672	47.723
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
<b>Produktion</b>									
Si	30.000	30.000	27.000	28.000	34.000	34.000	25.000	30.000	n. v.
FeSi	35.500	35.000	38.000	40.000	36.000	37.000	34.000	30.000	n. v.
<b>Exporte</b>									
Si	23.159	22.776	19.858	24.384	29.364	29.546	22.970	29.503	52.564
FeSi	47.737	48.367	46.364	51.526	46.651	47.958	44.888	42.195	60.725



## Kasachstan

Kasachstan war in seiner Vergangenheit stets ein bedeutender Produktionsstandort von Ferrolegierungen aller Art. Aufbauend auf den großen Chromitlagerstätten des Landes konzentrierte sich die Produktion allerdings vor allem auf Ferrochrom.

Im Jahr 2021 waren in Kasachstan sechs Unternehmen in der Produktion von Ferrosilizium, Ferrosilikomangan, Ferrosilikochrom, Ferrosilikoaluminium bzw. früher auch einmal Rohsilizium aktiv:

- Der im Jahr 1994 gegründete halbstaatliche kasachische Bergbau- und Hüttenkonzern Eurasian Resources Group (ERG) produzierte durch sein 1995 gegründetes Tochterunternehmen **TNC Kazchrome JSC** an zwei Standorten Ferrolegierungen:
  - ▶ Aksu in der Region Pavlodar (Eröffnung 1968, nach vollständiger Renovierung Wiederinbetriebnahme 1998, 28 Öfen in vier Hütten, Kapazität: 1,12 Mio. tpa FeCr, FeSiCr, FeSiMn und FeSi) und
  - ▶ Aktobe in der Region Aktobe (Eröffnung 1943, nach vollständiger Renovierung Wiederinbetriebnahme 2014, vier Öfen in zwei Hütten, Kapazität: 630.000 tpa FeCr und FeSi)

Nach [www.metalexpert.com](http://www.metalexpert.com) beliefen sich die Produktionsmengen in Aksu im Jahr 2020 auf 927.600 t FeCr, 79.600 t FeSiMn, 69.900 t FeSiCr und 55.700 t FeSi. In Aktobe wurden im gleichen Jahr 675.000 t FeCr und 200 t FeSi produziert.

- Das Unternehmen **KSP Steel LLP** eröffnete Ende 2007 in der Stadt Pawlodar, in der gleichnamigen Region, ein Stahlröhrenwerk, dem im Dezember 2013 ein Werk zur Produktion von Ferrolegierungen angeschlossen wurde. Seitdem werden hier in mittlerweile drei Öfen (2 x 24 MVA-, 1 x 9 MVA-Anschluss-

leistung) Ferrosilizium und Ferrosilikoaluminium nicht nur für den Eigenbedarf produziert. Die Kapazität liegt bei 30.000 tpa Ferrolegierungen, die FeSi-Produktion im Jahr 2020 betrug 9.500 t ([www.metalexpert.com](http://www.metalexpert.com)). Die FeSiAl-Produktion erfolgt in Unterlizenz für die ICMD Holding GmbH mit Sitz in Isernhagen bei Hannover. Langfristig plant ICMD in Karaganda ein eigenes Werk mit vier 33 MVA-Öfen und einer Kapazität von 90.000 tpa FeSiAl, aber auch FeSi und FeSiMn zu errichten.

- Die **YDD Corporation LLP** eröffnete im Juli 2019 im Industriegebiet von Karaganda in der gleichnamigen Region ein Ferrosiliziumwerk. Dieses Werk besitzt drei Öfen je 85,5 MVA und einen Ofen mit 94,5 MVA-Anschlussleistung und erreicht damit eine Gesamtkapazität von 180.000 tpa FeSi 65 %, FeSi 70 % und FeSi 75 % zzgl. 18.000 tpa Mikrosilika. Im Jahr 2020 konnten nach [www.metalexpert.com](http://www.metalexpert.com) bereits 72.900 t FeSi produziert werden. Im Frühjahr 2021 begann zudem die Produktion von FeSiMn und soll durch fünf Öfen bald eine Kapazität von 57.000 tpa erreichen.
- **Termitau Electrometallurgical Plant JSC**, ein Unternehmen der kasachischen Saikan LLP, geht auf ein Chemiewerk zurück, das im Jahr 1941 ebenfalls bei Karaganda errichtet wurde. Seit dem Jahr 2000 wird hier neben Calciumcarbid, weiterhin das Haupterzeugnis, auch Ferrosilikomangan produziert, nach [www.metalexpert.com](http://www.metalexpert.com) 22.300 t im Jahr 2019, aber nur 1.900 t im Jahr 2020.
- **Taraz Metallurgical Plant LLP** ist ein Tochterunternehmen der kasachischen Industrieholding SAT & Company JSC. Es betreibt in Taraz, der Hauptstadt der Region Zhambyl, eine Hütte mit einer Kapazität von 100.000 tpa Ferrosilikomangan, produzierte im Jahr 2020 jedoch nur 34.600 t dieser Ferrolegierung.
- Die **KazSilicon Metallurgical Plant LLP** eröffnete im Juni 2022 im Bezirk Karatal, Region Almaty, nach Modernisierung eine Siliziumhütte (Kapazität: 6.000 tpa), die bereits im

Jahr 2006 in Produktion ging, aber zwischen 2015 und 2022 gestundet war. Die Versorgung mit Quarz (> 99,5 % SiO<sub>2</sub>) erfolgt aus der in 25 km Entfernung liegenden, in der Nähe des Dorfes Zhalybulak gelegenen Sarykulsokoye-Gangquarzlagerstätte, die ebenfalls zum Unternehmen gehört. Der Exportanteil des produzierten Rohsiliziums soll bei 80 % liegen.

- Im Jahr 2008 wurde durch zwei metallverarbeitende russische Unternehmen (Anteil 84 %) und unter Beteiligung der damaligen ThyssenKrupp Metallurgie GmbH (16 %) die **Silicium Kazakhstan LLP** zur Produktion von Rohsilizium in Kasachstan gegründet. In den folgenden Jahren errichtete ThyssenKrupp am Industriestandort Karaganda eine moderne Siliziumhütte mit zwei Öfen, die 2011 mit einer Kapazität von 24.000 tpa Rohsilizium in Produktion gingen. Aufgrund erheblicher Schulden bei der Entwicklungsbank von Kasachstan wurde Silicium Kazakhstan dann jedoch im April 2013 verstaatlicht. Im Dezember 2016 wurde das Werk von der nationalen Bergbaugesellschaft JSC „Tau-Ken

Samruk“ erworben und unter der Bezeichnung **Tau-Ken Temir LLP** der Betrieb fortgeführt. Der eingesetzte Gangquarz stammte aus der Aktas-Lagerstätte im Distrikt Ulytau der Region Karaganda, die von der Silicon Mining LLP, ebenfalls eine Tochterfirma von Tau-Ken Samruk, abgebaut wurde. Ende des Jahres 2019 wurde die Siliziumproduktion in Karaganda aufgrund niedriger Weltmarktpreise eingestellt und bisher nicht wieder aufgenommen. Sowohl die Siliziumhütte als auch die zuliefernde Quarzlagerstätte stehen zum Verkauf.

Auch das Unternehmen **ANSA Silicon LLP**, seit 2019 eine Beteiligung des niederländischen Ferrometallgroßhandelsunternehmens Canarax Dutch BV, plant die Produktion von Rohsilizium in Kasachstan. Hierfür wird derzeit in Ekibastuz, Region Pawlodar, ein Werk mit vier Elektrolichtbogenöfen à 21 MVA-Anschlussleistung errichtet, das nach Inbetriebnahme (an noch unbekanntem Datum) eine Kapazität von 35.000 tpa Si zzgl. Mikrosilika aufweisen soll. Das Silizium soll v. a. in der Aluminiumherstellung zum Einsatz kommen.

**Tab. 60: Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi), Ferrosilikomangan (FeSiMn) und Ferrosilikochrom (FeSiCr) (in t) aus Kasachstan seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	3	2	2	101	0	36	280	3.931	3.093
FeSi	54.024	45.277	30.935	24.068	17.636	2.316	86	522	493
FeSiMn	145.021	187.736	206.336	191.380	183.323	115.098	56.822	175.400	155.002
FeSiCr	40.662	51.059	79.163	84.014	34.281	46.976	49.879	84.140	96.650
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	449	10.471	17.533	17.233	16.213	13.798	4.091	244	100
FeSi	1.255	16.573	11.824	33.944	28.855	37.214	93.895	121.674	70.552
FeSiMn	126.643	99.314	121.510	62.901	88.934	98.854	76.212	91.168	34.508
FeSiCr	105.549	23.602	32.914	49.280	46.194	44.696	28.566	34.746	33.599



## Katar

Im Frühjahr 2017 eröffnete **Qatar Solar Technologies (QSTec)**, ein Unternehmen der Qatar Foundation for Education, Science and Community Development, in der Industriestadt Ras Laffan, nahe Doha, ein Werk zur Produktion von Polysilizium in Solarqualität. Dieses besitzt in seiner ersten Ausbaustufe eine Kapazität von ca. 8.400 tpa, die aber irgendwann auf 50.000 tpa gesteigert werden soll. QSTec war seit Anfang 2014 mit 29 % auch Anteilseigner der ehemaligen SolarWorld AG mit Fertigungsstätten in Freiberg und Arnstadt.

Die Handelsdaten von Katar deuten darauf hin, dass zwar im Jahr 2019 erstmals geringe Mengen an Polysilizium produziert bzw. exportiert wurden, aber das Werk große Anlaufschwierigkeiten hat. So wurde im Jahr 2021 nur Silizium < 99,99 % Si erzeugt, im Jahr 2022 aber wohl nach Überwindung technischer Schwierigkeiten dann zudem Silizium > 99,99 % Si, wenn erneut auch nur in geringen Mengen. Nach katarischer Zollbehörde wurden im Jahr 2022 73 t Silizium < 99,99 % Si nach Indien und 1.604 t Silizium > 99,99 % Si nach Malaysia exportiert. Die malaysische Zollbehörde vermerkte dagegen den Import von 11.194 t Silizium < 99,99 % Si und 198 t Silizium > 99,99 % Si aus Katar.

**Tab. 61: Exporte von Silizium (Si, < 99,99 % Si) und Silizium (Poly-Si, > 99,99 % Si) (in t) aus Katar seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	0	15	62	149	173	835	538	130	12
Poly-Si	0	6	0	0	0	0	0	0	< 1
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	0	0	0	0	0	36	< 1	1.459	73
Poly-Si	0	0	< 1	0	< 1	32	0	0	1.604



## Laos

Das Unternehmen **Lao Silicon Co., Ltd.**, das 2006 mit Sitz in Vientiane/Laos gegründet wurde (ursprünglich als Joint Venture zwischen A&C (Far East) Industrial Ltd. aus Hongkong und einem lokalen Partner), nahm 2007 östlich von Vientiane die Produktion von Rohsilizium auf. 2012 gab die japanische Firma Itucho Metals Corporation bekannt, ebenfalls Anteile an diesem Unternehmen erworben zu haben. Die Hütte von Lao Silicon verfügt über drei Öfen je 8 MVA-Anschlussleistung bzw. eine Kapazität von 13.000 tpa Si. Genutzt werden die in Laos günstig zur Verfügung stehende Wasserenergie, das weitflächig zur Verfügung stehende Reduktionsmittel Holzkohle sowie teils händisch vorsortierter Quarz.

Im Oktober 2022 nahm Lao Silicon zudem den ersten von geplanten sechs Öfen je 12,6 MVA-

Anschlussleitung an einem zweiten Hüttenstandort in Tabo in Betrieb. Dort sollen zukünftig bis zu 50.000 tpa Rohsilizium erzeugt werden.

Lao Silicon exportiert weltweit mit den USA, Europa und Thailand als Hauptzielländer.

Laos plant auch den Ausbau der eigenen PV-Kapazitäten, allerdings ohne den Aufbau einer vorgelagerten Silizium-Wertschöpfungskette. Beispiele hierfür sind das 76 MWp „power purchase agreement“ (PPA) zwischen dem Unternehmen nValid Precision Engineering und der staatlichen laotischen „Electricite du Laos“ (EDL), der von der Wealth Power Group intendierte Bau einer 580 MWp PV-Anlage oder der durch die französische EDF geplante Bau eines schwimmenden Solarkraftwerks mit einer Leistung von 240 MWp am Wasserkraftwerk Nam Theun 2 am Nam Theun-Fluss.

**Tab. 62: Weltweite Importe von Silizium (Si) (in t) aus Laos seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	0	0	0	3.040	7.649	7.829	3.010	15.301	13.172
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	10.253	9.179	7.209	1.916	9.225	4.630	939	1.148	12.957



## Malaysia

Auf Borneo, im Bundesstaat Sarawak, in 60 km Entfernung von der Küstenstadt Bintulu, hat die malaysische Regierung auf Basis der dort günstig verfügbaren Wasserkraft seit dem Jahr 2008 auf 8.000 ha Fläche den Samalaju Industriepark zur Ansiedlung besonders energieintensiver Industrien erschlossen. Ein Tiefwasserhafen erlaubt den Export der dort hergestellten Produkte (Aluminium, Manganlegierungen (FeSiMn, HCFeMn), Rohsilizium, Ferrosilizium, Polysilizium, Phosphat) in alle Welt.

Die im Samalaju Industriepark derzeit tätigen Produzenten von Silizium bzw. Siliziumprodukten sind:

- **OM Materials (Sarawak) Sdn. Bhd.**, ein Joint Venture des Mn-Bergbau- und Hüttenkonzerns OM Holdings Ltd. (75 %) aus Singapur und der malaysischen Cahya Mata Sarawak Bhd. (25 %), nahm im September 2014 ein mit 16 Öfen in acht Hütten ausgestattetes Werk mit einer Kapazität von 308.000 tpa FeSi sowie 300.000 tpa FeSiMn/HCFeMn in Betrieb. Im Jahr 2022 kündigte das Unternehmen an, zwei seiner Öfen auf die Produktion von Rohsilizium umzurüsten, so dass ab 2023 sechs Öfen zur Produktion von FeSi, acht Öfen zur Produktion von Mn-Legierungen und zwei Öfen zur Produktion von Rohsilizium mit einer Kapazität von 21.000 bis 25.000 tpa dienen werden. Von den 16 Öfen sind jedoch nicht immer alle in Betrieb.
- Im Jahr 2011 kündigte auch der südkoreanische Zementkonzern Asia Cement Co., Ltd

(ACCL) an, durch sein Tochterunternehmen Asia Advanced Materials Sdn. Bhd., im Samalaju Industriepark eine Siliziumhütte errichten zu wollen. In einer ersten Phase sollte diese eine Kapazität von 33.000 tpa Rohsilizium und nach einer zweiten und dritten Ausbauphase eine Kapazität von 100.000 tpa Silizium besitzen. Mitte 2014 waren die Bauarbeiten für die erste Phase abgeschlossen, aber bis 2017 noch keine Produktion erfolgt. Ein Jahr später nahm jedoch am gleichen Ort die 2016 gegründete **PMB Silicon Sdn. Bhd.**, eine Tochtergesellschaft der malaysischen PMB Technology Bhd., die Produktion von Rohsilizium mit einer Anfangskapazität von 32.000 tpa auf. In einer zweiten Phase wurde bis Ende 2020 eine Kapazität von 72.000 tpa Rohsilizium erreicht. Eine dritte Phase mit Abschluss in Q3 2023 soll die Kapazität nochmals auf 108.000 tpa Si erhöhen. Das erzeugte Silizium sollte anfangs vor allem zur Herstellung von Al-Legierungen im benachbarten Werk der Press Metal Bhd. eingesetzt werden, wird jedoch mittlerweile auch in großem Umfang exportiert. Nach Unternehmensangaben wurden im Finanzjahr 2021 rund 48.000 t und im Finanzjahr 2022 rund 52.000 Silizium verkauft. Von den Einnahmen der Firma stammen ca. 20 – 30 % aus Verkäufen an OCIM Sdn. Bhd. (s. u.) für deren Produktion von Polysilizium.

- **Pertama Ferroalloy Sdn. Bhd.** ist eine gemeinsame Beteiligung des Mn-Unternehmens Asia Minerals Ltd. (60 %) aus Hongkong, der japanischen Unternehmen Nippon Denko Co., Ltd. (25 %) und Shinsho Corporation (7 %) sowie der malaysischen Carbon Capital Corp. Sdn. Bhd. (8 %). Im Jahr 2016 nahm das 2010 gegründete Unternehmen im

**Tab. 63: Produktion von Ferrosilizium (FeSi) und Mn-Legierungen (in t) durch die OM Materials (Sarawak) Sdn. Bhd., Quelle: ANNUAL REPORTS DER OM HOLDINGS LTD.**

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSi	8.641	104.554	126.261	174.540	220.515	230.735	167.443	131.059	140.355
Mn-Leg.	0	0	876	173.911	242.341	248.163	227.406	216.539	216.813



Samalaju Industriepark eine Hütte mit einer Kapazität von 120.000 tpa FeSiMn, 54.000 t MCFeMn und LCFeMn, 60.000 tpa FeSi 75 % sowie 200.000 tpa Sintermanganerz in Betrieb. Nach Asian Metal wurden in diesem Werk im Jahr 2022 ca. 40.000 t FeSi produziert. Durch Installation von zwei neuen Öfen soll die Kapazität im Jahr 2025 auf 100.000 tpa FeSi steigen.

- Das 1959 gegründete südkoreanische Chemieunternehmen OCI Company Ltd. ist seit 2008 in der Produktion von Polysilizium (Malaysia, Südkorea) und mittlerweile auch in der Herstellung von Solar- und Halbleitersilizium, Wafern, Modulen und der Errichtung von Solarparks tätig. Im Mai 2017 übernahm OCI für damals umgerechnet 173 Mio. US\$ das Siliziumwerk der japanischen Tokuyama Corporation im Samalaju Industriepark, die dort ab dem Jahr 2013 in zwei Werken mit der Produktion von Polysilizium begonnen hatte. In dem einen Werk wurde mit einer Kapazität von 6.200 tpa Polysilizium für die Halbleiterindustrie, in dem anderen Werk

mit einer Anfangskapazität von 6.000 tpa Polysilizium für die Solarindustrie produziert. Durch ihre neu gegründete Tochterfirma **OCIM Sdn. Bhd.** wurde die Gesamtkapazität mittlerweile auf 35.000 tpa erhöht, wobei Halbleitersilizium zukünftig vor allem (aber nicht ausschließlich) in Südkorea produziert werden soll. OCI kündigte mittlerweile an, die Kapazität in Malaysia in mehreren Phasen bis 2027 auf 65.000 tpa (erste Phase bis 2025 auf 45.000 tpa) erhöhen zu wollen. Zusätzlich sollen auch in Malaysia ab 2026 bis 10.000 tpa Halbleitersilizium produziert werden.

Weiterhin betreibt die OCI-Mehrheitsbeteiligung **OCI Speciality Co., Ltd.** am Standort Banting im Bundesstaat Selangor eine Fabrik zum Bruch von Rohsilizium, Produktion von Siliziumstäben nach dem CZ-Verfahren sowie zur Herstellung von Wafern und anderen Metallen für die Solarindustrie. Diese Fabrik war im Jahr 2009 noch unter dem Namen Elpion Silicon Co., Ltd. gegründet worden und nahm im Jahr 2015 die Produktion auf.

**Tab. 64: Weltweite Importe von Silizium (Si), Polysilizium (Poly-Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Malaysia seit dem Jahr 2014, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	5.726	6.031	3.400	188	420	5.862	36.998	50.111	50.123
Poly-Si	1.439	6.184	10.195	11.431	12.045	22.019	23.396	31.066	25.058
FeSi	325	52.269	35.258	93.065	105.230	115.345	90.065	52.693	90.065
FeSiMn	1.681	225	1.107	37.850	64.825	92.123	95.856	99.759	71.670



## Mexiko

In Mexiko wird im Bundesstaat Nuevo León Ferrosilikomangan teils für den heimischen Markt, teils für den Export – vor allem in die USA – produziert. Das 1953 gegründete mexikanische Unternehmen **Compañía Minera Autlán, S.A.B. de C.V.** mit Firmensitz in diesem Bundesstaat gilt als der größte Manganproduzent in Mittel- und Nordamerika. Neben den drei Bergbaustandorten Molango, Nonoalco und Naopa betreibt das Unternehmen Ferrolegierungswerke in Tamós, Gómez Palacio und Teziutlán.

- Ferrosilikomangan wird neben verschiedenen Arten von Ferromangan im 1974 errichteten Werk Tamós in der Nähe der Mangamine Molango produziert. Dieses Werk ist das größte von Autlán. Es liegt in der Nähe des Dorfes Tamós, Gemeinde Pánuco, im Norden des Bundesstaates Veracruz in der Nähe des Hafens von Tampico. Das Werk verfügt über fünf Elektroöfen, von denen zwei auch für die Produktion von Ferromangan, Ferrosilikomangan und Ferrosilizium verwendet werden.
- Das Werk Gómez Palacio nahm 1960 den Betrieb auf. Es wurde im Jahr 1993 von Autlán übernommen, danach modernisiert und 1995 wieder in Betrieb gestellt. 2016 und 2020 war die Produktion zwischenzeitlich unterbrochen. Die Anlage im nordwestlichen Bundesstaat Durango produziert Ferrosilikomangan mit einer Kapazität von bis zu 33.000 tpa.

- Das Werk „Ferroaleaciones Teziutlán“ im Bundesstaat Puebla, das in den 1950er Jahren das erste Ferrolegierungswerk Mexikos war, gehört seit 1973 zu Autlán. Derzeit produziert es mit vier Öfen Ferrosilikomangan.

Die mexikanische Tochterfirma **Nitrocor, SA de CV.** des 1993 gegründeten Familienunternehmens Hascor Metals, S.A. de C.V. (Hascor-Gruppe) betreibt seit 1996 in der Hafenstadt Tampico, Bundesstaat Tamaulipas, die Werke Ramji und Tulsi und produziert dort heute in insgesamt 16 Öfen verschiedene stickstoffhaltige Ferrolegierungen, Manganlegierungspulver und auch Ferrosilikomagnesium (Kapazität: 3.000 tpa).

Mexiko gilt als strategisch wichtiger (zukünftiger) Standort der Halbleiterindustrie im Bestreben, Lieferketten regional zu stärken (auch vor dem Hintergrund des amerikanischen „Chips and Science Act“). Intel Mexiko z. B. betreibt mit dem Guadalajara Design Center im Bundesstaat Jalisco das größte Entwicklungszentrum für Halbleiter in Lateinamerika. Infineon hat seinen Produktionsstandort in Tijuana in den vergangenen Jahren ausgebaut. In Regierungskonsultationen zwischen Mexiko und den USA wurden zuletzt im Rahmen des High Level Economic Dialogues Pläne zum Ausbau der Halbleiterproduktion in Mexiko diskutiert. Die mexikanische Regierung strebt den Aufbau von Produktionskapazitäten in südlichen Bundesstaaten aufgrund der dortigen Verfügbarkeit von Wasser an. Pläne zum Aufbau von Produktionskapazitäten von Polysilizium sind dagegen nicht bekannt.

Tab. 65: Produktion von Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in Mexiko,

Quelle: BRITISH GEOLOGICAL SURVEY WORLD MINERAL PRODUCTION (versch. Jahre).

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FeSiMn	104.780	97.457	109.286	114.320	85.065	134.470	139.047	161.221	157.855
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSiMn	164.852	139.363	134.251	148.142	151.991	154.209	147.784	170.929	175.396

**Tab. 66: Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Mexiko seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FeSi	286	688	95	411	227	685	648	492	315
FeSiMn	33.016	18.059	20.339	21.185	15.485	34.352	36.527	46.154	37.524
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSi	383	485	580	241	203	734	540	540	601
FeSiMn	48.322	35.127	30.852	30.614	26.981	41.413	43.050	37.815	51.483



## Nordkorea

Aus den weltweiten Handelsdaten ist bekannt, dass Nordkorea Ferrosilizium produziert bzw. in früheren Jahren zeitweilig auch andere Ferrolegierungen wie FeNb, FeNi, FeMo, FeCr,

FeSiCr, FeSiMn, FeMn und FeW, aber auch Rohsilizium produzierte (s. Tab. 67). Ein Großteil der produzierten Ferrolegierungen wird nach China exportiert. Die stark schwankenden Exportmengen deuten auf Versorgungsengpässe mit Energie und/oder Elektroden in den Hütten hin. Hintergründe sind nicht bekannt.

**Tab. 67: Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Nordkorea seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	0	0	0	< 1	0	83	98	0	0
FeSi	9.722	6.614	8.061	12.236	6.690	19.132	21.065	23.843	25.892
FeSiMn	0	0	0	0	1.079	0	< 1	0	0
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	0	0	0	0	0	0	0	0	< 1
FeSi	24.680	19.462	29.693	32.597	41.516	45.767	15.408	37.093	37.306
FeSiMn	0	0	0	0	0	0	0	0	0



## Nordmazedonien

Im heutigen Nordmazedonien existierte bis Ende des Jahres 2016 ein Werk zur Produktion von Ferrosilizium, untergeordnet auch Rohsilizium.

Bei diesem Werk der Jugohrom Ferroalloys Ltd. im Dorf Jegunovce im Pologtal handelte es sich um die 1952 gegründete Hütte der ehemaligen staatlichen Silmak dooel, die nach Privatisierung und mehreren Eigentümerwechseln im Jahr 2010 an die sich im russischen Privatbesitz befindliche Camelot-Gruppe mit Sitz in Hongkong verkauft wurde. Die Hütte besaß nach mehreren Erweiterungen zuletzt sieben Elektrolichtbogenöfen zur Produktion von Ferrosilizium und untergeordnet auch Rohsilizium (Gesamtkapazität: 84.000 tpa). Es wurde jedoch fast ausschließlich Ferrosilizium produziert (vgl. Tab. 68).

Die Hütte wurde in ihrer mehr als 50-jährigen Geschichte v. a. durch die von ihr ausgehenden starken Wasser- und Luftverschmutzungen bekannt, bevor sie im November 2016 nach mehreren Fristverlängerungen der Behörden endgültig stillgelegt wurde. Mehreren späteren Ankündigungen, nach Installation von Luftfiltern erneut wieder in Produktion gehen zu wollen, folgten bis heute keine Umsetzungen.

Andere Ferrolegierungen produziert in Nordmazedonien jedoch weiterhin das Unternehmen Skopski Leguri dooel, das im Jahr 2005 aus dem staatlichen Metallurgiekomplex Rudnitsa und Zhelezarnitsa im Industriegebiet von Skopje hervorging. Seit 2006 produziert Skopski Leguri Ferrosilikomangan und Ferromangan (Gesamtkapazität: 150.000 tpa mit fünf Öfen) sowie seit 2008 auch Ferronickel und Nickelroheisen.

**Tab. 68: Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Nordkorea seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	2.156	2.174	875	1	3	56	2.878	260	770
FeSi	69.514	64.080	30.650	26.891	14.248	13.751	50.856	38.972	67.595
FeSiMn	3.681	3.852	41.865	75.621	15.242	29.519	47.502	22.623	1.398
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	95	0	7	140	48	119	96	0	0
FeSi	80.535	46.921	33.089	1.736	169	210	129	70	120
FeSiMn	2	91	145	72	130	249	87	171	0



## Norwegen

In Norwegen sind mehrere Unternehmen in der Produktion von Silizium, aber auch Ferrosilizium und weiteren Ferrolegierungen aktiv. Alle nutzen die in Norwegen weitflächig und günstig verfügbare Wasserkraft, die regional durch Windenergie unterstützt wird. Im Sommer 2023 lag der Industriestrompreis in Mittelnorwegen bei im Weltvergleich sehr niedrigen 2–3 ct/kWh.

Im Jahr 2010 übernahm die **Wacker Chemie AG** für 66,5 Mio. € das im Jahr 1964 durch die vormalige FeSil ASA eröffnete Werk Holla in Kyrksæterøra, Gemeinde Heim, Provinz Trøndelag, ca. 70 km südwestlich von Trondheim. Die Si-

liziumhütte in Holla ist mit vier Öfen (47 MW-, 33 MW-, 18 MW- bzw. 14 MW-Anschlussleistung) ausgestattet und besitzt seit Inbetriebnahme des weltgrößten Siliziumofens (47 MW) im Jahr 2019 eine Zulassungskapazität von rund 100.000 tpa Silizium zzgl. Mikrosilika (JORDAL ET AL. 2023, Norwegian Environment Agency). Der für die Produktion benötigte Quarz wird sowohl lokal aus Norwegen als auch aus verschiedenen anderen Ländern (z. B. Spanien und Frankreich) bezogen. Heute versorgt der Produktionsstandort Holla die Wacker Chemie AG mit rund einem Drittel des vom Konzern benötigten Rohsiliziums. Im Mai 2022 kündigte Wacker Chemicals Norway AS an, seine Hütte in Holla bis Ende 2025 möglicherweise um einen weiteren Großofen erweitern und damit seine Kapazität vor Ort noch einmal um 50 % erhöhen zu wollen.



Abb. 52: Gemisch aus Quarzit und Quarzkiesen aus verschiedenen Ländern für die Siliziumproduktion im hochmodernen Werk Holla der Wacker Chemie AG in Norwegen, Foto: BGR.

Tab. 69: (Roh-)Produktion von Rohsilizium (in t) durch Wacker Chemical Norway AS seit dem Jahr 2013, Quelle: NORWEGIAN ENVIROMENT AGENCY.

Werk	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Holla	58.821	58.955	51.575	52.254	49.337	47.845	61.204	80.129	81.433	85.206



Abb. 53: Abstich von flüssigem Rohsilizium aus dem weltgrößten Siliziumofen (47 MW) im Werk Holla der Wacker Chemie AG, Foto: BGR.

Das größte norwegische und in vielen weiteren Ländern tätige Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette vom Quarzabbau über die Rohsilizium- bzw. Ferrosiliziumproduktion bis hin zur Fertigung von Silikonen bzw. Polysiliziumvorprodukten ist die 1904 gegründete **Elkem ASA** mit Sitz in Oslo. Sie ist seit 1917 und gegenwärtig an zehn Standorten in Norwegen, Indien, Island, China, Kanada und Paraguay in der Produktion von Ferrolegierungen aktiv. Elkem wuchs in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch Firmenzukäufe stark an und wurde im Jahr 2005 mehrheitlich vom norwegischen Mischkonzern Orkla ASA erworben. Dieser verkaufte seinen Anteil von 52,91 % an Elkem jedoch im April 2011 für 2 Mrd. US\$ an die China National Bluestar Group Co., Ltd., ein Gemeinschaftsunternehmen der staatlichen China National Chemical Corporation (79,48 %) und des US-Investmentunternehmens Blackstone Group Inc. (20,52 %).

Elkem ASA betreibt in Norwegen derzeit folgende Werke zur Produktion von Silizium bzw. Ferrosilizium:

- Salten in Straumen in der Gemeinde Sørfold, Provinz Nordland. Das Werk Salten wurde in den 1960er Jahren errichtet und ging 1967 mit einem ersten Ofen zur Produktion von Ferrosilizium in Produktion. Zwei weitere Öfen folgten 1970 und 1972 mit in den 2000er Jahren sukzessiver Erhöhung der Kapazität bei gleichzeitiger Umstellung auf die Produktion von Silizium. Heute werden im Werk Salten Rohsilizium (Zulassungskapazität: 130.000 tpa), Sidistar® – ein Polymeradditiv, sowie Mikrosilika produziert und von dort weltweit exportiert.
- Thamshavn liegt in der Gemeinde Orkland, Provinz Trøndelag, rund 40 km südwestlich von Trondheim. Das Werk wurde ursprünglich 1930 zur Verhüttung kupferführender Pyriterze aus der nahen Grube Løkken bzw. zur Produktion von Schwefel und Kupfermatte erbaut. 1964 ging der erste Ofen zur Produktion von FeSi in Betrieb, dem 1981 ein zweiter Ofen folgte. 1986 wurde die Hütte von Elkem übernommen und in jüngster Zeit v. a. um ein sehr effizientes Energierückgewinnungs-

system erweitert. Seit dem Jahr 1998 werden mit dem 25 MW-Ofen, seit 2006 auch mit dem großen 45 MW-Ofen ausschließlich Rohsilizium (Zulassungskapazität: 100.000 tpa) sowie Mikrosilika (Zulassungskapazität: 28.000 tpa) produziert. Aufgrund zu hoher Verunreinigungen setzt das Werk Thamshavn nicht den unternehmenseigenen Quarzit aus Tana/Nordnorwegen, sondern vor allem Quarzkiese aus Spanien sowie untergeordnet Quarz aus Ägypten als Quarzrohstoffe ein.

- Bremanger in Svelgen in der Gemeinde Bremanger, Provinz Vestland. Das Werk ging 1928 in Produktion und verfügt mittels seiner zwei Reduktionsöfen über eine Zulassungskapazität von 32.000 tpa FeSi in Form von 18 verschiedenen Qualitäten sowie mittels eines weiteren Ofens über eine Zulassungskapazität von 40.000 tpa Silgrain®. Letzteres ist ein Siliziummehl > 99 % Si, das in speziellen Anwendungsbereichen von Silizium und zur Herstellung von Trichlorsilanen und damit für die Produktion von Polysilizium verwendet wird. Zusätzlich wird Mikrosilika produziert.
- Bjølvefossen in Åvik in der Gemeinde Kvam, Provinz Vestland. Dieses Werk wurde im Jahr 1905 zur Nutzung der aus dem Fluss Bjølvo gewonnenen Wasserkraft gegründet und produziert seit den 1920er Jahren Ferrolegerungen. Heute verfügt es über zwei Reduktionsöfen zur Produktion von 120 verschiedenen Spezialprodukten auf FeSi-Basis (Zulassungskapazität: 60.000 tpa FeSi) und ist eine der weltgrößten Hütten zur Produktion von FeSiMg (Zulassungskapazität: 75.000 tpa).
- Rana im Mo Industriegebiet von Mo i Rana, Provinz Nordland. Elkem hat dieses Werk im Dezember 2016 vom ehemaligen Marktbegleiter FeSil ASA übernommen. Es verfügt über zwei Öfen mit einer Gesamtjahreszulassungskapazität von 90.000 t FeSi (in neun verschiedenen Qualitäten) bzw. 23.000 t Mikrosilika.

Der im Werk Holla und in anderen Siliziumhütten eingesetzte Quarzit stammt aus dem 1973 eröffneten und 1983 von Elkem übernommenen Großsteinbruch Tana in Austertana, rund 450 km nördlich des Polarkreises, und wird von dort zu den verschiedenen Siliziumhütten entlang der norwegischen Küste verschifft.

Große Hoffnungen setzt Elkem auch auf das hydrothermale Quarzvorkommen Nasafjell in der Gemeinde Saltfjell, Provinz Nordland, dessen Aufschluss jedoch von der örtlichen Bevölkerung nicht unterstützt wird.

Zu Elkem ASA gehörte bis zum Jahr 2021 auch die Elkem Solar AS, ein ursprünglich 1996 von der norwegischen Renewable Energy Corporation ASA gegründetes und 2015 für damals 511 Mio.€ übernommenes Unternehmen zur Produktion von Wafern, Zellen und Solarmodulen in Skandinavien. Die im Jahr 2021 für einen Preis von 771 Mio. US\$ zum indischen Petrochemie-Textil-Mischkonzern Reliance Industries Ltd. gewechselte REC Solar Holdings AS produziert als **REC Solar Norway AS** am Standort Kristiansand Solarsilizium (Kapazität: 8.400 tpa) und fertigt daraus am Standort Herøya monokristalline Wafer (Kapazität: 650 MWp). In der im Jahr 2009 in Kristiansand errichteten Fabrik erfolgt die Produktion von Solarsilizium nicht, wie weltweit üblich, durch Produktion und Aufschmelzen von Polysilizium, sondern mit 85 % geringerem Energieaufwand durch Raffinade und Weiterverarbeitung von Siliziumschlamm (engl.: kerf), der beim Sägen von Polysiliziumblöcken anfällt.

Zu den weiteren norwegischen Produzenten von Wafern für die Solarindustrie gehören **NorSun AS** mit Produktionsstandort in Årdal/Provinz Vestland (Jahreskapazität: 1 GWp) und bis zur Insolvenz im August 2023 **Norwegian Crystals AS** mit Produktion in Glomfjord/Provinz Nordland (500 MWp).



Tab. 70: (Roh-)Produktion (in t) von Elkem ASA in Norwegen seit dem Jahr 2013,  
Quelle: NORWEGIAN ENVIRONMENT AGENCY. n. v. = nicht verfügbar.

Werk	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Salten</b>					
Si	93.716	81.768	73.806	89.782	90.570
Sidistar® + Mikrosilika	31.584	40.851	36.974	32.449	32.064
<b>Thamshavn</b>					
Si	67.700	80.429	76.232	76.783	72.541
<b>Bremanger</b>					
FeSi	67.257	69.597	67.215	69.088	72.894
Silgrain®	26.779	24.288	23.408	27.260	25.626
Mikrosilika	16.284	17.674	17.593	18.552	19.204
<b>Bjølfossen</b>					
FeSi	56.571	59.568	55.962	46.482	44.028
FeSiMg	46.270	51.665	52.268	55.198	57.780
Mikrosilika					
<b>Rana</b>					
FeSi	73.007	90.341	84.392	91.249	85.386
Mikrosilika	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
Werk	2018	2019	2020	2021	2022
<b>Salten</b>					
Si	81.517	79.952	82.243	95.517	90.604
Sidistar® + Mikrosilika	28.103	27.396	24.945	24.407	24.340
<b>Thamshavn</b>					
Si	72.670	81.889	76.241	73.230	68.006
<b>Bremanger</b>					
FeSi	72.484	56.409	69.642	71.086	70.819
Silgrain®	34.808	18.816	27.312	28.230	n. v.
Mikrosilika	18.915	17.192	15.081	15.864	13.053
<b>Bjølfossen</b>					
FeSi	46.046	45.043	56.324	68.341	60.877
FeSiMg	62.635	55.814	44.071	65.224	64.825
Mikrosilika	3.069	2.748	4.076	3.286	2.466
<b>Rana</b>					
FeSi	85.299	74.542	93.572	104.466	116.699
Mikrosilika	n. v.	n. v.	16.635		

**Tab. 71: Produktion von Solarsilizium (in t) durch REC Solar Norway AS in Kristiansand seit dem Jahr 2013, Quelle: NORWEGIAN ENVIRONMENT AGENCY.**

Werk	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Kristiansand	5.719	4.415	6.137	6.655	7.315	9.837	2.718	6.182	9.321	6.663

**Finnfjord AS** ist ein bedeutender Produzent von Ferrosilizium am Finnfjord in der Gemeinde Senja, rund 5 km von der Stadt Finnsnes, Provinz Troms og Finnmark, entfernt. Das Werk ging 1962 als KS/AS FeSil Nord in Produktion und setzte nach Firmeninsolvenz im Jahr 1982 unter der Bezeichnung Finnfjord Smelteverk AS und mittels seiner drei Öfen die Produktion von Ferrosilizium (Zulassungskapazität: 100.000 tpa) und Mikrosilika fort. Im Jahr 2012 wurde ein Energierückgewinnungssystem installiert, das seitdem jährlich bis zu 340 GWh zur Primärproduktion beiträgt. Der zur Produktion am Finnfjord benötigte Quarzit wird vom Marktbegleiter Elkem aus dem Großsteinbruch Tana bezogen.

Das französische Bergbau- und Metallurgieunternehmen **Eramet SA** produziert in Norwegen an drei Standorten Mangan bzw. Ferromangan und Ferrosilikomangan. Die Produktionsmengen von Ferrosilikomangan an den hierfür relevanten Standorten Porsgrunn (Zulassungskapazität: 160.000 tpa) und Kvinesdal (Zulassungskapazität: 180.000 tpa) sind Tab. 73 zu entnehmen. Zur Ferrosilikomanganproduktion setzt Eramet auch off-grade Rohsilizium aus den anderen norwegischen Siliziumhütten ein. Hauptsiliziumrohstoff ist jedoch Quarzit aus dem Kragerø Steinbruch in der Provinz Vestfold og Telemark, an dem Eramet zu zwei Dritteln beteiligt ist, und aus dem Mårnes Steinbruch in Saldfjord, Nordland, der seit 1970 von Elkem ASA betrieben wird.

**Tab. 72: (Roh-)Produktion von Ferrosilizium (in t) durch Finnfjord AS in Norwegen seit dem Jahr 2013, Quelle: NORWEGIAN ENVIRONMENT AGENCY.**

Werk	2013	2014	2015	2016	2017
Finnfjord	97.184	101.825	97.545	101.032	92.300
Werk	2018	2019	2020	2021	2022
Finnfjord	93.212	104.240	105.464	98.791	92.258

**Tab. 73: (Roh-)Produktion von Ferrosilikomangan (in t) durch Eramet Norway AS seit dem Jahr 2017, Quelle: NORWEGIAN ENVIRONMENT AGENCY.**

Werke	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Porsgrunn	63.319	70.582	56.948	65.323	55.435	62.708
Kvinesdal	158.343	147.682	148.414	165.741	174.866	157.955

**Tab. 74: (Roh-)Produktion von Silizium (Rohsilizium und Siliziumstaub) (Si), Ferrosilizium (FeSi), Ferrosilikomangan (FeSiMn) sowie Ferrosilikomagnesium (FeSiMg) in Norwegen seit dem Jahr 2013, berechnet nach Daten der NORWEGIAN ENVIRONMENT AGENCY.  
n. v. = nicht verfügbar.**

	2013	2014	2015	2016	2017
Si	247.016	245.440	225.021	246.079	238.074
FeSi	294.019	321.331	305.114	307.851	294.608
FeSiMn	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	221.662
FeSiMg	46.270	51.665	52.268	55.198	57.780
	2018	2019	2020	2021	2022
Si	236.840	241.861	265.925	278.410	272.000
FeSi	296.971	280.234	325.002	328.000	323.000
FeSiMn	218.264	205.362	231.064	230.321	220.663
FeSiMg	62.635	55.814	44.071	65.224	64.825

**Literatur:**

KRISTIANSEN, L.-M. & VAN DER EIJK, C. (2020): Overview of the Norwegian metallurgical industry Part 1: Companies and Production: 41 S., 41 Abb.; Institutt for materialteknologi, SFI; Trondheim.

JORDAL, K., LANGØRGEN, Ø., KIM, D., FINOTTI, F., ROUSSANALY, S., MARSH, N. & VOLDSUND, M. (2023): The CCS Midt-Norge cluster. Industrial CCS collaboration for exploring synergies and common interests. – SINTEF Energy Research, 2023:00230: 41 S., 17 Tab., 27 Abb., 1 Anh.; Trondheim (URL: <https://www.sintef.no/globalassets/sintef-energi/pdf/ccs-midt-norge-final-report-v1.0---signert.pdf>).



## Paraguay

Im Februar 2014 gründeten das norwegische Siliziumunternehmen Elkem ASA (50 %) und die argentinische Grupos Andreani und Araujo (50 %) ein Joint Venture zum Neubau einer Ferrosiliziumhütte in Limpio, 25 km von Asunción, der Hauptstadt von Paraguay, entfernt. Im Oktober 2017 übernahm Elkem alle Geschäftsanteile der heutigen **Elkem Paraguay S.A.** und nahm im März 2018 die Hütte in Betrieb. Sie besitzt einen Elektrolichtbogenofen mit einer

Anschlussleistung von 11,5 bis 15 MVA und eine offizielle Kapazität von 11.000 tpa FeSi. Eine spätere Kapazitätserweiterung auf 30.000 tpa FeSi war ursprünglich geplant.

Das produzierte Ferrosilizium versorgt Kunden in ganz Lateinamerika. Der eingesetzte Quarz stammt aus regionalen Lagerstätten und als Reduktionsmittel kommen Holzkohle und Holz-hackschnitzel aus Eukalyptusbaumpflanzungen zum Einsatz. Der benötigte Strom wird dagegen günstig vom 350 km entfernt gelegenen Itaipú Wasserkraftwerk bezogen.

**Tab. 75: Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) (in t) aus Paraguay seit dem Jahr 2018, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2018	2019	2020	2021	2022
FeSi	3.625	10.773	8.803	10.673	13.553



## Philippinen

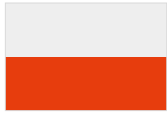
Die Philippinen produzieren zwar über die Solar Philippines Power Project Holdings, Inc. (Solar Philippines) Solarmodule und sind auch einer der wichtigsten Elektronikhersteller weltweit, sind jedoch vollständig auf Importe von Wafern für ihre PV- sowie Halbleiterindustrie angewiesen.

Auch eine Produktion von Rohsilizium, Polysilizium oder Ferrolegierungen findet auf den Philippinen nicht statt.

Im März 2003 nahm jedoch die ehemalige Mindanao Silicon Metal Corporation auf der Insel Mindanao eine Siliziumhütte mit einem Ofen und einer Kapazität von 4.800 tpa Si in Betrieb. Ein zweiter Ofen sollte im September 2003 und ein dritter Ofen im Januar 2004 folgen. Im Jahr 2012 stellte das Unternehmen die Produktion ein, weil ihm kein Strom mehr zugewiesen wurde – er wurde andernorts gebraucht.

**Tab. 76: Weltweite Importe von Silizium (Si) (in t) aus den Philippinen seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	4.502	3.723	7.823	5.364	5.197	4.462	4.874	1.273	481
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	115	< 1	66	471	295	89	0	0	10



## Polen

Bekanntester Produzent von Ferrosilizium in Polen ist **Huta Łaziska SA** mit einem Werk in Łaziska Górne (dt. Ober Lazisk), Oberschlesien, das bereits 1916 vom damaligen Montanunternehmer Hans Heinrich XV. Fürst von Pless, Graf von Hochberg, zur Produktion von Calciumcarbid für seine lokalen Kohlebergwerke gegründet wurde. Ab dem Jahr 1920 wurden dann in Łaziska Górne erstmals auch Ferrolegierungen, d. h. FeSi, FeCr und FeSiAl, für die heimischen Stahlhütten produziert. 1953 wurde die Produktion auf Elektrolichtbogenreduktionsöfen umgestellt und dann sukzessive auf die heutigen vier Öfen mit einer Kapazität von 96.000 tpa FeSi 45 %, FeSi 65 % und vor allem FeSi 75 % zzgl. Mikrosilika erweitert. In geringeren Mengen

wurde vor allem bis 2008 auch FeSiMn, ab 2013 auf Grundlage von importiertem HCFeCr auch HCFeSiCr produziert. Der eingesetzte Quarzit stammt größtenteils aus regionalen Vorkommen, besonders einem Quarzitsteinbruch im 20 km nördlich gelegenen Bukowa Góra.

Huta Łaziska SA ist (oder war?) ein Privatunternehmen im polnischen Familienbesitz. Der Vertrieb aller Produkte erfolgt vollständig über das zu einer maltesischen Holding gehörende Handelsunternehmen Re Alloys Sp. z o.o. mit Sitz ebenfalls in Łaziska Górne.

Gegenwärtig wird in Polen kein Polysilizium produziert. Auch die darauffolgende Wertschöpfungskette in der Solarindustrie ist, bis auf einige kleinere Anbieter von PV-Modulen, nicht ausgebildet.

**Tab. 77: Produktion von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in Polen, Quelle: BRITISH GEOLOGICAL SURVEY WORLD MINERAL PRODUCTION UND POLISH GEOLOGICAL SURVEY. n. v. = nicht verfügbar.**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FeSi	65.118	13.034	58.538	56.031	9.673	53.206	72.668	78.115	73.589
FeSiMn	10.242	3.310	15.950	25.061	72	112	378	81	99
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSi	62.878	77.754	77.682	65.732	63.618	65.523	61.709	73.370	51.371
FeSiMn	32	0	0	66	0	0	0	0	n. v.



## Rumänien

In Rumänien werden derzeit weder Silizium noch Ferrolegierungen produziert, obwohl dies in der Vergangenheit durchaus der Fall war.

Einstiger Produzent von Ferrosilizium war z. B. das Unternehmen Ferom SA in der Stadt Tulcea, das bis 1999 FeSi produzierte, aber seitdem nur noch Mn-Legierungen herstellt. Es wechselte im Jahr 2002 zur ukrainischen Pivat-Gruppe.

Ebenfalls in Tulcea ging im Juli 1973 ein metallurgischer Komplex zur Produktion von Ferrolegierungen für die heimische Stahl- und Aluminiumindustrie in Betrieb. Im Jahr 1988 erreichte er seine Maximalproduktion von fast 250.000 t, darunter 90.000 t FeMn, 55.000 t FeSi, 40.000 t FeSiMn, 32.000 t FeCr, 4.200 t Si, 500 t FeSiCr sowie FeW, FeSiMg und Schlacken. Im Jahr 2002 übernahm die FERAL Ltd. mit Sitz in London den Hüttenkomplex, der seitdem unter dem Namen S.C. FERAL S.R.L. firmiert. Das Werk besteht aus zwei Hütten mit zehn Öfen, davon besitzt die Hütte „Ferrolegierungen 1“ vier Öfen à 16,5 MVA-Anschlussleistung und einen Ofen mit 21 MVA-Anschlussleistung (Kapazität: 100.000 tpa) und

die Hütte „Ferrolegierungen 2“ fünf Öfen mit 2 x 55 MVA-, 1 x 43 MVA- und 2 x 60 MVA-Anschlussleistung (Kapazität: 180.000 tpa). FERAL Ltd. ging im Jahr 2018 in Konkurs. Ihr ehemaliges Tochterunternehmen S.C. FERAL S.R.L. hat die Produktion von Ferrolegierungen mittlerweile eingestellt und handelt mit Produkten aus der Ukraine.

Besser als mit der gegenwärtigen Produktion von Silizium und Ferrosilizium in Rumänien sieht es mit Projekten zur Verarbeitung von importiertem Silarsilizium aus.

So kündigte die ungarische Astrasun Solar Kft. im Jahr 2022 an, in der rumänischen Region Turnu Măgurele mit Investitionskosten von 270 Mio. € ein integriertes Werk zur Produktion von Wafern (1,8 GWp), Zellen (1,5 GWp) und Modulen (1,2 GWp) für die Solarindustrie errichten zu wollen. Mit der Produktion sollen v. a. die zahlreichen Solarparkprojekte im Rumänien beliefert werden.

Ein Jahr zuvor hatte bereits das rumänische Unternehmen Karpat Solar signalisiert, in Transsilvanien ebenfalls eine, wenn auch deutlich kleinere Solarmodulfabrik (erste Phase: 100 MWp) errichten zu wollen.

**Tab. 78: Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Rumänien seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	440	2.320	4.478	10	0	220	< 1	24	< 1
FeSi	567	1.043	152	645	606	46	23	82	34
FeSiMn	134.281	39.081	42.615	7.091	9.693	18.844	31.958	2.087	7.963
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	< 1	15	3	104	84	20	26	17	12
FeSi	361	2.674	< 1	527	24	3	130	1.113	87
FeSiMn	7.058	1.948	5.497	3.576	37	421	6.191	1.857	9.905



## Russland

In Russland gibt es zwei Produzenten von Rohsilizium, die beide zum weltweit zweitgrößten Aluminiumproduzenten United Company RUSAL plc gehören. Rund zur Hälfte für den Export, v. a. nach Europa, und zur anderen Hälfte für den Eigenbedarf in benachbarten Aluminiumhütten produziert RUSAL Rohsilizium durch seine beiden Tochterfirmen:

- **RUSAL-Kremniy-Ural LLC** (Ural Silicon) in Kamensk-Uralsky, Oblast Sverdlowsk, Hütte mit sechs Öfen, Kapazität: 30.000 tpa Si (zwischen 2020 und Juli 2021 gestundet)
- **JSC Kremniy** (Silicon) in Shelekhov, Oblast Irkutsk, Hütte mit fünf Öfen, Kapazität: 35.000 tpa Si

Die Produktionsmengen von RUSAL sind Tab. 79 zu entnehmen.

Wesentlich größer ist die Bedeutung von Russland als Produzent von Ferrolegierungen (FeSi, FeW, FeV, FeTi, FeMn, FeNb, FeNi, FeCr, FeSiCr, FeSiMn). Nach [www.metalexpert.com](http://www.metalexpert.com) wurden in Russland im Jahr 2019 535.200 t FeSi und 377.300 t FeSiMn, 2020 540.000 t FeSi und 385.400 t FeSiMn bzw. im Jahr 2021 564.800 t FeSi produziert. Hierbei sind die Produzenten von Ferrosilizium bzw. Ferrosilikomangan:

- **JSC „Kuznetskie Ferrosplavy“** („Kuznetsk Ferroalloys“, KFZ) ist ein Tochterunternehmen der von der Oligarchenfamilie Antipov geführten JSC „Ural-Siberian Metallurgical Company“ mit insgesamt vier Hütten, davon drei in Novokuznetsk und eine im Industriegebiet von Yurga, Oblast Kemerovo. Letztere Hütte (Yurga Ferroalloy Plant) mit sechs Öfen wurde im Jahr 2004 erworben und produzierte zuvor SiC als Schmirgelmittel. Mit insgesamt 19 Elektrolichtbogenöfen zwischen 20 und 29 MVA-Anschlussleistung und einem Tagesenergiebedarf von 6 GWh liegt die Jahreskapazität von Kuznetsk Ferroalloys bei 500.000 tpa FeSi 45 %, 65 % und 75 %. Die Quarzitversorgung erfolgt aus einem eigenen Großsteinbruch. Im Jahr 2021 hatte das Unternehmen bei einer Gesamtproduktionsmenge von 281.900 t FeSi (2019: 271.700 t, 2020: 272.100 t) am Standort Novokuznetsk im heimischen Markt einen Anteil von 49,9 %. Die Exportquote (über die Vertriebsorganisation RFA International, LP mit Sitz in der Schweiz) lag bei 90,3 %. Am Standort Yurga wurden 2021 zusätzlich 86.300 t FeSi (Marktanteil 15,3 %, Exportquote 98,9 %) bzw. 2019 78.500 t FeSi und 2020 80.600 t FeSi produziert.
- **JSC „Chelyabinsk Electrometallurgical Integrated Plant“** („CHEMK“), ebenfalls ein Tochterunternehmen der JSC „Ural-Siberian Metallurgical Company“, ging 1942 in Produktion und ist der zweitgrößte Produzent

**Tab. 79: Produktion und weltweite Importe von Rohsilizium (in t) aus Russland, Quellen: Geschäftsberichte der UNITED COMPANY RUSAL PLC (versch. Jahre) sowie GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Produktion	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	23.934	48.740	56.171	59.348	55.373
Importe	23.078	26.900	26.814	29.518	18.756	22.807	14.992	26.279	18.315
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Produktion	54.764	60.410	59.274	56.000	56.800	48.100	27.100	34.500	44.000
Importe	20.696	26.419	26.978	19.462	20.776	20.355	11.191	10.253	7.572



von Ferrosilizium in Russland. Zudem werden weitere Ferrolegierungen, wie FeCr, FeSiCr, FeSiMn, FeMn, FeMo, aber auch SiCa produziert. Das Unternehmen betreibt acht Hütten in Chelyabinsk, umgeben von zahlreichen stahlproduzierenden und -verarbeitenden Unternehmen. Mit insgesamt 38 Lichtbogenöfen mit bis zu 33 MVA-Anschlussleistung, davon elf zur Produktion von FeSi 45 %, 65 % und 75 %, und einem Tagesenergiebedarf von bis zu 11 GWh, liegt die Gesamtkapazität dieses Tochterunternehmens bei ca. 750.000 tpa Ferrolegierungen. Bei einer Produktionsmenge von 88.900 t FeSi im Jahr 2021 (2019: 84.900 t FeSi, 325.500 t FeSiMn, 113.800 t FeCr, 7.000 t FeMn, 2020: 85.500 t FeSi, 336.000 t FeSiMn, 79.200 t FeCr, 12.100 t FeMn) lag der einheimische Marktanteil bei 15,7 % und die Exportquote bei 49,2 %.

- **JSC „Serov Ferroalloy Plant“** („Serov“, SFP) wurde im Jahr 2013 ebenfalls von der JSC „Ural-Siberian Metallurgical Company“ übernommen und verfügt am Standort Jekaterinburg, Oblast Swerdlowsk, über eine Hütte mit 18 Öfen und einer Gesamtkapazität von 200.000 tpa FeCr, FeSiCr, FeNi und FeSi, davon vier Öfen zur Produktion von bis zu 50.000 tpa FeSi. In den letzten Jahren wurde allerdings nur noch FeCr produziert.
- Das Ferrolegierungswerk des Kohle- und Stahlproduzenten **Mechel OAO** befindet sich angrenzend an eine Aluminiumhütte in Bratsk im Oblast Irkutsk. Es wurde im Jahr 2004 von RUSAL an die JSC Investment

Construction Technologies verkauft, die es drei Jahre später an Mechel weiterverkaufte. Bis 2003 wurde hier mit einer Kapazität von 10.000 tpa in zwei Öfen auch Rohsilizium produziert, seitdem mit einer Kapazität von derzeit 87.300 tpa in vier sukzessive erneuerten Öfen mit (demnächst) je 33 MVA-Anschlussleistung nur noch FeSi 45 %, 65 % und 75 %. Mechel OAO besaß im Jahr 2021 bzgl. seiner Ferrosiliziumproduktion einen heimischen Marktanteil von 14,4 % und setzte 21.000 t des produzierten FeSi in seinen eigenen Stahlhütten ein. Der Rest wurde größtenteils nach Japan exportiert. Der zur Produktion eingesetzte Quarzit und quarzitischer Sandstein stammt seit 2013 aus dem gruppen-eigenen Steinbruch Uvatsk bei Nizhneudinsk in rund 360 km Entfernung.

- **PJSC Novolipetsk Steel Company** (NLMK) ist ein großer Stahlproduzent und betreibt am Standort Lipetsk, 400 km südlich von Moskau, eine Ferrosiliziumhütte mit einer Kapazität von 27.000 tpa FeSi, fast ausschließlich für den Eigenbedarf. Nach [www.metalexpert.com](http://www.metalexpert.com) produzierte das Unternehmen 2019 27.000 t FeSi, 2020 26.800 t FeSi und 2021 26.400 t FeSi (Exportquote: 4,7 %).
- Das Unternehmen **OOO „Zapadno-Siberskij Elektrometallurgicheskij Zavod“** (ZSEMZ) wurde 2008 gegründet und betreibt ein Werk zur Produktion von Ferrosilikomangan (2019: 51.800 t, 2020: 49.400 t) in Novokutznesk, Oblast Kemerowo.

**Tab. 80: Produktion von Ferrosilizium (FeSi) (in t) in Bratsk durch Mechel OAO,**  
Quelle: Geschäftsberichte der MECHEL OAO, versch. Jahre.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
FeSi	91.110	86.000	89.900	82.700	85.200	92.900	90.300	92.900	88.500
	2017	2018	2019	2020	2021	2022			
FeSi	68.600	76.100	66.900	66.700	77.700	75.000			

**Tab. 81: Produktion von Ferrosilizium (FeSi) (in t) in Russland, Quelle: [www.interfax.com](http://www.interfax.com)  
(versch. Monate bzw. Jahre). n. v. = nicht verfügbar.**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
FeSi	742.000	891.800	n. v.	n. v.	768.000	917.500	1.023.000
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
FeSi	1.047.000	1.018.000	1.062.000	1.059.000	935.500	841.000	921.200
	2019	2020	2021	2022			
FeSi	535.200	540.000	564.800	n. v.			



## Sambia

In Sambia gibt es mehrere kleinere Produzenten von Ferrosilizium und Ferrosilikomangan, die aufbauend auf den reichen Manganerzvorräten und der meist ausreichend verfügbaren Wasserenergie verschiedene Ferrolegierungen produzieren. Über keinen dieser Produzenten ist jedoch viel bekannt, auch fehlen gesicherte Informationen, ob alle der u. g. Hütten wirklich existieren bzw. produzieren:

- Matalloy Company Ltd., gegründet 1972, im Jahr 1991 Beginn der Produktion von  $\text{CaC}_2$  in einem 2,5 MVA-Ofen, später Umwandlung zur Produktion von FeSi 70 % und FeSiMn, seit 2012 in einem 6 MVA-Ofen, Erweiterung um einen 9 MVA-Ofen geplant
- Ferro Alloys Corporation Ltd. (FACL), gegründet 2010 mit Firmensitz in Kabwe, rund 130 km von Lusaka entfernt, ein 6,5 MVA-Lichtbogenofen mit einer Kapazität von 18.000 tpa Ferrolegierungen (FeMn und FeSiMn)
- Grahil Alloys Zambia Ltd., derzeit Errichtung einer Hütte in der Provinz Serenje mit elf 2 MVA-Öfen zur Produktion von wahlweise FeSi, FeSiMn oder FeMn
- PLR Projects Zambia Ltd. nahm im Mai 2017 eine Hütte in der Provinz Serenje mit zwei 9 MVA-Öfen zur Produktion von FeSi, FeMn und FeSiMn in Betrieb
- Amar Ferro Alloys Pvt. Ltd. mit Hütte in Pensulo, Provinz Serenje, Produktion von FeSi 70 – 75 % und 75 – 80 %, FeMn und FeSiMn
- Southern Africa Ferro Alloys Ltd. (SAFAL), gegründet 2011, Hütte mit zwei 6 MVA-Öfen in der Provinz Serenje, Produktion von FeSi 70 – 75 % und 75 – 80 %, HCFeMn und FeSiMn
- Omax Ferro Alloys Zambia Ltd., ein Tochterunternehmen der indischen Shree Ramdoot Gruppe, Hütte in Pensulo, Provinz Serenje, Produktion von HCFeMn, FeSi 70 – 75 % und FeSiMn
- Serenje Ferro Alloys Ltd., gegründet 2019, Hütte in Pensulo, Provinz Serenje, Produktion von FeMn, FeSiMn und FeSi
- Novel Ferro Alloys Ltd., Hütte in Pensulo, Provinz Serenje
- Pioneer Ferro Alloys Zambia Ltd., Hütte in Pensulo, Provinz Serenje
- Unite Alloys Zambia Ltd. (UAZL), Hütte in Pensulo, Provinz Serenje, mit Produktion von FeMn und FeSiMn verschiedener Qualitäten

**Tab. 82: Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Sambia seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FeSi	907	1.005	987	683	1.617	1.772	1.480	1.565	3.958
FeSiMn	0	0	0	0	0	0	2	2.030	4.067
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSi	5.963	6.967	10.344	10.192	7.592	8.122	8.068	9.285	10.480
FeSiMn	14.037	11.380	7.196	11.519	26.891	26.659	21.111	73.809	101.206



## Saudi-Arabien

In Saudi-Arabien werden derzeit weder Silizium, Ferrosilizium noch Polysilizium produziert, doch gab und gibt es dazu immer wieder Ansätze.

Die im Jahr 1992 gegründete Gulf Ferroalloys Company (Sabayek) produzierte von 1997 bis zu ihrer Insolvenz im Jahr 2001 geringe Mengen an Silizium und Ferrosilizium, aber nach Wiedereröffnung des Werkes im Jahr 2006 nur noch Ferrosilikomangan und Ferromangan. Die Hütte in der Al Jubail Industrial City 1 besitzt vier Öfen je 27 MVA-Anschlussleistung und eine Kapazität von 140.000 tpa FeSiMn bzw. FeMn.

Die saudi-arabische Polysilicon Technology Company (PTC) beendete ihre Produktion im Jahr 2016. Dieses Unternehmen, ein Joint Ven-

ture der saudischen Mutajadedah Energy Company (MEC) und der südkoreanischen KCC Corporation (KCC), betrieb über einen Zeitraum von zwei Jahren ein Werk mit einer Kapazität von 3.350 tpa Polysilizium in der Al Jubail Industrial City 2. Die Gesamtproduktionsmenge betrug knapp 3.800 t Polysilizium, das größtenteils nach China exportiert wurde.

Ein Abkommen zum Aufbau einer Wertschöpfungskette von der Polysiliziumproduktion bis zur Fertigung von PV-Modulen schlossen im Jahr 2019 die Saudi Basic Industries Corp. (SABIC), der südkoreanische Polysiliziumproduzent OCI Company Ltd. und der führende chinesische Solarzellen- und -modulproduzent LONGi Green Energy Technology Co., Ltd. Ein entsprechendes Werk sollte ein Investitionsvolumen von ca. 2 Mrd. US\$ erfordern – und wurde bisher nicht erbaut.

**Tab. 83: Weltweite Importe von Polysilizium (Poly-Si) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Saudi-Arabien seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Poly-Si	< 1	26	9	20	4	21	48	158	70
FeSiMn	20	11.594	15.913	15.587	18.136	14.845	22.729	20.604	14.498
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Poly-Si	3	1.184	2.230	371	0	0	0	0	0
FeSiMn	24.064	11.942	9.518	29.360	31.593	6.370	24.142	50.071	4.643



## Schweden

In Schweden wird durch das Unternehmen Vargön Alloys AB seit dem Jahr 2004 nur noch Ferrochrom, aber kein Ferrosilizium mehr produziert. Weitere Produzenten von Silizium oder Ferrolegierungen gibt es in Schweden nicht.

Auf der anderen Seite ist Schweden eines von Europas größten Produzentenländern von Halbleitern auf SiC-Basis für die Elektronikindustrie. Zu den Produzenten bzw. zukünftigen Produzenten, die entsprechende Projekte bzw. Fabriken angekündigt haben, gehören die schwedische Kiselkarbid i Stockholm AB („KISAB“) mit Werk in Kista, die US-amerikanische Coherent Corporation ebenfalls mit Werk in Kista sowie die niederländisch-schweizerische STMicroelectronics NV mit Werk in Norrköping.



## Slowakei

Das familiengeführte Unternehmen **OFZ (Oravské Ferozliatinová Závody), a.s.**, mit Sitz in der Gemeinde Oravský Podzámok, im Dreiländereck Slowakei – Polen – Tschechien, ging aus der staatlichen Kovohuty Istebné hervor, die erst in Istebné (1952 – 2003), später in Široká (seit 1965), Ferrolegierungen herstellte. Die Hütte in Široká, die heute mit sieben Lichtbogenöfen eine Kapazität von 136.000 tpa Ferrolegierungen (FeSi, FeMn, FeSiMn, FeSiCa, Si, alle in verschiedenen Qualitäten sowie FeCr, FeSiCr, FeSiMg und FeSiBa) besitzt, vertreibt ihre Pro-

dukte v. a. in den Nachbarländern, aber auch in Ungarn, Deutschland und Italien. Zusätzlich stellt OFZ a.s. Spezialdrähte her.

Das 1996 gegründete Unternehmen **KOVHUTY Dolný Kubín, s.r.o.**, seit einigen Jahren eine Tochterfirma der Mineralmühle Leun, Rau GmbH & Co. KG, betreibt auf dem Gelände der vormaligen ZVL-PM Dolný Kubín, im gleichnamigen Ort, ein Werk zur Produktion von ausgemahlene sowie zerstäubten Ferrosilizium-Pulvern (FeSi 15 %, 45 % und 75 %) sowie Pulvern auf Kupfer-, Bronze- und Zinnbasis. Hierbei wird das zur Produktion benötigte FeSi 15 % und FeSi 45 % selber hergestellt.

**Tab. 84: Produktion von Ferrolegierungen (in t) nach Firmenberichten der OFZ a.s.**  
n. v. = nicht verfügbar.

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSi	39.300	38.200	30.900	44.600	44.100	29.400	29.600	34.700	n. v.
FeSiMn	29.600	27.100	35.700	40.100	37.200	49.900	37.200	48.600	n. v.
HCFeMn	17.600	24.500	35.000	41.300	32.300	26.200	24.000	30.900	n. v.
MCFeMn	0	800	600	800	0	0	0	0	n. v.
FeSiCa	4.700	5.000	4.100	2.700	0	2.100	1.200	1.500	n. v.
FeSiCr	0	700	200	0	0	0	0	0	n. v.
Si	0	0	0	0	1.300	0	0	2.000	n. v.
<b>Summe</b>	<b>91.200</b>	<b>129.500</b>	<b>106.000</b>	<b>129.500</b>	<b>115.000</b>	<b>107.600</b>	<b>88.600</b>	<b>117.800</b>	<b>n. v.</b>

**Tab. 85: Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus der Slowakei seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	177	0	99	163	167	61	84	91	203
FeSi	23.250	18.859	16.262	18.215	11.198	26.694	32.388	26.634	36.109
FeSiMn	48.673	59.986	62.044	54.380	33.235	34.318	24.713	40.298	36.740
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	888	851	1.474	2.102	3.227	1.676	690	1.836	4.827
FeSi	37.532	35.526	35.115	49.780	37.275	30.863	28.484	37.139	25.375
FeSiMn	38.005	30.256	31.553	37.631	37.369	55.147	33.477	33.397	10.032



## Spanien

Spanien ist eines der Ursprungsländer des heutigen großen Silizium- und Ferrolegierungsproduzenten **Ferroglobe plc**, der Ende des Jahres 2015 durch Zusammenschluss der US-amerikanischen Globe Specialty Metals, Inc. und der spanischen Grupo Ferroatlántica, S.A. (zu 57 % im Besitz des spanischen Familienunternehmens Grupo Vila Mir) entstand.

Grupo Ferroatlántica, S.A. wurde im Oktober 2007 als Grupo Ferroatlántica, S.L. gegründet und ging vier Jahre später an die Börse. Das Unternehmen verfügte noch 2018 in Spanien über fünf Hütten (Boo, Cee, Dumbria, Sabón und Monzón), zwölf Wasserkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 192 MWp (mittlerweile alle verkauft) sowie vier Gangquarzsteinbrüche in der Region Galicien:

- Sonia bei Cañoles auf dem Stadtgebiet von Mañón
- Conchitina bei San Miguel de Negradas, Gemeinde O Vicedo (derzeit gestundet)
- Esmeralda in der Gemeinde Trazo und
- Serrabal auf den Stadtgebieten von Vedra und Boqueixón (Expansion geplant)

Aufgrund zurückgehender Reserven von Gangquarz in den spanischen Vorkommen bzw. ausstehender Abbaugenehmigungen sollte vor allem die Siliziumhütte in Sabón zukünftig auch mit bis zu 85.000 t jährlich durch die Ferroquartz Mauritania S.A. (90 % Ferroglobe plc, 10 % Staat Mauretanien) mit Gangquarz aus den mauretanischen Vorkommen Vadel 1 und 2 (Gesamtreserven 2,214 Mio. t Quarz) versorgt werden, die 200 bzw. 250 km vom Hafen von Nouadhibou entfernt liegen. Im Jahr 2017 begann die Testproduktion in Vadel 2 und 2018 wurden 12.417 t Quarz nach Spanien verschifft. 2019 wurde die Gewinnung aufgrund Streitigkeiten mit dem lokalen Abbauunternehmen eingestellt und mitt-

lerweile wurden alle Explorationsaufwendungen abgeschrieben.

Derzeit betreibt Ferroglobe in Spanien noch folgende Hütten:

- Sabón, im Industriegebiet von Sabón-Arteixo, Provinz A Coruña, im Nordosten der Region Galicien. Diese Hütte wurde 1972 in Betrieb genommen und 1992 von Grupo Ferroatlántica erworben. Sie besitzt drei Öfen mit 39 MVA- bzw. 2 x 48 MVA-Anschlussleistung und dient ausschließlich der Produktion von Rohsilizium mit einer Kapazität von 43.000 tpa Si. Die Hütte von Sabón ist seit Mitte 2022 aufgrund mangelnden Absatzes und hoher Energiepreise gestundet.
- Boo, mit Standort in Maliaño, Region Kantabrien, rund 5 km vom Hafen von Santander entfernt. Diese Hütte ging 1913 zur Produktion von Calciumcarbid in Betrieb und wurde im Laufe der Jahre sukzessive modifiziert. Derzeit produziert sie mit vier Elektrolichtbogenöfen (1 x 20 MVA-, 1 x 30 MVA- und 2 x 25 MVA-Anschlussleistung) FeMn und FeSiMn und mit einem schwenkbaren 3 MVA-Ofen MCFeMn. Die Gesamtkapazität der Hütte von Boo liegt bei 57.000 tpa FeMn und 115.000 tpa FeSiMn.
- Monzón, im Industriegebiet von Paúles am linken Ufer des Cinca in der Provinz Huesca, Region Aragonien. Die Hütte (Ferroatlántica del Cinca S.L.) ging 1940 in Betrieb und wurde nach mehreren Eigentümerwechseln 1996 von Grupo Ferroatlántica übernommen. Sie ist mit zwei 25 MW-Öfen zur Produktion von FeSiMn (Kapazität: 50.000 tpa) und zwei 10 MW-Öfen zur Produktion von FeMn (Kapazität: 57.000 tpa) ausgerüstet. Als Besonderheit sind alle vier Öfen schwenk- und kippbar.

Der Hüttenkomplex von Cee-Dumbria in der Provinz A Coruña, Region Galicien, wurde im Jahr 2019 an das Investmentunternehmen TPG Sixth Street Partners verkauft, wobei sich Ferroglobe jedoch verpflichtete, zukünftig sämtliche Produkte abzunehmen und zu vermarkten. Die Kapazität der Hütte von Cee mit ihren drei

Öfen (1 x 24 MVA-, 1 x 28 MVA-, 1 x 39 MVA-Anschlussleistung) lag damals bei 21.500 tpa FeSi, 67.500 tpa FeMn und 43.000 tpa FeSiMn, die der Hütte von Dumbria mit ihren zwei Öfen (1 x 72 MVA-, 1 x 39 MVA-Anschlussleistung) bei 61.000 tpa FeSi 75 % und 16.000 tpa Mikrosilika.

Die derzeitige Gesamtkapazität von Ferroglobe plc in Spanien wird vom Unternehmen mit 43.000 tpa Si, 71.000 tpa FeSi sowie 308.000 tpa FeMn und FeSiMn angegeben. Ein großes Problem in der Produktion sind, ähnlich wie in Deutschland, die hohen Energiekosten. Diese treffen Ferroglobe umso mehr, seitdem es seine ehemaligen Wasserkraftwerke verkauft hat. Zwischen November 2021 und September 2022 schaltete Ferroglobe sukzessive alle Öfen in Spanien ab, plant aber deren Wiederinbetriebnahme sobald ein Vertrag über eine autarke Energieversorgung, die diesmal aus Windkraftanlagen erfolgen soll, in Kraft getreten ist.

In Puertollano in der Provinz Ciudad Real, Region Kastilien, errichtete Ferroglobe plc durch sein Tochterunternehmen FerroSolar S.L. seit dem Jahr 2017 eine Anlage zur Produktion von bis zu

1.400 tpa UMG-Si (5N – 7N) zur geplanten Nutzung in der Solarindustrie. Mittlerweile soll das dortige Werk, nach Vorliegen aller behördlichen Genehmigungen, jedoch bis zu 3.300 tpa hochreines Silizium (geplant in den Qualitäten 3N und 4N) für Elektroautobatterien produzieren.

Polysilizium wird bis heute in Spanien nicht produziert, obwohl es auch dafür in der Vergangenheit mehrere Projektanläufe gab.

Neben dem Unternehmen Ferroglobe plc (s. o.) gewinnt auch das Siliziumunternehmen Elkem ASA in Spanien Quarz. Sein 1980 gegründetes Tochterunternehmen ERIMSA betreibt seit über 30 Jahren Quarzkiesgruben rund um Begonte (Lugo), Frades (A Coruña), Castillo (Pontevedra) und Bóveda del Río Almar (Salamanca). Die Jahresproduktion liegt bei insgesamt ca. 740.000 tpa, wovon rund die Hälfte in der regionalen Bauindustrie Verwendung findet, während die andere Hälfte über die Häfen von A Coruña und Avilés exportiert wird und der Versorgung der unternehmenseigenen, aber auch anderer Silizium- und Ferrosiliziumhütten in Nordeuropa dient.

**Tab. 86: Produktion von Rohsilizium (Si) in Sabón und Ferrosilikomangan (FeSiMn) in Monzón bzw. Boo durch Ferroglobe plc (in t) in Spanien, Quelle: Umweltberichte (span.: declaración ambiental) von FERROGLOBE PLC (versch. Jahre). Produktionsdaten aus Cee und Dumbria sind nicht publiziert. Die Angaben/Schätzungen des BGS und des USGS zur gesamtspanischen Produktion von Si, FeSi und FeSiMn treffen offensichtlich nicht zu und wurden daher hier nicht reproduziert. n. v. = nicht verfügbar.**

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Si (Sabón)	35.843	37.579	13.178	31.624	37.872	32.478	34.150	35.382
FeSiMn (Monzon)	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
FeSiMn (Boo)	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si (Sabón)	34.014	32.132	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	~28.500	n. v.
FeSiMn (Monzon)	n. v.	n. v.	55.899	45.882	42.190	24.708	29.366	n. v.
FeSiMn (Boo)	65.327	62.486	75.658	n. v.	80.323	64.104	65.901	n. v.





## Südafrika

Die Republik Südafrika ist, basierend auf ihren großen Chrom-, Mangan- und Vanadiumlagerstätten, ein bedeutender Produzent von Ferrolegierungen, wobei es sich aber zumeist um Ferrochrom (Anteil im Jahr 2016: 72 %) und Ferromangan (Anteil 23 %) und nur untergeordnet um Ferrosilizium (Anteil 4 %) handelt. Unter Ferrochrom ist auch die Produktion von Ferrosilikochrom (ein Produzent: Samancor Chrome Ltd.) und unter Ferromangan auch die Produktion von Ferrosilikomangan (ein Produzent: Transalloys (Pty) Ltd.) subsummiert. Nach RAVHUGONI (2017) lag die Produktion von Ferrosilizium im Jahr 2016 bei 44.000 t, das in drei Werken (s. u.) hergestellt wurde.

Größter Produzent von Rohsilizium und Ferrosilizium in Südafrika ist das weltweit tätige Unternehmen **Ferroglobe plc**, das Ende des Jahres 2015 durch Zusammenschluss der US-amerikanischen Globe Specialty Metals, Inc. und der spanischen Grupo Ferroatlántica, S.A. entstand.

Die Hütten von Ferroglobe plc in Südafrika sind:

- Polokwane in der Provinz Limpopo, rund 8 km von der Stadt Polokwane und 320 km nördlich von Johannesburg gelegen. Das Werk wurde in den 1950er Jahren auf dem Wiktop (Weißen Hügel) zur Aufbereitung und Mahlung des dort anstehenden Quarzes errichtet. Erst 1974 wurde dort auch eine Siliziumhütte in Betrieb genommen, die im Jahr 2005 von der Grupo Ferroatlántica erworben wurde und bis zum Jahr 2018 produzierte. Ab Juli 2019 war sie wegen der stark gestiegenen Energiepreise in Südafrika gestundet, doch ging sie Ende 2022 wieder sukzessive in Produktion. Die Hütte besitzt mit ihren drei 48 MVA-Öfen eine Kapazität von 55.000 tpa Si, das vor allem in die USA exportiert wird. Der Exportanteil lag zuletzt zwischen 80 und 90 %.
- eMalahleni in der gleichnamigen Stadt (früher Witbank), Provinz Mpumalanga, ca. 150 km

östlich von Johannesburg. Dieses Werk diente ab 1926 der Produktion von Calciumcarbid und wurde erst wesentlich später auf die Produktion von Ferrosilizium umgerüstet. Im Jahr 2008 erwarb die zur Grupo Ferroatlántica gehörende Silicon Smelters Pty, Ltd. das Werk, das seit der letzten Umrüstung im Jahr 2011 mit zwei Öfen zur Produktion von FeSi 75 bis 78 % (Kapazität: 40.000 tpa) und Impfmitteln (Kapazität: 11.000 tpa) sowie einem Ofen zur Produktion von bis zu 12.000 tpa Si ausgerüstet ist. Soweit bekannt, wird in eMalahleni jedoch kein Rohsilizium produziert. Das produzierte Ferrosilizium dient der Deckung des heimischen Bedarfs, v. a. der südafrikanischen Stahlhütten und Eisengießereien.

- Ballengeich, ca. 25 km von Newcastle, am Fuß der Drakensberge in der Provinz KwaZulu Natal. Das heutige Werk der Silicon Technology (Pty) Ltd. (Siltech) geht auf eine Zeche aus den 1880er Jahren zurück, die 1930 endgültig geschlossen wurde. Schon 1919 wurden hier Carbide bzw. ab 1930 Calciumcarbid produziert. 1992 wurde das Werk von der Siltech, seit 2013 ein Tochterunternehmen der Globe Specialty Metals, Inc. (s. o.) erworben und danach sukzessive auf die Produktion von Ferrosilizium umgerüstet. Heute besitzt die Hütte mit ihren zwei Elektrolichtbogenöfen à 27 bzw. 30 MW-Leistung eine Kapazität von 45.000 tpa FeSi 75 – 80 %, ist jedoch seit 2015 gestundet. Ferroglobe plc hat angekündigt, Siltech verkaufen zu wollen.

Mitte 2022 gab Ferroglobe plc an, in Südafrika eine Kapazität von 66.000 tpa FeSi zu besitzen.

Über sein Tochterunternehmen Silicon Smelters Pty, Ltd. (s. o.) und die 74 %ige Beteiligung Thaba Chueu Mining (Pty) Ltd., die im Jahr 2012 zusätzlich den Quarzproduzenten SamQuartz (Pty) Ltd. übernehmen konnte, besitzt Ferroglobe plc in Südafrika Zugangsrechte auf die hochwertigen Quarzvorkommen von Delmas/Mpumalanga, Fort Klipdam und Mahale/beide Limpopo sowie Roodeport/Gauteng. Diese versorgen v. a. aber auch die südafrikanische Glasindustrie.

Zusätzlich zu Ferroglobe plc gibt es in Südafrika noch zwei weitere Produzenten von Ferrosilizium, wobei beide Firmen Ferrosiliziumpulver herstellen:

Das südafrikanische Kohle- und Energieunternehmen Exxaro Resources Ltd. betreibt durch seine Tochterfirma **Exxaro's FerroAlloys (Pty) Ltd.** in Pretoria West ein Werk zur Produktion von bis zu 12.000 tpa FeSi, das nach Mahlung und Zerstäubung mit Stickstoffgas auf 5 – 212 µm Korngröße der Qualitätsverbesserung des in den südafrikanischen Sishen und Thabazimbi Bergwerken geförderten Eisenerzes dient. Das Werk ging 1996 durch Kumba Resources Ltd. in Produktion und im Jahr 2006 nach Aufspaltung von Kumba Resources an die neu gegründete Exxaro Resources über. 2014 und 2016 erfolgten grundlegende Modernisierungen.

Der zweite Produzent ist das Finanzunternehmen **Gxakra Investments (Pty) Ltd.**, das im Oktober 2021 alle Anteile an der Finanzbeteiligung

Siyanda-Inkwali Resources (Pty) Ltd. übernahm, das selbst in einem Joint Venture mit De Beers Group Services (Pty) Ltd. und dem National Empowerment Fund Trust im Jahr 2005 die Firma Dense Media Separation Powder (Pty) Ltd. („DMS Powders“) übernommen hatte. Die 1949 gegründete Firma DMS Powders betreibt seit den 1950er Jahren am Standort Meyerton nahe Johannesburg eine Hütte mit zwei 22 MVA-Öfen, in der jährlich bis zu 39.000 t FeSi in granularer und 12.000 t FeSi in Pulverform hergestellt werden können. Die Produkte dienen vornehmlich der Dichtentrennung von diamantführenden Erzen in De Beers-Bergwerken weltweit.

#### Literatur

RAVHUGONI, R. C. (2017): South African Ferroalloys Handbook.- Handbook H1/2017: 20 S., 9 Abb., 5 Tab.; 1 Anh.; Pretoria, RSA (Department of Mineral Resources).

**Tab. 87: Exporte von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi), Ferrosilikomangan (FeSiMn) und Ferrosilikochrom (FeSiCr) (in t) aus Südafrika seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	57.829	48.225	49.565	65.479	30.741	42.978	52.026	43.770	37.379
FeSi	38.186	57.131	47.176	38.928	34.686	55.811	62.937	33.674	31.469
FeSiMn	386.680	237.529	554.932	542.470	121.453	201.609	171.842	46.019	32.052
FeSiCr	1.179	422	194	< 1	0	0	14	7.126	944
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	49.266	51.816	27.040	9.437	35.701	26.619	2.710	505	513
FeSi	37.682	55.624	40.948	43.689	55.502	47.019	41.224	38.071	46.405
FeSiMn	183.556	163.263	147.663	124.914	141.175	120.101	110.180	129.219	130.498
FeSiCr	4.096	350	12	95	839	193	1.592	2.792	138



## Südkorea

Die Republik Korea (Südkorea) produziert kein Silizium, aber durch vier Unternehmen Ferrolegierungen (FeMn, FeSiMn), im Wesentlichen für die heimische Stahlindustrie.

Diese vier Produzenten sind:

- **DB Metal Co., Ltd.**, gegründet 1936 als Düngemittelproduzent und seit 1964 mit einer Hütte in Donghae, Provinz Gangwo, in der Produktion von Ferrosilizium (mittlerweile eingestellt) bzw. seit 1983 in der Produktion von FeMn verschiedener Qualitäten sowie FeSiMn tätig. Durch zehn Elektrolichtbogenöfen liegt die Kapazität der Hütte bei 370.000 tpa FeMn und 130.000 tpa FeSiMn.
- **Dongil Industries Co., Ltd.**, 1966 als Dongil Steel Co. gegründet und seit 1974 in Pohang, Provinz Gyeongsangbuk, mit einer Hütte mit mittlerweile acht Lichtbogenöfen in der Produktion von Ferrolegierungen (FeMn und FeSiMn sowie zumindest theoretisch auch FeSi 75 – 79 %) tätig.
- **Simpac Metal Co., Ltd.**, ein Unternehmen der familiengeführten SIMPAC Gruppe, das u. a. in Pohang, Provinz Gyeongsangbu, zwei Hütten mit vier Öfen zur Produktion von FeMn und FeSiMn verschiedener Qualitäten betreibt.
- **Tae Kyung Industrial, Ltd.**, ein weiteres Familienunternehmen, gegründet 1975, das in den verschiedensten Industrien (Kalk, Zink, Industriegase, Autobahnraststätten u. a.) aktiv ist. In Yemi, Provinz Gangwo, betreibt das Unternehmen seit 2005 eine Hütte zur Produktion von Ferrolegierungen (FeMn, FeSiMn).
- **OCI Company Ltd.**, ist ein 1959 gegründeter südkoreanischer Chemiekonzern, der seit dem Jahr 2008 auch Polysilizium produziert. Die Kapazität des Polysiliziumwerkes in Gunsan, Provinz Jeollabuk, wurde nach 2019 von damals noch 52.000 tpa auf mittlerweile 4.700 tpa reduziert und auf die Produktion von Halbleitersilizium (11N) konzentriert. Solarsilizium (10N) wird dagegen nur noch in einem zweiten Werk in Sarawak/Malaysia (Kapazität: 35.000 tpa) hergestellt (s. Malaysia). OCI kündigte an, die Kapazität in Gunsan bis 2026 um 2.500 tpa und in Malaysia in mehreren Phasen bis 2027 auf 65.000 tpa (erste Phase bis 2025 auf 45.000 tpa) erhöhen zu wollen. Zusätzlich sollen auch in Malaysia ab 2026 bis zu 10.000 tpa Halbleitersilizium produziert werden.
- **Hanwha Chemical Corporation**, Produktion von Polysilizium (Kapazität: 15.000 tpa) für die unternehmenseigene Solarzellenfertigung (s. u.) zwischen 2014 und 2020 in einem Werk in Yeosu, Provinz Jeollanam. Als Ersatz 2022 Erwerb einer Minderheitsbeteiligung am norwegischen Polysiliziumproduzenten REC Silicon ASA (zwei Werke in den USA, s. dort) und Absicherung durch Bezüge vom malaiischen Polysiliziumproduzenten OCIM Sdn. Bhd. (OCIMSB) (s. Malaysia).
- Innovation Silicon Co., Ltd., erloschen.
- KCC Corporation, erloschen, Produktion von Polysilizium (Kapazität: 6.000 tpa) zwischen Anfang 2010 und Ende 2011 in zwei Werken in Daejuk, Provinz Süd-Chungcheong, davon eines in Kooperation mit Hyundai Heavy Industries Group.

Im Jahr 2021 wurden in Südkorea rund 888.000 t Ferrolegierungen, zumeist FeMn, produziert.

- Woongjin Polysilicon Co., Ltd., erloschen, ein Tochterunternehmen der Woongjin Energy Co., Ltd., dem zwischen 2011 bis zu seiner Insolvenz im Jahr 2022 einzigen südkoreanischen Produzenten von Siliziumstäben und -wafern für die Solarindustrie, ehemaliges Polysiliziumwerk mit einer Kapazität von 7.000 tpa in Sangju, Provinz Nord-Gyeong-sang.
- Hankook Silicon Co., Ltd., erloschen, Produktion von Polysilizium (Kapazität: 3.500 tpa) zwischen 2010 und 2012 in einem Werk in Yeosu, Provinz Jeollanam.
- SMP, Ltd., erloschen, gegründet 2011 als JV zwischen Samsung Fine Chemicals (50 %) and MEMC Electronic Materials, Inc. (50 %), Produktion von Polysilizium (Kapazität: 10.000 tpa) zwischen 2014 bis Anfang 2016 in einem Werk in Ulsan.

Die 1952 gegründete südkoreanische Hanwha-Gruppe ist über die Hanwha Solutions Corporation bzw. deren Solarenergie-Abteilung Q Cells und Fertigungsstätten in Südkorea, Malaysia, China und den USA einer der weltweit größten Produzenten von Solarzellen (weltweite Kapazität: 10,9 GWp) und -modulen (weltweite Kapazität: 13,8 GWp). Die unternehmenseigene Produktion von Polysilizium wurde dagegen

im Februar 2020 (s. o.), die von Siliziumstäben schon zuvor im Jahr 2018 und die von Silizium-wafern auch schon im Jahr 2017 eingestellt.

Hyundai Energy Solutions, Ltd., die seit 2014 operative Solarenergieabteilung der Hyundai Heavy Industries Group, fertigt Solarzellen und Solarmodule (Kapazität: 1,35 GWp) in Südkorea und errichtet Solarparks weltweit. Auch OCI Company, Ltd. ist seit dem Jahr 2011 weltweit in der Entwicklung von Solarparks tätig.

Seit 1984 fertigt die heutige SK Siltron Co., Ltd. am Standort Gumi, Provinz Nord-Gyeongsang, Wafer auf Si- und mittlerweile auch SiC-Basis für die Halbleiterindustrie. Im Jahr 2021 war die südkoreanische SK Siltron nach den japanischen Konzernen Shin-Etsu Chemical (Marktanteil: 29,8 %) und SUMCO (24,8 %) und vor der deutschen Siltronic AG (14,1 %) sowie der taiwanesischen GlobalWafers (11,6 %) mit 18,1 % Marktanteil nach eigenen Angaben der weltweit drittgrößte Produzent von 300-mm-Wafern.

Südkorea importiert Rohsilizium v. a. aus China, während das in China gefertigte Polysilizium bisher nicht den Anforderungen der südkoreanischen Halbleiterindustrie entspricht und deswegen aus den USA und Deutschland zugekauft wird (s. Tab. 88).

**Tab. 88: Importe von Silizium (Si) sowie Im- und Exporte von Polysilizium (Poly-Si) (in t) nach bzw. aus Südkorea seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).  
D = Deutschland, CN = China.**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
<b>Importe</b>									
Si	48.949	55.019	65.828	85.630	78.836	107.476	151.286	112.205	113.514
• Anteil CN	99,2 %	98,9 %	98,3 %	93,3 %	85,4 %	86,7 %	78,9 %	75,5 %	81,5 %
Poly-Si	1.991	2.141	2.573	3.511	4.206	6.683	7.824	9.000	10.510
• Anteil D	3,6 %	3,0 %	3,0 %	3,7 %	6,1 %	13,7 %	22,2 %	28,1 %	61,0 %

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
<b>Exporte</b>									
Poly-Si	444	546	962	3.610	10.749	22.339	39.013	32.502	36.672
• Anteil CN	45,6 %	68,3 %	68,3 %	45,5 %	42,1 %	52,3 %	50,9 %	56,8 %	46,4 %
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
<b>Importe</b>									
Si	161.293	162.264	167.539	172.185	166.428	118.769	86.479	89.543	87.645
• Anteil CN	83,7 %	86,2 %	83,5 %	83,2 %	76,5 %	92,6 %	97,2 %	97,7 %	94,0 %
Poly-Si	9.945	10.757	8.812	9.700	7.503	7.250	7.392	8.190	5.522
• Anteil D	42,2 %	36,0 %	38,1 %	12,1 %	39,4 %	16,2 %	26,1 %	17,7 %	14,2 %
<b>Exporte</b>									
Poly-Si	55.319	69.790	81.377	80.809	60.347	54.874	13.974	5.962	3.040
• Anteil CN	56,7 %	70,0 %	79,4 %	86,1 %	81,9 %	93,0 %	81,1 %	73,5 %	46,1 %



## Taiwan

In Taiwan werden weder Rohsilizium, Ferrosilizium noch Polysilizium produziert. Bezüglich Polysilizium gab es jedoch in der Vergangenheit zwei Produzenten, die helfen wollten, die vollständige Abhängigkeit der taiwanesischen Industrie von importiertem Poly- bzw. Halbleiter-/ Solarsilizium zu beenden.

Im Jahr 2010 wurde zu diesem Zweck die Powertech Energy Corporation gegründet, die vier Jahre später ein Werk in Yunlin County mit einer Kapazität von 27.500 tpa Polysilizium als Grundlage der Produktion von Halbleitersilizium fertigstellen konnte. Dieses ging aufgrund der hohen, auch später nicht abbezahlten Firmenschulden jedoch nie in kommerziellen Betrieb und im Jahr 2020 musste das Unternehmen letztendlich Konkurs anmelden.

Bereits im Jahr 2015 hatte die 2007 gegründete Taiwan Polysilicon Corporation (TPSI) aus ähn-

lichen Gründen Konkurs anmelden müssen. Dieses Unternehmen hatte gegen chinesische Wettbewerber Polysilizium (Anfangskapazität: 5.000 tpa, Ausbaupkapazität: 27.000 tpa) und daraus Solarsilizium produzieren wollen.

Besonders wichtig ist die Versorgung mit Poly- bzw. Halbleitersilizium für die Waferfertigung als Grundlage für die gesamte taiwanesischen Halbleiterindustrie. Diese besitzt je nach Fertigungsgrad und Modell einen weltweiten Marktanteil zwischen 20 und 90 %.

Hierbei ist die Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, Ltd. (TSMC) nach der US-amerikanischen Intel Corp. und der südkoreanischen Samsung Electronics Co., Ltd. der weltweit drittgrößte Halbleiterhersteller und mit 64 % Marktanteil der weltweit größte unabhängige Auftragsfertiger für Halbleiterprodukte (Foundry). Das Geschäftsmodell ist darauf ausgerichtet, für Unternehmen ohne eigene Produktion wie z.B. AMD, Apple oder NVIDIA die Produktion von Halbleiterbauteilen zu übernehmen.



## Thailand

In Thailand werden seit über einem Jahrzehnt sowohl Rohsilizium als auch verschiedene Ferrolegierungen produziert. Obwohl der japanische Chemiekonzern Shin-Etsu Chemical durch seine Tochterfirma Asian Silicones Monomer Ltd. ein großes Silikonwerk in Map Ta Phut betreibt und damit Großabnehmer von Silizium im Land ist, wird nach ROSKILL (2014) dieses Werk durch importiertes Silizium versorgt, während das in Thailand produzierte Rohsilizium exportiert wird.

Die beiden Siliziumproduzenten Thailands sind:

**G.S. Energy Co., Ltd.**, gegründet 2008, betreibt seit 2010 eine Siliziumhütte im Ratchaburi Industriepark, in der gleichnamigen Provinz westlich von Thailand. Die Hütte verfügt über sechs Elektrolichtbogenöfen je 12 MVA-Anschlussleistung und damit über eine Kapazität von 45.000 tpa Si zzgl. Mikrosilika. Die Versorgung erfolgt aus zwei Quarzvorkommen (Reserven von 22 Mio. t) des Tochterunternehmens Supyakorn Inter Group Co., Ltd. aus 150 km Entfernung. Als Reduktionsmittel wird Holzkohle ein-

gesetzt. Ein Großteil des produzierten Siliziums wird in die USA exportiert, wo das Chemieunternehmen The Dow Chemical Company zu den Hauptkunden zählt.

Zwei Jahre später, 2010, wurde in Taiwan die Sica New Materials Co., Ltd. gegründet, deren Tochterunternehmen **Sica New Materials (Thailand) Co., Ltd.** Ende des Jahres 2014 die Testproduktion von Rohsilizium aus einer neu errichteten Hütte in Kanchanaburi, nordwestlich von Bangkok, aufnahm. Im Laufe der nächsten Jahre wurden drei der geplanten vier Öfen in Betrieb genommen und damit eine Anfangskapazität von 30.000 tpa Si (geplante Endkapazität: 90.000 tpa Si und 30.000 tpa SiC) erreicht. Im Februar 2020 wurde die Hütte von Sica New Materials im Zuge der Corona-Pandemie geschlossen und offenbar noch nicht wieder eröffnet.

Über die Produzenten von Ferrosilizium, Ferrosilikomangan etc. in Thailand ist nur wenig bekannt. Vermutlich handelt es sich um kleinere Hütten, häufig in chinesischem oder indischem Besitz, die den thailändischen Stahlhütten angeschlossen sind oder diesen über Zwischenhändler zuliefern.

**Tab. 89: Weltweite Importe von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Thailand seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	114	75	31	101	168	9.512	21.529	27.747	25.124
FeSi	58	0	450	238	174	81	524	470	1.244
FeSiMn	0	705	10	< 1	0	25	0	60	146
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	29.773	12.162	9.049	14.166	26.311	12.167	2.816	9.132	9.104
FeSi	244	264	1.858	6.623	9.795	8.916	6.485	6.735	7.594
FeSiMn	83	0	0	< 1	205	39	9	221	1.464



## Türkei

Aufgrund seiner Stahlindustrie ist die Türkei ein bedeutendes Verbrauchsland von Ferrolegierungen aller Art, die jedoch größtenteils aus China, Iran, Kasachstan und Russland (Ferrosilizium) bzw. Indien, Norwegen, Ukraine und Georgien (Ferrosilikomangan) importiert werden. Selbst produziert die Türkei nur Ferrochrom in bedeutenden Mengen, untergeordnet in einem Werk der Eti Elektrometalurji AŞ in Antalya auch Ferrosilikochrom (Kapazität: 23.000 tpa), dieses jedoch nur als Zwischenprodukt bei der Herstellung von LCFeCr. Bis 1995 gab es auch eine unbedeutende Produktion von Ferrosilizium, für die ebenfalls bei Eti Elektrometalurji AŞ in Antalya ein 6 MVA-Ofen mit einer Kapazität von 5.000 tpa zur Verfügung stand.

Gegenwärtig gibt es in der Türkei zwei Unternehmen, die Solarzellen produzieren bzw. planen, zu produzieren:

Smart Solar Technologies, ein Unternehmen der Smart Holding A.Ş, betreibt seit 2017

ein Solarmodulwerk mit einer Kapazität von 1,2 GWp in Gebze/Kocaeli sowie seit 2022 ein zweites Solarmodulwerk mit einer Kapazität von derzeit 500 MWp in Dilovası/Kocaeli. Bis 2026 ist zudem in İzmir die Inbetriebnahme eines integrierten Werks geplant, in dem dann Siliziumstäbe und Wafer (Kapazität: jeweils 3,6 GWp), Solarzellen (Kapazität: 2,4 GWp) und -module (Kapazität: 1,2 GWp) unter einem Dach gefertigt werden sollen.

Kalyon PV bzw. Kalyon Solar Technologies weihte im August 2020 in Ankara seine integrierte 2-Gigawattfabrik ein, in der neben Solarmodulen (Kapazität: 500 MWp) seitdem unter einem Dach ebenfalls Solarzellen, Wafer und Siliziumstäbe (mit jeweils ebenfalls 500 MWp Kapazität) hergestellt werden.

### Literatur

AYDIN, S., ERSUNDU, E. & YÜCEL, O. (2007): Ferroalloy production and consumption in Türkiye.- Proceedings of Infacon XI, 18.-21.2.2007, Neu-Delhi: 51-59, 8 Abb., 4 Tab.; Johannesburg (URL: <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXI/051-Aydin.pdf>).





## Ukraine

Die bisherige Produktion von Rohsilizium (Kapazität: 9.000 tpa, Produktion: ca. 5.000 tpa) in der Ukraine erfolgte ausschließlich für den Eigenbedarf im Zaporozhye Aluminiumkombinat, das seit April 2011 aufgrund damals zu niedriger Al-Preise stillgelegt ist und seitdem verfällt. Im März 2015 wurde der langjährige Mehrheits-eigner des Kombinats, die russische United Company RUSAL plc, zudem vom obersten Gericht der Ukraine gezwungen, 68 % der seit dem Jahr 2001 gehaltenen 98 % der Anteile am Kombinat an den ukrainischen Staat zurückzugeben.

Vor dem russischen Krieg in der Ukraine gab es im Land drei große Hütten, in denen Ferrosilizium bzw. Ferrosilikomangan hergestellt wurden. Alle drei Hütten gehörten zur in zahlreichen Industriebereichen tätigen ukrainischen „Pivat-Gruppe“:

- Das Kombinat der heutigen **JSC „Zaporozhsky Ferroalloy Plant“** im gleichnamigen Ort ging 1933 mit der Produktion von zuerst nur Ferrochrom in Betrieb. Bereits ab 1934 wurde zudem Ferrosilizium, ab 1944 Calciumcarbid und ab 1961 auch Manganmetall produziert. Heute verfügt das Unternehmen über 29 Elektrolichtbogenöfen mit 529 MVA-Gesamtanschlussleistung, zwei direkte Lichtbogenöfen und drei Kalkbrennöfen innerhalb von drei Hütten zur Produktion von FeSi 65 %, und FeSi 45 % sowie FeMn und FeSiMn verschiedener Qualitäten, zudem Branntkalk und Mn-Metall. FeSi kann mit einer Maximalkapazität von 147.600 tpa (andere Quellen: 85.000 tpa) produziert werden. Nach [www.metalexpert.com](http://www.metalexpert.com) lag die Produktion in Zaporozhsky im Jahr 2019 bei 59.900 t FeSi, 173.500 t FeSiMn, 39.500 t FeMn und 7.400 t Mn-Metall bzw. im Jahr 2020 bei 56.100 t FeSi, 98.900 t FeSiMn, 43.300 t FeMn und 3.400 t Mn-Metall (vgl. Tab. 90 und 91).
- Das **Stakhanov Ferrolegierungswerk** liegt in der Stadt Kadiivka (früher Stakhanov),

Luhansk Oblast, im russisch besetzten Territorium der Ukraine. Das Werk formiert seit der Okkupation unter der Bezeichnung „Abteilung #13 Stakhanov Ferrolegierungswerk von Vneshtorgservice“, letzteres ein Unternehmen aus Südossetien. Das Werk verfügt über acht Öfen je 24 MVA-Anschlussleistung und produzierte bis 2004 ausschließlich Ferrosilizium. Bis Mitte 2007 wurden vier der acht Öfen für die Produktion von FeSiMn umgerüstet, wodurch die Kapazität von 160.000 tpa FeSi auf 80.000 tpa (andere Quellen: 50.000 tpa) FeSi sank bzw. auf 150.000 tpa FeSiMn anstieg. Das Werk war zwischen August 2014 bis Mitte 2018 gestundet und soll danach mit nur einem Ofen 1.000 – 1.800 tpm FeSi für das Alchevsk Eisen- und Stahlkombinat, ebenfalls im okkupierten Gebiet gelegen, erzeugt haben.

- Die **JSC „Nikopol Ferroalloy Plant“** (NZF) liegt in der Stadt Nikopol im Dnipropetrowsk Oblast und befindet sich im Besitz der „Pivat-Gruppe“ und der „EastOne-Gruppe“, letzteres ein Tochterunternehmen der ukrainischen „Interpipe-Gruppe“. Das Nikopol Ferrolegierungswerk ging 1966 in Produktion und verfügt heute über 16 Öfen mit Anschlussleistungen von 22,5 bis 75 MVA. Hergestellt werden jährlich bis 1,2 Mio. t FeSiMn (Kapazität: 830.000 tpa), zudem FeMn, Schmelzflussmittel, Elektroden, Schlacken sowie Abrasionsmittel verschiedenster Qualitäten. Ursprüngliche Pläne, ab 2004 jährlich auch bis zu 13.700 tpa Ferrosilizium produzieren zu wollen, wurden nicht umgesetzt.

Nach Angaben der UKRAINIAN ASSOCIATION OF PRODUCERS OF FERROALLOYS AND OTHER ELECTROMETALLURGICAL PRODUCTS (UkrFA) lag die ukrainische Gesamtproduktion im Jahr 2019 bei 62.560 t FeSi und 804.700 t FeSiMn, im Jahr 2020 bei 60.800 t FeSi und 559.900 t FeSiMn und im Jahr 2021 bei 858.700 t FeSiMn und 87.600 t FeSi. Nach [www.metalexper.com](http://www.metalexper.com) betrug die ukrainische Gesamtproduktion im Jahr 2019 59.900 t FeSi und 798.700 t FeSiMn bzw. im Jahr 2020 56.100 t FeSi und 535.200 t FeSiMn. Seit Oktober 2022 werden von den ukrainischen Ferrolegierungs-

produzenten aufgrund des russischen Krieges in der Ukraine keine Produktionsdaten mehr publiziert. Zwischen Januar und August 2022 wurden nach Angaben des Branchenverbandes

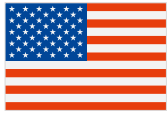
UkrFP in der Ukraine noch 19.700 t FeSi, 20.700 t FeMn, 356.500 t FeSiMn sowie 740 t andere Ferrolegerungen produziert.

**Tab. 90: Produktion von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in kt) der ukrainischen Unternehmen in den Jahren 2012–2020, Quelle: GMK CENTER UKRAINE. n. v. = nicht verfügbar.**

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<b>Zaporozhsky</b>									
FeSi	n. v.	29,1	60,0	52,2	60,9	54,7	75,4	62,6	32,9
FeSiMn	126,9	204,2	226,0	78,2	122,4	130,0	124,0	145,2	86,5
<b>Stakhanov</b>									
FeSi	119,6	118,8	n. v.	0	0	0	n. v.	n. v.	n. v.
FeSiMn	49,5	34,4	n. v.	0	0	0	n. v.	n. v.	n. v.
<b>Nikopol</b>									
FeSiMn	555	394	629	571	689	687	736	659,4	469,4
<b>Summe</b>									
FeSi	n. v.	147,9	60	52,2	60,9	54,7	75	63	33
FeSiMn	731,4	632,6	855	649,2	811,4	817,0	860	805	556

**Tab. 91: Produktion von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) in der Ukraine, Quelle: BRITISH GEOLOGICAL SURVEY WORLD MINERAL PRODUCTION (versch. Jahre).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
FeSi	227.500	169.000	218.485	201.706	193.034	253.801	186.306	150.265
FeSiMn	1.045.900	1.168.000	1.281.073	958.667	771.950	1.000.329	930.337	823.131
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
FeSi	191.207	167.977	114.826	126.297	118.371	97.084	97.000	97.000
FeSiMn	724.892	960.657	750.181	876.756	875.031	912.300	858.708	850.000



## USA

Die USA sind – weit hinter China – einer der weltgrößten Produzenten und zudem Verbraucher von Rohsilizium, Polysilizium, Ferrosilizium und vieler anderer Ferrolegierungen (FeCr, FeSiCr, FeMn, FeSiMn, FeNb, FeTi, FeMo, FeV, FeNi, FeW).

Der Beginn der Siliziumproduktion in den USA reicht viele Jahrzehnte zurück. Derzeit gibt es in den USA drei produzierende Unternehmen mit fünf Siliziumhütten. Dazu kommen zwei Unternehmen, die in drei Hütten Ferrosilizium herstellen.

Das weltweit in der Produktion von Ferrolegierungen tätige Unternehmen **Ferroglobe plc** mit Sitz in Großbritannien entstand Ende des Jahres 2015 durch Fusion der US-amerikanischen Globe Metallurgical Metals Inc. (GSM, 47 %) und der spanischen Grupo Ferroatlántica, S.A. (57 %, im Besitz des spanischen Familienunternehmens Grupo Vila Mir). Ferroglobe betreibt in den USA folgende Hütten:

- Beverley in Ohio, am Muskingum River am Fuß der Appalachen. Die industrielle Nutzung des Werksgeländes in Beverley erfolgt seit 1871, aber erst seit 1953 wurden hier in vier kleinen Öfen auch Ferrolegierungen hergestellt. 1956 wurde Globe Eigentümer des Werkes und ergänzte es 1968 und 1970 durch zwei weitere und nun größere Öfen. Derzeit verfügt die Hütte in Beverley in zwei separaten Gebäuden über insgesamt fünf Öfen, von denen die drei älteren (10 – 12 MW) zur Produktion von FeSi 75 % (Kapazität: 40.000 tpa) und die zwei jüngeren (je 20 MW) zur wahlweisen Produktion von FeSiMg (Kapazität: 52.000 tpa) oder (seltener) Rohsilizium (Kapazität: 24.800 tpa) dienen. Zudem kann bei Bedarf auch hochreines Rohsilizium (Kapazität: 380 tpa UMG-Si) für die Solarindustrie hergestellt werden.
- Selma in Alabama, 45 Meilen westlich von Montgomery, am Ufer des Alabama River. Der erste Ofen des Werks in Selma ging 1965

in Betrieb, um FeSi 75 % für die Mg-Produktion in einem benachbarten Werk herzustellen, das dann jedoch schon im gleichen Jahr geschlossen wurde. Im Jahr 1973 übernahm GSM die Hütte, ergänzte sie im Folgejahr um einen zweiten Ofen und stellte die Produktion ab dem Jahr 1975 auf Silizium um. Mit ihren nun zwei Öfen (18,5 MW, 19,5 MW) produzierte das Werk bis 2018 bei einer Kapazität von 24.000 tpa jährlich bis zu 22.000 tpa Si, wurde dann aufgrund der stark gefallen Siliziumpreise stillgelegt, jedoch im Jahr 2022 mit großer Unterstützung der Regierung von Alabama wieder hochgefahren.

- Bridgeport in Alabama (durch die Tennessee Alloys Company bzw. deren Mutterfirma, die Core Metals Group LLC, erworben durch GSM im Jahr 2010). Das Werk Bridgeport liegt im Jackson County von Alabama, in Sichtweite des Tennessee River. Es ging im Jahr 1977 zur Produktion von FeSi 50 % in Betrieb, produziert aber mittlerweile durch seinen 40 MW-Ofen vornehmlich FeSi 75 % mit einer Kapazität von 35.000 tpa.
- Alloy in West Virginia (durch die WVA Manufacturing, LLC, seit 2009 ein Joint Venture von Ferroglobe plc (51 %) und The Dow Chemical Corporation (49 %)). Das Werk Alloy liegt am Kanawha River, rund 50 km von Charleston, WV, entfernt, am Fuß der Appalachen. Es ging erstmalig im Jahr 1934 durch die Union Carbide Corporation in Betrieb und stellte über die folgenden Jahrzehnte im Wesentlichen Ferrolegierungen her. Ab den 1980er Jahren wurde die Produktion sukzessive auf Rohsilizium umgestellt. Im Jahr 1981 wurde das Werk an die norwegische Elkem ASA verkauft, die es zusammen mit dem dazugehörigen Wasserkraftwerk im Jahr 2005 für 130 Mio. US\$ an GSM weiterveräußerte. Die Hütte in Alloy verfügt über einen 32 MW- und einen 22 MW-Ofen sowie über drei 22 MW-Öfen (ein weiterer Ofen wurde 2022 stillgelegt) mit einer Gesamtkapazität von 72.000 tpa Si zzgl. Mikrosilika. Versorgt werden v. a. die beiden großen Silikonwerke von The Dow Chemical Corporation in den USA als auch Kunden aus der Aluminiumindustrie.

Die im Jahr 2006 von GSM erworbene Hütte in Niagara Falls, NY, wurde um 1900 in Betrieb genommen und besaß mit ihren zwei Öfen (19,5 MW, 22 MW) bei einer Durchschnittsproduktion von 20.000 tpa Si eine Kapazität von 27.000 tpa Si. Sie wurde Ende 2018 stillgelegt und Ende 2021 für 1,4 Mio. US\$ verkauft (und danach verschrottet).

Die Versorgung der Hütten von Ferroglobe plc in den USA durch Quarz erfolgt durch das Tochterunternehmen Alabama Sand and Gravel Inc. (ASG), das 2005 gegründet und ein Jahr später von GSM übernommen wurde. Alabama Sand and Gravel betreibt zwei Quarzkiesgruben in den Autauga und Chilton Counties, nahe Billingsley und Prattville, AL und versorgt die Hütten von Ferroglobe per Bahn. Als Reduktionsmittel setzt Ferroglobe in den USA bevorzugt aschearme Kohle aus den fünf Gruben des im Jahr 2007 gegründeten zweiten Tochterunternehmens Alden Resources, LLC aus Kentucky ein.

The Dow Chemical Company, der hinter der BASF SE zweitgrößte Chemiekonzern der Welt, übernahm im Juni 2016 alle Anteile der vormaligen Dow Corning Inc., ein Joint Venture zwischen Dow Chemical und dem Industriekonzern Corning, Inc. Dow Corning war seit 1943 in der Entwicklung und seit 1945 in der Produktion von Silikonen tätig und produzierte 1959 erstmals Polysilizium. The Dow Chemical Company wurde nach Übernahme aller Anteile von Dow Corning 2016 zum weltgrößten Produzenten von Silikonen (mit Produktionsstätten in den USA, Großbritannien und China) und damit auch einer der größten Verbraucher von Rohsilizium. Das Unternehmen verfügt über zwei eigene Siliziumhütten in Brasilien (s. dort) und ist an einer Siliziumhütte in Kanada (s. dort) und an der Siliziumhütte in Alloy, WV (s. o.) beteiligt. Im Jahr 2003 übernahm Dow Corning zudem die Siliziumhütte der früheren Simcala Inc. in Mt. Meigs, AL, und modernisierte sie im Jahr 2011. Die Siliziumhütte der **DC (Dow Chemical) Alabama, Inc.** verfügt heute über drei Öfen und eine Kapazität von rund 42.000 tpa Si zzgl. Mikrosilika. Dieses wird zu ca. 80 % von Dow Chemical selbst und zu 20 % in US-amerikanischen Al-Hütten verbraucht.

**Mississippi Silicon LLC** ist ein 2014 gegründetes Joint Venture zwischen Rima Holding USA, Inc. (80 %), ein Tochterunternehmen des brasilianischen Siliziumproduzenten Rima Industrial S/A (vgl. Brasilien), und Clean Tech I LLC (20 %), ein US-amerikanisches Investmentunternehmen. Der Vertrieb des seit September 2015 in der gemeinsamen Siliziumhütte in Burnsville, MS, mit einer Kapazität von 36.000 tpa in zwei Öfen produzierten Rohsiliziums erfolgt durch das Handelsunternehmen Polymet Alloys, Inc. Als Rohmaterial wird Quarzkies verwendet.

Der größte Produzent von Ferrosilizium in den USA ist der **Metallgroßhändler CC Metals and Alloys, Inc.** aus Calvert City, KY. CC Metals and Alloys ist seit Ende 2012 im Besitz der US-amerikanischen Georgian American Alloys Inc. (GAA), die wiederum ein Unternehmen der ukrainischen Pivat-Gruppe ist (vgl. Ukraine). Am Standort Calvert City begann die Produktion verschiedener Ferrolegierungen im Jahr 1949, wurde dann Anfang der 1980er Jahre aber vollständig auf Ferrosilizium umgestellt. Mit drei Elektrolichtbogenöfen produziert das Werk heute jährlich bis zu 90.000 t FeSi 50 % und FeSi 75 % in über 20 verschiedenen Qualitäten, inkl. FeSi 75 % HP, zudem FeSiMg, Impfmittel für Gießereien, Mikrosilika und FeSi-Pulver für die Produktion von Schweißdrähten.

Die kanadische Sinova Global Inc. plant nach eigenen Angaben, Quarz aus einem Steinbruch bei Golden, BC, in die USA zu exportieren und dort ab 2024 zur Produktion von Rohsilizium in einer noch zu errichtenden Siliziumhütte in Tiptonville, TN, zu nutzen. Dort erfolgte die Grundsteinlegung im Oktober 2022. Weitere Informationen, v. a. zur geplanten Kapazität der Hütte (16.000 tpa?), wurden noch nicht publiziert.

Seit dem Jahr 2016 schlägt auch die kanadische Firma HiTest Sand Inc. vor, in den USA eine Siliziumhütte („PacWest Silicon LLC“) zu errichten. Als Standort wurde Newport, WA, ausgesucht, wobei die dort geplante Hütte eine Kapazität von 73.000 tpa Si besitzt und Ende 2019 in Produktion gehen sollte. Der zur Produktion benötigte Quarz sollte ebenfalls aus einem

Quarzsteinbruch im kanadischen Golden, BC, importiert werden. Bisher wurde dieses Hüttenprojekt, auch aufgrund starken Widerstands aus der Bevölkerung, nicht umgesetzt.

Die derzeitigen Produzenten von Polysilizium in den USA sind:

- **Hemlock Semiconductor Operations, LLC (HSC)**, ein 1961 gegründetes Joint Venture der Unternehmen Dow Corning Inc. (63,25 %), Shin-Etsu Chemical Co., Ltd. (24,5 %) und Mitsubishi Materials Corp. (12,25 %) zur Produktion von Polysilizium für die Solar- und vor allem die Halbleiterindustrie. Derzeitige Eigentümer nach Rückzug von Mitsubishi im Jahr 2013 sind Corning Inc. (80,5 %) und Shin-Etsu Chemical Co., Ltd. (19,5 %). Das Werk von HSC in Hemlock, MI, besitzt nach Modernisierung im Jahr 2016 eine Kapazität von 42.000 tpa Polysilizium. Als zweite Fertigungsstätte in den USA eröffnete HSC im Jahr 2012 auch in Clarksville, TN, mit Investitionskosten von 1,2 Mrd. US\$ ein Polysiliziumwerk mit einer Anfangskapazität von 10.000 tpa (geplante Ausbauproduktionskapazität: 21.000 tpa). Aufgrund weltweiter Überkapazitäten und der von China im Jahr 2013 verhängten Einfuhrzölle gegen US-amerikanische Polysiliziumimporte ging dieses zweite Werk jedoch nie in Produktion.
- **REC Silicon ASA** aus Norwegen mit zwei Produktionsstätten in den USA:
  - a) Moses Lake, WA (REC Solar Grade Silicon LLC), erbaut 1984, mit derzeit drei Einheiten zur Herstellung von Silanen (Kapazität: 7.200 tpa Monosilane, 240 tpa Dichlorsilane und 2,4 tpa Disilane) sowie einer seit 2019 von 18.000 tpa auf 2.000 tpa reduzierten Kapazität von Polysilizium für die Solarindustrie (FBR grade auf der Basis von Monosilan als Ausgangsrohstoff). Gestundet zwischen Mai 2019 und 2023. Nach Beteiligung des südkoreanischen Polysiliziumproduzenten Hanwha Solutions bzw. Hanwha Corporation an REC Silicon mit 33,3 % kündigte das Unternehmen an, das Werk Moses Lake Ende 2023 wieder zu eröffnen und bis Ende 2024 auf volle Leistung hochzufahren.
  - b) Butte, MT (REC Advanced Silicon Materials LLC), in Betrieb seit 1998, Produktion von Silangasen (Kapazität: 5.240 tpa) in zwei Einheiten sowie Polysilizium für die Halbleiterindustrie (12N-Qualität) nach dem Siemens-Verfahren (Kapazität: 1.600 tpa).
- **High-Purity Silicon America Corp. (HSA)**, seit 1996 Mitsubishi Polycrystalline America Corp., nach Verkauf im Oktober 2022 ein Tochterunternehmen der japanischen SUMCO Corp. mit Polysiliziumproduktion (Kapazität: 1.500 tpa) in 11N-Qualität für die Halbleiterindustrie in einem Werk in Theodore, AL.
- Die **Wacker Chemie AG** begann im Jahr 2011 mit der Errichtung eines Polysiliziumwerks in Charleston, TN, das im April 2016 nach Inves-

Tab. 92: Produktion von Polysilizium (Poly-Si) bzw. Halbleitersilizium (Halbleiter-Si) (in t) durch REC Silicon ASA in den USA nach Firmenberichten. n. v. = nicht verfügbar.

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Poly-Si	5.555	5.780	6.241	7.828	13.673	19.050	21.405	19.764	18.794
Halbleiter-Si	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	1.861	1.313
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
FeSi	16.883	10.729	11.636	9.280	3.109	906	1.225	1.375	
FeSiMn	1.194	1.324	844	1.126	867	601	772	993	

titionen von rund 2,5 Mrd. US\$ in Produktion ging. Zwei größere Schadensereignisse seit Oktober 2016 führten zu Produktionsausfällen von teils mehrmonatiger Dauer. Das Werk der Wacker Polysilicon North America, LLC besitzt eine offizielle Kapazität von 20.000 tpa (ursprüngliche Planung 13.000 tpa) Polysilizium und produziert Polysilizium sowohl für die Solar- als auch für die Halbleiterindustrie. Im Juli 2022 kündigte Wacker zudem an, in einigen Jahren in Charleston auch Silikone herstellen zu wollen. Das im Werk Charleston benötigte Rohsilizium wird vor allem aus Brasilien, den USA und Norwegen bezogen (CRAWFORD & MURPHY 2023).

Als ehemalige Produzenten von Polysilizium in den USA sind zu nennen:

- MEMC Pasadena, Inc., ein Tochterunternehmen des ehemals großen US-amerikanischen Waferproduzenten SunEdison Inc., zwischen 1995 und 2006 Polysiliziumproduktion (FBR grade) in Pasadena, TX, mit einer Kapazität von 16.000 tpa.
- AE Polysilicon Corp., ein Tochterunternehmen des taiwanesischen Solarzellenproduzenten Motech Industries Inc., mit geplanter Produktion von 1.800 tpa (nach Ausbau 5.400 tpa) Polysilizium (FBR grade) in einem Werk in Fairless Hill, PA., nach Anfangsinvestitionen von 41 Mio. US\$ geschlossen im Jahr 2012.

Die beiden Produzenten von Ferrosilikomangan in den USA sind:

- **Felman Production, LLC** mit Werk in Letart, WV, seit 2006 ein Tochterunternehmen der US-amerikanischen Georgian American All-loys, Inc. (GAA), die wiederum ein Unternehmen der ukrainischen Pivat-Gruppe ist (vgl. Ukraine). Das Werk in Letart besitzt drei Elektrolichtbogenöfen und eine Kapazität von 105.000 tpa FeSiMn.
- **Eramet Marietta Inc.** mit Werk in Marietta, OH, seit 1999 ein Tochterunternehmen der französischen Eramet SA. Die FeSiMn-Kapazität des Werkes in Marietta, das über drei Öfen

mit einer Gesamtkapazität von 180.000 tpa FeMn verschiedener Qualitäten und FeSiMn verfügt, ist nicht publiziert.

Die Höhe der Produktion von Rohsilizium und auch aller anderen Ferrolegierungen in den USA wird aus Wettbewerbsgründen vom U.S. Geological Survey schon seit über einem Jahrzehnt nicht mehr veröffentlicht. Die stattdessen nun publizierte Menge des Siliziuminhalts der Gesamtproduktion aller Siliziumlegierungen zeigt deutliche Schwankungen (z. B. 2020: 361.000 t, 2021: 411.000 t), ist aber im Detail wenig aussagekräftig.

Die USA importieren seit 2015, jährlich:

- 121.000 – 165.000 t Rohsilizium, v. a. aus Brasilien, Kanada und Norwegen
- 190.000 – 269.000 t Ferrosilizium, v. a. aus Russland, Kanada, Brasilien und China
- 280.000 – 427.000 t Ferrosilikomangan, v. a. aus Georgien, Südafrika, Australien, Malaysia, Norwegen und Mexiko
- 1.000 – 3.000 t Polysilizium, v. a. aus Deutschland, Taiwan und Japan

Die USA exportieren seit 2015, jährlich:

- 2.000 – 5.000 t Rohsilizium, v. a. nach Kanada und Mexiko
- 10.000 – 36.000 t Ferrosilizium, v. a. nach Kanada und Mexiko
- 10.000 – 23.000 t Ferrosilikomangan, fast ausschließlich nach Kanada
- 30.000 – 67.000 t Polysilizium, v. a. nach Japan und Taiwan und in den letzten Jahren zunehmend nach Vietnam (Transitland Richtung China?)

In den USA gibt es zahlreiche und große Produzenten von Halbleitern, die jedoch größtenteils auch in Asien fertigen lassen.

**Tab. 93: Produktion von Silizium (Si), Ferrosilizium (FeSi), Ferrosilikolegerungen (FeSiX) sowie Polysilizium (Poly-Si) (in t) in den USA, nach USGS MINERALS YEARBOOK (versch. Jahre), ROSKILL (2014) (R) und DOE (2022).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Si	148.000	n. v.	n. v.	R135.000	R88.000	R163.000	R156.000	R158.000
FeSi	86.100	88.700	90.600	94.000 R152.000	105.000 R114.000	135.000 R148.000	R143.000	R160.000
FeSiX	123.000	164.000	180.000	193.000	124.000	153.000	n. v.	n. v.
Poly-Si	15.500	18.500	21.850	30.700	48.000	60.500	n. v.	n. v.
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Si	R150.000	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
FeSi	R161.000	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
FeSiX	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.	n. v.
Poly-Si	n. v.	46.000 <sup>1</sup>	34.000 <sup>1</sup>	30.000 <sup>1</sup>	30.000 <sup>1</sup>	21.000 <sup>1</sup>	n. v.	n. v.

<sup>1</sup> Nur Polysilizium für die PV-Industrie

Nach Daten des U.S. Department of Energy (DOE) zur PV-Industrie in den USA gibt es dort derzeit:

- Fünf Produzenten von Rohsilizium (DC Alabama, Inc., Mississippi Silicon, LLC, WVA Manufacturing, LLC, Ferroglobe-Ohio und Ferroglobe-Alabama, s. o.) mit einer Gesamtkapazität von 191.000 tpa Si.
- Zwei Produzenten von Polysilizium (für die Solarindustrie) (Hemlock Semiconductor Operations LLC und Wacker Polysilicon North America LLC, s. o.) mit einer Gesamtkapazität von 51.000 tpa Polysilizium.
- Keinen Produzenten von Siliziumstäben.
- Einen Produzenten von Wafern (CubicPV in Massachusetts) mit einer Kapazität von 20 MWp.
- Keinen Produzenten von Solarzellen. Angekündigt sind jedoch Investitionen von 2,5 Mrd. US\$ durch Hanwha Qcells Corp. in zwei Fertigungsstätten in Georgia, davon auch in ein neues Werk zur integrierten Pro-

duktion von Siliziumstäben, Wafern, Solarzellen und -modulen mit einer Kapazität von jeweils 3,3 GW.

- 16 Produzenten von Solarmodulen auf Siliziumbasis mit einer Gesamtkapazität von 5,6 GWp. Die größte Fertigungsstätte mit einer Kapazität von 1,7 GWp wird bereits jetzt durch Hanwha QCells Corp. in Georgia betrieben.

#### Literatur

DOE – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (2022): Solar Photovoltaics. Supply Chain Deep Dive Assessment U.S. Department of Energy Response to Executive Order 14017, „America’s Supply Chains“: 104 S., 79 Abb., 6 Tab.; Washington, DC (URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Solar%20Energy%20Supply%20Chain%20Report%20-%20Final.pdf>).



## Usbekistan

In Usbekistan sind zahlreiche Quarzit- und Gangquarzvorkommen bekannt, deren Ressourcen mit insgesamt mehreren Zehnermilliarden Tonnen angegeben werden. Diese befinden sich vor allem in den Regionen Kashkadar, Samarkand und Jizzakh (ASHUROV et al. 2010).

Die bisher einzige Siliziumhütte Usbekistans ging 2012 in der Freihandelszone Navoi in Betrieb. Das Werk verfügt über Verarbeitungskapazitäten von 12.000 tpa Rohsilizium, der dazugehörige Bergbaukomplex über Kapazitäten von 39.000 tpa Quarz. Der Betreiber **Uz-Kor Silicon, LLC** ist ein usbekisch-koreanisches Joint Venture zwischen dem südkoreanischen Unternehmen JS Neoplant Co., Ltd (50 %), dem Staatlichen Komitee für Geologie und Bodenschätze Usbekistans (25 %) sowie dem usbekischen Chemiekonzern OJSC Navoiazot (25 %). Nach nur wenigen Jahren abgeschaltet, äußerte die usbekische Regierung bereits 2019 Pläne, das Werk wieder in Betrieb zu nehmen. Dies ist aber wahrscheinlich noch nicht wieder geschehen.

Im Dezember 2015 eröffnete in der Freihandels- und Industriezone Angren in Tashkent auch ein erstes Werk zur Produktion von Ferrosilizium mit einer Kapazität von 6.000 tpa FeSi 45 – 75 %. Der eingesetzte, außergewöhnlich feinkörnige Quarz (Fraktion 0 – 20 mm) stammt aus einem Quarzvorkommen in der

Region Jizzakh. Als Reduktionsmittel wird Kohle verwendet, die aus Kasachstan importiert wird. Der Betreiber dieses Werkes ist das koreanisch-usbekische Joint Venture **Uz-Shindong Silicon, LLC**, das von dem Staatlichen Komitee für Geologie und Bodenschätze Usbekistans, dem usbekischen Stahlunternehmen JSC „Uzmetkombinat“ als größter Verbraucher von Ferrosilizium im Land, dem südkoreanischen Energieunternehmen Shindong Enercom Inc. sowie dessen Tochtergesellschaft Solartech gegründet wurde. 2022 übertrug JSC „Uzmetkombinat“ seine Anteile an Uz-Shindong Silicon und sechs weiteren Unternehmen an die staatliche Vermögensverwaltung. Sämtliches produziertes Ferrosilizium, 13.300 t zwischen 2014 und 2018, wird in Usbekistan verbraucht.

Im August 2018 nahm das seit 1944 bestehende **JSC „Uzmetkombinat“** selbst die Produktion von FeSi 40 – 75 % (Kapazität: 15.000 tpa) und im Dezember des gleichen Jahres auch von FeSiMn (Kapazität: 10.000 tpa) auf. Vom Ferrosilikomangan sollten nach den ursprünglichen Plänen 6.000 tpa für den eigenen Bedarf, 1.000 tpa für den heimischen Markt und 3.000 tpa für den Export bestimmt sein. Die verfügbaren Handelsdaten von Usbekistan weisen jedoch bisher keine Exporte von Ferrosilikomangan auf (vgl. Tab. 94).

Im Jahr 2012 plante das südkoreanische Unternehmen Hankook Silicon Co., Ltd. auch in Usbekistan Polysilizium in einem dort noch zu errichtenden Werk mit einer Kapazität von 10.000 tpa

**Tab. 94: Weltweite Importe von Silizium (Si) und Ferrosilizium (FeSi) (in t) aus Usbekistan seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	0	< 1	0	0	0	0	0	2	640
FeSi	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FeSi	0	0	0	0	0	0	63	2.744	271



zu produzieren. Spätestens mit der Insolvenz von Hankook Silicon im Jahr 2018 wurden diese Pläne nicht mehr weiterverfolgt.

Derzeit bestehen in Usbekistan Pläne zum Ausbau der Solarenergie mit Kapazitäten bis zu 5 GWp in den nächsten zehn Jahren, wobei das Unternehmen Masdar aus den Vereinigten Arabischen Emiraten der größte Investor in erneuerbare Energien in Usbekistan ist. Eine nennenswerte PV-Industrie gibt es jedoch bisher nicht (AYLAROV & SCHEIDER 2022). Die European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) finanziert derzeit eine 100 MWp-Photovoltaikanlage in der Region Navoi. Betreiber ist die Nur Navoi Solar Holding RSC, Ltd., Investor das o. g. Unternehmen Masdar.

#### Literatur

ASHUROV, M. KH.; ABDURAKHMANOV, B. M., ABDURAKHMANOV, K.P. & ASHUROV, KH. B. (2010): Prospects for the Research and Technology of Silicon Production for Solar Power Engineering in the Republic of Uzbekistan. *Applied Solar Energy*, 46, 2, 2010 (URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S0003701X10020015>).

AYLAROV, A. & SCHEIDER, J. (2022): Enabling PV in Uzbekistan. Eclareon GmbH Berlin (URL: [https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2021/10/enabling\\_pv\\_usbekistan\\_eng.pdf](https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2021/10/enabling_pv_usbekistan_eng.pdf))



## Venezuela

Venezuela hat kaum Bedarf an Silizium und benötigt auch nur wenig Ferrosilizium.

Aufgrund der im Land (niederschlagsabhängig) meist günstig verfügbaren Hydroenergie existiert dennoch ein Ferrolegerungswerk der **FerroVen S.A.**, dessen Anteilsmehrheit von 80,4 % (mittlerweile erhöht auf 99,9 %) im Jahr 1998 von der spanischen Grupo Ferroatlántica, S.A. (seit 2015 Ferroglobe plc) übernommen wurde. Das Werk liegt in Puerto Ordaz im Südosten von Venezuela, genauer im Industriegebiet von Matanzas, nahe dem Orinoco. Es verfügt über insgesamt sechs Öfen, von denen

zwei der Produktion von Elektrodenpaste bzw. calciniertem Anthrazit, ein Ofen der Produktion von FeMn (Kapazität: 12.500 tpa) oder FeSiMn (Kapazität: 21.500 tpa) und drei Öfen mit einer Kapazität von 96.000 tpa der Produktion von FeSi 70 – 75 % dienen. Seit dem Jahr 2016, offensichtlich mit einer kurzen Unterbrechung im Jahr 2021 (vgl. Tab. 95), ist das Werk aufgrund gestiegener Elektrizitätspreise und der starken Währungsschwankungen sowie politischen Instabilität Venezuelas gestundet.

Der von FerroVen benötigte Quarz stammt vom Tochterunternehmen Cuarzos Industriales de Venezuela S.A. (CuarzoVen) im Bundesstaat Bolívar, das dort Steinbrüche in Candelaria, El Manteco und El Mery betrieb.

**Tab. 95: Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Venezuela seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).**

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FeSi	63.291	86.311	79.131	76.247	55.297	60.022	80.063	74.108	80.469
FeSiMn	50	700	5.701	7.398	8.050	2.192	11.159	7.198	19.045
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSi	64.690	61.542	34.454	1.069	1.507	145	0	9	0
FeSiMn	2.681	10.438	6.340	1.500	0	0	0	3.994	0



## Vereinigte Arabische Emirate

Emirates Global Aluminium PJSC ist das größte Industrieunternehmen der Vereinigten Arabischen Emirate (VAE) außerhalb des Erdöl- und Erdgassektors. Mit Aluminiumhütten in Al Taweelah, Abu Dhabi, und Jebel Ali, Dubai, ist

das Unternehmen ein Großverbraucher von Rohsilizium mit einem Jahresbedarf von bis zu 63.000 t. Hauptlieferland ist China. Mitte 2022 kündigte das Unternehmen an, evtl. schon im Jahr 2023 mit dem Bau einer eigenen Siliziumhütte zu beginnen. Nach Deckung des Eigenbedarfs könnten dann in den VAE in einem weiteren Schritt auch Silikone oder Polysilizium für den Aufbau einer eigenen Solarindustrie produziert werden.



## Vietnam

Vietnam stellt kein Silizium oder Polysilizium her, besitzt jedoch mehrere Hütten zur Produktion von Ferrolegierungen. Deren Erzeugnisse wurden jedoch bisher größtenteils exportiert, so dass, um den Bedarf der heimischen Stahlindustrie zu decken, die Mehrheit der benötigten Ferrolegierungen – zumeist aus China – importiert wird. Die derzeit bekannten vietnamesischen Produzenten sind:

- **Công Ty TNHH Lionas Metals Co., Ltd.** (Lionas Metals Co., Ltd.) wurde ursprünglich im Oktober 2014 als Verkaufsniederlassung der chinesischen Erdos-Gruppe (s. China) gegründet, aber später unabhängig und dann im Jahr 2018 von der japanischen Firma „Lionas Fund“ übernommen. Im Januar 2019 eröffnete Lionas als Minderheitsgesellschafter (26 %), offensichtlich zusammen mit dem chinesischen Antimonproduzenten Yeoungsun Chemicals Corporation als Mehrheitsgesellschafter, in Nghi Sơn, Provinz Thanh Hóa, auf dem Gelände der früheren FeCr-Hütte der Ferocrom Thanh Hoa Co., Ltd. eine FeSi-Hütte. Diese verfügt derzeit über einen Ofen mit 16,5 MVA-Anschlussleistung und eine Kapazität von 12.000 tpa FeSi 75 %. Das produzierte Ferrosilizium wird größtenteils nach Japan und Südkorea exportiert. Bis Ende 2023 ist in Nghi Sơn die Inbetriebnahme eines weiteren 16,5 MVA-Ofens und damit eine Verdoppelung der dortigen Kapazität geplant. Die FeSi-Hütte in Nghi Sơn ist in Vietnam wegen illegaler Abfallentsorgung bekannt geworden.
- Im Juli 2022 kaufte „Lionas Fund“ in Tam Diep, Provinz Ninh Binh, weiterhin ein Industriegelände, auf dem zukünftig in einer Hütte mit zwei Elektrolichtbogenöfen jährlich ebenfalls bis zu 25.000 t FeSi produziert werden sollen. Im Dezember 2022 wurde zudem das aufgegebene Werksgelände eines japanischen Zementkonzerns nahe des Hafens Nghi Son in der Provinz Thanh Hoa erworben. Hier sollen in Zusammenarbeit mit einer

noch nicht genannten Firma in drei Öfen bis zu 40.000 tpa FeSi HP für die Produktion von elektromagnetischen Stählen für E-Autos hergestellt werden.

- Im Februar 2023 weihte auch die **Thai Nguyen Metallurgical Electromechanical Company** (MECO) ihr neues Ferrosiliziumwerk in der Provinz Thai Nguyen ein. Es besitzt eine Kapazität von 12.000 tpa FeSi 72 – 75 %.
- Die Vietnam Haiduong **New Resources Metallurgy Shareholdings Company** (NRM) wurde im Jahr 2009 gegründet und betreibt ein Werk in Kinh Môn in der Provinz Hải Dương. Es verfügt über sieben Öfen mit einer Gesamtkapazität von 150.000 tpa FeMn und FeSiMn verschiedener Qualitäten sowie SiC.
- Die 1995 gegründete **Tan An Co., Ltd.** betreibt seit dem Jahr 2008 in der Provinz Lao Cai eine Reihe von kleineren Wasserkraftwerken, seit dem Jahr 2011 in der Provinz Hòa Bình ein Furnierholzwerk und ging im Jahr 2008 ein Joint Venture mit einem chinesischen Partner zur Errichtung einer Hütte zur Produktion von bis zu 100.000 tpa FeMn sowie FeSiMn ein.

Zur Umgehung besonders der US-amerikanischen Einfuhrzölle für Direktimporte aus China betreiben mehrere große chinesische Produzenten der PV-Industrie auch in Vietnam Fertigungsstätten. So investierte Jinko Solar Co., Ltd. im Jahr 2021 in der Provinz Quảng Ninh umgerechnet 500 Mio. US\$ für den Aufbau eines Siliziumstab- und -waferwerks mit einer Kapazität von 7 GWp. Auch Trina Solar Ltd. kündigte an, in Vietnam ein 6,5 GWp-Waferwerk in Betrieb nehmen zu wollen. Weitere PV-Produzenten mit Fertigungsstätten auch in Vietnam sind Canadian Solar Inc. und Jianguo Seraphim Solar System Co., Ltd.

Aufgrund seiner niedrigen Produktionskosten etabliert sich Vietnam im Wettbewerb besonders zu Taiwan zudem seit einigen Jahren auch als Herstellerland für Halbleiter, jedoch ohne vorgelagerte Wertschöpfungskette. Die bisher größte Fab betreibt Samsung Electronics in Ho Chi Minh City.

Tab. 96: Weltweite Importe von Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) aus Vietnam seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
FeSi	0	0	0	902	3.355	21.002	59.904	63.686	55.092
FeSiMn	0	0	0	407	1.226	39.954	35.811	57.215	45.684
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FeSi	56.127	40.260	9.954	1.176	742	593	9.317	16.342	6.720
FeSiMn	75.920	71.941	90.838	75.281	81.472	61.488	61.013	67.871	80.164

Tab. 97: Weltweite Exporte von Rohsilizium (Si), Ferrosilizium (FeSi) und Ferrosilikomangan (FeSiMn) (in t) nach Vietnam seit dem Jahr 2005, Quelle: GLOBAL TRADE TRACKER (2023).

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Si	151	256	1.550	2.050	1.676	2.350	825	1.541	3.483
FeSi	3.675	6.165	8.978	452	177	407	516	1.242	520
FeSiMn	899	4.159	10.056	3.900	10.459	1	808	8.915	5.826
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Si	7.988	3.977	5.768	7.405	9.345	9.752	11.434	9.902	9.303
FeSi	612	1.048	13.648	21.414	19.541	29.932	37.733	48.122	39.398
FeSiMn	3.711	12.476	12.675	32.594	30.071	44.994	65.813	66.769	50.227

## Indikatoren und Risikobewertungen

		Indikator	Risikobewertung		
			gering	mittel	hoch
<b>Angebot und Nachfrage 2022</b>					
Recyclingrate	Silizium	EOL-RR			< 1 %
Derzeitige Marktdeckung (Md)	Silizium	Md	11,5 %		
	Silizium – Kapazität	Md(K)	46 %		
	Polysilizium	Md	32 %		
	Polysilizium – Kapazität	Md(K)	50 %		
	Ferrosilizium	Md	3,3 %		
	Ferrosilizium – Kapazität	Md(K)	39 %		
Länderkonzentration der Produktion	Silizium	HHI			5.773
Gewichtetes Länderrisiko der Produktion	Silizium	GLR		-0,06	
Länderkonzentration der Produktion	Polysilizium	HHI			6.971
Gewichtetes Länderrisiko der Produktion	Polysilizium	GLR		-0,09	
Länderkonzentration der Produktionskapazität	Kapazität Polysilizium	HHI			7.350
Gewichtetes Länderrisiko der Produktionskapazität	Kapazität Polysilizium	GLR		-0,14	
Länderkonzentration der Produktion	Ferrosilizium	HHI			4.976
Gewichtetes Länderrisiko der Produktion	Ferrosilizium	GLR		-0,20	
Länderkonzentration der Produktionskapazität	Kapazität Ferrosilizium	HHI			5.054
Gewichtetes Länderrisiko der Produktionskapazität	Kapazität Ferrosilizium	GLR		-0,27	
Länderkonzentration der Produktion	Ferrosilikomangan	HHI			4.764
Gewichtetes Länderrisiko der Produktion	Ferrosilikomangan	GLR		-0,20	
Länderkonzentration der Produktionskapazität	Kapazität Ferrosilikomangan	HHI			5.053
Gewichtetes Länderrisiko der Produktionskapazität	Kapazität Ferrosilikomangan	GLR		-0,24	

		Indikator	Risikobewertung		
			gering	mittel	hoch
<b>Handel 2022</b>					
<b>Importe Deutschlands</b>					
Diversifizierung	Rohsilizium	HHI			3.079
Gewichtetes Länderrisiko	Rohsilizium	GLR	1,12		
Diversifizierung	Polysilizium	HHI			8.075
Gewichtetes Länderrisiko	Polysilizium	GLR	1,04		
Diversifizierung	Ferrosilizium	HHI	749		
Gewichtetes Länderrisiko	Ferrosilizium	GLR	0,79		
Diversifizierung	Ferrosilikomangan	HHI	1.428		
Gewichtetes Länderrisiko	Ferrosilikomangan	GLR	0,65		
<b>Zukünftige Marktdeckung 2027</b>					
Zukünftige Marktdeckung (Mz) bis 2027	Silizium – Kapazität	Mz(K)	57 %		
	Polysilizium – Kapazität	Mz(K)	77 %		

**Länderkonzentration der der Produktion bzw. Importe Deutschlands (HHI):**

Summe der quadrierten Anteile an der Produktion bzw. der deutschen Importe

*Bewertungsskala HHI:*

10.000 – 2.500 = *bedenklich*

2.500 – 1.500 = *mäßig bedenklich*

1.500 = *unkritisch*

**Gewichtetes Länderrisiko der Produktion bzw. Importe Deutschlands (GLR):**

Summe der Anteile der Produktion bzw. der deutschen Importe multipliziert mit dem Länderrisiko

*Bewertungsskala GLR:*

-2,5- -0,5 = *bedenklich*

-0,5-0,5 = *mäßig bedenklich*

-0,5-2,5 = *unkritisch*

**Derzeitige Marktdeckung (Md):**

Quotient aus Nachfrage zu Angebot (Produktion Md oder Produktionskapazität Md(K)). Md gibt den Anteil von Angebotsüberschuss oder -defizit in Prozent an.

*Bewertungsskala:*

< 0 % = *bedenklich*

0 %–3 % = *mäßig*

> 3 % = *unkritisch*

**Derzeitige Marktdeckung (Md(K)):**

Quotient aus Nachfrage zur Angebotskapazität (Produktionskapazität). Md(K) gibt den Anteil von Kapazitätsüberschuss oder -defizit in Prozent an.

*Bewertungsskala:*

< 15 % = *bedenklich*

15 %–30 % = *mäßig*

> 30 % = *unkritisch*

**Zukünftige Marktdeckung (Mz(K))**

Quotienten aus einer angenommenen Nachfrage zu einer angenommenen Angebotskapazität im Jahr 2030. Mz(K) gibt den Anteil von Kapazitätsüberschuss oder -defizit in Prozent an.

*Bewertungsskala:*

< 15 % = *bedenklich*

15 %–30 % = *mäßig*

> 30 % = *unkritisch*

## Glossar

<b>Diversifizierung der Importe</b>	Die Diversifizierung der Importe errechnet sich mithilfe des HHI, wobei die mengenmäßigen Anteilswerte am Import auf Länderebene herangezogen werden.
<b>Gewichtetes Länderrisiko</b>	Das gewichtete Länderrisiko (GLR) errechnet sich aus der Summe der Anteilswerte der Länder an der Produktion, dem Nettoexport oder dem deutschen Import, multipliziert mit dem Länderrisiko (LR). Das gewichtete Länderrisiko liegt in einem Intervall zwischen +2,5 und -2,5. Bei Werten über 0,5 wird das Risiko als niedrig eingestuft, zwischen +0,5 und -0,5 liegt ein mäßiges Risiko vor und Werte unter -0,5 gelten als kritisch.
<b>Herfindahl-Hirschman-Index (HHI)</b>	Der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) ist eine Kennzahl, die die unternehmerische Konzentration in einem Markt angibt. Sie wird durch das Summieren der quadrierten Marktanteile aller Wettbewerber errechnet. Die Bewertungsskala für den HHI richtet sich nach den Vorgaben des U.S. Department of Justice und der Federal State Commission, die einen Markt bei einem HHI unter 1.500 als gering und zwischen 1.500 und 2.500 Punkten als mäßig konzentriert definieren. Bei einem Indexwert über 2.500 gilt ein Markt als hochkonzentriert.
<b>Länderkonzentration</b>	Die Länderkonzentration wird mithilfe des HHI berechnet, wobei jahresbezogene Anteilswerte der Bergwerksförderung, der Raffinadeproduktion oder der Importe auf Länderebene herangezogen werden.
<b>Länderrisiko</b>	Das Länderrisiko (LR) ergibt sich aus dem Mittelwert der sechs Worldwide Governance Indicators der Weltbank, die jährlich die Regierungsführung von über 200 Staaten weltweit bewertet. Gemessen werden (1) Mitspracherecht und Rechenschaftspflicht, (2) politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt, (3) Leistungsfähigkeit der Regierung, (4) Regulierungsqualität, (5) Rechtsstaatlichkeit und (6) Korruptionsbekämpfung.
<b>Marktdeckung</b>	Die Marktdeckung ergibt sich aus dem Quotienten der Nachfrage (Raffinadeverbrauch) und des Angebots (Raffinadeproduktion oder auch Angebotskapazität).
<b>Recyclingrate (EOL-RR)</b>	Die End-of-Life Recyclingrate (EOL-RR) ist der Quotient aus der Menge des dem Recycling zugeführten Altschrotts eines Rohstoffs und der Gesamtmenge des theoretisch in den End-of-Life-Produkten angefallenen Rohstoffs.
<b>Reserven</b>	Reserven sind die zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbaren Rohstoffmengen.
<b>Zukünftige Marktdeckung</b>	Die zukünftige Marktdeckung ergibt sich aus dem Quotienten der zukünftigen Nachfrage und des zukünftigen Angebots. Das zukünftige Angebot errechnet sich aus der Summe der derzeitigen Kapazität und einer zusätzlichen Jahresproduktionskapazität aus neuen Projekten bzw. Kapazitätserweiterungen.





Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der  
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)  
Wilhelmstraße 25–30  
13593 Berlin

[dera@bgr.de](mailto:dera@bgr.de)

