

Lippelt, Jana; Steigmeier, Jennifer; Wölfl, Anita

## Article

# Kurz zum Klima: Silizium – ein Rohstoff, der es in sich hat

ifo Schnelldienst

## Provided in Cooperation with:

Ifo Institute – Leibniz Institute for Economic Research at the University of Munich

*Suggested Citation:* Lippelt, Jana; Steigmeier, Jennifer; Wölfl, Anita (2021) : Kurz zum Klima: Silizium – ein Rohstoff, der es in sich hat, ifo Schnelldienst, ISSN 0018-974X, ifo Institut - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München, München, Vol. 74, Iss. 09, pp. 73-76

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/250817>

### Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

### Terms of use:

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*

Jana Lippelt, Jennifer Steigmeier und Anita Wöfl

## Kurz zum Klima: Silizium – ein Rohstoff, der es in sich hat

Die deutsche Wirtschaft leidet unter dem seit längerer Zeit herrschenden Chipmangel. So ist etwa die Autoindustrie seit Monaten mit ihrer Produktion in Verzug, da diese entscheidenden Bauteile fehlen. Sie sind überall dort im Auto verbaut, wo Elektronik gefragt ist; sie steuern den Komfort, die Fahr- und Datensicherheit, den Spritverbrauch oder den Schadstoffausstoß. Mit Tendenz steigend, denn durch die Megatrends Elektromobilität sowie autonomes und vernetztes Fahren wird der Bedarf an Mikrochips schon allein in der Autoindustrie in den kommenden Jahren deutlich zunehmen. Bis 2025 soll weltweit etwa doppelt so viel Mikroelektronik in den Kraftfahrzeugen verbaut werden wie noch 2020 (vgl. ZVEI 2021).

Dabei ist die Autoindustrie nur eine von vielen Abnehmerbranchen von Mikrochips. Zwar macht sie in Europa etwa 35% des Halbleitermarkts aus. Weltweit fließen jedoch nur knapp 8% des Umsatzes mit Halbleitern in die Automobilproduktion. Jeweils 30% werden weltweit in der Computerelektronik und in der Kommunikationstechnik verbaut (vgl. Abb. 1). Auch hier mit Tendenz steigend, denn die Welt digitalisiert sich immer schneller. So werden etwa Halbleiter im Bereich der erneuerbaren Energien immer mehr zum A und O. Zudem hat die Krise infolge der Corona-Pandemie einen Boom in der Kommunikations- und der Unterhaltungselektronik ausgelöst und die Nachfrage nach Halbleitern in der Medizintechnik steigen lassen.

An erster Stelle der Wertschöpfungskette der Halbleiterproduktion steht der Basisrohstoff Silizium – ein Rohstoff, der allerdings auch in vielen anderen zukunftsfähigen Bereichen eine entscheidende Rolle spielt. Ein Beispiel dafür sind etwa Batterien für die Elektromobilität. Ein anderes Beispiel sind erneuerbare Energien wie Photovoltaik (PV) und Windenergie, für die über die nächsten Jahre mit einem hohen und stetig wachsenden Bedarf gerechnet wird (vgl. Ausland und Rong 2020; IWR 2020). Solarzellen sind ohne Silizium nicht denkbar, und bei der Windenergie könnte Silizium nicht nur indirekt als Halbleiter in die Elektronik fließen, sondern eventuell auch direkt als Speicher material genutzt werden (vgl. CAU 2018).

### SILIZIUM – AUFWÄNDIGE PRODUKTION, ...

Silizium ist ein Halbmetall und Halbleitermaterial. Dabei handelt es sich nach Sauerstoff um das zweithäufigste chemische Element auf der Erde. Der Ausgangsrohstoff für Silizium ist zumeist Quarzsand, der weltweit in verschiedenen Ausprägungen in einer Viel-

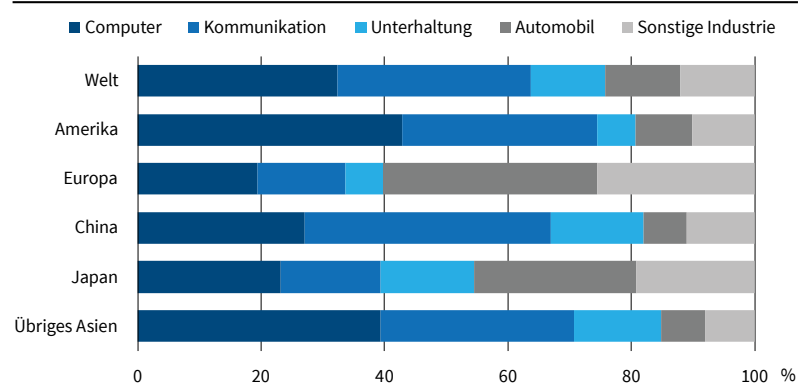
### IN KÜRZE

Als Basisrohstoff für die Produktion etwa von Mikrochips, Solarzellen oder auch Batterien für Elektrofahrzeuge wird Silizium immer zentraler für zahlreiche Schlüsseltechnologien. Zwar ist das Grundmaterial Quarzsand weltweit fast unbegrenzt vorhanden. Jedoch wird Silizium regional hoch konzentriert produziert, was die weltweite Versorgung mit dem Rohstoff schwierig macht. Zudem ist der Produktionsprozess sehr energieintensiv und dadurch mit erheblichen negativen Wirkungen für die Umwelt verbunden. Alternative Materialien und Technologien werden erforscht und haben schon für die nahe Zukunft sowohl aus Effizienz- wie auch Umweltgesichtspunkten großes Potenzial.

zahl von Gesteinen vorhanden ist. Quarz stellt dabei die kristalline Form von Siliziumdioxid dar, das aus Sauerstoff und Silizium besteht (vgl. BGR 2016). Verarbeitetes Silizium kann anhand seiner Reinheitsgrade in verschiedene Untergruppen unterschieden werden: Bei Roh- oder auch Ferrosilizium handelt es sich um eine Legierung aus Eisen mit einem Siliziumanteil von meist 50 bis 75% und einem Reinheitsgrad von 98–99%. Es wird beispielsweise in der Stahlproduktion und für Gusseisen verwendet (vgl. BGR 2016). Produkte mit höheren Siliziumanteilen werden unter dem Begriff Polysilizium zusammengefasst. Hierzu zählen zum Beispiel das Solarsilizium mit einem Reinheitsgrad von mehr als 99,9%. Hierzu zählt zudem das Halbleitersilizium, bei dem die erlaubte Gesamtverunreinigung nur im ppt-Bereich liegen darf; in einer

Abb. 1

Halbleitermarktsegmente nach Techniksparten und Regionen, 2020



Quelle: Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie.

© ifo Institut

Milliarde Siliziumatome darf demnach nur deutlicher weniger als ein Fremdatom enthalten sein (vgl. BGR 2016).

Die Gewinnung von Silizium für Produkte wie Halbleiter oder auch Solarzellen ist aufgrund des spezifischen Verfahrens und der zahlreichen Reinigungsvorgänge sehr aufwändig (vgl. Mai 2019). So wird zunächst Rohsilizium mit Hilfe der sogenannten carbothermischen Reduktion hergestellt, bei der eine Reinheit von mindestens 98,5% erreicht wird. Dies geschieht in einem elektrischen Lichtbogenofen bei einer Temperatur von über 2 000°C.

Die Herstellung von hochwertigem oder reinem Silizium für Mikrochips oder auch Solarzellen erfolgt dann überwiegend im sogenannten Siemens-Verfahren: Im ersten Schritt wird Rohsilizium mit Chlorwasser in flüssiges Trichlorsilan umgewandelt. Das Trichlorsilan wird anschließend bei hoher Temperatur in einem Glockenreaktor zersetzt, wobei hochreines Silizium abgeschieden wird und das für Solarzellen oder Mikrochips nötige polykristalline Silizium (kurz Polysilizium) entsteht (vgl. BGR 2016). Alternativ steht ein neueres energieeffizienteres Verfahren zur Verfügung, bei dem das reine Trichlorsilan in einem Wirbelschichtreaktor zersetzt wird. An den winzigen Siliziumkugeln, die im Reaktor umherwirbeln, scheidet sich das Silizium kontinuierlich ab, so dass sogar Silizium mit einer Reinheit von mindestens 99,9999% entsteht (vgl. BGR 2019).

**... REGIONAL HOCH KONZENTRIERT ...**

Die Deutsche Rohstoffagentur ordnet Silizium in die Gruppe der Rohstoffe mit den höchsten Preis- und Lieferrisiken ein (vgl. DERA 2019). Bei den aktuellen Strukturen kann es also auch in Zukunft immer wieder zu Engpässen kommen. Ein Grund dafür ist die starke regionale Konzentration der Siliziumproduktion und damit die weltweite Abhängigkeit von nur wenigen Produzenten. Im Jahr 2019 wurden mit 7,6 Mio. Tonnen etwa 67% der weltweit produzierten Menge an Silizium allein in China hergestellt. Als weitere wichtige Produktionsländer gelten Russland, Brasilien,

Norwegen, die USA, Frankreich und Malaysia, aktuell allerdings mit Anteilen von jeweils nur 4 bis 8% des Weltmarkts an Silizium (vgl. Abb. 2).

Was diese regionale Konzentration der Siliziumproduktion bedeutet, wurde im Laufe des Jahres 2020 deutlich: So ging zunächst aufgrund des drastischen weltweiten Konjunkturerinbruchs infolge der Corona-Pandemie im Frühjahr 2020 auch die Nachfrage nach Silizium stark zurück. Zusammen mit den sinkenden Preisen für Silizium wurden manche Produktionsstätten in den USA nicht mehr rentabel und mussten schließen (vgl. USGS 2021). Die Nachfrage vor allem nach Mikrochips und damit nach Silizium zog dann im Sommer überraschend schnell und stark wieder an und wurde durch den Corona-bedingten Digitalisierungsschub noch weiter angetrieben. Sie konnte jedoch nicht in dem Ausmaß und nicht sofort befriedigt werden. Denn hier kamen noch schlechte Wetterbedingungen hinzu, die in China zu Produktionsunterbrechungen oder sogar -schließungen führten. In manchen Regionen Chinas kam es infolge langanhaltender Trockenheit zu Wassermangel in den Wasserkraftwerken und damit zu Strommangel. Andere Regionen in China waren dagegen von Überschwemmungen betroffen (vgl. Ilg 2021).

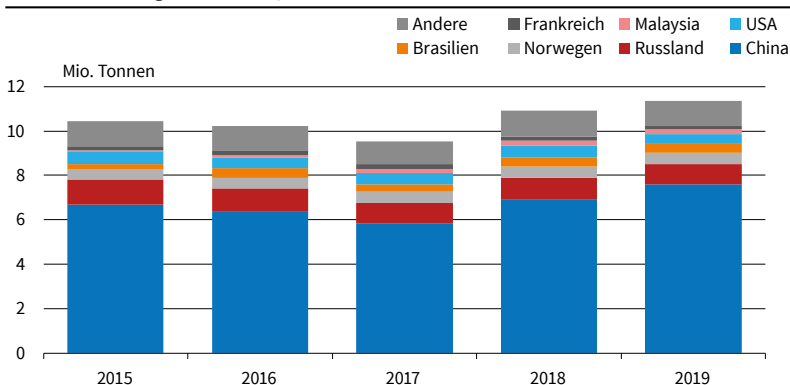
**... MIT ERHEBLICHEN NEGATIVEN UMWELTEFFEKTEN**

Da zur Produktion von Siliziumlegierungen in Lichtbogenöfen hohe Temperaturen von über 2000°C benötigt werden, zeichnet sich der Reduktionsprozess durch einen enormen Energieverbrauch aus. Dieser Stromverbrauch beläuft sich auf ca. 10,5 kWh/kg Rohsilizium. Bezüglich verarbeiteter Siliziumprodukte hat neben der Produktion von Reinstsilizium für Mikrochips besonders die Produktion monokristalliner Solarzellen den höchsten Strombedarf. Dieser wird hier für ein Modul mit 160 W<sub>p</sub> auf ca. 2,9 kWh/W<sub>p</sub> geschätzt (vgl. Dubey et al. 2013).

Durch den Energieaufwand, der für die Stromproduktion zum Betrieb der Anlagen nötig ist, fallen erhebliche Mengen von Kohlendioxid an. Dadurch werden während der Siliziumreduktion ca. 5 kg CO<sub>2</sub> pro kg Silizium frei (vgl. Alsema und Wild-Scholten 2007). Die Menge an Kohlendioxid steigt dabei zum einen mit einem zunehmenden Siliziumanteil des Ausgangsmaterials, zum anderen ist die Menge von der Art der Legierung und dem erwünschten Reinheitsgrad abhängig, was jeweils wiederum einen höheren Energieaufwand bedeutet.

Vor allem der Energiemix des für die Produktion verwendeten Stroms ist für die Höhe der Emissionen ausschlaggebend. Demnach fallen die Emissionen in Ländern wie China, in denen häufig Strom aus Kohlekraft eingesetzt wird, deutlich höher aus als in Ländern, die den Strom unter anderem durch erneuerbare Energien ersetzen. So konnten die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Norwegen durch den Einsatz von Wasserkraft um

Abb. 2  
Länderverteilung der Siliziumproduktion



Quelle: USGS Minerals Yearbook 2019.

© ifo Institut

bis zu 50% reduziert werden (vgl. Dubey et al. 2013). Neben den Emissionen aus dem Strombedarf hängt die emittierte CO<sub>2</sub>-Menge zudem von den Reduktionsmaterialien sowie den Eigenschaften der Öfen ab. Als Reduktionsmaterial wird dabei Kohlenstoff aus Kohle, Holzstücken, Holzkohle und Koks genutzt.

Wie viel letztendlich bezogen auf den gesamten Lebenszyklus von Siliziumprodukten an CO<sub>2</sub> entsteht, wird gut am Beispiel der Produktion von Solarzellen für Photovoltaikanlagen deutlich: So entstehen ca. 12g CO<sub>2</sub>/kWh bei der Herstellung und Nutzung von Dünnschichtmodulen, während es bei polykristallinen Solarpanelen bis zu 24 g CO<sub>2</sub>/kWh sind (vgl. Euractiv 2016). In einer aktuellen Studie des Umweltbundesamtes (2021) wurde der resultierende CO<sub>2</sub>-Fußabdruck verschiedener PV-Module, gemessen am Gesamtlebenszyklus, untersucht, aus dem sich anhand einer Vielzahl an Produktionsszenarien und Anlagenstandorten Bandbreiten von 16 bis 63 g CO<sub>2</sub> pro produzierte Kilowattstunde ergaben. Je nach Wirkungsgrad der Anlagen können dabei Einsparungen zwischen 3 und 15% erreicht werden.

Zusätzlich zu Kohlendioxid fallen bei der Siliziumproduktion weitere Emissionen in Form von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) und Feinstaub an. Stickoxide entstehen dabei hauptsächlich im Verlauf der Siliziumreduktion im Ofen. In Norwegen machten die NO<sub>x</sub>-Emissionen 2010 ca. 5% der gesamten NO<sub>x</sub>-Emissionen bzw. 41% aller industriellen Emissionen an Land aus (vgl. Myrhaug et al. 2012). Feinstaub entsteht dagegen während des gesamten Produktionsprozesses; die exakten Mengen sind hierbei ebenfalls von der Art der Öfen und dem gewählten Produktionsprozess sowie dem Einsatz der Reduktionsmaterialien abhängig.

Neben weiteren Auswirkungen auf die Umwelt durch schädliche Abfälle und die Eutrophierung von Gewässern schlägt sich die Produktion und Weiterverarbeitung von Silizium nicht zuletzt auch in einem erheblichen Wasserverbrauch nieder (vgl. Euractiv 2016). So nahm die für die Chipproduktion verbrauchte Wassermenge beim taiwanesischen Hersteller TSMC zwischen 2015 und 2019 um 70% zu (vgl. Barbiroglio 2021). Crawford et al. (2021) zufolge fallen die benötigten Wassermengen zur Chipproduktion bei Intel zudem dreimal so hoch aus wie die des Autoherstellers Ford insgesamt; gleichzeitig wurde dabei die doppelte Menge an Sondermüll verursacht. Dagegen werden diese Wassermengen laut Intel derzeit zu 80% recycelt, und deren Anteil soll bis 2025 auf 100% steigen (vgl. Intel Corporation 2021).

## AUSBLICK

Da die Produktion von Silizium bisher sehr energieintensiv ist, wird an nachhaltigeren Alternativen geforscht. Allein um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen, sind verschiedene neue Lösungsansätze im Bereich der Energieeffizienz notwendig. Ein neueres Verfahren ist hier zum Beispiel die Ge-

winnung von Silizium mit Hilfe eines Mikrowellenverfahrens. Diese Methode ist energieeffizienter und gleichzeitig kostengünstiger; in neueren Mikrowellenöfen können durch den Wegfall von Emissionen aus Kohleelektroden gegenüber bisherigen Verfahren Einsparungen von rund 5% erzielt werden (vgl. Alsema und Wild-Scholten 2007). Damit können die negativen Umweltauswirkungen der Siliziumproduktion in Zukunft reduziert werden (vgl. Mai 2019).

Zudem stehen inzwischen einige neue Materialien, wie beispielsweise Siliziumkarbid, zur Verfügung. Dieses Halbleitermaterial ermöglicht eine höhere Schaltgeschwindigkeit und kann bei höheren Temperaturen verwendet werden. Hinzu kommen deutlich geringere Wärmeverluste (vgl. Next Mobility 2019). Dadurch werden weniger Bauteile benötigt, um dieselbe Leistung wie zuvor zu erzielen. Mit Siliziumkarbid könnte in Zukunft die Stromausbeute von Photovoltaikanlagen auf über 99% erhöht werden und Elektroautos innerhalb von sieben Minuten für eine Reichweite von 200 Kilometern aufgeladen werden (vgl. Andres 2020).

Zwar ist Siliziumkarbid insbesondere angesichts der bislang kleinen Stückzahlen noch wesentlich teurer als Silizium. Mit dem technischen Fortschritt und der deutlich steigenden Nachfrage nach Siliziumprodukten könnte sich das jedoch schnell ändern. Die Wachstumsraten werden jedenfalls über die nächsten fünf Jahre auf weltweit mindestens 30 % geschätzt (vgl. Andres 2020). Hier liegt also beträchtliches Potenzial schon für die nahe Zukunft.

## LITERATUR

- Alsema, E. A. und M. J. Wild-Scholten (2007), »Environmental Impact of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production«, presented at 13th CIRP Intern. Conference on Life Cycle Engineering, Leuven, 31 Mai bis 2 Juni 2006, verfügbar unter: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.491.3389&rep=rep1&type=pdf>.
- Andres, M.-S. (2020), »Leistungsträger. Neue Materialien für Leistungshalbleiter stehen vor dem Durchbruch«, *Ampere* (3), 20–21.
- Ausland, G. und H. M. Rong (2020), »Silicon Production with High Energy Efficiency and Low CO<sub>2</sub> Footprint«, SI Conference Silicon for the Chemical and Solar Industry XV, 15.–18. Juni 2020, Trondheim.
- Barbiroglio, E. (2021), »No Water no Microchips: What Is Happening in Taiwan?«, *Forbes*, verfügbar unter: <https://www.forbes.com/sites/googlecloud/2021/06/25/doubling-down-on-insights-with-digital-twins/?sh=5d0ceef72ced>.
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2016), »Quarzrohstoffe in Deutschland«, verfügbar unter: [https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Downloads/studie-quarz-2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Downloads/studie-quarz-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=3).
- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2019), »Deutschland – Rohstoffsituation 2018«, verfügbar unter: [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/rohst-2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohst-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=5).
- Christian-Albrechts-Universität Kiel (CAU, 2018), »Silizium als neues Speichermedium für die Akkus der Zukunft«, *Chemie.de*, 24. August, verfügbar unter: <https://www.chemie.de/news/1154746/silizium-als-neues-speichermedium-fuer-die-akkus-der-zukunft.html>.
- Crawford, A., I. King und D. Wu (2021), »The Chip Industry Has a Problem with its Giant Carbon Problem«, *Bloomberg Green*, verfügbar unter: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-04-08/the-chip-industry-has-a-problem-with-its-giant-carbon-footprint>.
- Deutsche Rohstoffagentur (DERA, 2019), »DERA-Rohstoffliste 2019«, Berlin, verfügbar unter: [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-40.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-40.pdf?__blob=publicationFile).

Dubey, S., N. Y. Jadhav und B. Zakirova (2013), »Socio-Economic and Environmental Impacts of Silicon based photovoltaic (PV) Technologies«, *Energy Procedia* 33, 322–334.

Euractiv (2016), »Carbon Footprint of Solar Panels Under Microscope«, verfügbar unter: <https://www.euractiv.com/section/energy/opinion/mondycop22-lower-co2-emissions-with-lower-carbon-solar-energy/>.

Ilg, P. (2021), »Kleines Bauteil, große Wirkung«, *Zeit Online*, verfügbar unter: <https://www.zeit.de/mobilitaet/2021-01/chipmangel-halbleiter-autoindustrie-china-taiwan-silizium>.

Intel Corporation (2021), »Restore Water Goal: 2020 Annual Report. Executive Summary«, verfügbar unter: <https://www.intel.de/content/www/de/de/environment/restore-water-goal-executive-summary.html>.

IWR (2020), »Photovoltaik-Markt: Polysilizium-Nachfrage vor dynamischen Wachstum 2021«, verfügbar unter: <https://www.iwr.de/news/photovoltaik-markt-polysilizium-nachfrage-vor-dynamischem-wachstum-2021-news37159>.

Mai, J.-P. (2019), *Ein neuartiges Verfahren zur Gewinnung von Silizium für Solarzellen im Mikrowellenofen*, Dissertation, TU Braunschweig, verfügbar unter: [https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbbs\\_derivate\\_00045600/Diss\\_Mai\\_Janphilipp.pdf](https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbbs_derivate_00045600/Diss_Mai_Janphilipp.pdf).

Myrhaug, E.H., H. Tveit, N. E. Kamfjord, G. Andersen und A. Grovlen (2012), »NOx Emissions from Silicon Production«, SI Conference. Silicon for the Chemical and Solar Industry XI, 25 – 29. Juni 2012, Trondheim, verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/profile/Halvard-Tveit/publication/282014318\\_NOx\\_Emissions\\_from\\_Silicon\\_Production/links/56016a0608aeba1d9f850ac4/NOx-Emissions-from-Silicon-Production.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Halvard-Tveit/publication/282014318_NOx_Emissions_from_Silicon_Production/links/56016a0608aeba1d9f850ac4/NOx-Emissions-from-Silicon-Production.pdf)

Next Mobility (2019), »Die Rolle der Siliziumkarbid-Halbleiter für die E-Mobilität«, verfügbar unter: <https://www.next-mobility.de/die-rolle-der-siliziumkarbid-halbleiter-fuer-die-e-mobilitaet-a-872178/>.

Umweltbundesamt (2021), *Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. Abschlussbericht 35/2021*, verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06\\_cc\\_35-2021\\_oekobilanzen\\_windenergie\\_photovoltaik.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_35-2021_oekobilanzen_windenergie_photovoltaik.pdf).

USGS (2021), *Mineral Yearbook Silicon 2019*, verfügbar unter: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/silicon-statistics-and-information>.