

DIE BEDEUTUNG VON KOHLE FÜR DIE HERSTELLUNG VON SOLARPANEELN

Dr Lars Schernikau

INHALT

1. Herstellung von Silizium in metallurgischer Qualität
2. Kohlenstoffquellen für die Siliziumherstellung: Kohle, Petrolkoks, Hartholz
3. Produktion von Solar-Grade-Silizium (SoG-Si) und Wafering
4. Herstellung von Solarmodulen
5. Kohle und China
6. Zusammenfassung

Kohle ist in diesen Tagen nicht gerade das „Lieblingskind“. **Es scheint, dass fast die gesamte westliche politische Welt geschworen hat, die Kohle ins Grab zu schicken.** Nicht nur die Vereinten Nationen und die IEA haben der Kohle buchstäblich den „Krieg“ erklärt, sondern zahllose politische und aktivistische Organisationen und sogar führende Finanzinstitute erklären, die Nutzung der Kohle sofort zu beenden, wenn es in ihrer Macht stünde.

Der Grund für all dies ist natürlich dieses „schreckliche“ chemische Element namens Kohlenstoff (Nummer 6 im Periodensystem). Bedenken Sie jedoch, dass derselbe Kohlenstoff das zweithäufigste Element im menschlichen Körper ist und einen wichtigen Baustein für alles Leben auf der Erde darstellt. Übrigens ist Kohlenstoff nicht nur deshalb so wichtig, weil CO₂ Pflanzennahrung ist und Pflanzen bei einem CO₂-Gehalt von ca. 1.500 ppm in der Luft am besten gedeihen (der derzeitige atmosphärische Gehalt liegt bei ca. 420 ppm), sondern CO₂ ist auch ein Treibhausgas, das auch dazu beiträgt, die Temperatur auf unserer Erde gemäßigt und lebenswert zu halten.

Ich muss erwähnen, dass der Preis dafür, dass die Erde bewohnbar bleibt, an das Wasser oder besser gesagt an den Wasserdampf geht, das wichtigste und am häufigsten vorkommende Treibhausgas. Wir alle wissen, dass eine erhöhte Konzentration von Treibhausgasen zu einer leichten Erwärmung beiträgt, aber nur wenige von uns haben gelernt – mich eingeschlossen, nachdem ich mich damit befasst hatte – dass es so genannte Sättigungsgrenzen gibt, die es zu berücksichtigen gilt, was bedeutet, dass höhere Konzentrationen eines Treibhausgases immer weniger Einfluss auf Temperaturveränderungen haben (**die Erwärmungswirkung nimmt logarithmisch ab**).

Im heutigen Artikel geht es aber nicht um global gemessene und unbestrittene Temperaturveränderungen, ihre Ursachen und ihre negativen oder positiven Auswirkungen, sondern um Kohle und Solar.

Warum also sind Kohle und Solar so eng miteinander verbunden? Wie kommt es, dass die Herstellung von Solarmodulen ohne Kohle unmöglich ist? Ich dachte immer, dass Kohle „nur“ für die Stromerzeugung wichtig ist, da sie 36 % des weltweiten Strombedarfs deckt, d. h. über 8 Stunden von 24 Stunden an jedem einzelnen Tag des Jahres.

Und ich habe immer gedacht, dass Kohle „nur“ für die Herstellung von Stahl benötigt wird. Werfen wir aber heute einen Blick auf die Herstellung von Solarzellen, bei der es eigentlich um die Produktion von Silizium geht.

Der größte Teil der für die Herstellung von Solarzellen benötigten Energie wird bei der Siliziumproduktion, der Aufbereitung (purification) und dem Wafering verbraucht. Aber reden wir zunächst über die Reinheit (purity). 6N reines Silizium bedeutet 99,9999% Reinheitsgrad, 11N reines Silizium bedeutet 99,99999999% Reinheitsgrad.

Sie haben jetzt vielleicht einen ersten Eindruck von den chemischen und mechanischen Schwierigkeiten bei der Herstellung eines so reinen Metalls aus einem Naturprodukt bekommen.

In diesem Artikel werden Sie sehen, wie wichtig eine ununterbrochene Stromversorgung ist, insbesondere für industrielle Prozesse wie die Siliziumschmelze. Natürlich kommt dieser Strom in China aus Kohle und kann nicht aus Wind- oder Sonnenenergie gewonnen werden. Lassen Sie uns etwas tiefer einsteigen.

1. Herstellung von Silizium in metallurgischer Qualität und hochreinem Quarz (HPQ)

Elementares Silizium (Si) ist kein natürlich vorkommendes Element. **Silizium (Si) wird seit über 100 Jahren weitgehend unverändert durch chemische Reduktion von abgebautem hochreinem Quarz (SiO₂) unter Verwendung von Kohlenstoff (C) in Hochöfen hergestellt.** Die Hochöfen werden jeweils mit bis zu 45 Megawatt Strom betrieben, auch um die für die Prozesse erforderliche Wärme zu erzeugen. Wenn das Gemisch aus Quarzgestein und Kohlenstoff erhitzt wird – **was als Siliziumschmelze oder -verhüttung bezeichnet wird**, reagiert der Kohlenstoff mit dem Sauerstoff im Quarz und bildet CO-Gas. **Erinnern Sie sich, dass auch Eisenerz (Fe₂O₃) mit Koks aus Kokskohle (C) reduziert wird, um Eisen (Fe) herzustellen.**

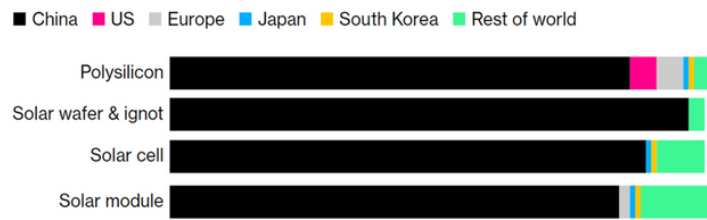
Alles vereinfacht:

- Herstellung von Eisen: $F_2O_3 + 3 C + \text{Wärme} \Rightarrow 2 Fe + 3 CO$
- Herstellung von Silikon (Verhüttung): $SiO_2 + 2 C + \text{Wärme} \Rightarrow Si + 2 CO$

Das bedeutet, dass jede Tonne Silizium allein in diesem Silizium-Schmelzprozess etwa 5-6 Tonnen CO₂ freisetzt.

Hochreiner Quarzsand (HPQ) ist das Ausgangsmaterial für Silizium in metallurgischer Qualität. Es wird allgemein davon ausgegangen, dass die Qualität des Ausgangsmaterials für Solarzellen und Halbleiter 99,95 % Siliziumoxid (SiO₂) mit nur <500 ppm Gesamtverunreinigungen beträgt. Solches HPQ ist knapp und muss abgebaut, verarbeitet, aufbereitet und natürlich transportiert werden, bevor es für die Verhüttung verwendet werden kann (Chemical Research 2023 und Troszak).

Abbildung 1: Chinas Anteil an der weltweiten Herstellung von Solarmodulen und seine Prozessschritte.



Quelle: BloombergNEF, April 2024

Die typische Verarbeitungssequenz für hochreinen Quarz umfasst folgende Schritte:

- (a) Vorbehandlung, die Zerkleinern/Brechen, Waschen, Entkalken, Sieben und Mahlen umfasst;
- b) physikalische Trennverfahren, einschließlich radiometrischer Sortierung, Separation durch dichte Medien, Schwerkraftabscheidung, magnetisch-elektrische Trennung und Flotation;
- (c) chemische Behandlungen, wie Kalzinierung-Wasserabschreckung und Auslaugung; und
- (d) fortgeschrittene Behandlungen wie Chlorierung, Rösten und Vakuumraffination (Zhang et al. 2023).

Die Schätzungen des Energie- und damit auch des CO₂-Fußabdrucks der Siliziumherstellung gehen in der Literatur und in der „wissenschaftlichen Gemeinschaft“ weit auseinander. Wir wissen aber bereits, dass die globale Siliziumreinigung und die Herstellung von Solarzellen von China dominiert wird (Abbildung 1).

2. Kohlenstoffquellen für die Siliziumherstellung: Kohle, Petrolkoks, Hartholz

Interessant ist, dass bei der Siliziumschmelze verschiedene Kohlenstoffquellen verwendet werden. Diese Kohlenstoffquellen stammen größtenteils aus Kohle, Petrolkoks (ein Nebenprodukt der Öltraffination) und Hartholz. Kohle zur Herstellung von Koks ist die wichtigste, aber **diese Kohle muss von besonderer Qualität sein, einen sehr geringen Aschegehalt, einen hohen Anteil an gebundenem Kohlenstoff, eine bestimmte Reaktivität** (geprüft mit SINTEF-Tests) und eine bestimmte Korngröße aufweisen. Diese Kohle ist weltweit eher knapp, wobei Kolumbien eine wichtige Rolle spielt. Weitere Einzelheiten zur Siliziumschmelze finden Sie auch in Troszak 2019, [Burning coal and trees to make solar panels](#).

Der Abbau dieser Kohle ist nicht nur teuer, weil sie knapp ist und viel Abraum erfordert, sondern auch die Aufbereitung der Kohle (Waschen) erfordert Energie und „verschwendet“ Ressourcen. Nach dem Waschen und der Aufbereitung kann nur ein Bruchteil der Kohle mit einer bestimmten Körnung, in der Regel 3-12 mm, in den Öfen für die Siliziumverhüttung verwendet werden. Das feinere Material muss zu niedrigeren Preisen verkauft werden. Um die Körnung zu erhalten, muss die Kohle außerdem in Schüttgutbeuteln oder Seecontainern transportiert werden, damit die Körnung bei der Handhabung erhalten bleibt.

Sie sehen also, warum für solche Spezialkohle eine hohe Prämie und eine beträchtliche Menge an Energie für den Abbau, die Verarbeitung / Aufbereitung / Sortierung und natürlich den Transport zu den Schmelzhütten erforderlich sind (Dank auch an Rob Boyd aus Neuseeland für seinen wertvollen Beitrag).

Hartholz ist ein bemerkenswertes Material. Geschreddertes Hartholz (Holzschnitzel) muss in den „Topf“ der Siliziumschmelze gemischt werden, damit die reaktiven Gase zirkulieren können, damit sich das bildende flüssige Silizium zum Abzapfen auf dem Boden absetzen und damit das entstehende CO (und andere Gase) sicher aus der „Ladung“ der Schmelze entweichen kann (Troszak 2019). Holzschnitzel bieten eine große Oberfläche, auf der die chemische Reaktion vollständiger und schneller ablaufen kann.

Hartholz trägt zur Aufrechterhaltung einer porösen Masse bei und begünstigt dadurch eine sanfte und gleichmäßige – statt heftige – Entgasung. Holzschnitzel tragen zur Regulierung der Schmelztemperaturen bei, damit der Ofen oben gleichmäßig brennt, die Leitfähigkeit verringert wird, die Elektroden tief eindringen, Staub reduziert wird und Brückenbildung, Verkrustung und Verklumpung der Mischung verhindert werden (Wartluft 1971).

Für die Herstellung von Holzschnitzeln müssen natürlich alte Bäume gerdodet und verbrannt oder besser „geschmort“ werden. Hartholz ist Biomasse, die der Natur entnommen wird, aber diese Bäume, z. B. im brasilianischen Amazonasgebiet, brauchen, wenn sie wuchern, mehr als ein paar Jahre zum Wachsen.

3. Herstellung von Solarsilizium (SoG-Si) und Wafering

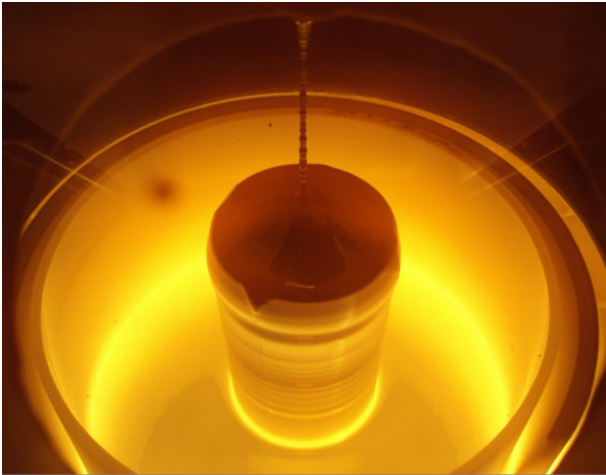
Damit die Herstellung von Solarzellenpaneelen möglich ist, sind weitere Schritte erforderlich. Metallurgisches Silizium (MG-Si) aus der Schmelze, das in der Regel einen Reinheitsgrad von 98 % aufweist, entspricht nicht den Reinheitsanforderungen der Photovoltaikindustrie, so dass es zwei weitere energieintensive Prozesse durchlaufen muss, bevor der Grundstoff (Silicon) zu Solarzellen und dann zu Paneelen verarbeitet werden kann. Erstens wandelt das Siemens-Verfahren metallurgisches Silizium (MG-Si) aus der Schmelze in polykristallines Silizium (Polysilizium oder polysilicon genannt) um, indem es einen extrem energieintensiven Prozess verwendet, ein Hochtemperatur-Aufdampfverfahren, (Troszak 2019). Die Reinheitsanforderungen für Solarsilizium (SoG-Si) liegen derzeit bei 9-11N (99,999999999%), das ist ein Faktor von 10.000 bis 100.000 reiner als die 5-6N-Reinheit, die für die Photovoltaik vor ein oder zwei Jahrzehnten erforderlich war, und wahrscheinlich die Grundlage für die Solarzellen auf Ihrem Dach (falls Sie welche haben).

Abbildung 2: „Bienenstock“-Holzkohleöfen in Brasilien.



Source: Alamy, from Troszak 2019

Abbildung 3: Czochralski-Siliziumbarren werden aus geschmolzenem Polysilizium gezogen



Quelle: Siltronic, aus [Troszak 2019](#)

Beim Siemens-Verfahren wird Silizium zerkleinert und mit Salzsäure (HCl) gemischt, um Trichlorsilangas (SiHCl_3) zu erzeugen. Dieses Gas wird erhitzt und auf sehr heiße Stäbe aus Polysilizium (1150°C) abgeschieden, während die Wände der Reaktionskammern gekühlt werden.

Jede Charge von Polysilizium-„Stäben“ braucht mehrere Tage, um zu wachsen, und eine kontinuierliche, rund um die Uhr verfügbare Stromversorgung jedes Reaktors ist unerlässlich, um einen kostspieligen „Betriebsabbruch“ zu verhindern.

Polysiliziumraffinerien sind auf äußerst zuverlässige konventionelle Stromnetze angewiesen und verfügen in der Regel über zwei eingehende Hochspannungs-Einspeisungen. (Quelle: Mariutti und Schernikau 2024, unveröffentlichte wissenschaftliche Studie, [Troszak 2019](#)). Es ist mein Verständnis, dass praktische jede Siliziumfabrik in China ein „eigenes Kohlekraftwerk erhält“.

In einem zweiten Schritt wird im Czochralski-Verfahren das flüssige Siliziummetall aus der Schmelze und den Dotierstoffen (Gallium oder Phosphor) zu einem großen Einkristall mit einem Durchmesser von 20-30 cm und einer Länge von 1-2 m (dem Silizium-Ingots) verarbeitet. Anschließend wird der Ingots in rechteckige Bricks gesägt, die mit Hilfe eines Diamantdraht-Sägeverfahrens in Wafer zerlegt werden (Abbildungen 3 und 4).

Dieser Prozess dauert mehrere Tage und erfordert eine ununterbrochene 24/7-Stromversorgung. Eine Ingots-/Wafer-/Zellen-Anlage kann mehr als 100 MWh zusätzliche Energie pro Tonne eingehenden Polysiliziums verbrauchen, was etwa sechsmal so viel ist wie die ursprüngliche Verhüttung des Siliziums aus Erz.

Auch die Schätzungen des Energie- und damit CO_2 -Fußabdrucks der Siliziumreinigung und des Waferings gehen in der Literatur weit auseinander, was hauptsächlich auf zwei Gründe zurückzuführen ist. Zum einen besteht keine Einigkeit über den geschätzten Energiebedarf für diese Kernprozesse. So ist beispielsweise Solarsilizium (SoG-Si) der energieintensivste Schritt im Siliziumreinigungsprozess und sollte am besten verstanden werden. In den SoG-Si-Beständen wird jedoch ein Strombedarf zwischen 50 kWh/kg und 110 kWh/kg angegeben, was recht niedrig erscheint.

Andererseits werden Sekundär- und Vorschmelzprozesse bei der Definition eines Energie-Fußabdrucks, der für die durchschnittliche chinesische Siliziumindustrie gilt, nur selten berücksichtigt. Gegenwärtig basieren die von den Regierungen für die Entscheidungsfindung herangezogenen Berichte in der Regel auf Best-in-Class-Anlagen, wie in Europa oder Nordamerika, was auf Grund der dominierenden Stellung von China weit von der Realität entfernt ist.

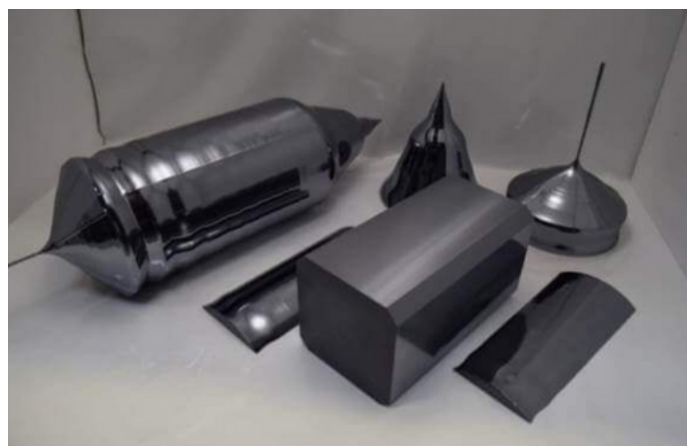
4. Abschluss der Herstellung von Solarmodulen

Nach der Herstellung der Wafer sind noch einige weitere Schritte erforderlich, bis wir ein fertiges Paneel haben. All diese Schritte erfordern eine beträchtliche Menge an Energie, zusätzlich zu den Rohstoffen, die für den Bau der Fabriken und Maschinen benötigt werden, für die Durchführung von Prozessen und Abläufen sowie für die Versorgung mit Strom und Wärme, die für die Durchführung dieser Prozesse erforderlich sind.

- **Sägen von Wafers:** Silizium-„Blöcke“ werden in dünne Wafer für die spätere Herstellung von Solarzellen zerschnitten
- **Solarzellen- und Modulproduktion:** Aluminium, Glas, Kupfer, Kunststoff, seltene Erden, Säuren und über 400 Chemikalien werden benötigt
- **Lieferung von Montagestrukturen:** Aluminiumrahmen, Zementfundamente usw. werden benötigt
- **Transport:** alles muss zum Einsatzort transportiert werden, z. B. in die USA oder nach Deutschland

Ich werde hier nicht auf die Demontage und Entsorgung von Paneelen eingehen. Es genügt jedoch zu erwähnen, dass die durchschnittliche Lebensdauer der neuesten Paneele für großflächige „utility scale“ Solarprojekte nur einen Bruchteil der in den Medien angepriesenen 20-25 Jahre beträgt und eher bei weniger als 15 Jahren liegt. Während ältere Solarpaneele länger „leben“, sind die neueren auf einen möglichst geringen Rohstoff- und Energieverbrauch optimiert, was sich negativ auf die Lebensdauer auswirkt. In [Libra et al. 2023](#) wird beschrieben, dass nach etwa 10 Jahren immer häufiger schwerwiegende Ausfälle von (bankfähigen) PV-Paneelen der ersten Kategorie auftreten. Es liegt auf der Hand, dass die Demontage und Entsorgung und natürlich auch das Recycling erneuter Energie, Ausrüstungen und Rohstoffe erfordern.

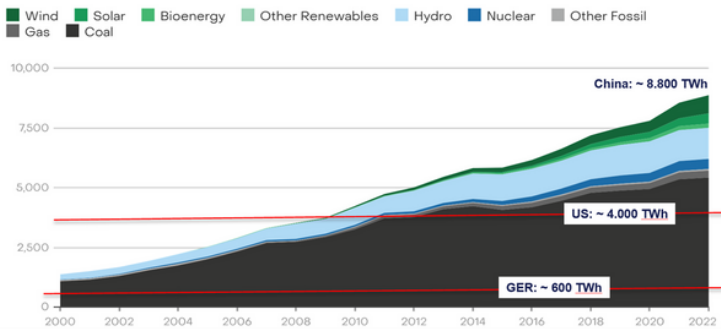
Abbildung 4: Czochralski-Verfahren, ganzer Block (links), Ziegel und Sehnen nach dem Sägen (rechts), Krone und Schwanz (oben rechts)



Source: SVM from [Troszak 2019](#)

5. Kohle und China

Abbildung 5: Chinesische Stromerzeugung nach Quellen im Vergleich zu den USA und Deutschland.



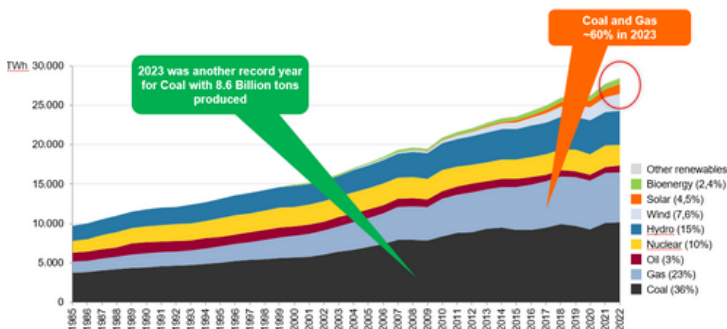
Quelle: Schernikau basierend auf Ember, Details [hier](#)

Aus diesem Blog können Sie nun besser erkennen, wie wichtig eine unterbrechungsfreie Stromversorgung insbesondere für industrielle Prozesse wie die Siliziumschmelze ist. Natürlich kommt dieser Strom in China aus Kohle und kann nicht aus Wind- oder Sonnenenergie gewonnen werden. Abbildung 5 zeigt, wie China seinen Stromverbrauch in 20 Jahren mehr als verfünffacht hat und wie die Kohleverstromung mit der Wirtschaft weiter wächst. **Die großen Wind- und Solaranlagen können eher als Ergänzung denn als Übergang gesehen werden.** Zum Vergleich habe ich Linien eingefügt, die den ungefähren Stromverbrauch der USA bzw. Deutschlands veranschaulichen:

Die weltweite Stromerzeugung wird von der thermischen Energie dominiert. Allein auf Kohle und Gas entfallen 60 % (Abbildung 6). Wir wissen, dass die Welt und insbesondere China (Abbildung 7) weiterhin große Kohlekraftwerke bauen, um eine zuverlässige, bezahlbare, und unterbrechungsfreie Stromversorgung zu gewährleisten. **Wind- und Solar-Enthusiasten unterschätzen oft die Bedeutung der Trägheit der rotierenden Masse von Kraftwerksturbinen für die Stabilität unserer Stromnetze.**

Der Kohleverbrauch erreichte 2023 einen neuen Rekord, weltweit (8,6 Mrd. Tonnen) und in China (über 4 Mrd. Tonnen). Gleichzeitig ist China weltweit führend bei der Installation neuer Solaranlagen im eigenen Land und verkauft seine Solarpaneele weltweit. In den Jahren 2023 und 2024 ist ein weiterer Aufschwung bei den Neuinstallationen von Kohlekraftwerken zu verzeichnen, deren Zahlen das Niveau von 2018 übertreffen (Abbildung 7).

Abbildung 6: Weltweite Stromerzeugung nach Quellen.



Quelle: Schernikau basierend auf [Our World in Data](#) und [Global Electricity Review](#)

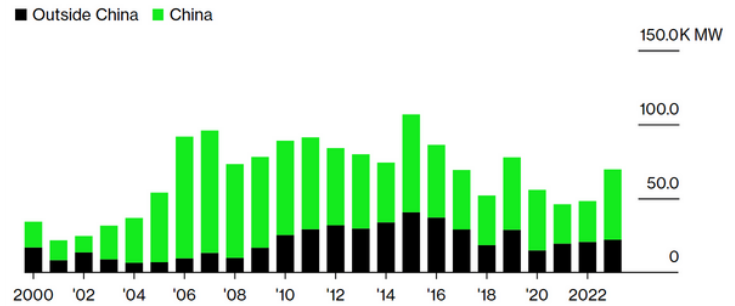
Die gesamte weltweit installierte Kapazität für die Stromerzeugung liegt wahrscheinlich bei 8,6 TW (einschließlich Kohle, Gas, Kernkraft, Wasserkraft, Windkraft, Solarenergie usw.), wovon etwa 2,1 TW auf Kohle entfallen.

Somit stehen 25 % der installierten Kapazität für 36 % der tatsächlichen Stromerzeugung. Die Auslastung der Kohlekraftwerke wird weiter abnehmen, wenn mehr Wind- und Solarenergie in die Netze eingespeist wird, aber die installierte Kohlekapazität wird weiterhin benötigt und muss mit dem Spitzenlast (peak power demand) wachsen.

Abbildung 7: Ausbau der Kohlekraftwerkskapazität in China.

China Leads a Resurgence in New Coal Power

China accounted for about two thirds of new coal capacity last year



Quelle: BNEF, Einzelheiten [hier](#)

6. Zusammenfassung

Solarenergie und Kohle sind eng miteinander verknüpft. Heute gibt es kein einziges Paneel, das ohne Kohle (oder auch Öl und Gas) hergestellt werden kann. Die Kohle wird als Reduktionsmittel für die Siliziumherstellung und als Wärme- und Stromquelle für die industriellen Prozesse benötigt, die zur Herstellung von Solarmodulen erforderlich sind, und das nicht nur in China. So unpopulär es auch sein mag, die Welt braucht Kohle, auch für die so genannte „Energiewende“.

Deshalb unterstütze ich Investitionen in Kohletechnologien und nicht deren Ausstieg, um die Produktion und Nutzung von Kohle so effizient wie möglich zu gestalten, nicht nur um die Umweltauswirkungen zu minimieren, sondern auch, um die Kosten niedrig zu halten, was die wirtschaftliche Entwicklung fördert und insbesondere den weniger Begünstigten zugute kommt.

Ich hoffe, dieser Beitrag hilft Ihnen, meine Leidenschaft für Kohle zu verstehen und gibt Ihnen einen neuen Einblick in die „saubere“ Welt der Solarenergie.

Wenn Sie mehr darüber erfahren möchten, wie Wind- und Solarenergie in unserem modernen Energiesystem funktionieren, lesen Sie bitte unser neues Buch **Unbequeme Wahrheiten: über Strom und die Energie der Zukunft**, das im [Buchhandel](#) erhältlich ist.

Dr. Lars Schernikau - ist Energieökonom, Rohstoffhändler, Entrepreneur und Autor. Mit mehr als zwei Jahrzehnten Erfahrung begann Lars seine Karriere bei The Boston Consulting Group, wo er seine umfassenden Kenntnisse der globalen Märkte entwickelte.

Von 2003 bis 2006 leitete Lars auch einen Windpark in Deutschland. Er hat Unternehmen im globalen Rohstoffsektor gegründet, geleitet und beraten und dabei einen bleibenden Eindruck hinterlassen. Über das Rohstoffgeschäft hinaus ist Dr. Schernikau ein renommierter Energiewirtschaftsexperte und Hauptredner auf globalen Energie- und Rohstoff-Foren in der ganzen Welt.

Sein neuestes Buch, **„Unbequeme Wahrheiten: über Strom und die Energie der Zukunft“**, thematisiert die Energiewende und die Frage, wie der weltweit wachsende Energiebedarf aus energiewirtschaftlicher Sicht gedeckt werden kann.