



### Sand and Silicon

Es ist schon erstaunlich, wie Sand die Welt und unser Leben verändert hat. Denis McWhan beschreibt sehr spannend und informativ alle technischen Entwicklungen, die auf dem einfachen Stoff Sand basieren. Während des 20. Jahrhunderts brachten thermodynamische Studien, physikalische Untersuchungen des festen Zustands und der Oberflächen sowie quantenmechanische Berechnungen die Forschungen über Sand weit voran und bereiteten den Weg für Dinge wie Feuerzeuge, Uhren, Unterwasserdetektoren, Sensoren, Solarzellen, Mikrochips, Laptops, Smartphones, Satelliten, Navigationssysteme, Geräte für die Raumfahrt usw., die aus unserem modernen Leben nicht mehr wegzudenken sind.

Schlüsselprozesse in dieser Entwicklung waren die Aufklärung der Struktur von Sand und Siliciumdioxid, die kontrollierte Reinigung von Siliciumdioxid und die Herstellung von hochreinem Polysilicium (polykristallinem Silicium) durch fraktionierte Destillation von Trichlorsilan. Heutzutage kann Silicium bis zu einer Reinheit von 99.999999% erhalten werden. Polysilicium ist der reinste Stoff, den der Mensch auf der Erde herstellt. Der Autor schildert eindrucksvoll, wie die Gesetze der Thermodynamik und ihr Verständnis treibende Kräfte dieser enormen Leistung wurden.

Das gereinigte Polysilicium diente im nächsten wichtigen Schritt der Entwicklung, der Züchtung von Siliciumeinkristallen und -polykristallen, als Ausgangsmaterial. Zwei Prozesse wurden entwickelt: Die Czochralski-Methode und das Zonenschmelzen. In beiden Verfahren werden Siliciumkristalle, die Basis der modernen Elektronikindustrie, erhalten. Halbleiter, insbesondere dotiertes Silicium haben die Wissenschaft im letzten Jahrhundert im hohen Maße beeinflusst, was sich in unzähligen Erfindungen und Entwicklungen widerspiegelt. Einige wenige davon wurden oben erwähnt.

Der Autor liefert eine interessante Zusammenfassung dieser Entwicklungen. Sein Buch richtet sich vor allem an Leser, die allgemein an Wissenschaften interessiert sind. Es kann auch als Einstieg für tiefergehende Studien auf einem bestimmten Gebiet dienen, denn es enthält eine umfassende Sammlung von Literaturhinweisen.

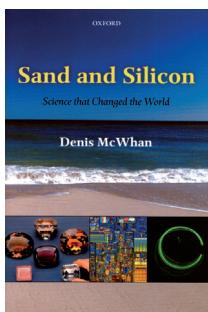
In den ersten beiden Kapiteln wird auf die Strukturen von Sand, Siliciumdioxid und Quarzkristallen eingegangen; auch Keramiken werden beschrieben. Der Leser erfährt, dass Siliciumdioxid, das heute unter anderem für die Herstellung modernster optischer Lichtleitfasern für die Signalübertragung verwendet wird, schon in der

Steinzeit als Feuerstein für die Herstellung der ersten von Menschen gefertigten Werkzeuge, z.B. Pfeilspitzen, gedient hat.

In Kapitel 3 wird beschrieben, wie auf der Basis der modernen Thermodynamik hochreines Polysilicium produziert werden kann. Im Siemens-Prozess wird aus Trichlorsilan reinstes Polysilicium hergestellt. Im folgenden Schritt werden entweder nach dem von dem polnischen Chemiker Jan Czochralski 1916 in den AEG-Laboratorien in Berlin erfundenen Verfahren oder dem von Bill Pfann 1951 in den Bell Laboratorien entwickelten Zonenschmelzverfahren Siliciumeinkristalle gezüchtet. Das Czochralski-Ziehverfahren von 1916 war eine derart bahnbrechende Erfindung in der Kristallforschung, dass man Jan Czochralski hätte erwähnen sollen. Diese beiden Prozesse sind im Wesentlichen die Ausgangspunkte des Kommunikationszeitalters. Der weitaus größte Teil der Siliciumchips für Mikroprozessoren, DRAMs („dynamic random access memory“), Flash-Speicher usw. wird nach dem Czochralski-Verfahren hergestellt. Ein unbearbeiteter Einkristall ist auf Seite 54 abgebildet. Ein 60-kg-Kristall ist schon sehr eindrucksvoll, aber heutzutage können Einkristalle mit einem Durchmesser von 30 cm und 400–500 kg Gewicht gezüchtet werden. Es wird erwartet, dass am Ende dieses Jahrzehnts Kristalle mit einem Durchmesser von 45 cm produziert werden können.

In Kapitel 4 wird der Einfluss kleiner Mengen von Verunreinigungen diskutiert. Die faszinierenden Farben von Edelsteinen beruhen beispielsweise auf geringen *natürlichen* Spuren verschiedener Metallionen. Absichtliche Verunreinigungen, d.h. Dotierungen, werden bei der Herstellung von (Silicium)Halbleitern erzeugt und sind entscheidend z.B. für deren elektrische Eigenschaften. Der Autor schildert, wie Experimente mit p- und n-Halbleitern, die darauf abzielen, die Elektronenröhren durch Feststoffverstärker zu ersetzen, 1947 zu der Erfindung von Transistoren durch W. Shockley, J. Bardeen und W. Brattain in den Bell-Laboratorien geführt haben. Auf modernen Mikroprozessorchips sind Milliarden von Transistoren angeordnet. In diesem Kapitel werden Forschungserfolge, z.B. auf den Gebieten Ionenimplantation, Photolithographie usw., und ihre Folgen für die Halbleitertechnologie detailliert beschrieben.

In Kapitel 5 stellt der Autor die Bedeutung von Sand auf dem Gebiet der erneuerbaren Energiequellen heraus. 1921 erhielt Albert Einstein den Nobel-Preis in Physik für die Erklärung des photoelektrischen Effekts. Dank der Sonne gelangen gewaltige Energiemengen zur Erdoberfläche. McWhan erklärt, dass die in einer Stunde auf der Erde freigesetzte Sonnenenergiemenge ungefähr dem Jahresverbrauch der gesamten Weltbevölke-



**Sand and Silicon**  
Science that Changed the World. Von Denis McWhan.  
Oxford University Press, Oxford, 2012. 160 S., geb.,  
29,95 £.—ISBN 978-0199640270

rung entspricht. In eineinhalb Tagen liefert die Sonne so viel Energie wie in den derzeit bekannten Erdölvorkommen steckt. Das Ziel der modernen Photovoltaikindustrie ist die intensivere Nutzung der Sonnenenergie als nachhaltige Energiequelle. Die Entwicklung von Solarzellen wurde ursprünglich durch die Raumfahrt vorangetrieben. In den 1960er Jahren stellten die Sputnik-Satelliten ihre Signalübertragung ein, nachdem ihre Batterien leer waren. Heute werden immer effizientere Solarzellen entwickelt. Einen umfassenden Überblick über diese Entwicklungen bietet dieses Kapitel.

Kapitel 6 ist der Oberflächenphysik gewidmet. Die Strukturen von Kristallen wurden durch Röntgenbeugung analysiert. Moderne Verfahren wie die Elektronenbeugung („low-energy electron diffraction“, LEED) und viele andere Methoden der Oberflächencharakterisierung wurden entwickelt und angewendet. In diesem Zusammenhang sollte auch die Rasterkraftmikroskopie genannt werden. Aufgrund der detaillierten Erforschung der Oberflächeneigenschaften und des Einsatzes moderner Techniken zur schichtweisen Abscheidung atomarer Schichten von Silicium und andrem Halbleitermaterial konnten spezielle elektronische Bauteile wie Feldeffekttransistoren (FETs) produziert werden. Außerdem wurde erkannt, dass die Beweglichkeit der Elektronen durch die Verwendung von gestrecktem Silicium („strained silicon“) gesteigert werden kann. Gezielte Manipula-

tionen der Bandlücke eröffneten ein weites Feld für besondere Anwendungen elektronischer Bauteile.

In Kapitel 7 beschäftigt sich McWhan mit der Datenübertragung. Im Internet werden täglich riesige Datenmengen versendet. Dies wird nur durch die Verwendung von Glasfaserkabeln (Quarzglas) als Übertragungsmedium ermöglicht. Die Geschwindigkeit der Signalübertragung wurde dadurch enorm gesteigert.

Unser Informationszeitalter ist quasi „auf Sand gebaut“. Nur ein kleiner Teil dieser unermesslichen Rohstoffquelle wird zurzeit genutzt. Das Buch ist eine interessante Zusammenfassung der Entwicklungen, die Wissenschaftler und Ingenieure bisher auf diesem Gebiet geleistet haben. Aus historischer Sicht werden vor allem die Forschungen der Bell Laboratories, des Brookhaven National Laboratory und der IBM Laboratories gewürdigt. Denis McWhan schildert, wie diese Leistungen zum Fortschritt der Wissenschaft beigetragen haben, und hebt die Interdependenz der wissenschaftlichen Erfolge und der entsprechenden Anwendungen in der Halbleitertechnologie und in den technischen Bereichen, die unsere moderne globale Kommunikation ermöglichen, hervor.

*Peter O. Hahn*  
Siltronic AG, Freiberg

DOI: [10.1002/ange.201207329](https://doi.org/10.1002/ange.201207329)