

KRISTALLE! – Schlüsselmaterialien für das 21. Jahrhundert

Was sind Kristalle?

Fast jede Substanz kommt in kristalliner Form vor. Beispiele sind Salz, Zucker, Arzneimittel, Metalle – aber auch Nierensteine. So sind über 98% der festen Erde kristallin. Natürliche Kristalle kennen wir als Mineralien. Sie faszinieren die Menschen durch ihre Größe, Farben und äußere Form seit Jahrtausenden, Diamanten und andere Edelsteine vor allen durch ihren Wert. Da die alten Griechen dachten, Bergkristalle bestünden aus gefrorenem Wasser, bedeutete das Wort κρυσταλλος („Kristallos“) ursprünglich Eis. Erst sehr viel später hat sich die heutige Bedeutung des Wortes etabliert.

Natürliche Kristalle wurden auch früher schon für technische Anwendungen genutzt. Jedoch bekamen Kristalle mit dem technischen Wandel im 20. Jahrhundert dann eine vollkommen neue Bedeutung. Ihre besonderen physikalischen Eigenschaften ermöglichten erst Innovationen wie die moderne Kommunikations- und Medientechnik, die heute in unserem Alltag unverzichtbar sind. Dafür werden „maßgeschneiderte“ Kristalle im industriellen Maßstab hergestellt, die es in der Natur überhaupt nicht oder nicht in der geforderten Größe, Reinheit und Perfektion gibt.

Das wissenschaftliche Merkmal von Kristallen ist die dreidimensionale Symmetrie, d.h. die regelmäßige Anordnung der Kristallbausteine, der Atome oder Atomgruppen, über makroskopische Dimensionen hinweg. Damit zeichnen sich Kristalle gegenüber anderen Materialien durch eine hohe Perfektion im Aufbau aus, die sich in den besonderen physikalischen Eigenschaften der Kristalle niederschlägt. Besonders interessant ist hierbei die störungsfreie Ausbreitung von elektrischen Strömen bzw. Signalen (Elektronen), Licht (Photonen) und Schall (Phononen), welche Kristalle für technische Anwendungen im Bereich der Elektronik, Optik und Akustik prädestinieren. Darüber hinaus weisen manche Kristalle aufgrund ihrer Struktur die Fähigkeit auf, unterschiedliche Energieformen ineinander umzuwandeln, z.B. Licht in Elektrizität (Photoeffekt, Solarzellen) und umgekehrt (Elektrolumineszenz, Leuchtdioden) oder mechanische Bewegung bzw. Schall in Elektrizität (Piezoeffekt) und umgekehrt.

Wozu braucht man Kristalle?

Die Ausnutzung der Eigenschaften von Kristallen in technischen Geräten und Systemen hat weltweit das Leben der Menschen vollständig durchdrungen und in vielen Bereichen geprägt. Ja, man kann sogar in Abwandlung eines Spruches sagen: „In jedem modernen Gerät steckt ein guter Kern – nämlich ein Kristall.“ Denken wir nur zum Beispiel an die integrierten elektronischen Schaltkreise (Mikroelektronik, ICs), die sogenannten „Chips“, die das Herzstück von Computern, Fernsehgeräten, DVD-Spielern und vielen anderen elektronischen Geräten darstellen. Ausgangspunkt für diese „Chips“ sind hochreine und sehr perfekte Silizium-Kristalle, die durch Schmelzen und Erstarren hergestellt werden. Aus diesen Silizium-Kristallen werden dann Scheiben (Wafer) geschnitten, auf denen die elektronischen Strukturen aufgebracht werden. Mit solchen „Chips“ lassen sich heute elektrische Signale verstärken, schalten oder speichern. Auf den grünen Platinen der ganzen elektronischen Geräte sieht man meist nur noch die schwarzen Kunststoffgehäuse, in denen diese „Silizium-Chips“ verborgen sind.

Ohne Silizium-Kristalle gäbe es also kein Internet. Ohne Silizium-Kristalle würde auch die Photovoltaik nicht in der heutigen Form existieren. Über 90% der Solarzellen bestehen aus

Silizium-Kristallen, die Sonnenlicht in elektrischen Strom umwandeln. Für diese Anwendung wird das Silizium in Form großer Flächen benötigt – deshalb muss es preiswert sein. Als bester Kompromiss zwischen dem von der Kristallqualität abhängigen Stromertrag und den Herstellungskosten haben sich deshalb Solarzellen aus grobkristallinem Silizium erwiesen. Ausgangsmaterial dafür sind wiederum Silizium-Kristalle, die nach speziellen Verfahren hergestellt werden.

Kristalle aus so genannten Verbindungshalbleitern besitzen spezielle Materialeigenschaften, die denen des Siliziums noch einmal weit überlegen sind. Sie kommen für die schnelle Datenübertragung, für energiesparende LED-Lampen im Haushalt oder für das effiziente Einspeisen regenerativ erzeugter Energie in das Stromnetz zum Einsatz. Verbindungshalbleiter sind chemische Verbindungen aus mehreren Elementen. Zum Beispiel setzt sich Galliumarsenid (GaAs) aus Gallium (Ga) und Arsen (As) zusammen. Derartige GaAs-Kristalle werden wiederum nach sehr speziellen, anspruchsvollen Verfahren hergestellt und dann beispielsweise zu roten LEDs weiterverarbeitet.

Auch in der Medizin spielen Kristalle eine Schlüsselrolle, wie etwa in der Computertomographie, bei der Entwicklung neuer Medikamente, deren Wirkstruktur anhand organischer Kristalle bestimmt wird, als Laserkristalle bei der Entwicklung minimalinvasiver Operationsmethoden oder in der Ultraschalldiagnostik. In der Verkehrstechnik finden Kristalle sowohl in Automobilen, Zügen und Flugzeugen für Steuerung, Sicherheit, Navigation oder Energieübertragung Anwendung. Stichwort Energie: Kristalle werden künftig eine Schlüsselrolle für die ressourcenschonende Gewinnung und Verteilung elektrischer Energie spielen, sei es in Form der schon erwähnten Solarzellen, als Kernstück im Generator von Windrädern oder als leistungselektronische Schaltelemente in Umrichtern und Netzverteilern.

Die große wissenschaftliche und technische Bedeutung von Kristallen ist auch dadurch dokumentiert, dass bis heute 31 Nobelpreise vergeben wurden, die fachlich in Verbindung mit Kristallen stehen.

Wie züchtet man Kristalle?

Die Vielfalt der zu züchtenden Materialien sowie deren individuelle Materialeigenschaften erfordern eine ganze Reihe von unterschiedlichen Kristallzüchtungsprozessen. Sie basieren üblicherweise auf dem Phasenübergang vom flüssigen in den festen Zustand (Schmelzüchtung). So werden Silizium-Kristalle aus einer 1400°C heißen Silizium-Schmelze hergestellt. Eines der wichtigsten Verfahren ist dabei das Czochralski-Verfahren, benannt nach einem polnischen Wissenschaftler, der es Anfang des 20. Jahrhunderts erfunden hat. Beim Czochralski-Verfahren wird der Kristall von oben langsam aus der Schmelze herausgezogen. Damit werden beispielsweise die Silizium-Kristalle hergestellt, die zu Computer-„Chips“ weiterverarbeitet werden.

Eine zweite wichtige Methode ist die so genannte gerichtete Erstarrung. Hier wird das Rohmaterial in einem Tiegel geschmolzen und anschließend vom Boden des Tiegels aus von unten nach oben gerichtet auskristallisiert. Dabei entstehen beispielsweise die grobkörnigen Silizium-Kristalle für Solarzellen.

Nur einige wenige Materialien von industrieller Bedeutung können nicht aus der Schmelze hergestellt werden. Dazu zählt beispielsweise der Halbleiter-Kristall Siliziumkarbid, der aus der Gasphase gezüchtet werden muss. Hierzu wird pulverförmiges Material bei über 2000°C verdampft und an einer kälteren Stelle kontrolliert als Kristall abgeschieden.

Warum Kristalle im Weltraum züchten?

Die Schwerkraft spielt bei der Kristallherstellung eine große Rolle. So beeinflusst sie die Strömungsvorgänge in der Schmelze, ganz wie in einem Kochtopf. Dies wiederum wirkt sich auf die Temperaturverteilung und auf den Massentransport aus und damit direkt auf die Bedingungen, unter denen der Kristall wächst. Auch können Partikel im Schwerfeld der

Erde absinken oder aufschwimmen, je nachdem ob sie schwerer oder leichter sind als die sie umgebende Schmelze. Im Weltall unter Schwerelosigkeit entfallen all diese schwerkraftgetriebenen Effekte. Dadurch finden die Erstarrungsprozesse unter besser kontrollierbaren Bedingungen statt und die ablaufenden Phänomene lassen sich besser verstehen. Mit diesem Wissen kann dann wiederum die Kristallherstellung auf der Erde optimiert werden. Für solche Kristallzüchtungsexperimente werden Minuten bis Stunden an Schwerelosigkeit benötigt. Deshalb befinden sich seit den frühen 1970iger Jahren immer wieder spezielle Kristallzüchtungsanlagen, die von Astronauten oder von der Erde aus bedient werden, auf Raketen, auf dem Space Shuttle, auf Satelliten oder auf der internationalen Raumstation.

Wo begann in Deutschland die Kristallzüchtung?

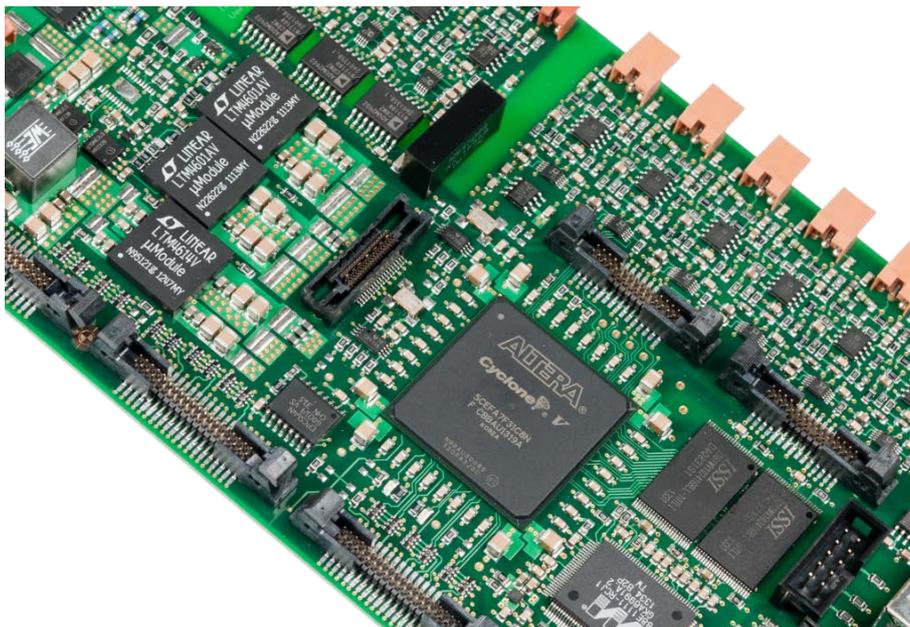
In der zweiten Hälfte der 1940er Jahre begann die Firma Siemens unter Leitung von Prof. Walter Schottky und Dr. Eberhard Spenke in Pretzfeld in der Fränkischen Schweiz, und dann später in Erlangen, die theoretischen Grundlagen und die fundamentalen Herstellungsprozesse von Halbleitern und deren Kristallen zu entwickeln. Zu den bedeutendsten Erfindungen dieser Pioniere der Mikroelektronik zählen der „Siemens-Prozess“ zur Aufreinigung von Silizium – womit heute 300.000 Tonnen Silizium jährlich hergestellt werden – oder das so genannten „Zonenziehen“ von Silizium, ein spezielles Kristallzüchtungsverfahren, welches immer noch eingesetzt wird, um Silizium-Kristalle mit einem sehr hohen elektrischen Widerstand zu produzieren. Dr. Heinrich Welker, ein weiterer Pionier, der ab den 1950er Jahren in Erlangen arbeitete, entdeckte die Verbindungshalbleiter, wie z.B. Galliumarsenid, Galliumnitrid oder Siliziumkarbid.

Die bahnbrechenden Arbeiten in den Siemens-Labors waren ab den 1970er Jahren der Anlass für vielfältige Forschungsaktivitäten zur Herstellung und Anwendung von Halbleitern und deren Kristallen an der Technischen und an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU). So wurde 1974 am Lehrstuhl für Werkstoffe der Elektrotechnik der FAU unter der Leitung von Prof. Georg Müller mit dem Aufbau eines Kristalllabors begonnen. In dieser Zeit wurden auch die ersten fränkischen Weltraumexperimente zur Kristallzüchtung durchgeführt. Mitte der 1990er Jahre lag ein weiterer Forschungsschwerpunkt auf der Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Galliumarsenid-Kristallen, gemeinsam mit einem Industriepartner. Heute finden sich weltweit in fast jedem Smartphone mehrere Galliumarsenid-„Chips“, die auf den in Franken mitentwickelten Galliumarsenid-Kristallen basieren.

Mitte der 1990er Jahre wurde auch am Fraunhofer IISB eine Arbeitsgruppe Kristallzüchtung gegründet, die heute als Abteilung „Materialien“ tätig ist. Die Abteilung Materialien betreibt in Erlangen und in Freiberg/Sachsen für die deutsche Industrie angewandte Forschung auf dem Gebiet der Halbleiterkristallzüchtung. Sie ist dabei sehr erfolgreich, was durch etwa 30 Forschungspreise rund um die Kristallzüchtung in den letzten 20 Jahren dokumentiert wird. Die Schwerpunkte des Fraunhofer IISB sind dabei Halbleiterkristalle für elektronische Systeme, also Silizium und spezielle Verbindungshalbleiter – wie zu den Anfängen in den 50er Jahren in den Siemenslabors.



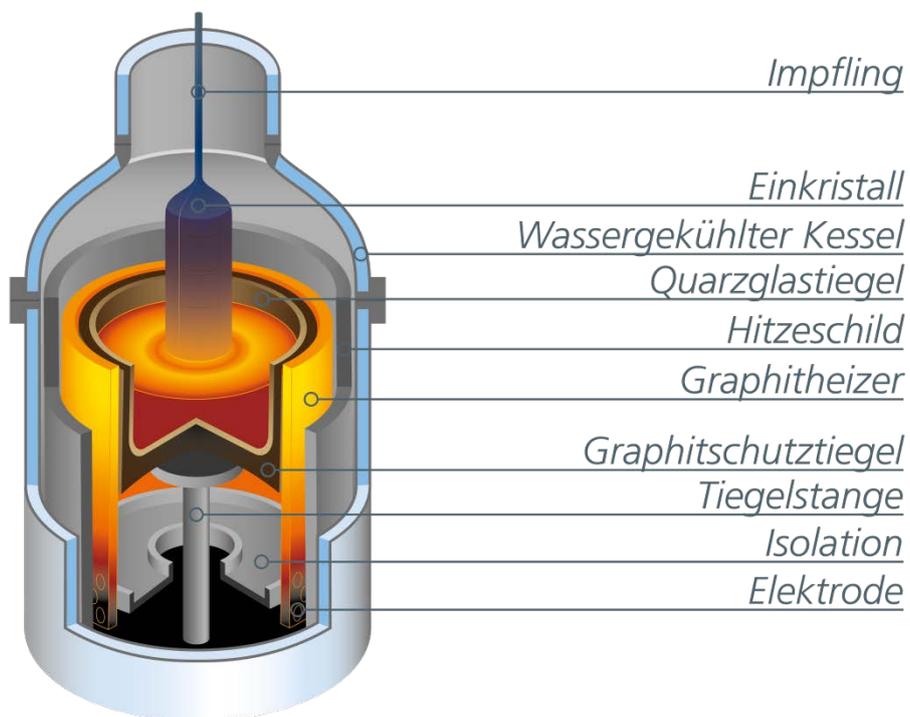
Natürliche und im Labor am Fraunhofer IISB hergestellte Kalziumfluorid-Kristalle für UV-Lichtbrechende Linsen. © Kurt Fuchs / Fraunhofer IISB



Computer-Chips aus Silizium, in schwarze Kunststoffgehäuse verpackt, auf einer Platine. © Fraunhofer IISB



Galliumarsenid-Kristalle mit verschiedenen Durchmessern, hergestellt nach dem VGF-Verfahren.
© Freiburger Compound Materials GmbH



Schematischer Aufbau einer Czochralski-Anlage zur Herstellung von Silizium-Einkristallen für die Mikroelektronik. © Fraunhofer IISB



Die Anlagen zur Herstellung von multikristallinen Silizium-Blöcken für die Herstellung von Solarzellen sind etwa 3-4 m hoch. © Fraunhofer IISB

Ansprechpartner

Dr. Jochen Friedrich

Fraunhofer IISB

Schottkystraße 10, 91058 Erlangen, Germany

Tel. +49-9131-761-270

Fax +49-9131-761-280

jochen.friedrich@iisb.fraunhofer.de

www.iisb.fraunhofer.de