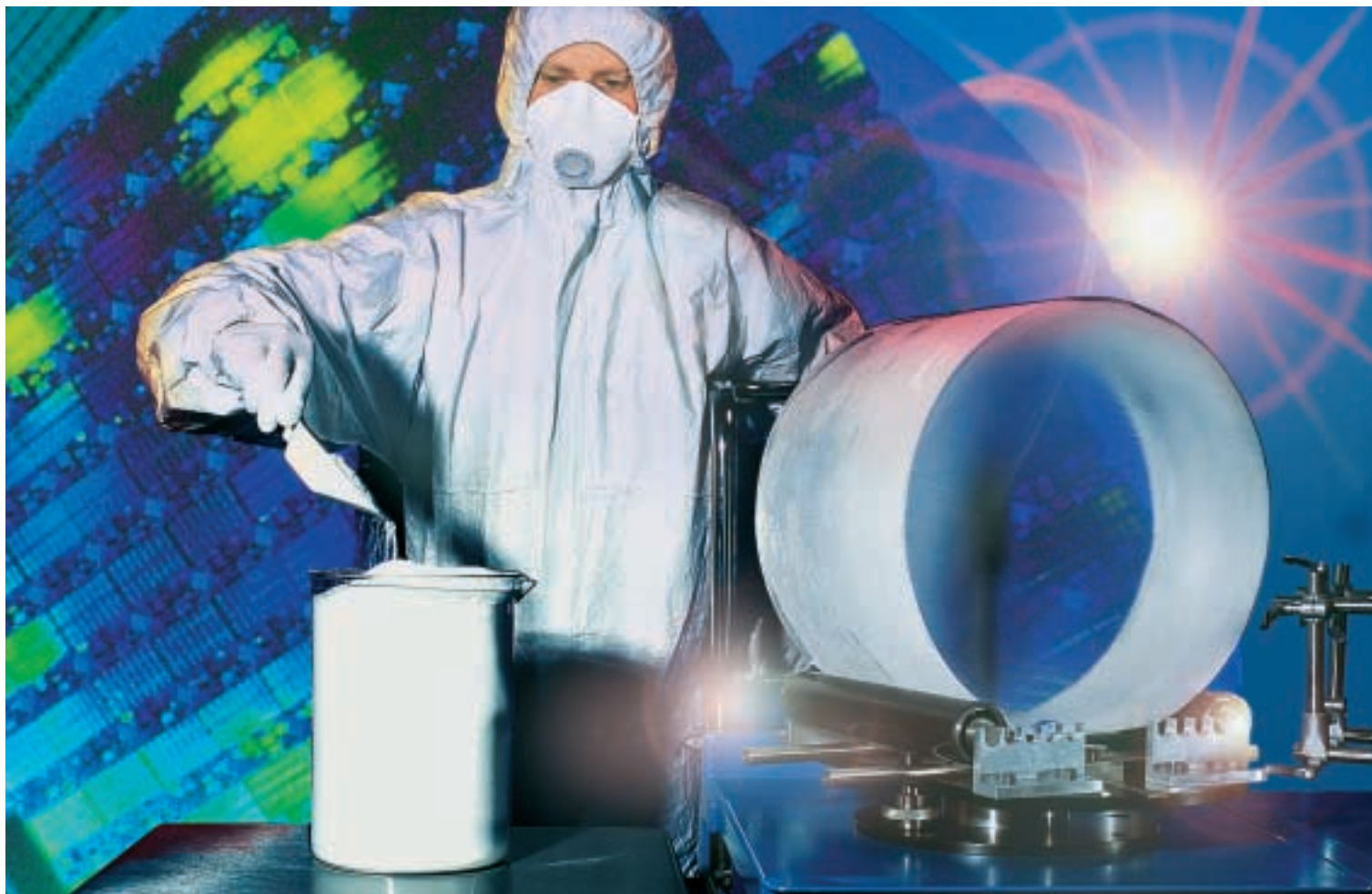




# „Juwelen“ für Innovationen

In Form von Juwelen üben **Einkristalle** seit Jahrhunderten eine ungebrochene Faszination aus. Neue Analysemethoden ermöglichen deren Züchtung für anspruchsvolle Anwendungen, beispielsweise in der Mikrolithographie.



Für den Einsatz in Optiken von Wafersteppern fertigt Schott Lithotec Calciumfluorid-Kristalle. Das Kristalllabor Erlangen entwickelt in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen spezielle Öfen zur Züchtung des Materials.

► Neben ihrer rein ästhetischen Funktion kommt den Einkristallen eine äußerst wichtige technische Bedeutung zu. Viele umwälzende Neuerungen der vergangenen 50 Jahre wären ohne Einkristalle nicht möglich gewesen. Für eine ganze Reihe moderner Technologien ist deren Einsatz unverzichtbar: Ohne Einkristallhalbleiter gäbe es beispielsweise die Mikroelektronik und die Informationstechnologie in ihrer heutigen Form nicht. In der Optik werden Einkristalle

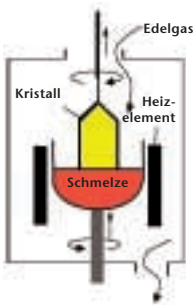
zum Beispiel in Form von Fenstern und Linsen in hochentwickelte optische Systeme integriert. Mit Laserkristallen bestückte Geräte erlauben die Entwicklung von neuartigen Behandlungsmethoden in der Medizin. Auch in der modernen Messtechnik und in der Materialverarbeitung gehören Laserwerkzeuge mittlerweile zum Standard.

Die enorme Bedeutung von Einkristallen spiegelt sich in den Produktionszahlen wi-

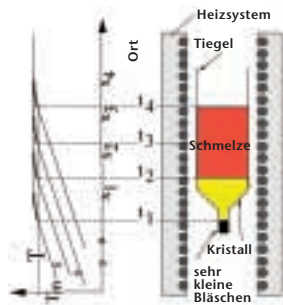
der: die Weltjahresproduktion von großen Einkristallen ist von 5.000 Tonnen im Jahr 1979 auf etwa 20.000 Tonnen im Jahr 1999 angestiegen.

## Züchtung von Einkristallen

Die Vielfalt der zu züchtenden Materialien sowie deren individuelle Materialeigenschaften erfordern eine ganze Reihe von unterschiedlichen Kristallzüchtungsprozessen.



Schematische Darstellung der Czochralski-(Cz-) Methode.



Skizze der Ofentemperaturprofile für verschiedene Zeitstufen in einer Vertical-Gradient-Freeze-(VGF-)Konfiguration.

sen. Heutige Kristallzüchtungstechnologien basieren üblicherweise auf dem Phasenübergang vom flüssigen in den festen Zustand, der sogenannten Schmelzzüchtung. Nur einige wenige Materialien von industrieller Bedeutung, wie beispielsweise der Halbleiter Siliziumkarbid, werden aus der Gasphase gezüchtet.

Die Grundlagen für die Schmelzzüchtungstechnologien zur Herstellung von Einkristallen aus der Schmelze wurden in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gelegt. Die wichtigste heute angewandte Technik zur Herstellung von Halbleiter- und Oxidkristallen ist die sogenannte Czochralski-Methode. Bei zwei anderen Techniken, der Bridgman-Stockbarger- und der VGF-(Vertical-Gradient-Freeze-)Methode, wird das polykristalline Rohmaterial in einem Tiegel geschmolzen und anschließend durch einen Einkristall-Keim am Boden des Tiegels gerichtet auskristallisiert. Im VGF-Verfahren geschieht das, indem man die Temperatur des Aggregats absenkt, in der Schmelze aber einen positiven Temperaturgradienten beibehält. Im Bridgman-Stockbarger Verfahren wird dagegen der Tiegel relativ zum Ofen bewegt.



Stand der Technik:  
Kristallzüchtungsanlage zur Herstellung von Siliziummonokristallen mit einem Durchmesser von 300 Millimeter bei Wacker Siltronic AG.

Der Vorteil beider Techniken gegenüber der Czochralski-Methode ist, dass man während des Schmelzprozesses die Temperaturbedingungen besser einstellen kann. Dadurch lassen sich Kristalle mit niedrigerer Fehlerdichte züchten. Der Nachteil ist, dass die Kristalle in Kontakt mit der Tiegelwand wachsen und während des Wachstums nicht beobachtet werden können. Das kann die Ausbeute der Kristallproduktion schmälern.

### Defekt-Engineering, eine moderne Lösungsstrategie

Mit Hilfe des sogenannten Defekt-Engineerings versuchen Forscher und Entwickler, größere Kristalle zu züchten und gleichzeitig deren Qualität im mikroskopischen oder sogar atomistischen Bereich zu verbessern. Dies wird durch eine genau kontrollierte Wahl der Wachstumsbedingungen erreicht. Die Fehlerbildung ist in den meisten Fällen direkt an das Temperaturfeld während des Wachstums gekoppelt. Die Lösungsstrategie ist deshalb zweigleisig. Zum einen wird der Kristallzuchtprozess sorgfältig analysiert, um die Beziehung zwischen den wichtigen Zuchtbedingungen zu finden und mit diesen Informationen ein Fehlermodell zu erstellen. Zum anderen wird ein Prozessmo-

dell benötigt, das die Wachstumsparameter (also jene Elemente des Züchtungsprozesses, die direkt manipuliert werden können) zu den Wachstumsbedingungen – meist das Temperaturfeld – in Beziehung setzt. Dies erreicht man durch die kombinierte Anwendung von experimenteller Analyse und Computersimulation.

### Herausragende Resultate

Das Kristalllabor Erlangen ist ein weltweit anerkanntes Kompetenzzentrum für Kristallzüchtung. Es verfügt sowohl über die notwendige experimentelle Infrastruktur als auch über leistungsstarke Simulationswerkzeuge, um innovative Methoden zu entwickeln und anzuwenden. Die Erfolge sind beeindruckend. Das Kristalllabor war maßgeblich an der Entwicklung des VGF-Prozesses für die industrielle Produktion von GaAs- und InP-Einkristallen beteiligt und hat solche Kristalle mit extrem niedriger Fehlerdichte gezüchtet.

In Zusammenarbeit mit der Schott Lithotec AG entwickelte das Kristalllabor spezielle Öfen für die Züchtung von Calciumfluorid-(CaF<sub>2</sub>-)Kristallen, die als Linsenmaterial in der Mikrolithographie eingesetzt werden.

Die Produktionsanlagen von Schott Lithotec sind mittlerweile die größten der Welt. Außerdem hat das Kristalllabor einen neuen Ofen-Prototyp entwickelt und gebaut, mit dem wertvolle Erkenntnisse für die Züchtung von CaF<sub>2</sub>-Kristallen gewonnen werden können. ◀

### „Juwelen“ für die Halbleiterindustrie

Überblick der Einsatzgebiete von Einkristallen

Anwendungsgebiete	geschätzter Anteil an der Weltproduktion (20.000 t)
Halbleiter	60 %
Szintillation	12 %
Optik	10 %
Akustische Optik	10 %
Laser u. Nicht-lineare Kristalle	5 %
Juwelen u. Uhren-industrie	3 %



### Aktuelle Forschungsthemen in der Kristallzüchtung

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten werden durch die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Anwendung bestimmt. Es gibt jedoch für alle Kristallzüchtungstechnologien gemeinsame Probleme, die auf eine Lösung warten.

- ▶ Die Anlagen müssen vergrößert werden, um größere Kristalle züchten zu können und so Produktivität und Ausbeute zu erhöhen.
- ▶ Kristallfehler, welche die Leistung und Funktion der aus den Kristallen hergestellten Produkte beeinträchtigen, müssen vermieden werden.
- ▶ Die Bildung bestimmter Kristallfehler muss kontrolliert werden, um die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Kristalle den Erfordernissen der jeweiligen Anwendungen anzupassen.
- ▶ Für alle relevanten Kristalleigenschaften im Mikro- und Makrobereich muss eine hohe Reproduzierbarkeit erreicht werden.