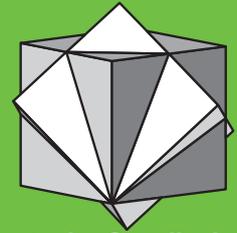


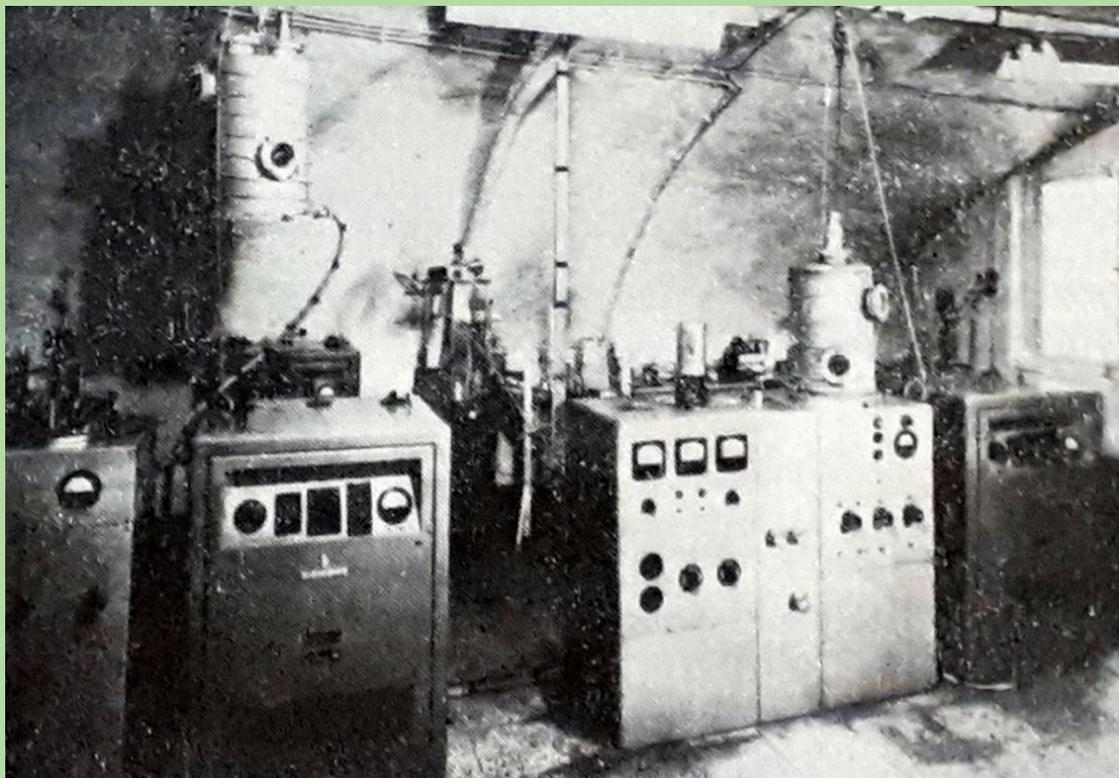


ISSN 2193-3758

Mitteilungsblatt  
Nr. 108 / 2019



Deutsche Gesellschaft  
für Kristallwachstum und  
Kristallzucht e.V.



---

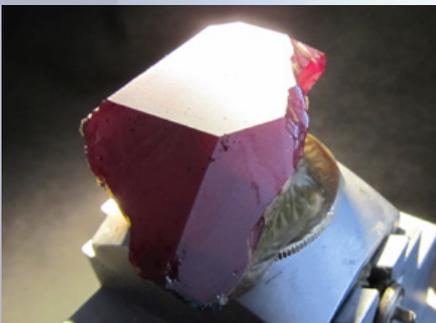
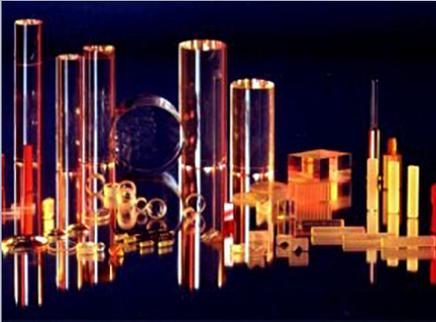
## Inhaltsverzeichnis

Der Vorsitzende / Editorial . . . . .	3
DGKK intern . . . . .	5
DGKK Fokus . . . . .	7
DGKK Nachrichten . . . . .	17
DGKK Personen . . . . .	27
DGKK Nachwuchs . . . . .	33
Über die DGKK . . . . .	37
Tagungskalender . . . . .	38

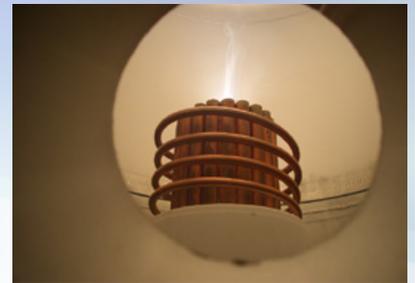
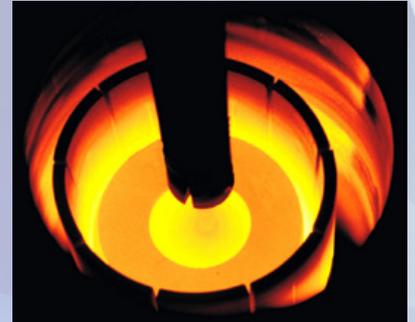
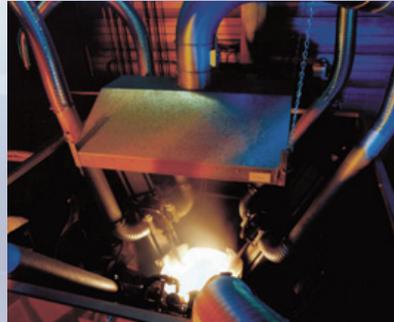
---

# SurfaceNet

## Crystals



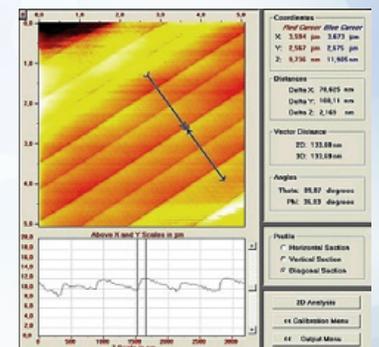
## Crystal Puller



## Wafers



## Analytical Services



## Substrates Custom Parts

## Sputter Targets PLD Targets Custom Crystal Growth

## SurfaceNet GmbH

Oskar-Schindler-Ring 7 · 48432 Rheine – Germany  
Telefon +49 (0)5971 4010179 · Fax +49 (0)5971 8995632  
sales@surfacenet.de · www.surfacenet.de

## Der Vorsitzende

### Liebe Kolleginnen und Kollegen,

für das neue Jahr wünsche ich Ihnen und Ihren Familien alles Gute!

Das letzte Jahr ist in verschiedener Hinsicht für die DGKK bzw. die Kristallzüchtung in Deutschland erfolgreich verlaufen. Unser Kollege Matthias Bickermann wurde in das DFG-Fachkollegium 406-03 (Thermodynamik und Kinetik sowie Eigenschaften der Phasen und Gefüge von Werkstoffen) gewählt.

Bei den Preisen der IOCG, die traditionell auf der ICCGE verliehen werden, sind in Keystone zwei deutsche Kristallzüchter geehrt worden. Reinhard Uecker hat zusammen mit Darrell Schlom den Frank-Preis für ihre Arbeiten zu verspannten Oxid-Schichten bekommen und Anton Jesche ist für seine Arbeiten zur Züchtung von Kristallen von Materialien mit korrelierten Elektronensystemen mit dem Schieber-Preis ausgezeichnet worden. Weitere Einzelheiten zu den Preisträgern und ihren Arbeiten sind in diesem Heft zu finden. Allen Preisträgern nochmals einen herzlichen Glückwunsch!

Des weiteren hatten wir eine sehr erfolgreiche Tagung mit unseren polnischen Kolleginnen und Kollegen in Poznań. Hierüber ist ja bereits im letzten MB berichtet worden. Selbstverständlich wurde dabei auch der Geburtsstadt und dem Grab Jan Czochralskis ein Besuch abgestattet. Jan Czochralski war übrigens ein Gründungsmitglied der „Deutschen Gesellschaft für Metallkunde“ (heute „für Materialkunde“), die im letzten Jahr ihr 100-jähriges Bestehen feiern konnte. Die DGKK feiert dann in diesem Jahr, zwar nicht 100 Jahre aber immerhin 50 Jahre. Die Elektronikindustrie ist eben noch nicht so alt, aber wird mit Sicherheit auch das Leben in den nächsten 50 Jahren mitbestimmen. Deshalb wollen wir bei unserer Jubiläumstagung in München sowohl zurück als auch nach vorne schauen. Daneben soll es ein großes Familientreffen sein und ich freue mich, dass viele Mitglieder der ersten Stunde ihr Kommen angekündigt haben.

Wenn Sie diese Zeilen lesen, bin ich als Vorsitzender nicht mehr im Amt. Ich möchte mich bei allen anderen Vorstandsmitgliedern, die mich während meiner Amtsperiode begleitet und unterstützt haben, ganz herzlich bedanken! Aber nicht nur

die Vorstandsmitglieder machen die Arbeit. Ganz wichtiger Bestandteil des wissenschaftlichen Lebens der DGKK sind die Arbeitskreise. Leitung und Organisation der Treffen ist immer mit nicht geringer Arbeit verbunden. Noch mehr Arbeit ist mit der Organisation der jährlichen Kristallzüchtungstagung verbunden. Vielen Dank an alle Helfer, die die reibungslose Durchführung dieser Tagung in den letzten Jahren gewährleistet haben! Der Dank geht selbstverständlich auch an die Organisatoren des Seminars der jDGKK! Ein ganz wichtiges Kommunikationsorgan ist unser Mitteilungsblatt. Ich möchte Sie an dieser Stelle ausdrücklich ermuntern, entsprechende Beiträge an die Redaktion zu schicken (redaktion@dgkk.de). Und vielen Dank an alle, die dieses bisher gemacht haben! Die Hauptarbeit liegt dann immer noch bei demjenigen, der Beiträge anfordert, integriert und das Heft zusammenstellt. Bis Heft 104 hatte dieses Uwe Rehse getan, schon unterstützt von Klaus Böttcher, der diese Aufgabe dann mit Heft 105 komplett übernommen hat. Herzlichen Dank für viele schöne und interessante Hefte! Auch die Aktualisierung der Web-Seiten ist keine Selbstverständlichkeit. Insbesondere der Umzug des Servers auf einen kommerziellen Anbieter war nochmal ein Stück Arbeit. Für diese Arbeit geht der Dank an Sabine Bergmann. Für die weitere Pflege der Webseiten ist der Vorstand dabei, eine langfristige Lösung zu finden. Auch hier gilt: Änderungs- und Ergänzungswünsche bitte an die entsprechende Redaktion schicken (internet.redaktion@dgkk.de). Die DGKK ist kein großer aber trotzdem ein sehr aktiver Verband. Das ist so, weil sich viele mit spezifischen Aktivitäten beteiligen. Das soll auch die nächsten fünfzig Jahre so bleiben. Ich wünsche meinem Nachfolger, Andreas Danilewsky, und seinem Stellvertreter, Andreas Erb, viel Erfolg für Ihre Arbeit, wie auch allen anderen amtierenden Vorstandsmitgliedern. Und natürlich auch Freude bei der Ausübung ihrer Tätigkeiten!

Ihnen wünsche ich ein erfolgreiches Jahr und weiterhin viel Freude mit der DGKK!

Ihr  
Wolfram Miller

## Inhaltsverzeichnis

Der Vorsitzende .....	3
Editorial .....	4
Titelbild .....	4
DGKK-intern .....	5
Einladung zur Jahreshauptversammlung 2020 .....	5
DGKK-Fokus .....	7
50 Jahre DGKK .....	7
70 Jahre GaAs und III-V-Kristallzüchtung aus der Schmelze .....	8
Schloss Pretzfeld: Siliziumrevolution .....	12
Mitglieder 2019, zweite Jahreshälfte: Firmen .....	16
DGKK-Nachrichten .....	17
ICCGE-19/OMVPE-19 in Keystone, USA .....	17
ISSCG-17 in Granby, Colorado, USA .....	19
ICNS 2019, Seattle, USA .....	22

DRIP XVIII, 08.-12. September 2019, Berlin .....	24
ForMikro-LeitBAN .....	26
Anna Pajęczkowska: 85. Geburtstag .....	27
Joint Meeting jDGKK and YC .....	27
Reinhard Uecker: Frank-Preis der IOCG .....	28
Anton Jesche: Schieber-Preis der IOCG .....	30
Nachruf auf Josef Grabmaier .....	31
Kaspars Dadzis erhält ERC Grant .....	32
Jubilare .....	32
DGKK-Nachwuchs .....	33
Leonhard von Helden: Strain engineering .....	33
Mitglieder 2019, zweite Jahreshälfte: Privatpersonen .....	34
Schülerwettbewerb .....	35
Über die DGKK .....	37
Arbeitskreise der DGKK .....	38
Tagungskalender .....	38

## Editorial

### Verehrte Leserinnen und Leser,

auch Mitte Januar wünsche ich Ihnen noch ein gesundes und erfolgreiches Neues Jahr!

Motiviert durch das Jubiläum '50 Jahre DGKK' werfen wir in dieser Ausgabe ausführlichere Blicke zurück in die Geschichte der Kristallzüchtung unseres Landes. Dazu gehört auch das Titelbild, das noch aus den Jahren vor der Gründung der DGKK stammt.

Darüber hinaus reflektiert dieses Heft das Konferenzleben: 2019 war wieder ein Jahr der dreijährlichen ICCGE-

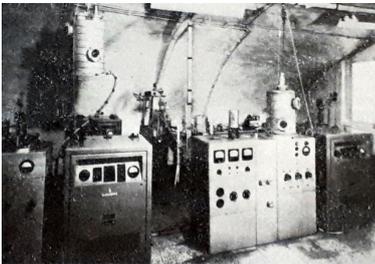
Konferenzreihe einschließlich der Schule und der zweijährlichen Konferenz zu den Nitridhalbleitern. Ebenso werden die Preisträger namhafter Auszeichnungen gewürdigt.

Das Finale des Heftes wird von den (Züchtungs-)Ergebnissen der Gewinner des bundesweiten Schülerwettbewerbs zur Kristallzüchtung gebildet.

Eine interessante Lektüre dieses Heftes wünscht Ihnen

Klaus Böttcher

## Titelbild



Bildquelle: s. Text →

Das tiegelfreie Zonenziehen zur Herstellung von Siliziumkristallen wurde Anfang der 1950iger Jahre im fränkischen Pretzfeld von Dr. Reimer Emeis entwickelt und patentiert. 1955 wurden in Pretzfeld mit diesem Verfahren Silizium-Kristalle mit einem Durchmesser von 12 mm hergestellt, 1961 bereits mit 25 mm und 1964 sogar mit 33 mm. Das Foto zeigt die „Kristallzieherei“ im Pretzfelder Schloss um 1955 mit Anlagen zur Einkristall-Herstellung durch des tiegelfreie Zonenziehen. Quelle: Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Eberhard Spenke, 1965, Siemens; <http://www.joerg-berkner.de/Scriptum/Scriptum.html>

## Material-Technologie & Kristalle für Forschung, Entwicklung und Produktion

- ▲ Kristallzüchtungen von Metallen, Legierungen und Oxiden
- ▲ Kristallpräparation (Formgebung, Polieren und Orientieren)
- ▲ Reinstmaterialien (99,9 – 99,99999 %)
- ▲ Substrate (SrTiO<sub>3</sub>, MgO, YSZ, ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc.)
- ▲ Wafer (Si, Ge, ZnTe, GaAs und andere HL)
- ▲ Sputtertargets
- ▲ Optische Materialien (Fenster, Linsen, etc.)
- ▲ Auftragsforschung für Werkstoffe und Kristalle



# MaTeck

Im Langenbroich 20  
52428 Jülich  
**Tel.:** 02461/9352-0  
**Fax:** 02461/9352-11  
**eMail:** [info@mateck.de](mailto:info@mateck.de)

Besuchen Sie uns im Internet (inkl. Online-Katalog):  
[www.mateck.de](http://www.mateck.de)



**An alle Mitglieder**

**Schriftführerin**

Dr. Christiane Frank-Rotsch  
Leibniz Institut für Kristallzüchtung  
Max-Born-Str.2  
D-12489 Berlin  
Telefon (030) 6392 3031  
Telefax (030) 6392 3003  
Email [christiane.frank-rotsch@ikz-berlin.de](mailto:christiane.frank-rotsch@ikz-berlin.de)  
20.12.2019

**Jahreshauptversammlung 2020**

Liebe Mitglieder,

der Vorstand lädt Sie herzlich zur ordentlichen Mitgliederversammlung (Jahreshauptversammlung 2020) ein, die anlässlich DKT 2020 in München-Garching stattfindet.

Ort: Rudolf-Mößbauer-Hörsaal,  
Gebäudenummer 5051 Physik 1  
Raumnummer 2501  
James-Franckstr.1  
85748 Garching b. München

Zeit: **Mittwoch, 11.03.2020**, 18:30 Uhr

Vorläufige Tagesordnung:

1. Begrüßung und Feststellung der Beschlussfähigkeit
2. Bericht des Vorsitzenden
3. Bericht der Schriftführerin
4. Bericht des Schatzmeisters
5. Bericht der Kassenprüfer und Entlastung des Vorstandes
6. Planung für 2020
7. Deutsche Kristallzüchtungstagungen 2021/2022
8. Abschließende Diskussion und Beschluss über die DKT 2021
9. Ehrenmitglieder (Vorschläge und Abstimmung)
10. Berichte zu den DGKK – Arbeitskreisen
11. Verschiedenes

Anträge auf Erweiterung der Tagesordnung sind dem Vorstand gemäß § 9 (2) der Satzung rechtzeitig mitzuteilen.

Wir möchten Sie bitten, Ihre Teilnahme an der Jahreshauptversammlung 2020 möglich zu machen.

Mit freundlichen Grüßen

Christiane Frank-Rotsch  
Schriftführerin DGKK



**Sindlhauser  
Materials**

[www.sindlhauser.de](http://www.sindlhauser.de)



Technologien von morgen  
sollten auch an die Zukunft denken:

**REACH. Recycling. Rentabel.**

**Sputter-Targets von Sindlhauser.**



Sindlhauser Materials  
Daimlerstraße 68  
D-87437 Kempten

T +49 831 960 458-0  
F +49 831 960 458-10  
[info@sindlhauser.de](mailto:info@sindlhauser.de)

Mitglied der europäischen  
Forschungsgesellschaft  
Dünne Schichten

## DGKK-Fokus

### Die Gründung der DGKK

Wolfram Miller, Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin

Am Abend des 9. April 1970 wurde die DGKK in Bad Bensheim von 13 Mitgliedern gegründet. Dieses war der Schlusspunkt unter eine etwa dreijährige Diskussion, wie die Kristallzüchtung in Deutschland organisatorisch am besten repräsentiert werden könnte. Zugleich war es der Startpunkt für eine Erfolgsgeschichte. Neben der ein Jahr früher gegründeten British Association for Crystal Growth ist die DGKK die größte derartige Organisation in Europa. Wie auch die BACG veranstaltet die DGKK jährlich eine Kristallzüchtungskonferenz. Diese Konferenzen wurden häufig mit den Gesellschaften der benachbarten Länder gemeinsam durchgeführt. Die Geschichte der Jahrestagungen ist im MB 100 (2015) nachzulesen. Ebenfalls dort ist die Entwicklung der DGKK dargelegt. Hierzu gehört auch die Entwicklung des Pendant in der damaligen DDR, der AG "Kristallisation" der VfK (Vereinigung für Kristallographie). Die Entwicklung bis in die Gegenwart lässt sich in *Crystal Research and Technology* 2020, 55, 1900202 (<https://doi.org/10.1002/crat.201900202>) nachlesen. Hier wird auch die Rolle der Arbeitskreise beleuchtet, die seit 1986 mit ihren Treffen eine wesentliche Basis für den wissenschaftlichen Austausch bieten. Seit Beginn an gab es einen Arbeitskreis für GaAs und andere III-V-Kristalle, für Oxide und für die Epitaxie von Halbleitern.

Interessant ist auch wie zu Zeiten von zwei Staaten, der Bundesrepublik Deutschland und der Deutschen Demokratischen Republik, versucht wurde, einen wissenschaftlichen Austausch herzustellen. Auf Seiten der VfK wurden Redner aus der Bundesrepublik und anderen westlichen Ländern zu Konferenzen eingeladen. So sprach z.B. Siegfried Haussühl (Universität Köln) auf der VfK-Konferenz 1978 über die systematische Suche nach Einkristallen mit starker Polarität. Auf Seiten der DGKK gab es 1986 die folgende Initiative: in der Mitgliederversammlung in Erlangen schlug Helmut Wenzl eine bilaterale Sommerschule vor. Als Thema wurde "Epitaxy of Semiconductor Compounds" diskutiert und als Ort Dresden. Leider konnte dieses Vorhaben nicht realisiert werden.

Als Teilnehmer der Gründungsversammlung in Bensheim-Adersbach am 9. April 1970 erkläre ich hiermit meinen Beitritt zur Deutschen Gesellschaft für Kristallwachstum und Kristallzüchtung:

K. Becker  
 J. Grabiner  
 S. Haussühl  
 R. Lachmann  
 W. Stöckel  
 H. Ullrich  
 B. Jampel  
 Rudolf Witsche  
 J. Grabiner  
 R. Pützner  
 H. Hesse  
 H. Klein  
 G. M. La

Fig. 1: Auch eine Form von Gründungsurkunde: Die Teilnehmer der Gründungsversammlung erklären ihren Beitritt zur neu gegründeten Gesellschaft. Foto: DGKK

Inzwischen liegt der Mauerfall 30 Jahre zurück. Die deutschen Kristallzüchter haben nach der Maueröffnung sehr schnell zusammengefunden. Bereits bei der ersten gemeinsamen Konferenz in Frankfurt (Main) 1990 traten viele Wissenschaftler aus der DDR der DGKK bei. Die AG "Kristallisation" löste sich auf, auch weil die Kristallographen in der VfK zusammen mit der "Arbeitsgemeinschaft Kristallographie" (AGKr) am 12. März 1991 die neue Vereinigung "Deutsche Gesellschaft für Kristallographie" (DGK) gründeten.

In den folgenden beiden Artikeln wird die Entwicklung der Kristallzüchtung in Deutschland an zwei prägnanten Beispielen gezeigt: einmal im östlichen Teil (Freiberg) und einmal im westlichen Teil (Franken).

## 70 Jahre GaAs und III-V-Kristallzüchtung aus der Schmelze

B. Weinert, St. Eichler, FCM Freiberg

Die Entwicklung, Produktion und Vermarktung des Halbleiters GaAs ist eng mit der Technikgeschichte Deutschlands nach dem zweiten Weltkrieg verbunden. Nachdem von Heinrich Welker am 11.03.1951 bei Siemens die III-V-Verbindungen und ihre grundlegenden Eigenschaften patentiert wurden, begann die weltweite Erforschung einer neuen Materialgruppe für Anwendungen in der Mikro- und Optoelektronik. Die III-V Verbindungen sind meist direkte Halbleiter und wurden als Ersatz für die damals bekannten indirekten Halbleiter Germanium und Silizium vorgesehen. 1953 wurde die erste GaAs-Gleichrichterlinie von H. Welker vorgestellt und von R. Gremmelmaier 1956 die ersten InAs- und GaAs-Einkristalle, mittels Hotwall-Züchtung in geschlossener Quarzampulle, demonstriert. Die Zersetzungsdrücke der Arsenide und Phosphide machten die Synthese und Einkristallzüchtung jedoch schwierig. Erst 1964 wurde durch den Einsatz von Boroxid als Flüssigkeitsdichtung durch Mullin u.a. in England, die Züchtung von 2"-Einkristallen nach dem Liquid-Encapsulation-Czochralski-Verfahren (LEC) möglich und damit der Weg für eine industrielle Massenfertigung geebnet.

In Freiberg begann die Reinstmetall- und Verbindungshalbleiterforschung im Forschungsinstitut für Nichteisenmetalle (FNE) im Jahr 1949. Es wurden u.a. die Elemente Zr, Ti, Bi, Fe, Sb, Au, In, As, Ge, Ga, Pb, Zn und Si, sowie die ersten Verbindungshalbleiter für die unterschiedlichsten Anwendungen in hochreiner Form dargestellt. Am 01.04.1957 wurde der VEB-Spurenmetalle per Dekret in Freiberg gegründet, um entsprechende Materialien für die DDR zu produzieren. Dies war notwendig, da es aufgrund der politischen Verhältnisse nicht möglich war, ebensolche strategisch wichtigen Rohstoffe aus dem westlichen Ausland zu importieren. Im Jahr 1963 erhält der Betrieb für seine Produktion von Reinstgallium, mit einer Reinheit von 6N, ein Diplom auf der Leipziger Frühjahrsmesse. Die Verbindungshalbleiter werden, wie bereits erwähnt, in Kooperation im FNE entwickelt. Es beginnt 1962 mit der Darstellung von polykristallinem Indiumantimonid. Im FNE wird die erste Maschine zur Galliumphosphid-Synthese unter eigener Regie von einem Betrieb aus dem damaligen Karl-Marx-Stadt (heute Chemnitz) aufgebaut. Die synthetisierten Mengen betragen pro Versuch etwa 100 g.

In den Jahren 1967/68 werden die III-V-Forschungsaktivitäten vom FNE getrennt und von Spurenmetalle Freiberg (SMF) übernommen. Die Entwicklungsabteilung verbleibt jedoch weiterhin physisch im Technikum des FNE. Von 1965 bis 1986 erfolgen analoge Entwicklungen zur Herstellung weiterer III-V-Verbindungshalbleiter wie InAs und GaP. 1972 gelingt erstmals die Herstellung von polykristallinem GaAs und InP. Heute sind dies neben SiC die wichtigsten Verbindungshalbleiter. 1975 erfolgt der Umzug der Abteilung für III-V-Verbindungen zu SMF nach Muldenhütten bei Freiberg. Die

Produktion von Germanium wurde aufgrund der Konkurrenz des Siliciums eingestellt. Die weitere Entwicklung der Einkristallzüchtung für GaAs, GaP und InP erfolgte in Kooperation mit dem Halbleiterwerk in Stahnsdorf bei Berlin.

1981 wurde beschlossen, zukünftig neue III-V-Einkristallzüchtungsanlagen nur noch in Freiberg aufzubauen. Zwei Zuchtungsanlagen aus der damaligen UdSSR wurden 1983 für die Züchtung von Einkristallen gekauft. Es war nun möglich, Si-dotiertes GaAs nach dem horizontalen Bridgman-Verfahren bis zu 35 mm Schulterbreite und geringen Versetzungsdichten als Substrate für LASER- und LED-Anwendungen herzustellen. Im Zeitraum von 1984 bis 1989 wurden aus Frankreich fünf LEC-Anlagen für die Produktion von 2"-GaAs- und GaP-Einkristallen importiert. Parallel kommt es zur Neukonzipierung der Scheibenfertigung. Bereitgestellte Investitionsmittel ermöglichten den Kauf von Schneidemaschinen aus der Schweiz und Poliermaschinen aus der damaligen CSSR. Die Forschungsabteilung für GaAs nutzte sehr lange aus Kostengründen Maschinen und Räumlichkeiten der Siliziumproduktion in Muldenhütten, welche nicht mehr betrieben werden konnten. Die benötigten Mengen waren verhältnismäßig klein und der Preisdruck erlaubte nur eine eher provisorische GaAs-Produktion. Die Umstrukturierungen führten dazu, dass 1989 eine für den Ostblock einmalige Entwicklungs- und Fertigungslinie für die III-V-Halbleiter in Freiberg entstand. Im gleichen Zeitraum gab es eine intensive Forschungsk Kooperation mit vielen Forschungseinrichtungen in der damaligen DDR, insbesondere mit der Bergakademie Freiberg (BAF). Die Arbeiten wurden an der BAF über die dort bestehende Forschungsgemeinschaft, die sich mit der Züchtung und Charakterisierung von Halbleitermaterialien beschäftigte, koordiniert.

Die Zusammenarbeit begann mit der Hochreinigung von Germanium durch Zonenschmelzen und setzte sich in der Entwicklung von Züchtungsverfahren von ternären Verbindungen fort, die zur Züchtung von III-V-Halbleitern (GaAs, InP, GaP) weiterentwickelt wurde. Parallel dazu erfolgte die Entwicklung der Hochreinigungsverfahren für Phosphor, die später eine industrielle Anwendung fand. In der Forschungsgemeinschaft kooperierten Metallkundler, Physiker, Chemiker, Automatisierungstechniker und Kristallzüchter. Die Kooperation ermöglichte neben der eigentlichen Kristallzüchtung auch eine materialspezifische Geräteentwicklung für die Kristallzüchtung und die Charakterisierung der Kristalle. Ein Höhepunkt der Zusammenarbeit war 1987/89 die Konzipierung, der Bau und die Inbetriebnahme einer horizontalen Bridgman-Anlage zur Züchtung von GaAs-Einkristallen bis zu 75 mm Schulterbreite. Aus denen konnten 2"-GaAs-Si-dotierte Wafer für Laseranwendungen gewonnen werden. Parallel dazu erfolgte die Entwicklung der Züchtung von 2"-GaAs-Kristallen

nach dem Vertical-Gradient-Freeze-Verfahren (VGF). Diese Forschungsergebnisse flossen in die industrielle Entwicklung, der noch heute bei der Freiburger Compound Materials GmbH (FCM) bestehenden Produktionstechnologie, ein.

Die Entdeckung und Entwicklung von III-V-Halbleiter durch H. Welker hat natürlich auch die westdeutsche Halbleiterindustrie sehr früh auf den Plan gerufen. 1958 begann die Erforschung des Halbleiterwerkstoffs GaAs bei Wacker. Im Jahresbericht der Wacker-Chemitronic von 1959 wurden erste Erfolge über die Herstellung von geringen Mengen GaAs erwähnt. Weitere Ergebnisse der darauffolgenden Jahre konnten jedoch nicht recherchiert werden, obgleich bei Wacker eine entsprechende GaAs-Produktion in den 80iger Jahren entstand und Wacker Chemitronic Weltmarktführer für 100mm LEC-GaAs-Substrate wurde. Dazu wurden Cz-Si-Züchtungsmaschinen für die LEC-GaAs-Züchtung verwendet. Die Züchtung fand bei geringem Überdruck statt, ein Kompromiss zwischen dem erforderlichen Druck, um die GaAs-Zersetzung am Schmelzpunkt zu verhindern und den technischen Voraussetzungen der verwendeten Si-Züchtungsanlagen. Um das entsprechende polykristalline GaAs-Ausgangsmaterial wirtschaftlich zu erzeugen, wurde eine spezielle Hochdrucktechnologie entwickelt, die noch heute in weiterentwickelter Form bei FCM zum Einsatz kommt. Mitte der 80er Jahre wurde auf Anregung und in Zusammenarbeit mit der Wacker Chemitronic GmbH im Forschungszentrum Jülich mit der Entwicklung neuer, zukunftsweisender Konzepte für die GaAs-Kristallzüchtung begonnen. Der Fokus lag auf der Weiterentwicklung des LEC-Verfahrens mittels einer Hot-Wall-Czochralski-Anlage (Leybold AG). Im FZ Jülich konnte nachgewiesen werden, dass sich GaAs-Kristalle damit züchten lassen. Die Arbeiten wurden mit einer verbesserten, kostengünstigeren Variante als Vapor Pressure Controlled Czochralski-Verfahren, mit und ohne Boroxidabdeckung, bis zum Jahr 2000 im Institut für Kristallzüchtung (IKZ) fortgeführt. Es konnten u.a. halbisolierende 150mm GaAs-Einkristalle mit einmaligen Eigenschaften dicht an der stöchiometrischen Zusammensetzung gezüchtet werden. Die Stabilität und die Kostenstruktur des Verfahrens waren jedoch im Vergleich zum parallelentwickelten VGF-Verfahren nicht konkurrenzfähig, was letztendlich die Einführung der Produktion verhinderte. Zur selben Zeit wurden dazu im FZ Jülich verschiedene Varianten zur vertikalen Bridgman-Züchtung getestet und 1997 in einer Veröffentlichung in der Fachzeitschrift III-V-Review vorgestellt. FCM hatte sich entschieden, eine dieser Varianten bis zur Massenfertigungsreife weiterzuentwickeln. Heute werden in Freiberg auf Basis der Jülicher Konzepte mit dem VGF-Verfahren etwa 70 t GaAs-Einkristalle pro Jahr hergestellt. .

Die politische Situation Ende der 80er Jahre hatte einen großen Einfluss auf die Entwicklung III-V-Halbleiter Industrie in West- und Ostdeutschland. Die staatliche finanzielle Unterstützung der III-V-Materialien erfolgte bis zu diesem Zeitpunkt fast ausschließlich aus militärischer Sicht. Eine

große kommerzielle Anwendung war mit Ausnahme von roten LED's noch nicht in Aussicht. Mit der politischen Wende und Wiedervereinigung der beiden deutschen Staaten nahm das Interesse an den III-V-Materialien zumindest gefühlt stark ab. Im westlichen Teil Deutschlands wurde eine wirtschaftliche Vermarktung bei Wacker plötzlich nicht mehr als tragfähig eingeschätzt. Trotz der führenden Position auf dem Weltmarkt für 100 mm LEC-GaAs-Substrate führte dies 1991 zu der kurzfristigen Entscheidung, die GaAs-Produktion einzustellen und sich auf das Kerngeschäft der Siliziumwafer-Herstellung zu konzentrieren. Im östlichen Teil Deutschlands brach der kleine Markt in Osteuropa für LEDs und Laser mit der Währungsunion zusammen. Damit kam die Entwicklung und Produktion von Bauelementen in Berlin und Substraten in Stahnsdorf und Freiberg ebenfalls zum Stillstand.

Einer kleinen Gruppe von weitsichtigen Persönlichkeiten aus Wissenschaft, Industrie und Politik ist es zu verdanken, dass die Technologien zur Herstellung der III-V-Halbleiter für Deutschland nicht verloren gegangen sind. Sie beschlossen am 15.04.1991 sich dafür einzusetzen, dass die III-V-Entwicklung und Produktion in Freiberg fortgeführt wird. Schritt für Schritt wurden in den folgenden Monaten die politischen, finanziellen und personellen Randbedingungen geschaffen, um das Unmögliche möglich zu machen. Das „Vorhaben“ III-V-Produkte in Deutschland zu produzieren stand noch mehrmals auf der Kippe und es muss bis heute immer wieder auf neue Herausforderungen reagiert werden. Die ersten Kontakte zur Übernahme der Produktionsaktivitäten von Wacker Siltronic durch SMF in Freiberg wurden bereits 1990 aufgenommen. Im April 1991 reisten die ersten Mitarbeiter von Freiberg nach Burghausen und befassten sich mit der dortigen Produktion, um sie später in Freiberg anwenden zu können. Politisch war die Transaktion zu diesem Zeitpunkt noch ungewiss - die entsprechenden Verträge waren noch nicht unterzeichnet. In Freiberg wurden parallel die Rahmenbedingungen zum Aufbau der Produktionsanlagen aus Burghausen geschaffen. Dazu wurde ein bisher ungenutzter Hallenteil am Produktionsstandort Berthelsdorfer Straße ausgebaut. Bis Ende August 1991 erfolgte die Übernahme der gesamten Technologie und der Abbau der Anlagen in Burghausen.

Am 26.08.1991 wurde der Vertrag zwischen der Treuhand und Wacker Siltronic unterschrieben. Eine Stunde später verließ der erste LKW mit Produktionsanlagen das Firmengelände in Burghausen. Die Maschinen wurden mit Unterstützung der Burghausener Kollegen in Freiberg umgehend wiederaufgebaut und in Betrieb genommen. Am 06.12.1991 wurde der erste 100 mm GaAs-LEC-Einkristall auf Basis der Wackertechnologie in Freiberg gezüchtet. Bis Februar 1992 konnte auch die Waferfertigung in Freiberg wieder angefahren werden, woraufhin erste Muster zur Antestung in alle Welt versendet wurden. Bis Mitte 1993 dauerte die Requalifizierung des nach Wackertechnologie produzierten GaAs-Materials aus Freiberg. Ein Nachteil war, dass sich die Kunden inzwi-

schen auf den Weltmarkt neu orientiert hatten und nun zurückgewonnen werden mussten. Hierfür wurde eine zusätzliche Imagekampagne gestartet. Im gleichen Jahr fand in Freiberg eine wissenschaftliche Veranstaltung des Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) anlässlich der gelungenen Verlagerung der III-V-Aktivitäten von Burghausen nach Freiberg statt. Damit konnten bisher bestehende Zweifel bei Kunden im In- und Ausland ausgeräumt werden. Insbesondere in Japan wurde es nicht für möglich gehalten, eine derartige Verlagerung in so kurzer Zeit zu realisieren. Im Rahmen der Imagekampagne fand auch ein hochrangiger japanischer Besuch in Freiberg statt, welcher von den Gästen als sehr beeindruckend empfunden wurde. Das Freiburger Unternehmen wurde ein ernsthafter Konkurrent auf dem Weltmarkt. Am 01.07.1995 wurden die III-V-Aktivitäten von den Freiburger Elektronikwerkstoffen (FEW) getrennt. Es entstand die Freiburger Compound Materials GmbH, eine einhundertprozentige Tochter der Treuhandgesellschaft.

Am 31.08.1995 fand der Verkauf der Gesellschaft an die „Federmann Enterprise Ltd.“ statt. Das Engagement eines israelischen Investors hatte eine große politische Dimension. 50 Jahre nach Kriegsende setzte man damit ein Zeichen der Versöhnung. Nach der Wende war es die erste israelische Investition in einen Produktionsstandort in Sachsen. In den ersten Jahren war die Siemens AG (später Infineon) als strategisch wichtiger Kunde mit 12,5% am Unternehmen beteiligt, zog sich jedoch später zurück. Technologisch war die erste Zeit geprägt durch die Konzentration auf das LEC-Verfahren. Insbesondere wurde darauf fokussiert, eine exakte Kopie des 100 mm-Kristallzüchtungsprozesses von Wacker, bei einem Druck nahe dem Dissoziationsdruck, herzustellen. Bereits 1993 wurde damit begonnen, die bei Wacker angedachten aber nicht mehr realisierten Gedanken, einer Züchtung bei höherem Druck und den bei SMF/FEW ehemals bestehenden Technologien zur Hochdruckzüchtung zu vereinen. Die daraus resultierenden Erkenntnisgewinne waren unglaublich. Sie waren die Basis für das vollständige thermodynamische, chemische und physikalische Verständnis des GaAs-Züchtungssystems.

Mit der Privatisierung der FCM stellten sich neue Aufgaben. Der erste Schritt war die Suche nach einem geeigneten Firmensitz. In unmittelbarer Nähe des bisherigen Standortes in der Berthelsdorfer Straße befand sich im Gewerbegebiet Süd „Junger Löwe Schacht“ eine passende Fläche. Es begann eine fieberhafte Arbeit von Projektierung und Genehmigung des Neubaus und bereits am 05.09.1995 erfolgte die Grundsteinlegung. Eigentlicher Baubeginn war jedoch erst im Frühjahr 1996, da wichtige Genehmigungen noch fehlten und der Winter 1995/96 eine sehr strenge und lange Frostperiode hatte. Im Sommer 1996 konnte trotzdem planmäßig Richtfest gefeiert werden und bereits im März 1997 wurden die ersten Einkristalle im neuen Gebäude gezüchtet. In dieser Zeit entwickelte sich die Mobiltelefonie, was die Nachfrage an GaAs stark anwachsen ließ. Dies bewirkte bei FCM im Jahr 1997

eine Umsatzsteigerung von 40% gegenüber dem Vorjahr. Neben diesen marktwirtschaftlichen Erfolgen gab es auch in der Technologie wesentliche Fortschritte. Es erfolgte ein Wechsel der Dotierstoffe von Chrom zu Kohlenstoff, um die halbisolierenden Eigenschaften und die Zuverlässigkeit der nachfolgenden Bauelemente zu verbessern. Um der steigenden Nachfrage gerecht zu werden, waren mittelfristig größere Durchmesser und bessere Eigenschaften der Kristalle erforderlich. Bereits 1995 wurde in Freiberg der erste Kristall mit einem Durchmesser von 150 mm nach dem LEC-Verfahren gezogen. 1998 wurde die 150 mm-LEC-Technologie in die Freiburger Produktion überführt.

Durch die Verlagerung der Produktion von Burghausen nach Freiberg waren jedoch auch Einschnitte zu verzeichnen. So wurde die an beiden Standorten ehemals bestehende horizontale Bridgman-Technologie für Laser und LEDs nicht weiter betrieben, obwohl diese Produkte am Weltmarkt gebraucht wurden. Allerdings war diese horizontale Technologie im Quarzglasschiffchen nicht für die Herstellung großer Kristalle/Wafer geeignet. Aufbauend auf den Erfahrungen der alten Technologien und in Zusammenarbeit mit den Universitäten Erlangen und Freiberg sowie dem FZ Jülich entwickelte FCM damals das VGF-Verfahren (VGF - Vertical Gradient Freeze). Es stellte eine vertikale Modifikation des Bridgman-Verfahrens dar. 1997 wird bei FCM eine erste Anlage basierend auf der Jülicher Technologie für die Entwicklung installiert. Der bis zum Jahre 2000 weiter stark wachsende Mobilfunkmarkt bringt dem Betrieb jährliche Steigerungsraten von 50%. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist nicht nur die Kristallzüchtung von enormer Bedeutung, sondern auch nachfolgende Schritte wie das Wafering. Als markantester Entwicklungsschritt ist zu erwähnen, dass bei FCM seit 1997 das mechanische Läppen der Wafer komplett eingespart werden konnte. Dies erfordert höchste Qualitäten beim Wafersägen und eine dementsprechend angepasste Politur.

Der wirtschaftliche Erfolg und die Nachfrage veranlassten die Eigentümer und die Geschäftsleitung, über eine Erweiterung des Werkes nachzudenken. Diese Überlegung wurde durch die Annahme eines weiter steigenden Bedarfes gestützt. Im Jahr 2000 begann der Neubau der Fab 2 bei FCM. In dieser Phase des Neubaus fiel die weltweite Halbleiterkrise im Jahr 2001. Dem Unternehmen brachte diese Situation, neben vielen Problemen, auch neue Möglichkeiten und Herausforderungen. Die weltweiten GaAs-Bauelementehersteller begannen zu dieser Zeit ihre Produkte nicht mehr mittels Ionenimplantation, sondern durch Epitaxieverfahren zu produzieren. Diese neuen Bauelemente (HBT, pHEMT) waren kleiner und leistungsstärker als ihre Vorgänger (MESFET). Die Herausforderung für FCM bestand darin, dass für diese neue Bauelementengeneration ein Substrat mit möglichst geringer Versetzungsdichte benötigt wird. Bereits seit 1997 wurde in Freiberg ein Substrat mit diesen Eigenschaften mittels VGF-Verfahren entwickelt. Es ließen sich hiermit neben dem semi-

isolierenden GaAs für die Mikroelektronik auch Si-dotiertes GaAs für die Opto-Elektronik herstellen. Damit erschloss sich für FCM ein zweites Standbein, da für Lumineszenzdioden im Farbspektrum von gelb bis rot und für Laser im Bereich von 680-980 nm versetzungsarmes GaAs erforderlich war und ist.

Aufbauend auf den Entwicklungen im GaAs wurden in den Jahren 2002 bis 2006 zusätzlich VGF-Technologien zur Herstellung von GaP und InP erarbeitet und Kristalle und Wafer bis 100 mm erzeugt. Zu dieser Zeit gab es aufgrund der sehr geringen Nachfrage keine Einführung in die Produktion. Mittlerweile besteht jedoch wieder ein größerer Bedarf an InP-Wafern, so dass die Entwicklungsaktivitäten wieder aufgenommen wurden. In den Jahren 2000 bis 2001 verringerte sich die Produktionsmenge von GaAs Wafern um ca. 50%. Erst 2008 war ein erneutes Wachstum, auf die dreifache Menge des Jahres 2000, zu verzeichnen -damit war der Wechsel der Züchtungstechnologie vom LEC zum VGF-Verfahren verbunden. Die VGF-Entwicklung ermöglichte FCM, den neuen Anforderungen des GaAs-Marktes seit 2001 gerecht zu werden und die Halbleiterkrise zu überwinden. Zu dieser Zeit gab es weltweite Überkapazitäten und es trat ein für Halbleiterprodukte typische Preisverfall ein. Die notwendige Produktivitätssteigerung drückt sich darin aus, dass sich die produzierte Waferoberfläche 2006 im Vergleich zu 2000 mit nur 20% mehr Mitarbeitern nahezu verdoppelt hatte. Möglich ist eine solche Entwicklung nur mit einem starken Entwicklungsteam. 15% bis 20% der FCM-Belegschaft beschäftigen sich auch heute noch mit Forschung, Entwicklung und Technologiekontrolle. Ein sichtbarer Ausdruck der wissenschaftlichen Kompetenz des Unternehmens war auch die Züchtung des weltweit ersten 200 mm LEC- und VGF-GaAs-Einkristalls im Jahre 2000, die Entwicklung der multi-Tiegel-VGF-Technologie und die Einführung einer hocheffektiven Drahtsägetechnologie bei der Waferherstellung. Die Weiterentwicklungen der Technologie im Hinblick auf die Beherrschung der Dotierung und Steigerung der Effektivität führte 2005 zur Entwicklung eines überarbeiteten VGF-Maschinentyps. Heute (2019) werden über 90% der hergestellten Kristalle nach diesem Verfahren produziert. Im Jahr 2008/2009 hinterlässt die weltweite Wirtschaftskrise auch ihre Spuren in der GaAs-Produktion. Allein nur die Ankündigung, dass der Umsatz an Handys um 10% sinken werde, verursachte eine schlagartige Kontrolle aller Lagerbestände und die Absage von Aufträgen in Größenordnungen. Bei FCM wurden etwa 12 Wochen lang keine Einkristalle gezüchtet und die Hersteller für Ga und As hatten sogar die Produktion für ein halbes Jahr eingestellt. Dennoch wurden Ende 2008 mehr Handys verkauft als im Vorjahr.

In den folgenden Jahren wuchs die GaAs-Produktion wieder, wurde aber von mehreren Ereignissen und Entwicklungen beeinflusst. So gab es durch die Katastrophe in Fukushima im Jahr 2011 zu mehreren Störungen der globalen GaAs-Produktion. Der japanische As-Produzent befand sich in unmittelbarer Nähe und musste seine Produktion über einen

längeren Zeitraum einstellen. Auch die japanischen Mitbewerber hatten infolgedessen unter dem As-Mangel stark zu leiden. Der japanische pBN-Tiegelhersteller war auch betroffen und musste aufgrund des Energiemangels seine Produktion drosseln. Nicht zuletzt kam es zu einer extremen Verknappung von Boroxid, welches zur Abbremsung der Neutronen in den Unglücksreaktoren in Fukushima benötigt wurde. All dies führte zu einem zusätzlichen Entwicklungsschub, um diese Roh- und Hilfsstoffe noch effektiver zu nutzen und die Kosten für GaAs weiter zu senken.

In der GaAs-Produktion liegen die Hauptdurchmesser für mikroelektronische und optoelektronische Anwendungen derzeit bei 150 mm, für Nischenanwendungen der Optoelektronik werden auch noch Wafer geringeren Durchmessers verwendet (100 mm, 3"). Die Nachfrage nach 200 mm Wafer ist heute immer noch gering. Der Weltmarktanteil von FCM an der Produktion von GaAs-Substraten beträgt 2018 über 60% für die Mikroelektronik und 15% für die Optoelektronik. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass FCM in den letzten 10 Jahren sein Produktionsvolumen immer wieder steigern konnte, was bei weiter fallenden Preisen pro cm<sup>2</sup> sehr große Anstrengungen bei der Kostenreduzierung erforderte. Auch in Zukunft werden viele kreative Ideen notwendig sein, um diese weiter voranzutreiben. Kürzlich wurde noch von einem kaum wachsenden GaAs-Markt ausgegangen. Glücklicherweise gibt es immer wieder neue Anwendungen, so zum Beispiel sollen zukünftig auf Basis von GaAs-Wafern IR-VCSEL-array's zur 3D-Umgebungserfassung produziert werden. Dazu sind großflächige Si-dotierte nahezu versetzungsfreie GaAs-Wafer erforderlich. Vor einigen Jahren noch als undenkbar erachtet, werden heute große Entwicklungsanstrengungen unternommen, um dies mit entsprechender Ausbeute zu realisieren.

Auch wenn GaAs heute vorrangig für kommerzielle Zwecke eingesetzt wird, so ist es auch heute noch ein strategisches Material. Der Bedarf wird zukünftig verstärkt von der derzeitigen Weltpolitik beeinflusst werden, da dieses Material gegenwärtig nur noch von wenigen Firmen in der Welt hergestellt wird. Umso bedeutender ist es, dass all die Forschungs- und Entwicklungsprojekte am GaAs über die vielen Jahrzehnte durch eine kontinuierliche Förderung begleitet wurden und werden. Dem BMFT/ BMBF, BMVg, BMWi, den Bundesländern mit ihren Förderprogrammen z.B. in Bayern, Sachsen und Berlin sowie der EU sei an dieser Stelle gedankt. Wie bei allen Materialien werden die Entwicklungen von den Anwendungen getrieben. Sie benötigen jedoch eine sehr lange und kontinuierliche Erforschung auf der Material- und Verfahrensseite, welche viele Jahrzehnte dauern kann und von der heute die Anwendungen dann relativ schnell profitieren. Auch zukünftig führt es zu neuen Entwicklungen, die diese Eigenschaften in Anwendungen nutzen, die uns heute noch unbekannt sind.

Zusammenfassend kann man sagen: Der hauptsächliche Erfolg des GaAs liegt im:

- Material (direkter Halbleiter mit hoher Elektronenbeweglichkeit & EL2 als mitteltiefer Donator)
- Verfahren (Abdeckung der Schmelze mit Boroxid)
- Hilfsmaterialien (pBN-Tiegel)
- tiefgreifenden Verständnis der Physik und Chemie der Prozesse

und damit bei den Menschen, die all dies vorangetrieben, verstanden und umgesetzt haben, denen wir hiermit nochmals danken wollen. FCM mit seiner Geschichte ist stolz auf das erreichte und blickt optimistisch in die Zukunft. In dieser Publikation wurden bewusst keine Namen der beteiligten Personen erwähnt. Auch wenn viele hervorzuheben gewesen wären, es hätte am Ende den Umfang des Artikels gesprengt.

## Von Franken in die ganze Welt - Wie auf Schloss Pretzfeld die Siliziumrevolution begann

Th. Richter, J. Friedrich, Fraunhofer IISB, Erlangen

Kirschen, Edelbrände, Apfelmöste, Bier und gutes Essen - Pretzfeld, die Marktgemeinde im Herzen der Fränkischen Schweiz, ist bekannt für vielerlei kulinarische Genüsse und für ihre reizvolle landschaftliche Lage. Weit weniger bekannt sein dürfte hingegen die abenteuerliche Geschichte vom Siemens-Labor auf Schloss Pretzfeld und von den kreativen Wissenschaftlern und Technikern, die hier bahnbrechende Entwicklungsarbeit für die heutige und auch künftige Elektronik geleistet haben. Heute erinnert in Pretzfeld nicht mehr viel an die damit unmittelbar verbundene „Halbleiterei“ in dem mittelalterlichen Schloss und mitten im Schlossgarten. Deshalb wird es sicher nicht nur alteingesessene Franken überraschen, welchen technologischen Stellenwert einige der Erfindungen und Entwicklungen aus Pretzfeld bis dato immer noch besitzen.

### Der Anfang nach dem Ende

Berlin 1944. Der renommierte Industriephysiker Prof. Walter Schottky, unter anderem Entdecker des nach ihm benannten Schottky-Effektes, flieht mit seiner Familie aus der Bombenhölle, sein Labor bei Siemens & Halske liegt in Schutt und Asche. Zuflucht findet Schottky in der Fränkischen Schweiz in Pretzfeld und er bekommt von Siemens ein eigenes Dienstzimmer auf dem alten Pretzfelder Schloss (siehe Abbildung 1) zugewiesen. In Berlin sorgt sich unterdessen Siemens-Direktor Günther Scharowski um neue Standorte für die Werke von Siemens-Halske und Siemens-Schuckert. In Nürnberg gibt es mit den Siemens-Schuckert-Werken bereits einen großen Siemens-Standort. Leider sieht es im zerstörten Nürnberg ähnlich traurig aus wie in Berlin, die Nürnberger Schuckert-Werke sind ebenfalls schwer getroffen.

Gleich nebenan hatte Erlangen riesiges Glück im Unglück. „Erlangen woll'n wir schonen, nach dem Krieg drin' wohnen!“, so ein Erlanger Reim, und tatsächlich, während der alliierten Luftangriffe fällt hier nur eine einzige Bombe vom Himmel, versehentlich verloren und obendrein ein Blindgänger. Als Standort des großen Reinigerwerks, kriegsbedingt seit 1943 sogar Hauptzentrale der Siemens-Reinigerwerke, ist Erlangen bei Siemens durchaus keine unbekanntes Größe. So betreibt Günther Scharowski schließlich die Verlagerung

der gesamten Siemens-Konzernzentrale von Berlin nach Erlangen. Damit werden aber auch die Weichen gestellt, dass neben Walter Schottky noch weitere namhafte Siemens-Forscher und Physiker nach Franken kommen, eine historisch einmalig günstige Konstellation.



Abb. 1: Im Schloss in Pretzfeld, das 1145 erstmals urkundlich erwähnt wurde, wurde in den 1950er Jahren bahnbrechende Entwicklungsarbeit für die heutige und künftige Elektronik geleistet. Quelle: Karlheinz Loch, privat

Eine der Koryphäen, die auf diese Weise den Weg in die Fränkische Schweiz zu Walter Schottky finden, ist der Halbleiterforscher Dr. Eberhard Spenke. Spenke war schon vor dem Krieg Siemens-Mitarbeiter bei Schottky und beschäftigte sich unter anderem intensiv mit sogenannten Leistungsgleichrichtern, also elektronischen Bauelementen, die Wechselspannung in Gleichspannung umwandeln. Zu dieser Zeit gab es auch bereits erste Halbleiterbauelemente. Dies waren die sogenannten Trocken-Gleichrichter aus Materialien wie Kupferoxydul und Selen, die unauffällig und mehr oder weniger zuverlässig ihren Dienst in elektrischen Antrieben, Stromversorgungen oder Messgeräten verrichteten. In den letzten Kriegsjahren zeigte sich, dass die von den alliierten Flugzeugen eingesetzten Radarwellen nicht mehr detektiert werden konnten. Deshalb wurde damals bereits begonnen, an neuen Halbleitermaterialien und -bauelementen aus Germanium und Silizium zu forschen. Dies zeigte, wohin die Reise technologisch einmal gehen wird.

### Der Einzug ins Schloss

Nach dem Krieg beschäftigen sich weltweit einige Forschergruppen und Firmen mit Halbleitermaterialien und Halbleiterbauelementen, um die genauen Wirkmechanismen, also die Physik hinter den Bauelementen, zu verstehen und exakte theoretische Modelle für die Halbleitereffekte aufzustellen. Ganz zu schweigen von den Halbleitermaterialien selbst, deren Herstellung entwickelt werden musste. Vor diesem Hintergrund hatte sich Eberhard Spenke bei Günter Scharowski für die Gründung eines gesonderten Halbleiterlabors stark gemacht.

Für so ein Halbleiterlabor benötigt man aber einen geeigneten Platz, intakte Gebäude und Räume sind indes absolute Mangelware. Auch im unzerstörten Erlangen reicht es hinten und vorne nicht, die Siemens-Zentrale platzt aus allen Nähten. Man verweist Spenke kurzerhand auf Pretzfeld, wo ja bereits Walter Schottky auf dem Schloss untergekommen ist. Dieser mahnt nun seinerseits zur Eile, denn es sind Millionen Flüchtlinge und Vertriebene unterwegs und auch in Pretzfeld muss jederzeit mit dem Eintreffen von Neuankömmlingen gerechnet werden.

Wie abenteuerlich die ganze Situation war, beschreibt Spenkes Kollege und Stellvertreter Dr. Arnulf Hoffmann sehr treffend am 23.8.1946 in einem Brief an seine Frau: „Seit Mittwoch (21.8.) haben wir nun auch in Pretzfeld im Schloss oben ein Quartier eingerichtet, in dem wir einfach zwei Feldbetten mit Strohsäcken dort aufstellten. Leihweise haben wir auch die ersten Büromöbel bekommen, sodass wir hier auch sitzen und arbeiten können. Wir wohnen also auf einem „Schloss“. Doch ist es etwas ganz anderes als in Märchen. Der Wind pfeift durch die gesprungenen Scheiben. Und auch, wenn diese alle heil sein werden, wird es nicht weniger pfeifen. Nun ja, die Tatsache, dass wir letztlich einen alten Pferdestall zum Wohnen dem Schloss vorziehen, sagt genug.“

Mit viel persönlichem Einsatz und Improvisationstalent richten sich die Wissenschaftler schließlich in den historischen Räumen des 1145 erstmals urkundlich erwähnten Pretzfelder Schlosses ein. Als Ziel wird ihnen zunächst mit auf den Weg gegeben, den oben bereits erwähnten Selengleichrichter zu perfektionieren, damit in Berlin die Produktion wieder ins Rollen kommt. Das gelingt mit Bravour und die Forscher lernen auch endlich, den Funktionsmechanismus hinter dem Gleichrichtereffekt zu verstehen.

Für die wichtigen Siemens-Geschäftsfelder in der Erzeugung, Verteilung und Nutzung von elektrischer Energie soll das Pretzfelder Labor aber auch möglichst rasch neue Produkte entwickeln. Ob Kraftwerke, Netztechnik, Züge, Straßenbahnen, überall werden dringend neue elektronische Bauelemente für hohe elektrische Leistungen, sprich für die Leistungselektronik, benötigt, die es so noch gar nicht gibt.

### Die Suche nach dem Stein der Weisen

Einen Tag vor Weihnachten 1947 platzt in Murray Hill, New Jersey, die Bombe. Die Amerikaner John Bardeen, Walter Brattain und William Shockley präsentieren in den berühmten

„Bell Laboratories“ ihren ersten funktionsfähigen Transistor aus Germanium. Auch wenn sie selbst noch gar nicht richtig verstehen, wie dieser Transistor funktioniert, ist es doch der Beginn einer ganz neuen Ära. Transistoren stellen heute den Grundbaustein moderner Mikrochips dar. Für ihre Erfindung erhalten Bardeen, Brattain und Shockley 1956 den Nobelpreis für Physik. Germanium ist plötzlich weltweit angesagt und verschiedenste Forschergruppen beschäftigen sich mit diesem Halbleiter. Sogar der erste Mikrochip, der aus mehreren solcher Transistoren besteht und den der Amerikaner Jack Kilby ein Jahrzehnt später im Herbst 1958 präsentierte, war noch mit Germanium aufgebaut. Auch Jack Kilby wird für seine Leistung mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Umso erstaunlicher erscheint vor diesem Hintergrund der Weg, den die Pretzfelder Forscher gingen. Wie fast überall unternehmen auch die Pretzfelder zunächst Experimente mit Germanium. Eberhard Spenke ist aber schon damals der Meinung, dass Germanium zwar eine schnelle Lösung wäre, um rasch Produkte in den Markt zu bringen, aber langfristig gesehen kein Potential hat. So scheidet für Spenke dieser Halbleiter als ungeeignet für die Leistungselektronik aus und er setzt ab 1952 komplett auf das Halbleitermaterial Silizium. Die Arbeit mit Silizium gilt in Pretzfeld zunächst als technologisch „hoch riskant“. Aufgrund seiner viel höheren Schmelztemperatur ist Silizium sehr viel schwieriger zu verarbeiten als das beliebte Germanium. Und es gibt Silizium nicht in der notwendigen Reinheit und Perfektion. Aber das Material hat handfeste Vorteile. Silizium ist im Gegensatz zu Germanium gut verfügbar. Silizium gibt es sprichwörtlich wie Sand ( $\text{SiO}_2$ ) am Meer. Es besitzt auch bessere elektrische Eigenschaften, und Siliziumbauelemente können bei höheren Temperaturen arbeiten als vergleichbare aus Germanium. Spenke setzt also goldrichtig auf Silizium, eine mutige Entscheidung mit weitreichenden Folgen.

### Nicht nur sauber, sondern reinst und perfekt!

Doch die Sache mit dem Silizium hat einen Haken. Halbleiter-Elektronik funktioniert nur, wenn das Silizium extrem rein ist. Erst dann kann der elektrische Widerstand durch Zugabe von Fremdatomen gezielt eingestellt werden. Heute wird Silizium mit einer Reinheit von 99,9999999 % verlangt. Umgerechnet entspricht diese Reinheit, wenn es auf der Erde unter 8 Milliarden Männern gerade mal 8 Frauen geben würde oder umgekehrt.

Hohe Reinheit alleine reicht aber noch nicht aus, denn damit ein Halbleiter elektrisch funktioniert, muss er außerdem über eine perfekte Anordnung seiner Atome verfügen, er muss ein „Einkristall“ sein. In einem perfekten Einkristall kann der elektrische Strom dann so gut wie ungestört fließen.

Vor diesem Hintergrund waren die Forscher in Pretzfeld sicher alles andere als begeistert, sich in einem alten, zugigen Schloss einzurichten (siehe Abbildung 2) und dort ihre empfindlichen Apparaturen aufzustellen. Doch die Halbleiterpioniere lassen sich nicht so leicht aus der Fassung bringen.



### Halbleiterfertigung in den historischen Räumen!



### Halbleiterfertigung heute im Reinraum des Fraunhofer IISB

Abb. 2: oben) Halbleiterfertigung in den historischen Räumen des Pretzfelder Schlosses. Quelle: Karlheinz Loch, privat; unten) Halbleiterfertigung heute im Reinraum des Fraunhofer IISB. Quelle: Kurt Fuchs, Fraunhofer IISB

#### Vom Obstbrand zum Reinstsilizium

Wenn die Reinheit des Siliziums das Geheimnis ist, so liegt der Schlüssel in der Reinigung. Die Pretzfelder Forscher wählten ein in der Chemie und insbesondere in der Gegend um Pretzfeld bestens bekanntes Verfahren, um das Silizium von den hartnäckigen Verunreinigungen zu trennen, die Reinigung durch Destillation. Bloß wie soll man metallisches Silizium destillieren? Anders als der Alkohol im Schnaps, der schon bei knapp  $80^{\circ}\text{C}$  verdampft, fängt Silizium bei schlappen  $1410^{\circ}\text{C}$  gerade einmal an, zu schmelzen. Die Lösung ist so einfach wie genial. Zunächst erfolgt die Umwandlung des Rohsiliziums, was man durch eine Reaktion zwischen Koks und Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) gewinnt, in eine bei Raumtemperatur flüssige Siliziumverbindung, das Trichlorsilan (ein Silizium-Atom mit

drei Chloratomen und einem Wasserstoffatom). Anschließend findet dann die Reinigung des Trichlorsilans durch Destillation bei  $32^{\circ}\text{C}$  statt, nicht viel anders als bei den berühmten Pretzfelder Obstbränden. Mit einem speziellen thermischen Verfahren wird das gereinigte Trichlorsilan schließlich wieder in festes, jetzt aber hochreines Silizium zurückgewandelt.

Das Siemens-Verfahren erregte damals weltweit großes Aufsehen und in der Folge schlossen eine Vielzahl namhafter Hersteller von Halbleitergrundmaterial dazu Lizenzvereinbarungen mit Siemens. Heute heißt diese Art der Herstellung von Reinstsilizium immer noch schlicht und einfach „Siemens-Prozess“ und es werden weltweit ungefähr 450 000 Tonnen Reinstsilizium mit dem in Pretzfeld entwickelten Verfahren hergestellt.

### Vom Reinstsilizium zum perfekten Kristall

Der Siemens-Prozess liefert zwar Reinstsilizium. Jedoch besteht es aus vielen kleinen Kristallen. Für elektronische Anwendungen muss dieses sogenannte „polykristalline“ Silizium noch zu großen, perfekten Einkristallen weiterverarbeitet werden. Die Pretzfelder erfanden dazu ein berührungsloses Verfahren, das sogenannte tiegelfreie Zonenziehen. Ein senkrecht an beiden Enden eingespannter Kristallstab wird in einem schmalen Bereich durch eine Induktionsspule erwärmt, bis sich eine schmale Schmelzzone bildet. Die Spule bewegt sich dabei langsam entlang des Kristallstabes und mit ihr die Schmelzzone. Bei der Abkühlung und Erstarrung der Schmelzzone „rekristallisiert“ der Siliziumstab schließlich Stück für Stück zu einem perfekten Einkristall (siehe Abbildung 3). Die Pretzfelder waren allerdings nicht die einzigen, die am Zonenziehen arbeiteten. Fast zeitgleich wurde es in den USA entwickelt.

Bis in die 1980er Jahre war das tiegelfreie Zonenziehen das dominierende Herstellungsverfahren für Siliziumkristalle. Heute spielt das Pretzfelder Verfahren allerdings nur noch für Kristalle für spezielle Leistungsbaulemente eine Rolle, die etwa 5 % des Weltmarktes entsprechen. Man hatte nämlich in den 80er Jahren festgestellt, dass spezielle Verunreinigungen förderlich sind für die Bauelemente und diese mit einem anderen Kristallherstellungsverfahren einfacher in den Siliziumkristall eingebaut werden können.

### Das Wiesental, das erste „Silicon Valley“?!

Die Verfügbarkeit der Technologien zur Herstellung von Reinstsilizium und zur Herstellung von Einkristallen brachte den technologischen Durchbruch. In der Halbleiterszene ist Pretzfeld plötzlich weltweit bekannt. Schon 1954 statten die Erfinder des Germanium-Transistors und späteren Nobelpreisträger Bardeen und Brattain dem Team um Schottky und Spenke im „famous Pretzfeld“ einen persönlichen Besuch ab. In der nächsten Dekade setzen die Pretzfelder Pioniere eine Reihe von Meilensteinen und Rekorden. So gelingt in den Jahren 1954 bis 1956 die Entwicklung des ersten Silizium-Leistungsgleichrichters und des ersten Silizium-Leistungstransistors. 1965 wird der erste Silizium-Thyristor in Scheibenbauform, ein Stromventil für sehr hohe Leistungen, vorgestellt und ist die Sensation auf der Hannovermesse. In der Folge werden immer höhere Spannungen und Ströme erreicht. Die Entscheidung der Pretzfelder, auf Silizium zu setzen, erweist sich als richtungsweisend für die gesamte Elektronik.

### Made in Pretzfeld

Viele Anlagen und Kraftwerke auf der ganzen Welt enthalten Silizium-Leistungsbaulemente aus Pretzfeld, beispielsweise in Brasilien, Kanada, China, Deutschland, Indonesien, Libyen, Österreich, Saudi Arabien oder den USA. Ein technischer Meilenstein war dabei das Wasserkraftwerk in Cabora Bassa, Mosambik, das 1975 mit damals modernster Technik für die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) in Betrieb ging. Für diese HGÜ-Technik kamen die Scheibenthyristo-

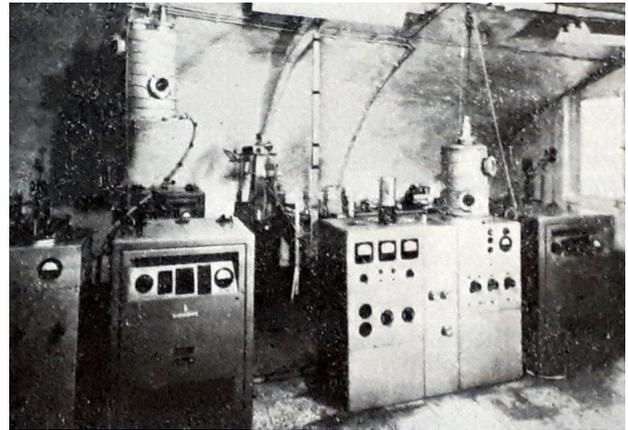


Abb. 3: oben) Foto der Kristallzieherei in Pretzfeld um 1955 mit Anlagen zur Einkristall-Herstellung durch des tiegelfreie Zonenziehen. Quelle: Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Eberhard Spenke, 1965. unten) Foto einer heutigen Anlage für das tiegelfreie Zonenziehen. Quelle: PVA Crystal Growing Systems GmbH.

ren aus Pretzfeld zum Einsatz. Die für die Kontaktierung der Scheibenthyristoren verwendeten Federkontakte wurden ebenfalls in Pretzfeld erfunden. Damit konnten Zuverlässigkeitsprobleme, die beim sonst üblichen Löten auftraten, beseitigt werden. Heute sind Federkontakte immer noch ein weltweiter Standard bei der Kontaktierung von Leistungsbaulementen und kompakten Leistungsmodulen.

Das Halbleiterlabor auf Schloss Pretzfeld konnte noch relativ lange seine Unabhängigkeit wahren und dabei munter weiterwachsen. 1969 sollte allerdings ein Großteil der Pretzfelder Silizium-Entwicklung mit mehr als 100 Mitarbeitern nach München gehen. Doch in München gibt es anscheinend

technologische Probleme. Die Pretzfelder dagegen fertigen weiter Silizium-Leistungsbaulemente mit so guten Ergebnissen, dass die Fertigung in Pretzfeld ab 1970 wieder ausgebaut wird. So entstehen hinter dem Schloss und mitten im Schlossgarten neue Fabrikhallen. 1990 beschließen Siemens und die AEG, ihre Aktivitäten im Bereich der Silizium-Leistungsbaulemente unter dem Namen eupec zu vereinen. Ab sofort firmierten auch das Labor und die Fertigung im Pretzfelder Schloss als eupec. 1997 kommt eine weitere Innovation aus Pretzfeld, ein lichtgezündeter Thyristor. 1998 erhält Siemens Aufträge für HGÜ-Anlagen in China, Thailand und Malaysia und lässt noch einmal eine neue, größere Fertigungshalle in Pretzfeld bauen. Aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen fällt aber 2002 die Entscheidung, den Halbleiter-Standort in Pretzfeld aufzugeben und zu schließen.

#### Halbleiterforschung und Leistungselektronik in Franken heute

Das Ende der Halbleiterproduktion in Pretzfeld ist aber nicht das Ende der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Halbleitertechnologie und Leistungselektronik in Franken. So forschen seit über 40 Jahren Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg an neuen Materialien, Verfahren und Bauelementen für die Mikro- und Leistungselektronik. Und gleich daneben gibt es seit fast 35 Jahren mit dem Fraunhofer IISB in der Schottkystraße in Erlangen sogar ein eigenes Institut, das sich ganz den Halbleitermaterialien und der Leistungselektronik verschrieben hat. Aktuell entwickeln die Ingenieure des Fraunhofer IISB technische Lösungen für die Mobilität der Zukunft sowie für nachhaltige Energieerzeugung, -verteilung und -speicherung, angefangen von neuen Halbleitermaterialien, über neue Bauelemente bis hin zum kompletten Systemen. Ein Schwerpunkt dabei bilden leistungselektronische Lösungen auf Basis sogenannter Verbindungshalbleiter, d.h. chemische Verbindungen, die z.B. aus zwei Elementen der 4. Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente bestehen, wie Siliziumkarbid, oder aus Elementen der 3. und 5. Hauptgruppe, wie Aluminiumnitrid. Diese Verbindungshalbleiter wurden im Übrigen ebenfalls in den Labors der Siemens-Schuckertwerke in Franken Anfang der 1950iger Jahre von Heinrich Welker erfunden.

Das strategische Dach für diese Forschungsaktivitäten ist das Leistungszentrum Elektroniksysteme, kurz LZE. Das LZE ist eine gemeinsame Initiative der beiden Fraunhofer-Institute IIS

und IISB sowie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), zusammen assoziierten Partnern aus der Industrie. In der Region um Erlangen und Nürnberg findet sich eine europaweit einmalige Konzentration an Forschungs-kompetenz und Industrielandschaft zu Elektronik und Elektroniksystemen. Ergänzt wird dies durch das European Center for Power Electronics (ECPE), das europäische Industriennetzwerk im Bereich Leistungselektronik mit Sitz in Nürnberg ist. Das ECPE bündelt seinerseits die industriellen Aktivitäten der Unternehmen im Bereich der Leistungselektronik in der Metropolregion. Alleine im Bereich der Leistungselektronik sind hier ungefähr 40 000 Beschäftigte in rund 200 Firmen tätig.

#### Weißt Du, wieviel Sternlein stehen?

Wie sähe das moderne Leben ohne Elektronik aus? Sicher sehr viel weniger modern, als den meisten Menschen lieb wäre. Elektronik ist heute allgegenwärtig und in vielen Bereichen sogar unverzichtbar. Ob Internet, Informationsverarbeitung, Energieversorgung, Telekommunikation, Massenmedien, Medizintechnik, Verkehrswesen und vieles mehr; es ist bald einfacher, die Lebensbereiche zu nennen, in denen die Halbleiterelektronik noch nicht Einzug gehalten hat. Die Leistungsfähigkeit aktueller Computer wäre ebenso undenkbar wie die Verbreitung mobiler, batteriebetriebener Elektronikgeräte. Den meisten Menschen ist vielleicht gar nicht bewusst, wie sehr sich das Leben durch die Elektronik verändert hat und wie schnell es sich immer weiter verändert. Die Mikroelektronik auf Siliziumbasis hat die dritte industrielle Revolution ins Rollen gebracht und mit dem Siegeszug der Digitaltechnik vollzieht sich gerade die vierte. Die Basis ist, wie oben erwähnt, der Silizium-Transistor. Ein heutiger Chip enthält etwa 10 Milliarden solcher winzigen Transistoren. Bis heute wurden weltweit insgesamt etwa 10 Trilliarden Transistoren ( $10^{22}$ ) hergestellt und damit genauso viel, wie es vermutlich Sonnen im gesamten Universum gibt. Und es kommen täglich unzählige Mikrochips mit Milliarden von Transistoren dazu. All dies wäre nicht möglich ohne die Pretzfelder Errungenschaften. Inmitten der fränkischen Schweiz in Pretzfeld, in einem Nachkriegsprovisorium auf einem alten Schloss, schrieben einige Halbleiterforscher diese Elektronikgeschichte. So lebt in jedem dieser Transistoren das Erbe der Halbleiterpioniere von Pretzfeld weiter.

Wer hätte das gedacht?

## Mitglieder 2019, zweite Jahreshälfte

Wir begrüßen seit dem 30.06.2019 als neue Mitglieder (Stand 19.12.2019):

**Neumitglieder / Privatpersonen:** siehe S. 34

**Neumitglieder / Firmen:**

ChemPur Feinchemikalien und Forschungsbedarf GmbH, Dr. Marcel Hagel  
Bamac Electric GmbH, Andreas Nebelung

Karlsruhe  
Oberhausen

## DGKK-Nachrichten

### Impressionen von der ICCGE-19/OMVPE-19 in Keystone, USA

Matthias Arzig, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Fürth

Wissenschaftler aus der ganzen Welt sind in diesem Jahr dem Ruf der American Association for Crystal Growth (AACG) in die hohen Berge der Rocky Mountains gefolgt. In Colorado auf einer Höhe von 2800 m und umrahmt von einem herrlichen Bergpanorama liegt der Ferienort Keystone, der mit der ICCGE-19 nun schon zum vierten Mal eine Konferenz zur Kristallzüchtung beheimatet. Ein angenehmes Klima, eine schöne Natur, zahlreiche Freizeitmöglichkeiten um das Konferenzzentrum und in erster Linie natürlich ein spannendes und vielseitiges Programm sorgten für eine gut besuchte Tagung. Auch in diesem Jahr wurde zusammen mit der ICCGE der „US Biennial Workshop on Organometallic Vapor Phase Epitaxy“ (OMVPE-19) durchgeführt. Damit ergab sich ein Programm aus insgesamt 26 Sitzungen, von denen bis zu sieben parallel stattfanden.

Eröffnet wurde die Konferenz von den „Conference Chairs“ Vincent Fratello und Jeffrey Derby. Nach der Begrüßung hielt Bob Feigelson einen Vortrag anlässlich des 50-jährigen Jubiläums der AACG. Sein mit netten Anekdoten und tollen Fotos gespickter Vortrag gab einen geschichtlichen Überblick, nicht nur über die Geschichte des AACG, sondern auch darüber, wie sich die Kristallzüchtung im Allgemeinen zu einer eigenständigen Disziplin in der Wissenschaft entwickelte. Als erste Konferenz, bei der Wissenschaftler aus verschiedenen Bereichen zusammenkamen, um über die Kristallzüchtung zu diskutieren, gilt die „Discussions of the Faraday Society“ aus dem Jahr 1949. Dort kamen unter anderem Wissenschaftler mit bekannten Namen wie N.F. Mott, I.N. Stransky, W.K. Burton, N. Crabrera oder F.C. Frank zusammen. Die erste internationale Konferenz zu Kristallwachstum, die den Start für eine Reihe von Konferenzen und damit auch den „Urahn“ zur ICCGE-19 darstellt, war die von Michael Schieber im Jahr 1966 organisierte ICCG-1 in Boston. Michael Schieber war bestrebt, die Kristallzüchter in den USA zu vernetzen. Er besuchte Bob Laudise und Ken Jackson bei den Bell Labs, um ihnen von seiner Idee der Gründung einer Vereinigung der Kristallzüchter zu berichten, konnte sie aber nicht überzeugen. So dauerte es noch bis zum Jahr 1969, bis die AACG gegründet und die erste American Conference on Crystal Growth (ACCG-1) abgehalten wurde. Bob Feigelson, der selbst „Chair“ der ACCG-3 war, zeigte des Weiteren viele Fotos der abgehaltenen Konferenzen und verdeutlichte dabei die Feierfreudigkeit des AACG. Am eindrücklichsten waren dabei die Pool-Partys, die zwischenzeitlich eine Art Tradition waren.

Nach diesem Ausflug in die Vergangenheit hielt Thierry Dufar den zweiten plenary talk mit dem Titel „Defect Engineering in Bulk Crystal Growth“. Er beschrieb die Prozessentwicklung aus einer sehr industrienahen Sichtweise. Optimale

Züchtungsparameter stellen unabhängig von Material und Methode immer einen Kompromiss aus vielen Faktoren wie beispielsweise Wachstumsrate, Grenzflächenstabilität, Defektdichte usw. dar. Am Beispiel von Sn-dotiertem InP zeigte er, wie mit relativ einfachen Plots ein Prozessfenster gefunden wurde, um Kristalle mit hoher Qualität bei möglichst hoher Wachstumsrate zu züchten. Die von ihm „process charts“ genannten Diagramme sind einfach und funktionieren prinzipiell für jedes System. Die Schwierigkeit ist aber, alle Zusammenhänge, die das Kristallwachstum beeinflussen, zu bestimmen.



Fig. 1: Keystone von oben umrahmt von den hohen Bergen der Rocky Mountains. Foto: M. Arzig

In der plenary session am zweiten Konferenztag wurden drei Preise vergeben. Darrell Schlom (Cornell University, USA) und Reinhard Uecker (Leibniz Institute for Crystal Growth, DE) erhielten den Frank-Preis für ihren Beitrag bei der Entwicklung neuer Perovskit-Substratmaterialien, die das „strain engineering“ neuer funktionaler Oxide ermöglicht haben.

In ihrem gemeinsamen Festvortrag beschrieb zuerst Darrell Schlom einprägsam seine Odyssee bei der Suche nach passenden Substraten. Dabei lernte er ungewollt bei den Bell Labs, wie sich das Geräusch des Generators ändert, wenn man seinen Iridium-Tiegel versehentlich aufschmilzt. Letztendlich fand er aber zum IKZ Berlin, wo er bei einem Besuch Reinhard Uecker kennenlernte, der ihm endlich Kristalle mit den ersehnten Gitterparametern züchten konnte. Reinhard Uecker berichtete über die Herausforderungen bei der Herstellung der ersehnten neuen Materialien mit Gitterparametern größer als die bis dato erhältlichen 3.9 Å. Die Kristallisation verschiedenster Seltenerdvanadaten und weiteren Materialien wie beispielsweise LaLuO<sub>3</sub> und SAGT war die Grundlage, um mittels „strain engineering“ Oxid-Dünnschichten mit neuartigen Eigenschaften herzustellen. So wird zum Beispiel das normalerweise dielektrische EuTiO<sub>3</sub> zum stärksten bekannten ferroelektrischen Ferromagnet, wenn es stark verspannt

auf  $\text{DyCO}_3$ -Substraten abgeschieden wird.

Kazuo Nakajima wurde der Laudize Prize verliehen für seinen Beitrag bei der Entwicklung von hochqualitativen Kristallen für quarternäre optische Halbleiter und bei der Entwicklung von Silizium für Solarzellen und der industriellen Anwendung. In seiner Festrede wurde die Wichtigkeit hochwertiger quarternärer II-V-Halbleiter für moderne Kommunikationssysteme deutlich. Außerdem zeigte er, wie mit der „dendritic casting method“ hochwertiges Silizium Solarzellenmaterial produziert wird.

Anton Jesche von der Universität Augsburg wurde für seine innovativen Entwicklungen im Bereich der Kristallzüchtung von komplexen magnetischen Materialien mit dem Schieber-Preis ausgezeichnet. In seiner Festrede stellte er die vielseitigen Aktivitäten seiner Forschungsgruppe „Übergangsmetallverbindungen mit orbitalen magnetischen Momenten“ vor. Beispielsweise wurde ein Rückkopplungssofen entwickelt, der in-situ Phasenübergänge durch Widerstandsänderungen detektieren kann. Eindrucksvoll war vor allem ein kurzes Video, das zeigte, wie bei der „flux-growth“ Methode die Kristalle vom geschmolzenen Material getrennt werden können, indem die noch rot glühende Quartz Ampulle direkt aus dem Ofen schnell in eine Zentrifuge gegeben wird.

Die Postersessions am Abend, die gemeinsam mit der Industrieausstellung stattfanden, waren gut besucht. Möglicherweise hat viele auch das gesponserte Buffet gelockt, nachdem für das Mittagessen auf der Tagung 15\$ verlangt wurden.

Von den für die erste Session angekündigten 79 Postern wurden viele kurzfristig abgesagt und leider nur 28 auch wirklich vorgestellt. Bei der zweiten Postersession war mit 45 vorgestellten Postern dann etwas mehr geboten. Den Preis für das beste Poster gewann Nikola Basinova von der „Czech Academy of Sciences“ aus Prag für ihren Beitrag mit dem Titel: „Determination of  $\text{Zn}^{2+}$  supersaturation in the growth solution for the synthesis of ZnO nanorods“. Mittels Titration bestimmte sie die Übersättigung der Zink-Ionen in der Lösung und wie sich diese beim Wachstum der ZnO-Nanorods ändert.

Den Mittwochnachmittag haben die Organisatoren freigehalten, damit die Konferenzteilnehmer die Umgebung erkunden können. Wer wollte, konnte sich zwei vorgeschlagenen Aktivitäten anschließen. Es bestand die Möglichkeit, bei einer Kutschfahrt die Natur auf sich wirken zu lassen und für die Teilnehmer, die etwas mehr Abenteuer erleben wollten, wurde eine Wildwasser Rafting Tour angeboten. Abgesehen davon bot auch der Ferienort an sich verschiedenste Möglichkeiten der Freizeitgestaltung. So konnte man zum Beispiel die ausgezeichneten Downhillstrecken am nahe gelegenen Skiberg herunterrasen, oder bei einer ausgedehnten Wanderung den Einfluss der dünnen Höhenluft auf die Kondition erleben.

Für das Konferenzdinner wurden einige Karten wieder zurückgegeben, wodurch viele Studenten, die eigentlich kein Ticket gekauft hatten, die Möglichkeit bekamen kostenlos mit dabei zu sein. Das Dinner fand auf einer Ranch im Freien statt, umrahmt von Ställen und Weiden, wo sich kleine Ponys und riesige Pferde tummelten. Das Wetter spielte mit und

3|5  
power electronics



**3-5 Power Electronics  
GmbH**

Gostritzer Str. 61 – 63,  
01217 Dresden  
Tel.: +49 (0)351 8728200,  
Fax: +49 (0)351 8728202  
E-Mail: info@3-5pe.com



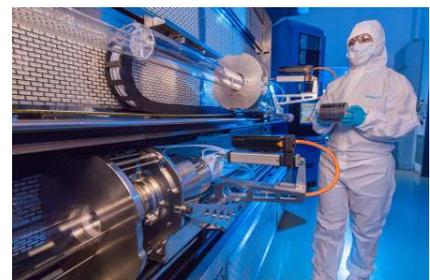
## Der Spezialist für directWide-Band Gap Dioden

Anwendungsorientierte Entwicklung von  
Gallium Arsenid Leistungshalbleitern

Durchbruchspannungen 400V – 1700V  
Stromtragfähigkeit bis 100A pro Chip

Hoher Wirkungsgrad Bestes Preis/  
Leistungsverhältnis

Herstellungsverfahren und  
Baulemente  
Weltweit patentiert



so wären die aufgestellten Zelte gar nicht nötig gewesen. Ein amerikanisches Barbecue mit einer großen Auswahl an Fleisch, Fisch und Gemüse wurde aufgefahren und an den Bars fand jeder ein passendes Getränk. Nach dem ausgedehnten Mahl und ein paar Dankesworten der Organisatoren animierten verschiedenste Spiele wie Hufeisenwerfen oder Lassowerfen, den inneren Cowboy zu befreien. Nach dem prächtigen Sonnenuntergang konnte man sich dann am Lagerfeuer wärmen, bis die Shuttles nach und nach alle Gäste wieder wohlbehalten zu den Hotels brachten.

Insgesamt war es eine tolle Konferenz mit einer Vielfalt an Themen. Die breit gefächerte Themenauswahl der Beiträge aus den verschiedensten Bereichen der Kristallzüchtung motivierte, den eigenen Horizont zu erweitern und kreative neue Ideen für die eigenen Problemstellungen zu finden. Die hiesigen Aktivitäten im Bereich der Kristallzüchtung wurden mit 36 Beiträgen aus Deutschland international vertreten.

Ich möchte mich bei der DGKK für den Reisekostenzuschuss

bedanken, der es mir ermöglicht hat, meine Ergebnisse einem internationalen Publikum zu präsentieren.



Fig. 2: Sonnenuntergang beim Konferenzdinner. Foto: M. Arzig

## Bericht zur ISSCG-17 in Granby, Colorado, USA

Jan Phillip Wöhrle, Kristallographie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Die 17. International Summer School on Crystal Growth fand in diesem Jahr vom 21. bis zum 26. Juli in Granby (Colorado, USA) statt. Granby ist ein kleines Städtchen in den Rocky Mountains mit dem typischen Kleinstadtcharme, wie man ihn aus vielen Filmen kennt - breite Straßen, kleine Häuschen und weite Blicke über die Hochebene. Tagungszentrum war die YMCA Snow Mountain Ranch, eine Art Familienresort, die durch ihr Angebot von Freizeitaktivitäten wie Reiten, Mini-golf, Tennis, Mountainbiken und vielem mehr auch das Kind in jedem Wissenschaftler begeisterte. Besonders außergewöhnlich war das Spielen mit den Huskys.

Organisiert wurde die diesjährige Summer School von Thomas F. Kuech (Pennsylvania State University, USA) und Joan M. Redwing (University of Wisconsin-Madison, USA). Die einwöchige Schule war von Montag bis Freitag gefüllt mit hochinteressanten Vorlesungen, die ein sehr großes Spektrum an Grundlagen der Kristallzüchtung abdeckten.

Tag 1 - Feigelson & Klimm: Nach der Anreise am Sonntag und der Zuteilung der Zimmer, begann die Summer School am nächsten Tag mit einem spannenden Vortrag über die Geschichte der Kristallzüchtung, gehalten von Robert Feigelson (Stanford University, CA, USA). Sein Vortrag lehrte uns sehr detailliert, wie die Kristallzüchtung entstanden ist, beginnend mit „Wer waren die ersten Kristallzüchter?“. Gaius Plinius Secundus Maior, auch Plinius der Ältere genannt, schrieb zwischen 77-79 v. Christus in seinem Werk „Naturalis Historia“ die Herstellung von Vitriol, welches zu der damaligen Zeit vor allem in der Medizin und als Färbemittel Verwendung fand. Dies ist somit der älteste erhaltene Text, der die Kristallzüchtung von Menschenhand beschreibt. Weiter ging es mit den physikalischen Grundlagen und der Theorie der

Kristallzüchtung, über Röntgenbeugung am Kristallgitter, die grundlegenden Kristallstrukturen, bis hin zu den heutigen Grundzüchtungsmethoden, die Herr Feigelson sehr detailliert erklärte.

Zweiter Redner am Montag war Detlef Klimm vom Leibniz-Institut für Kristallzüchtung in Berlin. Herr Klimms Bestreben war es, den Zuhörern die Grundlagen und Unterschiede von 1-, 2-, und Mehrkomponentensystemen (wieder) beizubringen. Auf den ersten Blick mag das eine recht trockene Materie sein, aber Herr Klimm hat sich sehr viel Zeit genommen und mit großer Begeisterung die Grundlagen der Thermodynamik und Phasenübergänge erläutert.

Nach dem Abendessen fand die erste Poster Session der Summer School statt und bot Gelegenheit, sich mit den jungen Kolleginnen und Kollegen (die aus allen Teilen der Welt kamen: Europa, Asien, Australien und selbstverständlich aus den USA) sowie mit den Dozenten auszutauschen und besser kennenzulernen.

Tag 2 - Derby, Vlieg & Lan: Am zweiten Tag wurde auch wieder viel geboten. Jeffrey Derby (University of Minnesota) begann mit einer seiner großen Leidenschaften: den Transportphänomenen im Kristallwachstum. Neben den verschiedenen Transportmechanismen (diffusiver Transport, Strömungen, Randbedingungen et cetera) und der mathematischen Betrachtung dieser Zustände wie die Navier-Stokes-Gleichung und numerischen Simulationen, waren weiterer Hauptpunkte die uns Herr Derby näherbringen wollte, beispielsweise die klassische Segregationsanalyse, oder die Hürden, die „in situ“ Beobachtungen und Überprüfungen während des Kristallwachstums mit sich bringen. Zudem erklärte er uns, dass sich manch eine Fragestellung mit Beobachtungen aus

der Natur beantworten lässt (wie z.B. ein Lee-Wellen Vortex in der Kristallschmelze).



Fig. 1: Freizeit während der Summer School Foto: M. Roder

Zweiter Redner war Elias Vlieg aus den Niederlanden (Radboud University Nijmegen). Sein Thema war auch die Thermodynamik, aber mit Augenmerk auf die Keimbildung. Neben Grundlagen wie Keimbildungsgrenze, heterogener und homogener Nukleation, BFDH Theorie, Kossel Model und Spiralwachstum, ging er auch auf die Nanowire Technik und vor allem auf diverse nicht-klassische Keimbildungsvorgänge, wie zum Beispiel die Bildung eines Keimkristalls innerhalb eines Postcritical Nucleus ein.

Der letzte Vortragende des Tages war Chung-Wen Lan von der National Taiwan University mit dem Titel „Bulk Crystal Growth from Melt“. Neben einem ausführlichen Überblick über die verschiedenen Züchtungsmethoden und die Kristall-Markturnsätze (Halbleiter und PV 93%; Szintillatoren und Kristalle für optische Anwendungen jeweils 2%; Kristalle für akustische und Laser Anwendungen jeweils 1%) ging Herr Lan sehr detailliert auf die diversen Faktoren ein, die das Kristallwachstum beeinflussen können - positiv wie negativ. Neben Tiegelmaterialeigenschaften, Meniskus- und Durchmesserkontrolle, der Facettierung und Unterkühlungsphänomenen, ging Lan auch auf den Einfluss der Schmelzrotation, der Ziehgeschwindigkeit und von verschiedenen magnetischen Feldern

sowie anderen externen Kräften ein. Wie am Vortag folgte nach dem gemeinsamen Abendessen eine weitere Poster Session.

Tag 3 - Goorsky & Kurtz: Am Mittwoch startete Mark Goorsky von der University of California mit seinem Vortrag über „Defekte und Verunreinigungen“ in der Kristallzüchtung. Nach den Basics wie den verschiedenen Defektarten ging Goorsky größtenteils auf die elektronischen Eigenschaften und Wirkung dieser ein und erklärte die Effekte auf die Bandstruktur, deep levels und der Ladungserhaltung ausführlich. Sehr interessant war auch der Rolle von peripheren Schäden und deren Einfluss auf das Kristallwachstum.

Im Anschluss hielt Sarah Kurtz von der UC Merced (School of Engineering, ebenfalls an der University of California) und dem NREL (National Renewable Energy Laboratory) einen Vortrag über Charakterisierung und in situ Beobachtung. Sie ging auf verschiedene Methoden ein (z.B. SIMS, FTIR, Röntgendiffraktometrie und in situ Reflexions-Spektroskopie) und erklärte die Vor- und Nachteile bzw. die Limitierungen dieser. Die „take-home message“ war: Man muss sich im Vorfeld genau mit der Fragestellung beschäftigen und wissen, was man beobachten möchte, um die dafür geeignetste Methode auswählen zu können“.

Der Nachmittag stand jedem frei zur Verfügung und man konnte sich bei den schon erwähnten Aktivitäten etwas vom hohen Input der letzten Tage erholen.

Tag 4 - Vekilov, Paskova, Uda & Schlom: Nach einem erholsamen Nachmittag in der unberührten Natur der Rock Mountains, war man wieder fit, um den Themen des vierten Tages aufmerksam zu folgen. Peter G. Vekilov (University of Houston) begann den Tag mit einem Vortrag über Lösungszüchtung. Auch hier gab es einen kleinen Exkurs in die Geschichte der Kristallzüchtung - eine der ältesten Lösungszüchtung war die Gewinnung von Salz mit Salzpflanzen, in denen Salzwasser so lange erhitzt wurde, bis nur noch eine feste Phase übrig war. Diese Technik wurde bereits im Mittelalter angewendet. Auch Herr Vekilov ging noch einmal sehr detailliert auf die Thermodynamik ein, aber mit Fokus auf die Kink Position im Kossel Modell und der Bildung atomarer Lagen.

Zweite Sprecherin des Tages war Tania Paskova von der North Carolina State University, die zu den Themen Epitaxie und Gasphasenzüchtung referierte. Hauptaugenmerk lag darauf, den Zuhörern die verschiedenen Methoden näher zu bringen - (H)VPE, MOCVD, MBE, PVT sind nur ein paar der erläuterten Techniken. Der zweite Teil Ihres Vortrags handelte davon, wie Materialeigenschaften diese Methoden beeinflussen, welche Hürden dadurch entstehen und wie man diese abschwächen kann.

Am Nachmittag ging es weiter mit dem Thema Volumenkristallzüchtung von Oxiden, gehalten von Satoshi Uda vom Institute for Materials Research an der Tohoku University (Japan). Neben weiteren Grundlagen wie dem Burton, Prim,

Schlichter (BPS) Modell und dem Einfluss von konstitutioneller Unterkühlung, wurde auch ausführlich der Unterschied zwischen kongruentem und nicht-kongruentem Schmelzen veranschaulicht.

Als letztes sprach Darrell G. Schlom mit dem Titel „Growth of Advanced Complex Oxides“. Herr Schlom (Cornell University) referierte voller Begeisterung über diese Materialien und deren Verwendungsmöglichkeiten, machte aber gleichzeitig wirklich klar: eins der wichtigsten Dinge für das Züchten dieser Kristalle mittels MBE (Zitat Schlom: „Atomic Spray Painting“) ist das richtige Substrat - ohne das geht es nicht. Neben seiner Arbeit an komplexen Oxiden schwärmte Herr Schlom besonders von den Möglichkeiten die PARADIM bietet. PARADIM steht für „Platform for the Accelerated Realization, Analysis, and Discovery of Interface Materials“ und ermöglicht Wissenschaftlern aus einem riesigen Fuhrpark an Züchtungs-, Analyse- und Auswertemethoden diejenigen zu verwenden, an welche sie sonst anderswo kaum Zugang bekämen. Es wird von der NSF, NASA und weiteren Forschungseinrichtungen geführt.

Am Abend gab es dann ein traditionelles amerikanisches Barbecue, bei dem man gemütlich zusammensitzen und über die Eindrücke der letzten Tage sprechen konnte.

Tag 5 - Fornari, Balushi & Roberts: Am letzten Tag dieser sehr lehrreichen Woche folgten noch drei weitere Vorträge. Der erste Sprecher war R. Fornari, gefolgt von Z. Al Balushi und K. Roberts. Herr Fornari (Universität Parma, Italien) weihte uns in die „Geheimnisse“ der Epitaxie von „Energy Materials“ ein. Bandgap tuning, Tandem-Solarzellen, Thermo-PV Anwendungen und die „Multi Quantum Well“-Technologie sind nur einige Beispiele. Momentan forscht Herr Fornari an  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , welches als alternatives Halbleitermaterial für Hochleistungselektronik interessant sein könnte. Das Problem: es gibt fünf bekannte Polymorphe, aber die Wissenschaft hat sich bisher hauptsächlich mit der Beta-Modifikation beschäftigt.

Zakaria Al Balushi von der Berkeley Universität in Kalifornien (USA) hielt einen sehr interessanten Vortrag über „Low

Dimensional Materials“. Hinter diesem Titel versteckt sich in erster Linie die Erforschung von Graphen. Balushi erklärte den Zuhörern, was die Vorteile dieses Materials sind, wie man es herstellt (z.B. die „Roll-to-Roll Methode“ oder via Epitaxie) und wie man die Domänengröße in CVD Graphen kontrolliert. Der letzte Redner war Kevin J. Roberts von der Universität Leeds (UK) mit dem Thema: „Crystal Growth of Micro-Particulate Materials“. Die pharmazeutische Kristallzüchtung hat mittlerweile eine wichtige Rolle in der Industrie eingenommen und die Kristallographie ist aus dieser Branche nicht mehr weg zu denken. Auch hier ist die Kontrolle von Wachstumsrate, Kristallorientierungen und der Morphologie äußerst wichtig. Dies wurde uns an  $\text{C}_{13}\text{H}_{18}\text{O}_2$  (eher bekannt als Ibuprofen) deutlich gemacht.

Nach einigen Schlussworten von Joan und Tom war dann auch der letzte Tag zu Ende und man hatte nochmals die Gelegenheit, sich der umwerfenden Natur rund um Granby zu widmen. Summa summarum war es eine äußerst gelungene Summer School, auf der man nicht nur sehr viel über verschiedene Kristallzüchtungsmethoden (z.B. aus der Schmelze oder Gasphase), Grundlagen (Keim- & Defektbildung, Kristallwachstum, Thermodynamik, Phasenübergänge), die Manipulation des Kristallwachstums (Temperaturgradienten, Magnetfelder), die mathematische Betrachtung von Fragestellungen mittels Simulationen (z. B. von Transportphänomenen in der Schmelze) sowie verschiedene Analysemethoden gelernt, sondern auch neue Freundschaften geschlossen hat und ich möchte hiermit nochmal Tom und Joan für die Organisation und Durchführung dieses Events danken. Es war klasse!

Auch möchte ich mich recht herzlich bei der Deutschen Gesellschaft für Kristallwachstum und Kristallzüchtung für den Reisekostenzuschuss bedanken, der es mir ermöglichte, an der diesjährigen ISSCG & ICCGE teilzunehmen und meine eigenen, aktuellen wissenschaftlichen Forschungsergebnisse aus dem Bereich der Kristallzüchtung unter Schwerelosigkeit einem internationalen Publikum zu präsentieren.



Fig. 2: Gruppenbild der Summer School Teilnehmer, Foto: J. Redwing

## Bericht von der International Conference on Nitride Semiconductors - ICNS 2019, 7.-12. Juli, Seattle, USA

Matthias Marx, AIXTRON SE, Herzogenrath

Die „International Conference on Nitride Semiconductors“ ist eine zweijährig stattfindende Konferenz, die sich im Wesentlichen mit dem Wachstum von Gruppe III-Nitridhalbleitern sowie deren Anwendungen in Form von Bauelementen beschäftigt. Dieses Jahr wurde die 13. Konferenz dieser Reihe in Bellevue, Washington (USA), veranstaltet und somit in nur 20 Autominuten Entfernung von Seattles Innenstadt. Seattle ist eine unglaublich sehenswerte Stadt, die von viel Wasser, Bergen und grünen Wäldern umgeben ist. Diese Umgebung wurde auch in der Stadtplanung selbst aufgegriffen – zahlreiche Parks laden zum Verweilen ein und die Stadt besitzt breite Straßen mit vielen Fahrradwegen, die häufig von Bäumen gesäumt sind. Gleichzeitig finden sich aber auch zahlreiche herausragende architektonische Bauwerke in der Stadt, was sicherlich den vielen Technologieunternehmen geschuldet ist, die hier ihren Hauptsitz haben (z.B. Microsoft, Amazon und Boeing). Der Veranstaltungsort ermöglichte also auch vor oder nach der Konferenz genügend interessante Ausflugsziele, die zu einem längeren Aufenthalt einluden.

Den Konferenzvorsitz der diesjährigen ICNS übernahm Prof. W. Alan Doolittle vom Georgia Institute of Technology, den Programmvorsitz Prof. Christian Wetzel vom Rensselaer Polytechnic Institute und Dr. Stacia Keller von der University of California, Santa Barbara.

Insgesamt gab es über 700 Beiträge (Vorträge und Poster), die sich zu großen Teilen auf die drei Hauptthemen „Licht emittierende Bauelemente“ (20% der Beiträge), „Epitaktisches Wachstum“ (18%) und „Elektronische Bauelemente“ (17%) verteilten.

Eingeleitet wurde die Konferenz von 4 eingeladenen Gastvorträgen, die aktuelle zentrale Fragestellungen behandelten. Der erste Vortrag wurde von Nobelpreisträger Prof. Shuji Nakamura gehalten und beinhaltete die Entwicklung im Bereich nichtpolarer und semipolarer kantenemittierender Laser Dioden und VCSEL. Es folgte ein Vortrag von Prof. Jun Suda über die Entwicklung vertikaler GaN-Leistungsbaulemente und ein Vortrag von Prof. Nicolas Grandjean über neue Erkenntnisse zum Einfluss von Punktdefekten auf die Effizienz von Nitrid-LED. Abgeschlossen wurde diese erste Plenarsitzung von Prof. Zetian Mi über mögliche zukünftige Anwendungen von Gruppe III-Nitrid Nanokristalle. Im weiteren Verlauf der Konferenz wurden 60 Sessions mit über 300 Vorträgen angeboten. Wobei die meisten durch eingeladene Gastvorträge (54) eingeleitet wurden. Die über 350 Posterbeiträge wurden an zwei Abenden in entspannter Atmosphäre bei kleinen Häppchen und Getränken präsentiert und ermöglichten ausführliche wissenschaftliche Diskussionen. Um der Konferenz einen übergeordneten Rahmen zu geben, wurde sie

durch vier weitere Gastvorträge am Freitag abgeschlossen. Diese beinhalteten die Anwendung von konventionellen und N-polaren GaN HEMT für Hochfrequenz- und Hochleistungselektronik (gehalten von Prof. Umesh Mishra), den Einfluss von Leerstellenkomplexen auf nichtstrahlende Rekombinationsmechanismen in Gruppe III-Nitrid Bauelementen (Prof. Shigefus Chichibu), die aktuelle industrielle Entwicklung von LED vom UV- bis zum roten Spektrum (Dr. Martin Strassburg) und zuletzt ein Ausblick wie es möglich sein wird AlGaIn sinnvoll als Halbleiter nutzen zu können (Prof. Zlatko Sitar).

Einen kompletten Einblick in die wissenschaftlichen Themen wird es durch eine Spezialausgabe in Physica Status Solidi geben. An dieser Stelle werden daher nur die persönlichen Highlights der gehörten Vorträge sowie intensiv diskutierte Themen zusammengefasst.

Einen ausführlichen Überblick über die Ergebnisse seiner Arbeitsgruppe gab Prof. Nicolas Grandjean in seinem Gastvortrag. Die Ausgangsfrage seines Vortrages war, wie die kommerzielle InGaIn/GaN-LED trotz hoher Defektdichten eine interne Quanteneffizienz von fast 100% erzielen kann. Dabei lag das Augenmerk auf der Rolle der unter dem Mehrfachquantentopf liegenden InGaIn-Schicht. Diese Schicht bzw. deren positive Auswirkung auf die Effizienz der LED wurde in der Vergangenheit häufig dadurch begründet, dass die Schicht entweder die internen elektrischen Felder oder die Verspannung über bzw. in den darauffolgenden aktiven Schichten verbessern sollte. Prof. Grandjean konnte diese Behauptungen schlüssig widerlegen und führte die Verbesserung schlussendlich auf eine Vergrabung von Oberflächen-defekten zurück. Somit fungiert die erste InGaIn-Schicht als Opferschicht für die darauffolgenden InGaIn-Schichten des Mehrfachquantentopfs. Die Argumentation wurde wie folgt geführt: während der GaN-Puffer wächst, bilden sich intrinsische Punktdefekte (Stickstoffleerstellen), die sich jedoch nicht in den Kristall einbauen, sondern als Oberflächendefekte vorliegen. Die Oberflächendefekte entstehen ab ca. 900°C und sättigen nach einem GaN-Wachstum von 100 nm. Bei niedrigen Temperaturen im InGaIn-Wachstum verbinden sich die Stickstoffleerstellen mit Indiumleerstellen und werden als Komplex in den Kristall eingebaut. Die Vergrabungseffizienz in einer InGaIn-Schicht sättigt ab einer Konzentration von 4% Indium und einer Schichtdicke von 50 nm. Aus diesen Erkenntnissen kann z.B. geschlossen werden, dass die Wachstumstemperatur von GaN-Barrieren in der aktiven Schicht nicht zu hoch gewählt werden darf, da ansonsten wieder neue Oberflächendefekte gebildet werden, die dann im folgenden Quantentopf wieder eingebaut werden und die nichtstrahlende Rekombination erhöhen würden.

Bezüglich neuartiger HF-Schalter wurde ein sehr interessanter Vortrag von Dr. Robert S. Howell von der Northrop Grumman Corporation gehalten. Er stellte einen Super Lattice Castellated Field Effect Transistor (SLCFET) vor, um die Limitierung bisheriger HF-Schalterdesigns zu übertreffen. Die Leistungsfähigkeit eines HF-Schalters ist im Wesentlichen gegeben durch das Verhältnis seiner Kapazität im OFF-Zustand und seinem ON-Widerstand. Ersterer wird in erster Näherung durch parasitäre Streufelder bestimmt. Um den ON-Widerstand zu senken und gleichzeitig die Kapazität nicht wesentlich zu beeinflussen, hat die Gruppe um Dr. Howell einen Mehrkanal-FET durch ein 6-fach AlGaN/GaN-Übergitter realisiert. Die Kanäle werden von der Seite durch ein 3D-Gate gesteuert. Mit diesem Konzept konnte die Gruppe einen HF-Schalter realisieren, der einen Drainstrom von  $IDSS = 2 \text{ A/mm}$ , eine Durchbruchspannung von  $V_{BK} > 50 \text{ V}$  und ein Gütefaktor FCO von 2 THz erzielte. Der Gütefaktor ist damit 3-8-mal größer als in konventionellen FET.

Intensiv diskutiert wurde unter anderem das Wachstum von N-polaren Gruppe III-Nitriden, welches zunehmend an Interesse gewinnt. Die Nutzung von N-polarem Material verspricht aufgrund der umgedrehten Polarisationsfelder gegenüber M-polarem Material Vorteile in vielen Anwendungen, z.B. bei E-mode oder hochgradig skalierten Feldeffekttransistoren, Sensoren sowie auch in optischen Bauelementen wie LED und Laser. Einige Bauelemente, auch bereits kommerziell erhältliche, wurden in verschiedenen Beiträgen vorgestellt. Als zukünftig interessante Anwendung wurde die Realisierung

von Superjunction Feldeffekttransistoren genannt. Neben der Verwendung in Bauelementen wurde insbesondere auch die höhere thermische Stabilität gegenüber M-polarem GaN herausgestellt. Dies erlaubt z.B. ein Hochtemperatur-Annealing zur Aktivierung von Mg in p-dotiertem GaN, wodurch Aktivierungseffizienzen von über 80% erzielt werden können.

Neben den schon bewährten Gruppe III-Nitriden wurde auch ein zunehmendes Interesse an noch nicht so intensiv erforschten Verbindungen festgestellt. Unter anderem z.B. hexagonales Bornitrid, welches mit einer Bandlücke von 6,1 eV als ultravioletter Lichtemitter genutzt werden könnte. Es wurde sowohl in seiner 3D-Variante, als auch in seiner 2D-Variante diskutiert und verschiedene Wachstumsparameter und mögliche Dotierstoffe vorgestellt. Ebenfalls noch relativ unbekannt ist die Verbindung Aluminiumscandiumnitrid. Zu diesem Material gab es einen sehr ausführlichen Vortrag von Prof. Oliver Ambacher, der die herausragenden piezoelektrischen und ferroelektrischen Eigenschaften beleuchtete. Die präsentierte Arbeit stützte sich auf DFT-Simulationen, welche experimentell bestätigt werden konnten. Auf Basis der gezeigten Ergebnisse wurde die Verwendung dieses Materials für akustische Oberflächenwellen-Filter motiviert.

Neben der Wissenschaft muss zuletzt noch der gesellige Höhepunkt der Konferenz, das Konferenzdinner, erwähnt werden, welches in spektakulärer Umgebung im Chihuly Garden and Glass abgehalten wurde. Das Chihuly Garden and Glass ist ein Museum, welches direkt an der berühmten Seattler Space Needle gelegen ist und die Werke des Künstlers Dale

## I-B-S Fertigungs- und Vertriebs GmbH

für Forschung und Produktion

D-82284 GRAFRATH Postfach 30

Tel. 08144 / 7656 Fax 08144 / 7857 email: ibs-scholz@t-online.de

### Läppen-Polieren



**IB 400**  
für Läpp-Polierteller  
von 300 - 400 mm dia.  
Läpp-Poliermittelzufuhrsystem,  
Polier-Jigs.

**Innenlochsägen Annular 40/50**  
Schnitttiefen 42 bzw. 52 mm  
Man. Tischzustellung  
Digitalanzeige für U<sub>pm</sub>,  
Tischposition und Schnittvorschub.

### Schneiden



Weitere Produkte: Fadensägen nach dem Läppprinzip

Bitte besuchen Sie unsere Internetseite

[www.ibs-grafrath.de](http://www.ibs-grafrath.de)

Chihuly ausstellt. Es zeigt eine faszinierende Landschaftskombination aus Natur und Glas. Das Konferenzdinner fand im großen Wintergarten und Garten des Museums statt, was eine angenehm lockere und ungezwungene Atmosphäre ermöglichte.

## Bericht von der DRIP XVIII, 08.-12. September 2019 in Berlin

Matthias Bickermann, Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin

Ich freue mich, im DGKK-Mitteilungsblatt über die DRIP XVIII-Konferenz zu berichten, die ich zusammen mit Dr. Anna Mogilatenko von Ferdinand-Braun-Institut (FBH) Berlin organisieren durfte. Die DRIP-Konferenzserie wurde 1985 ins Leben gerufen und war nach 2007 nun zum zweiten Mal in Berlin. Der Konferenzname lautet ausgeschrieben "Conference on Defects - Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors". Die korrekte Beschreibung und die technische Kontrolle von Defekten in Halbleiterkristallen sowie die Untersuchung des Defektverhaltens im Bauelement sind nicht nur für Bauelementdesign und -entwicklung, sondern auch für die Kristallzüchtung relevant. Denn nur hier kann das Material aufgrund der Erkenntnisse weiter verbessert werden.



Fig. 1: Kaspars Dadzis vom IKZ Berlin während seines Vortrages. Foto: DRIP XVIII

Die DRIP trägt diesen Gedanken Rechnung und hat deshalb gegenüber den Konferenzen, die sich auf die Defektphysik beschränken, ein klares Unterscheidungsmerkmal. In den Vorträgen und Postern werden Material, Charakterisierungsmethode und avisierte Anwendung verknüpft und aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet. Deshalb ist es schwierig, die Themen zu gliedern und Trends herauszugreifen. Es dominieren Beiträge, die an einem spezifischen Halbleitermaterial Strukturdefekte oder Punktdefekte diskutieren - diesmal vor allem SiC und Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, aber auch Gruppe III-Nitride und Silizium, Volumenmaterial genauso wie dünne Filme oder Nanostrukturen. In weiteren Vorträgen werden spezielle Charakterisie-

Schlussendlich möchte ich mich noch einmal bei der DGKK bedanken, die mir durch die Überreichung des Nachwuchswissenschaftler-Preises 2018 ermöglicht hat, an dieser spannenden Konferenz teilzunehmen.

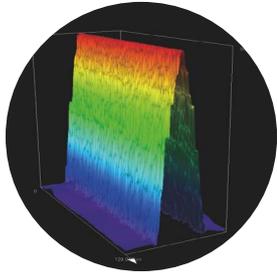
rungstechniken vorgestellt, einige Vortragenden haben auch die lokalen und/oder dynamischen Eigenschaften von Bauelementstrukturen untersucht. Insbesondere Röntgentechniken, Rasterkraft- und Transmissionselektronenmikroskopie, auch Kathodolumineszenz- oder EBIC-Mapping spielen eine Rolle, dagegen gibt es relativ wenige "Defektphysik"-Vorträge mit optischer oder elektrischer Spektroskopie. Das "I" für Imaging in "DRIP" wird von den Teilnehmern als wichtig erachtet!



Fig. 2: Während der Kaffeepause. Foto: DRIP XVIII

Unter den etwa 130 Teilnehmern, die sich zur DRIP XVIII an vier Tagen im Novotel Berlin-Tiergarten getroffen haben, sind Doktoranden, PostDocs, aber auch Professoren und Forscher in leitenden Positionen v.a. aus Europa und Asien. Knapp 30% aller Teilnehmer kommen aus Japan, 15% aus China, 25% der Teilnehmer sind aus Deutschland, 25% aus 12 anderen europäischen Ländern. Mit 3 Teilnehmern sind die USA deutlich unterrepräsentiert, das war aber auch bei vorigen Konferenzen schon so. Es wurden 13 Vortragende eingeladen, dazu wurden 55 reguläre Vorträge gehalten und knapp 40 Poster präsentiert.

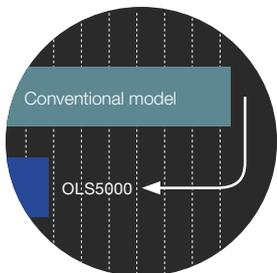
Viele bekannte Experten und "Stammgäste" als Teilnehmer, die sehr freundliche Atmosphäre sowie die Diversität der Vorträge und Themen machen die DRIP zu einer äußerst lohnenden Konferenz für alle, die sich im Bereich der Defekte in Halbleitern lösungs- sowie anwendungsorientiert fortbilden wollen und die bereit sind, ihr Forschungsgebiet in einem etwas breiteren Kontext zu sehen.



4K Scan Technology



Smart Scan



PEAK Algorithm



Extension Frame

## Reach the Next Level of Surface Metrology The New LEXT OLS5000

Uncovering more detail than ever before, the intuitive LEXT OLS5000 3D measuring laser microscope delivers reliable data quickly – from any surface and any sample.

- **Capture any surface**

Capture steep slopes up to 87.5° with 4K Scan Technology

- **Measure any sample**

Elevated Extension Frame accommodates tall samples up to 210 mm

- **Save time**

PEAK Algorithm enables 4X faster scanning at all magnifications

- **Easy and reliable**

Automatically and easily acquire accurate data in just one click with Smart Scan

 [www.olympus-ims.com](http://www.olympus-ims.com)

## Kleiner, schneller, energieeffizienter - leistungsstarke Bauelemente für den digitalen Wandel

Presseinformation |ForMikro-LeitBAN| Berlin, 29.11.2019

**Hocheffiziente Leistungshalbleiter sollen die Voraussetzungen für vielfältige neue Anwendungen schaffen – von der Elektromobilität bis hin zur künstlichen Intelligenz. Darauf zielt das kürzlich gestartete Verbundprojekt „Leistungstransistoren auf Basis von AlN (ForMikro-LeitBAN)“, an dem auch das Fraunhofer IISB beteiligt ist.**

Smarte Energieversorgung, Elektromobilität, breitbandige Kommunikationssysteme und Anwendungen der künstlichen Intelligenz (KI) - die Anzahl miteinander agierender und vernetzter Systeme wächst stetig. Zugleich ist der schonende Umgang mit Ressourcen eine zentrale gesellschaftliche Herausforderung. Mit immer mehr Systemen und dem zunehmenden Datenverkehr steigt jedoch der Primärenergieverbrauch. Elektrische Energie muss stets umgewandelt werden, damit sie von den verschiedenen Systemen genutzt werden kann, daher nimmt auch der Bedarf an elektrischer Konversion zu. Allein in Europa gehen so jährlich schätzungsweise mehr als drei Terawattstunden an Energie verloren - die Elektrizitätsmenge, die von einem mittleren Kohlekraftwerk produziert wird. Die effiziente Wandlung von Energie wird damit zum Schlüssel für Anwendungen in Industrie 4.0, KI und Co. ForMikro-LeitBAN erforscht technologische Maßnahmen, mit denen die Effizienz weiter erhöht und damit Ressourcen geschont werden. Voraussetzung dafür sind effizient schaltende Leistungshalbleiter, die eine hohe Energiedichte ermöglichen. In großem Maßstab eingesetzt, ließe sich mit ihnen spürbar Energie einsparen und einen relevanten Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung leisten. Im Projekt soll Aluminiumnitrid als neues Halbleitermaterial für diese Aufgabe entwickelt, an geeigneten Bauelementen getestet und für zukünftige Anwendungen in Systemen qualifiziert werden. Das Vorhaben wird bis 2023 mit 3,3 Millionen Euro vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Programm ForMikro gefördert.



Fig. 1: AlN-Kristall als Halbleitergrundmaterial für leistungselektronische Bauelemente. Bild: Anja Grabinger / Fraunhofer IISB

### Aluminiumnitrid - Ausgangsmaterial mit Potenzial

Die Effizienz von Systemen wird durch statische und dynamische Verlustleistungen von Halbleitern begrenzt. Diese werden durch das jeweilige Material bestimmt. Mit gängigen Leistungsbauelementen auf Siliziumbasis wird es immer schwerer, die Effizienz von elektrischen Umrichtern und Leistungsverstärkern zu steigern. Daher müssen neue Halbleitermaterialien mit verbesserten Eigenschaften erforscht und zur Marktreife gebracht werden. Die Projektpartner setzen auf Aluminiumnitrid (AlN). Das für elektronische Anwendungen bislang wenig erforschte Halbleitermaterial bietet verglichen mit Silizium-Bauelementen einen bis zu 10.000-mal geringe-

ren Durchlassverlust.

Es zeichnet sich zudem durch eine sehr hohe Durchbruchspannungsfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit aus - ideale Voraussetzungen für Leistungshalbleiter mit hoher Energiedichte und Effizienz. Freistehende isolierende AlN-Wafer sollen als Materialbasis eingesetzt und qualifiziert werden. Gegenüber einer AlN-Epitaxie auf Fremdsubstraten wie etwa Siliziumkarbid kann die Versetzungsdichte um fünf Größenordnungen reduziert werden. Das bietet das Potenzial für schnell und effizient schaltende Bauelemente bei gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit.

### Volle Prozesskette - vom Kristallwachstum bis zu Systemdemonstratoren

Die neuartigen AlN-Bauelemente bauen konzeptionell auf der gut erforschten GaN-Technologie auf. Neu ist der Übergang von den üblichen Fremdsubstraten wie Siliziumkarbid, Saphir oder Silizium auf freistehende AlN-Substrate. ForMikro-LeitBAN erforscht die Entwicklung derartiger AlN-Wafer und testet diese in einem speziell zugeschnittenen Bauelementprozess. Testsysteme für Millimeterwellen-Anwendungen und für leistungselektronische Energiekonverter qualifizieren die neuen hocheffizienten AlN-Bauelemente für die Anwendungen in entsprechenden Systemen. Sie bereiten den Transfer dieser Technologie in eine industrielle Umgebung vor. Dies ist im Rahmen eines Folgeprojekts geplant. Ein Industriebeirat unterstützt die Arbeiten im Konsortium: Infineon für die Leistungselektronik, UMS für die Millimeterwellen-Technik und III/V-Reclaim für die Wiederverwertung der AlN-Wafer. Folgende Partner beteiligen sich an ForMikro-LeitBAN und decken gemeinsam die komplette Wertschöpfungskette ab - vom AlN-Wafer bis hin zum Millimeterwellen- oder leistungselektronischen System:

- Ferdinand-Braun-Institut (FBH): AlN-Bauelementdesign und -Entwicklung
- Fraunhofer IISB, Erlangen (IISB): AlN-Kristallzucht, Waferherstellung
- TU Bergakademie-Freiberg (IAP): Prozessmodulentwicklung, Analytik
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU): Materialanalytik
- Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU): AlN-Millimeterwellen-Systeme
- Technische Universität Berlin (TUB): AlN-Leistungselektronische Systeme

<https://www.elektronikforschung.de/projekte/formikro-leitban>

Foto: <https://www.iisb.fraunhofer.de/presse>.

Kontakt:

Petra Immerz, M.A., Communications Manager  
Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik  
Gustav-Kirchhoff-Straße 4, 12489 Berlin  
Tel. 030 6392-2626, E-Mail: [petra.immerz@fbh-berlin.de](mailto:petra.immerz@fbh-berlin.de)

## Prof. Anna Pajęczkowska on the occasion of her 85<sup>th</sup> birthday

Dobrosława Kasprovicz, Poznań University of Technology



Professor Anna Pajęczkowska graduated from the Faculty of Mathematics, Physics and Chemistry, Adam Mickiewicz University, Poznań, with a master's degree in chemistry. In 1958 she started working at the Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warszawa, at the Department of Semiconductor Physics. In 1974 she joined the research staff at the Physics of Magnetic Materials and since 1991 she has been

working at the Institute of Electronic Materials Technology. Her main interest was the chemistry and physics of new materials, inorganic compounds, obtained as polycrystals or single crystals.

She is the author or co-author of about 200 papers published in peer-reviewed journals of international circulation. She mastered crystallization using the Bridgman and Czochralski methods. As an attractive co-worker she worked with many research centres in Germany, Bulgaria, Russia and Holland, contributing to many joint papers. Particularly long-term cooperation she held with the Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences in Leningrad, Russia and the Max Planck Institute in Stuttgart, Germany. In 1983

she was distinguished with the AN BAN award from the Bulgarian Academy of Sciences, in 1983 and 1989 she received the awards of the Scientific Secretary of Polish Academy of Sciences. Besides Polish doctoral students she promoted two doctoral students from Russia, the Lomonosov Institute, in Moscow. She has led to successful completion six research projects financed by the of the Polish Ministry of Sciences and Higher Education. Prof. Anna Pajęczkowska was among the founders of the Polish Society for Crystal Growth (PSCG) and was the first President of the PSCG (1991-1993). At present Prof. Anna Pajęczkowska is an Honorary Member of the PSCG. Since 1992 Prof. Anna Pajęczkowska has been a member of the German Association for Crystal Growth (DGKK). Thanks to Prof. Anna Pajęczkowska collaboration between DGKK and PSCG started almost 30 years ago. She has been a chair-woman and co-organizer of many domestic and international conferences, a member of editorial board of Crystal Research and Technology, a member of and consultant for many international organizations in the area of crystal growth.

Thanks to her efforts the Polish physicist Jan Czochralski from Kcynia has been internationally appreciated. In 2003 Prof. Anna Pajęczkowska was awarded with the title of Honorary Citizen of Kcynia. She used best efforts to promote the Polish Sejm initiative of making the year 2013 dedicated to Jan Czochralski and she was a member of the Honorary Committee for Celebration of the year of Jan Czochralski.

## 1<sup>st</sup> joint meeting of young Crystal Growers (jDGKK) and Young Crystallographer (YC)

Melissa Roder, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

The 1<sup>st</sup> joint meeting of the jDGKK and YC was held in Cologne from 19<sup>th</sup> to 20<sup>th</sup> of September. The goal of this meeting was to bring together the young people of the two companies and to exchange about similarities and differences in their topics.

The main programme was focussed on academic talks held by professors from different universities, giving an introduction into one topic with a crystallographic or crystal growth background. Further, industrial talks were given from several company representatives, introducing the company and their work routine.

One highlight of the meeting was the Lighting talk session. Students presenting a poster are stronger involved into the programm and encouraged to give a five minute talk, in which they give a short „appetizer“ to their poster.

At the end of the meeting, the group participated at a historic guided city tour through Cologne, visiting the ruins of the Roman culture.



Group picture of the participants of the 1<sup>st</sup> joint meeting in front of the Cologne Cathedral. Foto: M. Roder

## Dr. Reinhard Uecker mit dem Frank-Preis der IOCG ausgezeichnet

Matthias Bickermann, Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin

Unser ehemaliger Kollege am Leibniz-Institut für Kristallzüchtung Dr. rer. nat. Reinhard Uecker hat im August 2019 den Frank-Preis der IOCG erhalten, die höchste Auszeichnung der International Organization for Crystal Growth. Er wurde zusammen mit Prof. Darrell Schlom von der Cornell-Universität in Ithaca, NY (USA) geehrt "für ihre bahnbrechenden Beiträge zur Entwicklung neuer Perowskit-Substrate, die das strain engineering von funktionellen Oxiden ermöglichen." [1]. Diese Anerkennung für besondere wissenschaftliche und technische Leistungen auf dem Gebiet des Kristallwachstums und der Kristallzüchtung möchten wir zum Anlass nehmen, die Arbeiten von Reinhard Uecker hier noch einmal gebührend zu würdigen.



Fig. 1: Die Preisträger des Frank-Preises der IOCG Darrell Schlom (links) und Reinhard Uecker, zusammen mit Koichi Kakimoto (ganz links) und Elias Vlieg. Foto: IOCG

Reinhard Uecker studierte an der HU Berlin und arbeitete seit 1975 durchgehend an der Züchtung und Charakterisierung von Oxidkristallen, zuerst am Zentralinstitut für Optik und Spektroskopie (Abt. Kristallchemie, Leiter: Dietrich Schultze) und am Zentralinstitut für Physikalische Chemie der Akademie der Wissenschaften der DDR, sowie seit dessen Gründung nach dem Mauerfall am Institut für Kristallzüchtung (IKZ) im Forschungsverbund Berlin e.V. Er hat im Jahr 2000 in der Leibniz-Universität Hannover bei Prof. Josef-Christian Buhl (Institut für Mineralogie) promoviert [2].

Die Herstellung von oxidischen Substratkristallen stellt spätestens seit Mitte der 1990er Jahre sein Hauptinteresse dar. Die Nutzung der Kristalle als Substrate für die Epitaxie u.a. von Hochtemperatursupraleitern (HTSL) und Multiferroika hat höchste Schichtqualitäten ermöglicht und damit wesentlich zum Fortschritt der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung in den genannten Gebieten beigetragen. Dabei ist die Auswahl an geeigneten Materialien entscheidend, damit die Substrate möglichst exakt den Vorgaben der Materialphysiker zur Anpassung der Gitterkonstanten und der thermischen Ausdehnungskoeffizienten entsprechen, aber auch als Volumenkristalle herstellbar sind. Die in der Umsetzung dann entscheidenden Voraussetzungen - reproduzierbare Herstellung, strukturelle Qualität und Größe - liegen

jedoch in der Hand des Kristallzüchters. Aus der Zusammenarbeit mit Darrell Schlom, der auf den Substraten die richtigen Schichten aufwächst und die daraus entstehenden physikalischen Phänomene auszuwerten vermag, entstand so eine überaus erfolgreiche, international sichtbare und wissenschaftlich bahnbrechende Zusammenarbeit.

In seiner Dissertation [2] hat Reinhard Uecker die Czochralski-Kristallzüchtung von  $\text{NdGaO}_3$ ,  $\text{SrLaGaO}_4$  und  $\text{SrPrGaO}_4$  in Iridiumtiegeln bei  $1500\text{-}1700^\circ\text{C}$  weiterentwickelt, um Substrate für hochwertige Schichten aus Hochtemperatursupraleitern wie YBCO zu ermöglichen. Nicht nur die Züchtungsbedingungen, sondern auch die Facettierung, die Zwillingbildung sowie die Bildung von Nachbarphasen und die Zusammensetzungsproblematik aufgrund der peritektischen Erstarrung werden ausgiebig untersucht. Für das System  $\text{SrO-Pr}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$  hat er das Phasendiagramm neu vermessen und bisher unbekannte Phasen identifizieren können. Die o.g. Materialien werden heute noch am IKZ hergestellt und gelten weiterhin als Standardsubstrate für HTSL-Schichtbauelemente wie z.B. SQUIDS und Mikrowellenfilter.

Die von Reinhard Uecker maßgeblich mitentwickelten Seltenerdscandate,  $\text{REScO}_3$  mit  $\text{RE} = \text{Dy, Tb, Gd, Eu, Sm, Nd}$  oder  $\text{Pr}$ , haben dann zu dem oben genannten Durchbruch im strain engineering geführt. Darunter wird die Änderung elektrischer und magnetischer Ordnungseigenschaften kontrolliert verspannter dünner Oxidschichten (z.B.  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$  und  $\text{EuTiO}_3$ ) verstanden. Publikationen im Jahr 2004 in *Nature* und *Science* mit R. Uecker als Coautor wurden bisher 1327 bzw. 1140 mal zitiert [3,4] und sind damit die beiden mit Abstand am häufigsten zitierten Publikationen des IKZ [5]. Auch die Themengruppe Perowskitschichten am IKZ unter der Leitung von Jutta Schwarzkopf geht auf den Erfolg des strain engineering zurück. Dort werden bis heute die am IKZ hergestellten Seltenerdscandate als Epitaxiesubstrate verwendet. Die Zusammenarbeit mit der Firma CrysTec GmbH hat durch exzellente Politurarbeit und den weltweiten Vertrieb die Nutzung dieser Substratmaterialien in der Forschung trotz des hohen Preises wesentlich vorangetrieben.

Als erfolgreich gelöste technologische Herausforderungen bei der Herstellung von Seltenerdscandaten sind die Czochralski-Züchtung in Iridiumtiegeln bei Temperaturen oberhalb  $2100^\circ\text{C}$  und die Züchtung von Mischkristallen variabler Zusammensetzung zu erwähnen. Wissenschaftlich wurde an diesen Kristallen insbesondere die Spiralbildung durch Selbstabsorption im nahen IR erstmals ausführlich untersucht und beschrieben [6]. Die Erkenntnisse haben u.a. bei den aktuellen F&E-Aufgaben am IKZ sehr geholfen, denn auch bei der Züchtung von  $\text{SrTiO}_3$ - und von hochdotierten  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ -Einkristallen stellt Spiralbildung eine wesentliche Problematik dar.

Weitere kristallzüchterische Arbeitsgebiete von Reinhard Uecker in den letzten 15 Jahren waren u.a. die Züchtung von PZ-NT (Blei-Zirkonat-Niobat-Titanat)-Einkristallen aus der  $\text{PbO}$ -Lösung ohne Keimvorgabe im konischen Tiegel, die für Ultra-

schallgeber und -sensoren für die Medizindiagnostik verwendet werden, sowie die Züchtung von Kristallen aus Yb:CaF<sub>2</sub> und Yb:SrF<sub>2</sub> in Platin- oder Graphittiegeln, die für Terawatt-Laser benötigt werden [7]. Als langjähriger Leiter der Themengruppe Oxide am IKZ (bis 2016) hat er dabei Kollegen unterstützt (insbes. Detlef Klimm, Steffen Ganschow, Detlev Schulz, Zbigniew Galazka und Christo Gugushev), die selbst zur thermischen und thermochemischen Analyse, zu dynamischen Züchtungsatmosphären usw. vieles wissenschaftlich beitragen konnten und dies immer noch tun. Zudem wurde aus diesen Aktivitäten unter seiner Leitung [8] die Entwicklung wichtiger neuer transparenter halbleitender Substratmaterialien angestoßen ( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SnO<sub>2</sub>), die das Feld der oxidischen Substratkristalle noch einmal wesentlich erweitert haben und in Zukunft noch eine wichtige Rolle spielen können.

Die Herstellung von oxidischen Substratkristallen ist weiterhin ein wichtiges Arbeitsgebiet am IKZ. Doch international wird dieses Forschungsgebiet schon lange dominiert von der Zielsetzung, kostengünstig und schnell eine Vielfalt dünner Filme oft zweifelhafter struktureller Qualität auf kommerziell gut verfügbaren Substraten (Saphir, Silizium, MgO) abzuscheiden und zu untersuchen. Ob mit dieser Strategie ein zuverlässiges Produkt für den Massenmarkt entwickelt werden kann, ist mindestens fraglich. Dagegen tragen die wegweisenden Arbeiten von Reinhard Uecker zu der seriösen Bewertung neuer Materialtechnologien und -eigenschaften durch die höchste

strukturelle Qualität und beste denkbare Gitteranpassung bei. Genau dafür wurde Reinhard Uecker mit dem Frank-Preis geehrt.

- [1] [http://www.iocg.org/prizes/frank\\_laudise\\_prize.html](http://www.iocg.org/prizes/frank_laudise_prize.html)
- [2] R. Uecker, Untersuchungen zur Züchtung und Realstruktur der Hochtemperatursupraleiter-Substratkristalle NdGaO<sub>3</sub>, SrLaGaO<sub>4</sub> und SrPrGaO<sub>4</sub>, Hannover, Univ., Diss. 2000, online unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e002/317343564.pdf>
- [3] J.H. Haeni, P. Irvin, W. Chang, R. Uecker, P. Reiche, ..., D.G. Schlom, Nature 430, pp. 758-761, 2004
- [4] K.J. Choi, M. Biegalski, Y.L. Li, A. Sharan, J. Schubert, R. Uecker, P. Reiche, ..., D.G. Schlom, Science 306, pp. 1005-1009, 2004
- [5] Web of Knowledge, abgerufen am 07.11.2019, Advanced Search OO="crystal growth"
- [6] R. Uecker, H. Wilke, D.G. Schlom, B. Velickov, P. Reiche, A. Polity, M. Bernhagen, M. Rossberg, J. Crystal Growth 295, pp. 84-91, 2006
- [7] M. Siebold, M. Hornung, R. Boedefeld, ..., R. Uecker, A. Jochmann, J. Hein, M.C. Kaluza, Optics Lett. 33, pp. 2770-2772, 2008
- [8] Z. Galazka, R. Uecker, K. Irmscher, M. Albrecht, D. Klimm, M. Pietsch, M. Brützam, R. Bertram, S. Ganschow, R. Fornari, Cryst. Res. Technol., 45, pp. 1229-1236, 2010

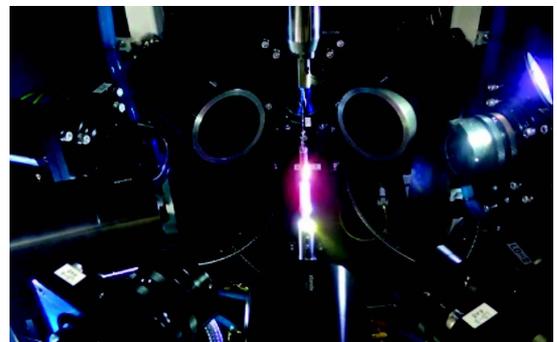


qd-europe.com

## Innovativer Schmelzzonenofen mit Diodenlaser für die Kristallzucht

Die ideale Lösung auch für schwierig zu erzeugende Kristalle

- Geeignet für Temperaturen bis zu 3.000 °C
- Exzellente Homogenität der eingestrahlten Energie
- Strahlprofile sind für die Kristallzucht optimiert
- Temperaturmessung und Steuerung in Echtzeit



Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>



Rubin, T<sub>m</sub> ~2072 °C



SmB<sub>6</sub>, T<sub>m</sub> ~ 2345 °C



YIG, Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>

## Dr. Anton Jesche mit dem Schieber-Preis der IOCG ausgezeichnet

Wolfram Miller, Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin

Anton Jesche ist der erste Deutsche und das erste DGKK-Mitglied, dem der 2004 erstmalig vergebene Schieber Prize der IOCG verliehen wird. Anton Jesche hat an der TU Dresden studiert und seinen Abschluss mit der Diplom-Arbeit "Phase formation and structural transitions in cobalt-copper nanolayers" gemacht. Diese Arbeit fertigte er unter der Anleitung von Peter Paufler und Dirk C. Meyer an. Für die Promotionsarbeit ging er an das Max-Planck-Institute for Chemical Physics of Solids in Dresden. Im Januar 2008 war die Supraleitung in den Eisenpniktiden entdeckt worden, womit diese Materialklasse in den Fokus der Forschung kam. Eine Herausforderung ist die Herstellung von Einkristallen dieser Materialklasse, die Thema seiner Promotionsarbeit wurde: "3d and 4f correlations in quaternary iron pnictides: the special case of  $\text{CeFeAs}_{1-x}\text{P}_x\text{O}$ ". Ihm ist dabei die Kristallzüchtung in einem externen Sn-Fluss bei sehr hohen Temperaturen ( $\approx 1500^\circ\text{C}$ ) gelungen. Zu jener Zeit war es diese einzige Dotierungs-Serie der  $\text{LnFeAsO}$ -Supraleiter (sogenannte 1111-Verbindungen), die an Einkristallen untersucht werden konnte. In keinem anderem Fall ist die Einkristallzüchtung gelungen. Nach der Promotion ging er zu Paul C. Canfield an das Ames Laboratory. Paul Canfield ist ein Pionier beim Flux Growth von hochschmelzenden Materialien. Anton Jesche begann, sich mit neuen magnetischen Materialien, die auf Stickstoff basieren, zu beschäftigen. Auch hier galt es die enormen Schwierigkeiten bei der Einkristallzüchtung und Probenpräparation zu überwinden. Dieses gelang mit metallic fluxes (Li and Ca flux). Die Arbeiten zu Eisen-dotiertem  $\text{Li}_3\text{N}$  führten zu Publikationen in *Nature Communications* 5 (2014), 3333 and *Physical Review Letters* 120 (2018), 147202. Die Details zur Lösungszüchtung von Einkristallen, die leicht flüchtige and reaktive Materialien enthalten, sind in *Philosophical Magazine* 94 (2014), 2372 dargelegt.

Alle diese Arbeiten waren die Grundlage für die erfolgreiche Beantragung des Emmy-Noether-Grants der DFG, um den Aufbau einer Nachwuchsgruppe zu fördern. Diese Gruppe hat Anton Jesche an der Universität Augsburg im Jahr 2014 aufgebaut. Der Schwerpunkt der Arbeiten in der über

sechs Jahre geförderten Nachwuchsgruppe liegt auf Eisen-dotiertem Lithium-Nitriden. Diese sind ein interessantes Materialsystem für harte Permanentmagnete. Ziel des Projekts ist die Etablierung dieses Materials als Modellsystem. Der erste Schritt ist die Züchtung von Kristallen mit sehr hoher Perfektion, um eine tiefgreifende Charakterisierung durchführen zu können. Die ausgeprägte magnetische Anisotropie soll eingehend untersucht werden und durch Dotierung manipuliert werden. Weitere Informationen sind unter <https://www.physik.uni-augsburg.de/exp6/EM/Project/> zu finden.

Für seine herausragenden Arbeiten zur Kristallzüchtung hatte die DGKK Anton Jesche bereits im Jahr 2015 mit dem Nachwuchswissenschaftler-Preis ausgezeichnet. Nun ist ihm auch der Preis der Internationalen Organisation verliehen worden. Wir wünschen ihm für die weitere wissenschaftliche Karriere viel Erfolg !



Der Preisträger Anton Jesche (Mitte) mit dem Vorsitzenden der Preis-Kommission, Thomas Kuech (links), und dem Vorsitzenden der IOCG, Koichi Kakimoto (rechts). Foto: IOCG

## Nachruf auf Prof. Dr. Josef Grabmaier, einer der DGKK-Gründungsväter

Georg Müller, Langensendelbach



(16.02.1926 - 24.07.2019)

Im vergangenen Sommer verlor die DGKK mit Prof. Dr. Josef Grabmaier den letzten noch Verbliebenen aus der Gruppe, die man als die Gründungsväter der DGKK bezeichnen kann. Josef Grabmaier und die Herren S. Haussühl, J. Liebertz, A. Neuhaus, R. Nitsche und K. Recker ergriffen ab 1968 die Initiative und leisteten gemeinsam die Vorarbeiten, die im Sommer 1970 zur Gründung der DGKK

führten - deren 50-jähriges Bestehen 2020 gefeiert wird. Neben den genannten fünf Kristallwissenschaftlern, die allesamt in den Diensten einer Universität standen, repräsentierte der bei Siemens tätige Josef Grabmaier die Industrie und konnte so deren damals stark gestiegenes Interesse an der Herstellung von Kristallmaterialien authentisch vertreten.

Die Dokumente aus der Gründungszeit weisen Josef Grabmaier auch als sehr rührigen Betreiber hin zur Gründung einer eigenen Gesellschaft, eben der DGKK, aus, wenn er z.B. am 29.12.1968 an A. Neuhaus (Univ. Bonn) schreibt: „Was die Organisationsform für die Förderung der Kristallzüchtung anlangt, bin ich nach reichlicher Überlegung zu der Überzeugung gelangt, dass wir der Sache am meisten dienen, wenn wir unseren eigenen Weg gehen.“ Um dann fortzufahren, „... schlage auch ich als Rechtsform der von uns neu zu gründenden „Gesellschaft für Kristallzüchtung“ - über die genaue Bezeichnung kann man noch diskutieren - den eingetragenen Verein vor.“

Und so kam es dann ja auch, der Verein wurde im Sommer 1970 gegründet und erhielt nach intensiver Diskussion den etwas sperrigen Namen DGKK, der aber immerhin unsere Arbeitsgebiete treffend umfasst. Josef Grabmaier wurde dann erster Schatzmeister dieser neuen DGKK. Dies kam nicht von ungefähr, denn er schreibt schon vor der Gründung im Mai an den Gründungskollegen J. Liebertz: „Mittlerweile habe ich am hiesigen Postscheckamt ein Postscheckkonto einrichten lassen. Da wir vorläufig noch kein eingetragener Verein sind, habe ich ein auf meinen Namen lautendes Sonderkonto einrichten lassen.“

Die berufliche Laufbahn von Josef Grabmaier begann nach dem Studium der Mathematik und Physik mit anschließender Promotion in Physikalischer Chemie an der Universität München im Jahre 1956 mit dem Eintritt in das Halbleiterwerk der Firma Siemens. Dies war ja gerade die Zeit des grandio-

sen Aufstiegs des Siliziums zum wichtigsten Halbleitermaterial - erinnert sei nur an die großartigen Beiträge zur Gewinnung des Reinst-Siliziums und zur Erfindung des Floating Zone Verfahrens von Spenkes Arbeitsgruppe im fränkischen Pretzfeld. Josef Grabmaier war direkt in diese Silizium-Pionierarbeiten involviert, bis er 1961 das Aufgabengebiet wechselte und im Münchner Siemens Forschungslabor die Stelle eines Laborleiters erhielt. Dort ging es um die Herstellung von massiven Einkristallen für die Anwendung als Festkörperlaser. Dazu wurden sowohl Anlagen als auch Prozesse entwickelt, z.B. für Rubin nach dem Verneuil-Verfahren, für Calciumwolframat mit Nd-Dotierung (Czochralski-Verf.) und Calciumfluorid mit Sm-Dotierung (Horizontales Bridman-Verf.). Später kam dann die LEC-Züchtung von GaAs dazu, mit der 1970 erstmals die Züchtung von versetzungsfreiem GaAs gelang. Ende der 1970er Jahre wurde bei Siemens (wie auch bei Wacker in Burghausen) die Herstellung von polykristallinem Silizium für preisgünstige Solarzellen ein wichtiges Thema, dem sich sogleich Josef Grabmaier intensiv widmete. In der Folgezeit entstand dazu unter der Autorenschaft von Josef Grabmaier eine Vielzahl von Patenten, die insgesamt neben den 80 Publikationen die beachtliche Marke von 100 weit überschritt. Darunter waren auch etliche Beiträge zu den später von ihm bearbeiteten Gebieten der Flüssigkristalle und Glasfaserkabel.

Ab 1985 konnte Josef Grabmaier seine umfangreiche berufliche Erfahrung als Lehrbeauftragter der Universität Hannover im Fach Energieumwandlung mit Photovoltaik und Windkraft an Studierende weitergeben. Diese Tätigkeit als Honorarprofessor übte er aus bis zu seinem Übergang in den Ruhestand 1991.

Ich selbst habe Josef Grabmaier nach meinem Eintritt in die DGKK ab Mitte der 1970er Jahre bei einigen DGKK-Veranstaltungen als begeisterten Kristallzüchter und lebhaften Vortragenden erlebt und dabei auch seine Ehefrau, Prof. Christa Grabmaier, kennengelernt, die als langjährige Schatzmeisterin der DGKK diente. Der fachliche Wechsel von Josef Grabmaier zum Solar-Silizium führte leider dazu, dass er nicht mehr auf DGKK-Tagungen präsent war, weil dieses Thema damals - im Gegensatz zu heute - nicht auf der Agenda der DGKK stand.

Josef Grabmaier konnte erfreulicherweise viele Jahre seinen verdienten Ruhestand genießen - besonders gern mit Kegel- und Golfspiel. Er starb im Sommer 2019 im Alter von 93 Jahren.

Die DGKK hat allen Anlass - gerade im Zusammenhang mit ihrem 50-jährigen Bestehen, ihrem Gründervater Josef Grabmaier ein ehrendes Gedenken zu bewahren.

## Kristallwachstum unter der Lupe - Neue Modell-Generation für Wachstumsprozesse IKZ-Forscher Kaspars Dadzis erhält ERC Starting Grant

Pressemitteilung | IKZ | 03-09-2019

**Erstmals in der Geschichte des Leibniz-Instituts für Kristallzüchtung (IKZ) wird der begehrte Zuschuss des Europäischen Forschungsrats (ERC) an einen IKZ-Forscher vergeben. Kaspars Dadzis erhält für sein Projekt "Next Generation Multiphysical Models for Crystal Growth Processes (NEMOCRYS)" über einen Zeitraum von 5 Jahren insgesamt 1,5 Millionen Euro. Als einer von insgesamt vier Wissenschaftlern in Deutschland behauptete sich Kaspars Dadzis im Panel "Products and Processes Engineering".**

Kristallwachstumsprozesse sind hochkomplexe physikalische Phänomene. Häufig wird dabei die numerische Simulation zur Prozessoptimierung eingesetzt. Der Mangel an Möglichkeiten für direkte Messungen innerhalb von Kristallzüchtungsumgebungen schränkt jedoch die erreichbare Genauigkeit der zugrunde liegenden theoretischen Modelle ein. Folglich dominiert immer noch ein experimenteller Trial-and-Error-Ansatz die Praxis der Kristallwachstumsentwicklung. Dies könnte sich in Zukunft durch die Arbeit der Nachwuchsforschergruppe „Modellexperimente“ unter der Leitung von Kaspars Dadzis ändern.



Fig. 1: Kaspars Dadzis mit dem Demo-Aufbau für einen Kristallwachstumsprozess  
Foto: privat

Das ausgezeichnete Projekt "Next Generation Multiphysical Models for Crystal Growth Processes (NEMOCRYS)" wird

mit sich der Entwicklung einer neuen experimentellen Plattform (dem "MultiValidator"), welche eine einzigartige Kristallzüchtungsanlage für Modellmaterialien beinhaltet. Das zielgerichtete Design des Aufbaus, die reduzierten Betriebstemperaturen und die geringeren Anforderungen an die Vakuumabdichtung ermöglichen einen unkomplizierten experimentellen Zugang für verschiedene In-situ-Messtechniken. Die gleichzeitige Beobachtung von Wärmefeldern, Strömungen, Spannungsverteilungen und anderen physikalischen Phänomenen wird es erstmals ermöglichen, eine Reihe von grundlegenden Annahmen in multiphysikalischen makroskopischen Modellen für das Kristallwachstum zu validieren. Das NEMOCRYS-Projekt hat das Ziel, eine neue Ebene des physikalischen Verständnisses zu erreichen und das Paradigma zu ändern, wie wir Kristallwachstumsprozesse und ähnliche komplexe multiphysikalische Systeme beobachten, beschreiben und entwickeln. Die praktischen Ergebnisse in Form neuer physikalischer Modelle und optimierter Messtechniken werden zur Unterstützung verschiedener Entwicklungsprojekte am IKZ eingesetzt.

Insgesamt 408 Nachwuchsforscher wurden vom Europäischen Forschungsrat im Rahmen des diesjährigen ersten abgeschlossenen ERC-Wettbewerbs gefördert. Die sehr begehrte Förderung soll einzelnen Wissenschaftlern helfen, eigene Teams aufzubauen und wegweisende Forschung über alle Disziplinen hinweg zu betreiben. Die Zuschüsse in Höhe von insgesamt 621 Mio. EUR sind Teil des Forschungs- und Innovationsprogramms der EU, Horizont 2020.

Nach dem Abschluss seiner Promotion arbeitete Kaspars Dadzis in der industriellen Forschung bei SolarWorld in Freiberg mit dem Schwerpunkt Züchtung von Siliziumkristallen für Solarzellen. Im Jahr 2016 wechselte er an das Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ) in Berlin-Adlershof. Für seine Arbeiten auf dem Gebiet der Modellversuche und der numerischen Simulation für das Kristallwachstum erhielt er 2017 den "LIMTECH Young Scientist Award".

### Jubilare

Wir gratulieren herzlich zum Geburtstag:

Herrn Prof. Dr. Joachim Bohm, Berlin	zum 85. Geburtstag
Herrn Prof. Dr. Donald T.J. Hurle, Bristol, UK	zum 85. Geburtstag
Herrn Prof. Dr. Klaus Jacobs, Berlin	zum 75. Geburtstag
Herrn Prof. Dr. Peter Rudolph, Schönefeld	zum 75. Geburtstag

## DGKK-Nachwuchs

### Strain engineering potassium sodium niobate thin films

Leonhard von Helden, Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin

The spectacular properties of ferroelectric materials have made them indispensable components of a wide range of modern technological devices. For instance, their switchable polarization is utilized in non-volatile random access memories, their high dielectric constants are exploited in capacitors, and their piezoelectric properties are essential for actuators, transducers and energy harvesters. As part of the worldwide focus on nanotechnology over the last two decades, ferroelectrics in thin-film form have undergone considerable development, paving the way for their implementation in telecommunication devices, microelectromechanical systems (MEMS) and high sensitivity sensors.

In many of the examples given, the device performance crucially depends on underlying structural characteristics of the particular ferroelectric material employed, such as its crystal symmetry and ferroelectric domain configuration. Moreover, the effect of temperature on ferroelectric behavior has a significant impact on functional properties due to the occurrence of thermally induced ferroelectric phase transitions. These are in general accompanied by a favorable increase of dielectric constants and a distinct softening of the material.

In thin films, the selective implementation and variation of epitaxial strain allows one to manipulate both of these characteristics at the same time. The concept is called  $\beta$ strain engineering in analogy to its widespread use in semiconductor research.

In this regard potassium sodium niobate is considered to be among the most promising materials to replace  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$  (PZT), which currently dominates the market. Beyond the impressive properties exhibited by  $(\text{K},\text{Na})\text{NbO}_3$  (KNN) in bulk form - high piezoelectric coefficients, high coupling coefficients and a high Curie temperature - its unit cell dimensions allow for strain engineering via the epitaxial strain imposed by suitable rare-earth scandate substrates with (110)-surface orientation. Additionally, the flexibility of the potassium-to-sodium ratio of KNN enables its lattice parameters to be continuously tailored, which - together with the choice of substrate - opens a wide parameter space to apply strain engineering. Further, the orthorhombic symmetry of KNN at room temperature enables the introduction of monoclinic symmetries by applying anisotropic strain. It is widely accepted that these monoclinic phases should possess higher piezoelectric coefficients due to the possibility of continuous rotation of the polarization vector.

Therefore, the aim of my doctoral thesis was to elucidate the strain-temperature-phase relations in epitaxial KNN thin films and understand their connection to ferro- and piezoelectric properties. Film growth was conducted by means of liquid-delivery metalorganic chemical vapor-phase epitaxy (MOVPE) enabling much higher crystalline quality compared to pulsed-laser deposition, which is the most commonly applied thin film growth method in ferroelectric research. Various (110)-cut rare-earth scandate single crystals  $\text{DyScO}_3$ ,

$\text{TbScO}_3$ ,  $\text{GdScO}_3$  and  $\text{SmScO}_3$  were utilized as substrates. These came from the Oxides & Fluorides group at IKZ. Following growth, the films were characterized by a combination of piezoresponse force microscopy (PFM), piezoelectric testing with double beam laser Interferometry (DBLI), high resolution X-ray diffraction (HR-XRD) and X-ray reciprocal space mapping (RSM). Furthermore, the films were characterized as a function of temperature using all of the aforementioned methods.

First, a detailed structural investigation of the ferroelectric domain structure in epitaxial  $\text{K}_{0.70}\text{Nb}_{0.3}\text{O}_3$  on (110)  $\text{TbScO}_3$  was conducted.[1] This combination of substrate material and film composition was chosen as a model system since its almost uniaxial strain condition yields a position right in the center of the MC domain stability regime in the misfit strain-misfit strain phase diagram. An analysis of the ferroelectric domain structure with laterally resolved piezoresponse force microscopy (PFM) reveals four types of superdomains each being composed of highly periodic stripe domains, see Fig. 1 (a). By complementary two-dimensional and three-dimensional high resolution X-ray reciprocal space mapping this domain pattern is proven to be formed out of monoclinic unit cells with Pm symmetry. On this basis a complex MC domain model was derived confirming the theoretical predictions, see Fig. 1 (b).

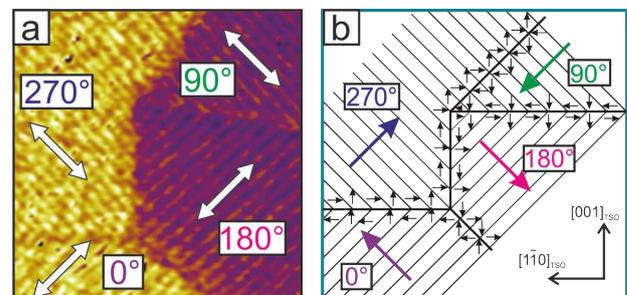


Fig. 1: (a) Lateral piezoresponse micrograph of a 35 nm  $\text{K}_{0.70}\text{Nb}_{0.3}\text{O}_3$  film on a (110)  $\text{TbScO}_3$  substrate, disclosing the co-existence of four variants of superdomains, denoted as  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  and  $270^\circ$ . White double arrows indicate the orientation of stripe domains within the particular superdomains. (b) Plane view of the lateral polarization orientations observed in the PFM micrograph. The in-plane polarization of stripe domains is given by black small arrows, while the in-plane net polarization of superdomains is given by bold colored arrows. Adapted from [1].

One highlight during the high resolution X-ray experiments was the investigation with a nanofocused X-ray beam performed at the ESRF synchrotron facility. The sketch in Fig. 2 (a) illustrates the possibility to individually investigate each superdomain type of the ferroelectric domain pattern. Only this sophisticated characterization allowed to distinctly confirm the afore seen MC domain model and calculate the monoclinic shearing angles ( $0.14^\circ$ ) of the unit cells forming the ferroelectric pattern.

The investigation of the electromechanical properties of the KNN layers by double beam laser interferometry (DBLI) re-

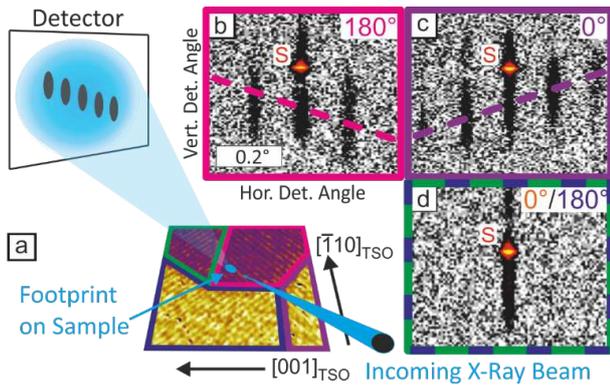


Fig. 2: X-ray diffraction from a  $50 \times 50 \text{ nm}^2$  beam spot for different positions on the sample: (a) sketch of the scattering geometry, (b)–(d) 2D intensity distributions on the two-dimensional detector in the vicinity of the (242)TSO substrate reflection (S) measured at different positions on the sample. The corresponding diffraction patterns can be assigned to particular superdomains as indicated by different colors. Adapted from [1].

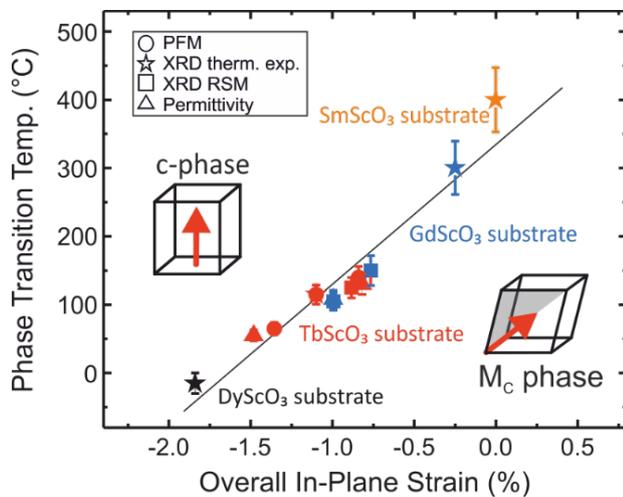


Fig. 3: Evolution of the MC-to-c-phase transition temperature as function of overall in-plane strain in KNN films. A huge and apparently linear shift from  $-15^\circ\text{C}$  to  $400^\circ\text{C}$  can be obtained. The in-plane strain was varied by choosing different (110)-oriented rare-earth scandates as substrate material. Black, red, blue and orange color indicate  $\text{DyScO}_3$ ,  $\text{TbScO}_3$ ,  $\text{GdScO}_3$  and  $\text{SmScO}_3$ , respectively. The molar potassium content was varied in the range of  $0.54 < x < 0.78$ . The transition temperatures have been determined by LPFM (circles), by thermal expansion measurements (stars), by X-ray RSMs (squares) and by permittivity measurements (triangles). Adapted from [2].

vealed a macroscopic effective piezoelectric coefficient of up to  $d_{33,f} = 23 \text{ pm/V}$ . This value is competitive to piezoelectric coefficients of alternative lead-free piezoelectrics like  $\text{BaTiO}_3$ . Furthermore, surface acoustic wave (SAW) experiments were performed in cooperation with the group of R. Wördenweber

at the Forschungszentrum Jülich (FZJ), see Ref. [1,3]. They exhibited extraordinary signal intensities considering the low thickness of the investigated film. A correlation to the structural MC domain model showed that the SAWs propagate selectively along the inherent monoclinic shearing directions. This result underlines the strong impact of crystalline symmetry on the functional properties of piezoelectrics. Additional temperature-dependent measurements showed that the SAW signals were significantly enhanced in the vicinity of a thermally induced phase transition.

Finally, a systematic study of the influence of compressive epitaxial strain on the ferroelectric-to-ferroelectric phase transition from the monoclinic MC phase into the orthorhombic c-phase in KNN films was conducted.[2] The temperature of this phase transition is shown to decrease continuously with increasing compressive strain. The total shift in transition temperature arising from such strain engineering is huge, exceeding 400 K as shown in Fig. 3. This systematic variation of the compressive epitaxial strain was imparted by the rare-earth scandate substrates selected for this study, namely (110)  $\text{DyScO}_3$ , (110)  $\text{TbScO}_3$ , (110)  $\text{GdScO}_3$  and (110)  $\text{SmScO}_3$ . Moreover, by varying the potassium-to-sodium ratio in the range of  $0.54 < x < 0.78$  the phase transition temperature was finely tuned. The phase transition and domain nanostructure were characterized in detail using a combination of temperature-dependent PFM, HR-XRD and DBLI.

The new insights of my work help towards understanding the systematics of strain engineering lead-free KNN layers and thus enable optimizing their functional properties. Therefore, they will aid in enhancing the performance of future technological devices based on ferroelectric thin films and in making them environmentally friendly.

[1] L. von Helden, M. Schmidbauer, S. Liang, M. Hanke, R. Wördenweber, and J. Schwarzkopf, Ferroelectric monoclinic phases in strained  $\text{K}_{0.70}\text{N}_{0.3}\text{NbO}_3$  thin films promoting selective surface acoustic wave propagation Nanotechnology 29 (2018), 415704.

[2] L. von Helden, L. Bogula, P.-E. Janolin, M. Hanke, T. Breuer, M. Schmidbauer, and J. Schwarzkopf, Huge impact of compressive strain on phase transition temperatures in epitaxial ferroelectric  $\text{K}_x\text{N}_{1-x}\text{NbO}_3$  thin films, Applied Physics Letters 114 (2019), 232905.

[3] S. Liang, Y. Dai, L. von Helden, J. Schwarzkopf, and R. Wördenweber, Surface acoustic waves in strain-engineered  $\text{K}_{0.70}\text{N}_{0.3}\text{NbO}_3$  thin films, Applied Physics Letters 113 (2018), 052901.

## Mitglieder 2019, zweite Jahreshälfte

Wir begrüßen seit dem 30.06.2019 als neue Mitglieder (Stand 19.12.2019):

### Neumitglieder / Privatpersonen:

Herr Alexander Gybin	Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin
Herr Christian Rhode	Goethe-Universität Frankfurt/M.
Herr Prof. Jürgen Christen	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

### Verstorben:

Prof. Dr. Josef Grabmaier	München
---------------------------	---------

## Wer züchtet den schönsten Kristall? - Gewinner des bundesweiten Schülerwettbewerbs stehen fest

Pressemitteilung | Fraunhofer IISB | 16.12.2019

**3500 Schülerinnen und Schüler von 250 Schulen aus ganz Deutschland nahmen am bundesweiten Schülerwettbewerb „Wer züchtet den schönsten Kristall?“ teil. Der Wettbewerb wurde vom Fraunhofer IISB, der Deutschen Gesellschaft für Kristallwachstum und Kristallzüchtung (DGKK) und dem Leistungszentrum Elektroniksysteme (LZE) gemeinsam mit dem P-Seminar „Kristallwettbewerb“ des Gymnasiums Eckental organisiert. Eine Fachjury wählte die Gewinnerkristalle aus 350 eingesendeten Alaunkristallen aus. Der erste Preis ging an das Theodor-Fliedner-Gymnasium in Düsseldorf. Den zweiten Platz teilen sich das Max-Planck-Gymnasium in München, die Georg-Kerschensteiner-Schule in Müllheim und die staatliche Realschule in Dornburg-Camburg. Auf dem dritten Platz landeten die Kaufmännischen Schulen Hausach. Darüber hinaus bekommen das Kant-Gymnasium in Boppard und die staatliche Realschule in Herzogenaurach Sonderpreise.**

Um den Schülerinnen und Schülern den Einfluss dieser technischen Kristalle auf unser tägliches Leben bewusst zu machen und sie für die Ingenieurs- und Naturwissenschaften zu begeistern, haben das Fraunhofer IISB, die Deutsche Gesellschaft für Kristallwachstum und Kristallzüchtung (DGKK) und das Leistungszentrum Elektroniksysteme (LZE) Anfang 2019 zur Teilnahme am bundesweiten Schülerwettbewerb „Wer züchtet den schönsten Kristall?“ aufgerufen.

670 Gruppen aus den Jahrgangsstufen 5 bis 12 mit insgesamt 3500 Schülerinnen und Schülern von 250 Schulen aus ganz Deutschland folgten dem Aufruf. Die Schülergruppen beteiligten sich zusammen mit jeweils einer betreuenden Lehrkraft am Wettbewerb. Mit viel Engagement nutzten die Gruppen die Zeit von Mai bis November für Experimente, um aus dem von den Organisatoren zur Verfügung gestellten Alaunsalz möglichst schöne und große Kristalle zu „züchten“.

Mit viel Stolz haben die Schülerinnen und Schüler nun vor kurzem ihre besten Exemplare an das Fraunhofer IISB eingesandt, wo eine Fachjury aus den 350 zurückgeschickten Kristallen die besonders schönen Gewinnerkristalle auswählte. Diese zeichnen sich durch eine Doppelpyramidenform aus, sind weitestgehend wasserklar und möglichst groß.

Der erste Preis für den „schönsten Kristall“ ging an das Theodor-Fliedner-Gymnasium in Düsseldorf. Den zweiten Platz teilen sich das Max-Planck-Gymnasium in München, die Georg-Kerschensteiner-Schule in Müllheim und die staatliche Realschule in Dornburg-Camburg. Auf dem dritten Platz landeten die Kaufmännischen Schulen Hausach. Darüber hinaus bekommen das Kant-Gymnasium in Boppard und die staatliche Realschule in Herzogenaurach einen Sonderpreis für den „größten Kristall“ sowie für die „kreativste Kristallpräsentation“. Alle Gewinner erhalten einen „Siliziumkristall“ mit dem Namen ihrer Schule als repräsentative Urkunde, eine Geldprämie sowie einen Reisekostenzuschuss zur Teilnahme an der feierlichen Preisverleihung. Die Preisverleihung findet am 12. März 2020 im Rahmen der Deutschen Kristallzüchtungstagung in München statt.

Der Schülerwettbewerb „Wer züchtet den schönsten Kristall?“ wurde vom Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB in Erlangen, der Deutschen Gesellschaft für Kristallwachstum und Kristallzüchtung e.V.

und dem LZE e.V. gemeinsam mit dem P-Seminar „Kristallwettbewerb“ des Gymnasiums Eckental organisiert und durchgeführt. Bayern Innovativ mit den Clustern neue Werkstoffe und Energietechnik sowie die Firmen (alphabetisch) Aixtron, AMS, Freiburger Compound Materials, PVA CGS und Siltronic unterstützten den Wettbewerb finanziell.

Für den Wettbewerb gab es von Seiten der teilnehmenden Schulen durchweg positive Rückmeldung. Aufgrund dieser positiven Resonanz ist bereits eine Wiederauflage des Wettbewerbs für das Schuljahr 2022/2023 geplant.

Hier einige ausgewählte Stimmen: „Wir konnten es zuerst nicht glauben, dass aus so kleinen Krümeln so große, schöne Kristalle wachsen können. Man braucht ganz schön Geduld [...] Auch der Stromausfall beim Kühlschrank in den Sommerferien [...] konnte uns nicht bremsen“. „Die Schülerinnen und Schüler hatten mächtig Spaß dabei und sie haben sich sehr viel Mühe gegeben, auch wenn ihnen viel Geduld abverlangt wurde“, so das Feedback von betreuenden Lehrkräften. „Schön, dass es Institute wie das Ihrige gibt, die naturwissenschaftlich orientierte Wettbewerbe anbieten und fördern. Außerdem ein sehr großes Lob für die hervorragende Information und Anleitung sowie die Bereitstellung des Salzes. Dadurch war es für mich als Lehrkraft total entspannt und einfach, mit meinen Schülern an diesem Wettbewerb teilzunehmen.“ „Ich finde es super, dass den Jugendlichen durch so einen Wettbewerb die Möglichkeit gegeben wird, über den Unterricht hinaus zu blicken und naturwissenschaftliches Arbeiten selbst auszuprobieren. Spannenderweise zieht das Format externer Wettbewerb oftmals besser als das Angebot zu einem Wahlunterricht an der eigenen Schule“.

### Kontakt:

Dr.-Ing. Jochen Friedrich  
Head of Department Materials  
Fraunhofer Institute for Integrated Systems and Device Technology IISB, Schottkystrasse 10  
91058 Erlangen, Germany  
Phone +49 9131 761-269



Sieger: Theodor-Fliedner-Gymnasium Düsseldorf



Platz 2: Georg-Kerschensteiner-Schule Müllheim



Platz 2: Staatl. Realschule Dornburg-Camburg



Platz 2: Max-Planck-Gymnasium München



Platz 3: Kaufmännische Schulen Hausach



Siegerkristalle



Sonderpreis: Kant-Gymnasium Boppard



Sonderpreis: Staatliche Realschule Herzogenaurach

Alle Abbildungen auf dieser Seite sind von A. Grabinger, IISB.

## Über die DGKK

Die Deutsche Gesellschaft für Kristallwachstum und Kristallzüchtung (DGKK) ist eine gemeinnützige Organisation zur Förderung der Forschung, Lehre und Technologie auf dem Gebiet des Kristallwachstums und der Kristallzüchtung. Sie vertritt die Interessen ihrer Mitglieder auf nationaler und internationaler Ebene.

### 1. Vorsitzender

Prof. Dr. Andreas N. Danilewsky  
Kristallographie  
Institut für Geo- und Umweltwissenschaften  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Hermann-Herder-Str. 5, 79104 Freiburg  
Tel.: 0761 / 203 - 6450  
E-Mail: a.danilewsky@krist.uni-freiburg.de

### 2. Vorsitzender

Prof. Dr. Andreas Erb  
Walther-Meißner-Institut für Tieftemperaturphysik  
der Bayerischen Akademie der Wissenschaften  
Walther-Meißner-Straße 8, 85748 Garching  
Tel.: (089) 2891 4228  
E-Mail: a.erb@wmi.badw.de

### Schatzmeister

Prof. Dr. Peter Wellmann  
Institut für Werkstoffwissenschaften 6  
Friedrich-Alexander-Universität (FAU)  
Martensstr. 7, 91058 Erlangen  
Tel.: 09131 / 85 27635  
Fax: 09131 / 85 28495  
E-Mail: peter.wellmann@ww.uni-erlangen.de

### Schriftführerin

Dr. Christiane Frank-Rotsch  
Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ)  
Max-Born-Str.2, 12489 Berlin  
Tel.: 030 / 6392 3031  
Fax: 030 / 6392 3003  
E-Mail: christiane.frank-rotsch@ikz-berlin.de

### Redaktion:

Dr. Klaus Böttcher  
Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ)  
Tel.: 030 / 6392 3073  
Fax: 030 / 6392 3003  
E-Mail: redaktion@dgkk.de

### Anzeigen:

Dr. Ulrike Wunderwald  
Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien  
(THM)  
Tel.: 03731 / 2033-101  
E-Mail: Ulrike.Wunderwald@thm.fraunhofer.de

### Nachrichten der DGKK, Stellenangebote, Stellengesuche:

Dr. Christiane Frank-Rotsch  
Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ)  
Tel.: 030 / 6392 3031  
Fax: 030 / 6392 3003  
E-Mail: christiane.frank-rotsch@ikz-berlin.de

### Redaktionsschluss:

27. Dezember 2019  
ISSN 2193-374X (Druck)  
**ISSN 2193-3758 (Internet)**  
Gesetzt mit pdfL<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

Die DGKK ist Mitglied der Bundesvereinigung Materialwissenschaft und Werkstofftechnik e.V. (BV MatWerk). Die DGKK veranstaltet jährlich die Deutsche Kristallzüchtungstagung, gibt zweimal jährlich das DGKK-Mitteilungsblatt heraus und unterhält eine Web-Seite ([www.dgkk.de](http://www.dgkk.de)). Die Arbeit der Gesellschaft ist in Arbeitskreisen organisiert.

### Beisitzer

Dr. Ulrike Wunderwald  
Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien  
(THM)  
Am St.-Niclas-Schacht 13, 09599 Freiberg  
Tel.: 03731 / 2033-101  
E-Mail: Ulrike.Wunderwald@thm.fraunhofer.de

Dr. Ludwig Stockmeier  
Siltronic AG  
Berthelsdorfer Straße 113, 09599 Freiberg  
Tel.: 03731 / 278-7295  
E-Mail: ludwig.stockmeier@siltronic.com

Dr. Götz Meisterernst  
Siltronic AG  
Johannes-Hess-Straße 24, 84489 Burghausen  
Tel.: 08677/ 83 - 3930  
E-Mail: goetz.meisterernst@siltronic.com

### Bankverbindung:

Sparkasse Karlsruhe  
Kto.-Nr.: 104 306 19  
BLZ: 660 501 01  
IBAN DE84 6605 0101 0010 4306 19  
SWIFT-BIC: KARSDE66

### Internetredaktion:

Die Internetredaktion setzt sich gegenwärtig aus der Schriftführerin, der Webmasterin und dem Redaktionsteam des Mitteilungsblattes zusammen.

E-Mail: [internet.redaktion@dgkk.de](mailto:internet.redaktion@dgkk.de)

Sabine Bergmann

Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ)

Tel.: 030 / 6392 3093

E-Mail: [webmaster@dgkk.de](mailto:webmaster@dgkk.de)

WWW: <http://www.dgkk.de>

### Mitgliedschaft:

Der Mitgliedsbeitrag kostet zur Zeit im Jahr 30 € und für Studenten ermäßigt 20 €. Beiträge für juristische Personen erhalten Sie auf Anfrage. Sie können sich über die Internetseite der DGKK online anmelden. Dort finden Sie auch die DGKK Stichwortliste.

### Anzeigenpreise:

Die Anzeigenpreise gelten pro Anzeige in Abhängigkeit von der Größe und sind Brutto-Preise. Bitte wenden Sie sich bei Interesse an die Redaktion.

Anzahl Anzeigen	DGKK-Mitglieder		Nicht-Mitglieder	
	1/1 Seite	1/2 Seite	1/1 Seite	1/2 Seite
1	288,00 €	135,00 €	320,00 €	150,00 €
4	234,00 €	108,00 €	260,00 €	120,00 €

## Arbeitskreise der DGKK

### Herstellung und Charakterisierung von Massiven Halbleiterkristallen

Sprecher: Prof. Dr. Peter Wellmann  
 Institut für Werkstoffwissenschaften 6, Universität Erlangen-Nürnberg, Martensstr. 7, 91058 Erlangen  
 Tel.: 09131 85 27635 Fax: (09131) 85 28495 E-Mail: peter.wellmann@ww.uni-erlangen.de

### Intermetallische und oxidische Systeme mit Spin- und Ladungskorrelationen

Sprecher: Prof. Dr. Andreas Erb  
 Walther-Meißner-Institut, Walther-Meißner-Straße 8, 85748 Garching  
 Tel.: (089) 2891 4228 E-Mail: a.erb@wmi.badw.de

### Kristalle für Laser und Nichtlineare Optik

Sprecher: Dr. Klaus Dupré  
 FEE, Struthstr. 2, 55743 Idar-Oberstein  
 Tel.: (06781) 21191 E-Mail: dupre@fee-io.de

### Epitaxie von III-V-Halbleitern

Sprecher: Prof. Dr. Michael Heuken  
 AIXTRON SE, Dornkaulstr. 2, 52134 Herzogenrath  
 Tel.: (2407) 9030 154 Fax: (2407) 9030 125 E-Mail: m.heuken@aixtron.com

### Wachstumskinetik und Nanostrukturen

Sprecher: Dr. Wolfram Miller  
 Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Max-Born-Str. 2, 12489 Berlin  
 Tel.: (030) 6392 3074 Fax: (030) 6392 3003 E-Mail: wolfram.miller@ikz-berlin.de

### Industrielle Kristallzüchtung

Sprecher: Dr. Götz Meisterernst  
 Siltronic AG, Johannes-Hess-Straße 24, D-84489 Burghausen  
 Tel.: (08677) 83 7556 E-Mail: goetz.meisterernst@siltronic.com

### Angewandte Simulation in der Kristallzüchtung

Sprecher: Dr. Lev Kadinski  
 Siltronic AG, Johannes-Hess-Straße 24, 84489 Burghausen  
 Tel.: (08677) 83 1991 Fax: (08677) 83 7303 E-Mail: lev.kadinski@siltronic.com

## Tagungskalender

### 2020

- **11. – 13. März 2020**  
 Deutsche Kristallzüchtungstagung DKT 2020,  
**TU München, Garching**
- **14. – 18. Juni 2020**  
 8<sup>th</sup> Int. Workshop on Crystal Growth Technology  
 (IWCGT-8), <https://iwcgt-8.ikz-berlin.de/>  
**Berlin**
- **23. – 28. August 2020**  
 Int. Workshop on Nitride Semiconductors  
 (IWN 2020), <https://www.iwn2020.org/>  
**Berlin**
- **17. – 18. September 2020**  
 9. French-German Workshop on Oxide, Dielectric,  
 and Laser Crystals (DGKK-Oxide 2020)  
**IKZ, Berlin**
- **04. – 06. Oktober 2020**  
 2<sup>nd</sup> Joint Meeting of the "Young Crystallographers"  
 (DGK) and the "Young Crystal Growers" (DGKK)  
<https://dggk-home.de/aks/jkyc/freiberg-2020/>  
**TU Bergakademie Freiberg**
- **07. – 08. Oktober 2020**  
 DGKK-Arbeitskreistreffen "Massive Halbleiter",  
**TU Bergakademie Freiberg**
- **08. – 09. Oktober 2020**  
 DGKK-Arbeitskreistreffen "Intermetallika",  
**IWF Dresden**

### 2021

- **21. – 24. Juli 2021**  
 3<sup>rd</sup> European School on Crystal Growth (ESCG-3),  
**Chimie - ParisTech, Paris**
- **26. – 28. Juli 2021**  
 7<sup>th</sup> Europ. Conf. on Crystal Growth (ECCG-7),  
**Marriot Rive Gauche, Paris**

# Feedback furnace

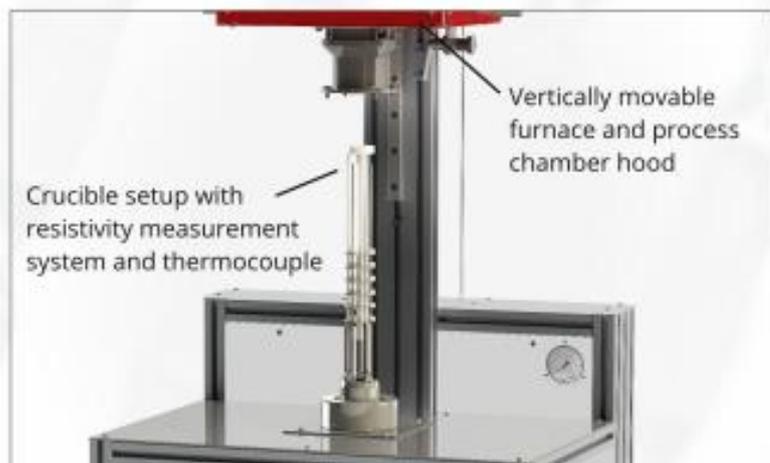
Novel equipment for flux crystal growth:  
Direct process control by in-situ detection of phase transitions

Heating power of the furnace is directly linked to conversion processes in the sample material:

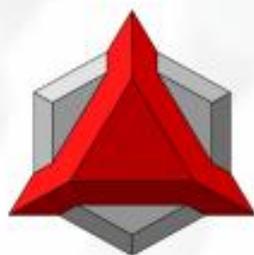
- Detect crystallization onset by latent heat monitoring directly from the solution
- Perform seed selection by temperature oscillation at the crystallization point
- Suppress supercooling and uncontrolled crystallization

Technical specifications in the standard configuration:

- Max. temperature: 1300 °C
- Max. crucible dimensions:  $d = 25 \text{ mm}$ ,  $h = 50 \text{ mm}$
- Precise sample temperature monitoring by lock-in amplified resistivity measurements AND thermocouples
- Automatic detection of temperature anomalies down to  $10^{-4} \text{ abs}(T)$
- Fully computer-controlled and automatable via GUI or python scripts
- Vacuum and gas connections
- Comfortable crucible installation due to a vertically movable furnace hood

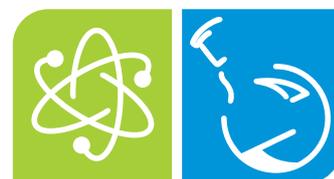


A high-precision measurement system directly detects ongoing crystallization during flux growth by the onset of characteristic signatures in the temperature profile of the sample. This signal is caused by the latent heat associated with the phase transition. The in-situ detection of nucleation allows to significantly reduce the relevant temperature regime and enhances the applicability of lower cooling rates than previously practical. The feedback furnace combines crystal growth with a thermal analysis of the sample material to provide a powerful instrument for the creation of heretofore poorly studied multicomponent compounds.



**SCIDRE**  
SCIENTIFIC INSTRUMENTS DRESDEN GMBH

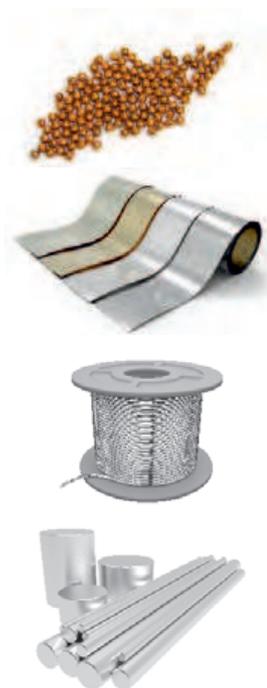
High Pure Metals and Inorganics  
Rare Earth Metals and Compounds  
Precious Metals and Compounds  
Organometallics  
Precious Metals Catalysts  
Sputtering Targets  
Evaporation Materials  
Laboratory Equipment  
Nanopowders  
Customized Synthesis



**chemPUR**

*Ihr Partner für Chemie & Physik*

# Wir schaffen Verbindungen



- individueller Service
- bezugsnahe Betreuung
- fachkundige Beratung
- enge Zusammenarbeit
- zertifiziert nach  
ISO 9001:2008

ChemPur Feinchemikalien und Forschungsbedarf GmbH  
Rüppurrer Straße 92    Tel.: + 49 (0) 7 21 - 9 33 81 40  
D-76137 Karlsruhe    info@chempur.de

[www.chempur.de](http://www.chempur.de)