

B21567 F

Kultur & Technik

Zeitschrift des Deutschen Museums München

3/1983

DM 5.-/öS 50.-

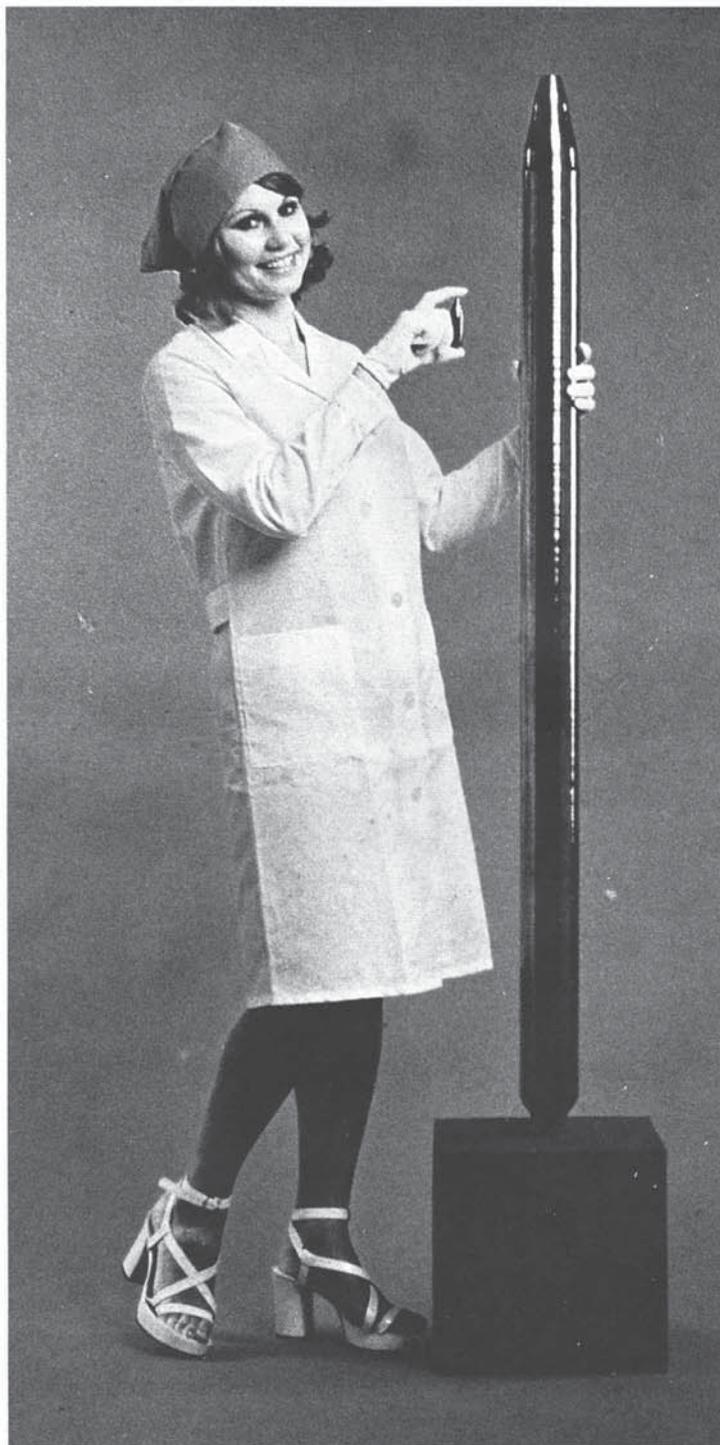
Verlag Karl Thieme München



FESTKÖRPER QUO VADIS?

»It's difficult to prophesy, mainly if it concerns the future«

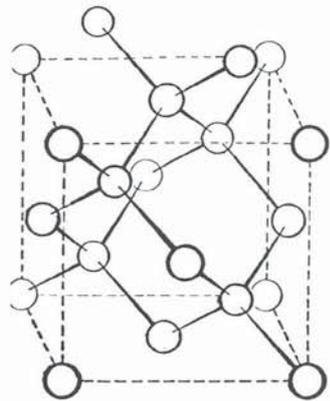
Mit seinem Artikel »Festkörperphysik: Quo vadis?« schreckte Gert Eilenberger im März 1981 die Leser der Physikalischen Blätter, der Verbandszeitschrift der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG), auf [1] und konnte eine respektable Ernte an humanistisch geschmückten Gegenreden ernten [2–4]: »Quidquid agis, prudenter agas.« Es wäre reizvoll, diese Kontroverse hier zu verfolgen, jedoch gestattet dies der Raum leider nicht. Woran hat sich die Diskussion entzündet? Vielleicht an Eilenbergers Behauptung, daß die Festkörperphysik, ja die Physik überhaupt, sich immer mehr von grundlegenden Fragestellungen entfernt und zu einer »höheren« Ingenieurwissenschaft entwickelt, also kein »faustisches Suchen« mehr, sondern ein materials tailoring für jeden Zweck... Widerspricht dem z. B. nicht, daß bis heute keine in sich geschlossene mikroskopische Theorie der Suprafluidität von Helium (He-4) existiert, ein Effekt, der schon in den zwanziger Jahren entdeckt wurde [2], und noch viele grundlegende Phänomene ihrer Klärung harren? Aus Eilenbergers Aufsatz spricht auch der Unmut der Spezialisierung auf immer kleinere Bereiche der Festkörperphysik, ganz zu schweigen im Hinblick auf die gesamte Physik. Die intensive Diskussion der provokanten Eilenbergerschen Thesen [1] hat den technologischen Sog, dem sich die Grundlagenforschung auch immer mehr ausgesetzt sieht, beleuchtet. – In der Tat, vom Laserplattenspieler über den Herzschrittmacher bis zum phototropen Glas von Sonnenbrillen und dem Farbfernseh Bildschirm, stößt man heute auf die Auswirkungen der Festkörperphysik. Wir wollen hier zur



Orientierung einen kleinen Streifzug zur Beleuchtung von Facetten heutiger Festkörperwissenschaft unternehmen. Vor 40 Jahren stand der Festkörperwissenschaftler nicht gerade im höchsten Ansehen unter den Kollegen, es war da viel von »Schwarzkunst« bis zu »Schmierphysik« hinter vorgehaltener Hand zu hören. Das Problem jener Frühphase war die Unmöglichkeit, Resultate, die an einem Material gewonnen wurden, mit einer anderen Festkörperprobe, zu reproduzieren. Man hatte noch nicht die modernen Kristallzuchtverfahren zur Hand, die die Herstellung von Materialien bis dahin unbekannter Reinheit (ein Fremdatom auf eine Milliarde Wirtatome) erlauben. In diesen Zeitraum fällt eine charakteristische Anekdote, an die Edgar Lüscher in seiner »Physik – einmal anders« erinnert:

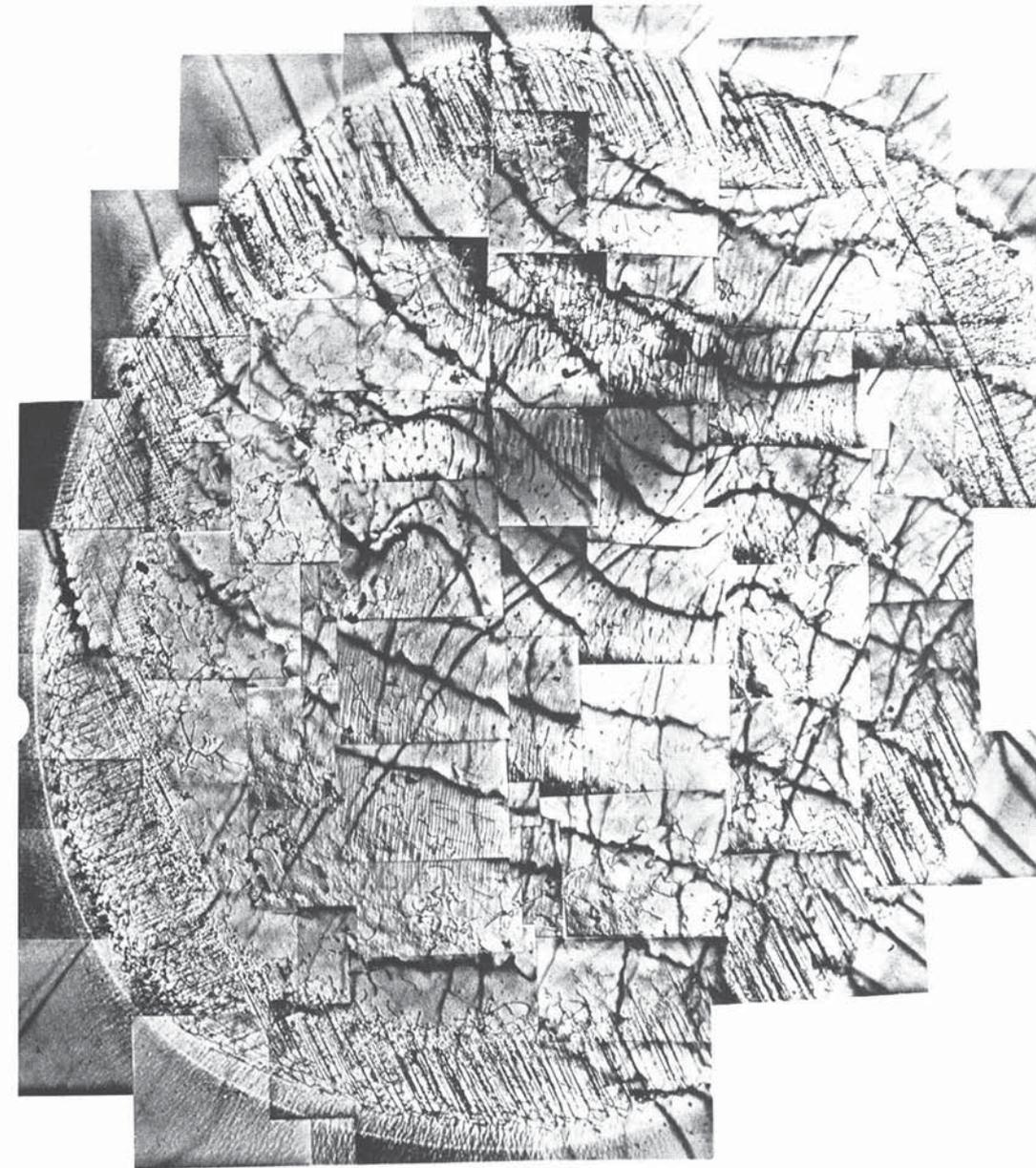
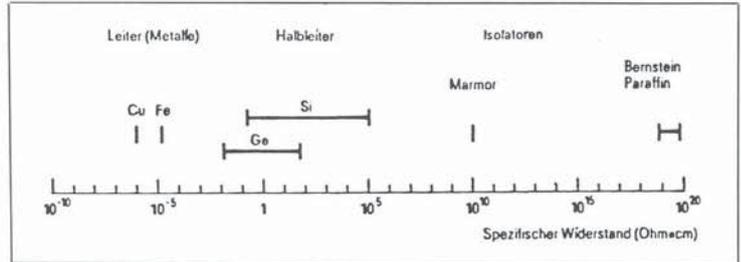
»Eine echt dramatische Entwicklung – mit Spannungsmomenten, die nur mit einem guten Kriminalroman verglichen werden können – hat sich in den beiden letzten Jahrzehnten in der Halbleiterphysik abgepielt. Noch in den 40er Jahren wurden die Festkörperphysiker von ihren viel feineren Kollegen der Kernphysik nicht ganz ernst genommen. Der Schreiber erinnert sich an die Weihnachtsfeier 1949

1 Silizium-Einkristalle hoher chemischer und kristallographischer Perfektion. Der große Kristall wiegt rund 12 kg und kann routinemäßig und computergesteuert aus einer über 1200° C heißen Schmelze gezüchtet werden. Selbst in dieser Größe können solche Kristalle versetzungsfrei und mit extrem niedrigem Gehalt an Fremdatomen technisch gefertigt werden. Diese Kristalle sind das Grundmaterial für die moderne Festkörperelektronik. (Photo Wacker-Chemitronic)



2 Das Diamantgitter, in dem auch Si und Ge, die »Stähle des Elektronikzeitalters«, kristallisieren

3 Einteilung der Stoffe nach ihrer elektrischen Leitfähigkeit; Halbleiter liegen in ihrem Leitvermögen zwischen den Metallen und den Isolatoren; aus [10]



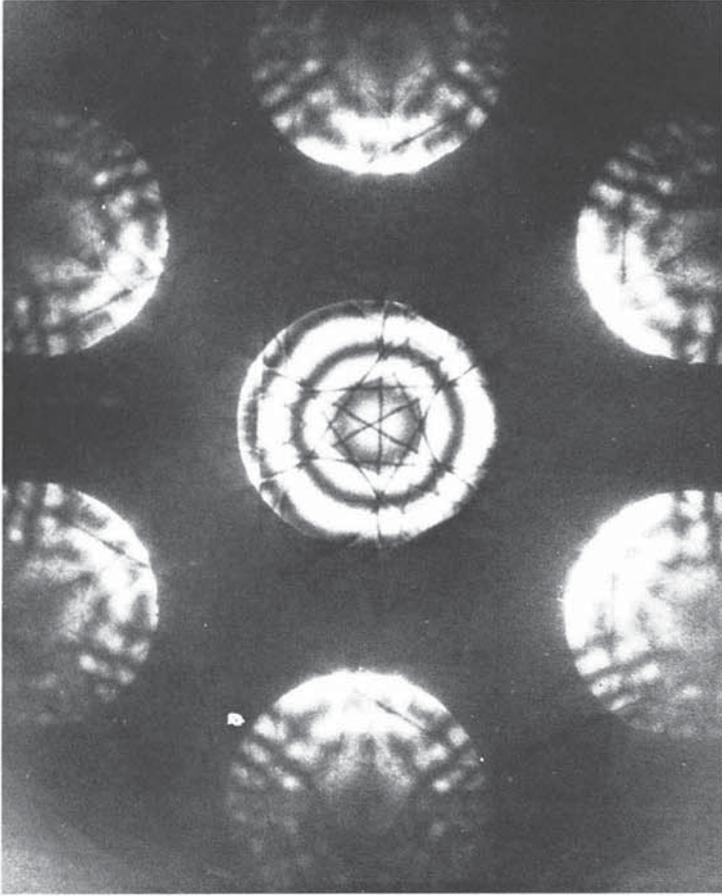
4 Elektronenmikroskopisches Bild einer Siliziumprobe, die zunächst durch Ionenimplantation amorphisiert und dann durch kurzzeitige lokale Erhitzung mit einem Laserstrahl rekristallisiert wurde. In den kristallinen Be-

reich, der von amorphem Silizium umgeben ist, sind auf Grund von Temperaturspannungen Versetzungen hineingeglitten. Die Untersuchung von Fehlstellen in einem derart ausgedehnten Gebiet erfordert ein Hochspannungselek-

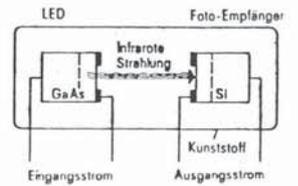
tronenmikroskop, wie es am MPI für Metallforschung in Stuttgart zur Verfügung steht, sowie ein spezielles Verfahren zur Präparation von großflächigen Proben. (Photo MPG)

des Physikalischen Instituts der ETH in Zürich. Es war ein alter Brauch, daß den verschiedenen Gruppenchefs symbolische Geschenke übergeben wurden. Die Kernphysiker überreichten Prof. Georg Busch, einem der Pioniere moderner Halbleiterphysik, einen perfekten Löcherleiter – nämlich einen Schweizer Käse. Daß die Geschenkgeber damals vor allem den zweiten Teil des Begriffes »Schweizer Käse« im Sinne hatten, war allen Institutsangehörigen klar. Die Halbleiterphysik fristete lange Zeit ein Schattendasein, da sie mit dem Makel Unsauberkeit, Fehlstellen und Ungenauigkeit behaftet war.« [5]

Eben die alchemistisch anmutenden Untersuchungen, das Durchwühlen des gesamten Fundus der Anorganiker (Gmelin), die unzähligen Versuche der Züchtung reiner Kristalle, das Zonenschmelzen, das Ziehverfahren aus der Schmelze haben Einkristalle zugänglich gemacht und damit erst den Weg für systematische, reproduzierbare, in ihren Parametern kontrollierbare Untersuchungen geebnet. Abbildung 1 zeigt – mit einem charmanten Maßstab zum Größenvergleich – zwei typische Siliziumeinkristalle. Der kleinere Kristall, den man mühelos in der Hand halten kann, stellte in den sechziger Jahren eine beachtliche Leistung dar. Heute gelingt es, 12 kg schwere Einkristalle unter wirtschaftlich vertretbarem Aufwand zu züchten, mit »genauer kristallographischer Orientierung, mit absoluter Perfektion des Kristallbaues, d. h. ohne Versetzungen, ... Das unterste Atom am Ende des Kristalls »weiß« noch genau, wie die Atomordnung vom Keimling her war. Außerdem ist die chemische Reinheit dieses Kristalls so hoch gezüchtet, daß nur jedes milliardste Atom von anderer chemischer Art ist als Sili-



5 Beugung eines konvergenten Bündels von Elektronenstrahlen an einer 1500 Å dicken, planparallelen Platte eines perfekten Silizium-Einkristalls, eine Aufnahme aus dem Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Institut für physikalische Chemie, Berlin. Die Energie der Elektronen beträgt 100 keV. Der Fokus des Strahlenbündels liegt in der Kristallplatte und hat einen Durchmesser von 100 Å. Die Platte ist senkrecht zur dreizähligen Kristallachse geschnitten; das Beugungsbild läßt diese Symmetrie erkennen. Die Extinktionskonturen, die in den kreisförmigen Beugungsreflexen erscheinen, hängen empfindlich von der inneren Struktur der Kristalle ab. Sie können zum Beispiel Informationen über die Verteilung der Bindungselektronen in reinen und dotierten Kristallen liefern. (Photo MPG)



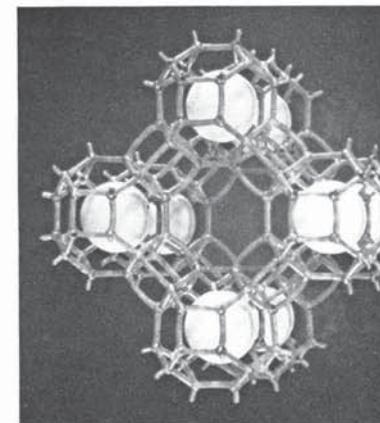
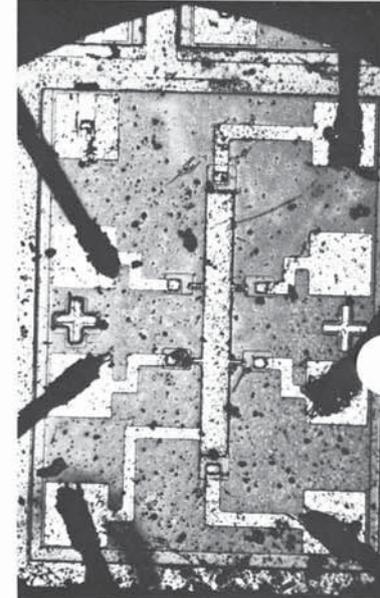
7 Optoelektronisches Koppel element; aus [10]

8 Die MOSFET-Bauelemente, an denen Klaus von Klitzing die Quantisierung des Hall-Effekts nachweisen konnte, sind nur 0,4 mm lang und 0,04 mm breit: Die balkenförmige Probe befindet sich in der Mitte des Bildes. Die zur Seite und nach außen geführten in rechteckige Kontaktflächen auslaufenden Elektroden dienen dem Anschluß der Proben. Die Oberfläche des in diesem Mikroskopbild gezeigten MOSFET-Elements ist relativ schmutzig, nachdem damit schon in großer Anzahl Experimente durchgeführt wurden. (Photo MPG)



6 Th. Maiman, der Vater des Rubinlasers. Der an den Seitenflächen verspiegelte Rubinstab ist mit einer Xenon-Blitzlampenwendel als Pumpsystem umgeben. (Photo Franzis Verlag)

9 Speicherung von Krypton 85 im Kristallgitter von Zeolithen. Die Abbildung zeigt als Modell den Aufbau des Kristallgitters sog. 5A-Zeolithe. Man erkennt im Zentrum einen großen Hohlraum, der von je 4 weiteren kleineren Hohlräumen symmetrisch umgeben ist, in denen das Krypton 85, durch die weißen Kugeln veranschaulicht, gespeichert werden kann. An der Vorderseite der symmetrisch angeordneten kleinen Hohlräume sind die Poren erkennbar, mit denen die Hohlräume untereinander in Verbindung stehen. In kaltem Zustand sind sie kleiner als die in den Hohlräumen gespeicherten Gasmoleküle. Man beachte, daß die Darstellung nicht voll maßstabsgerecht ist. (Photo Kernforschungszentrum Karlsruhe)



**FESTKÖRPER
QUO VADIS?**



10 Kunst- und Gebrauchsgegenstände der verschiedensten Epochen werden im Heidelberger MPI für Kernphysik mit Hilfe der Thermolumineszenz-Methode untersucht und datiert. Das Anbohren erfordert eine ruhige Hand, um die wertvollen Stücke nicht mehr als notwendig zu beschädigen. Das Pferd erwies sich als eine Nachbildung einer altchinesischen Keramikplastik aus der T'ang-Dynastie. (Photo MPG)



11 Auch ein »Arbeitsplatz« für Festkörperforscher, die sich mit Archäometrie befassen. Das Bild zeigt eine antike Bergwerksgalerie auf der Kykladeninsel Sifnos. (Photo MPG)

zium« [6]. Mit den hochreinen Wirten Silizium und Germanium, die im Diamantgitter kristallisieren (Abb. 2), verfügt man über die Ausgangsstoffe der Halbleiterindustrie; diese Materialien werden deshalb auch oft als »moderner Stahl« bezeichnet. Die geziel-

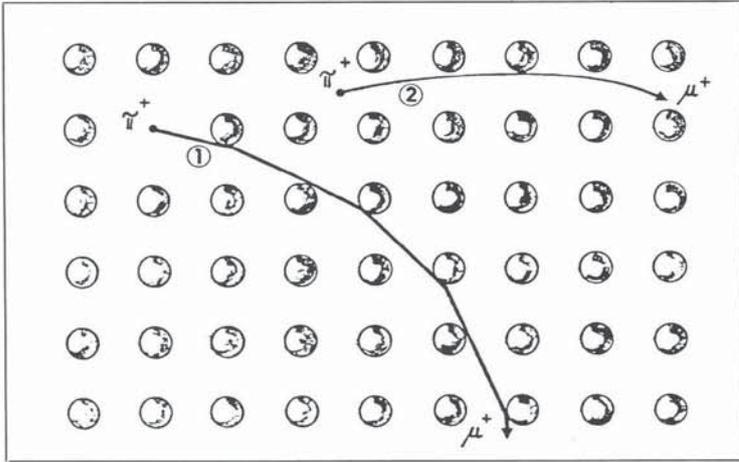
te Veränderung der Leitfähigkeit von Halbleitern durch Variation des Gehalts an Fremdatomen hat über die Ausnutzung des Sperrschichteffekts den Aufbau moderner elektrischer Bauelemente erst ermöglicht. Die Entwicklung des Transistors geht auf Shockley, Brattain und Bardeen Ende der vierziger Jahre zurück [7–9]. Damit begann der Siegeszug der Miniaturisierung durch Hochintegration. Kostete vor 15 Jahren eine Transistorfunktion noch 5 DM, so ist der Preis 1983 auf 0,005 Pfen-

nig gefallen, dies entspricht einem Faktor von 10^5 . Noch 15 Jahre nach der Entdeckung des Transistoreffekts vermochte man nur einige Transistoren auf einem Siliziumeinkristall zu integrieren, zur Zeit sind es zwischen 150 000 und einer Million; die sich abzeichnenden Grenzen werden um 10–100 Millionen Transistoreinheiten pro Baustein geschätzt. Die den Festkörperswissenschaften entstammenden Halbleiter von der Tunnel- und Lumineszenzdiode über den Halbleiterlaser, den Thyristor

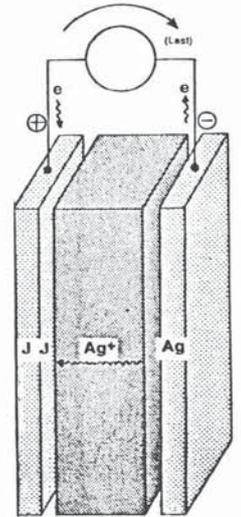
und Triac bis hin zur MOS-Technik und dem Mikroprozessor verändern unser tägliches Leben in noch nicht absehbarer Weise. Die Abwicklung des bargeldlosen Zahlungsverkehrs ist dabei nur ein Beispiel. Allein in New York City wechselten 1980 eine Milliarden Schecks ihren Besitzer, die damit verbundene Zahl von Buchungsvorgängen kann nur mehr ein Computer bewerkstelligen. Die moderne Medizin, sei es nun das Überwachungs-EKG von der Größe einer Zigaretenschachtel, das bequem vom Patienten in der Nachsorgephase ständig getragen werden kann, der Herzschrittmacher, der anschnallbare Insulininjektor, dessen Mikroprozessorstuerung eine an den Bedarf angepasste Dosierung gestattet, oder die Prozeßrechner in der Nuklearmedizin zur dynamischen Szintigraphie, kommt ohne die Mikroelektronik nicht mehr aus. Der Ausbau der Kommunikationssysteme, z. B. könnte theoretisch die gesamte Weltbevölkerung gleichzeitig über einen Laserstrahl telefonieren, die bemannte Welt Raumfahrt und Satellitentechnik, die Glasfaserkabel zum Informationstransport [11] ... entwickeln einen gigantischen Informationsmarkt. Man könnte spekulieren, daß eine Dezentralisierung der Arbeit folgen wird, die es z. B. Behinderten gestatten wird, mit dem heimischen Terminal ein Fenster in die Arbeitswelt zu erhalten und so vom Informationsmarkt zu profitieren.

Waren die Großrechner in den 50er Jahren noch etagenfüllende, aufgrund ihrer Wärmeentwicklung (Röhren) raumbeheizende Einrichtungen, so konzentriert die fortschreitende Miniaturisierung

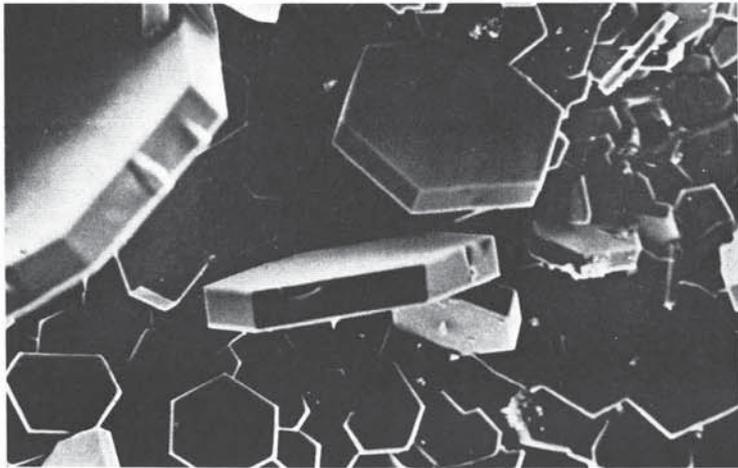
FESTKÖRPER QUO VADIS?



12 »Im Kristallgitter bestehen für ein durch Zerfall eines Pions in Gang gesetztes Myon sehr unterschiedliche Fortbewegungsmöglichkeiten. Startet es von einer Fehlstelle aus (Bahn 1), wird es unsystematisch abgelenkt und verläßt den Kristall irgendwo. Von einem Zwischengitterplatz aus (Bahn 2) bleibt das Myon dagegen innerhalb einer Kristallebene und stößt ›storkelnd‹ gegen die imaginären Wände des Kristallgitters. Es wird *nur in bestimmte, durch die Symmetrieachse des Kristalls festgelegte Richtungen kanalisiert.*« (Photo MPG)



14 Prinzip einer Festkörperbatterie. (Photo MPG)



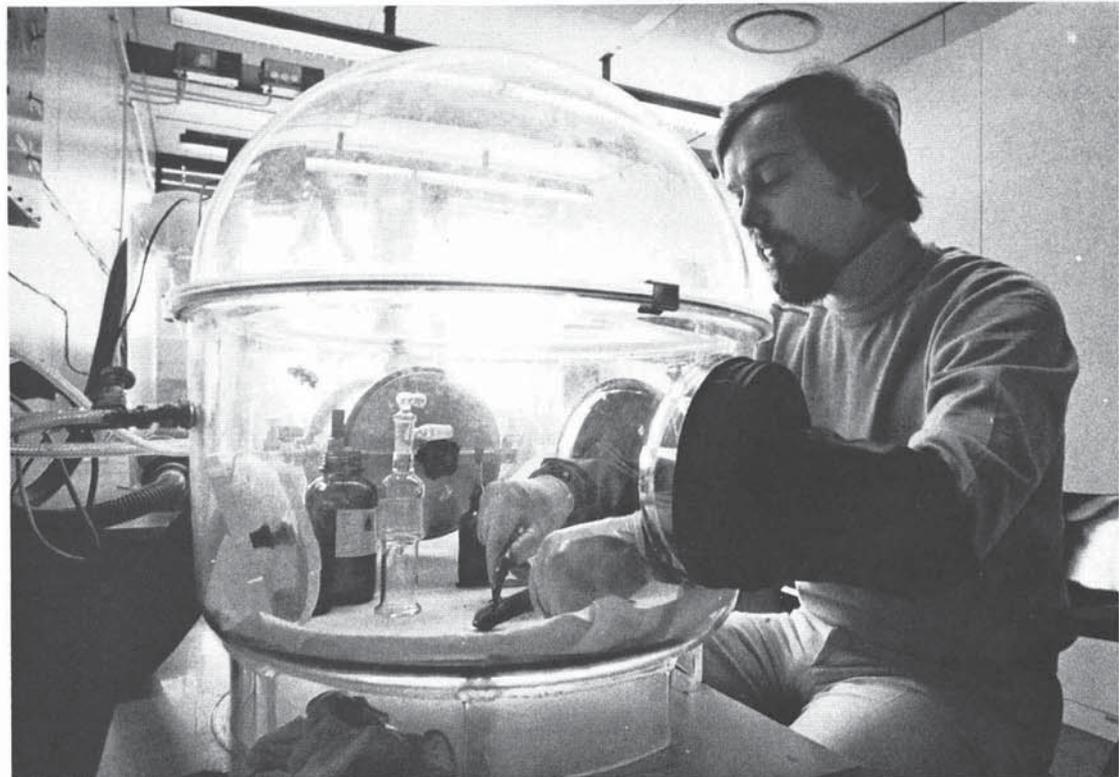
13 Lithiumnitridkristalle aus der Hochdrucksynthese mit charakteristischer hexagonaler Symmetrie im Rasterelektronenmikroskop. (Photo MPG)

höflich sind, wissen sie diesen Fehler ihres Gastes positiv zu deuten. Das Fehlen eines negativen Elektrons ist für die Gastgeber einfach gleichwertig mit dem Vorhandensein eines positiven Loches. Physikalisch ist es tatsächlich so, daß sich diese positiven Löcher wie positive Ladungen benehmen, und man nennt solche Halbleiter p-leitend – p steht für positiv oder

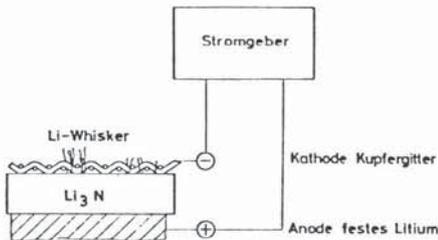
die gleiche Rechenkapazität auf einen handlichen Tischrechner. Wie schon erwähnt, kann die Leitfähigkeit von Halbleitern (Abb. 3) innerhalb weiter Grenzen durch die Einbringung von Fremdatomen variiert werden; das Dotieren kann schon während des Ziehvorgangs des Einkristalls durch geeignete Schmelzzusätze erfolgen oder durch Neutronenbestrahlung, Legierung, Diffusion und oder Implantation.

»Werden andererseits Elemente wie Bor, Indium aus der 3. Gruppe in Silizium oder Germaniumkristalle eingebaut, so fehlt pro Gastatom ein Elektron. Da Silizium und Germanium als Wirte sehr

15 In der Inertgasglovebox werden die empfindlichen Lithiumnitrid-Kristalle poliert und mit verschiedenen Elektroden kontaktiert. Ebenso wird, wie hier gezeigt, das Lithiummetall vor der Synthese von der Oxidschicht gereinigt. (Photo Peter Blachian, MPG)



16 Experimentelle Anordnung zum Studium von Lithium-Whiskern. Der Transport von Lithium von der Anode (festes Lithium) zur Kathode (Kupferritter) wird durch die Lithium-Ionenleitung



im Lithiumnitrid ermöglicht. Bei einem Strom von einigen Milliampere beobachtet man nach wenigen Stunden Lithium-Whisker, die durch das Kupferritter wachsen

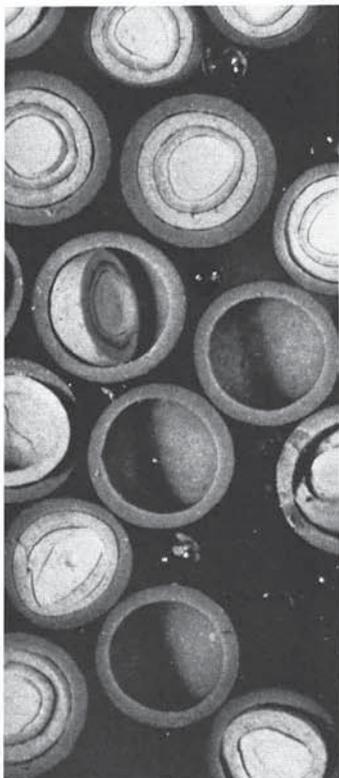


17 Kleine Kugeln mit gleichem Durchmesser entstehen in einem Taumelbehälter nach einem vom Pulvermetallurgischen Laboratorium des Max-Planck-Instituts (Nils Claussen, Günter Petzow) für Metallforschung gefundenen Anlagerungs-(Agglomerations-) Verfahren. Im Bild verschiedene Größenklassen trocken agglomerierter ungesinterter Aluminiumoxid-Kugeln (Al_2O_3) mit Durchmessern zwischen 0,075 und 3 Millimeter. (Photo MPG)

Akzeptoren. In einem allerdings unterscheiden sich diese positiven Löcher von wirklichen Ladungen. Die angesprochene Höflichkeit bezieht sich nur auf den Gastgeber, nicht aber seine Nachbarn, die dafür überhaupt kein Verständnis haben. Wird ein solcher p-leitender Halbleiter mit metallischen Kontakten versehen, so weist das Metall die positiven Löcher ab; diese haben ihren Existenzbereich nur innerhalb des Gastgeberkristalls. Elektronen von n-leitenden Halbleitern sind dagegen in den Kontaktmetallen sehr wohl willkommen, da sie ja wirkliche Ladungen sind.» [12]

Bei der Bauelementherstellung

18 Querschliff durch gesinterte, aus mehreren Schichten verschiedener keramischer Pulver bestehende Kugeln, die nach einem vom Pulvermetallurgischen Laboratorium des Max-Planck-Instituts für Metallforschung entwickelten Verfahren aufgebaut wurden: Ausgehend von unregelmäßigen, inneren Keimen wird mit zunehmender Schichtfolge eine unregelmäßige Kugelform angestrebt. (Photo MPG)



werden beim Germanium-Legierungstransistor Indiumkügelchen auf den n-leitenden Germanium-Kristall aufgeschmolzen. Das Indium löst einen Teil des Germanium an und beim Erstarren werden Indiumatome ins Germaniumgitter eingebaut, wobei p-leitende Kristallbereiche entstehen. Eine andere Vorgehensweise besteht darin, bei etwa 1000°C Siliziumkristallscheiben Bordampf auszusetzen. Die Bor-Atome diffundieren in das n-Silizium ein und erzeugen die p-leitende Zone, n-leitende Zonen gehen auf die Diffusionsbehandlung mit Phosphor zurück. Eine genaue Lokalisation und Dosierung gestattet das Ionenimplantationsverfahren. Der in der Gasphase ionisierte Dotierstoff wird im Vakuum durch ein elektrisches Feld beschleunigt und in den Halbleiterkristall hineingeschossen. Das Arsenal zur Untersuchung von Ausgangsmaterialien für die Halbleiterherstellung reicht übrigens von der Elektronenmikroskopie (Abb. 4), der Elektronen- und Neutronenbeugung (vgl. Abb. 5) usw. bis hin zur photoakustischen Spektroskopie, bei der die Umsetzung von absorbiertener Lichtenergie via Wärme in Druckschwankungen der umgebenden Luft untersucht wird [13]. Das Geburtsdatum der modernen Festkörpertheorie läßt sich übrigens »spektroskopisch« indizieren:

Am 8. Juni 1912 legten Max von Laue und Mitarbeiter der Bayerischen Akademie der Wissenschaften ihre ersten Untersuchungen über Röntgenbeugung an Kristallen vor, und untermauerten damit die dreidimensionale Festkörperstruktur. Auch auf einem ganz anderen Teilgebiet waren es die hohe handwerkliche Kunst der Kristallzüchtung und systematische chemische Arbeiten, die im Verein mit den spektroskopischen Hilfsmitteln erst die Voraussetzung für eine große physikalische Entdeckung geschaffen haben, die heute einen ähnlichen Siegeszug der Anwendungen antritt, wie der 15 Jahre zuvor entdeckte Transistor [14]. Gemeint ist der Laser.

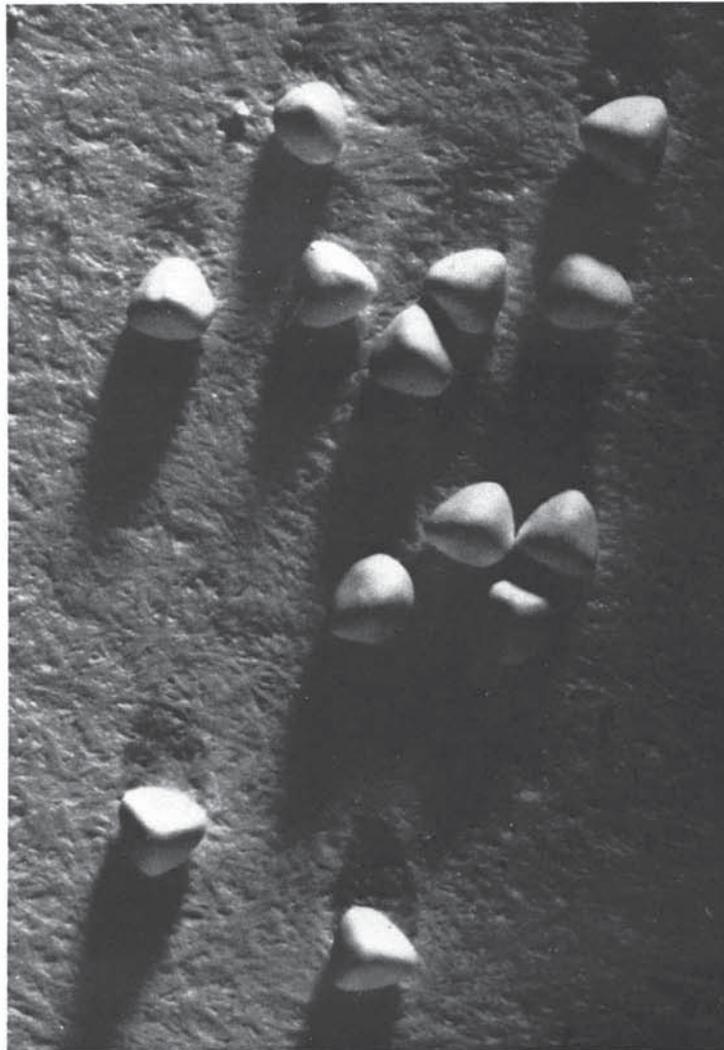
Abbildung 6 zeigt den ersten Rubinlaser mit seinem Konstrukteur Th. Maiman [15, 16]. Maiman verwendete einen Rubin-

stab, dessen Enden unterschiedlich verspiegelt waren. An einem soll die Reflexion möglichst vollständig erfolgen, während am anderen Ende durch geminderte Reflexion eine Auskoppelung des Strahls erreicht wird. Gepumpt wurde der erste Festkörperlaser mit einer den Rubinlaser umgebenden Xenon-Blitzlampe. Die »laseraktiven Zentren« im Korundgitter des Aluminiumoxids sind Chromionen, die gemäß ihrer oktaedrischen Umgebung eine charakteristische Aufspaltung der Energieniveaus zeigen, die für die Emission von Strahlung der Wellenlänge $694,3\text{ nm}$ (Rotlicht) verantwortlich zeichnen.

Die vielfältigen Laseranwendungen reichen von der Medizin (Behandlung von Melanomen; Laserchirurgie; Photokoagulation der Retina; Endoskopieler; Stimulation der Wundheilung) über Landvermessung, berührungsfreie Materialverarbeitung sowie Etikettierung (z. B. Zerschneiden von Siliziumscheiben in der Halbleiterfertigung), Aufspüren von Luftverunreinigungen mit dem LIDAR (Light-Detecting And Ranging) bis hin zur Laserchemie [17]. In der Umkehrung des »Photodiodeneffektes« wird die radiative Rekombination von Elektronen und Löchern in den Lumineszenzdioden (LED) auf GaAs-Basis ausgenutzt. Die Farbe des emittierten Lichts ist durch Variation der Zusammensetzung abstimmbare: GaAs-infrarot; GaAsP je nach Phosphorgehalt rot bis gelb; GaP mit Zink- und Sauerstoffdotierung: rot; GAP mit Stickstoffdotierung grün bis gelb [10]. Die Vorteile gegenüber Glühlampen, etwa bei der Beleuchtung von Skalen, bzw. bei Anzeigesegmenten ist die etwa 100fach größere Lebensdauer und die Tatsache, daß die Lichtleistung nicht spontan, sondern langsam im Laufe des Alterungsprozesses zurückgeht. Die Ansprechzeit ist 10^6 mal kürzer, die hohe mechanische Stabilität hervorzuheben. Die große Schaltgeschwindigkeit wird in der Optokopplung (vgl. Abb. 7) ausgenutzt. Auf diese Weise entsteht ein Relais, das gegenüber den herkömmlichen mechanischen Ausführungen sich durch hohe Isolation zwischen beiden Stromkreisen und keinerlei mechanische Abnutzung auszeichnet [10].

FESTKÖRPER QUO VADIS?

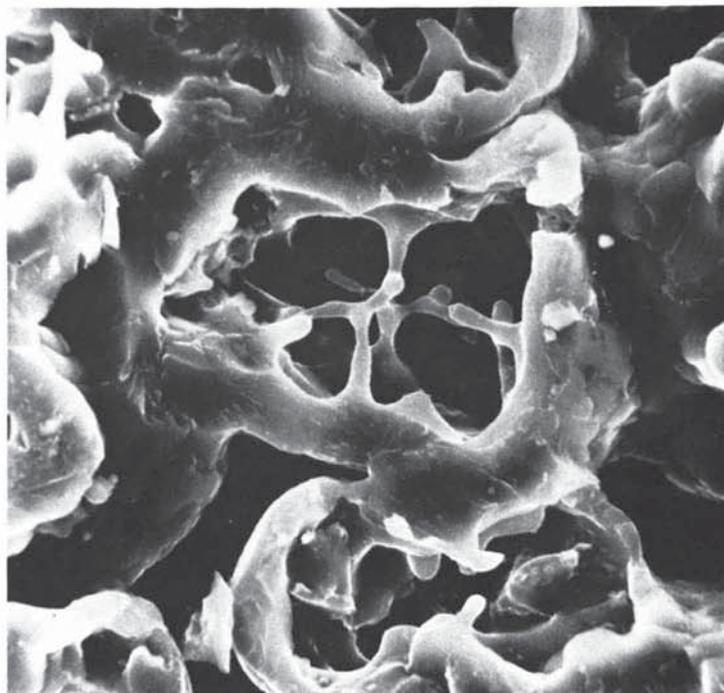
19 Mit dem vom Pulvermetallurgischen Laboratorium des Max-Planck-Instituts für Metallforschung entwickelten Verfahren lassen sich auch pyramidenförmige Aluminiumoxid-Agglomerate (Al_2O_3) herstellen: Sie sind aus kleineren Teilchen entstanden, die nicht mehr aus den Tetraederlücken einer sich bewegenden Kugelschüttung herausschlüpfen konnten. (Photo MPG)



Zur rasanten Entwicklung der Optoelektronik siehe [18, 19]. Mit Hilfe eines Metall-Oxyd-Silizium-Feldeffekt-Transistors (MOSFET) (Abb. 8) gelang es die für den gesamten Atombau entscheidende Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante mit bisher ungeahnter Genauigkeit zu bestimmen. (Die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante gibt die Verknüpfung der Größen Elementarladung und Lichtgeschwindigkeit über das Plancksche Wirkungsquantum an.)

Damit wurden MOSFET-Bauelemente überraschenderweise zu Werkzeugen für die Grundlagenforschung der Atomphysik. Aufgrund der gefundenen Widerstandsquantelung bieten sich auch Anwendungen im Eichwesen an. Bisher wird der elektrische Widerstand für Eichzwecke durch eine Drahtwicklung realisiert, ähnlich wie ursprünglich das Meter durch einen Platin-Iridiummaßstab festgelegt war. Und wie dort an die Stelle des Stabs eine bestimmte Lichtwellenlänge eines Kryptonübergangs getreten ist, so läßt sich jetzt das Ohm unmittelbar an die Feinstrukturkonstante mit der MOSFET-Methode koppeln. Nach diesem interessanten Aspekt der Grundlagenforschung, der auch für das Eichwesen Relevanz besitzt, zu einem Anwendungsproblem, der nuklearen Entsorgung. F. Baumgärtner gibt mit dem Planungsstand von 1970 folgende Abluftkomponenten einer Auflösungskampagne von zwei Tonnen Kernbrennstoff in der Wiederaufbereitung an:

*2000 m³ Spül- und Förderluft, die von außen angesaugt wird
200 m³ Stickoxide, die bei der Reaktion von Salpetersäure mit dem Brennstoff entstehen*



*2 m³ des Spaltproduktes Xenon, die praktisch nicht radioaktiv sind
200 Liter radioaktives Kr-85
50 Liter radioaktives Jod
10 cm³ ¹⁴CO₂, 130 mg T₂O
sowie Radiolysewasserstoff
ca. 10 dm³/h [21].*

Eine neue Möglichkeit in der Endlagerung von Kr-85 scheint sich nun durch die Verwendung von Zeolithen abzuzeichnen [22, 23]. Die Struktur von Zeolithen ist durch SiO_4 - und AlO_4 -Tetraeder geprägt, die dergestalt miteinander verknüpft werden, daß sich ein hochporöses Hohlraumsystem ausbildet (Abb. 9). In den Kanälen dieses »molecular framework« können beispielsweise H_2O , CO_2 , NH_3 und organische Moleküle eingelagert werden, dies wird durch den Porendurchmesser (zwischen 0,3 und 1,2 nm) bestimmt. Bei einem Kanaldurchmesser von 0,35 nm wird z. B. Stickstoff, nicht jedoch Ar aufgenommen. So erklärt sich die Verwendung der Zeolithe als Molekularsiebe.

Im allgemeinen verändert sich die Zeolithstruktur bei Ein- und Auslagerung (je nach Druck und Temperatur) nur geringfügig [24] (vgl. Abb. 9). Die kommerziell erhältlichen Zeolithe vom Typ 5A werden auf ihre Einsatzfähigkeit als Festkörpermatrix zur Fixierung von Krypton getestet. Im Kernforschungszentrum Karlsruhe wird versucht, durch Veränderung der gegebenen Grundkörper per Ionenaustausch das Fixiervermögen gegenüber Krypton zu verbessern. Der verwendete 5A-Zeolith weist, wie Abbildung 9 zeigt, zweierlei Hohlräume im Netzwerk auf, die über Öffnungen von 0,2 bzw. 0,4

20 Bruchfläche einer reaktionsgesinterten Legierung aus Beryllium mit einem Volumengehalt von 2,8 Prozent Kobalt: Durch Sintern von pulvermetallurgisch hergestellten Proben aus Berylliumpulver, das mit Nickel oder Kobalt beschichtet war, konnten im Pulvermetallurgischen Laboratorium des Max-Planck-Instituts für Metallforschung in Stuttgart metallische Werkstoffe mit Dichten unter 0,5 Gramm pro Kubikzentimeter hergestellt werden. Der Vergrößerungsmaßstab der Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme beträgt etwa 1 : 1600. (Photo MPG)

nm verfügen. Diese Abmessungen sind vergleichbar mit der Größe des als Spaltprodukt anfallenden Kryptons. Zur Bildung der kleinen Hohlräume wird der Zeolith auf ca. 500°C aufgeheizt, durch thermische Dehnung vergrößert sich die Öffnung derart, daß Krypton, das unter einigen hundert bar Druck steht, »eingefüllt« werden kann. Beim Abkühlen verengen sich die Käfigöffnungen, Krypton ist eingeschlossen. Zu einer Freisetzung durch Rückstoß bei seiner Betaumwandlung wird es aufgrund der geringen Masse eines β -Teilchens nicht kommen. Die ersten orientierenden Langzeituntersuchungen wurden im Hinblick auf thermisches Verhalten, Bestrahlung mit hohen Gammadosen sowie Wassereintrich durchgeführt. Bis zu 450°C erfolgt keine nennenswerte Freisetzung des Kryptons.

Eine mehrwöchige Lagerung unter Wasser (Simulation eines Wassereintrichs) zeigte keine signifikante Gasfreisetzung [25]. Kr-85 ist ein weicher Betastrahler mit einer Halbwertszeit von 10 Jahren, das bisherige Entsorgungskonzept schreibt vor, daß Krypton mindestens 100 Jahre von einem Kontakt mit der Ökosphäre abzutrennen ist. Bisher wird dafür die Lagerung in Druckflaschen in Betracht gezogen, was wegen der möglichen Korrosion nicht restlos unbedenklich erscheint. Vielleicht bietet da die Anwendung von Zeolithen eine Alternative [25]. So will man ein radioaktives Edelgas »hinter Gittern« fixieren.

Um gleich bei der Kernstrahlung zu bleiben, moderne Dosimetriesysteme (Glas- und Thermolumineszenzdosimetrie) bauen auf strahlungsinduzierten Festkörpereffekten auf.

Die immerwährende Beimengung von Radionukliden aus den natürlichen Zerfallsreihen sowie des β -Strahlers K-40 führen in natürlichem Ton zu einer Strahlendosis von etwa 1 Gray*/Jahrhundert. Dadurch werden Elektronen ins Leitungsband des Festkörpers angeregt, von dort können sie in Haftstellen gelangen und »eingefroren« werden. Erwärmt man alte Keramik, so rekombinieren die Elektronen nach thermischer Haftstellenbefreiung radiativ,

*1Gy = 1 J/kg

d. h. es wird Licht emittiert (Thermolumineszenz). Die Intensität der Thermolumineszenz ist ein Maß für die Zeit, die das Material seit dem Brand der Einwirkung seiner radioaktiven Beimengungen ausgesetzt war. Mit Hilfe einer Eichkurve kann bei ermittelter Intensität der Thermolumineszenz das Alter der Probe ermittelt werden. Die Thermolumineszenzmethode ist zu einem Standardverfahren der Archäometrie geworden (vgl. Abb. 10).

Bei der Datierung von steinzeitlicher Bandkeramik erweist sie sich als ebenso hilfreich wie bei der Untersuchung römischer Tonwasserleitungen oder beim Datieren von antiken Bergbauaktivitäten mittels aufgefundener Tonscherben (vgl. Abb. 11). Eine interessante Untersuchungsmöglichkeit von Defektstellen in Kristallgittern bietet die Methode der »torkelnden Mesonen«. Bereits in den dreißiger Jahren forderte der japanische Physiker Hideki Yukawa aus Überlegungen der theoretischen Kernphysik heraus, daß es im Atomkern Teilchen von 200–300facher Elektronenmasse geben müsse, diese sollten für den Zusammenhalt des Atomkerns (gegenüber der Coulomb-Abstoßung) verantwortlich zeichnen. In der kosmischen Höhenstrahlung wurden sie dann entdeckt, und man nannte sie Mesonen (beispielsweise das elektrisch geladene Pion mit 273facher Elektronenmasse und das Myon mit 207facher Elektronenmasse). Pionen können über Kernreaktionen, mit im Isosynchronzyklotron auf 600 MeV beschleunigten Protonen, erzeugt werden. Beschießt man damit einen Festkörper (in der vorliegenden Untersuchung z. B. Tantal [26]), so können die implantierten Teilchen auf Gitterfehlstellen bzw. auf Zwischengitterplätze gelangen, letztere sind Plätze innerhalb des Gitters, an denen ein fremdes Teilchen den weitestmöglichen Abstand von den benachbarten (vier oder sechs) Atomkernen innehat. Da die Pionen ebenso wie die Atomkerne positive Ladung tragen, werden sie sich aufgrund der repulsiven elektrostatischen Wechselwirkung möglichst weit voneinander entfernen. Nach wenigen hundertmillionstel Sekunden zer-

fallen sie zu Myonen, die dabei eine kinetische Energie (von 4,12 MeV) erhalten. Abbildung 12 zeigt, daß die so entstandenen Myonen je nach ihrem Entstehungsort unterschiedliche Wege im Kristallgitter einschlagen, also ihre an der Probenoberfläche angenommene Emissionsverteilung Informationen über die Struktur ihrer Startplätze enthält. Myonen, die von einem Zwischengitterplatz aus starten, torkeln durch das Gitter und stoßen hier und da an die imaginären Gitterwände, allmählich werden sie in Richtung der Symmetrieachsen des Kristalls kanalisiert (»channelling«). Außerhalb treffen diese Myonen dann auf richtungsempfindliche Detektoren, die innerhalb sehr enger Winkelbereiche deutliche Anisotropie des Emissionsverhaltens indizieren. Myonen, die in Leerstellen, also auf regulären Gitterplätzen eingefangen wurden, kommen nicht in diese günstige Situation. Wann immer sie auf einen benachbarten Atomkern zulaufen, werden sie unsystematisch abgelenkt, so daß gerade in jenen Richtungen, in denen die Atomkerne regelmäßig in dichten Reihen angeordnet sind, besonders wenige Myonen aus dem Kristall austreten [26].

Abbildung 13 zeigt die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Lithiumnitrid, das durch Hochdrucksynthese aus flüssigem Lithium bei 10 Atmosphären Stickstoffdruck gewonnen wurde; die sechszählige (hexagonale) Kristallsymmetrie ist gut zu erkennen. Seit Mitte der siebziger Jahre beschäftigt man sich mit Lithiumnitrid, vor allem im MPI für Festkörperforschung in Stuttgart, da es wegen seines hohen Lithiumgehalts und seines »pathologisch« deformierten Nitridions eine interessante Modellspezies für die Festkörpertheorie darstellt. Einkristalle werden nach dem Czochralski-Verfahren in einem Wolframtiegel hergestellt. Das Kristallwachstum liegt in der Größenordnung von fünf Millimeter/Stunde, wobei rubinrote Einkristalle bis drei Zentimeter Durchmesser und fünf Zentimeter Länge erhalten werden, die über längere Zeit der Luft beständig sind.

Lithiumnitrid ist auch im Hinblick auf elektrochemische Anwendun-

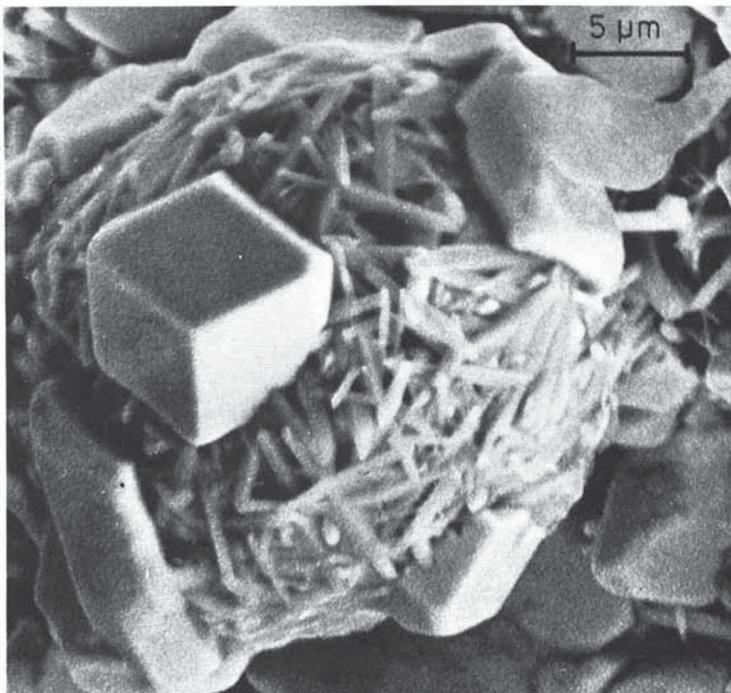
gen interessant. Es lassen sich damit z. B. Festkörperbatterien (vgl. Abb. 14) aufbauen, die gegenüber dem konventionellen Bleiakku eine Steigerung der Energiedichte um den Faktor 7 gestatten. Allerdings erfordert eine Batterie, die auf Basis eines Lithium-Ionenleiters arbeitet, eine Betriebstemperatur von 400–450°C.

Zur Zeit ist man dabei, auf der Basis von Aluminiumoxid-Trägern sowie in Poly- und Einkristallform Lithiumbatterien zu bauen, ja überhaupt die elektrochemischen Eigenschaften zu bestimmen. Dabei steht die Gefahr der Selbstentzündlichkeit des Nitrids an der Luft im Wege, weshalb man in Inertgasgloveboxen ausweicht (vgl. Abb. 15). Die ionenleitenden Eigenschaften von Lithiumnitrid lassen sich anschaulich mit der in Abbildung 16 dargestellten Anordnung belegen. Auf einen Li_3N -Einkristall wird unter Schutzgasatmosphäre eine Lithiumelektrode als Anode aufgeschmolzen, die Kathode besteht aus einem aufgepreßten Kupfergitter. Bei 80°C wurde ein Strom von 80 mA hindurchgeschickt, worauf man nach einigen Stunden das Ausblühen von sogenannten Lithiumwhiskern (Abb. 16) durch das Kathodennetz hindurch beobachten konnte [27].

Im MPI für Metallforschung in Stuttgart arbeitet zur Zeit eine Gruppe über Herstellungsverfahren von kleinen Kugeln gleichen Durchmessers, wie sie etwa für Kugellager, die Aufbereitung von Rohstoffen oder als Träger für Katalysatoren benötigt werden. Meist wird dabei mit Hilfe eines Siebverfahrens aus einem gegebenen Ensemble eine Auswahl getroffen. Derartige Kügelchen im Bereich von zehntel bis wenigen Millimetern Durchmesser lassen sich in einem Taumelmischer aus Material heterogener Größenverteilung herstellen. Verantwortlich für dieses Verhalten zeichnet der sogenannte Sozialeffekt, denn bei der Methode entstehen aus unterschiedlichen Kügelchen lauter gleichförmige: die großen schleifen sich ab, die kleinen wachsen. Das Mischverfahren ist so zuverlässig, daß man Kugeln einer vorgegebenen Größe durch Taumelmischung einer bestimmten Men-

FESTKÖRPER QUO VADIS?

21 Innere Spannungen in einer $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ -Dispersionskeramik. Aus der Abhängigkeit des Kontrastes von elektronenmikroskopischen Parametern können quantitative Aussagen über die Spannungsverteilung im Aluminiumoxid gemacht werden. (Durchstrahlungselektronenmikroskopische Aufnahme 72000fach). (Photo MPG)



ge von zwei Kugelsorten erzeugen kann, damit ist die Möglichkeit gegeben, gezielte Gefügekstrukturen keramischer Werkstoffe aufzubauen. Die unsoziale Agglomeration, d. h. die großen Teilchen wachsen à conto der kleinen, wird durch besondere Bewegungsabläufe aufgrund der Wechselwirkungskräfte zwischen einzelnen Pulverteilchen erreicht. Dazu

wird das Pulver in einem taumelnden Zylinder durcheinandergerüttelt. Die Taumelbewegung verhindert, daß sich im Inneren Zonen bilden, in denen praktisch keine Bewegung stattfindet. Statt dessen sind im Taumelbehälter die Druck- und Stoßkräfte der sich aneinanderlagernden (agglomerierenden) Teilchen größer. Dies führt zur Zertrümmerung der kleinen Kügelchen und zu einer perfekten Abrundung der damit stabileren, größeren Spezies. Dadurch gewinnen letztere eine solche große Festigkeit, daß sie sich nicht mehr gegenseitig zerstören können. Einfluß auf die Agglomeration haben Neigungswinkel, Drehgeschwindigkeit und Füllungsgrad des Taumelbehälters sowie, vor allem bei hochgetrockneten Pulvern, die Luftfeuchtigkeit und zusätzlich verwendete Bindemittel. Je nach Wahl lassen sich damit gleiche Kugeln mit Durchmessern zwischen 0,1 und 3 Millimeter herstellen (Abb. 17, 18) sowie Kugeln, die sich aus einzelnen Schalen aufbauen, porös bzw. innen hohl oder mit Einbuchtungen an der Oberfläche versehen sind. Bricht man die Agglomeration bereits in der zweiten Wachstumsstufe ab, entstehen tetraederförmige Gebilde (Abb. 19). Das gemeinsame Prinzip ist die Zusammenballung einzelner Pulverteilchen durch eine systematische Bewegung des Pulverbetts, ohne daß die chemischen Eigenschaften der Pulverteilchen verändert werden. Wir sind am Ende des kleinen Rundgangs in den Festkörperwissenschaften angelangt, der die weitreichende Bedeutung der Festkörperchemie und der Festkörperphysik für die Grundlagen-

22 Bruchgefüge eines kupferreichen Dentalamalgams. Nach dem Amalgamieren ternärer Silber-Kupfer-Zinn-Pulver bildet sich um die Ausgangspulverteilchen netzförmig angeordnet die Kupfer-Zinn-Phase Cu_6Sn_5 . Die Silber-Quecksilber-Phase Ag_2Hg_4 dagegen kristallisiert aus quecksilberreichen Gebieten. Durch die Anordnung und das Wachsen der Kupfer-Zinn-Phase schwellen derartige Amalgame an. Dabei sind die durch die Cu_6Sn_5 -Kristallisation entstandenen Hohl-

forschung sowie die breite Palette der alltäglichen Anwendung zeigt. Die Abbildungen 20–22 stehen noch einmal stellvertretend für den Zyklus der Festkörperwissenschaften; Materialsynthese, Bestimmung und Auslotung der Materialeigenschaften, Suche nach Anwendungsbereichen verknüpft mit Grundlagenforschung auf allen drei Sektoren, womit sich der Kreis schließt. Zum Abschluß dieser knappen, zugegebenermaßen subjektiv beeinflussten Rundschau sei ein Auszug aus der Rede des Bundespräsidenten wiedergegeben, die er anlässlich der Festsitzung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft bei der 4^{ten} Physikertagung 1980 im Auditorium Maximum der Universität Bielefeld am 5.3.1980 hielt [32].
»Es wird oft behauptet, unser Leben habe sich durch die modernen Naturwissenschaften und ihre technische Anwendung in diesem Jahrhundert mehr verändert als in zwei Jahrtausenden vorher. Und es ist nicht zu bestreiten, daß die Einwirkungen des Menschen und seiner Technik das Gesicht seiner Umwelt in unseren Tagen radikaler verwandelt haben als je zuvor. Mit dieser Erkenntnis ist sich wohl die ganze heute lebende Generation der tiefen Problematik dieser Veränderungen bewußt geworden. Neben Stolz und Faszination treten bei der Betrachtung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts Beklemmung und Skepsis. Und doch hat der sogenannte technische Fortschritt uralte Menschheitsträume erfüllt. So die Sehnsucht des Fliegens, die Goethe im Osterspaziergang unvergleichlich beschworen hat, wo Faust der untergehenden Sonne nachruft:

räume mit flüssigem Quecksilber aufgefüllt. Im Endstadium der Erhärtung verschwindet reaktionsbedingt das flüssige Quecksilber durch weiteres Eindiffundieren in die Ausgangspulverteilchen unter Porenbildung. Dies ruft einen Schrumpfungsprozeß durch Festphasensintern hervor, der gegenüber der Schwellung verursachenden Eindringen des Quecksilbers in die Teilchen überwiegt. (Aufgenommen im Rasterelektronenmikroskop mit Kühlmikroskopvorrichtung). (Photo MPG)

*O daß kein Flügel mich vom Boden hebt,
Ihr nach und immer nach zu streben!*

*Ich sah im ewigen Abendstrahl
Die stille Welt zu meinen Füßen,
Entzündet alle Höhn, beruhigt jedes Tal,*

Den Silberbach in goldne Ströme fließen ...

Freilich sieht die Verwirklichung dieses Traums oft anders aus. Die meisten Menschen erleben ihn in einer Großraummachine des modernen Massentourismus. Mit der Erschließung der Nuklearenergie ist das Wunschbild einer dem Menschen dienstbaren, nahezu unerchöpflichen Kraft Wirklichkeit geworden – aber zugleich auch die bisher radikalste Bedrohung menschlicher Existenz. Viele Millionen haben im Fernsehen die völlige Lösung des Menschen von irdischer Schwere und seine erste Landung auf dem Mond beobachten können. Aber indem die Mondflüge und der Vorstoß von

Raumsonden zu den Planeten die extreme Unwirtlichkeit der benachbarten Himmelskörper erwiesen, wurde der Menschheit bewußt, daß es keine Flucht von unserem überfüllten Planeten geben wird.

Die Physiker werden fortfahren, mit Raumsonden und Satelliten, mit Radioteleskopen und Zyklotronen immer neue Geheimnisse des Makro- und Mikrokosmos aufzuhellen. Aber wir werden es hier in unseren Dimensionen mit den wachsenden Problemen einer wachsenden Menschheit aufnehmen müssen. Die Frage, ob die Hervorbringungen unserer Technologie, die rohstoff- und energieaufwendigen Produktionsweisen unserer Industrien überall die richtigen Ansätze für die Lösung unserer Zukunftsaufgaben bieten, wird nicht jeder mit einem zuversichtlichen Ja beantworten. Sicher werden von den Physikern aber auch mehr rohstoffsparende und umweltschonende Verfahren entwickelt werden.



Literatur:

- [1] Eilenberger, G.: »Festkörperphysik: Quo vadis?«, Physikalische Blätter 37, 69 (1981)
- [2] Pobell, F.: »Quidquid agis prudenter agas – natürlich auch in der Festkörperphysik«, Physikalische Blätter 37, 71 (1981)
- [3] Heywang, W.: »Festkörperphysik – Quo vadis? Ein weiterer Beitrag zur Diskussion während des »Tages der Physik« im Physikzentrum im November 1980«, Physikalische Blätter 37, 152 (1981)
- [4] Bilz, H.: »Festkörperphysik: am Ende? – Eine Gegenrede«, Physikalische Blätter 37, 277 (1981)
- [5] Lüscher, E., H.-J. Jodl: Physik einmal anders, München 1976
- [6] Queisser, H.-J.: Festkörperforschung, Carl Friedrich von Siemens Stiftung, Themen XXI, München 1975
- [7] Shockley, W.: Bell System Technical Journal 28, 435 (1949)
- [8] Bardeen, L. W. H. Brattain: Physical Review 74, 230 (1948)
- [9] Shockley, W., M. Sparks, G. K. Teal: Physical Review 83, 151 (1951)
- [10] Bohle, G., E. Hofmeister: Halbleiterbauelemente für die Elektronik, München 1980
- [11] Grabmaier, I., H. Schneider, E. Lebetzki, N. Douklias: »Preparation of Low-Loss Optical Fused-Silica Fibers by Modified Chemical Vapour Deposition Technique«, Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte 5, 171 (1976)
- [12] Lüscher, E.: Aktuelle Physik, München 1978

[13] Coufal, H.-J., E. Lüscher: »Photoakustische Spektroskopie – Eine vielversprechende neue Technik?«, Physik in unserer Zeit 9, 46 (1978)

[14] Schwankner, R.: »Laser 1917–1978«, Kultur & Technik 3, 12 (1979)

[15] Maiman, Th. H.: »Stimulated Optical Radiation in Ruby«, Nature 187, 493 (1960)

[16] Maiman, Th. H.: Physical Review Letters 4, 564 (1960)

[17] Schwankner, R.: Laseranwendungen in der Experimentalchemie – Ein Praktikum, München–Wien 1978

[18] Ratheiser, L., H. Pichler: Optoelektronik, München 1976

[19] Gillich, H.: Lichtleiter – Lichtleitstäbe – Lichtleitkabel in Theorie und Praxis, Stuttgart–Botnang 1971

[20] von Klitzing, K. et al: Physical Review, Letters 45, 494 (1980)

[21] Der Bundesminister für Forschung und Technologie (Hrsg.): Baumgärtner, F.: Sicherheit und Umweltschutz bei der nuklearen Entsorgung, Bonn 1979

[22] Penzhorn, R.-D.: Long-Term Storage of Kr-85 in Zeolite 5 A, 16th DOE NUCLEAR AIR CLEANING CONFERENCE

[23] Penzhorn, R.-D., P. Schuster, H. E. Noppel, L. M. Hellwig: »Long-Term Storage of Krypton-85 in Zeolites«, IAEA-SM-245/10, 291, Wien (1980)

[24] Semenov, I. N., K. V. Ovcinnikov: Interessante anorganische Verbindungen, Leipzig 1975

[25] Körting, K.: »Endlagerung von Krypton 85: Radioaktives Edelgas hinter Gittern«, Physikalische Blätter 36, 171 (1980)

[26] Maier, K., G. Flik, et al: Physics Letters 83 A, 341 (1981)

[27] Generalverwaltung der Max-Planck-Gesellschaft (Hrsg.): Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, Berichte und Mitteilungen der MPG (1/1978)