

# Graduiertenkolleg „Neue Hochleistungswerkstoffe für effiziente Energienutzung“

von  
**Rolf Clasen**

Mit 12 Stipendiaten konnte das Graduiertenkolleg „Neue Hochleistungswerkstoffe für effiziente Energienutzung“ am 1. Januar 1996 an der Universität des Saarlandes eröffnet werden. Mit der erfolgreichen Verlängerung nach drei Jahren gelang es, das Graduiertenkolleg (GRK) thematisch von dem etwas weit gefassten Begriff „Hochleistungswerkstoffe“ auf „Hochleistungswerkstoffe für effiziente Energienutzung“ zu fokussieren, weitere Kollegen, insbesondere aus der Physik, für die Teilnahme zu gewinnen und auf 18 Stipendiaten auszuweiten.

Ziel des Graduiertenkollegs ist es, eine fachübergreifende Ausbildung in den Fächern Chemie, Physik, Werkstoffwissenschaften und Elektrotechnik zu ermöglichen, indem Stipendiaten an Forschungsprojekten beteiligt werden, die sich mit den Grundlagen, der Herstellung und der Charakterisierung von Hochleistungswerkstoffen und der Entwicklung von innovativen Verfahren zur Herstellung von Hochleistungswerkstoffen und Bauteilen beschäftigen.

## Studienprogramm

Das wesentliche Kennzeichen eines Graduiertenkollegs gegenüber anderen Gemeinschaftsprojekten wie beispielsweise einem Sonderforschungsbereich ist das Vorlesungsprogramm, das die unterschiedlichen Kenntnisstände der beteiligten Doktoranden/innen aus der Physik, Chemie und Werkstoffwissenschaften ausgleichen, Grenzgebiete erweitern und auf Schwerpunkte des GRK vertiefen soll. Das Schema der Vorlesungen zeigt Abbildung 1. Hierbei werden den Studierenden aus den verschiedenen Fachrichtungen nicht nur bekannte und leicht modifizierte Vorlesungen angeboten, sondern auch vollkommen neue Vorlesungen gehalten, die sonst innerhalb bestehender und meist nicht leicht zu ändernden Studienpläne kein ausreichendes Publikum gefunden hätten. Ein Beispiel ist die Vorlesung „Neue Werkstoffe, Bauteile und

Systeme für effiziente Energienutzung“, die mit vier Semesterwochenstunden angeboten wurde und das gesamte Spektrum der

Werkstoffe für effiziente Energieumformung und Energienutzung umspannt. Die Unterlagen zu dieser interessanten Vorlesung sind im

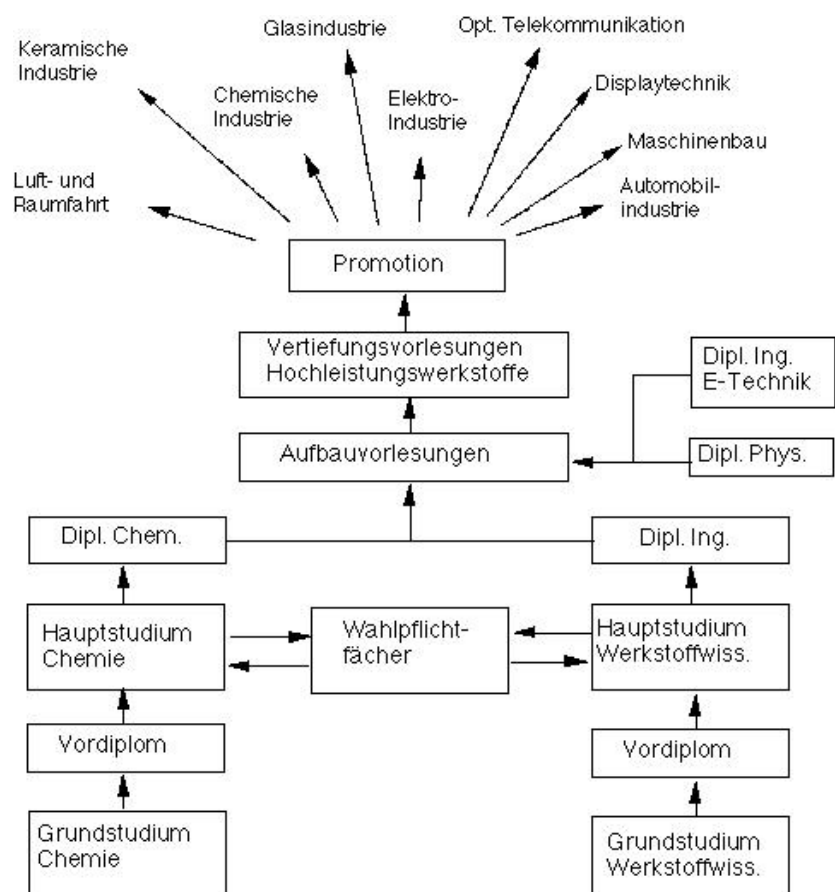


Abb. 1: Schema Studienprogramme

Internet zu finden (<http://www.uni-saarland.de/fak8/powder-tech/lehre/lehre.html>). Die Vorlesungen werden in einem 3-jährigen Zyklus angeboten.

In dem Ausbildungsprogramm werden die Vorlesungen durch ein Seminar aller Stipendiaten und Kollegiaten und durch Exkursionen ergänzt. In der praxisorientierten Lehre sind Exkursionen eine notwendige Ergänzung zu den Vorlesungen, wo die Grundlagen zwar gut vermittelt werden können, die wirklichen Dimensionen in der betrieblichen Praxis aber nur begrenzt darstellbar sind. Da die Durchführung von Exkursionen in der Regel mit höheren Kosten verbunden ist, jedoch seitens der Universität des Saarlandes keine Mittel verfügbar sind und Firmen in der Regel nur für die Kosten vor Ort aufkommen, kann das Graduiertenkolleg das Finanzierungsproblem lösen. Mit diesen im GRK bewilligten Mitteln wurden mehrere, zum Teil auch mehrtägigen Exkursionen zu Betrieben durchgeführt, die in fachlicher Nähe zu den thematischen Schwerpunkten des GRK stehen. Diese Exkursionen stehen auch anderen Studierenden offen, wobei eine volle Übernahme der Kosten auf die Stipendiaten und Kollegiaten des GRK beschränkt bleibt. Als Beispiele sollen hier die Besuche beim EnBW Badenwerk AG, der Rheinbraun AG und der Plansee AG in Reutte aufgeführt werden, wo Gewinnung elektrischer Energie aus Wasserkraft und Braunkohle sowie die Herstellung von Metallen

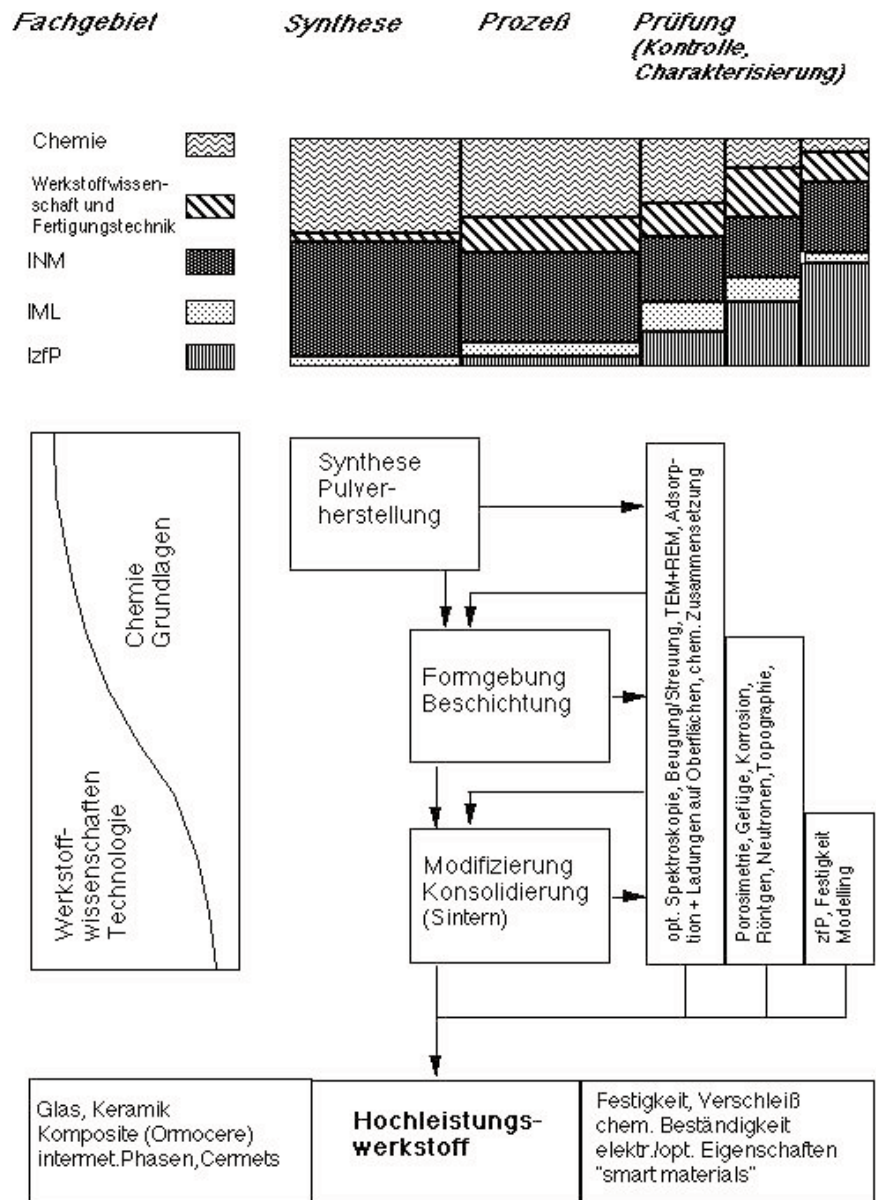


Abb. 2: Schema Forschungsprogramme

für den Hochtemperatureinsatz gezeigt wurde.

Ergänzende Vorlesungen auf Spezialgebieten wurden durch Gastwissenschaftler gehalten. So war die „interaktive“ Vorlesung von

David Jiles (USA) über „Magnetic Materials“ ein interessanter Ansatz, die Studenten einzubeziehen.

### Forschungsprogramm

Die Forschungsprogramme gliedern sich jetzt in drei materialorientierte Schwerpunkte: (1) Metalle und intermetallische Legierungen als Elektrodenwerkstoffe in Anwendungen bei hohen Temperaturen bzw. hoher mechanischer Belastung, (2) Eigenschaften und Herstellungsverfahren von Hochtemperatur-Ionenleitern für Brennstoffzellen und Hochleistungsbatterien und (3) Schichten für solare Energieumformung. Die gemeinsame

Zu den Leitern der Arbeitsgruppen des Graduiertenkollegs „Neue Hochleistungswerkstoffe für effiziente Energienutzung“ gehören neben dem Sprecher Prof. Dr. R. Clasen (Pulvertechnologie von Glas und Keramik) und dem Stellvertreter Prof. Dr. W. Arnold (Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren) auch Prof. Dr. H. Beck (Anorganische und Analytische Chemie und Radiochemie), Prof. Dr.-Ing. J. Breme (Mechanische Eigenschaften von Werkstoffen), Prof. Dr. H. D. Breuer (Physikalische Chemie), Prof. Dr. H. Dürr (Organische Chemie, inzwischen pensioniert), Prof. Dr. R. Hempelmann (Physikalische Chemie), Prof. Dr.-Ing. F. Mücklich (Funktionswerkstoffe), Dr. H. Schmitt (Technische Physik), Prof. Dr. H. Vehoff (Grundlagen der Werkstoffwissenschaften/Methodik) und Prof. Dr. H. Wagner (Anorganische und Analytische Chemie und Radiochemie).

Klammer dieser Schwerpunkte sind die angestrebten Anwendungen dieser Hochleistungswerkstoffe, die zur effizienten Energienutzung beitragen. Dies beinhaltet sowohl die Umformung von Energie als auch den Gebrauch von Nutzenergie. Innerhalb der Forschungsprogramme ist zu die unterschiedliche Position von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren innerhalb der Wertschöpfungskette zu berücksichtigen. Aber nur durch eine gute Zusammenarbeit, die die notwendige Kommunikationsfähigkeit voraussetzt, kann das gemeinsame Ziel, die Herstellung von Hochleistungswerkstoffen, erreicht werden. Das Zusammenwirken der einzelnen Gruppen ist schematisch in Abb. 2. dargestellt.

### Forschungsprojekte

Die einzelnen Forschungsprojekte, die thematisch den in der Zielsetzung genannten drei Materialschwerpunkten zugeordnet sind, werden von Stipendiaten und Kollegiaten im Rahmen von Doktorarbeiten bearbeitet. Dabei wird seitens der DFG großer Wert darauf gelegt, dass diese Doktorarbeiten nicht ewig lange dauern, sondern in dem maximalen Förderzeitraum

von drei Jahren abgeschlossen werden. Die Erfahrungen in der ersten Förderperiode mit 12 Stipendiaten haben gezeigt, dass in Saarbrücken diese Vorgabe recht gut erfüllt werden konnte. Damit ist die Teilnahme an einem Graduiertenkolleg nicht nur wegen der breiteren und qualifizierteren Ausbildung interessant, sondern auch wegen der überschaubaren und kurzen Zeit für die Promotion. Beides wird von der Industrie honoriert und steigert die Chancen, einen guten Arbeitsplatz nach der Promotion zu bekommen. Damit diese Vorteile nicht nur auf eine begrenzte Anzahl von Stipendiaten begrenzt bleibt, kann man auch als Kollegiat an dem Graduiertenkolleg teilnehmen. Ein Kollegiat wird aus anderen Quellen finanziert, nimmt aber an dem Ausbildungsprogramm (Vorlesungen und Seminare) teil. Dafür besteht auch die kostenlose Teilnahme an Exkursionen. Eine Darstellung aller Forschungsprojekte würde an dieser Stelle zu weit führen. Nähere Informationen und eine Darstellung der Teilnehmer/innen sind auf der homepage des GRK zu finden (<http://www.uni-saarland.de/fak8/gk/personen/stipendiaten2.html>). Um aber einen kleinen Eindruck von der Vielseitigkeit der

Forschungsarbeiten zu erhalten, deren Fortschritt alle Stipendiaten und Kollegiaten in dem gemeinsamen Seminar verfolgen können, werden hier exemplarisch (ohne eine Wertung) fünf Projekte aus der ersten und zweiten Förderperiode kurz vorgestellt, die jeweils eine Werkstoffgruppe sowie die Verfahrens- und Messtechnik beschreiben. Bei den Autoren wurden jeweils nur die Stipendiaten benannt.

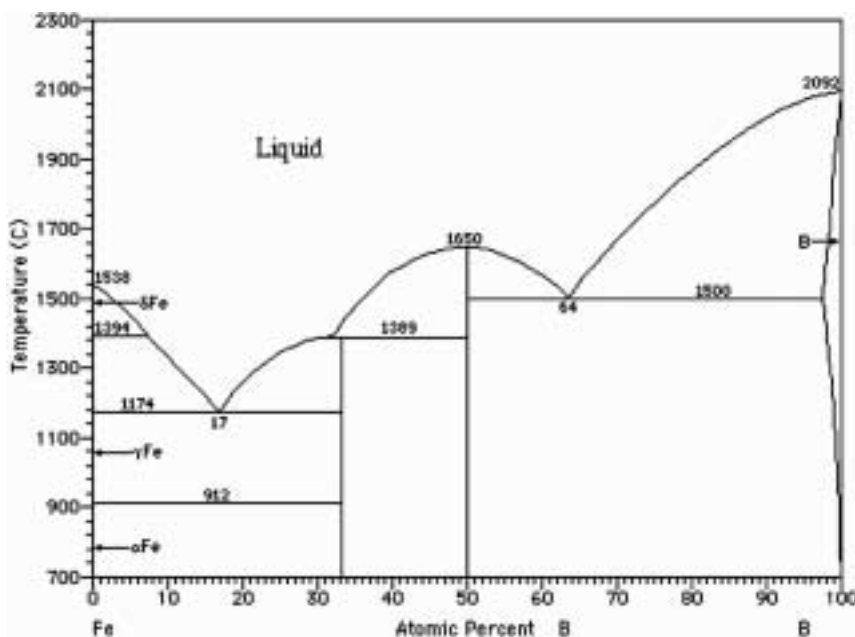
### Titanboride als Verstärkungsphase durch in-situ Reaktionen in den Systemen Ti-Fe-B und Ti-Al-V-B

Dipl.-Ing. Michael Hamentgen,  
(UdS, Mechanische Eigenschaften von Werkstoffen)

In der vergangenen Förderperiode des Graduiertenkollegs wurde erfolgreich versucht, Titanboride als Verstärkungsphase in eine Titanmatrix einzubetten. Dies geschah über eine in-situ Reaktion von Ti und FeB (Abb. 3). Es ergab sich eine gute Haftung der Titanboridausscheidungen in der Matrix. Die Titanmatrix ihrerseits wurde mittels des freigesetzten Eisens durch die Ausscheidung der intermetallischen Phase TiFe aufgehärtet. Der entstandene Werkstoff hat gute mechanische Eigenschaften und ist, ab einem Borgehalt von 3.7 Gew.%, sehr verschleißbeständig. In der momentanen Förderperiode wird versucht, die mit Titanboriden verstärkten Werkstoffe weiter zu optimieren (z. B. durch Umformen), wobei auch Titanlegierungen untersucht werden sollen.

Die Umformproben wurden auf pulvermetallurgischem Weg hergestellt. Hierzu wird Titanpulver mit Eisenborpulver im Verhältnis 85:15 gemischt, kaltisostatisch gepresst, gesintert und anschließend bei 1100°C umgeformt. Durch das Sintern entstehen keine plattenförmigen Boridausscheidungen, sondern eher globulitische (Abb. 4). Diese

Abb. 3: Phasendiagramm von Fe-B



Form der Ausscheidungen bietet beim Umformprozess Vorteile. Im weiteren Verlauf werden die mechanischen Eigenschaften und das Verschleißverhalten des Werkstoffs ermittelt.

Die Legierung TiAl6V4 ist weltweit die am häufigsten hergestellte und verwendete Titanlegierung. Aus diesem Grund wird angestrebt, in diese (a+b) Legierung Borid-ausscheidungen einzubringen. Ferner besitzt die TiAl6V4-Matrix gegenüber Titan technischer Reinheit den Vorteil einer höheren Grundfestigkeit. Das Einbringen der Boride geschieht ebenfalls mit Hilfe von Eisenborid (FeB) bzw. mit Hilfe von Aluminium-Bor-Verbindungen ( $AlB_2$  bzw.  $AlB_{12}$ ) zunächst auf schmelzmetallurgischem Weg (Abb. 5).

### Ionenleiter für Hochtemperaturbrennstoffzellen

Dipl.-Chem. Dinah Hassan, Dipl.-Chem. Stefan Marion, Dipl.-Phys. Mark Wildersohn (UdS, Physikalische Chemie, Pulvertechnologie von Glas und Keramik)

Die keramische Brennstoffzellen bieten die Möglichkeit der direkten Stromerzeugung durch eine elektrochemische Verbrennung von Brenngas (Wasserstoff, Erdgas) mit Sauerstoff. Sie bestehen aus zwei porösen Elektroden, der Kathode und der Anode, die durch eine gasdichte Elektrolytschicht getrennt werden. Das Brenngas wird zur Anode geleitet, wo es oxidiert wird. Die Elektronen fließen extern zur Kathode, wo sie an den Sauerstoff abgegeben werden. Die Elektrolytschicht ist entweder protonen- oder sauerstoffionenleitend, so dass sich die Protonen und Anionen entweder auf der Seite der Anode oder der Kathode zu Wasser verbinden. Eine Brennstoffzelle mit einem Protonenleiter ist schematisch in Abb. 6 gezeigt.

In derzeit gebräuchlichen keramischen Brennstoffzellen wird als



Abb. 4: Globulitische TiB-Ausscheidungen

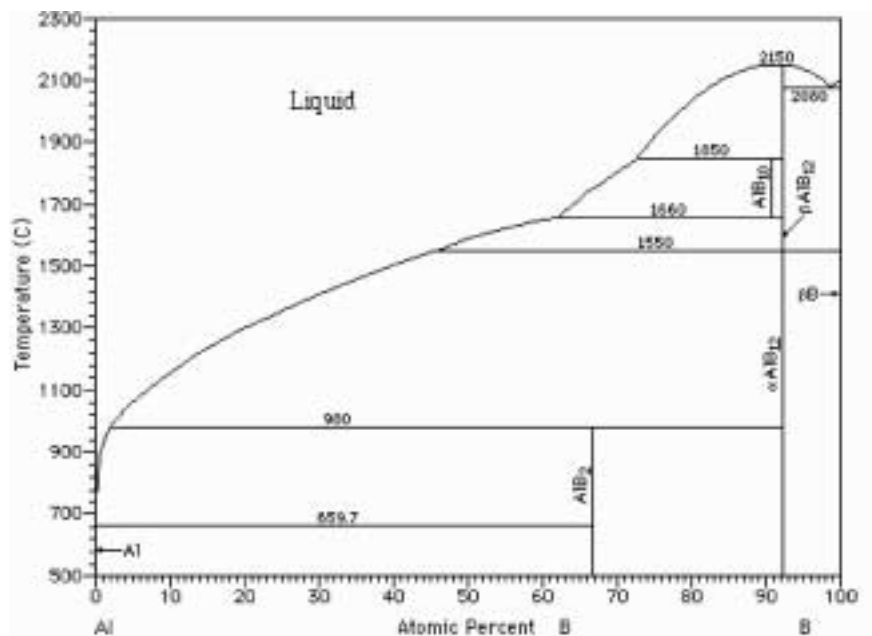
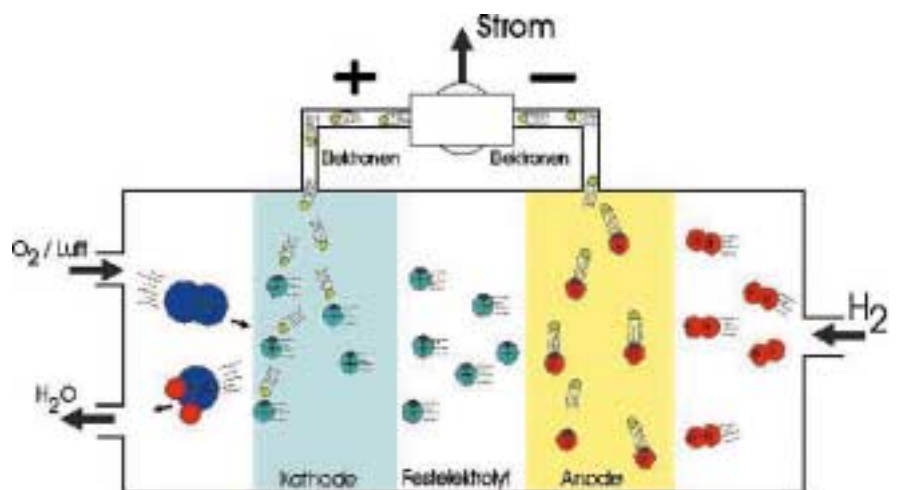


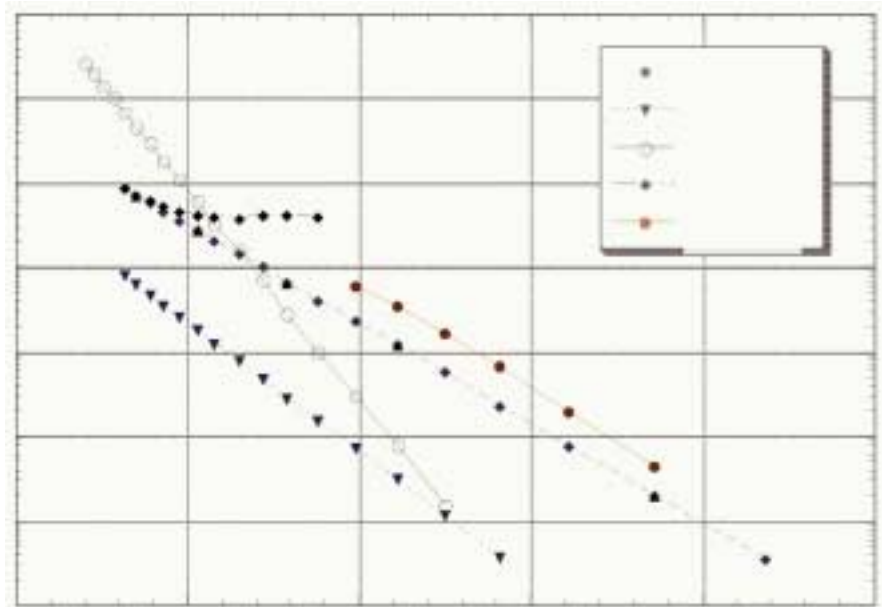
Abb. 5: Phasendiagramm von Al-B

Abb. 6: Schematische Darstellung einer Hochtemperaturbrennstoffzelle (SOFC) mit Protonenleiter



Elektrolyt ein Sauerstoffionenleiter wie z.B. Yb-stabilisiertes Zirkoniumdioxid (YSZ) verwendet. Der Nachteil dabei ist, dass bei dieser Art Brennstoffzelle zum Einen die notwendige Betriebstemperatur über 800°C liegt und zum Anderen die Bildung des Wassers an der Anode erfolgt und damit zu einer Verwässerung des Brenngases führt. Es werden daher Wege gesucht, die Betriebstemperatur zu senken und die Bildung des Wasser durch die Verwendung eines Protonenleiters als Elektrolyten auf die Kathodenseite zu verlagern. Auf Grund seiner elektrischen Eigenschaft erscheint das in feuchter Atmosphäre protonenleitende  $\text{Ba}_3\text{Ca}_{1,18}\text{Nb}_{1,82}\text{O}_{3-d}$  (BCN18) als Elektrolyt geeignet, siehe Abb. 7.

Das Konzept besteht darin, als Substrat und Kathodenmaterial unterstöchiometrisches, Sr-dotiertes Lanthan-Manganat  $\text{La}_{0,75}\text{Sr}_{0,2}\text{MnO}_{3-d}$  (ULSM) zu verwenden, aus dem zunächst nach den üblichen keramischen Formgebungsverfahren mit anschließendem Sintern Formkörper mit einer Porosität von 30-50 % hergestellt werden. Anschließend wird auf dieses Substrat die dichte Elektrolytschicht durch thermisches Spritzen (hier



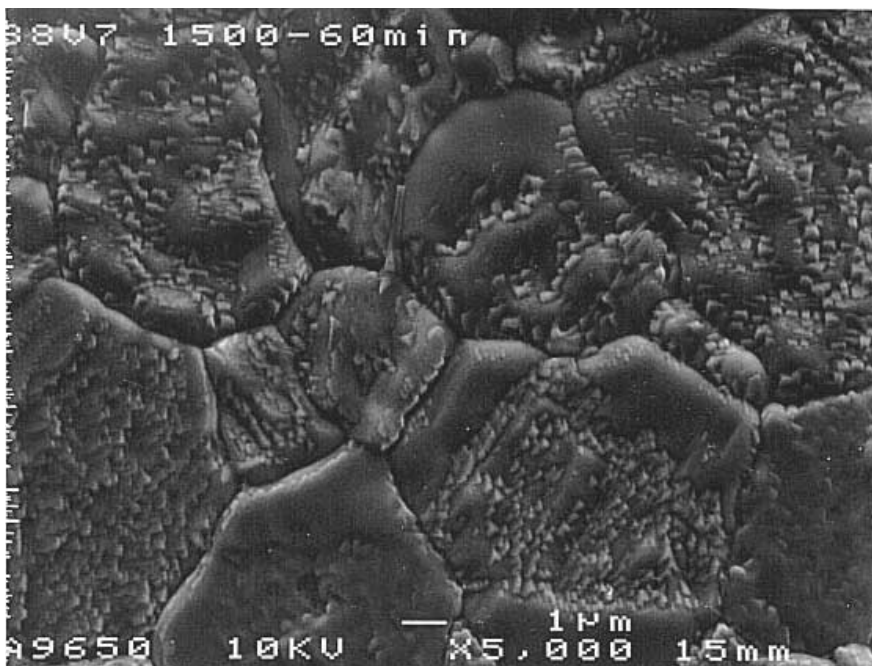
**Abb. 7: Elektrische Leitfähigkeit von verschiedenen Protonenleitern**

Plasmaspritzen) aufgebracht. Danach wird die Materialkombination thermisch beaufschlagt (thermisches Ätzen bei 1500 °C, 1 h), um ein grobkörniges Gefüge der BCN-Schicht und damit eine bessere Leitfähigkeit zu erzielen. Diesem Einfluss der Gefüge-Eigenschaft-Korrelation wird häufig nicht genügend Beachtung geschenkt. Ein Gefügebild, hergestellt durch thermisches Ätzen, ist in Abbildung 8 wiedergegeben. Bei dieser Temperatur und Haltezeit ist mit einem Nachsintern der LSM-Kathode zu er-

warten, weswegen die Porosität so hoch angesetzt wird. Schließlich wird auf die thermisch beaufschlagte BCN-Schicht die Anode als poröse Schicht aus einem BCN/Ni-Cermet als Anode durch Flamm- oder Plasmaspritzen aufgetragen. Zur Erhöhung der Porosität kann auch eine Mischung aus BCN und NiO flammgespritzt werden, wobei das NiO anschließend zu Ni reduziert werden muss.

Die Problematik besteht darin, ein poröses Substrat mit einer zur Plasma beschichtung ausreichenden mechanischen Festigkeit darzustellen. Ein möglicher Ansatz ist, organisches Schaumstoffmaterial mit einem ULSM-Schlacker zu tränken, zu trocknen, das organische Material auszuheizen und den Formkörper anschließend zu sintern. Ein anderer Weg könnte sein, einen ULSM-Schlacker mit Graphit zu versetzen, diesen zu trocknen, auszuheizen und schließlich zu sintern.

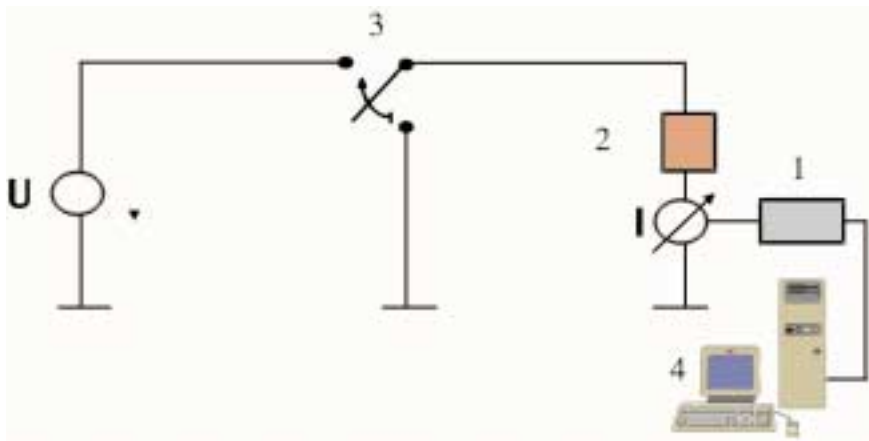
**Abb. 8: REM-Aufnahme des Gefüges von BCN, thermisch bei 1500 °C geätzt**



### Untersuchungen zur Ladungsträgerdynamik in Titandioxid

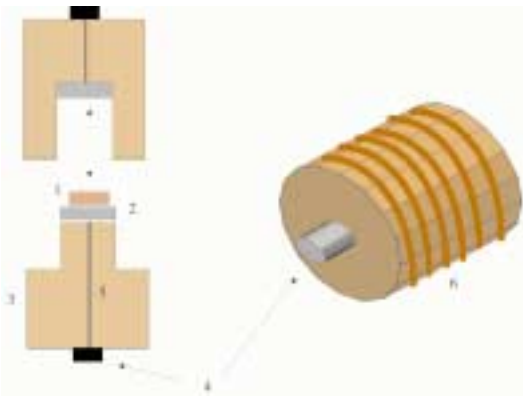
Dipl.-Chem. Holger Wittmer  
(UdS, Physikalische Chemie)

Titandioxid wird wegen seiner hervorragenden optischen Eigenschaften

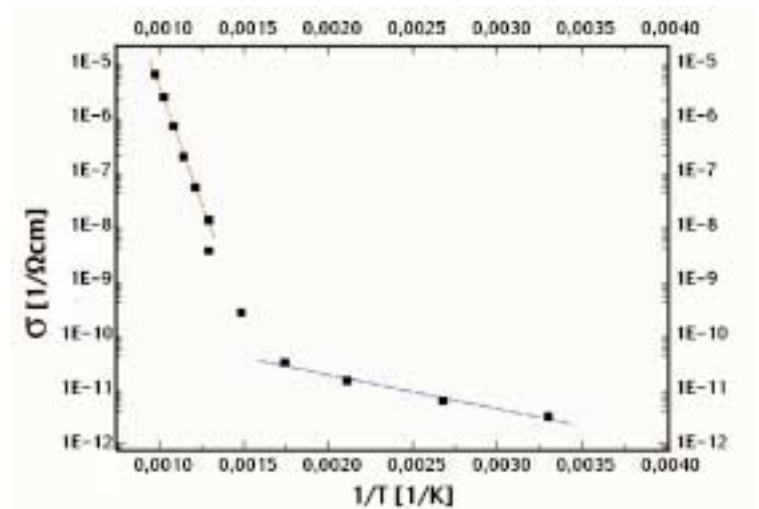


**Abb. 9: Aufbau zur Messung raumladungsbeschränkter Ströme**  
 1: A/D-Wandler, 2: Messzelle, 3: Schalter, 4: Computer

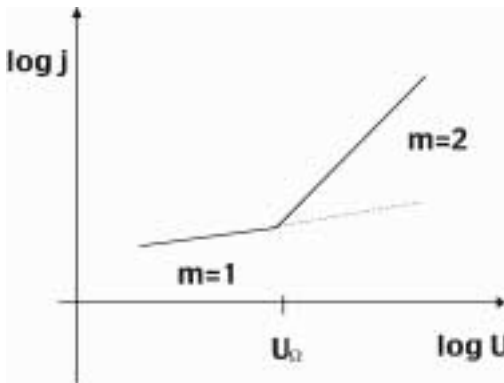
beispielsweise der Korngröße – in Relation gebracht werden. Besondere Bedeutung kommt hierbei den im nanokristallinen Titandioxid gefundenen und systematisch untersuchten raumladungsbeschränkten Strömen zu (SCLC, Abb. 9). Hierzu wurde der in den Abbildungen 10 und 11 dargestellte Messapparat aufgebaut. Durch eine Kombination von zeitaufgelöster und stationärer Messung besagter Ströme ist sowohl eine Bestimmung der elektronischen Leitfähigkeit als auch



**Abb.10: Aufbau der verwendeten Messzelle:**  
 1: Probe, 2: Elektrode Kupferstempel),  
 3: Kupfergehäuse, 4: BNC-Buchse,  
 5: Zuleitung, 6: Heizwicklung



**Abb. 12:  $\sigma(1/T)$ -Charakteristik in log-Auftragung**



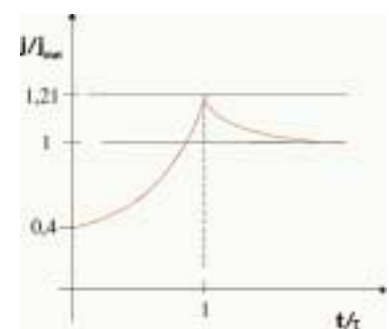
**Abb. 11:  $j(U)$ -Charakteristik in log-log-Auftragung**

stoffe sowie als leistungsfähiges Elektrodenmaterial in neuartigen photoelektrochemischen Solarzellen (Grätzelzelle). Obwohl die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Titandioxid mittlerweile breite Anwendung finden, ist bisher nur wenig über die mikroskopischen physikalischen Größen wie etwa die Elektronenbeweglichkeit oder die Dichte freier Elektronen bekannt. Sind die Zeitskalen, auf denen die photogenerierten Prozesse ablaufen (TRPC), bestimmt, so sind bei Kenntnis obiger Größen Aussagen über zurückgelegte Wegstrecken der freien Ladungsträger möglich. Insbesondere können diese mit vorgegebenen Systemlängen – wie

der Beweglichkeit möglich (Abbildungen 12 und 13). Insbesondere sind Messungen der Elektronendichten in den untersuchten Materialien zugänglich. Des Weiteren können Aussagen zu Konzentrationen von in Haftstellen fest sitzenden Elektronen gemacht werden. Unter diesem Aspekt widmet sich die vorliegende Ausarbeitung einer theoretischen und exper-

ten (hohes Streuvermögen, starke UV-Absorption) vor allem sowohl als Weißpigment in Abdeckfarben als auch in Sonnencremes und Holzschutzlacken als UV-Filter eingesetzt. Nanokristallines Titandioxid hat in den letzten Jahren für eine Vielzahl interessanter technischer Anwendungen gesorgt, etwa als effektiver Photokatalysator bei der Zersetzung organischer Schad-

**Abb. 13: theoretische Zeitabhängigkeit der Ströme**



rimentellen Untersuchung der Ladungsträgerdynamik in Titan-dioxid.

### Verfahrenstechnik

Dipl.-Ing. Laurent Schenck (UdS, Pulvertechnologie von Glas und Keramik)

Ein grundlegendes Problem in der Verfahrenstechnik ist die Erwärmung von Materialien. Grundlegende Anforderungen an die technische Erhitzung Homogenität und Geschwindigkeit. Konventionelle Erwärmungsmethoden basieren auf Wärmeleitung (Kammerofen) und Strahlung (CO<sub>2</sub>-Laser). Eine interessante Alternative dazu bietet die Mikrowellentechnik. Sie ermöglicht die volumetrische Erwärmung von Materialien mit sehr hohen Aufheizraten, wodurch die Prozesszeiten erheblich reduziert und zudem die Eigenschaften von gesinterter Keramik verbessert werden können (z.B. höhere Dichte, homogeneres Korngefüge). Allerdings ist die Anwendung der Mikrowellentechnik durch die dielektrischen Eigenschaften der verwendeten Materialien begrenzt. So werden die meisten Gläser und Keramiken als mikrowellentransparent bezeichnet und lassen sich daher nur schwer erhitzen. Problematisch ist des Weiteren die exakte Temperaturmessung der Proben, da deren Temperaturprofil bei der Mikrowellenerwärmung invers ist. Dadurch ist die Oberflächentemperatur aufgrund der Wärmeabstrahlung niedriger als das Probeninnere.

Um solche Materialien mittels elektromagnetischer Strahlung zu erwärmen, bieten sich verschiedene Möglichkeiten an. So kann zum einen der apparative Aufwand derart gesteigert werden, dass die elektrische Feldstärke in der Probe ausreicht um das Material zu erwärmen. Die andere Alternative beruht in einer indirekten Vorerwärmung der Probe auf eine kritische Temperatur, bei der sich die di-

elektrischen Eigenschaften sich derart ändern, dass eine Mikrowellenabsorption möglich ist. Die Vorerwärmung kann entweder mittels um die Probe angeordneten Stäbe oder Platten aus krowellenabsorbierendem Material oder durch Zugabe einer entsprechenden Dotierung erfolgen. Da bei der indirekten Vorerwärmung ein erheblicher Anteil des Prozesses auf konventionellem Weg erfolgt, ist eine Aussage über den Mikrowellenanteil und den konventionellem Anteil der Erhitzung schwierig. Deshalb wurde im Projekt die erste Alternative verfolgt, d.h. die Optimierung des elektrischen Feldes am Ort der Probe. Dadurch kann sie von der Probe absorbierte Leistung gesteigert (die absorbierte Leistung ist dem Quadrat der elektrische

Feldstärke proportional) und eine Erwärmung realisiert werden. Der hierzu erforderliche experimentelle Aufbau ist in Abbildung 14 dargestellt. Die Mikrowellenstrahlung der handelsüblichen Frequenz 2,45 GHz wird mittels eines Magnetrons erzeugt, die maximale Leistung des Generators beträgt 2 kW. Der „Ofenraum“ besteht aus einem zylindrischen, wassergekühlten Resonator, in dem sich nur eine stehende Welle ausbildet und daher als „Einmodenresonator“ bezeichnet wird. Die Welle ist eine transversal magnetische des Typs TM<sub>011</sub> mit einem Maximum der elektrischen Feldstärke in der Mitte des Resonators. Da die elektrischen Verhältnisse im Resonator während des Erhitzungsprozesses sehr stark variieren können, muss eine ständige

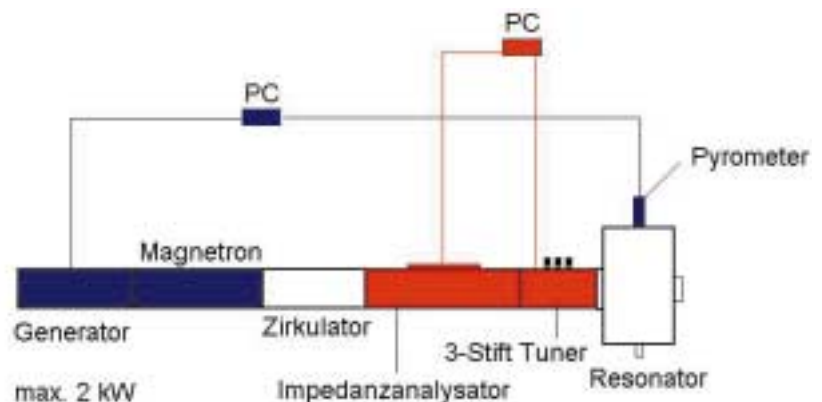
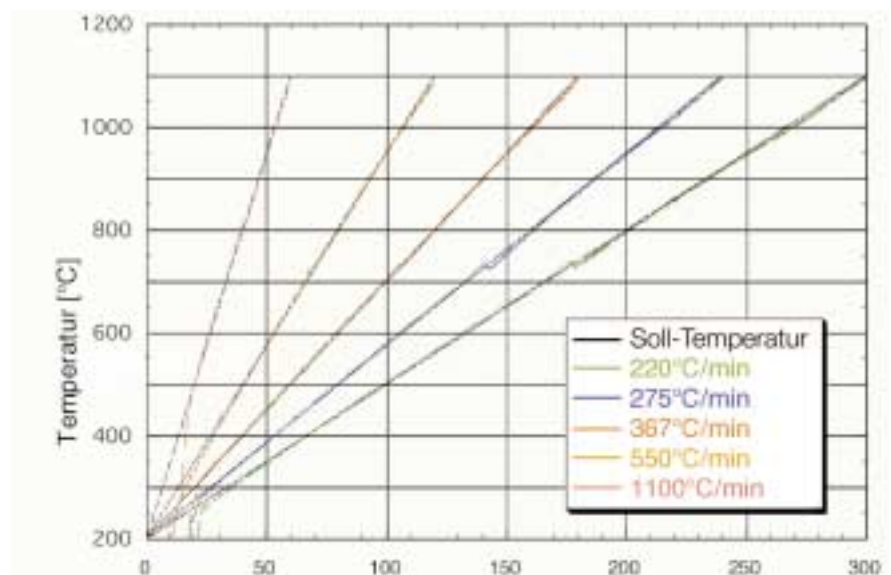


Abb. 14: Schematischer Aufbau Mikrowellenanlage

Abb. 15: Aufheizraten von Floatglas bei Mikrowellenerwärmung



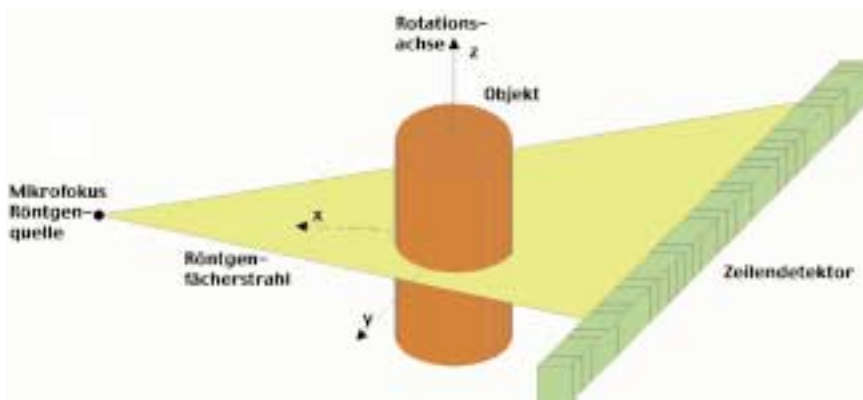


Abb. 16: Prinzip der Computertomographie (CT)

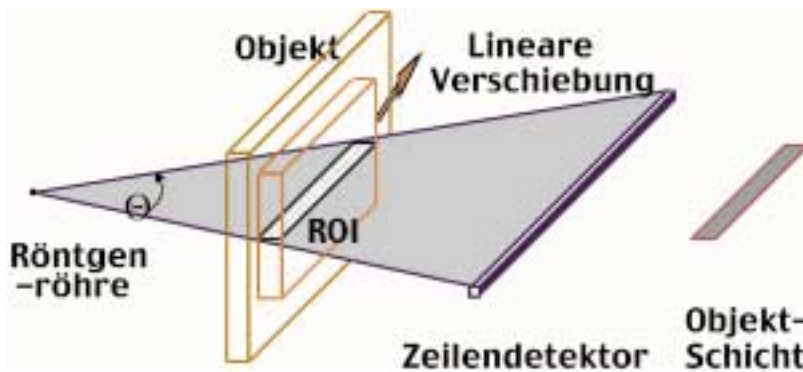


Abb. 17 Prinzip der Computerlaminographie (CL)

Anpassung erfolgen. Dazu misst ein Impedanzanalysator versuchsrelevante Parameter wie z.B. eingestrahlte, reflektierte und absorbierte Leistung sowie Stehwellenverhältnis und Phase und übermittelt diese an mittels eines CAN-Bus an einen automatischen Dreistift-

tuner, der durch Tauchen von Stiften in den Hohlleiter die Impedanzverhältnisse anpasst und eine optimale Absorption durch die Probe gewährleistet.

Aus der Vielzahl der Anwendungen, die durch diese exakt temperatur-

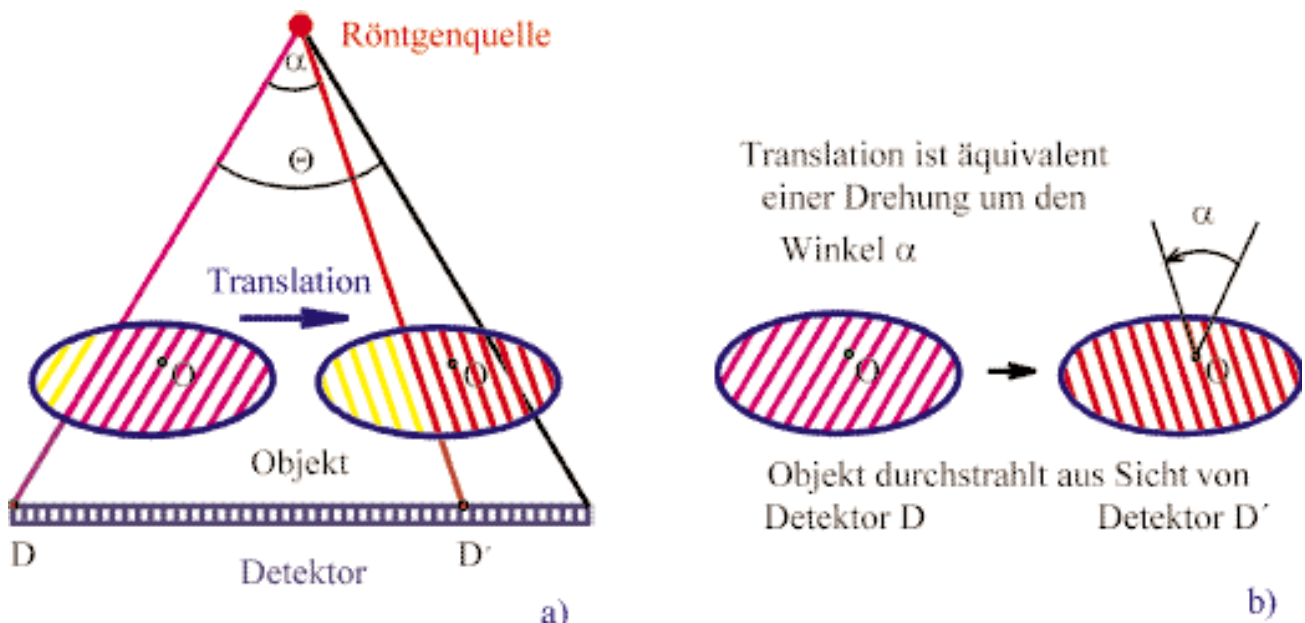
kontrollierte Mikrowellenerhitzung mit der aufgebauten Anlage möglich ist, soll an dieser Stelle nur die hohe Aufheizrate gezeigt werden. Dazu wurde eine ca. 3 mm dicke Floatglasscheibe (Kalknatronglas) in den Monomoderesonator gelegt und mit verschiedenen Leistungen vorgegebene Temperaturprofile (schwarze Kurven in Abb. 15) nachgefahren. In Abbildung 15 ist deutlich zu erkennen, dass selbst sehr hohe Aufheizraten von 1100 °C/min kontrolliert durchgeführt werden können. Hierbei erfolgte die Erhitzung des Glases ausschließlich durch Mikrowellenabsorption von Raumtemperatur an. Wegen der hohen elektrischen Feldstärken, die in dem Monomoderesonator erreicht werden können, ist dies auch für dielektrische Materialien möglich. Daher lassen sich auch die Erwärmungsmechanismen durch Mikrowellenabsorption mit dieser Anlage ohne die Überlagerung von thermischer Strahlung untersuchen.

### Charakterisierung von Hochleistungswerkstoffen

Dipl.-Ing. Sven Gondrom (IZFP)

Am Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) wurde mit der Computerlaminographie (CL)

Abb. 18: Prinzipskizze zur Äquivalenz der CL zu einer CT mit stark eingeschränktem Winkelbereich







**Prof. Dr. Rolf Clasen**, geb. 1948 in Hamburg, studierte Physik an der Universität Frankfurt/Main und der RWTH Aachen. Promotion 1974 über Festkörperspektroskopie in Aachen. Von 1975-92 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungslaboratorium Aachen der Philips GmbH 1989 Habilitation an der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften der RWTH Aachen, Forschungsschwerpunkt Entwicklung neuer Verfahren zur Herstellung von Lichtleitfasern aus Nanoteilchen. 1992 Direktor am Institut für Neue Materialien gem. GmbH und Leiter der Abteilung Glastechnologie, verbunden mit einer Professur für Werkstoffwissenschaften an der Universität des Saarlandes. Seit 1997 Leiter des Lehrstuhles für Pulvertechnologie von Glas und Keramik an der Universität des Saarlandes. Mitglied in zahlreichen nationalen und internationalen Fachverbänden.

ein Verfahren entwickelt, das die Prüfung von flächigen oder fest eingebauten Objekten, die nicht aus allen Richtungen zugänglich sind, erlaubt. Hierzu wird eine einfache Messanordnung genutzt, die lediglich eine lineare Translation des Objektes, bzw. alternativ der Röntgenquelle und des Detektors, erfordert. Auf eine Rotation, wie sie bei der CT benötigt wird, wird bewusst verzichtet. Abbildung 16 zeigt das Prinzip der Computertomographie mit einer Drehung des Objektes um  $360^\circ$ , während Abbildung 17 das Prinzip der Computerlaminographie darstellt.

Bei der CL wird das Objekt im Fächerstrahl der Röntgenröhre (Öffnungswinkel  $Q$ ) parallel zum Detektor linear in einer Richtung bewegt. Bei Verwendung eines flächigen Detektors wird ein Röntgenkegelstrahl benötigt. Es können dann nicht nur einzelne Objektschichten, sondern ein ganzes Objektvolumen rekonstruiert werden.

Die auf die Detektorelemente auftreffende Strahlung enthält Infor-

mationen über die einzelnen Volumenelemente des Objektes. Während der Bewegung ändert sich von Detektorelement zu Detektorelement sukzessive der Winkel, mit welchem das jeweilige Volumenelement durchstrahlt wurde. Betrachtet man in Abbildung 18 zwei feste Detektorelemente  $D$  und  $D'$  so entspricht die dort registrierte Intensität einer Durchstrahlung des Objektes mit parallelen Strahlen nach einer Rotation um den Winkel  $\alpha$ . Bei stationären Objekten werden Quelle und Detektor simultan in einer Richtung bewegt. Prinzipiell ist also die Computerlaminographie einer Computertomographie mit extrem stark eingeschränktem Winkelbereich äquivalent. Während sich bei einer herkömmlichen CT der Messbereich über volle  $360^\circ$  erstreckt, werden bei der CL Daten lediglich aus einem Bereich erfasst, der dem Öffnungswinkel des Röntgenfächerstrahls entspricht und üblicherweise zwischen  $30^\circ$  und maximal  $90^\circ$  liegt. Zur Rekonstruktion der Objektschichten wird in der CL ein algebraisches, iteratives Verfahren (ART) eingesetzt, das vergleichsweise zeit-

aufwendig ist. Aufgrund des eingeschränkten Winkelbereichs kommt es in den Rekonstruktionen der Objektschichten zu verfahrensbedingten Artefakten, so werden z. B. die Objektumrisse in Durchstrahlungsrichtung nicht korrekt wiedergegeben, da diese Informationen eine Messung in der Richtung erfordern würde, in die die Translation erfolgt und die in den angesprochenen Fällen nicht zugänglich ist.

Der Ansatzpunkt zur Lösung der auftretenden Probleme besteht in der Einbringung von „a priori Informationen“ über das Objekt, wie z. B. Objektumrisse, in die Rekonstruktion. Diese Vorgehensweise hat zum einen eine deutliche Verbesserung der Bildqualität ermöglicht und darüber hinaus die relativ langen Rekonstruktionszeiten deutlich verkürzt, da weit weniger Iterationen zur Rekonstruktion einer Objektschicht nötig geworden sind. Es ist gelungen, die Rekonstruktionszeiten einer Objektschicht höchster Auflösung von 10 Stunden auf deutlich weniger als eine Stunde zu verkürzen. Bei einer gleichzeitig erzielten deutlichen Qualitätsverbesserung ist die Computerlaminographie damit zu einer interessanten Alternative zu herkömmlichen Prüfmethode geworden, bei denen z. B. mehrere Durchstrahlungsaufnahmen aus verschiedenen Richtungen aufgenommen und die erstellten Röntgenfilme quasi von Hand verglichen wurden, um Aussagen über die Tiefenlage von Fehlern oder Objektstrukturen zu erhalten.

**Abb. 19: CL an einer Aluminiumschweißnaht mit Poren und einem Riss, rechts bei Verwendung der äußeren Umrisse als a priori Informationen**

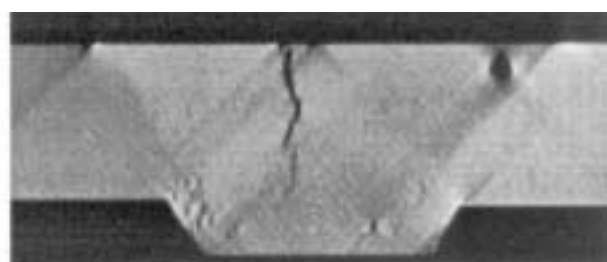


Abbildung 19 zeigt die Rekonstruktion eines Schweißnahtbereiches in einer Aluminiumplatte. Im Rekonstruktionsbereich befinden sich mehrere Poren sowie ein Riss in der Schweißnaht. Da bei der Computerlaminographie nur Informationen aus einem begrenzten Winkelbereich vorliegen, kann in der Regel aus diesen Informationen allein die äußere Geometrie des Prüfobjektes nicht rekonstruiert werden. Infolge dessen ist auch keine Aussage darüber möglich, ob der im linken Teilbild dargestellte Riss im Innern des Objektes liegt oder bis zur Oberfläche reicht. Die Rekonstruktion kann nun durch die Verwendung von a priori Informationen über die äußere Geometrie des Prüfobjektes wesentlich verbessert werden, wie im rechten Teilbild zu erkennen ist. Die auftretenden Artefakte sind deutlich reduziert und das Bild ist wesentlich schärfer. Darüber hinaus ist eine genaue Bestimmung der Lage der Poren und des Risses im Objekt möglich.

### Ausblick

Die zweite Förderperiode geht Ende 2001 zu Ende. Daher ist geplant, eine dritte zu beantragen und den Antrag im März nächsten Jahres einzureichen. Da alle Kandidaten der 2. Förderperiode Ende nächsten Jahres die Arbeiten abschließen sollen, werden im WS 2000/01 verstärkt Vorlesungen aus dem betriebswirtschaftlichen Bereich und Exkursionen mit Gesprächsmöglichkeiten mit den Personalchefs der besuchten Unternehmen angeboten werden.

Anzeige

Johnson Controls GmbH

Ihr Direktkontakt

zur praxisnahen Forschung

Kontaktstelle für Wissens- und  
Technologietransfer  
Telefon 0681/302-2656 Fax 0681/302-4142  
E-mail: [kwt@rz.uni-saarland.de](mailto:kwt@rz.uni-saarland.de)

