

3.

Werkstoff- mechanik und neue Materialien

Durch die Verflechtung von natur- und ingenieurwissenschaftlicher Forschung leistet GKSS einen innovativen Beitrag zur Entwicklung von Werkstoffen und Materialien.

1956

1960

1970

1980

1990

2000

2006

3. Werkstoffmechanik und neue Materialien

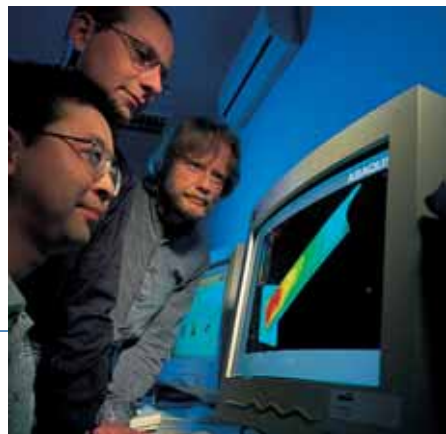
3.1 Werkstoffmechanik (seit 1980)

3.1 Werkstoffmechanik (seit 1980)

Weltweit gilt die Erhöhung der Betriebssicherheit von Materialien und Strukturen als bedeutende Forschungs- und Entwicklungsaufgabe. Zahlreiche Forschungsinstitute und Industriefirmen, Versicherungs- und Überwachungsgesellschaften arbeiten etwa im Fahrzeug- und Flugzeugbau oder bei Chemieanlagen und auf Meeresplattformen an der Entwicklung von Methoden zur Bewertung der Zuverlässigkeit von Bauteilen. Diesem Ziel gelten auch die seit Beginn der 1980er Jahre innerhalb der Komponentensicherheit eingebetteten Forschungen von GKSS auf dem Gebiet der Werkstoffmechanik.

Das Ziel der Werkstoffmechanik bei GKSS besteht generell in der interdisziplinären Zusammenführung experimenteller Methoden, theoretischer Modellbildungen und analytischer wie rechnerischer Verfahren, um Leichtbauwerkstoffe und -strukturen besser charakterisieren und aussagekräftiger bewerten zu können. Hierbei bildet die Bruchmechanik, d. h. die Erforschung des Einflusses von Rissen auf die Tragfähigkeit metallischer Leichtbauwerkstoffe, einen eigenen Schwerpunkt. Innerhalb dieses Bereichs konzentrieren sich die Untersuchungen besonders auf das Festigkeitsverhalten von Werkstoffen, auf das ihrer Schweißverbindungen und ihrer jeweiligen Bauteile. Dabei werden die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Werkstoffe analysiert und deren Übertragbarkeit von der Laborprobe auf Bauteile ermittelt. Seit Mitte der 1980er Jahre entwickelt GKSS spezielle Methoden zur Ermittlung des Ausbreitungsverhaltens von Rissen und stellt Regeln für deren Übertragbarkeit auf bestimmte Bauteile auf. Darüber hinaus erarbeitet GKSS analytische Lösungen zur Abschätzung bruchmechanischer Beanspruchung an einzelnen Bauteilen.

Während bruchmechanische Methoden in der Regel auf vereinfachenden Annahmen beruhen, können mit numerischen Simulationen auf Basis der Schädigungsmechanik realistische Vorhersagen von Verformungs-, Schädigungs-



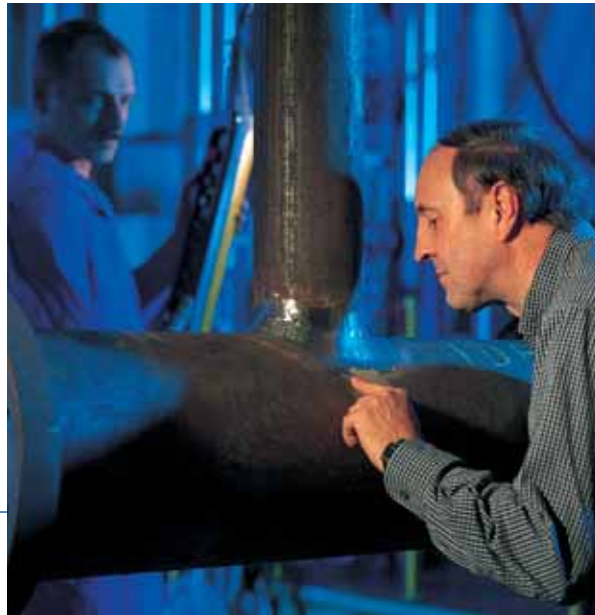
*Das Bauteil im Computer:
Rechnerische Simulation
des Werkstoff- und Bauteilverhaltens
spart Kosten und macht
Konstruktionen sicherer.*

1987 • Legierungsentwicklung und Werkstoffmechanik unter dem Dach der Werkstoffforschung.

und Bruchvorgängen getroffen werden. Solche Vorhersagen gewinnen besonders bei komplizierten Bauteilgeometrien insofern große Bedeutung, als damit die Zusammenhänge zwischen der Mikrostruktur von Werkstoffen und den Verformungs- und Schädigungseigenschaften auf mikrostruktureller Ebene sowie den globalen Festigkeits- und Rissfortschrittseigenschaften erfasst werden können.

Die Entwicklung von intermetallischen Legierungen und die Bewertung von Rissfehlern in Werkstoffen und Bauteilen bildeten daher seit Mitte der 1980er Jahre unter dem gemeinsamen Dach der GKSS-Werkstoffforschung eigene Vorhaben. Etwa an der Jahrtausendwende verlagerten sich die Schwerpunkte des FuE-Programms von GKSS erneut und führten ebenfalls zu einer Neuausrichtung der Werkstoffforschung und damit auch der Werkstoffmechanik: Die gesamte Werkstoffforschung widmet sich dem Leichtbau in der Verkehrs- und Energietechnik, wobei die Werkstoffmechanik ihre Bewertungsmethoden für die im Leichtbau geforderte besonders hohe Ausnutzung von Tragfähigkeit und Lebensdauer der Bauteile weiterentwickelt.

Seit etwa 2005 beschäftigt sich die Werkstoffmechanik bevorzugt mit der Herstellung und Bewertung von Hybridstrukturen; das sind Bauteile, die aus unterschiedlichen Werkstoffen (z.B. Aluminium u. Magnesium) hergestellt werden und besonders für den Leichtbau von Interesse sind. GKSS will hierbei sowohl die Entwicklung von Fügeverfahren als auch die eines Bewertungssystems für solche Werkstoffverbunde vorantreiben, die durch ihre Heterogenität eine besondere Herausforderung darstellen.



Das Bauteil in der Realität: Versuche an realen Bauteilen oder bauteilähnlichen Strukturen dienen der Verifikation der entwickelten Modelle.

1956

60

70

80

90

00

2006

3. Werkstoffmechanik und neue Materialien

3.1 Werkstoffmechanik (seit 1980)



In den zurückliegenden Jahren konnte die Forschung im Bereich Werkstoffmechanik bereits vielfältige Erfolge aufweisen: Auf dem Gebiet der Bruchmechanik entwickelte GKSS verschiedene neue Testmethoden zur Ermittlung des Risswachstums in metallischen Werkstoffen. Deren Ergebnisse sind ebenso in internationale Normen und Vorschriften eingeflossen wie solche, die sich bei Verfahren zur Bewertung von Bauteilen ergeben haben. In der numerischen Materialmodellierung gelang es, Modelle zur Beschreibung von Verformung und Bruch vor allem hinsichtlich ihrer Anwendung auf dünnwandige Leichtbaustrukturen weiterzuentwickeln. Zu nennen ist in diesem Zusammenhang unter anderem die Identifizierung der Modellparameter durch die Kombination von Experimenten und numerischen Simulationen.

Um die bisherige Erfolgsgeschichte fortzuschreiben, wird in den nächsten Jahren die gesamte Forschungskette vom atomaren Aufbau bis zum Bauteilverhalten zu untersuchen sowie ein umfassendes Expertensystem zur Bewertung von Leichtbaustrukturen zu bilden sein. Die einzelnen GKSS-Einrichtungen wollen zu diesem Zweck verstärkt mit anderen Forschungszentren, vor allem denen der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, kooperieren.

*Kleine Risse mit großer Bedeutung - Festigkeitsverhalten von Schweißverbindungen:
Ein Riss in der Grenzfläche zwischen Grundwerkstoff und weicherem Schweißgut wird in den weicheren Bereich abgelenkt.*

3.2 Metallische Leichtbau- und Funktionswerkstoffe (seit 1986)

Spätestens seit der Ölkrise in den 1970er Jahren wurde in den Industrieländern immer intensiver danach gefragt, wie der Energieverbrauch zu senken, die Lebensqualität und Mobilität aber zu erhalten oder sogar zu erhöhen sei. Vor dem Hintergrund dieser Fragestellungen beschäftigte sich die GKSS-Werkstoffforschung seit Mitte der 1980er Jahre mit neuartigen metallischen Leichtbauwerkstoffen. Diese können in besonderer Weise zur Ressourcenschonung beitragen und beispielsweise im Karosserie-, Motoren- und Turbinenbau eingesetzt werden. Die ab 1986 betriebene Forschung rückte zunächst den grundlegenden Zusammenhang von mikroskopischen Strukturen und mechanischen Eigenschaften intermetallischer Werkstoffe auf der Basis von Titanaluminiden (TiAl) ins Zentrum ihrer Arbeiten. In der folgenden Dekade verlagerte sich der Fokus mehr auf die Anwendung der erzielten Ergebnisse. Dementsprechend wurden bei GKSS werkstoffbezogene Fertigungs- und Verarbeitungstechnologien aufgebaut und Kooperationen mit der Industrie intensiviert.



Kompressor-Laufschaufeln für ein Flugtriebwerk aus einer von GKSS patentierten TiAl-Legierung, die in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben durch Strangpressen, Schmieden und elektrochemisches Senken hergestellt wurde.

1956

60

70

80

90

00

2006

3. Werkstoffmechanik und neue Materialien

3.2 Metallische Leichtbau- und Funktionswerkstoffe (seit 1986)

Schon früh standen dabei die besonderen mechanischen und funktionalen Eigenschaften von nanostrukturierten Werkstoffen im Vordergrund, zuerst bei TiAl-, dann bei Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen. Deren Herstellung erfolgte sowohl pulvermetallurgisch als auch durch neuartige Dünnschichttechniken. Im Jahre 1999 wurde dann mit der Entwicklung von Magnesiumlegierungen für Ultraleichtbau-Anwendungen begonnen, um im Bereich der Strukturwerkstoffe eine zweite innovative Legierungsklasse zu etablieren. Die bei GKSS in einzigartiger Weise verfügbaren und auf ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen ausgerichteten Neutronenstreuexperimente am GKSS-Forschungsreaktor FRG-1 unterstützten dabei sowohl die Grundlagenforschung als auch die technologisch orientierten Arbeiten. Seit Ende 2005 erweitert die Inbetriebnahme eines ersten eigenen Experiments für die Materialforschung mit Synchrotronstrahlung am nahe gelegenen Helmholtz-Zentrum DESY diese Möglichkeiten wesentlich. Damit können bestimmte Untersuchungen bedeutend schneller durchgeführt werden, sodass es nun möglich wird, Prozesse als Funktion der Zeit mit atomarer Auflösung zu verfolgen.

Langfristiges Ziel ist es, Leichtbauwerkstoffe für spezifische Anwendungen zu funktionalisieren bzw. multifunktionale Werkstoffe zu entwickeln, die eine völlig neue Kombination von Eigenschaften aufweisen.

Titanaluminide für Hochtemperatur-Anwendungen (seit 1986)

Ressourcenschonung kann besonders durch Innovationen in Hochtemperatur-Technologien erreicht werden, mit denen die Prozesstemperatur erhöht, Trägheitskräfte reduziert und so die Effizienz von Energiewandlungsanlagen insgesamt gesteigert werden. Das lässt sich allerdings nur realisieren, wenn leichte, korrosionsbeständige und zugleich extrem feste Werkstoffe zur Verfügung stehen, die auch bei hohen Temperaturen zum Einsatz kommen können. Für derartige Verwendungsmöglichkeiten bieten intermetallische Titanaluminid-Legierungen auf Grund ihrer außergewöhnlichen thermo-physikalischen Eigenschaften besonders gute Voraussetzungen.

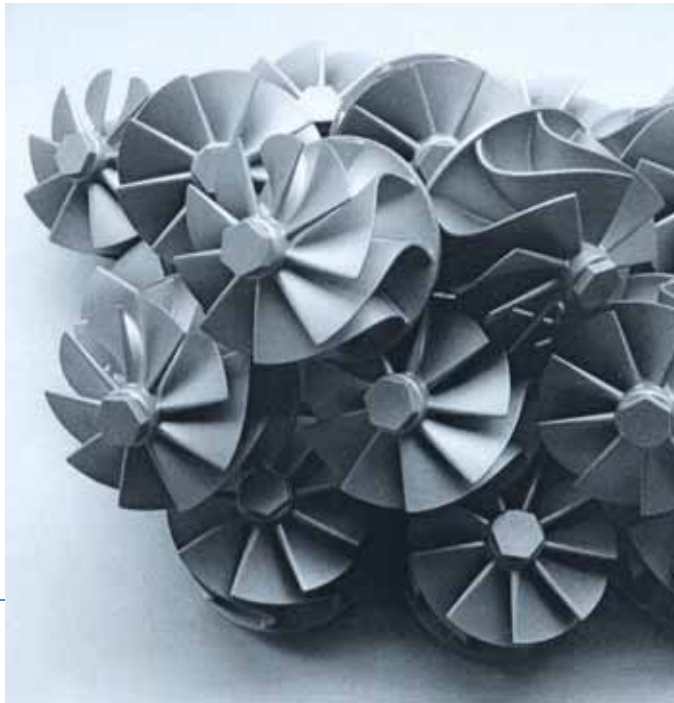
Um die zu erwartenden Verbesserungen und Innovationen zu realisieren, ist – außer der grundlegenden Erforschung der Zusammensetzung und der Gefüge dieser neuen Werkstoffe – auch die Entwicklung von zuverlässigen und kostengünstigen Herstellungstechnologien notwendig. 1994 wurde deshalb in enger Kooperation mit einem Anlagenhersteller eine Pilot-

1986 • Titanaluminide für Hochtemperatur-Anwendungen.

Pulververdüngungsanlage für die Entwicklung von pulvermetallurgischen Herstellungsrouten in Betrieb genommen und für die Produktion von TiAl-Pulvern und Halbzeugen erfolgreich eingesetzt.

Zudem bearbeitete GKSS seit 1995 auch alternative schmelzmetallurgische Prozesstechnologien sowie in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie die zugehörigen Umformtechnologien zur Herstellung von TiAl-Halbzeugen und Bauteilen. Sowohl die speziellen TiAl-Legierungen als auch die Prozesstechnologien werden auf metallphysikalischer Basis entwickelt. Dabei erlauben besonders elektronenmikroskopische Untersuchungsmethoden, aber auch Neutronenstreuexperimente eine Charakterisierung der Werkstoffe bis zu atomaren Dimensionen.

Von 1998 bis 2002 wurde bei GKSS eine neue Generation von TiAl-Legierungen (TNB) entwickelt, die wegen ihrer außergewöhnlichen Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit eine Ausnahmestellung im Bereich der Hochtemperatur-Werkstoffe einnehmen. Die bisherigen Ergebnisse versprechen eine erfolgreiche Zukunft dieser Legierungen, wie der zurzeit bei Rolls-Royce vorbereitete Einsatz von Turbinenschaufeln, die aus einer GKSS-Legierung bestehen und für Flugtriebwerke vorgesehen sind, erkennen lässt. Im Bereich der Automobilindustrie kommen ebenfalls TiAl-Legierungen zur Anwendung, etwa bei Laufrädern für Abgas-Turbolader.



Laufräder für Abgas-Turbolader aus Titan-Aluminiden sind zugleich extrem leicht, korrosionsbeständig und hochfest.

1956

60

70

80

90

00

2006

3. Werkstoffmechanik und neue Materialien

3.2 Metallische Leichtbau- und Funktionswerkstoffe (seit 1986)

Magnesium-basierte Legierungen (seit 1999)

Magnesium-Werkstoffe zeichnen sich auf Grund der geringsten Dichte aller metallischen Strukturwerkstoffe durch ein hohes Leichtbaupotenzial aus und sind daher besonders für einen Einsatz in denjenigen Bereichen geeignet, in denen Masse bewegt wird. Bei vergleichbaren mechanischen Eigenschaften gegenüber anderen Materialien kann man bei den aus Magnesium-Werkstoffen hergestellten Bauteilen von einem deutlich geringeren Gewicht ausgehen. Deshalb finden sich Magnesium-basierte Legierungen hauptsächlich bei verschiedenen Komponenten im Automobilbau oder als Gehäusebauteile von Handys, Notebooks und fototechnischen Produkten. Insbesondere im Fahrzeugbau werden erhebliche Anstrengungen in der Legierungs- und Prozessentwicklung unternommen, um den Anwendungsbereich für Magnesium-Werkstoffe zu erweitern und, neben dem Antriebsstrang, weitere Teile der Karosserie und des Innenraumes für diesen Leichtbauwerkstoff zu erschließen.

1999 erweiterte GKSS ihre bis dahin auf intermetallische TiAl-Werkstoffe ausgerichtete Legierungsentwicklung auf Magnesium-Legierungen. Zunächst lag der Forschungsschwerpunkt auf monolithischen und kurzfaserverstärkten Magnesium-Guss-Legierungen, die als temperaturbeständige Werkstoffe für Getriebegehäuse ebenso geeignet sind wie für den Motorenbereich. Zur Entwicklung einer geeigneten Herstellungstechnik (Druckguss, Squeeze-Casting, Thixo-Casting, Kokillenguss) baute GKSS kommerziell verfügbare Gussapparaturen in einer eigenen Versuchshalle auf. Die bisher genannten Forschungsschwerpunkte wurden in den folgenden Jahren durch die Entwicklung von Magnesium-Knetlegierungen für Strangpressprofile, Bleche und Schmiedebauteile ergänzt. Bei der Entwicklung dieser Legierungen spielt die Prozesstechnik selbst eine große Rolle.

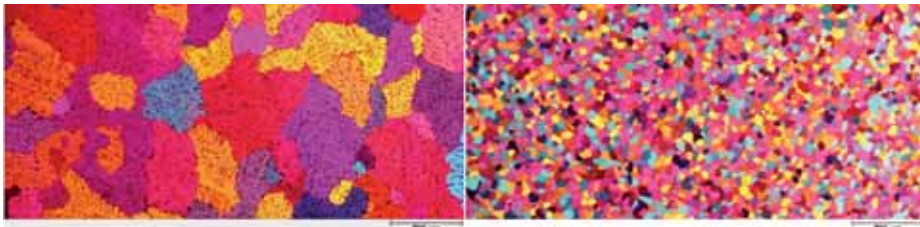
Die Ziele in der Halbzeugentwicklung bestehen darin, gleichzeitig hohe Festigkeit und gute Umformbarkeit mit einer isotropen Umformcharakteristik bei moderaten Temperaturen zu erreichen. Modellentwicklungen und Simulationsrechnungen begleiten dieses Unterfangen, indem sie die mechanischen Eigenschaften unter Berücksichtigung der Prozesstechnik vorausberechnen. Da bei vielen Anwendungen die hohe Korrosionsempfindlichkeit von Mg-Legierungen und teilweise auch die geringe Verschleißbeständigkeit von Mg-Bauteilen Probleme darstellen, entwickelt GKSS für solche Komponenten geeignete Beschichtungen, die nach Möglichkeit selbstheilend sein sollten (d. h. ihre Schutzwirkung auch nach einer mechanischen Beschädigung

1999 • Magnesiumbasierte Legierungen.

gewährleisten). Die Erforschung und Entwicklung von Mg-Legierungen konnte hierbei auch davon profitieren, dass ein Helmholtz-Zentrum wie GKSS den nicht zu unterschätzenden Vorteil des vergleichsweise einfachen, hausinternen Zugangs zu modernen Großgeräten bietet. So konnten etwa Dank der Forschungsmöglichkeiten mit Neutronen am GKSS-Forschungsreaktor FRG-1 wichtige Erkenntnisse über kristalline Vorzugsorientierungen (Texturen) an Mg-Legierungen – wie im übrigen auch an TiAl-Legierungen – und den damit verbundenen Verarbeitungsprozessen gewonnen werden: Diese sind für die gezielte Einstellung der makroskopischen mechanischen Eigenschaften in einem Endprodukt von eminenter Bedeutung.

Da für den wirtschaftlichen Einsatz von Magnesiumwerkstoffen auch deren Recycling von Bedeutung ist, arbeitet GKSS ebenfalls an der Entwicklung von Recyclinglegierungen. Sie müssen die nötigen Festigkeitseigenschaften besitzen und zugleich hinreichend korrosionsbeständig sein. Demgegenüber eignet sich Magnesium wegen der ausgeprägten Korrosion hervorragend als biokompatibler und bioabbaubarer Werkstoff für Implantate (wie Stents, Schrauben, Nägel und Clips). In diesen Fällen ist neben einer ausreichenden Festigkeit und Steifigkeit des verwendeten Materials ein kontrolliertes Korrosionsverhalten notwendig, bei dem sich das Implantat innerhalb eines vorausberechneten Zeitraumes im Körper auflösen soll. Zu diesem Zweck müssen Legierungen entwickelt werden, deren Abbauprodukte im Körper absolut verträglich sind und die nach Möglichkeit zugleich die Regeneration des körpereigenen Materials unterstützen.

Seit 2005 baut GKSS das Magnesium Innovation Center (MagIC) auf, das seine Arbeit Anfang 2007 aufnehmen wird. Es wird deutschland- oder gar weltweit einzigartige Möglichkeiten zur Entwicklung der Magnesiumtechnologie von der Grundlagenforschung bis hin zur anwendungsnahen Prototypenentwicklung bieten.



links: kommerzielle Mg-Legierung Korngröße 400 µm.
rechts: korngefeinte Legierung Korngröße 60 µm.

1956

60

70

80

90

00

2006

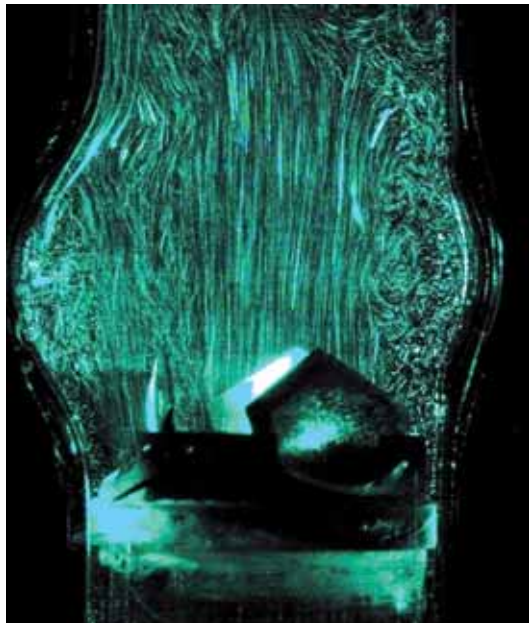
3. Werkstoffmechanik und neue Materialien

3.2 Metallische Leichtbau- und Funktionswerkstoffe (seit 1986)

Metallpulverspritzguss für Hochleistungsbauteile und biokompatible Werkstoffe (seit 1997)

Das Metallpulverspritzgießen (Metal Injection Moulding, MIM) ist eine relativ junge Urformtechnologie, die sich hervorragend für die Herstellung von komplexen Bauteilen aus Metallpulver eignet. Die Erschließung der innovativen MIM-Technologie bei GKSS zielt auf die Verarbeitung von Ti- und Mg-Basiswerkstoffen. 1997 gelang es im Rahmen eines GKSS-Kooperationsprojektes erstmals, Titanlegierungen über die Prozessroute des Metallpulverspritzgießens zu endformnahen Probekörpern mit äußerst guten mechanischen Eigenschaften zu verarbeiten. Dieser Erfolg führte zur Entscheidung, das Metallpulverspritzgießen in Kombination mit der bei GKSS entwickelten Pulvertechnologie für Titan-Werkstoffe zu etablieren und medizin- und verkehrstechnische Bauteile mit Hilfe der MIM-Technologie im Labormaßstab zu produzieren.

Der Schwerpunkt der Produktentwicklung lag auf der Herstellung von medizinischen Implantaten (von z. B. neuartigen Herzklappenprothesen und komplexen Wirbelschrauben). Die erfolgreichen Entwicklungen führten 2004 zur Gründung der Firma TiJet, die seitdem die kommerzielle Produktion komplexer Titan-Implantate mit der bei GKSS entwickelten MIM-Technologie übernommen hat. Einen weiteren Forschungsschwerpunkt bildete die Herstellung von MIM-gefertigten Ti- und TiAl-Leichtbaukomponenten für die Verkehrstechnik. Besonders die Beherrschung einer kostengünstigen Herstellungstechnologie für komplexe TiAl-Hochleistungsbauteile würde den künftigen Einsatz dieser Werkstoffe wesentlich erweitern.



*Mit dem MIM-Verfahren hergestellte Herzklappenprothese im Strömungstest
Herzklappen-Design: Tricomed Medizintechnik GmbH, Kiel,
Strömungsversuchsstand: Institut für Angewandte Physik, Universität Kiel.*

Fügetechnologie zur Herstellung von Hybridbauteilen (seit 1995)

Die derzeitigen Fügeaktivitäten bei GKSS gingen Mitte der 1990er Jahre aus dem ehemaligen Forschungsschwerpunkt Unterwassertechnik hervor, bei dem das Schweißen unter Wasser von besonderer Bedeutung war. Im Rahmen der GKSS-Werkstoffforschung werden zurzeit drei fortschrittliche Fügeverfahren verwendet und für die Herstellung von Leichtbaustrukturen genutzt. Das seit Ende der 1990er Jahre praktizierte Diffusionsschweißen wird bei GKSS im Wesentlichen zur Fügung von Titanaluminiden eingesetzt. So kann ein geschmiedetes Titanaluminid-Bauteil auf einem Schaft oder einer Halterung befestigt werden, die aus einem anderen Werkstoff bestehen. Das Laserstrahlschweißen, das bei GKSS seit 2001 zum Einsatz kommt, hat das Fügen insbesondere von Aluminium- und Magnesium-Legierungen zum Schwerpunkt. Primäre Anwendungen sind besonders Aluminium-Leichtbaustrukturen für den Flugzeugumpf, um damit Gewichtseinsparungen von 15% und sogar darüber hinaus zu realisieren.

Das Reibrührschweißen ist ein neuartiges Fügeverfahren, das 1991 vom englischen The Welding Institute patentiert wurde und seit Mitte der 1990er Jahre bei GKSS weiterentwickelt wird. Dieses Verfahren bietet den Vorteil des Schweißens unterhalb des Schmelzpunktes der Fügepartner und ist dazu geeignet, Stumpf- und Überlappverbindungen herzustellen. Dadurch können Werkstoffe miteinander verbunden werden, die mittels Schmelzschweißverfahren nicht gefügt werden können. Während das Reibrührschweißen üblicherweise zur Herstellung gerader Nähte an ebenen Strukturen eingesetzt wird, konnten bei GKSS durch die Verbindung des Schweißkopfes mit Robotern die ersten räumlich gekrümmten Nähte realisiert und das zugehörige Verfahren 1999 patentiert werden.

Dank der Möglichkeiten zur Neutronenforschung am GKSS-Forschungsreaktor FRG-1 wurden zerstörungsfreie Messverfahren entwickelt, bei denen die Fähigkeit der Neutronen genutzt wird, tief in das Innere von Proben und Bauteilen einzudringen und



Kraftgesteuertes Reibrührschweißen einer gekrümmten Flugzeugschale mit einem Tricept TR805 Roboter.

3. Werkstoffmechanik und neue Materialien

3.2 Metallische Leichtbau- und Funktionswerkstoffe (seit 1986)

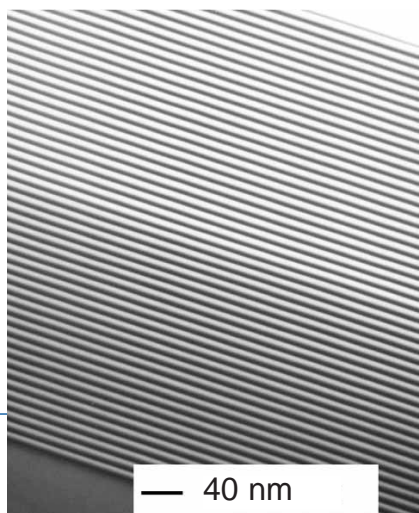
dadurch Aussagen über deren atomare Struktur zu liefern: Anhand der Veränderungen der Atomabstände in Schweißnähten konnten die inneren Spannungen gemessen und die Prozessparameter so eingestellt oder optimiert werden, dass ein Versagen der Naht weniger wahrscheinlich wird. Dadurch konnte die Qualität der Fügung wesentlich verbessert und Aussagen über die Belastbarkeit der Verbindung getroffen werden.

Der Anwendungsschwerpunkt der GKSS-Entwicklungen im Bereich der Füge-techniken liegt vor allem im Luftfahrtbereich, aber auch bei anderen Verkehrstechnologien. Eine Herausforderung stellt dabei die Herstellung von Hybridstrukturen aus unterschiedlichen Werkstoffen dar. Als Beispiele dafür kann man reibrührgeschweißte Bleche nennen, die aus zwei verschiedenen Werkstoffen bestehen (z. B. Aluminium und Magnesium), so genannte Tailored Blanks, oder auch diffusionsgeschweißte Ventile für Automotoren aus einer TiAl-Legierung, die einen Schaft aus Stahl oder Titan aufweisen.

Nanostrukturierte Materialien (seit 1989)

Seit Ende der 1980er Jahre werden bei GKSS nanostrukturierte Materialien mittels spezieller Dünnschichttechnologien sowie pulvermetallurgisch mittels Hochenergiemahlen hergestellt. Nanostrukturierte Materialien besitzen aufgrund ihrer extrem feinen Mikrostruktur außergewöhnliche mechanische und funktionale Eigenschaften und Eigenschaftskombinationen. Innerhalb der Grundlagenforschungen wurden zunächst die Mechanismen der Phasenbildung sowie der Mikrostrukturentwicklung umfassend charakterisiert. Auf den gewonnenen Erkenntnissen aufbauend nutzt GKSS seit Mitte der 1990er Jahre die außergewöhnlichen Eigenschaften für die Entwicklung neuer Produkte.

Eine sehr erfolgreiche Entwicklung stellte die Herstellung nanostrukturierter Röntgenoptiken dar. Anfang der 1990er Jahre wurden erstmals bei GKSS neuartige Sputterquellen mit der Ultrahochvakuum-Technologie kombiniert, um dünne



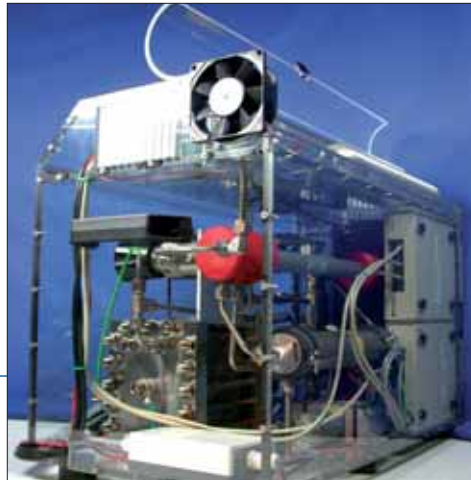
Von GKSS in Zusammenarbeit mit INCOATEC entwickeltes Viellagen-Schichtsystem für Röntgen Spiegel für die Röntgenfluoreszenz-Spektrometrie. Lanthan / Borcarbid, Dicke der Doppellagen ca. 10 nm.

1989 • Nanostrukturierte Materialien.

Schichten und Vielschichten mit sehr hoher Reinheit und extremer Dickenpräzision reproduzierbar herzustellen. Aufbauend auf einer systematischen Grundlagenforschung zur Bildung metastabiler Phasen in Schichtstrukturen gelang es 1995, nanostrukturierte Vielschichten für röntgenoptische Anwendungen zu produzieren. Neben der Nutzung als Röntgenspiegel in Röntgendiffraktometern eröffneten sich dabei ebenfalls Anwendungen in der Röntgenanalytik. Die Qualität der von GKSS hergestellten Röntgenspiegel spielte dabei eine entscheidende Rolle, da sie wesentlich die untere Grenze für die Nachweisbarkeit der Elemente bestimmt. Die technologisch interessanten Ergebnisse wurden patentiert und führten 2002 zur Gründung der Firma INCOATEC GmbH durch Mitarbeiter des GKSS-Forschungszentrums.

Seit 1996 konzentrieren sich die Arbeiten auf dem Gebiet der nanostrukturierten Werkstoffe zudem auf die Untersuchung von Leichtmetall-Hydriden für die Wasserstoffspeicherung, die als eine der zentralen Herausforderungen für eine zukünftige Wasserstofftechnik für mobile Anwendungen gilt (z. B. für Autos, Handys, Kameras usw.). Durch die Entwicklung von nanokristallinen Magnesium-Legierungen mit geeigneten Katalysatorzusätzen wurde ein Durchbruch bei der Wasserstoffaufnahme- wie bei der -abgabekinetik erzielt. Damit waren die Be- und Entladung des Wasserstoffspeichers nun innerhalb weniger Minuten möglich, wodurch Leichtmetallhydride auch für den technischen Einsatz interessant wurden.

Seit 2000 umfassen die Arbeiten bei GKSS auch nanostrukturierte Alkali-Aluminiumhydrid-Verbindungen sowie seit 2004 reaktive Hydrid-Bor-Komposite, die eine reversible Wasserstoffspeicherkapazität von bis zu 11 % ihres Gewichts aufweisen. Neben der Entwicklung neuartiger Speichermaterialien konzentriert sich GKSS auch auf die kostengünstige Produktion dieser Materialien sowie Bau und Test von Prototypentanks, um die Materialien praxisnah zu bewerten. Damit rückt die Vision einer emissionsfreien Wasserstofftechnik für mobile Anwendungen ein erhebliches Stück näher.



Im Rahmen des BMWI-InnoNet-Projekts "Mini-Ely" entstandener Miniatur-Elektrolyseur zur Befüllung von Metallhydridspeichern als Ladestation für portable Brennstoffzellen.

1956

60

70

80

90

00

2006

3.3 Membranen in der Trenn- und Umwelttechnik (seit 1999)

Membranen gehören zu den integralen Bestandteilen aller lebenden Organismen. Sie bilden wichtige Bausteine des Lebens, da sie Schadstoffe filtern und Informationen übertragen, den Energiehaushalt optimieren und Nährstoffe transportieren. Die Funktionsweise von Membranen basiert auf ihrer Fähigkeit, selektiv bestimmte Moleküle passieren zu lassen oder sie abzublocken und somit Trennungen zwischen erwünschten und unerwünschten Molekülen vorzunehmen. So können beispielsweise dünne Filme aus Silikongummi organische Dämpfe von Luft abtrennen, oder Ethanol aus Bioalkohol-Gemischen anreichern. Filme aus anderen Materialien können Salze aus Wasser entfernen, um Trinkwasser zu gewinnen. Damit stellen Membranen die Vorbilder für technische Verfahren in der Stofftrennung dar, die nicht nur preiswerter in der Herstellung als herkömmliche Verfahren sind, sondern ebenfalls erheblich umweltschonender.

1999 richtete GKSS – basierend auf den langjährigen Erfahrungen in der Entwicklung und dem Einsatz von Membranen zur Meerwasserentsalzung durch Umkehrosmose bzw. als Filter – den neuen Forschungsschwerpunkt Umweltfreundliche Trenn- und Verfahrenstechnik ein. Ziel war es, das breite Spektrum von der Grundlagenforschung bis hin zum in der Praxis anwendbaren Endprodukt unter folgenden Fragestellungen zu bearbeiten: Wie genau werden Stoffe durch Membranen hindurch transportiert? Welche Polymerwerkstoffe für Membranen können entwickelt werden? Wie wären Pilotanlagen zu konstruieren?

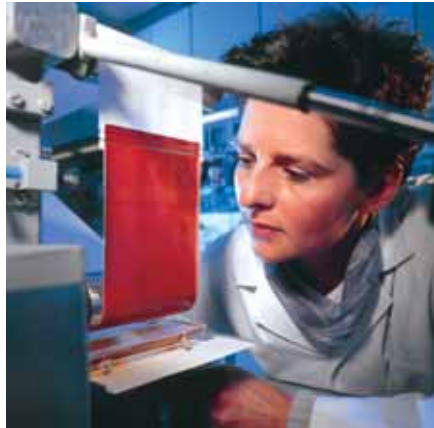
In diese Vorhaben von GKSS wurde gleichzeitig die Membranforschung des ehemaligen Forschungsinstituts der Akademie der Wissenschaften der



Anlage zur Benzindampfrückgewinnung an einem Tanklager der Aluminium Rheinfelden GmbH, heute Borsig MT.

1999 • Membranen für die Brennstoffzellentechnologie.

DDR in Teltow-Seehof eingebunden. Damit konnte das Spektrum der GKSS-Forschungsaktivitäten beträchtlich erweitert werden. Als besondere Beispiele kann man hier Membrananwendungen im Lifescience-Bereich und grundlegende Untersuchungen zu Transportmechanismen in Polymeren mittels Molecular Modelling nennen.



Die Forschungsergebnisse von GKSS auf dem Gebiet der Membranforschung wurden und werden häufig relativ schnell in industriell verwertbare Produkte und Prozesse umgesetzt. So sind sowohl Trennverfahren für Pharmaunternehmen (z. B. bei der Wirkstoffgewinnung) oder für die Medizintechnik (z. B. Hohlfasermembranen für künstliche Nieren) als auch für die Lebensmittelindustrie (z. B. zur Hydrierung von Speiseölen) sowie für die Petrochemie (z. B. bei der Benzindampfrückgewinnung in Tanklagern) aufgebaut worden bzw. werden weiterentwickelt.

Seit 1999 entwickelt GKSS ebenfalls Membranen für die Brennstoffzellentechnologie. Diese Arbeiten werden durch den Zusammenschluss verschiedener HGF-Zentren und Universitäten in einem von GKSS koordinierten Virtuellen Institut verstärkt. Membranen auf der Basis von Mischungen aus Polymeren mit organischen oder anorganischen Füllkörpern, intrinsisch mikroporösen Polymeren sowie Blockcopolymeren sind Neuentwicklungen von GKSS im Bereich der multi-funktionalen Werkstoffe.



oben: Membranherstellung im Labor-Maßstab.
unten: Prototyp einer Anlage zur Herstellung von Flachmembranen im industriellen Maßstab.

1956

60

70

80

90

00

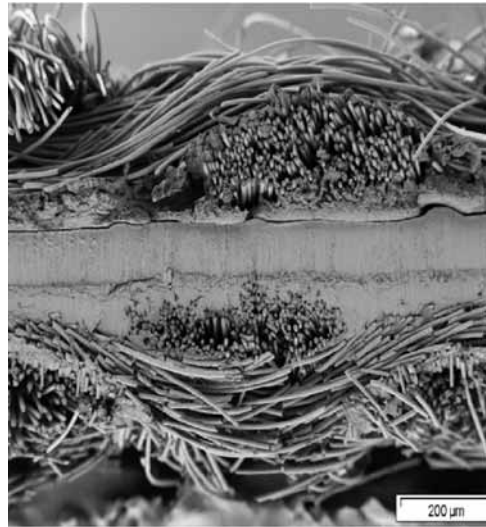
2006

3. Werkstoffmechanik und neue Materialien

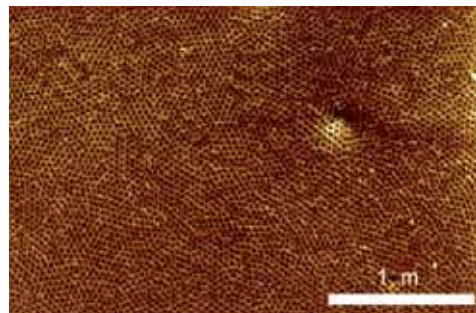
3.3 Membranen in der Trenn- und Umwelttechnik (seit 1999)

In den letzten Jahren wird darüber hinaus vermehrt der Einsatz von Membranen für Anwendungen in der Regenerativen Medizin erforscht. Neue Verarbeitungsmethoden wie das Elektrospinning wurden etabliert und erlauben den Zugang zu Fasern mit Durchmessern im Nanometerbereich, die neben der Funktionalisierung von Membranoberflächen auch für biomedizinische Anwendungen und für Multikomponentenwerkstoffe neue Perspektiven eröffnen.

Dank des hoch entwickelten Niveaus der Membrantechnologie wird ihr von Experten eine zukunftsweisende Bedeutung beigegeben.



Zu Beginn des 21. Jahrhunderts hält GKSS eine Spitzenposition in der Membranforschung und -entwicklung in Europa. Das kommt besonders in der großen Anzahl der von GKSS koordinierten europäischen Projekte auf dem Gebiet der Membranforschung zum Ausdruck.



oben: Membran-Elektroden-Einheit für die Brennstoffzelle.

unten links: Membranmodul, unten rechts: Rasterkraftmikroskopische Aufnahme einer Polystyrol-block-polyethylenoxid Zweiblockcopolymer-Membran. Polyethylenoxid bildet die dunklen Kanäle.

3.4 Biomaterialien für die Regenerative Medizin (seit 2002)

Der wachsenden Lebenserwartung der Bevölkerung und den großen Erfolgen bei der Behandlung vieler Erkrankungen in früheren Lebensaltern korrespondiert der Anteil altersbedingter Beschwerden und Gebrechen. Zu diesen zählen etwa degenerative Gelenkschädigungen, dauerhafte oder zeitweilige Organausfälle und Diabetes mit sämtlichen Folgeerscheinungen. Außer den genannten Gesundheitsbeeinträchtigungen erfordern aber beispielsweise auch Unfallverletzungen umfassende Organunterstützungssysteme. Um die benötigten Grundlagen für zukünftige regenerative Therapiemaßnahmen zu schaffen und die mit weit reichenden sozioökonomischen Konsequenzen verbundenen Herausforderungen des Gesundheitssystems zu erfüllen, werden die Anstrengungen der Gesundheitsforschung besonders in diesem Bereich auf internationaler Ebene derzeit erheblich intensiviert.

Seit 2002 sind die Forschungsarbeiten des Instituts für Polymerforschung von GKSS am Standort Teltow im Programm Regenerative Medizin in den Forschungsbereich Gesundheit der Helmholtz-Gemeinschaft eingebunden. Das Teltower Institut widmet sich der Biomaterialentwicklung, wobei die Kernkompetenz sowohl in der Entwicklung multifunktionaler Materialien als auch in deren Verarbeitung z. B. zu Fasern, Folien, Membranen und porösen Strukturen aus Lösung oder Schmelze liegt. Untersuchungen zur Interaktion der Materialien mit physiologischen Umgebungen vermitteln Aufschluss über die Bioverträglichkeit der Materialien und liefern Erkenntnisse, die den gezielten Aufbau von Geweben in Zukunft erlauben. Diese Entwicklung der Multifunktionalität von Polymeren ermöglichte erstmals, eine maßgeschneiderte Biomaterialentwicklung in Angriff zu nehmen. Denn diese Kunststoffe haben das Potenzial, in völlig neuartigen Produkten eingesetzt zu werden, vor allem innerhalb der Regenerativen Medizin.

Die Biomaterialentwicklung erfolgt in enger Zusammenarbeit mit anderen Forschungsinstituten, Kliniken und der Industrie. Das Institut für Polymerforschung in Teltow beteiligt sich dabei vor allem am Aufbau eines Translationszentrums zur Überführung der Forschungsergebnisse

3. Werkstoffmechanik und neue Materialien

3.4 Biomaterialien für die Regenerative Medizin (seit 2002)



FORSCHUNG MIT TRADITION: FORSCHUNGSSTANDORT TELTOW-SEEHOF

Als 1992 die Membranforschung des Institutes für Polymerenchemie Teltow-Seehof (bei Berlin) in das GKSS-Institut für Chemie integriert wurde, stieß eine über knapp drei Jahrzehnte gewachsene Forschungs-kompetenz zu GKSS hinzu.

Den Forschungsstandort Teltow-Seehof selbst gibt es seit 1921. Er war entstanden, als das Unternehmen „Vereinigte Glanzstoff-Fabrik“ (VGF) seine Forschungs- und Entwicklungsabteilung hierher verlegte, nachdem dessen Werk im Elsass in der Folge des I. Weltkriegs an Frankreich gefallen war. Die Forschungen an diesem privatwirtschaftlichen Institut, das in den Jahren 1923-1927 von dem renommierten Chemiker Dr. Emil Heuser geleitet wurde, richteten sich vor allem auf den Viskoseprozess, ein Verfahren zur Herstellung von Chemiefäden auf Cellulosebasis.

1928 ging die Aktienmehrheit an dem Institut an die niederländische „Allgemeine Kunstseiden-Union“ (AKU) über. Nach dem II. Weltkrieg in der Sowjetischen Besatzungszone liegend wurde die Einrichtung de facto enteignet. Im Rahmen der Wissenschaftsorganisation der DDR war dem bis dahin sehr spezialisierten Institut eine neue, weiter gefasste Funktion zugeordnet: die eines zentralen allgemeinen Chemiefaser-Instituts für die DDR. So wurde es 1949 als „Institut für Faserstoff-Forschung“ (IFF) unter dem Dach der „Akademie der Wissenschaften“ neu gegründet. Aufgrund ihrer unmittelbaren Relevanz für die Textilindustrie besaß die Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Chemiefasern in der DDR eine relativ hohe Förderpriorität und das IFF wurde in den 1950er und 1960er Jahren zu einem beachtlichen Forschungsinstitut ausgebaut. Nach dem wirtschafts- und wissenschaftspolitischen Kurswechsel von 1971 wurde die Kooperation zwischen IFF und

Chemiefaserindustrie stark intensiviert und gestaltete sich zunehmend straffer und verbindlicher.

1972 kam es zu einer tief greifenden Umstrukturierung, die eine Erweiterung der Forschungsfelder mit sich brachte und einen neuen Namen: Das IFF hieß jetzt Institut für Polymerenchemie (IPOC).

In den 1970er Jahren entwickelte sich das IPOC weiterhin erfolgreich und konnte die Themenpalette seiner Forschungen weiter verbreitern. Vor allem mit den Arbeiten zur Synthese und Charakterisierung von Polyelektrolyten, zur Chemie und Physik der Cellulose, zur Entwicklung von Membranen als Trennmateriale, zur Synthese von Adhäsiva und zur Emulsionspolymerisation wurde die Grundlage geschaffen, auf der das Institut nach der Wende seine Zukunftsfähigkeit unter Beweis stellen konnte.

Die 1980er Jahre waren am IPOC durch die Krise der DDR-Wirtschaft und das Ausbleiben nötiger Investitionen geprägt. Die technische Ausrüstung und das angesammelte Know-how waren dennoch 1989 auf einem so hohen Niveau, dass das Institut nach der Wiedervereinigung nicht wie viele andere „abgewickelt“, sondern nach der Begutachtung durch den deutschen Wissenschaftsrat als wertvolle Kapazität im Rahmen der nunmehr gesamtdeutschen chemischen Forschung bewertet wurde. Zur Jahreswende 1991/92 hörte das IPOC auf zu existieren. Der umfassende Umbau des Instituts hatte zur Erhaltung seiner Arbeitsgebiete eine Aufgliederung in mehrere Einzelinstitute notwendig gemacht, zu denen seit 1992 auch der Institutsteil Teltow-Seehof mit der Membranforschung des Institutes für Chemie im GKSS-Forschungszentrum Geesthacht gehörte.

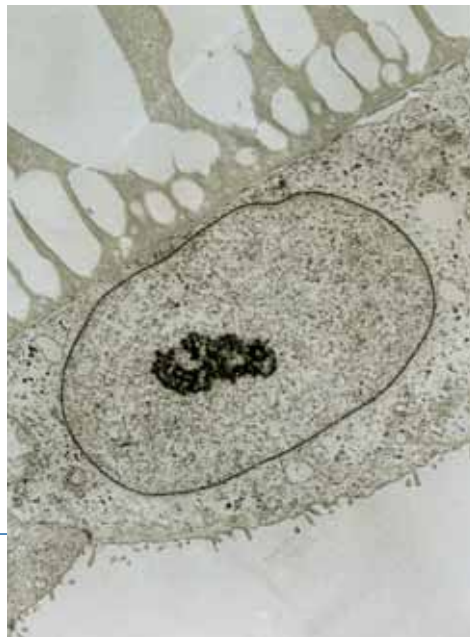
2006 • Einrichtung eines Zentrums für Biomaterialentwicklung am Standort Teltow.

1956

in Regenerative Therapien an der Charité in Berlin (BCRT) und ist Partner in der Regenerative Medizin Initiative Berlin-Brandenburg. Die in dieser Zusammenarbeit entstandenen Produkte erfüllen die hohen Anforderungen der Medizin, wie sich beim Ersatz geschädigter Gewebe und Organe mit Hilfe der Möglichkeiten des Tissue-Engineerings (Organ- und Gewebersatz) ebenso gezeigt hat wie bei leistungsfähigen Implantaten oder in der kontrollierten Wirkstofffreisetzung sowie in der minimalinvasiven Chirurgie (Knopflochchirurgie).

Die durch ihren innovativen Charakter und ihr hohes Anwendungspotenzial wegweisenden Arbeiten zur Entwicklung von Formgedächtnismaterialien (die sich dadurch auszeichnen, dass sie in Abhängigkeit von einem äußeren Reiz ihre Form ändern), bildeten die Basis für den Aufbau eines Zentrums für Biomaterialentwicklung am Standort Teltow. Hier wird beispielsweise intelligentes und auf Wärme reagierendes medizinisches Nahtmaterial entwickelt, das unter anderem in der Lage ist, sich selbst zum Knoten zu formen und eine definierte Spannung auf Wundränder auszuüben. Unter Nutzung derartiger stimuli-sensitiver Kunststoffe ist es ebenfalls möglich, sperrige Implantate durch kleine Öffnungen in den Körper zu transportieren, die dann an der gewünschten Stelle ihre vorgesehene Funktion entfalten können.

Wissenschaftler des Instituts für Polymerforschung und des MIT, Cambridge, USA, untersuchten ferner, ob und wie auch Licht das Formgedächtnis des Polymers auslösen kann. Durch die Einführung lichtempfindlicher Materialsysteme wurden die Anwendungsmöglichkeiten der Formgedächtniskunststoffe deutlich erweitert. So lassen sich beispielsweise intelligente Nahtmaterialien und Gefäßstützen (Stents) mit solchen Materialien realisieren. Aktuelle Forschungen zielen zudem darauf, Materialien zu entwickeln, die ihre Form unter Einfluss von magnetischen Feldern verändern.



Nierenepithel-Zellschicht auf einer Polyacrylnitril-Membran.

2006

3. Werkstoffmechanik und neue Materialien

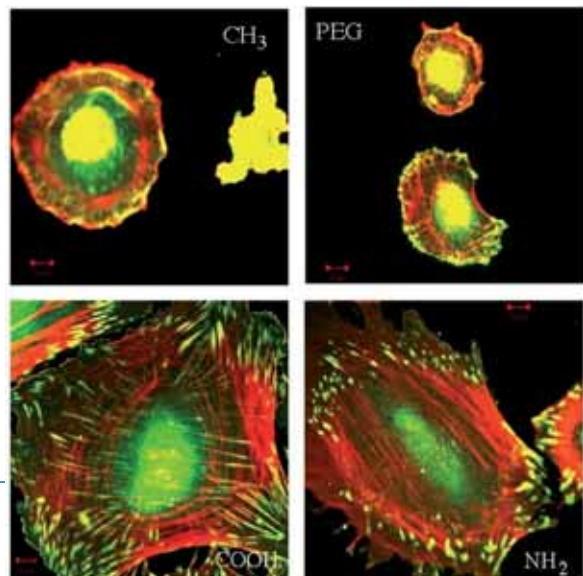
3.4 Biomaterialien für die Regenerative Medizin (seit 2002)

Auf dem Weg des Bio-Interface-Engineering stehen GKSS-Wissenschaftler vor zwei Herausforderungen: Zum einen gilt es, Zellfunktion und -vitalität zu erhalten, und zum anderen ist die jeweils erforderliche Zellteilung und -differenzierung über die integrierte kontrollierte Freisetzung bioaktiver Moleküle (wie Wachstumsfaktoren) und die physikalische Stimulation zu steuern. Darüber hinaus soll durch die Umsetzung biomimetischer Konzepte die weitere Annäherung von Scaffoldprodukten (Gerüststrukturen für das Zellwachstum) an die Funktionalität der jeweiligen natürlichen Zellumgebung (extrazellulären Matrix) verfolgt werden.

In Teltow werden zudem Bioreaktoren für grundlegende Untersuchungen außerhalb des jeweiligen Organismus (in vitro) entwickelt, hauptsächlich im Zusammenhang mit tierischen Stammzellen sowie Organunterstützungssystemen. Im Bereich des Gewebeersatzes werden unter besonderer Berücksichtigung von Stammzellentechnologien Anwendungen sowohl für strukturierten Knorpel und Muskeln als auch für die Haut erforscht. Ein Ziel besteht in der Entwicklung von Stammzelltherapien im Bereich der Ischämie (Durchblutungsstörung), das gemeinsam mit der Universitätsklinik Rostock verfolgt wird.

Außerdem bearbeiten die Teltower Wissenschaftler mit dem Deutschen Krebsforschungszentrum erfolgreich das Tissue Engineering künstlicher Haut. Die Herstellung künstlicher Haut und deren dauerhafte Verbindung mit dem menschlichen Gewebe verspricht aber auch Verbrennungsoptionen hoffnungsvolle Perspektiven, da eine Behandlung mit aus körpereigenen Zellen gebildetem Hautersatz erheblich vereinfacht und beschleunigt durchführbar ist.

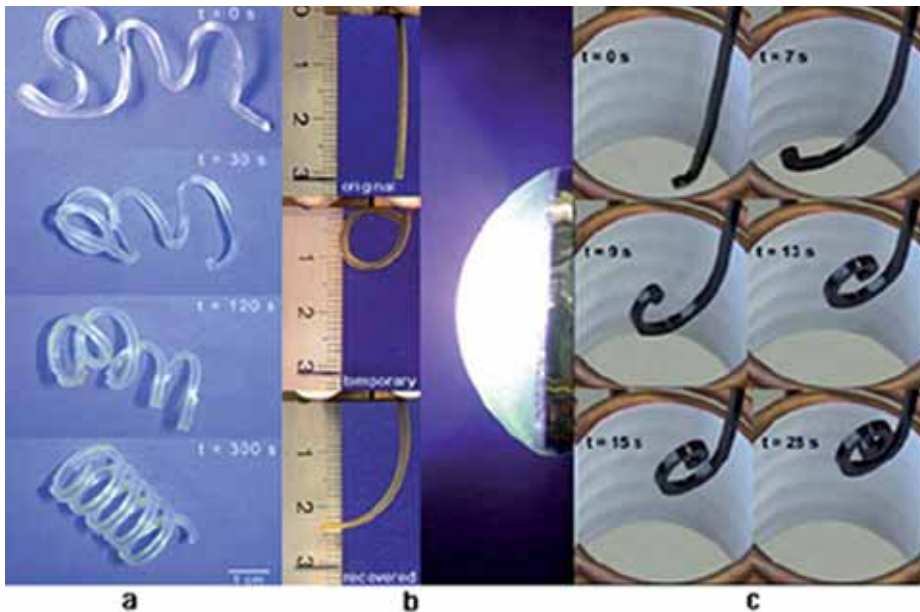
Die Integration neuerer Forschungen in der Materialwissenschaft und -technologie, der Nano- und



Rasterlasermikroskop-Aufnahmen von Humanfibroblasten (63fache Vergrößerung, Maßstab 10 Mikrometer).

2003 • Formgedächtniskunststoffe für medizinische Anwendungen.

Mikrotechnologie sowie in der Computerwissenschaft und Informationstechnologie, der Biotechnologie und Biophysik und des Tissue Engineering, der allgemeinen Medizinforschung und der Molekularbiologie hat zur Entwicklung eines neuen interdisziplinären Gebietes für Technologien und Produkte geführt. Dadurch wird die Lücke zwischen Lösungen der Natur und menschlicher Technologie mehr und mehr überbrückt. Diese Art der Verknüpfung verschiedener Technologien ist integraler Bestandteil der Helmholtz- Innovationsstrategie für das Gebiet Regenerative Medizin, welches signifikante Verbesserungen gegenwärtiger therapeutischer Ansätze erwarten lässt.



Formgedächtniskunststoffe entwickelt für medizinische Anwendungen, die durch unterschiedliche äußere Reize ihre Form ändern.

1956

60

70

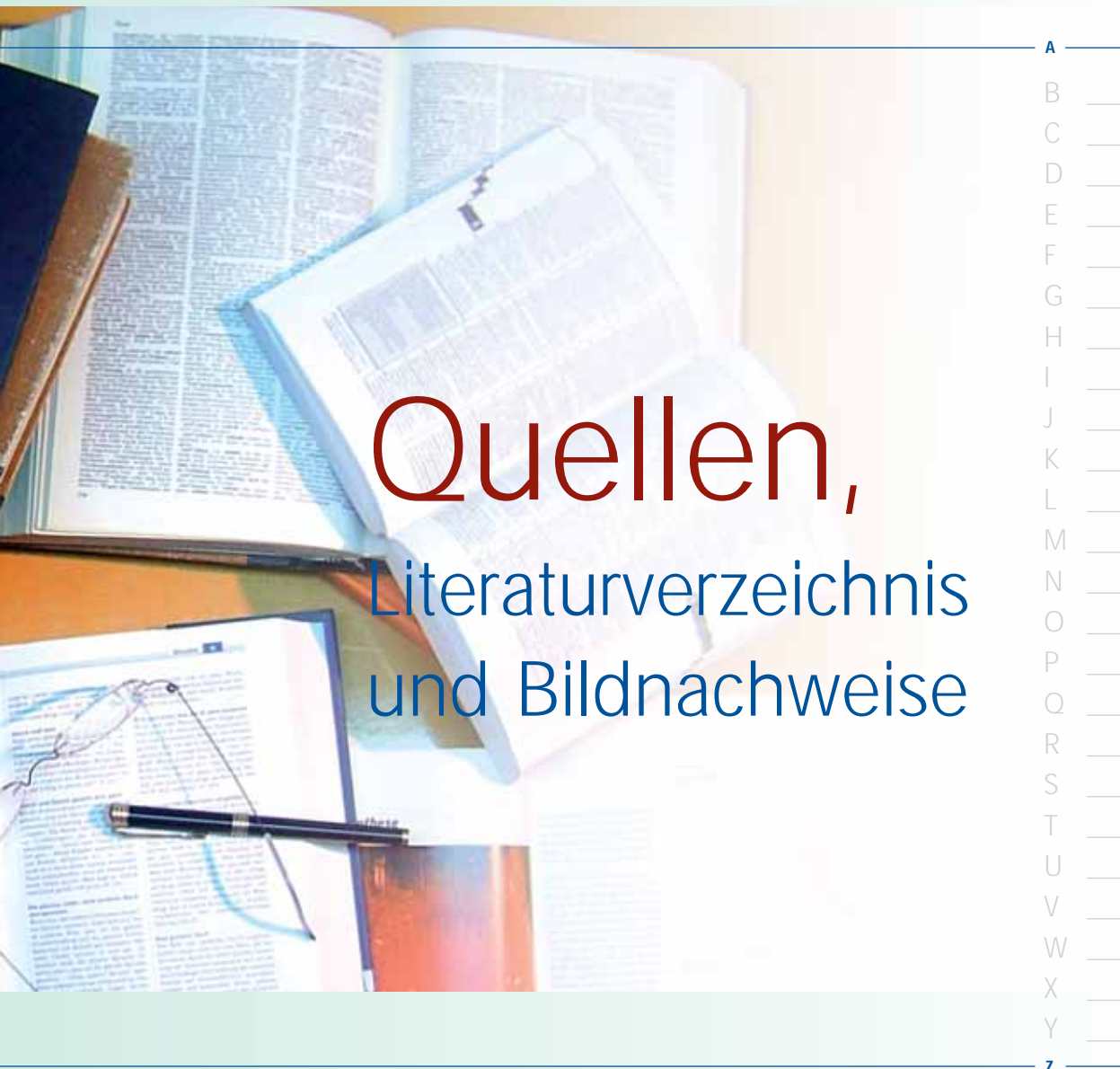
80

90

00

2006





Quellen, Literaturverzeichnis und Bildnachweise

- A
- B
- C
- D
- E
- F
- G
- H
- I
- J
- K
- L
- M
- N
- O
- P
- Q
- R
- S
- T
- U
- V
- W
- X
- Y
- Z

- Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen: Großforschung in der Bundesrepublik Deutschland, Bonn 1993.
- Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen: Handbuch der Großforschung, Bonn 1985-1995.
- Bittner, Karsten: NS Otto Hahn. Vor 20 Jahren beendete das einzige deutsche atomgetriebene Schiff seine letzte Reise, in: Deutsche Schifffahrt Bd. 21 (1999), S. 5-9.
- Boehart, William u. Wolf Rüdiger Busch (Hrsg.): Ein Traum ohne Ende. Beiträge über das Leben und Wirken Alfred Bernhard Nobels aus dem Jubiläumsjahr 2001 in Geesthacht, Münster 2004.
- Dube, Norbert: Die öffentliche Meinung zur Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland: 1955-1986; eine Dokumentation, Berlin 1988.
- Engelhardt, Wolfgang: Beharrlich in kleinen Schritten. 50 Jahre Natur- und Umweltschutz in Deutschland, Berlin 2002.
- Fanger, Hans-Ulrich u.a.: Schwermetalle in der Elbe und ihre Bilanzierung, Geesthacht 1991.
- Fanger, Hans-Ulrich u.a.: Wasser- und Schwebstofftransport im Sylt-Römö-Wattenmeer, Geesthacht o. J. (MS).
- Gerlach, Walther: Otto Hahn. Ein Forscherleben in unserer Zeit, Stuttgart 1984.
- Gruber, Karl: Der Krümmel. Die erste Dynamit-Fabrik Alfred Nobels, Geesthacht 1999.
- GKSS-Forschungszentrum: 25 Jahre GKSS, Geesthacht 1981.
- GKSS-Forschungszentrum: 40 Jahre GKSS, in: Unter Uns, GKSS-Mitarbeitermagazin 3/1996, Beilage, Geesthacht 1996.
- GKSS-Forschungszentrum: Abschlussbericht zum Forschungsschwerpunkt Unterwassertechnik, zusammengestellt und bearbeit v. Hans-Jürgen Deeg, Geesthacht 2004.
- GKSS-Forschungszentrum: Ästuarforschung am Beispiel der Tidelbe, Geesthacht o. J.
- GKSS-Forschungszentrum: Jahresbericht, Geesthacht 1970-2005.
- GKSS-Forschungszentrum: NS Otto Hahn – Erstes deutsches Kernergieschiff, Geesthacht 1981.
- GKSS-Forschungszentrum: Protokolle über die Sitzung des Aufsichtsrates der Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt m.b.H., Geesthacht 1956-1970 (MS).
- GKSS-Forschungszentrum: Protokolle über die Sitzung des wissenschaftlich-technischen Beirats der Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt m.b.H., Geesthacht 1956-1970 (MS).
- Hahn, Dietrich (Hrsg.): Otto Hahn. Leben und Werk in Texten und Bildern, Frankfurt a. M. 1988.
- Hohensee, Jens: Der erste Ölpreisschock 1973/74. Die politischen und gesellschaftlichen Auswirkungen der arabischen Erdölpolitik auf die Bundesrepublik Deutschland und Westeuropa, Stuttgart 1996. [=Historische Mitteilungen, Beiheft17].
- Jäger, Helmut: Einführung in die Umweltgeschichte, Darmstadt 1994.
- Justo, Luciene Fernandes: Die Geschichte der GKSS von 1968 bis 1984 als Beitrag zur Geschichte der Großforschung in der Bundesrepublik Deutschland, Abschlussbericht, Geesthacht o. J. [2001] (MS).

Quellen und weiterführende Literatur.

Justo, Luciene Fernandes: Großforschung im Kontext. Die GKSS und ihre forschungspolitischen Ziele in den siebziger Jahren, in: Antworten auf die amerikanische Herausforderung. Forschung in der Bundesrepublik und der DDR in den "langen" siebziger Jahren, hrsg. v. Gerhard A. Ritter, Frankfurt a. M. u. New York 1999, S. 163-187.

Kaysser, Wolfgang A.: Großforschung im gesellschaftlichen Wandel. Festrede, gehalten am 11.02.2005 an der Technischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, o.O. [Geesthacht] 2005 (MS).

Kernergieschiff NS Otto Hahn, Hamburg o. J. [1969].

Löffler, Theodor: Meerwasserentsalzung, Stuttgart 1990.

Müller, Wolfgang D.: Die Geschichte der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland, Stuttgart 1990.

Mutert, Susanne: Großforschung zwischen staatlicher Politik und Anwendungsinteresse der Industrie (1969-1984), Frankfurt a. M. 2000.

Radkau, Joachim: Aufstieg und Krise der deutschen Atomwirtschaft 1945-1975, Reinbek bei Hamburg 1983.

Renneberg, Monika: Gründung und Aufbau des GKSS-Forschungszentrums Geesthacht. Ein Beitrag zur Geschichte der Großforschungseinrichtungen in der Bundesrepublik Deutschland, Frankfurt a. M./ New York 1980. [=Studien zur Geschichte der deutsche Großforschungseinrichtungen, Bd. 7].

Ritter, Gerhard Albert: Großforschung und Staat in Deutschland. Ein historischer Überblick, München 1992.

Samhaber, Wolfgang M.: Erfahrungen und Anwendungspotential der Nanofiltration, in: VDI Wissensforum. Membrantechnik in der Prozessindustrie, Seminar 415003, 20.-21. September 2005, Berlin. [<http://www.vdiwissensforum.de/fileadmin/pdf/415003.pdf>].

Schnier, C. u. Hans-Ulrich Fanger: Development and application of an iridium tracer for tracking tailings in the central Red Sea, Geesthacht 1983.

Simonis, Udo E.: Wasserpolitik. Handlungsstrategien für eine nachhaltige Wasserversorgung, Berlin o. J. [http://www.berlininstitut.org/pdfs/Simonis_Wasserpolitik.pdf].

Stettler, Niklaus: Die Zukunft der 50er und 60er Jahre. Zukunftsvorstellungen und Technikutopien in wissenschaftlicher und populärwissenschaftlicher Literatur 1950 bis 1968, Basel 1993 (MS).

Stiftung Naturschutz: Natur im Sinn. Beiträge zur Geschichte, Essen 2001. [=Veröffentlichungen der Stiftung Naturschutzgeschichte, Bd. 2].

Szöllösi-Janze, Margit: Großforschung in Deutschland, Frankfurt am Main 1990.

Tode, Sven: Chronik des Hahn-Meitner-Instituts in Berlin, Hamburg 2005.

Trischler, Helmut: Hoffnungsträger oder Sorgenkind der Forschungspolitik? Die bundesdeutsche Großforschung in den „langen“ siebziger Jahren, in: Dahlemer Archivgespräche, Bd. 5 (1999), S. 200-214.

Weil, Leopold: Charakterisierung der Risiken der Kernenergienutzung, Aachen 2003.

Weinberg, Alvin Martin: Probleme der Großforschung, Frankfurt a. M. 1970.

Witthöft, Hans Jürgen: Energie aus der Nordsee, Herford 1979.

World Health Organization and United Nations Children's Fund (Hrsg.): Meeting the MDG Drinking Water and Sanitation Target. A Mid-Term Assessment of Progress, New York u.a. 2004.

A

B

C

D

E

F

G

H

I

J

K

L

M

N

O

P

Q

R

S

T

U

V

W

X

Y

Z

- Seite 17: Klaus F. Kallmorgen, Hamburg im Auftrag der Studiengesellschaft zur Förderung der Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt
- Seite 19 unten: Archiv Bergedorfer Schloss
- Seite 23 unten: Nordmark Film, Kiel
- Seite 24: www.ohg-marktredwitz.de
- Seite 29: Fotografie Geisler
- Seite 30: Fotografie Geisler
- Seite 36: Prof. Dr.Dr.-Ing. habil. Karl W. Böddeker, Glinde
- Seite 47: Dittmer Oceanographic Instruments
- Seite 55: www.photolib.noaa.gov/historic/nws/wea00800.htm
- Seite 60: ACCESS e.V., Aachen
- Seite 62: Fotografie Geisler
- Seite 63: Fotografie Geisler
- Seite 65: Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co. KG
- Seite 67: ACCESS e.V., Aachen
- Seite 70: Institut für Angewandte Physik, Universität Kiel
- Seite 72: Fraunhofer ISE, Freiburg
- Seite 74: Aluminium Rheinfelden GmbH, heute Borsig MT

Alle übrigen GKSS

U4