



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

NACHRICHTEN



Jahrgang 39 • 3/2007

Technologietransfer

**Im Inhaltsverzeichnis verwendete
Abkürzungen:**

IHM	Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik
IMF	Institut für Materialforschung
IMK	Institut für Meteorologie und Klimaforschung
IPE	Institut für Prozess- datenverarbeitung und Elektronik
ITC	Institut für Technische Chemie
ITP	Institut für Technische Physik
MAP	Stabsabteilung Marketing, Patente und Lizenzen
NANOMIKRO	Programm Nano- und Mikrosysteme

Herausgeber:

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640 · 76021 Karlsruhe
Telefon 07247 82-0

Redaktion:

Dr. Joachim Hoffmann

Redaktionsbeirat:

Prof. Dr. K. Beheng, IMK
Dr. W. Breitung, IKET
Prof. Dr. E. Dinjus, ITC-CPV
Dr. K. Gompper, INE
Dr. G. Metzger, FTU
Prof. Dr. M. Noe, ITP
Dr. W. Pfleging, IMF-I
Prof. Dr. V. Saile, IMT (Vorsitzender)
Dr. K.-F. Weibezahn, IMB

Layout, Grafik und Satz:

Stolz Grafisches Atelier · Karlsruhe

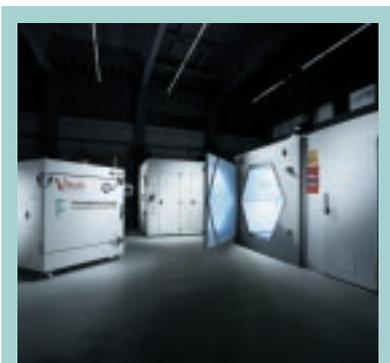
Druck:

Wilhelm Stober GmbH · Eggenstein

Nachdruck mit Genehmigung des
Forschungszentrums Karlsruhe GmbH
unter Nennung der Gesellschaft und
des Autors gestattet. Beleg erbeten.

Die NACHRICHTEN
können kostenlos über die
Hauptabteilung Bibliothek und Medien
des Forschungszentrums bezogen
werden.

Printed in the Federal Republic of
Germany



Im Mikrowellen-Versuchszentrum des
Forschungszentrums Karlsruhe steht
auch die weltweit größte Mikrowellen-
prozessanlage HEPHAISTOS-CA3.
Hier werden unter anderem kohlefa-
serverstärkte Leichtbaukomposit-
strukturen für den Flugzeug- und Fahr-
zeugbau entwickelt.

Inhalt / Contents

- **Technologietransfer im Forschungszentrum Karlsruhe – aus kleinen Ideen große Werte schaffen** 151

Technology Transfer at the Forschungszentrum Karlsruhe – Creating Big Values from Small Things

J. Fahrenberg, MAP

The scientific basis of innovations results from a variety of research and development (R&D) projects at the institutes of the Research Center. Apart from gaining knowledge, however, it is aimed at transferring market-relevant research results to innovative products and services of industry. A number of services and funding options are offered by the Forschungszentrum to support this process. A key instrument is the so-called technology transfer (TT) project that shall be presented in this issue by way of examples. In the past years, such projects gave rise to various innovations in industry, which is reflected among others by the Forschungszentrum's income from royalties.

- **Karlsruher Elektroporationsanlage KEA – Die Erfolgsgeschichte eines Technologietransfers in die Industrie** 153

Electroporation Device KEA, a Successful Technology Transfer in Industry

G. Müller, W. Frey, M. Sack, C. Schultheiss, IHM; H.-G. Mayer, MAP; J. Sigler, Staatliches Weinbauinstitut Freiburg; M. Kern, KEA-TEC GmbH, Waghäusel; U. Günther, Beckers Bester GmbH & Co., Eislebener Fruchtsaft oHG, Eisleben

A device for electroporation of fruit mash has been developed and tested successfully with respect to technical and economical means in an apple juice press house over a period of one year (poration of 20,000 tons mash). The patented physical procedure increases the yield of juice by 5–7 %. Experiments are also carried out with wine berries and hint to an interesting alternative to common procedures like must fermentation and -heating. Finally, electroporation of biological tissue turns out to meet the interest of many places in agriculture.

- **HEPHAISTOS – Energieeffizienz und Innovation durch Mikrowellentechnik für die industrielle Produktion von polymeren Verbundwerkstoffen** 159

HEPHAISTOS – Energy Efficiency and Innovation by Microwave Technology for the Industrial Production of Polymers and Reinforced Plastics

L. Feher, S. Stanculovic, J. Akhtar, V. Nuss, T. Seitz, C. Zöller, S. Layer, J. Dittrich, IHM

High mobility and resources consumption today characterize a global, export-oriented economy. Increasing scarcity of resources and energy, however, will influence the cost structure of products, services, locations, and mobility. Provident, innovative developments give rise to new, resources-efficient production processes, systems, and materials. For some years now, innovative approaches have been pursued by to opening up energy-efficient applications with microwaves by technology transfer to industry. By this work, an innovative modular microwave system line HEPHAISTOS with very homogeneous field distributions has been developed. Several industrial installations have been realized and taken into service at the new HEPHAISTOS-Experimental Centre (HEC) to develop highly efficient sophisticated processes actually targeted at avionic CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastics) structures.

■ Anwendungen zur Feuchteüberwachung mit TAUPE-Sensoren

163

Applications of Moisture Monitoring Using TAUPE-sensors

F. Königer, IMK; R. Schuhmann, ITC, H.-G. Mayer, MAP; M. Stacheder, A. Rohleder, Universität Karlsruhe

TAUPE as a moisture sensor has been developed in cooperation with Technology Transfer Division in Forschungszentrum Karlsruhe since 1996. These sensors can be used to monitor moisture in a variety of materials, using time domain or frequency domain techniques. Major applications are large area supervision of landfill sealings, determination of the snow water equivalent, e. g. in the project SNOWPOWER for the forecasting of the amount of water for energy production in storage lakes and, as a new project, continuous monitoring of groundwater level in the flood plane of river Rhine.

■ Gips als nachwachsender Rohstoff

169

Gypsum as Renewable Resource

M. Schwotzer, ITC; G. Dehne, GEOTEKT GbR; A. Gerdes, ITC und HS-Karlsruhe

Natural resources of high-quality gypsum, the raw material for production of industrial plasters, become more and more depleted and are furthermore heavily accessible. Thus, a method was developed in a co-operation with the plaster industry. The project aimed at a technical acceleration of the usually long-term geological transformation process of low-quality, anhydrite-rich rocks into higher quality resources of gypsum. The results of both, laboratory and large-scale experiments are expected to permit an application of anhydrite-rich raw materials for the production of gypsum plasters in medium-term.

■ Magnettechnologie für μl bis m^3 – Anwendungsbeispiele von Magnetseparatorentwicklungen aus dem ITC-WGT

173

Magnet Technology from μl up to m^3 – Application Examples of Magnetic Separators Developed at the ITC-WGT

M. Franzreb, ITC

Magnet technology offers the unique property of manipulating and selectively separating magnetic particles down to the and sometimes even below micrometer size. On the one hand, particles of this kind are encountered in large volumes, e. g. in the steel, car or mineral industry, but also in the chemical industry, for example in the form of suspended catalysts. On the other hand, magnetic microparticles play an important role in many bioanalytical and diagnostic assays, where they are often suspended in volumes of a few μl only. Despite the large differences in volume, the basic principles of magnetic separation are common to all these applications and widely explored by several technology transfer projects.

■ **Ein einfaches und kostengünstiges Verfahren zur Dioxinabscheidung – von den Grundlagen zur technischen Anwendung**

179

A Simple and Economical Technology for the Separation of Dioxins – from the Basics to Technical Application

S. Kreis, H. Hunsinger, ITC

Plastics, such as polypropylene (PP) are widely used as construction materials in wet scrubbers because of their excellent corrosion resistance and low price. Unfortunately PP has the property to interact with dioxins in a temperature depending absorption/desorption equilibrium, which causes the so called “memory effect”. The authors report about the development and the technical application of an innovative material for removing toxic dioxins from combustion gases. The so-called ADIOX[®]-material consists of PP filled with fine grained carbon particles. Meanwhile ADIOX[®] has been installed successfully in more than fifty full-scale incineration lines in Europe and North America.

■ **Neuartige reaktionsgesinterte Keramiken zur Herstellung von vollkeramischem Zahnersatz**

185

Novel Reaction-sintered Ceramics for the Fabrication of All-ceramic Dentures

J. R. Binder, N. Schlechtriemen, E. Günther, H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, J. Haußelt, IMF;
A. Bodenmiller, E. Klose, E. Knorpp, KaVo Dental GmbH;
G. Heydecke, J. R. Strub, Universitätsklinikum Freiburg, Abteilung für Zahnärztliche Prothetik

Ceramic materials are increasingly gaining in importance in a variety of technical applications. During the manufacturing of ceramic components, one of the main issues is sintering shrinkage because of its impact on precision and reproducibility. A reaction sintering process developed at the Forschungszentrum Karlsruhe allows the fabrication of net-shape ceramics where the sintering shrinkage is completely compensated by the volume increase during oxidation of intermetallic compounds. In cooperation with KaVo Dental GmbH, a shrinkage-free zircon ceramic was developed for use in dentistry. From the beginning, this development was supported by in vitro and in vivo studies at the university hospital in Freiburg.

■ **Messsysteme (Molche) zur Detektion von Rissen und Korrosion in Pipelines**

190

Measuring System for Detection of Defects in Pipelines

M. Balzer, A. Herth, N. Flatinger, H. Stripf, H. Widmann, IPE; A. Hugger, PII Pipetronix GmbH

The Forschungszentrum Karlsruhe and the PII Pipetronix company jointly developed inspection robots, so called pigs, which scan pipelines for defects like corrosion or tiny cracks. The amount of sensor data gathered during the inspection of a pipeline of 250 kilometre length is about 15 000 TBytes, at a rate of up to 67 GByte/s. As there is no communication to the outside world, this amount of data has to be filtered, reduced and compressed by a factor of 150 000 to store it on a robust storage device. To solve this requirements a massive parallel multiprocessing system with signalprocessors and programmable gate arrays was developed. The programs of this computer system contain the most recent techniques of pattern recognition for storing only information which is indicative of defects in the pipeline.

■ **Entwicklung von NMR-Spektrometern – eine TT-Erfolgsstory**

197

NMR Spectrometer Development – a Tale of Technology Transfer Success

M. Kläser, Th. Schneider, ITP

AIDS, Alzheimer's, BSE and SARS affect the entire global population. Overcoming these diseases is the subject of research throughout the world. Proteins play a central role in these illnesses and the determination of their structure is essential for the successful conquering of the disease. High resolution NMR-spectroscopy is a method of determining the spatial structure and dynamics of biological macro-molecules. The effectiveness of this technique depends crucially on the sensitivity of the measurement, and therefore the strength of the applied magnetic field. In this article we discuss the development of high resolution NMR spectrometers within the framework of technology transfer projects.

■ **Sensolute GmbH – Technologietransfer durch ein neuartiges Ausgründungsmodell**

204

Sensolute GmbH – Technology Transfer Through a New Type of Spin-off

G. Müller, IPE

Through Sensolute GmbH scientists of the Forschungszentrum Karlsruhe bring the results of their research and development to the market. Sensolute's mission is to produce and market miniature vibration sensors for a vast range of commercial applications in technical products. The miniature vibration sensor is used to detect movement or the absence thereof. This function can be valuably implemented for battery operated devices in order to contribute to energy efficiency. For instance, bike computers with integrated miniature vibration sensors are automatically switched on when the bicycle is set in motion and off as soon as no motion is detected for a predefined time lag, in order to save battery power and extend the battery lifetime.

■ **Vom Forscher zum Unternehmer**

207

From Researcher to Entrepreneur

K. Balster, ADMEDES Schuessler GmbH

ADMEDES Schuessler GmbH is a world wide leading OEM stent manufacturer, predominantly in the area of Nitinol self expanding stents and has set standards worldwide regarding Nitinol micro-machining and the surface quality of Nitinol components. Dr. Andreas Schuessler, President and CEO of Admedes Schuessler GmbH brings a rich background of academic science and practical experience to the company he founded eleven years ago. Much of the activities during his work as group leader laser materials processing at the Institute of Materials Research I at the Forschungszentrum Karlsruhe in the early and mid 90's focused in the area of laser micro machining of Nitinol materials. In the time since, he has been a part of the commercialization of many successful devices available today. In 1999 he was honored by the German Federal President Roman Herzog in the course of the initiative "Mutige Unternehmer braucht das Land" and just recently he was nominated finalist for the award "Entrepreneur des Jahres 2007" offered by Ernst & Young.

■ Forum Industrie und Forschung (FIF)

209

Forum Research and Industry (FIF)

Th. Schaller, NANOMIKRO

The road between research and industry must be faster, said Angela Merkel, the Chancellor of the Federal Republic of Germany in her speech at the Jubilee celebration of 50 years of the Forschungszentrum Karlsruhe. The Forum Research and Industry (FIF) is an initiative of the Forschungszentrum Karlsruhe improving knowledge and technology transfer in the fields of microsystem technology and nanotechnology. Since 1999 FIF has offered its member firms interdisciplinary advice and technological services. As a research and development partner for every size of business, from start ups to large concerns, FIF combines reliable cooperation with fast and straightforward communication and will provide, in analogy with the metaphor of the Federal Chancellor, a “fast track” between research and industry.

■ Innovation durch Nanotechnik

211

Innovation by Nanotechnology

R. Hedderich, NanoMat

NanoMat is a supraregional network for nanotechnology materials, comprised of major research facilities, universities and companies (e.g. Evonik, BASF, Merck, Sustech, Robert Bosch and BMW in Germany, Poland and Switzerland. The research issue which links NanoMat members is the synthesis and investigation of nanostructured materials, and the applications resulting from their nanoscale nature. NanoMat is taking a leading role in the questions associated with the sustainable development of nanotechnology. Within the network, the abilities of the partners are interlinked, so that projects can be carried out in a continuous and interdisciplinary way from the preliminary research stage through the transfer into economically viable products.

Technologietransfer im Forschungszentrum Karlsruhe – aus kleinen Ideen große Werte schaffen

J. Fahrenberg, MAP

Die wissenschaftliche Basis für Innovationen wird in vielfältigen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FuE) in den Instituten des Forschungszentrums erarbeitet. Neben dem reinen Erkenntnisgewinn gilt die Verpflichtung auch der Umsetzung marktrelevanter Forschungsergebnisse in innovative Produkte und Dienstleistungen in der Wirtschaft. Um diesen Prozess ganzheitlich zu unterstützen, werden im Forschungszentrum verschiedene Dienstleistungen und Fördermöglichkeiten angeboten. Ein zentrales Instrument sind die sogenannten Technologietransfer-(TT)-Projekte, die in dieser Ausgabe exemplarisch für den Bereich Technologietransfer dargestellt werden. Über diese Projekte wurden in den vergangenen Jahren vielfältige Innovationen in der Wirtschaft ermöglicht, was sich unter anderem in den Lizenznahmen des Forschungszentrums widerspiegelt.

Der Technologietransfer im Forschungszentrum Karlsruhe hat eine lange Tradition. So gab es bereits im Gründungsjahr 1956 erste Vorgänge und Schutzrechtsanmeldungen im Patentbereich. Auf Basis des alleinstellenden Know-hows und bestehender Patente aus den verschiedenen Forschungsbereichen wurden über die Jahre bis heute über 150 Millionen Euro reine Lizenznahmen erzielt. Den Höhepunkt erreichten die Einnahmen in den Jahren 1980 bis 1990 auf Basis des kerntechnischen Know-hows.

Mit Unterstützung dieser Einnahmen wurde in dieser Zeit eine eigene Abteilung gegründet, die den Auftrag hatte, den Technologietransfer im Forschungszentrum

gezielt zu fördern: die Stabsabteilung Technologietransfer (TT). Als ein strategischer Grundbaustein der Abteilung wurde ein TT-Programm konzipiert, mit dem ein Teil der eingehenden Lizenznahmen aus einem eigens dafür geschaffenen Transfer-Fonds in Kooperation mit der Industrie – und auch deren Beteiligung – in neue aussichtsreiche Entwicklungsprojekte investiert wurde. Diese Risikoteilung kommt beiden Partnern zugute und ist als eine Art „Generationenvertrag“ bis heute ein Erfolgsmodell – erfolgreiche alte Projekte finanzieren neue Ideen und die wiederum ihre Nachfolger. So wurden bis heute über 300 Projekte finanziell unterstützt.

Der zunächst stark auf Patent- und Lizenzfragen fokussierte Technologietransfer hat sich immer neuen Herausforderungen gegenübergesehen. Die zunehmende Globalisierung, die steigende Innovationsgeschwindigkeit und der vermehrte Wettbewerb um Forschungsfördermittel, aber vor allem der Verlust des „Quasimonopols“ im kerntechnischen Bereich haben eine Weiterentwicklung des Transfermodells erforderlich gemacht. Mit dem Grundgedanken, den Innovationsprozess durchgängig von der Erfindungsmeldung über Marketingmaßnahmen, Industriekooperationen bis hin zur Unternehmensgründung zu begleiten, wurden im Jahr 2002 die am Innovationsprozess beteiligten Strukturen in einer neuen Stabsabteilung Marketing Patente und Lizenzen (MAP) zusammengeführt.

Den Instituten, die durch ihre wissenschaftlich-technischen Leistungen die Basis einer jeden Innovation schaffen, stehen die unter-

stützenden Serviceleistungen nun in einer Abteilung gebündelt zur Verfügung. Das Angebot reicht von der Beratung der Erfinder und der Ausarbeitung und Anmeldung von Patenten, über die Unterstützung der Wissenschaftler bei der Partnersuche und Darstellung der Forschungsergebnisse auf Messen, in Broschüren und im Internet, bis hin zur Erstellung und Verhandlung von Lizenzverträgen sowie der kompetenten Beratung und Begleitung von Ausgründungsprojekten – immer flankiert von der Möglichkeit, bei Bedarf die Mittel des Transfer-Fonds zweckgebunden einzusetzen.

Unter anderem von der zunehmenden Bedeutung von Unternehmensgründungen motiviert, wurde 2004 das Thema Public Private Partnership aufgegriffen. Da es bereits zu diesem Zeitpunkt eine regionale Kooperation im Bereich Technologietransfer u. a. mit der Universität Karlsruhe (TH) und der Hochschule Karlsruhe gegeben hat, wurde vereinbart, dieses wichtige Thema gemeinsam anzugehen und externe Kompetenzen im Bereich Business Development für den gemeinsamen Nutzen systematisch zu erschließen und einzubeziehen. Aus dieser strategischen Überlegung heraus wurde der Prozess der TechnologieScreenings entwickelt, d. h. das gemeinsam mit privaten Partnern durchgeführte Identifizieren, Bewerten und Weiterentwickeln aussichtsreicher Technologien, Verfahren und Geschäftsideen. Die zur Wissenschaft komplementäre wirtschaftliche Denkweise der Partner sowie der Zugang zu privaten Investoren haben hier einen neuen und ergänzenden Mehrwert in die Arbeiten

eingebraucht und das bisherige TT-Modell weiter auf internationales Niveau angehoben. Erste Beispiele bestätigen diese eingeschlagene Strategie.

Der Technologietransfer steht nun vor einer neuen Herausforderung der Etablierung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) mit den Schwerpunkten Forschung, Lehre und Innovation gemeinsam mit der Universität Karlsruhe (TH). Beide Partner zählen in verschiedensten Bereichen bereits jetzt zu führenden Innovationspartnern der Wirtschaft. Im Rahmen des KIT soll diese Rolle nun weiter strategisch und auf internationalem Niveau ausgebaut werden. Dies soll sich mittelfristig auch in einer substantiellen Steigerung der relevanten Innovationskennzahlen widerspiegeln. Basis für dieses Vorhaben ist zum einen die Nutzung des durch den Zusammenschluss entstehenden herausragenden Innovationspotenzials im natur- und ingenieurwissenschaftlichen Bereich, zum anderen wiederum die Bereitstellung bzw. Weiterentwicklung unterstützender Instrumente und Serviceleistungen im Bereich des Technologietransfers.

Die gegenwärtigen zentralen Servicestrukturen beider Partner mit all ihren Erfahrungen werden dazu mittelfristig in einer neuen Stabsabteilung „Innovation“ zusammengeführt und mit einem gemeinsam definierten und umfassenden



Abb. 1: Aus kleinen Dingen große Werte schaffen – ein Beispiel für gelungenen Technologietransfer: Das Unternehmen microworks GmbH, eine Ausgründung aus dem Forschungszentrum, vertreibt unter anderem Mikrozahnräder aus Hartgold für die Uhrenindustrie.

Leistungsangebot alle Institute des KIT in ihrem Innovationsbestreben unterstützen.

Ein Element, dem auch diese Ausgabe der Nachrichten gewidmet ist, wird auf jeden Fall auch mit KIT erhalten bleiben: die Möglichkeit, auch außerhalb der Institutshaushalte in pfiffige Ideen und „kleine Pflänzchen“ investieren zu können, um diese dann zum Wohl der Einrichtung, der beteiligten Personen und auch des Wirtschafts-

standorts Deutschland wachsen und gedeihen zu sehen. Dass dies funktioniert wird Ihnen in den folgenden Beiträgen vor Augen geführt und soll dadurch auch noch einmal die Bedeutung und Motivation für das Technologietransfer-Programm unterstreichen.

Karlsruher Elektroporationsanlage KEA – Die Erfolgsgeschichte eines Technologietransfers in die Industrie

G. Müller, W. Frey, M. Sack, C. Schultheiss, IHM; H.-G. Mayer, MAP; J. Sigler, Staatliches Weinbauinstitut Freiburg; M. Kern, KEA-TEC GmbH, Waghäusel; U. Günther, Beckers Bester GmbH & Co., Eislebener Fruchtsaft oHG, Eisleben

Einleitung

Die Extraktionen wertgebender flüssiger Inhaltsstoffe aus pflanzlichen Zellen erfordert das Öffnen der Zellmembrane. Der durch mechanische Mühlen erreichbare Zellaufschlussgrad reicht oftmals nicht für eine optimale Extraktion der Inhaltsstoffe aus. Für den Zellaufschluss werden auch zusätzlich thermische und/oder enzymatische Zellaufschlussverfahren eingesetzt. Damit sind das Erhitzen der Maische auf ca. 80 °C und der Einsatz von Enzymen gemeint. Diese Standardverfahren haben einen mehr oder weniger negativen Einfluss auf Produktionskosten, Energieverbrauch, Geschmack und Ernährungsphysiologie.

Eine echte Alternative zu den oben genannten Verfahren ist die Maischeporation, bei der Spannungsimpulse an die Maische abgegeben werden. Hierbei handelt es sich um ein physikalisch wirkendes Zellaufschlussverfahren, das nicht nur die Nachteile der beschriebenen Standardverfahren vermeidet, sondern eine zusätzliche Steigerung der Saftausbeute und wertgebender Inhaltsstoffe hervorruft.

Historie, Wirkprinzip

Die Elektroporation ist Gegenstand von Arbeiten an Universitäten und landwirtschaftlichen Forschungsstellen wie dem Forschungszentrum Karlsruhe, der Technischen Universität Berlin, dem DIL Quakenbrück, der Universität Hohenheim, der Forschungsanstalt Geisenheim und der Universität Hamburg Harburg. Ziel der Arbeiten ist die wissenschaftliche Untersuchung der Elektroporation am Bei-

spiel verschiedener Früchte wie zum Beispiel Hackfrüchte, Karotten, Rüben, Obst, Äpfel und Beeren eingeschlossen Weinbeeren. Es wurden in Zusammenarbeit mit der Lebensmittelindustrie auch Förderprogramme in Anspruch genommen, die die industrielle Umsetzbarkeit dieses Verfahrens zeigen sollten. Im Rahmen einer solchen Ausschreibung wurde das Forschungszentrum Karlsruhe kontaktiert, seine Kompetenz bezüglich des Baus und des Betriebs von elektrischen Pulsgeneratoren (Marxgenerator) einzubringen. Es erwies sich sehr schnell, dass die Marxgeneratortechnologie, wie sie ursprünglich für die FRANKA-Anlagen (Fragmentieren von Gestein, Keramik und Glas durch Unterwasser-Funkenentladungen) entwickelt wurde, ein Vehikel ist, um industrielle Mengen von biologischem Material zu porieren. Gemeint sind Durchsätze pro Anlage von ein bis zehn Tonnen Maische oder Früchte in der Stunde, mit der Option solche Anlagen auch zur Massedurchsatzhöhung zu bündeln, wie es zum Beispiel in der Zuckerindustrie in Erwägung gezogen wird [1, 2]. Über das weite Feld der mögliche Applikationen ist bereits im Magazin „Nachrichten“ des Forschungszentrums Karlsruhe vom Mai 2003 berichtet worden [3], so dass hier im Wesentlichen nur von den neu hinzugekommenen Verfahren, Technologien und Aspekten berichtet werden soll.

Zum elektrophysikalischen Wirkprinzip der Porenbildung gibt es folgende Modellvorstellung: Die 5–7 nm dicke Zellmembran wird als Isolator betrachtet. Die äußere Suspension und das Cytoplasma im

Zellinneren dagegen besitzen eine vergleichsweise hohe elektrische Leitfähigkeit, so dass sich beim Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes die Potenzialdifferenz entlang der Zelle in die Membran verlagert. Die Feldstärken an der Zellmembran sind enorm und bewegen sich im Bereich von 2×10^6 Volt/cm [4, 5]. Aufgrund der Kraftwirkung des elektrischen Feldes kommt es bei genügend hoher Membranspannung zur Porenbildung [6]. Es zeigt sich, dass die Potenzialdifferenz ΔV_M ca. 1 V über der Membran betragen muss. Wird die Potenzialdifferenz über der Membran genügend lange aufrechterhalten nimmt der Durchmesser der Pore soweit zu, dass laut Modellrechnungen ein kritischer Durchmesser von 36 nm überschritten wird. An diesem Punkt kann sich die Pore nicht mehr alleine verschließen. Die Poren bleiben dauerhaft offen und es findet ein Konzentrationsaustausch der Inhaltsstoffe mit dem umgebenden Medium statt – man spricht vom Zellaufschluss.

Anlagentechnik

KEA-Anlagen bestehen aus einem Pulserzeuger und einem Zellaufschlussreaktor (KEA: Karlsruher Elektroporationsanlage). Als Pulserzeuger werden Marxgeneratoren eingesetzt, die im Prinzip aus einer Anzahl elektrischer Kondensatoren bestehen (bei KEA sechs Stück), die im schnellen Takt (20 Hz) parallel aufgeladen (auf 50 kV) und dann seriell in den mit Elektroden versehenen Zellaufschlussreaktor entladen werden (300 kV-Pulse). In Abb. 1 ist die mobile Anlage KEA-Wein zu sehen, deren Mobilität es erlaubt in den

Produktionsstätten der Lebensmittelindustrie eingesetzt zu werden. Insbesondere wurde diese Anlage gebaut, um bei Winzern und Winzergenossenschaften an Ort und Stelle Beerenmaische zu porieren (s. Kapitel „Poration von Weinbeerenmaische“).

In Abb. 2 ist schließlich die stationäre Version der Maischeporationsanlage der Firma KEA-TEC abgebildet, wie sie seit Anfang 2006 in der Apfelsaftindustrie eingesetzt wird und über die im Folgenden ausführlich berichtet wird. Die Integration einer Porationsanlage in bestehende Keltereien ist einfach, da sie an beliebiger Stelle zwischen Mühle und Bandpresse bzw. Dekanter in die maischeführende Rohrleitung eingebaut werden kann.

Maischen aus unterschiedlichen Früchten und Gemüse sind aufgrund ihrer Konsistenz oftmals



Abb. 1: Mobile Maischeporationsanlage KEA-Wein.

schwierig mit Fördertechnik zu bewegen und zu verarbeiten, zumal die Förderleistung meist hoch sein muss. Aus diesem Grund ist bei den industriellen KEA-Anlagen ein ausreichend dimensionierter Leitungs- und Reaktorquerschnitt vor-

gesehen, der bei Fließgeschwindigkeiten von ca. 30 cm/s Durchsätze von bis zu 10 t/h erlaubt. Bei einer Anschlussleistung des Marxgenerators von typisch 20 kW wird die Maische im Mittel sechsmal mit 300kV/6kA-Pulsen beaufschlagt. Daraus errechnet sich die spezifische Energie zu 4–5 kJ/kg bzw. 1,5 kWh pro Tonne Apfelsmaische. Die Maische erwärmt sich dabei nur um ca. 1 K.



Abb. 2: Maischeporationsanlage KEA-Apfel der KEA-TEC GmbH; Durchsatz 10 t/h.

Technologische Vorteile der Maischeporation und Vermarktungsfähigkeit der Saftprodukte

Die in Vorversuchen bei verschiedensten Früchten ermittelten Vorteile der Elektroporation sind der verbesserte Zugang zum Saftinhalt der Frucht, der ohne Zugabe von membranwirksamen Zusatzstoffen (Enzymen etc.) erfolgt. Dabei tritt keine thermische Schädigung der Zellmatrix auf, die unter Umständen zu Kochgeschmack führen kann. Die subjektive Geschmacksverbesserung, sowie

analytische Messungen weisen oft auf eine verbesserte Extraktion von werthaltigen Inhaltsstoffen hin. Messungen haben auch gezeigt, dass die Entsaftung zu einer reduzierten Restfeuchte im Trester führt und bei Vermeidung von Enzymzugaben selbst der Trester noch zur Pektinherstellung verwendet werden kann.

Die wichtigsten Kriterien dieser neuen Technologie sind Verbrauchersicherheit und die Vermarktungsfähigkeit der erzeugten Saftprodukte. Ein vom Forschungsbereich der Ernährungsindustrie e. V. (FEI) finanziertes Forschungsvorhaben zeigte, dass die über physikalisch/chemische und sensorische Analysen ermittelten Inhaltsstoffkonzentrationen im porierten Apfelsaft normal sind und der Saft als uneingeschränkt verkehrsfähig eingestuft werden kann.

Betriebserfahrung mit der Maischeporation in der Apfelsaftindustrie

Der Einsatz der mobilen Porationanlage KEA-WEIN des Forschungszentrums (s. Abb.1) zeigt, dass der druckbeaufschlagte

Strom von Apfelmatsche mit 10 t/h durch die Anlage gefahren und sukzessive der Pulsgenerator zugeschaltet werden konnte. Anschließend wurden zwei große Experimente gefahren, wobei jeweils 20 bis 30 t Apfelmatsche ohne, und eine jeweils gleiche Menge mit eingeschalteter Bepulung durch die Anlage gefördert wurden.

Dabei wurde streng darauf geachtet, dass erstens es sich um identische Rohware handelt, d. h. gleicher Lieferant, gleiche Sorten und Erntezeitpunkt, gleiches Lieferdatum, zweitens identische Einstellung der Maschinen und Anlagen gewährleistet war, drittens, um Messfehler auszuschließen, die Rohware gewogen wurde, und Saftmengen in dem gleichen Tank mit Standanzeige ermittelt wurden (keine elektronische Mengemessung), viertens Batchgrößen zwischen 25 und 30 t je Testfahrt betragen, und schließlich fünftens eine fachliche Versuchsüberwachung während der Kampagnen gewährleistet war. Das eine Experiment wurde mit frischen Äpfeln, das andere mit Lagerware durchgeführt, die meist reif bis überreif war. In beiden Fällen wurde ein

Anstieg der Direktsaftausbeute von fünf bis sieben Prozent ermittelt.

Die daraufhin installierte stationäre Anlage KEA-Apfel (s. Abb.2) ist seit Anfang 2006 ununterbrochen in einer Produktionslinie eingesetzt. In Tab. 1 sind Experimente aufgelistet, die im Laufe des Jahres mit dieser Anlage durchgeführt wurden. Auffallend ist, dass die Erstsftausbeute an wertigem, naturtrüben Direktsaft in allen Fällen stabil um fünf bis sieben Prozent erhöht ist.

Aus den Ergebnissen von Tab. 1 lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Ausbeutesteigerung bei der wertgebenden Erstpressung erhöht sich stabil um 5–7%.
- Der Feuchtigkeitsgehalt des Tresters ist reduziert. Damit reduzieren sich auch die unvermeidlichen Trocknungskosten für die Herstellung von Tierfutter.
- Die Viskositätsreduktion der porierten Maische führt auch zur Erhöhung Durchsatzleis-

Experiment vom:	16.03.2006		05.04.2006		05.04.2006		13.03.2007		Mittelwerte	
Poration	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja
Energieeintrag [kJ/kg]	0	6	0	3,5	0	4	0	3,8	0	4,3
Menge Rohware [kg]	28.880	28.930	30.940	21.950	25.490	24.680	28.510	28.490	28.455	26.013
Menge Erstsft [l]	21.500	23.500	14.600	11.620	18.200	18.350	21.300	22.700	18.900	19.043
Menge Zweftsft [l]	10.000	10.200	15.000	11.400	11.000	12.200			12.000	11.267
Erstsftausbeute l/kg	74,5 %	81,2 %	47,2 %	52,9 %	71,4 %	74,4 %	74,7 %	79,7 %	66,4 %	73,2 %
Zweftsftausbeute l/kg	16,1 %	15,3 %	29,5 %	28,2 %	16,0 %	19,4 %			20,5 %	21,0 %
Gesamtausbeute l/kg	90,5 %	96,6 %	76,7 %	81,1 %	87,4 %	93,8 %			84,9 %	90,5 %

Tab. 1: Ergebnisse der Poration von Apfelmatsche bei 10 m³/h Durchsatz.

tion, da der Saft bei der Pressung besser abfließt.

- Der Saft zeigt keinerlei qualitative Beeinflussung.
- Durch die Installation von KEA-Äpfel ergeben sich insgesamt geringere Betriebskosten und ein geringerer technologischer Aufwand (z. B. durch das verbesserte Fließverhalten des Saftes).

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Herstellung von Äpfeldirektsaft

Es wurde eine Wirtschaftlichkeitsrechnung zur Herstellung von naturtrübem Äpfeldirektsaft aus der 10 t/h Maischeverarbeitung auf Basis eines einjährigen Anlagenbetriebs erstellt:

Während einer Betriebsdauer von einem Jahr (2000 Stunden) wurden 20.000 t Maische poriert. Bei einer Ausbeuteerhöhung von fünf Pro-

zent wurden zusätzlich 1000 t Saft produziert, bzw. bei einem Erlös von geschätzt 0,18 € pro Liter ergibt sich ein jährlicher Mehrertrag von 180.000 €. Andererseits treten bei einer Nutzungsdauer von geschätzt 7 Jahren und einem Zinssatz von 5 % jährliche Fixkosten in Höhe von 42.000 € auf, zu denen noch variable Kosten (Strom, Wasser etc.) von 7.000 € hinzukommen, sodass ein Nettogewinn von 130.000 € verbleibt. Rein rechnerisch sind die Investitionskosten von 180.000 € nach 1,5 Jahren amortisiert. Nicht gerechnet sind Einsparungen bei der Trocknung des feuchtigkeitsreduzierten Tresters.

Poration von Weinbeerenmaische

Der Aufschluss von Zellen durch Zellporation ist ein in der Weinbereitung völlig neuartiges Verfahren der Trauben- und Maischebehandlung. Bei der Bereitung von

Rotmost ist je nach Rebsorte eine Farbextraktion ggf. ohne Erhitzung innerhalb weniger Stunden möglich. Im Unterschied zu den etablierten Verfahren der Rotweinbereitung ist die Maischeporation gekennzeichnet durch nicht-thermisch-wässrige Extraktionsbedingungen. Bei optimalen Bedingungen ist ein signifikanter Unterschied zwischen dem solchermäßen hergestellten Rotwein und der durch Maischeerhitzung bereiteten Kontrollvariante analytisch wie sensorisch kaum festzustellen (Tab.2). Damit werden auch Ansatzpunkte gesehen, im Vergleich zur Maischeerhitzung Energiekosten einzusparen. Im Vorfeld der herkömmlichen Maischegärung erlaubt die unterstützende durchgeführte Maischeporation einen effizienteren Zellaufschluss und damit kürzere Maischekontaktzeiten.

In der Weißweinbereitung von gewichtigem Interesse ist die Freisetzung von Aromastoffen oder deren Vorstufen, vor allem aus den

	Most			Wein						
	Mostgewicht [°Oe]	Gerbstoffe [g/l]	Gesamtsäure [g/l]	Alkohol [g/l]	Gesamtsäure [g/l]	freie SO ₂ [mg/l]	gesamte SO ₂ [mg/l]	Gerbstoffe [mg/l]	Farbintensität	Qualitätszahl **
Kontrolle (ME*)	96,5	2,8	8,3	98,5	4,7	48	131	2,1	2,47	2,17
Maischeporation	96,0	2,3	6,9	104,2	4,1	51	121	2,0	2,33	2,15

*) Maischeerhitzung
 **) Blindverkostung durch 48 fachkundige Personen (Kellermeister etc.). Beide Varianten sind gleichrangig: 23 Mal wurde die Zellporation auf Rang 1 gesetzt, 25 Mal die Kontrolle.

Tab. 2: Maischeporation zur Rotweinbereitung (Spätburgunder Rotwein).

Beerenhäuten. Die Maischeporation erbringt eine deutliche Steigerung. Überlange Maischestandzeiten können damit ebenso entfallen wie eine zusätzliche Enzymbehandlung

Vorteile sind außerdem gegeben im Hinblick auf die Vermeidung der Untypischen Alterungsnote (UTA). Bei entsprechend kritischem Lesegut haben Versuche mit zellporierter Maische gezeigt und 50 Prüfer in vergleichender Verkostung bestätigt, dass infolge verbesserter Extraktion ein signifikanter Qualitätsvorsprung gegenüber den Kontrollvarianten beobachtet werden kann (Tab. 3). Bemerkenswert ist auch der deutlich höhere Kalium-Wert der maischeporierten Variante, was auf einen sehr effektiven Aufschluss hinweist.

Dieses „Maischeporation“ genannte Verfahren eignet sich so-

wohl als Alternative zur Maischerhitzung bei der Rotweinerzeugung als auch zur Unterstützung der Maischegärung sowie zur Gewinnung von Weißmost. Neben verfahrenstechnischen Vorteilen wie verringerten Stand- und Verarbeitungszeiten, ggf. auch geringeren Energiekosten, lässt das bislang nicht zugelassene Verfahren einen effizienteren Aufschluss der Beeren sowie eine verbesserte Weinqualität erwarten.

Ausblick

Die Entwicklung der KEA-Technologie am IHM, die Förderung und die Vermarktungsstrategie durch die Stabsabteilung MAP und schließlich die industrielle Umsetzung der Methode durch den industriellen Kooperationspartner KEA-TEC hat diese Technologie auf einen erfolgreichen Weg ge-

bracht. Mit der Erstellung einer ersten großen Anlage und der einjährigen Bewährungsprobe ist ein Anfang gemacht worden, dem weitere Anwendungen folgen sollen.

Der Poration von Frucht- und Gemüsemaischen wird große Aufmerksamkeit geschenkt. Die Untersuchungen erstrecken sich auch auf ganze Hackfrüchte, die durch ein drehendes Förderrad in ein Wasserbad transportiert und dort poriert werden. Hintergrund sind Energiekosteneinsparungen, die anstelle einer thermischen von einer „kalten“ Extraktion von Inhaltsstoffen erwartet werden.

Zusammenfassung

Am IHM wurde in Zusammenarbeit mit unserem Lizenznehmer eine Anlage zur Elektroporation bzw. Zellporation von Fruchtmaischen entwickelt, die nach einjähriger

	Most (vorgeklärt)			Wein					
	Mostgewicht [°Oe]	Gesamtsäure [g/l]	Gerbstoffe [g/l]	Alkohol [g/l]	Gesamtsäure [g/l]	Gesamt SO ₂ [mg/l]	Gerbstoffe [g/l]	Kalium [mg/l]	Rangziffer**
Vergleich (GTP*)	82	11,1	0,22	99,0	6,7	85	0,26	498	2,3
Kontrolle (Maische gepumpt)	77	9,2	0,33	96,2	6,7	83	0,33	585	2,5
Maischeporation (Maische gepumpt)	79	8,6	0,57	98,9	6,8	92	0,38	776	1,3

*) Ganztraubenpressung
 **) Von den meisten Prüfern muss Rang 1 für die maischeporierte Variante vergeben worden sein

Tab.3: Maischeporation zur Weißweinerzeugung (Riesling).

Bewährungsprobe in einer Apfelsaftkellerei in technischer und ökonomischer Hinsicht alle Erwartungen erfüllt hat. Mit Hilfe schnell repetierender hoher elektrischer Felder wird in einem patentierten Verfahren biologisches Zellgewebe effektiver geöffnet und auf diese Weise mit höherer Ausbeute (5–7 %) entsaftet.

Dies war nur mit der Entwicklung von speziellen Hochspannungs-

pulsanlagen hoher Leistung und Durchflussreaktoren möglich, die eine kontinuierliche Zellporation gestatten. Dabei wird die Maische mit bis zu 20-mal pro Sekunde einem Mikrosekunden langen elektrischen Puls von ca. 300 kV und 6 kA ausgesetzt. Die Maische erwärmt sich dadurch im Schnitt um wenige Kelvin, weswegen das Verfahren als nicht-thermisches bezeichnet werden kann. Es gelingt

meist eine bessere Entsaftung und eine effektivere Gewinnung wertvoller Inhaltsstoffe der Früchte, wie das auch in einer Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Weinbauinstitut in Freiburg für die Weinbeerenmaischen gezeigt werden konnte.

Literatur

- [1] C. Schultheiss, H. Bluhm, H.-G. Mayer, M. Kern, T. Michelberger, G. Witte, *Plasma Science, IEEE Transactionson, Vol. 30 Issue 4, 1547–1551, 2002*
- [2] M. Sack, C. Schultheiss, H. Bluhm, *IEEE Trans. Industry Applications, 2005, pp. 725–733*
- [3] H. Bluhm, W. Frey, C. Gusbeth, M. Sack, C. Schultheiss, *Nachrichten Forschungszentrum Karlsruhe, Jahrg. 35, S. 105-110, Karlsruhe,3/2003*
- [4] J.C. Weaver, Yu.A. Chizmadzhev, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics Vol. 41, 135–160, 1996*
- [5] R.P. Joshi, K.H. Schoenbach, *Phys. Rev. Vol. 62, No.1,1025–1033, 2000*
- [6] J.C. Neu, W. Krassowska, *Phys. Rev. E, Vol. 59, No. 3, 1999, 3471–3482*

HEPHAISTOS – Energieeffizienz und Innovation durch Mikrowellentechnik für die industrielle Produktion von polymeren Verbundwerkstoffen

L. Feher, S. Stanculovic, J. Akhtar, V. Nuss, T. Seitz, C. Zöller, S. Layer, J. Dittrich, IHM

Einleitung

Hohe Mobilität und Ressourcenverbrauch kennzeichnen heute ein global exportorientiertes Wirtschaftssystem. Die zunehmende Verknappung von Ressourcen und Energie wird konsequenten Einfluss auf die Kostenstruktur von Produkten, Dienstleistungen, Standorten und die Mobilität an sich nehmen. Durch vorausschauende, innovationsfördernde Entwicklungen können neue ressourceneffizientere Fertigungsverfahren, Systeme und auch Materialien entwickelt werden. Neue innovative Wege werden seit einigen Jahren am KIT (Karlsruhe Institut of Technology, Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik IHM, am Forschungszentrum Karlsruhe) beschritten um mit Mikrowellen energieeffiziente Anwendungsfelder durch Technologietransfer für die Industrie zu erschließen. Mikrowellen sind heute schon in verschiedenen technischen Anwendungsformen zu einem selbstverständlichen Bestandteil des modernen Lebens geworden (z. B. Küchenmikrowelle). Im Vergleich zu konventionellen Erwärmungsverfahren haben Mikrowellen ganz besondere Vorteile.

Die Erzeugung sehr gleichmäßiger, homogener Felder war bislang ein Kernproblem der Mikrowellenprozesstechnik und für viele industrielle Anwendungen unverzichtbare Voraussetzung. Dieses Problem wurde schon 1997 in Grundlagenuntersuchungen am Forschungszentrum Karlsruhe gelöst sowie patentiert. Es zeigte sich, dass eine hexagonale Geometrie des Mikrowellenapplikators unter bestimmten Voraussetzun-

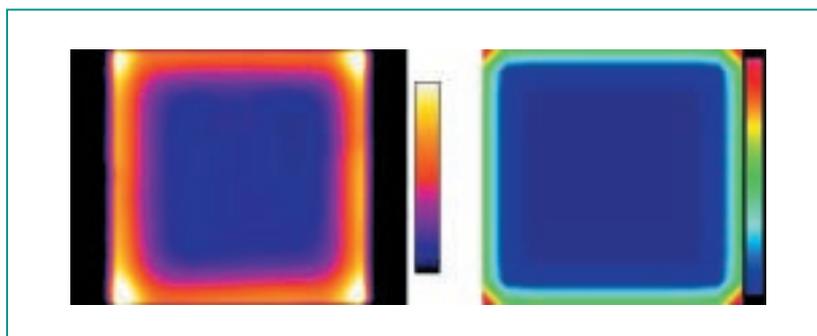


Abb. 1: Vergleich Simulation und Experiment einer beginnenden Mikrowellenerwärmung von CFK.

gen ideal zur Homogenisierung der Mikrowellenfelder ist. Ein weiterer entscheidender Schritt für diese technischen Entwicklungen war auch die Berechnung von Temperaturantworten von Materialien in elektromagnetischen Feldern. Um diese komplexe Thematik behandeln und verstehen zu können, war die Entwicklung verschiedener numerischer Simulationsmethoden [1] entscheidend (Abb. 1). Es konnte analytisch und numerisch vorhergesagt werden, dass z. B. bei kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffen (CFK) Prozessfelder für die Aushärtung mit verschwindenden thermischen Gradienten erzeugt werden können (Abb. 2).

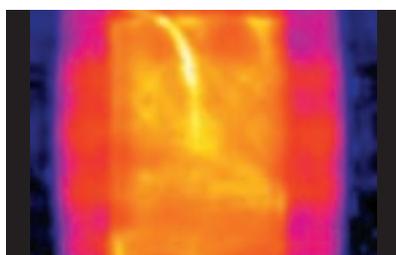


Abb. 2: Thermografie einer CFK-Platte im stationären Zustand – nur das regelnde Thermoelement hebt sich leicht von der gleichmäßigen Hintergrundtemperatur der Platte unter dem Aufbau ab.

Für diesen industriellen Anwendungsfall wurde eine modulare Mikrowellensystemlinie HEPHAISTOS [2] mit exzellenten homogenen Feldverteilungen entwickelt. HEPHAISTOS steht für: High Electromagnetic Power Heating Autoclaveless Injected Structures Oven System und verweist damit auf die zukünftige zeit- und energieeffiziente Ersatzmöglichkeit für die Autoklavtechnologie (Thermische Öfen, die unter sehr hohen Druck gesetzt werden). Übrigens, schon in der antiken Welt war Hephaistos zuständig für die Metall- und Ofenverarbeitung. Er ist identisch mit Daedalus, der mit dem bekannten „ersten mythologischen Flug“ und den berühmten „geleiteten Flügeln“ zu tun hat.

Die Idee zunehmender Ressourcenschonung für Flugzeuge, Autos und Windkraftanlagen

Diese Problematik, der sich schon Daedalus und Ikarus stellten, ist für die Luftfahrtforschung hochaktuell, insbesondere seitdem man Flugzeuge und Tragflächenteile zunehmend aus synthetischen Leichtbaumaterialien baut [3]. Dabei ist die Frage des richtigen „Leims“

oder besser Kunststoff für Flügel natürlich von „tragender“ Bedeutung [4]. Bei Metallen ist nach ca. 80 Jahren intensiver technischer Entwicklung das Potenzial für zusätzlich verbesserten Leichtbau absehbar ausgeschöpft. Bei kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffen (CFK) ist dagegen die Entwicklung im vollen Gange. Aufgrund ihrer geringen Dichte von $1,55 \text{ g/cm}^3$ gegenüber Aluminium mit $2,8 \text{ g/cm}^3$ sind diese Werkstoffe für den Leichtbau besonders gut geeignet.

Derzeitige Flugzeuge bestehen im Wesentlichen noch aus Metall. Beim Airbus A320 beträgt der Gewichtsanteil von Faserverbundwerkstoffen immerhin schon 15 %. Während in jedem A380 noch rund 60 % Aluminium und 22 % CFK stecken, soll der CFK-Anteil beim neuen Langstreckenflugzeug A350 XWB auf 52 %, vergleichbar mit der neuen 787 von Boeing steigen. Duroplastische CFK-Verbundwerkstoffe werden heute noch in schweren Industrieöfen bei hohem Druck, den besagten Autoklaven ausgehärtet. Die international patentierten HEPHAISTOS-Systeme arbeiten dagegen grundsätzlich ohne zusätzlichen Druck und erwärmen dabei trägheitslos nur das Bauteil selber (selektive Heizung) – die Ofenumgebung wird nicht mehr aktiv geheizt woraus sich eine erhebliche Energieeinsparung ergibt [5]. Für die HEPHAISTOS-Systeme sind zudem neuartige hocheffiziente Antennensysteme entwickelt worden, mit denen fast die gesamte erzeugte Mikrowellenleistung verlustfrei in die Ofenmodule eingekoppelt werden kann [6, 7]. Im Weiteren wirken die Mikrowellen volumetrisch, d. h. ohne Wär-

meileitung dringt die Mikrowelle in das zu erwärmende Material ein und hinterlässt sofort einen Heizeintrag im Inneren. Damit kann bei einem geringen Energieverbrauch eine hohe Heizrate in dem Bauteil direkt durch die Mikrowelle erzeugt werden. Zudem erschließen sich synergetisch neu entwickelte kostengünstigere Verfahren der Luftfahrtforschung in Kombination mit der HEPHAISTOS-Technologie, um polymere Harze als „Leim“ zwischen trockene Kohlefasern zu injizieren. Wie Untersuchungen der EADS zeigten, „klebt“ der mikrowellengehärtete „Leim“ besser zwischen den Fasern als durch die Prozessierung in thermischen Öfen. Dieses äußert sich zum Beispiel in einer Verbesserung des ILS-Wertes (Interlaminary Shear Strength), der die Härte des Materials als auch die Anbindung der Harzmatrix mit den Fasern charakterisiert (Abb. 3). Die Materialien halten höhere Belastungen aus.

Was nun im Flugzeug Gewicht einspart, kann auch dazu dienen, Automobile leichter zu machen. In der Formel 1 z. B. wird CFK in vergleichbarer Weise wie in der Luftfahrt eingesetzt – für den breiten Einsatz von Verbundwerkstoffen im Automobilbereich, wo nicht nur auf synthetische Kohlefasern gesetzt wird, sondern auch Naturfasern wie Flachs und Sisal für Fahrzeugverkleidungen zunehmend eingesetzt werden, bestehen ähnliche Einsatz- und Einsparmöglichkeiten durch Mikrowellentechnik. Neben den technologischen Industrieentwicklungen bis zu industriellen Großsystemen werden mit anderen KIT-Instituten des Forschungszentrums Karlsruhe und zahlreichen bedeutenden Industrieunternehmen im Rahmen eines BMBF-Projektes Grundlagen und Anwendungen erforscht, um bessere und schnellere Aushärtungen von Harzen durch spezifische mikrowellensensitive Materialien und Nano-Partikel [8] zu er-

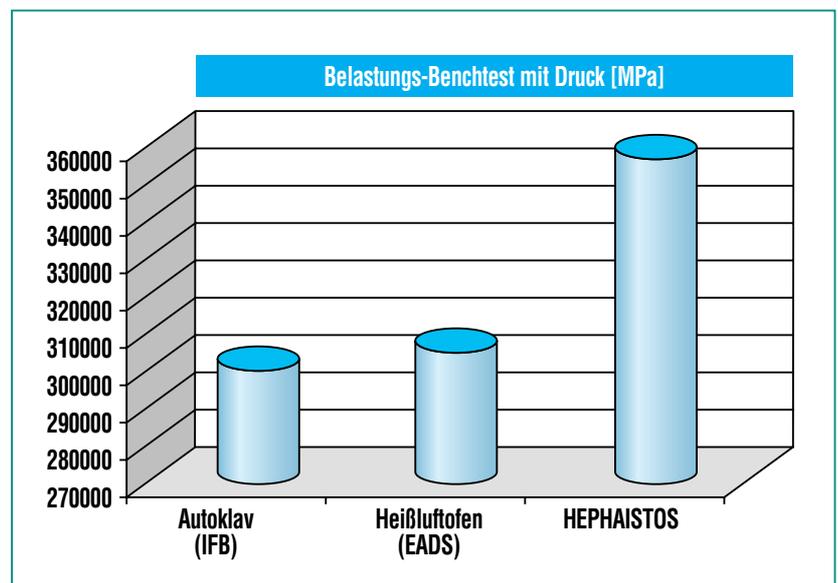


Abb. 3: Vergleich der ILS-Werte von identischen Testplatten in verschiedenen Öfen.



Abb. 4: Forschungszentrum Karlsruhe, IHM: Projektleitung des BMBF-Vorhabens „Innovative modulare Mikrowellentechnik zur Prozessierung von Faserverbundwerkstoffen“.

möglichen (Abb. 4). Diese Aktivitäten werden am IMF-3 (Dr. Szabo) und ITC (Prof. Döring) durchgeführt. Die HEPHAISTOS-Technik kann durch ihre Modularität sehr große Systeme realisieren und damit sehr große technische Verbundstrukturen hochqualitativ aushärten. Dieses ist neben dem Flugzeugbau auch für nachhaltige Energieerzeugung mit großen Windkraftanlagen und Rotorblättern aus CFK ein bedeutendes Zukunftsthema (Abb. 5). Die HEPHAISTOS Mikrowellentechnik wurde seit 2003 in einem Technologietransferprojekt der Abteilung MAP (Stabsabteilung Marketing, Patente und Lizenzen) des Forschungszentrums Karlsruhe mit der Vötsch Industrietechnik sowie den Partnern Institut für Flugzeugbau (IFB) an der Universität Stuttgart und dem Composite Research Center der EADS in München industrialisiert [9].

Frisch gepresst mit Mikrowellen

Die Frage des richtigen „Leimes“ für Flügel und dessen Umgang, war im Verständnis der antiken Autoren des Ikarus-Mythos schon von vitaler Bedeutung – genauso wie in der heutigen Verbundwerkstoffforschung, insbesondere seitdem man aerodynamisch relevante Primärstrukturen wie Tragflächenteile und Vorflügel zunehmend aus solchen synthetischen Leichtbaumaterialien (kohlefaserverstärkten Kunststoffen, CFK) bauen möchte. Ein neu entwickelter Mikrowellen-Injektor wird in Kombination mit der HEPHAISTOS-Technologie (siehe Beitrag „Mikrowellen revolutionieren die industrielle Erwärmungstechnik“) polymere duroplatische Harze blitzschnell als „Leim“ zwischen trockene Kohlefasern von vorbereiteten Strukturteilen in der Fertigung pressen [10]. Dieser Produktionsschritt der Harzinjektion

wird in Zukunft durch ein neu entwickeltes kleines kompaktes Mikrowellensystem beschleunigt und verbessert werden. Kern dieser technischen Innovation ist ein kompakter Mikrowellenapplikator, der eine optimierte Felddurchdringung des durchströmenden Mediums ermöglicht und damit eine volumetrische Heizung des Flüssigkeitsquerschnittes garantiert. In Rohrquerschnitten bildet sich bekanntlich ein Poisson-Strömungsprofil aus, das mittig eine höhere Geschwindigkeit als am Rand besitzt. Schnell strömende Flüssigkeiten, hier zudem bei schlecht wärmeleitenden Harzen, müssten über die am Rand langsam gleitende Grenzschicht zum schnell fließenden Kern erwärmt werden. Dieses ist bei schnellen Geschwindigkeiten nicht mehr möglich, da die Wärme den Kern vom Rand nicht mehr erreicht und damit zum einen Überhitzungen am Rand auftreten und zum anderen eine geregelte Temperatur des Kernes gar nicht möglich wird. Anders bei Verwendung des Mikrowelleninjektors. Dieser heizt, die Wärmeleitung umgehend, vom schnell fließenden Zentrum zum Rand hin unmittelbar das durchfließende Me-



Abb. 5: Der HEPHAISTOS-CA2 vor der Aushärtung einer Großstruktur in einem metallischen Werkzeug der EADS.

dium auf. Damit können sehr hohe Durchflussraten erreicht werden. Zudem findet eine Aktivierung der Harzmonomere statt, was zu einer erhöhten Beweglichkeit und damit Senkung der Viskosität des Harzes führt. Das Harz lässt sich dadurch schneller, „flüssiger“, geschmeidiger und mit weniger Fehlstellen in die trockenen Kohlefasern der Struktur injizieren. Die Entwicklungen zielen auf kompakte, modulare Systeme, die als Stand-Alone-Einheiten die Harzinjektion automatisiert bei der Fertigung von Luftfahrt- und Automobilteilen vornehmen und auch als vollintegrierte Komponenten in der HEPHAISTOS-Produktlinie verwendet werden können. Im Juni 2007 wurde am Forschungszentrum Karlsruhe eine neue Anlage HEPHAISTOS-CA3 (VHM 180/300) aufgebaut, die weltweit das größte Mikrowellenkammersystem mit über 7000 l Prozessvolumen darstellt. Diese Anlage ist zudem einmalig in ihrer Konzeption, da sie über zwei Zugänge die experimentelle Realisie-

rung von Durchflussverfahren ermöglicht. Die Anlage befindet sich derzeit im Testbetrieb und wird innerhalb des BMBF-Vorhabens mit den neuartigen automatisierten Mikrowelleninjektoren ausgerüstet werden.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Eigenschaften, Vorteile und Probleme der HEPHAISTOS-Systemlinie für die energieeffiziente Herstellung verkehrstechnischer Leichtbaumaterialien behandelt. Zusammen mit Airbus wird diese Technologie für den Einsatz im A350- und A31X-Programm derzeit vorbereitend untersucht. Ein weiterer neuartiger Anwendungsfall stellt die Prozessierung und Konsolidierung von Hochtemperaturthermoplasten dar, die aufgrund ihrer konventionell sehr teuren und komplizierten Prozessierbarkeit nur bei sehr ausgewählten Strukturteilen zur Anwendung kommen. Die HEPHAISTOS-Tech-

nologie kann nach dem bisherigen Ergebnisstand für die industrielle Anwendung dieser extrem leichten und starken Materialien einen Quantensprung bewirken. Auch die Erwärmung und Prozessierung von keramischen Materialien ist damit bei 2,45 GHz möglich, was bislang nur bei höheren Frequenzen durchgeführt wurde. Für eine industrielle Erschließung energieeffizienter Produktionsprozesse wurde im Dezember 2007 das neue HEPHAISTOS-Versuchszentrum am IHM eingeweiht. Wie die theoretischen Forschungen zudem zeigten, ist für solche Fortschritte und Optimierungen das Verständnis physikalischer Quantenvorgänge und Energiekonversionen im Mikroskopischen in Präzisierung der klassischen Elektrodynamik erforderlich [11]. Es wird spannend, welche neuartigen Optimierungen und Technologien sich aus diesen neuen Ansätzen für die Werkstoffverarbeitung ableiten lassen werden und die gute alte Küchenmikrowelle als eine „Quantenmaschine“ begriffen wird.

Literatur

- [1] L. Feher, M. Thumm, *Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe*, 28, 1996, 215–223
- [2] L. Feher, M. Thumm, *Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe*, 35, 2003, 123–127
- [3] C.Y.Niu, *Composite Airframe Structures*, Hong Kong Conmililit Press Ltd., 1992
- [4] J.Brandt, K. Drechsler, J. Filsinger, *New Approaches in Textile and Impregnation Technologies for the Cost-Effective Manufacturing of CFRP Aerospace Components*, ICAS 2002, Toronto, (2002)
- [5] L. Feher, M. Thumm, *Microwave Innovation for Industrial Composite Fabrication. The HEPHAISTOS Technology*, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 32, No. 1, February 2004, 73–79
- [6] S. Stanculovic, L. Feher, M. Thumm, *Design of travelling wave slotted waveguide feeds for 2.45 GHz industrial microwave heating system*, 10th International Conference on Microwave and Radiofrequency heating, Modena, Italy, Sept. 12–15, 2005, 454–457
- [7] S. Stanculovic, L. Feher, M. Thumm, *Slotted waveguides for 2.45 GHz industrial applicators*, Noordwijk, ESA, 2005, 21–24
- [8] L. Feher, et al., *Gigahertz and Nanotubes – Perspectives for Innovations with Novel Industrial Microwave Technology*, Advanced Engineering Materials, Vol.8 – No.1–2, February 2006, 26–32
- [9] L. Feher, K.Drechsler, R.Wiesehöfer, J. Filsinger, *SAMPE Journal, The Industrial HEPHAISTOS System Line for Microwave Processing of High Performance Composites*, SAMPE Journal Vol. March/April, 2007
- [10] L. Feher, K. Drechsler, R. Wiesehöfer, *Advancements in CFRP Microwave Processing with the HEPHAISTOS-System*, SAMPE EUROPE International Conference 2007, Paris, April 3rd–5th, 2007
- [11] L.Feher, *Energy Efficient Microwave System and Materials Processing Technologies for Avionic, Mobility and Environmental Applications*, Habilitationsschrift, Juli 2007, 17–30

Anwendungen zur Feuchteüberwachung mit TAUPE-Sensoren

F. Königer, IMK; R. Schuhmann, ITC, H.-G. Mayer, MAP; M. Stacheder, A. Rohleder, Universität Karlsruhe

Wirkungsweise

Der Feuchtesensor TAUPE (Taupe = französisch Maulwurf) wurde in Zusammenarbeit mit der Technologietransfer-Abteilung (MAP) am Forschungszentrum Karlsruhe für die großflächige Bestimmung von Wassergehaltsverteilungen in horizontalen Bodenschichten entwickelt [1, 3, 4, 5].

Das Funktionsprinzip nutzt die elektrophysikalische Wechselwirkung zwischen einem elektrischen Leiter und seiner Umgebung. Bei der Sensorkonstruktion aus einem Flachbandkabel mit drei Kupferleitern (Abb. 1) greift ein elektromagnetisches Feld in das umgebende Medium und wirkt in einem Radius, der etwa dem Leiterabstand entspricht. Ist das Medium feuchter, nimmt seine Dielektrizitätszahl DZ wegen des großen Unterschieds von Wasser (DZ ca. 80) und Bodenmaterial (DZ ca. 3 bis 7) deutlich zu und beeinflusst die Ausbreitungseigenschaften und die Dämpfung des Feldes.

Bei der Anwendung des TDR (Time Domain Reflectometry, Zeitbereichs-Reflektometrie)-Verfahrens wird eine Folge von steilflankigen Rechtecksignalen auf die Leiter aufgeschaltet und im Zeitbereich das von dem Sensor reflektierte Messsignal aufgezeichnet [5]. Das dazu äquivalente FDR (Frequency Domain Reflectometry, Frequenzbereichs-Reflektometrie)-Verfahren verwendet diskrete Frequenzen für die integrale Ermittlung der Feuchte, indem Phasenänderungen des Signals längs der Sensoren ermittelt werden.

Eine flächige Anordnung von TAUPE-Sensoren mit einer Länge bis zu 20 m und, je nach Geländeneigung, in einem Abstand bis zu 10 m ermöglicht eine großräumige Ermittlung des Wassergehaltes. Sie kann durch zusätzliche Anordnung von Sensoren in verschiedenen Tiefen Informationen über die Variation des Wassergehaltes auch in einem größeren Volumen liefern.

Anwendungen

Einsatzgebiete für den Feuchtesensor TAUPE betreffen alle Anwendungen, bei denen die Kenntnis der räumlichen Variabilität der Feuchte in einem Medium von Interesse ist. In vielen Fällen sind repräsentative Feldmittelwerte und ihre zeitliche Änderung von Interesse, wobei die örtliche Auflösung von kleinskaligen Feuchtevariationen entlang des Sensors zusätzliche Informationen liefert.

Dies trifft besonders zu auf die Anwendungen:

- Dichtungskontrollsysteme für Mülldeponien (TDR- und FDR-Messungen) [1, 3, 6],
- Schneefeuchtemessung und Bestimmung des Schneewasseräquivalents, das ist die Menge an Wasser, die sich beim Schmelzen aus einer bestimmten Menge an Schnee bildet [2],
- Vertikale Überwachung der Wasserverteilung im Untergrund.

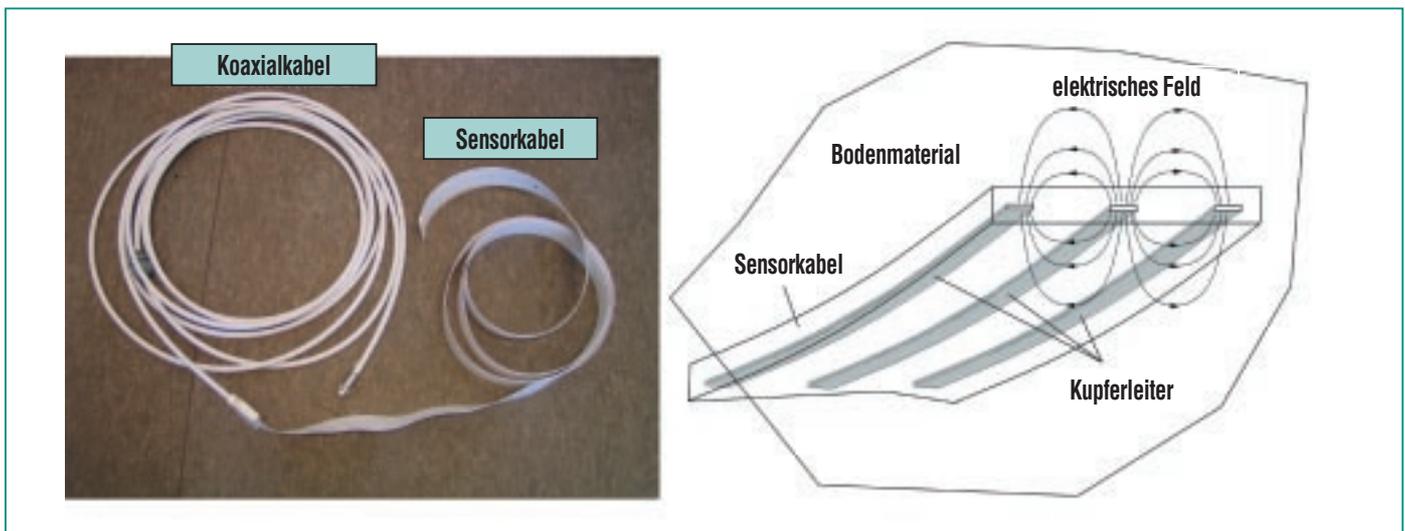


Abb. 1: TAUPE-Kabel mit koaxialer Signalzuführung und angegossenem Flachbandkabel mit drei Kupferleitern als Sensor.

Dichtungskontrollsysteme für Mülldeponien

Gemäß Deponieverordnung sind Oberflächenabdichtungen von Abfalldeponien so auszulegen, dass sie das Auswaschen von im Müllkörper befindlichen Schadstoffen durch Oberflächenwasser verhindern und das Grundwasser vor Verunreinigungen schützen. Das Dichtungselement ist zwischen Müll und Rekultivierungsschicht eingebaut.

Deponie Karlsruhe-West

Seit 1999 ist auf der Mülldeponie Karlsruhe-West eine vom Land Baden-Württemberg geförderte Demonstrationsanlage mit TAUPE-Sensoren (Abb. 2) in Betrieb und liefert kontinuierlich Daten über den Zustand der Abdichtung. Durch sie soll das Verfahren die Marktreife und damit einen breiten Einsatz im Bereich Deponieabdichtungskontrolle erreichen.

Deponie Magdeburg

Weitere Testanlagen mit TAUPE-Feuchtesensoren wurden zusammen mit MAP, mit der Umweltbehörde der Stadt Magdeburg und

der Gesellschaft für Grundbau und Umwelttechnik mbH, GGU, 2000 auf der Mülldeponie „Cracauer Anger“ in Magdeburg eingebaut. Sie sollen unter anderem die Langzeitfunktionsfähigkeit von unterschiedlichen geotextilen Drainagematten, wie sie im Tiefbau eingesetzt werden, demonstrieren. Das TAUPE-Kontrollsystem bestimmt hier die zeitliche Verzögerung im Wassertransport zwischen Niederschlag und Wassereintritt in das Dränelement.

Deponie „Hintere Dollert“

Im Rahmen eines Technologietransfer-Projektes wird zusammen mit dem Lizenznehmer Meteolabor AG und dem Landkreis Rastatt in einem Testfeld mit einer Fläche von 20.000 m² auf der Deponie „Hintere Dollert“ in Oberweier die Funktion des Dichtungselements unter realen Bedingungen getestet, also unter dem Einfluss von Deponiesetzungen, der Bildung von Deponiegas durch die Verrottung des Müllmaterials sowie Durchsickerungen von Oberflächenwasser direkt aus der Rekultivierungsschicht. Das im Testfeld installierte Dichtungskontrollsystem TAUPE gewährleistet die Kontrolle der

Dichtigkeit. Das Land Baden-Württemberg hat den Bau des Testfeldes finanziell gefördert.

Insgesamt sind 230 TAUPE-Sensorkabel in zwei Kontrollschichten, unterhalb des Dichtungselements und darüber im unteren Bereich der Rekultivierungsschicht, verlegt. Seit Mitte August 2005 werden die Daten des TAUPE-Systems kontinuierlich aufgezeichnet, ausgewertet und graphisch dargestellt.

Abb. 3 zeigt beispielhaft eine charakteristische Feuchteverteilung über die Testfeldfläche der Deponie in Oberweier in der unteren Kontrollschicht, die aus den Messsignalen der einzelnen Sensoren ermittelt werden. Dort ist erkennbar:

- An der Oberseite des Testfeldes und an den Rändern treten zum Teil hohe Feuchtwerte (blau) auf. Hier ist die Abdichtung gegen die Umgebung nicht optimal und Niederschlag kann eintreten.
- Die Feuchtwerte zwischen den beiden Wirtschaftswegen in der Hangmitte entsprechen den Erwartungen (weitgehend grün unterlegt) und liegen zwischen 8 und 11 Gewichtsprozent. Im mittleren Bereich ist der hohe Wassergehalt des dort feucht eingebauten Materials sichtbar.
- Am Hangfuß sind ebenfalls erhöhte Werte durch laterale Abflüsse gemessen.

Kritische, rot eingefärbte Bereiche können so leicht identifiziert und näher untersucht werden. Die Analyse der jeweiligen Sensordaten und die Prüfung auf Auffälligkeiten



Abb. 2: Einbau von TAUPE-Feuchtesensoren auf der Mülldeponie KA-West.

erlaubt es, einen möglichen Wasserzutritt durch die Dichtschicht zu erkennen.

Das System soll Leckagen mit einer Ortungsgenauigkeit $< 100 \text{ m}^2$ und die Änderung des Wassergehalts in der Abdichtung um ± 5 Volumenprozent detektieren. Mit dieser Messaussage wird es dem Deponiebetreiber möglich sein, das Schadenspotenzial einer detektierten Leckage abzuschätzen und geeignete Maßnahmen in die Wege zu leiten. Durch die Kenntnisse dieser Parameter ergeben sich erhebliche Einsparmöglichkeiten bei Reparaturarbeiten.

Schneefeuchtebestimmung

In dem vom Forschungszentrum koordinierten EU-Projekt „SNOW-POWER“ hat der kanadische Partner Hydro-Quebec, einer der weltgrößten Stromerzeuger aus Wasserkraft, festgestellt, dass sich durch die messtechnische Bestimmung der Schneefeuchte in einem ausgewählten Wassereinzugsgebiet von ca. 320 Tm^2 und einer damit erzielten Verbesserung der Zuflussprognose für großflächige Wasserspeicher um nur 10 % eine Ertragssteigerung durch die Steuerung des Wasserstandes von 2,2 TWh bzw. 45 M€ erzielen ließe.

Darüber hinaus tragen Schneefeuchtemessungen zur Verbesserung der Lawinenwarnung insbesondere von Nassschneelawinen bei, wobei über die Wassergehaltsbestimmung das Ausmaß und der Zeitpunkt der Schneeschmelze bestimmt wird. Die Hochwasservorhersage lässt sich damit ebenfalls erheblich präzisieren.

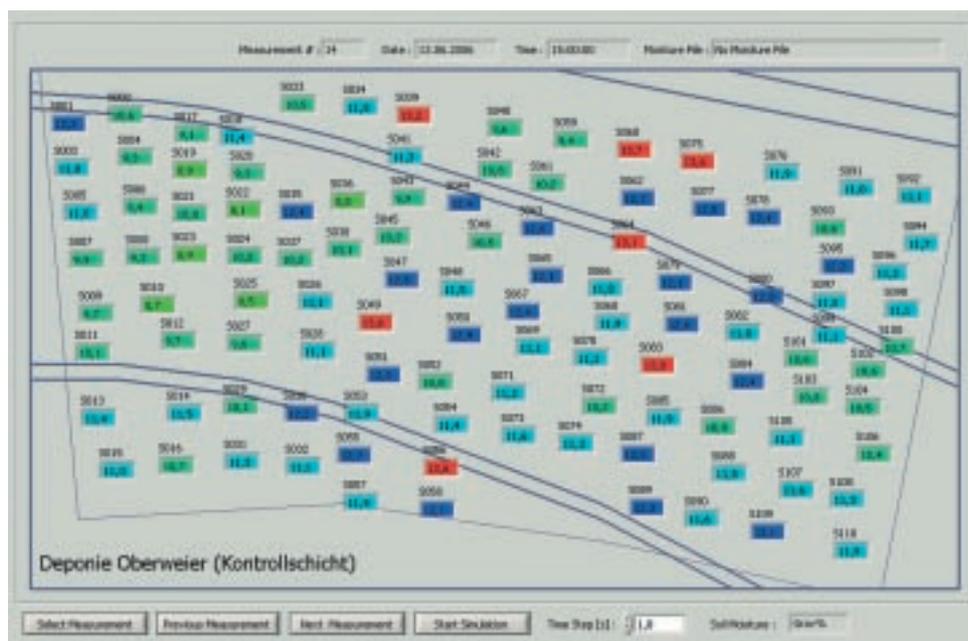


Abb. 3: Feuchteverteilung im Testfeld in der Kontrollschicht unter der Abdichtung. Die Zahlen in den farbig unterlegten Feldern zeigen die über die Sensorenlänge von 10 m integrierten gravimetrischen Wassergehalte der TAUPE-Sensoren in ca. 2 m Tiefe zu einem Zeitpunkt.

In drei Wintern wurden TAUPE-Sensoren (Abb. 4) auf einem Testfeld des Schnee- und Lawinenforschungszentrums Davos und auf Testfeldern von Hydro-Quebec in Canada getestet. Als Referenzmessungen dienten manuell erfasste Schneeprofilaufnahmen, in deren Rahmen auch der Wert des Schneewasseräquivalents schichtweise bestimmt wurde sowie Messungen der Dichte mittels eines Schneekissens (Abb. 5).

Die Stärke des TAUPE-Sensors für die Charakterisierung der Schneedecke liegt somit darin, dass zusätzlich zur Dichte und dem Schneewasseräquivalent auch der Flüssigwassergehalt der Schneedecke gemessen wird. Dies ist einerseits für hydrologische Fragestellungen interessant, weil damit der Zeitpunkt der Sättigung und des ersten Abflusses von Wasser aus der



Abb. 4. Installation des TAUPE-Sensors für die Bestimmung von Schneefeuchte, Schneedicke und Schneewasseräquivalent (Messfeld Weissfluhjoch, Davos (CH)) zwischen einem Bodenanker und dem Turm. Die obere Befestigung muss höher liegen, als die maximal zu erwartende Schneedecke.

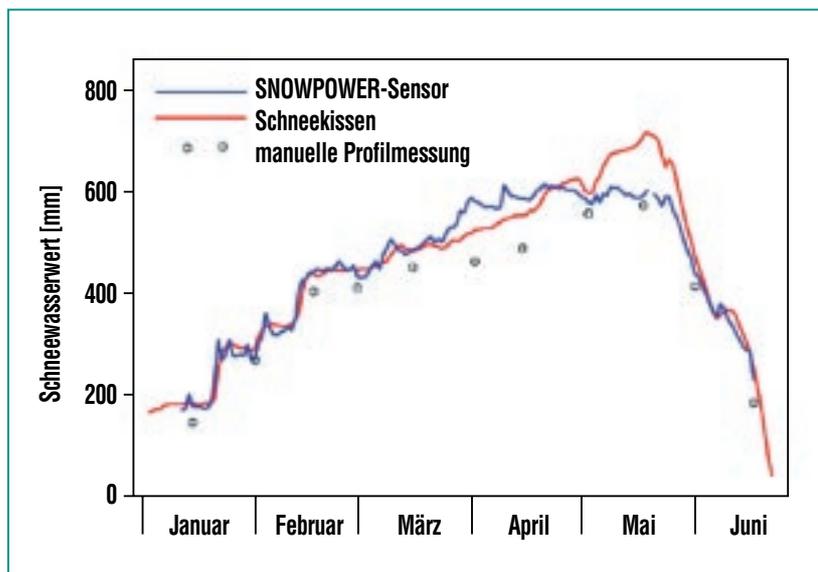


Abb. 5: Saisonaler Verlauf des Schneewasserwerts im Winter 2004/05 auf dem Weissfluhjoch, gemessen mit dem SNOWPOWER-Sensor, dem Schneekissen und aus Profilmessungen.

Schneedecke festzustellen ist. Andererseits kann diese Zusatzinformation für die Gefahrenbeurteilung bezüglich Nassschneelawinen von bedeutendem Interesse sein.

Schließlich kann man zusammen mit Fernerkundungsdaten und hydrologischen Modellen insbesondere die Zuflussprognose für Wasserkraftwerke deutlich verbessern.

stimmt maßgebend die verfügbaren Wassermengen für die Vegetation. Besonders bei geringen Flurabständen des Grundwassers kann durch eine unverträglich große Absenkung eine Umgestaltung der Flora erfolgen, die dann auch Auswirkungen auf die Fauna haben kann. Die Vielzahl der Grundwasserentnahmestellen in Deutschland, welche diesen Bedingungen entsprechen müssen, verspricht eine hohe wirtschaftliche Umsetzung des Verfahrens.

In einem Technologietransfer-Vorprojekt in Zusammenarbeit mit dem Landesumweltamt Sachsen-Anhalt sind die bisherigen TAUPE-Sensoren dahingehend abgeändert worden, dass existierende Sensoren auf PVC-Rohre (Abb. 6) aufgebracht wurden. Auf einer Mülldeponie in Magdeburg-Hängelsberge messen die eingebrachten Rohrsensoren die Änderung der Müllfeuchte durch Bewässerung an der Oberfläche bis in sechs Meter Tiefe. Das Ergebnis liefert eine Bewertungsgrundlage für die einzubringende Wassermenge und ihre Verteilung in unterschiedlichen Tiefen und steuert die Optimierung des Deponiegasausstoßes. Lokale Vernässungen und Austrocknungen sowie permanente Zonen höherer Feuchte sind damit klar erkennbar (Abb. 7).

Dieses Projekt läuft seit Mitte Juli 2006 und liefert seither eine detaillierte räumliche und zeitliche Auflösung der Feuchteverteilung im Müllkörper.

Das Technologietransfer-Projekt „Rohrsensor“ beinhaltet, gemeinsam mit einem Lizenznehmer, die Entwicklung eines professionell anwendbaren Sensors auf den



Abb. 6: Rohrsensor für Vertikalprofil der Feuchte in einer Mülldeponie.

Rohrsensor

Eine weitere Anwendung von TAUPE-Feuchtesensoren befasst sich mit der Bestimmung von vertikalen Feuchteprofilen und Wassergehaltsbestimmung in verschiedenen Bodenmaterialien.

Ein aktuelles Technologietransfer-Projekt mit den Stadtwerken Karlsruhe hat zum Ziel, an einer Studie mitzuarbeiten, welche die Umweltverträglichkeit der Wasserentnahme durch die Stadtwerke und die Grundwasserneubildung in den Einzugsgebieten der Wasserwerke untersucht.

Die Versickerung von Niederschlägen in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Erdbodens be-

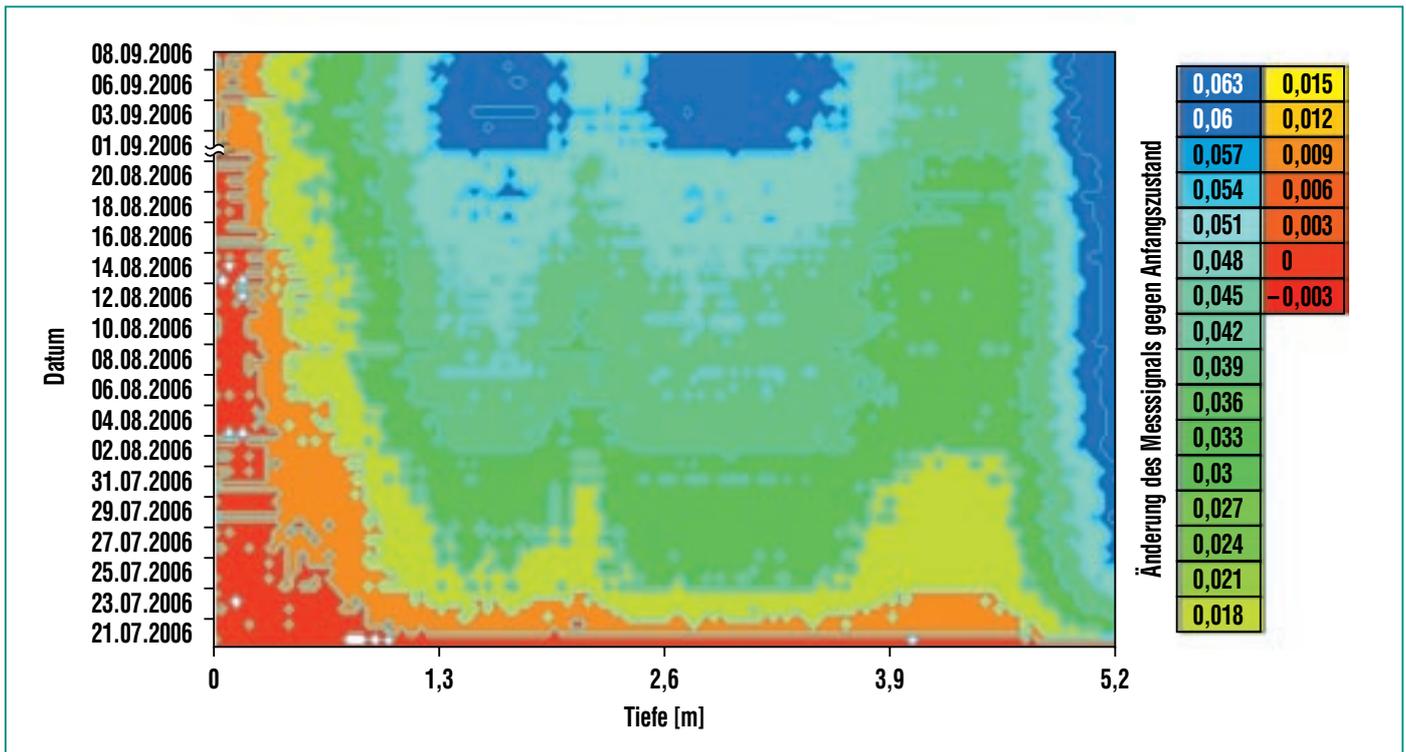


Abb. 7: Zeitliche und räumliche Variation des Messsignals entlang des Rohrsensors der Länge 6 m, bezogen auf einen Ausgangszustand der Feuchte im Müllkörper.

Grundlagen des bisherigen TAUPE-Feuchtesensors und den Erkenntnissen aus dem Vorprojekt in Magdeburg.

Derartige Rohrsensoren sollen in einfacher Weise den nahezu ungestörten Einbau in eine beliebige Umgebung, zum Beispiel auch in Dämme und Deiche, ermöglichen. Die Messtechnik zur Ermittlung von Wassergehalt und Feuchteverteilung besteht aus der Zusammenstellung bestehender und weiterentwickelter Komponenten mit Berücksichtigung von effektiven Stromspartechniken, die einen netzunabhängigen Betrieb auf längere Dauer möglich macht.

Zusammenfassung

Unterschiedliche Anwendungen des TAUPE-Feuchtemessverfahrens zeigen den breiten Einsatzbereich zu gänzlich verschiedenen Fragestellungen. Sie reichen von der Kontrolle der Dichtigkeit von Mülldeponien über die Bestimmung des Schneewasseräquivalents bis zur Überwachung der Grundwasserneubildung. Der besondere Vorteil des Verfahrens liegt in der Fähigkeit, nicht nur Punktmessungen durchführen zu können, sondern die Feuchte in einem größeren Volumen auch ortsaufgelöst zu bestimmen. Da-

mit sind in einem weiten Anwendungsgebiet, sowohl in der Wissenschaft als auch in wirtschaftlich interessanten Bereichen, detaillierte Aussagen über die Wassergehaltsverteilung in einem Medium möglich.

Literatur

- [1] A. Brandelik, C. Hübner, R. Schuhmann, (1996), *Feuchtesensor für ausgedehnte Schichten*, Deutsches Patent Nr. 19501196
- [2] A. Brandelik, C. Hübner, (1997), *Verfahren zur Bestimmung des volumetrischen Flüssigwassergehalts und der Dichte von Schnee und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens*, Deutsches Patent Nr. 19755052
- [3] A. Brandelik, C. Huebner, R. Schuhmann, (1998), *Moisture sensor for large area layers* (German patent no. 4432687, European patent no. 0804724, US patent no. 5942904), 16 June
- [4] A. Brandelik, C. Hübner, *Subsurface Sensing, Subsurface Aquametry, Subsurface Sensing Technologies and Applications*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, Vol. 1, No. 4, (2001) 365–376
- [5] C. Hübner, A. Brandelik, (2001), *Elektrophysikalische Aquametrie*, Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe, Jahrg. 33, 1/2001, S. 23–30
- [5] R. Becker, A. Bieberstein, C. Hübner, R. Nüesch, W. Schädel, A. Scheuermann, S. Schlaeger, R. Schuhmann, 2003, *Nondestructive in situ and online measurements of soil physical parameters*, in *Soil and Rock America 2003, 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 39th US Rock Mechanics Symposium, Cambridge*, 22–26 June
- [6] F. Königer, J. Roth, W. Rabl-Lasar, R. Schuhmann, R. Nüesch, *Dichtungskontrollsystem für Deponien – Erfahrungen mit dem System TAUPE auf der Hausmülldeponie „Hintere Dollert“ des Landkreises Rastatt*, *Berichtsband zum Workshop 2006, Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis*, Oktober 17–18, Karlsruhe, Germany, S. 215–221

Gips als nachwachsender Rohstoff

M. Schwotzer, ITC; G. Dehne, GEOTEKT GbR; A. Gerdes, ITC und HS-Karlsruhe

Einleitung

Baustoffe repräsentieren einen der größten anthropogen verursachten Massenströme. So beträgt die Weltjahresproduktion des Portlandzementes allein ca. zwei Milliarden Tonnen. Bei der Herstellung wird ca. eine Milliarde Tonnen CO₂ freigesetzt und aufgrund der erforderlichen Brenntemperatur von über 1400 °C ist auch ein erheblicher Energieeinsatz nötig. Durch den weiter steigenden Bedarf an Baustoffen, vor allem in den industriellen Schwellenländern wie China oder Indien, werden sich diese Zahlen eher noch erhöhen. Um diesen Entwicklungen begegnen zu können, werden in Zukunft Werkstoffe wie z. B. Gips eine wichtigere Rolle spielen, zumal durch Einsatz moderner Bauchemie dessen Eigenschafts- und Anwendungsspektrum deutlich erweitert werden kann. Dem breiteren Einsatz des „low-energy“-Produktes Gips steht aber die Verfügbarkeit der natürlichen Rohstoffe gegenüber.

Die natürlichen Vorkommen hochwertigen Gipsgesteins, dem Rohstoff für die Herstellung von Spezial- und Industriegipsen sind rar und werden immer schwerer zugänglich. Gipsgesteine (CaSO₄ x 2 H₂O) mit niedrigerer Reinheit, d. h. mit einem hohen Anteil an dem wasserfreien Calciumsulfat Anhydrit (CaSO₄) stehen jedoch in großen Mengen zur Verfügung. In einem Technologietransferprojekt des Forschungszentrums Karlsruhe GmbH, gefördert und betreut von der Stabsabteilung Marketing, Patente und Lizenzen, und der Gipsindustrie befindet sich derzeit ein neues Konzept zur Nutzung

dieser qualitativ minderwertigen Rohstoffe in der Erprobung. In Versuchsfeldern in offengelassenen Steinbrüchen sollen diese anhydritreichen Gesteine in hochwertige Rohstoffe für industrielle Nutzung umgewandelt werden. Durch technische Einflussnahme wird die im natürlichen Umfeld zwar spontan, jedoch sehr langsam ablaufende Umwandlungsreaktion von Anhydrit in Gips beschleunigt. Gipsgesteine sollen als „nachwachsender Rohstoff“ aus anhydritreichen Gesteinen gewonnen werden. Mit moderner Analytik und mit Hilfe von Computersimulationen werden die Reaktionsparameter der „Vergipsungsreaktion“ von Anhydritgestein erfasst. Feld- und Laborversuche sind die Basis für die Untersuchung der chemischen und mineralogischen Prozesse bei der „Vergipsung“ von anhydritreichem Gestein.

Neben der Ermittlung von Grundlagenwissen über die „Vergipsung“ wird auf diesem Wege die Voraussetzung für die Umsetzung dieses neuen Konzeptes im großtechnischen Maßstab geschaffen.

Die natürliche Vergipsung von Anhydrit

Die Umwandlung von Anhydritgestein in gipsreiches Gestein ist ein im natürlichen Umfeld spontan, jedoch sehr langsam ablaufender Prozess. Die Umwandlung von Anhydrit in Gips ist eine Lösungs- und Ausfällungsreaktion. Anhydrit geht in Lösung und Gips kristallisiert aus. Diese Reaktion führte zur Bildung natürlicher Gipslagerstätten. Kommt Anhydritgestein durch geologische Prozesse in den Einflussbereich von Wasser, werden durch



Abb. 1: Grenze Anhydrit – Gips, Lokalität Kahler Kopf, Südharz.

die so genannte „Vergipsung“ Gipslagerstätten gebildet [1]. Diese Lagerstättenbildung läuft in geologischen Zeiträumen ab. In Abb. 1 ist die Grenze von Gips und Anhydrit einer derart gebildeten Lagerstätte dargestellt (Lokalität Kahler Kopf, Walkenried, Südharz).

Auf freiliegenden Anhydritflächen stillgelegter Steinbrüche kann eine Anhydritvergipsung, gemessen an der in geologischen Zeiträumen ablaufenden Bildung von Gipslagerstätten, sehr schnell ablaufen [2]. Im Zuge der Vergipsung quillt das Anhydritgestein gewissermaßen auf. Abb. 2 zeigt Fotos dieser als „Zwergenlöcher“ bezeichneten Aufwölbungen vergipsender Anhydritschichten in offengelassenen Steinbrüchen. Der Mechanismus, welcher zu dieser Volumenveränderung des Gesteins führt, wird im Folgenden erläutert.

Reaktionsmechanismus der Vergipsung von Anhydritgestein

In Abb. 3 ist der Reaktionsmechanismus der Vergipsung von Anhydritgestein schematisch darge-

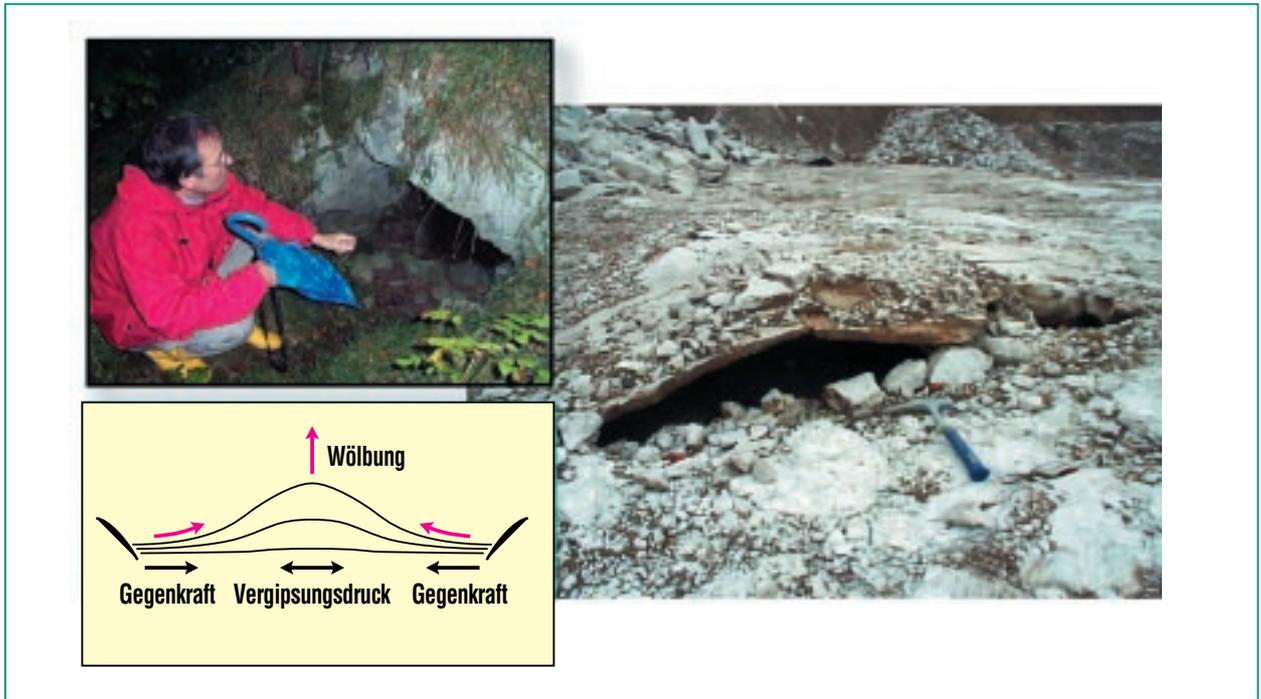


Abb. 2: Zwergenlöcher, Walkenried, Südharz.

stellt. Voraussetzung für die Vergipsung von Anhydritgestein ist die Anwesenheit von Wasser. Es dient bei der Vergipsung einerseits als Lösemittel zur Anhydritauflösung und wird andererseits für die Kristallisation der Hydratphase Gips benötigt. Demzufolge beeinflussen zwei Prozesse die Reak-

tionsgeschwindigkeit der Vergipsung: Der Transport von Wasser (Abb. 3 a) sowie die Reaktionsbedingungen für die Auflösung von Anhydrit und die Kristallisation von Gips (Abb. 3 b).

Beim Wachstum in Porenräumen und Frakturen des Anhydritge-

steins bauen Gipskristalle einen gerichteten Druck auf, der zu Deformationen und zum mechanischen Versagen des Gesteinsgefüges führt [3]. Dies kann zur Erweiterung des Fraktursystems im Gestein führen. Somit wird verhindert, dass durch ein Zuwachsen der Porenräume mit Gips die weitere Wasserversorgung und damit auch die Vergipsungsreaktion unterbunden werden.

Darüber hinaus sind die freiliegenden Anhydritflächen offengelassener Steinbrüche den Einflüssen der Witterung ausgesetzt. Klimatische Einflussfaktoren wie z. B. Temperaturschwankungen oder Frostsprengung, können zur Schwächung des Gesteinsgefüges führen und begünstigen auf diese Weise den Wassertransport ins Gestein.

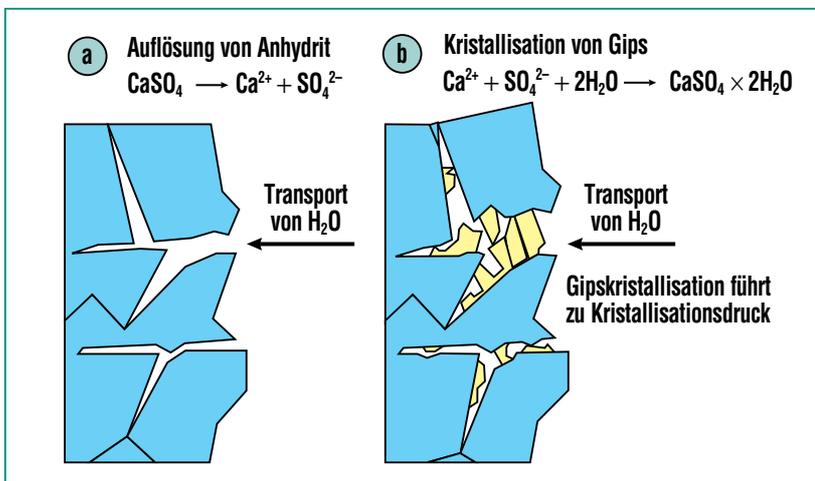


Abb. 3: Mechanismus der Vergipsung von Anhydritgestein.

Laboruntersuchungen und Feldversuche

Allgemeines

Das Ziel von Laborexperimenten und Feldversuchen ist es, die Einflussgrößen, welche die Vergipsgeschwindigkeit maßgeblich beeinflussen, zu identifizieren. Die Kenntnis der Vergipsgeschwindigkeit und das Verständnis der sie beeinflussenden Faktoren ist die Voraussetzung für eine wirtschaftlich relevante Umsetzung des Konzeptes „Gips als nachwachsender Rohstoff“.

Laborexperimente

In Laborversuchen wurde durch Einflussnahme auf die Löslichkeitsgleichgewichte durch Veränderung der Zusammensetzung der Reaktionslösung und Temperaturbedingungen die Bildung der „Zwergelöcher“ nachgestellt. Abb. 4 zeigt einen Quader aus Anhydritgestein, bei welchem unter Laborbedingungen die Anhydritauflösung und die Gipskristallisation forciert wurden. Durch Einstellung reaktionsfördernder chemischer Randbedingungen ist es möglich, den Vergipungsprozess weiter zu beschleunigen.

Ergebnisse der Feldversuche

Abb. 5 zeigt den Aufbau eines Großversuches in einem offengelassenen Steinbruch. Hier werden verschiedene Gesteinstypen mit mehreren Versuchskonzeptionen vergipungsbeschleunigenden Bedingungen ausgesetzt.

Die Untersuchung dieser Feldversuche zeigt, dass sich Vergipung



Reproduktion der Zwergelöcher im Labor

Durch Einstellung reaktionsfördernder Bedingungen im Laborexperiment konnte die „Zwergelochbildung“ in 2–3 Wochen forciert werden.

Der Kristallisationsdruck von (in Poren und kleinsten Frakturen) wachsenden Gipskristallen verursacht eine mechanische Beanspruchung des Anhydritprobekörpers. Der Anhydritquader ist „aufgequollen“.

Abb. 4: Reproduktion der „Zwergelöcher“ im Labor.

von Anhydrit im natürlichen Umfeld durch technische Einflussnahme beschleunigen lässt. Mit voranschreitender Vergipung ließ sich eine Veränderung des Gesteinsgefüges beobachten. Abb. 6 a) bis c) zeigt die makroskopisch sichtbare Veränderung eines Anhydritgesteins im zeitlichen Verlauf eines Feldversuches. Das ursprünglich blau grau erscheinende Anhydritgestein (Abb. 6 a) ist im nächsten Schritt von weißen Adern und feinen Frakturen durchzogen (Abb. 6 b). Im letzten Schritt erscheint das Gestein weiß, was auf die Umsetzung zu Gips hinweist (Abb. 6 c).

Das Dünnschliffbild (Abb. 6 c) zeigt eine Fraktur, die auf den Innenseiten mit Gipskristallen belegt ist. Risse entstehen, wenn in dem Gestein Spannungen aufgebaut werden, welche seine Zugfestigkeit überschreiten. Im Feldversuch können Spannungen durch klimatische Einflüsse (z. B. Temperaturschwankungen, Feucht-Trocken-Zyklen) oder durch die chemische Reaktion (Kristallisationsdruck



Abb. 5: Aufbau eines Großversuches in einem offengelassenen Steinbruch.

durch Gipswachstum) im Gestein entstehen. Diese Rissbildung ist für die Vergipungsreaktion von großer Bedeutung, da Transportmöglichkeiten für Wasser entstehen und neue reaktive Oberflächen geschaffen werden.

Des Weiteren zeigten verschiedene Gesteinstypen ein unterschiedliches Reaktionsverhalten. In den Untersuchungen zeigten sich die von Reimann [2] beschriebenen Zusammenhänge zwischen dem Vergipungsverhalten und dem



Abb. 6: Reaktionsfortschritt im Feldversuch.

Gesteinstypus des anhydritreichen Gesteins. So zeigen beispielsweise Gesteine, die sich in ihren Gefügecharakteristika wie z. B. der Korngröße unterscheiden, Unterschiede in ihrem Vergipsungsverhalten.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Vergipsung von Anhydritgestein lässt sich durch technische Einflussnahme beschleunigen. Der Zusammenhang zwischen Vergipsungsgeschwindigkeit und äußeren Einflüssen sowie Materialparametern ist nachgewiesen.

Für die wirtschaftlich relevante Realisierung des Konzeptes „Gips als nachwachsender Rohstoff“ ist die Abschätzbarkeit der Vergipsungsrate von großer Bedeutung. Ein zentraler Punkt für die Reaktionsgeschwindigkeit der Vergipsung ist die Wassergängigkeit des Gesteins. Das Zusammenspiel der im natürlichen Umfeld wirksamen Einflussfaktoren ist rein experimentell sehr schwer fassbar. Daher wird durch Parameterstudien an einem numerischen Modell das komplexe Materialverhalten bei der Vergipsung analysiert werden. Beispielsweise können mit dieser Vorgehensweise Zusammenhänge zwischen der Vergipsungsreaktion und Faktoren wie Tempera-

turschwankungen, Rissbildung und der Korngröße des Anhydritgesteins ermittelt werden. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist wichtig, um die Umsetzungsrate abschätzen zu können. Die technische und damit auch wirtschaftliche Umsetzung wird wesentlich durch die Reaktionsgeschwindigkeit bestimmt. Im Laufe des Projektes wurden Lösungen entwickelt, die mittelfristig einen technischen Einsatz anhydritreicher Rohstoffe zur Herstellung von Werkstoffen auf Gipsbasis erwarten lassen.

In Memoriam

Dieser Artikel ist Herrn Prof. Dr. Rolf Nüesch gewidmet, der dieses Projekt nicht nur initiiert, sondern durch seine unerschöpfliche Kreativität und wissenschaftliche Kompetenz wesentlich getragen hat.

Danksagung

Die Autorenschaft bedankt sich bei der Stabsabteilung Marketing, Patente und Lizenzen, im Speziellen bei Herrn Dr. Rainer Körber, für die Förderung und Betreuung des Projektes.

Literatur

- [1] R. Langbein, H. Peter, H.-J. Schwahn, (1982) *Karbonat- und Sulfatgesteine, Monographienreihe „Nutzbare Gesteine und Industriemineralien“*, Hrsg. Rösler, H.J. und Blankenburg, H.-J., VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- [2] M. Reimann, (1991) *Geologisch-lagerstättenkundliche und mineralogische Untersuchungen zur Vergipsung und Volumenzunahme der Anhydrite verschiedener geologischer Formationen unter natürlichen und labormäßigen Bedingungen*, Geol. Jb., D 97, p. 21–125, Hannover
- [3] M. Schwotzer, R. Nüesch, (2002) *Natursteinverwitterung durch Gipswachstum: Eine Modellstudie der Umwandlung von Anhydrit in Gips*, in GDCh Monographie 25, *Bauchemie von der Forschung bis zur Praxis*, Hrsg. GDCh-Fachgruppe Bauchemie, p. 188–190, ISBN 3-936028-07-9

Magnettechnologie für μl bis m^3 – Anwendungsbeispiele von Magnetseparatorentwicklungen aus dem ITC-WGT

M. Franzreb, ITC

Einleitung

Das Institut für Technische Chemie, Bereich Wasser- und Geotechnologie (ITC-WGT) am Forschungszentrum Karlsruhe, beschäftigt sich seit über zehn Jahren mit der Entwicklung und Anwendung von Magnetseparatoren. Grundlage für alle Typen von Magnetseparatoren bildet dabei die Eigenschaft magnetischer Felder auf Materie eine Kraft auszuüben. Der allgemeine Zusammenhang für diese Magnetkraft F_m lautet:

$$F_m = \mu_0 V_p M_p \nabla H$$

mit der Permeabilitätskonstante des Vakuums μ_0 , dem Partikelvolumen V_p , der Partikelmagnetisierung M_p und dem Gradienten der magnetischen Feldstärke am Ort des Partikels ∇H . Da die Art der abzutrennenden Partikel in der Regel vorgegeben ist, bilden die Einflussgrößen auf die innerhalb eines Separators erzielbare Magnetkraft die vorherrschende Feldstärke und insbesondere deren Gradient. Die Herausforderung bei der Entwicklung von Magnetseparatoren besteht daher in der gezielten Generierung ausreichend starker Magnetfeldgradienten innerhalb des Arbeitsvolumens einerseits und der strömungstechnischen Optimierung andererseits. Im Falle großer Arbeitsvolumina von Litern bis hin zu m^3 , wie sie in Magnetseparatoren bei der Erzaufbereitung oder der Partikelseparation in metallverarbeitenden Betrieben anfallen, ist das in den Siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelte Prinzip der Hochgradienten-Magnetseparation (HGMS) unter dem genannten Gesichtspunkt sicherlich bis zum heutigen

Zeitpunkt die effektivste Methode [1]. Bei der HGMS wird in den Bereich eines äußeren Magnetfeldes eine mit einer ferromagnetischen Abscheidematrix gefüllte Filterkammer eingebracht. Diese Abscheidematrix besteht zum Beispiel aus einer lockeren Packung grober Stahlwolle oder einem Stapel Drahtnetze. Die Matrixdrähte bündeln das äußere Magnetfeld in ihrer Umgebung und schaffen so nahe ihrer Oberfläche Bereiche, die auf para- sowie ferro- bzw. ferrimagnetische Partikel stark anziehend wirken. Durchströmt eine Suspension derartiger Partikel den Separator, werden diese selbst für Partikelgrößen im Sub-Mikrometerbereich innerhalb der Matrix zurückgehalten und die gereinigte Flüssigkeit verlässt das System.

Magnetseparation im Kubikmeter-Maßstab

Während das Grundprinzip der HGMS seit ca. 40 Jahren bekannt ist, ist die technische Umsetzung bis heute Gegenstand intensiver Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten. Ausgehend von den Anforderungen an magnetische Verfahren in der Wassertechnologie wurde am ITC-WGT ein kontinuierlich arbeitender Karussellmagnetseparator patentiert [2] und in Form verschiedener Prototypen getestet [3, 4]. Im Rahmen einer Präsentation des Separators auf der Hannovermesse 1997 kam es zu einem ersten Kontakt mit der Firma Steinert. Die Firma Steinert ist ein traditionsreiches und innovationsgeprägtes Unternehmen, das insbesondere in den Bereichen Metallrecycling sowie Abfallaufbereitung tätig ist. Der 1889 in Köln gegründete Familienbetrieb be-

schäftigt heute rund 150 Mitarbeiter und ist u. a. über Tochtergesellschaften, Joint Ventures und Lizenznehmer weltweit präsent.

Der ursprüngliche Wunsch der Firma war es, eine Lösung für die Abwasserprobleme des Tochterunternehmens Metalloxyd zu finden. Schon bald entstand aber der Gedanke einer gemeinsamen Entwicklung des Magnetseparators bis zur Marktreife. Dennoch benötigte es weitere eineinhalb Jahre und zweier Diplomarbeiten, bis 1999 ein auf die Dauer von drei Jahren ausgelegtes Technologietransferprojekt beginnen konnte. Der im Laufe des Projekts in der Hauptwerkstatt des Forschungszentrums gefertigte Karussellmagnetseparator demonstrierte seine Effizienz u. a. zur weitergehenden Phosphatelimination in der Kläranlage des Forschungszentrums [4], er veranschaulichte letztendlich aber auch die mechanische Komplexität und damit Störanfälligkeit des Systems. Als Konsequenz aus diesen Beobachtungen konzentrierten sich die weiteren Arbeiten auf das gemeinsam erdachte Prinzip eines starren Aufbaus des Separators in Kombination mit einem schaltbaren Permanentmagneten [5]. Ein schaltbarer Permanentmagnet entsprechender Größe und Stärke war hierbei vollkommen neu und führte im Jahr 2001 zu einer erfolgreichen Patentanmeldung [6] des Hochgradient-Magnetfilters, kurz HGF. Ein erster Prototyp war im Jahr 2002 fertig gestellt und wurde u. a. für Prozessflüssigkeiten der Stahl- und Automobilindustrie erprobt. Im Folgenden wird die Funktionsweise und eine typische Anwendung des HGF kurz erläutert.

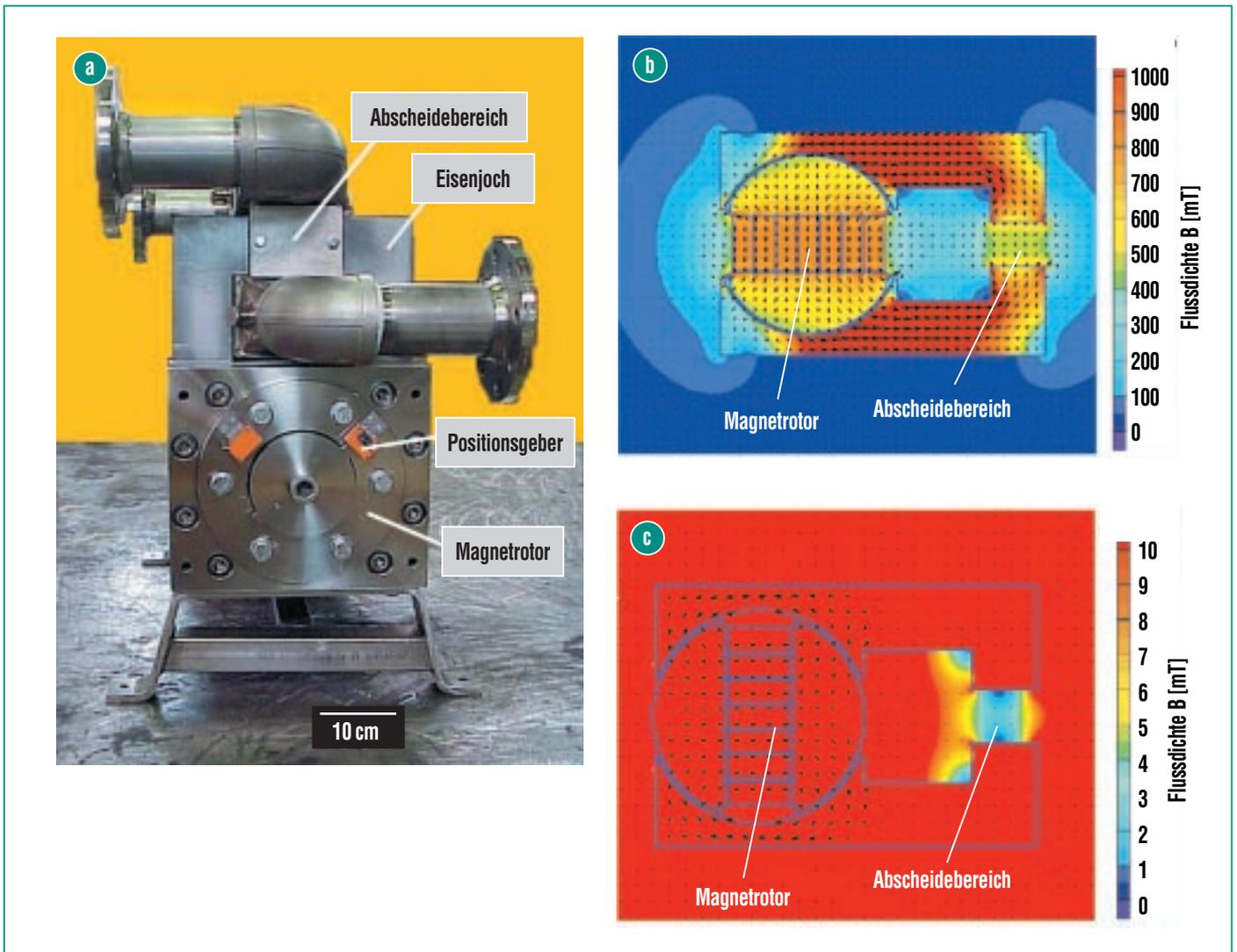


Abb. 1: a) Ansicht eines Schnitts durch einen Hochgradienten-Magnetseparator des Typs HGF. b) Mittels FEM berechnete Magnetfeldverteilung für den Schaltzustand des Rotors während des Filtrationsbetriebs bzw. c) während der Rückspülung.

Der HGF besteht aus einem Permanentmagnetrotor, der in einem Eisenkreis/Eisenjoch eingebaut ist (siehe Abb. 1a). Der Permanentmagnetrotor ist mit Magnetblöcken aus Neodym-Eisen-Bor, dem stärksten industriell genutzten Permanentmagnetmaterial, bestückt. Der Eisenkreis bildet ähnlich einem Hufeisenmagnet eine massive U-förmige Einheit zur Führung des magnetischen Flusses. Im oberen,

offenen Bereich befindet sich die Abscheidematrix. Im eingeschalteten Zustand bildet der zylindrische Permanentmagnet zusammen mit dem Eisenjoch einen gewöhnlich Magnetkreis, der im Bereich der Abscheidematrix ein Magnetfeld von ca. 450 mT erreicht (Abb. 1b). Im „ausgeschalteten“ Zustand ist der Permanentmagnetrotor um 90° um seine Längsachse gedreht (Abb. 1c). Hierdurch

liegt das wirkende Magnetfeld bei nur noch ca. 3–4 mT, d. h. das Verhältnis von ein- zu ausgeschaltetem Zustand beträgt über 100. Nord- und Südpole sind dann im direkten Bereich des Rotors kurzgeschlossen und die Abscheidematrix kann gespült werden. Durch erneutes Drehen des Rotors um 90° liegt das Magnetfeld im Bereich der Abscheidematrix wieder an

und ein neuer Filtrationszyklus beginnt.

Der erste Bautyp des HGF besitzt eine Abscheidematrix von 50 cm Länge und wird daher unter der Bezeichnung HGF 50 geführt. Je nach Einsatzbedingungen und Kundenanforderungen können mit ihm Durchsätze zwischen 3 und 160 m³/h erzielt werden. Werden noch höhere Durchsätze gefordert, sind inzwischen weitere Typen der Baureihe HGF verfügbar. Die derzeit größte Ausführung, der HGF 100-2, verfügt über zwei, links und rechts des Permanentmagnetrotors angeordnete Abscheidematrizes von je 1 m Länge. Abb. 2 zeigt einen HGF 100-2 während der Fertigung (a) sowie während des konkreten Betriebs unter den harten Einsatzbedingungen in einem Walzwerk (b).

Ein typisches Einsatzgebiet des HGF sind die Vorreinigungsstufen in Walzwerken. In der Vorreinigung werden dabei dem Ausgangsmaterial anhaftende Fette und Öle verseift sowie anhaftende Feinstpartikel aus Metall und Zunder ent-

fernt. Um die geforderten Qualitäten von unter 10 mg verbleibenden Feststoffen pro m² Blech zu erfüllen, ist dabei eine konstante Pflege der Entfettungsbäder notwendig. Die mittlere Korngröße der zu entfernenden Partikel liegt bei nur ca. 1,5 µm bei einem Eisenanteil des Gesamtfeststoffs von ca. 50 %. Durch den Einsatz eines HGF im Bypass konnte der Eisengehalt in den Tauchentfettungsbädern von ursprünglich über 200 mg/l auf im Mittel 50 mg/l reduziert werden. Noch entscheidender für den störungsfreien Betrieb der gesamten Entfettungsanlage ist jedoch der Schutz der Ultrafiltrationsanlage, die zur Entfernung feinsten Seifenpartikel eingesetzt wird. Durch den Einbau zweier HGF im Jahr 2005 konnte die Eisenkonzentration im Zulauf der Membranmodule um bis zu 90 % gesenkt werden. Die Ultrafiltrationsanlage bezieht ihren Zulauf dabei aus einem Zwischenbehälter, der direkt aus dem Filtrat des HGF gespeist wird. Die Magnetfilter arbeiten im Dauerbetrieb, nur unterbrochen durch eine wö-

chentliche manuelle Kontrolle und Reinigung von wenigen Minuten. Aktuelle Fortentwicklungen der HGMS-Technologie am ITC-WGT zielen vor allem in Richtung kleinerer Systeme für einen dezentralen Einbau sowie in Richtung spezieller Ausführungen zur Verbesserung der Filterabreinigung im Falle adhäsiver Komponenten in den Zuläufen.

Magnetseparation im Mikroliter-Maßstab

Das zweite Beispiel für einen erfolgreichen Transfer von am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelter Magnettechnologie arbeitet in Flüssigkeitsvolumina, die ca. acht Größenordnungen geringer sind als die durch einen HGF bearbeiteten. Anstelle der Partikel-elimination aus 10 m³/h lag die Aufgabenstellung hier in einer automatisierbaren Abtrennung und Resuspendierung magnetischer Mikropartikel aus Probenvolumina bis hinab in den Bereich von 100 µl und darunter. Entsprechende Aufgabenstellungen finden sich im



Abb. 2: Fotos der derzeit größten Ausführung des Hochgradienten-Magnetseparators Typ HGF mit zwei Abscheidematrizes von je 1 m Länge. a) Zwei HGF 100-2 während der Fertigung. b) HGF 100-2 inklusive Verrohrung während des Einsatzes in einem Walzwerk.

Bereich der Probenaufbereitung für die Bioanalytik, Forensik und medizinische Diagnostik. In den genannten Gebieten ist oftmals eine Isolierung und Reinigung von Biomolekülen, wie z. B. Nukleinsäuren oder Proteinen, aus geringsten Probenmengen eine notwendige Voraussetzung für anschließende analytische Techniken [7, 8]. Ein Vergleich verschiedener Verfahren zur Probenaufbereitung zeigt rasch die Vorteile des Einsatzes funktioneller magnetischer Mikropartikel, sogenannter Magnetbeads, gegenüber klassischen Techniken wie Extraktion oder Adsorption an Festphasen.

Die Handhabung magnetischer Partikel mit Durchmessern von ca. 1 µm in Volumina bis zu wenigen Millilitern kann im Falle weniger Proben über einfache Handmagnete oder Magnettracks erfolgen. In den genannten Anwendungsgebieten ist aber oftmals die rasche Bearbeitung einer großen Probenanzahl notwendig. Bei dem Einsatz von automatisierten Handhabungsrobotern stellt sich dabei das Problem, dass neben einer Separation auch eine Überführung der Magnetpartikel in neue Lösungen und eine anschließende effiziente Resuspendierung gefordert sind. Diese, mittels klassischer Permanentmagnete nicht erreichbare, Kombination von Fähigkeiten wird durch ein am ITC-WGT in Zusammenarbeit mit der Firma chemagen Biopolymer-Technologie AG entwickeltes und patentiertes Separations- und Resuspensionsprinzip erreicht [9]. Das Prinzip wurde rasch nach seiner

Entwicklung durch die Firma chemagen Biopolymertechnologie AG in Lizenz genommen und bis zur Marktreife entwickelt. Einen Ausschnitt des resultierenden kommerziellen Produkts, dem chemagic Magnetseparations Modul I, zeigt Abb. 3.

Bei dem chemagic System wird die magnetische Separation der Partikel durch den Einsatz eines Elektromagneten in Kombination mit auswechselbaren „Separationsköpfen“ erreicht. Die Separationsköpfe verfügen über 12 oder 96 magnetisierbare Stäbe aus einem speziellen, weichmagnetischen Material. Zur Partikelseparation wird der Separationskopf abgesenkt, wodurch die Stäbe in die Probengefäße eintauchen. Durch Einschalten des Elektromagneten werden die Stäbe magnetisch und sammeln an ihrem Ende die Partikel ein (Abb. 4). Anschließend können die am Stab anhaf-



Abb. 3: Detailansicht des chemagic Magnetic Separation Module I der Firma chemagen. Zu sehen sind der Elektromagnet sowie der verfahrbare Separationskopf mit in diesem Fall zwölf magnetisierbaren sowie um ihre Achse rotierbaren Metallstäben. Durch Einfahren des Separatorkopfs in die Bohrung des eingeschalteten Magneten werden die Stäbe temporär magnetisiert, wodurch sich in Probenmaterial suspendierte magnetische Mikropartikel an den Stäben anlagern.

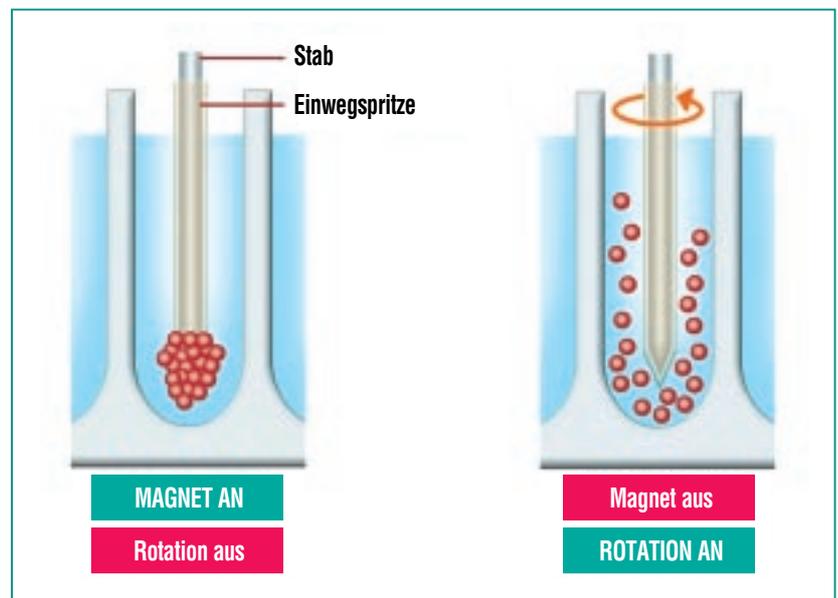


Abb. 4: Schematische Darstellung des Betriebszustands des chemagic Magnetseparations Modul I während der Partikelabscheidung bzw. -resuspension.

Anwendung	Ausgangsmedium	Proben- volumen	Referenz
Isolierung viraler Nukleinsäuren aus gepoolten Plasmaproben von Blutspendern zum Nachweis von Infektionserregern (z. B. Hepatitis)	Plasma	10 ml	[10, 11]
Isolierung genomischer DNA aus Vollblut zur HLA-Klassifizierung (Voraussetzung zur Identifizierung von Spendern für Stammzelltransplantationen)	Vollblut	2 ml	[12]
Isolierung viraler oder bakterieller Nukleinsäuren aus Patientenproben zum Nachweis unterschiedlicher Krankheitserreger (u. a. Chlamydien, Borrelien)	Blut, Plasma, Urin, Abstriche, Muttermilch, Stuhl	200 µl	
Hochdurchsatzanalyse der Scrapie-Anfälligkeit bei Schafen	Schafsblut	15 µl	[13]

Tab. 1: Anwendungen des chemagic Systems zur Hochdurchsatz-Probenaufbereitung.

tenden Partikelpellets durch Verfahren des Separationskopfs in neue Lösungen überführt werden. Zur Resuspendierung der Partikel werden der Magnet ausgeschaltet und gleichzeitig die Stäbe über einen Motor in schnelle Rotation um ihre Längsachse versetzt. Hierdurch kommt es zu einer raschen und zugleich schonenden Resuspendierung der Partikel.

Seit seiner Markteinführung im Jahr 2002 hat sich das chemagic System in zahlreichen Anwendungen bewährt, bei denen eine verlässliche Hochdurchsatz-Probenaufbereitung unbedingte Voraussetzung ist. Wie aus der kurzen Übersicht in Tab. 1 zu erkennen, erfordern Anwendungen wie die Untersuchung von Blutspenden nach viralen Infektionen oder die HLA-Typisierung im Rahmen der Identifizierung passender Stammzellen-Spender für Leukämieerkrankte eine extrem hohe Verlässlichkeit der eingesetzten Techniken.

Auch im Falle der Anwendung der Magnetseparation zur automatisierten Handhabung von Magnetpartikeln in kleinsten Volumina steht die Entwicklung nicht still. So erwies sich der Durchsatz des chemagic Systems von bis zu 4000 Proben pro Tag für viele Anwendungen als zu groß. Die jüngste Umsetzung des beschriebenen Magnetseparationsprinzips, der chemagic Prepito, beschränkt sich daher auf die parallele Bearbeitung von bis zu zwölf Proben, wobei in dieses neue System bereits eine automatisierte Dosierung der benötigten Pufferlösungen als Standard integriert ist [14].

Fazit

Der Einsatz moderner Magnettechnologie bietet vom µl- bis zum m³-Maßstab die Möglichkeit einer effizienten Elimination bzw. Handhabung magnetischer Feinstpartikel im Größenbereich weniger Mikrometer. Die Anwendungen rei-

chen dabei von der Verbesserung der Produktqualität und dem Schutz nachgeschalteter Systeme bis hin zu modernen Hochdurchsatztechnologien im Zusammenhang mit bioanalytischen oder medizinischen Fragestellungen. Die auf dem Gebiet der Magnettechnologie aktuellen und zukünftigen Arbeiten am ITC-WGT konzentrieren sich insbesondere auf das bisher wenig untersuchte technische Anwendungspotenzial funktioneller magnetischer Mikro- und Nanopartikel in den Bereichen Biokatalyse, Bioproduktaufreinigung sowie allgemein dem Bereich selektiver Sorptionsverfahren. Durch die Kombination funktioneller Magnetpartikel mit maßgeschneiderter Magnettechnologie eröffnet sich die Möglichkeit neuer, vereinfachter Prozesse mit verbesserter Kinetik und Ausbeute.

Literatur

- [1] R. Gerber, R.R. Birss, *High Gradient Magnetic Separation, Magnetic materials and their applications series*, ed. J.E. Thompson, Vol. 1, 1983, Chichester: Research Studies Press
- [2] M. Franzreb, et al., *Hochgradienten-Magnetabscheider* DE 19 626 999 21.08.1997
- [3] M. Franzreb, *Anwendung der magnetischen Separation zur Abwasserreinigung, Nachrichten Forschungszentrum Karlsruhe, Ausgabe 1/2001, p. 51–58*
- [4] M. Franzreb, W.H. Höll, *Phosphate removal by High-Gradient Magnetic Filtration Using Permanent Magnets, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2000, 10(1): p. 923–926*
- [5] C. Hoffmann, M. Franzreb, W.H. Höll, *A novel high-gradient magnetic separator (HGMS) design for biotech applications, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2002, 12(1): p. 963–966*
- [6] M. Franzreb, H. Leinen, G. Warlitz, *Hochgradienten-Magnetfilter und Verfahren zum Abtrennen von schwach magnetisierbaren Partikeln aus flüssigen Medien, DE10117659 9.4.2001*
- [7] M. Franzreb, et al., *Protein purification using magnetic adsorbent particles, Appl. Microbiol. Biotechnol., 2006, 70: p. 505–516*
- [8] I. Safarík, M. Safariková, *Magnetic nanoparticles and bioscience, Monatshefte für Chemie, 2002, 133: p. 737–759*
- [9] M. Franzreb, J. Wohlgemuth, *Verfahren zum Abtrennen eines dispergierten oder gelösten Stoffes und Magnetseparator, DE 10 057 396 4.4.2002*
- [10] L. Pichl, et al., *Magnetic bead technology in viral RNA and DNA extraction from plasma minipools, Transfusion, 2005, 45(July): p. 1106–1110*
- [11] M. Störmer, K. Kleesiek, J. Dreier, *High-Volume Extraction of Nucleic Acids by Magnetic Bead technology for Ultrasensitive Detection of Bacteria in Blood Components, Clinical Chemistry, 2007, 53(1): p. 104–110*
- [12] M. Verboom, et al., *High Throughput DNA Isolation by Chemagen Technology for HLA Registry Typing. in 20th European Immunogenetics Conference (EFI), 2006, Oslo, Norway*
- [13] R. Schubbert, S. Jacobs, *Hochdurchsatzanalyse der Scrapie-Anfälligkeit bei Schafen, Laborwelt, 2005, 3: p. 40–41*
- [14] *chemagen Biopolymer-Technologie AG (2007)*

Ein einfaches und kostengünstiges Verfahren zur Dioxinabscheidung – von den Grundlagen zur technischen Anwendung

S. Kreis, H. Hunsinger, ITC

Einleitung

Hinter der Bezeichnung „Dioxine“ verbergen sich zwei chemische Verbindungsklassen (polychlorierte Dibenzop-dioxine und Dibenzofurane, PCDD/F) mit insgesamt 210 einzelnen chemischen Verbindungen (Kongeneren). Die Toxizität der einzelnen Kongenere variiert sehr stark in Abhängigkeit von der Stellung und der Anzahl der Cl-Atome im Molekül. Dioxine mit weniger als vier Cl-Atomen werden als untoxisch betrachtet. Da Dioxine mit vier bis acht Cl-Atomen (TetraCDD/F-OctaCDD/F) in Umweltproben immer als Gemisch der verschiedenen Kongenere vorliegen, wurde aus Normierungsgründen das System der Toxizitätsäquivalenzfaktoren (I-TEF) eingeführt. Dieses System ordnet jeder einzelnen Verbindung einen Toxizitätsfaktor zu und ermöglicht dadurch, unterschiedlich zusammengesetzte Dioxinproben in ihrer Auswirkung auf die Umwelt zu vergleichen. Der analytische Messwert der einzelnen Kongenere wird mit dem Toxizitätsfaktor multipliziert und die Summe dieser Werte ergibt den TEQ-Wert (Toxizitätsäquivalenzwert) einer Probe. Alle

gesetzlichen Regelungen zur Emission von Dioxinen beruhen auf diesem System. Prinzipiell gilt, dass niedriger chlorierte PCDD/F (z. B. TCDD) einen höheren I-TEF-Wert haben als höher chlorierte PCDD/F (z. B. OCDD). Eine Anreicherung der niedrigchlorierten PCDD/F in einer Probe führt zu einer Erhöhung des TEQ-Wertes.

Im Rahmen unserer Untersuchungen zur Bildung/Zerstörung von Dioxinen an der Anlage TAMARA stellten wir fest, dass sich die Zusammensetzung der Dioxine beim Durchströmen der Nasswäscher stark änderte [1]. Als Ursache hierfür wurde von uns die reversible Absorption der PCDD/F [2] in dem als Konstruktionswerkstoff eingesetzten Polypropylen (PP) identifiziert (Abb. 1a).

Dieser Prozess hat in Verbrennungsanlagen mit Nasswaschsystemen, in denen PP als Werkstoff eingesetzt wird (z. B. Füllkörper, Tropfenabscheider) eine besondere Bedeutung. Ein Teil der in das Nasswaschsystem eingebrachten Dioxine wird im PP absorbiert und angereichert. Im Nicht-Regelbetrieb (An- und Abfahrzeiten, Störfälle) können im Vergleich zum

Regelbetrieb deutlich höhere PCDD/F-Konzentrationen in das Nasswaschsystem eintreten. Dies bedeutet, dass nach einer längeren Betriebszeit der Nasswäscher die Dioxine so stark im PP angereichert sind, daß schon geringe Änderungen der Temperatur oder der PCDD/F-Konzentration im Abgas zu einer PCDD/F-Desorption führen („Memory-Effekt“).

Da niedrig chlorierte PCDD/F leichter desorbiert werden (höherer Dampfdruck, höhere Diffusionsgeschwindigkeit) und einen höheren Beitrag zum TEQ-Wert liefern, führt diese Desorption dazu, dass der TEQ-Wert im Abgas nach Wäschern höher liegen kann als die Eingangskonzentration. Häufig wird dann der Emissionsgrenzwert überschritten. Daher muss in solchen Anlagen entweder ein zusätzliches Aggregat zur PCDD/F-Abscheidung am Ende der Rauchgasreinigungsstrecke nachgerüstet werden (Polizeifilter) oder die Freisetzung der PCDD/F aus dem Nasswaschsystem verhindert werden. Aus der Literatur [3] sind zu diesem Zweck unter anderem Verfahren bekannt, bei denen dem Waschwasser feine Aktivkohlepartikel oder Tenside zugesetzt

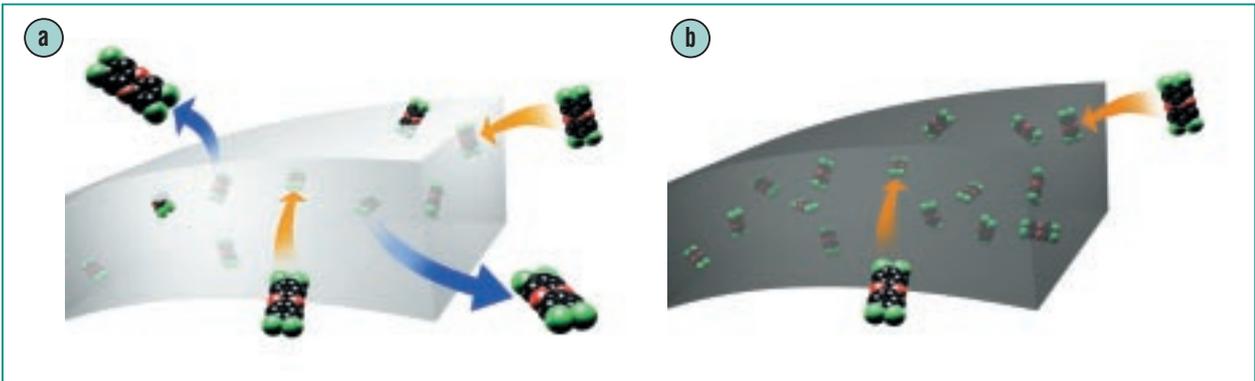


Abb.1: Schematische Darstellung a) des reversiblen Absorptions-/Desorptions-Gleichgewichtes der Dioxine in PP, b) der irreversiblen Dioxinabscheidung in Füllstoff-dotiertem PP (C-PP).

werden, die eine PCDD/F-Abscheidung bewirken wodurch die PCDD/F-Konzentration im Abgas abgesenkt wird. Diese Verfahren benötigen Dosiereinrichtungen, greifen aktiv in den Prozess ein und können die Eigenschaften des Nasswaschsystems nachteilig beeinflussen. In beiden Verfahren können feine, mit Dioxinen angereicherte Partikel (C-Partikel oder Aerosol-Tröpfchen) im Abgasstrom mitgerissen und emittiert werden.

Idee

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde die Idee entwickelt, durch Einbringen eines stark adsorptiv wirkenden Füllstoffes (z. B. Aktivkohle) in das PP die Desorption der Dioxine und damit den Memory-Effekt zu unterdrücken.

Dieses Material würde die Vorteile des PP (selektive PCDD/F-Abscheidung, kein Abrieb) mit den Vorteilen eines Füllstoffes (starke, irreversible PCDD/F-Adsorption)

vereinen. Ein solches Material, dessen mechanische Eigenschaften gegenüber reinem PP durch den Füllstoff nicht wesentlich verändert werden, wäre sowohl als Festbettfilter im Abgassystem als auch zur Konstruktion von Bauteilen im Nasswaschsystem geeignet.

Ein zusätzlicher Vorteil dieses Materials ergibt sich bei der Entsorgung. Aufgrund der Membranfunktion des PP sollte eine selektive Abscheidung organischer Verbindungen auf dem Füllstoff stattfinden. Anorganische Gasbestandteile, vor allem Quecksilber, würden auf dem Füllstoff nicht adsorbiert. Dadurch wäre es möglich, gebrauchtes C-PP-Material durch Rückführung in die Verbrennung zu entsorgen. Während des Verbrennungsvorgangs werden die organischen Schadstoffe, auch die Dioxine, praktisch vollständig zerstört. Es wäre kein Transport und keine Deponierung dioxinhaltiger Rückstände notwendig.

Basisuntersuchungen

Mit diesen Randbedingungen und den bei uns vorhandenen technischen Möglichkeiten wurde zum Zweck einer schnellen Realisierung beschlossen, fein gemahlene (<100 µm) Herdofenkoks (HOK) in das PP einzubringen und mit diesem Material (C-PP) die ersten Versuche durchzuführen. Als Referenz wurde ein Parallelversuch mit purem PP-Granulat durchgeführt.

Über ein bei uns entwickeltes Verfahren [4] wurde Raumluft mit ca. 500 ng/Nm³ Dioxinen (Cl4-Cl8) angereichert und bei 78–80 °C in einer silanisierten Glassäule (Durchmesser: 4,5 cm) jeweils über ein

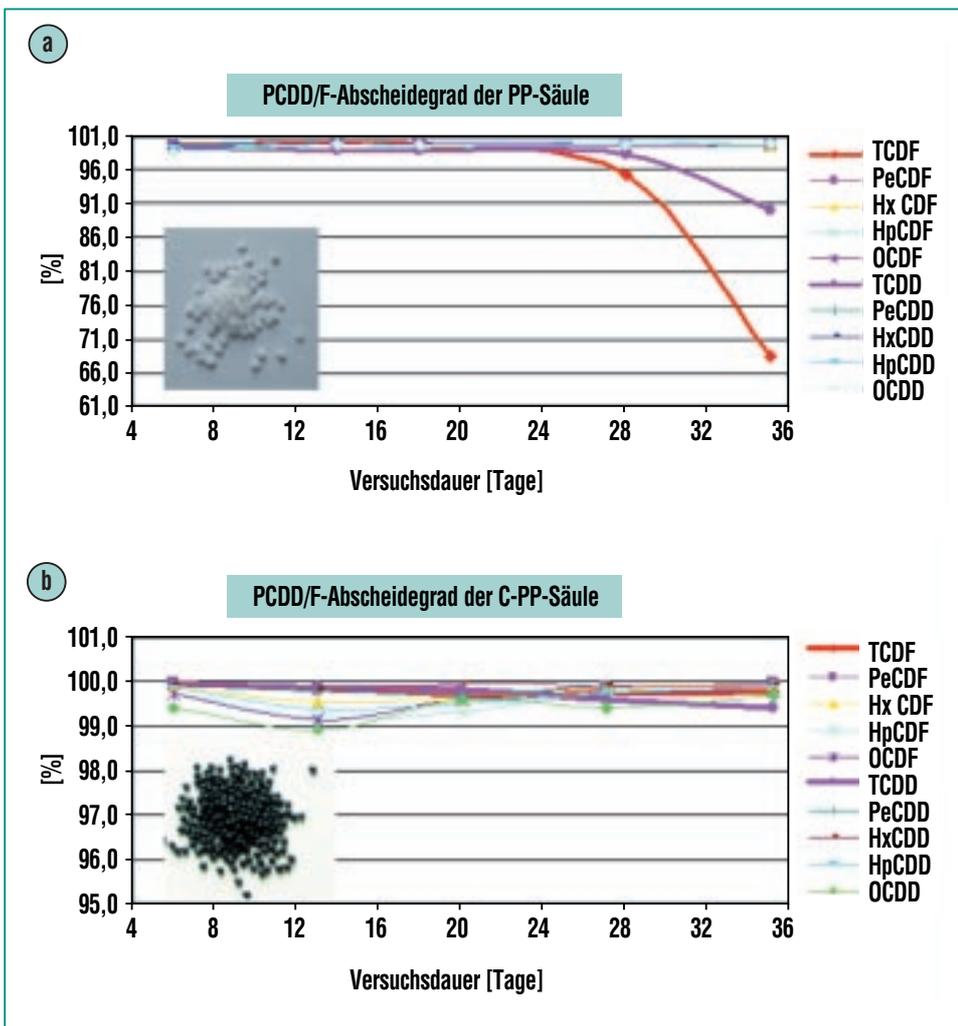


Abb. 2: Abscheidegrade der Dioxine nach Chlorierungsgrad in den beiden parallel durchgeführten Laborexperimenten.

Festbett aus C-PP- bzw. PP-Granulat geleitet. Das Festbett war in einzelne Betten unterteilt. Die PCDD/F-Konzentration am Eingang und Ausgang des PP-Bettes wurde kontinuierlich gemessen. Alle Bestandteile der Apparatur, die mit PCDD/F in Berührung kamen, bestanden aus silanisiertem Glas. Die Adsorberkartuschen der Probenahmen wurden zeitgleich im Abstand einiger Tage ausgewechselt und auf PCDD/F untersucht. Die Versuchszeit betrug jeweils 35 Tage (Abb. 2).

Die Abscheidegrade der beiden Experimente für die einzelnen Chlorierungsstufen ist in Abb. 2b graphisch dargestellt. Deutlich ist zu sehen, dass im Fall des PP der Abscheidegrad für die hochchlorierten PCDD/F über den gesamten Versuchszeitraum praktisch konstant bleiben, während die Abscheidegrade für die tetrachlorierten PCDD/F nach ca. 30 Tagen deutlich abfallen; d. h. die niedrigchlorierten PCDD/F durchdringen aufgrund ihrer reversiblen Abscheidung im PP den Filter schon nach kurzer Zeit.

Im Fall des C-PP bleibt der Abscheidegrad für alle Chlorierungsstufen der PCDD/F über den gesamten Versuchszeitraum praktisch konstant, d. h. es findet eine irreversible Adsorption an der Oberfläche der im PP eingelagerten Kohlepartikel statt.

Dieses Ergebnis wurde in einem nachfolgenden Desorptionsversuch bestätigt. Für diesen Versuch wurden Dioxin-beladene C-PP/PP-Proben aus dem Laborversuch bei 120 °C von erhitzter Raumluft durchströmt. Beide Versuche wurden mit identischen Versuchspa-

rametern durchgeführt. Die freigesetzten PCDD/F wurden unmittelbar danach auf Herdofenkoks adsorbiert. Die PCDD/F-Beladung des Herdofenkokes wurde nach Versuchsende analysiert (Abb. 3).

Es zeigte sich, daß die aus C-PP thermisch desorbierbare PCDD/F-Menge mindestens um den Faktor 50 niedriger liegt als aus PP. Dies bedeutet, daß der überwiegende Teil der PCDD/F im C-PP an den Kohlenstoff adsorbiert ist und thermisch nicht mehr desorbierbar ist.

Auf der Basis dieser Ergebnisse wurde eine Patentanmeldung [5] durchgeführt.

Technische Umsetzung

Noch während der Patentanmeldung (Februar 2001) gab es erste Kontakte mit der schwedischen Firma Götaverken Miljö AB (GMAB) aus Göteborg, die im Juli 2001 zum Abschluss eines Lizenzvertrages führten. Im September 2001 wurde die erste kommerzielle Müll-

verbrennungsanlage in Thisted/Dänemark mit Füllkörpern aus „schwarzem PP“ ausgerüstet. Diese Anlage diente der Gewinnung von Daten zur Abscheideeffizienz im großtechnischen Dauerbetrieb und der Optimierung des Materials (Füllstoff, Füllstoffgehalt, mechanische Eigenschaften). Bereits nach sechs Monaten Betrieb waren die Ergebnisse so positiv, dass GMAB mit dem zwischenzeitlich ADIOX® getauften Material im Sommer 2002 auf den Markt kam [6]. Die ersten großtechnischen Anwendungen bestanden im Wesentlichen im Ersatz von PP-Füllkörpern in Wäschern durch ADIOX®-Füllkörper zur Unterdrückung des „Memory-Effektes“ und zur zusätzlichen Dioxinabscheidung in Altanlagen zur Unterstützung vorhandener Dioxinabscheider.

Auf der Basis der dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden in enger Zusammenarbeit zwischen dem Forschungszentrum Karlsruhe und

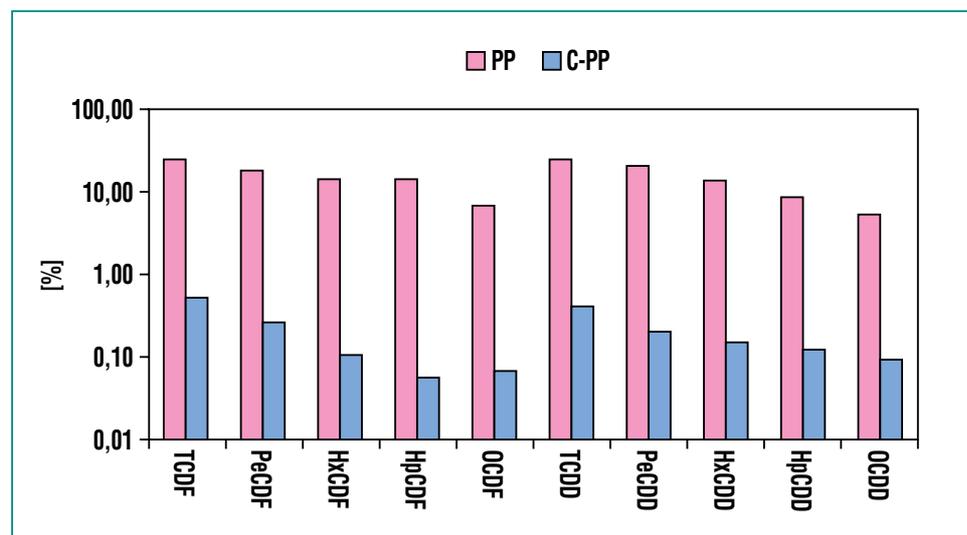


Abb. 3: Vergleich der Desorptionsgrade von Dioxin-beladenem PP/C-PP bei 120 °C aufgeschlüsselt nach Chlorierungsgrad (Desorptionsgrad in % = Desorbierte Menge PCDD/F / Gesamtbeladung PCDD/F*100).

GMAB weitergehende Abgasreinigungskonzepte entwickelt und realisiert:

Dioxinabscheidung in Nasswäschern mit ADIOX®-Füllkörpern

Konzeption:

- Einhaltung aller gesetzlichen Emissionsgrenzwerte mit robusten und kostengünstigen Komponenten.
- Staubabscheidung: Elektrofilter; Schadgase + Dioxine: ADIOX®-Nasswäscher.
- Integration in bestehende Rauchgasreinigungsanlagen nur durch einfache Modifikation der Nasswäscher.

Ende 2004 wurde die nach dieser Konzeption erneuerte Abgasreinigung der Müllverbrennungsanlage (MVA) in Holstebro (Dänemark) in



Abb. 4: Bild der Nasswäscher der MVA Holstebro.

Betrieb genommen (Abb. 4 u. 5). Erstmals werden in dieser Anlage Dioxine ausschließlich durch die Kombination Elektrofilter/Nasswäscher weit unter den gesetzlichen Emissionsgrenzwert abgesenkt. Die Anlage läuft seit Inbetriebnahme problemlos und der Abscheidegrad für die PCDD/F

liegt stabil bei ca. 99 % (Abb. 6). Obwohl die Nasswäscher zur Dioxinabscheidung etwas größer als üblich dimensioniert sind, ist dieses Konzept den Alternativverfahren (Aktivkohledosierung mit Gewebefilter, Katalytische Verfahren) ökonomisch und betriebstechnisch überlegen.

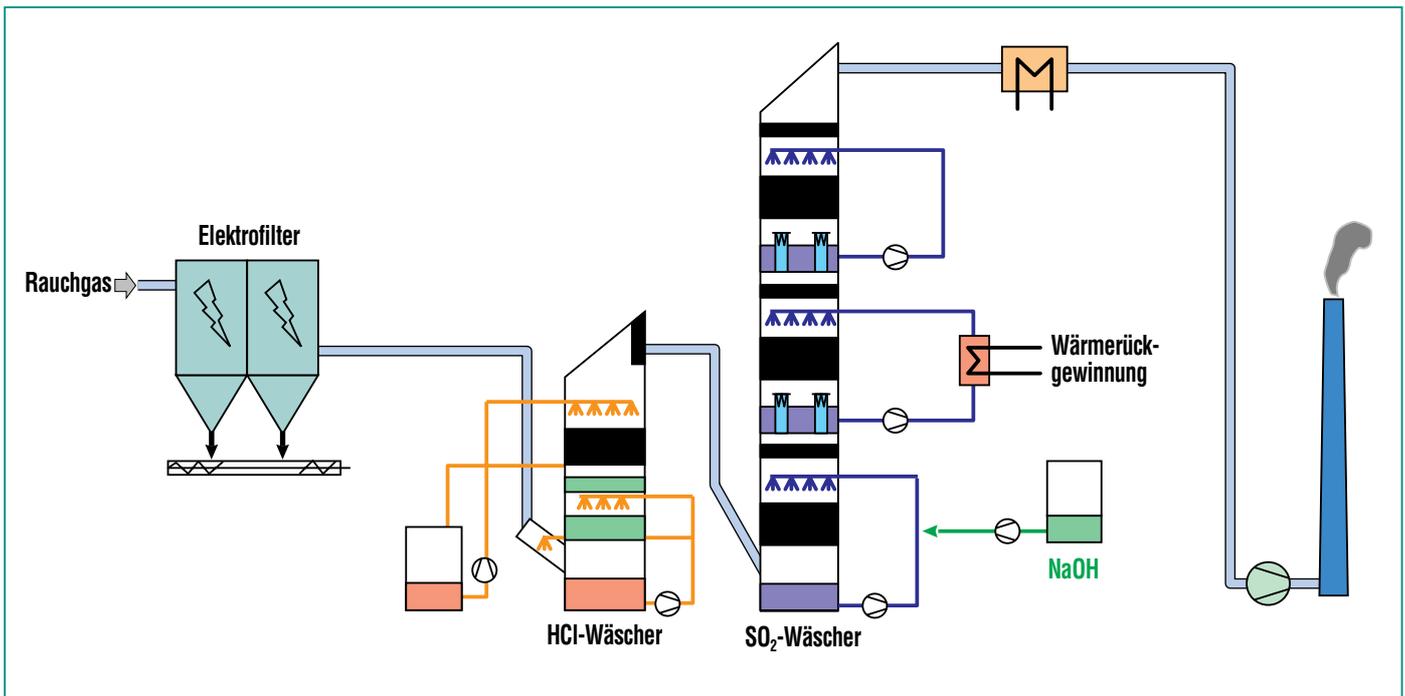


Abb. 5: Schema der Rauchgasreinigung Mølbjergverket in Holstebro/Dänemark.

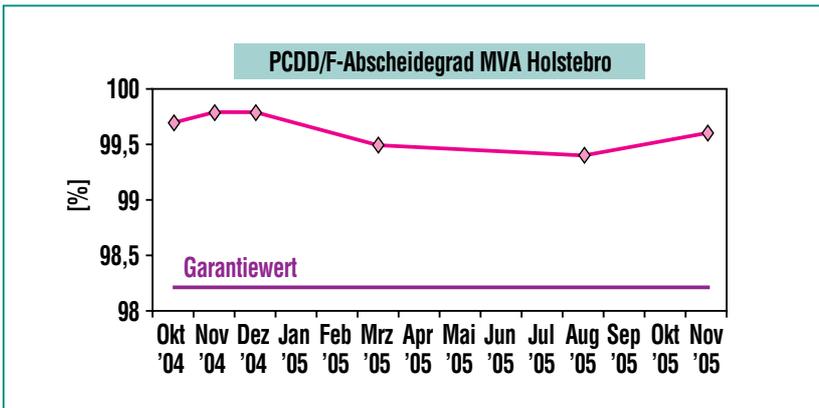


Abb. 6: PCDD/F-Abscheidegrad der ADIOX®-Wäscher in der MVA Holstebro während des ersten Betriebsjahres.

Einsatz als Trockenadsorber

Konzeption:

Einsatz als Polizeifilter nach Gewebefilter/Nasswäscher

Im Jahr 2005 wurde ein mit ADIOX®-Formkörpern gefüllter Adsorbenturm im Bypass einer MVA in Göteborg in Betrieb genommen. Das Abgas (1000 Nm³/h) wurde nach Nasswäschern entnommen und durch einen Wärmetauscher auf 80 °C erhitzt, um Kondensation im Adsorber zu verhindern.

Nach einem Testbetrieb von 12 Monaten lagen genügend Daten zur Auslegung einer technischen Anlage vor. Wie erwartet, können im trockenen Betrieb gleiche Abscheidegrade mit kleineren Bauabmessungen als im Nassbetrieb erreicht werden.

In der MVA von Lynköping (Schweden) wurde diese Konzeption als Polizeifilter im Jahr 2006 realisiert (Abb. 7 u. 8). Zunächst erfolgt die Hauptabscheidung der Dioxine durch die Aktivkohle-(AK)-Dosis-



Abb. 7: Teilansicht der Rauchgasreinigung MVA Linköping,

reinigung auf die Gewebefilter (Flugstromverfahren). Der ADIOX®-Filter dient zum Abfangen von Emissionsspitzen im Nicht-Regelbetrieb (An-/Abfahrtsbetrieb, Störfälle).

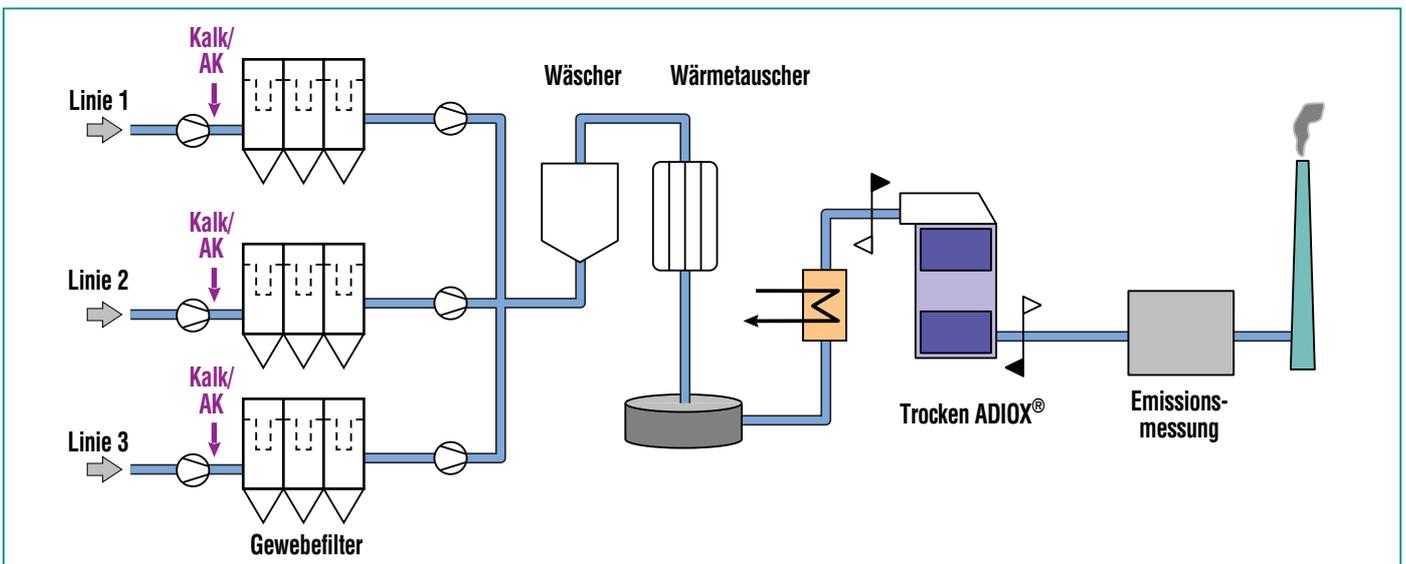


Abb. 8: Schema der Rauchgasreinigung Techniska Verken in Lynköping/Schweden.

Bisher wurden zu diesem Zweck üblicherweise AK-Festbettadsorber (Nachteile: Abrieb, Selbstentzündung, Differenzdruck) oder Katalysatoren (Nachteile: hohe Investitionskosten, hohe Temperaturen) eingesetzt. Erste Messungen in 2007 belegen die volle Funktionsfähigkeit.

Stand der Dinge

- PCT-Anmeldung; Patente erteilt in allen großen potenziellen Märkten (Deutschland, USA, Russland, China, Indien).
- Füllkörper unterschiedlicher Geometrie und Größe aus ADIOX®-Material sind im Einsatz.
- Standzeiten des Materials ≥ 2 Jahre.
- Gewebe aus ADIOX®-Material als Tropfenabscheider sind im Einsatz.
- Installation von ADIOX®-Formkörpern in mehr als 50 technischen Anlagen.
- Installationen in 8 europäischen Ländern (Abb. 9) sowie in USA und Kanada.



Abb. 9: ADIOX®-Installationen in Europa.

- Einsatz nicht nur in Müllverbrennungsanlagen sondern auch in der Chemischen Industrie und der Papierindustrie
- Entsorgung Dioxin-beladener ADIOX®-Füllkörper durch Verbrennung ohne Einfluss auf die Emissionen wurde in einer Müllverbrennungsanlage nachgewiesen.

Literatur

- | | | |
|--|---|---|
| [1] S. Kreis, H. Hunsinger, H. Vogg, <i>Chemosphere</i> 32, 73 (1996) | [3] C. de Vries, <i>VDI-Seminar</i> 435911, 16./17.09.99, München | [5] DE 10164066 (2005) |
| [2] S. Kreis, H. Hunsinger, H. Seifert, <i>Chemosphere</i> 40, 1029 (2000) | [4] DE 4425657 (1999) | [6] S. Andersson, S. Kreis, H. Hunsinger, <i>Organohalogen compounds</i> , 58, 157 (2002) |

Neuartige reaktionsgesinterte Keramiken zur Herstellung von vollkeramischem Zahnersatz

J. R. Binder, N. Schlechtriemen, E. Günther, H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, J. Haußelt, IMF;
 A. Bodenmiller, E. Klose, E. Knorpp, KaVo Dental GmbH;
 G. Heydecke, J. R. Strub, Universitätsklinikum Freiburg, Abteilung für Zahnärztliche Prothetik

Einleitung

Maßgeschneiderte, auf spezifische Anforderungen hin optimierte Keramiken gewinnen in vielen technischen Bereichen zunehmend an Bedeutung. Ihre besonderen Eigenschaften erhalten die modernen Hochleistungswerkstoffe erst durch die Verwendung synthetischer Ausgangsverbindungen, die unter kontrollierten Bedingungen weiterverarbeitet werden. Die Herstellung der keramischen Bauteile basiert in der Regel auf pulvertechnologischen Formgebungsverfahren und einer Verdichtung der porösen Formkörper durch einen Hochtemperaturprozess, dem Sintern. Dabei tritt eine lineare Schwindung von typischerweise 15–20 % auf. Die so genannte Sinterschwindung wird bei der Fertigung berücksichtigt, in dem der zu sinternde Formkörper entsprechend größer dimensioniert wird. Erfolgt die Schwindung nicht isotrop, so muss das Bauteil aufwändigen und kostenintensiven Nachbearbeitungsprozessen unterzogen werden. Speziell bei Mikrobauteilen ist eine Nachbearbeitung aufgrund der geringen Di-

mensionen häufig nicht möglich. Daher sind für den Einsatz von keramischen Werkstoffen in der Mikrosystemtechnik Verfahren vorteilhaft, mit denen der Sinterschwund minimiert werden kann. Zur Herstellung von „near net shape“-Keramiken [1] stellen Reaktionsinterverfahren eine interessante Prozesstechnik dar.

Basierend auf dem Prinzip des Reaktionsinterns wurde im Institut für Materialforschung III des Forschungszentrums Karlsruhe innerhalb des Programms Nano- und Mikrosysteme ein Verfahren entwickelt, mit dem die Sinterschwindung nicht nur minimiert, sondern vollständig kompensiert werden kann. Dies wird durch den Einsatz von intermetallischen Verbindungen ermöglicht. Im System $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-ZrO}_2$ stehen mit ZrSi_2 , Zr_2Si und ZrAl_3 drei intermetallische Verbindungen zur Verfügung, mit denen eine ganze Reihe von keramischen Materialien mit unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften (Tab. 1) hergestellt werden können [2–5].

Zur Etablierung dieser form- und dimensionstreu sinternden Kera-

miken in der Mikrosystemtechnik werden derzeit verschiedene Mikrostrukturierungsverfahren verfolgt [6, 7]. Im Bereich der Dentaltechnik ist man bezüglich der industriellen Nutzung dieses innovativen Werkstoffes bereits einen Schritt weiter. Hier gelang der Technologietransfer einer reaktionsgesinterten Zirkonkeramik. Der Werkstoff wurde in enger Zusammenarbeit mit der Firma KaVo Dental GmbH im Hinblick auf die Bearbeitung mit dem KaVo Everest® CAD/CAM-System [8] und den Anforderungen der Zahnmedizin bis zur Marktreife weiterentwickelt. Begleitet wurden die Entwicklungen von Beginn an durch In-vitro- und später durch In-vivo-Studien des Universitätsklinikums Freiburg.

CAD/CAM-Technologie in der Dentaltechnik

Mit der CAD/CAM-Technologie hat ein automatisiertes Fertigungsverfahren Einzug in die Dentaltechnik gehalten, das nicht nur aus wirtschaftlicher Sicht interessant ist, sondern die Herstellung von vollkeramischem Zahnersatz, insbesondere aus oxidkeramischen

	Sintertemperatur	Sinterdichte		Weibull-Parameter		Risszähigkeit
	[°C]	[g/cm ³]	[% TD]	σ_0 [MPa]	m [-]	K_{Ic} [MPa m ^{1/2}]
SiO ₂ -Zirkon (Zr/Si = 0,75)	1600	4,19	99	311	8	3,3
Zirkon-ZrO ₂ *) (Zr/Si = 2,0)	1550	4,97	97	468	10	4,8
Mullit-ZrO ₂	1450	4,31	97	632	12	5,0
Al ₂ O ₃ -Mullit-ZrO ₂	1500	4,21	99	635	18	4,7
Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ *)	1575	4,61	98	779	17	–

*) Bei diesen Keramiken konnte die Schwindung nicht vollständig kompensiert werden.

Tab. 1: Werkstoffkennwerte von reaktionsgesinterten Keramiken im System $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-ZrO}_2$.

Werkstoffen wesentlich erleichtert bzw. erst ermöglicht. Dies führt zu einem zunehmenden Angebot an unterschiedlichen keramischen Materialien. Unter dem Gesichtspunkt der CAD/CAM-Fertigung können Dentalkeramiken in vier Gruppen eingeteilt werden [9]. Man steht vor der Wahl zwischen der Hartbearbeitung, die mit langen Maschinenlaufzeiten sowie einem hohen Werkzeugverschleiß verbunden ist, und der Weißbearbeitung, bei der der anschließende Sinterprozess zu einer linearen Schwindung von ca. 20 % führt. Des Weiteren hat man nach der Weißbearbeitung auch die Möglichkeit, über die Infiltration von Glas einen dichten Werkstoff zu erhalten [10]. Diese so genannten Infiltrationskeramiken konnten bereits mit „klassischen“ Methoden

im Dentallabor hergestellt werden [11]. Bei der seit Ende 2006 kommerziell erhältlichen KaVo Everest® HPC (high performance ceramic) handelt es sich um eine neuartige Dentalkeramik. Diese kann im Grünzustand bearbeitet werden und wird im anschließenden Reaktionssinterprozess form- und dimensionstreu gesintert.

Prinzip der KaVo Everest® HPC

Das Prinzip der schwindungsfrei sinternden Zirkonkeramik beruht auf der Kompensation der beim Sinterprozess unvermeidbar auftretenden Schwindung durch eine volumenvergrößernde Oxidationsreaktion [2]. Hierbei hat sich die Verwendung der intermetallischen Verbindung Zirkoniumdisilicid

($ZrSi_2$) als besonders günstig erwiesen, weil die Oxidationsreaktion des $ZrSi_2$ zu $ZrSiO_4$ und SiO_2 mit einer relativen hohen Volumenzunahme von 121 % verbunden ist. Die relative Volumenänderung $\Delta\tilde{V}$ während des Reaktionssinterprozesses wird letztendlich durch die Zusammensetzung des Grünkörpers bzw. durch dessen relative Massenänderung $\Delta\tilde{m}$, durch die nach der Formgebung erzielte Gründichte $\rho_{\text{Grünkörper}}$ und durch die Sinterdichte der Keramik ρ_{Keramik} bestimmt:

$$\Delta\tilde{V} = (1 + \Delta\tilde{m}) \cdot \frac{\rho_{\text{Grünkörper}}}{\rho_{\text{Keramik}}} - 1$$

In Abb. 1 wird anhand der Ergebnisse der thermischen Analyse das Prinzip des Reaktionssinterprozesses veranschaulicht.

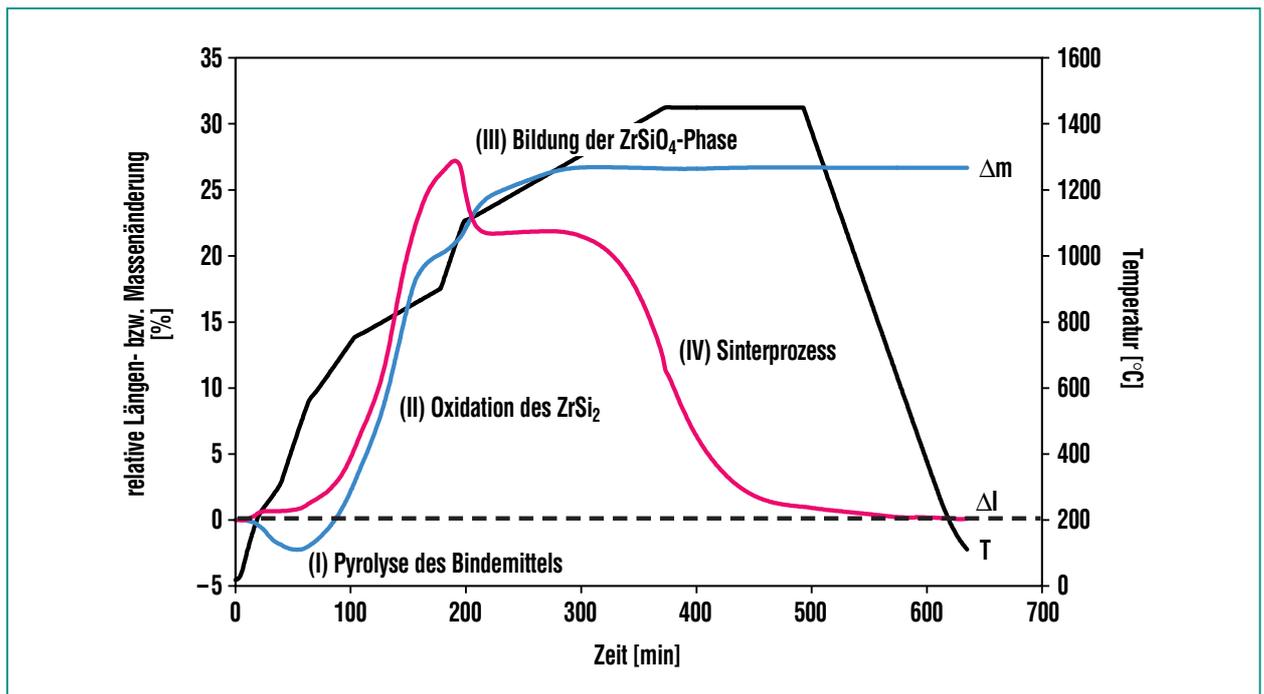


Abb. 1: Thermische Analyse einer reaktionsgesinterten Zirkonkeramik. Die vier Stadien des Reaktionssinterns – Pyrolyse des Bindemittels, Oxidation des $ZrSi_2$, Bildung der $ZrSiO_4$ -Phase und Sinterprozess – lassen sich anhand der Längen- (rot) und Massenänderung (blau) zuordnen. Am Ende hat der Formkörper wieder seine ursprüngliche Länge erreicht.

Neben Zirkoniumdisilicid sind Zirkoniumdioxid und ein siliziumorganisches Polymer die wesentlichen Bestandteile dieses Reaktionssinterverfahrens. Der Anteil des Zirkoniumdioxids beeinflusst zum einen die relative Volumenzunahme und zum anderen über das Zr/Si-Verhältnis die Werkstoffeigenschaften [3]. Das siliziumorganische Polymer ist für die Formgebung und die Grünkörperstabilität entscheidend. Zudem hat dieser so genannte „low loss binder“ gegenüber konventionellen Bindemitteln den Vorteil, dass er beim keramischen Brand zu über 80 % keramisiert und dadurch die Schwindung von vornherein minimiert. Neben diesen drei Hauptbestandteilen wurden während der Werkstoffentwicklung weitere anorganische Additive zugegeben, die nicht nur zu verbesserten Werkstoffeigenschaften führten, sondern mit denen auch die Sinter-temperatur von über 1600 °C auf 1450 °C verringert werden konnte. Dadurch ist es möglich, Kronen aus KaVo Everest® HPC und Zahnersatz aus Zirkoniumdioxid zusammen in einem Ofen zu sintern. Des Weiteren konnte durch die Zugabe von Farbpigmenten bzw. Metalloxiden eine Einfärbung der an sich weißen Keramik in dentale Grundfarben realisiert werden (Abb. 2).

Werkstoffeigenschaften der reaktionsgesinterten Keramik

Die Keramik zeichnet sich durch ihre hervorragende chemische Beständigkeit aus. Die chemische Löslichkeit liegt mit $7,2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ [12] deutlich unter dem in der DIN EN ISO 6872 geforderten Grenzwert

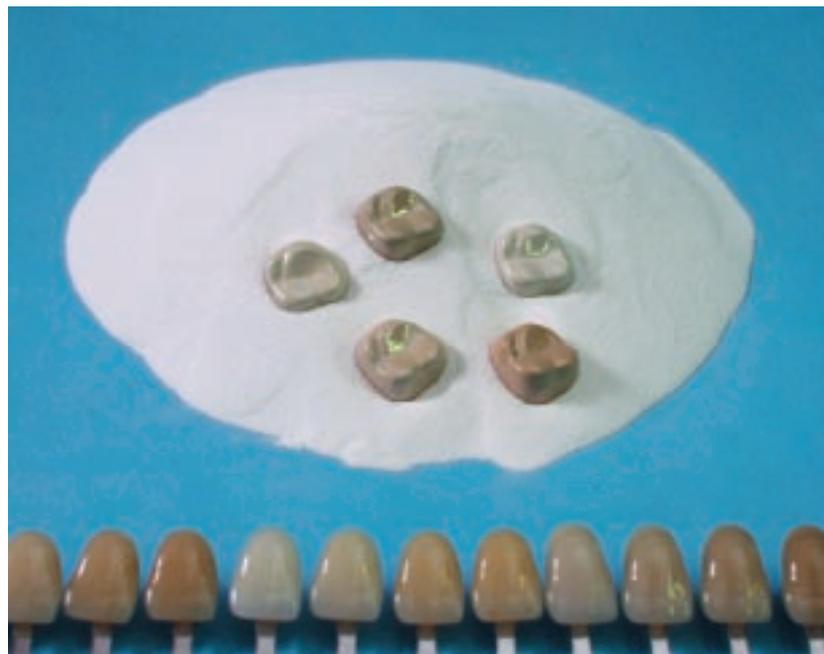


Abb. 2: Reaktionsgesinterte Vollkronen, die mit verschiedenen Metalloxiden und Farbpigmenten in dentale Grundfarben eingefärbt wurden (unten: Beispiele aus dem Vita Lumin-Vakuum Farbring).

von $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Die gute chemische Beständigkeit führt auch zu ausgezeichneten Ergebnissen bei der Prüfung der Biokompatibilität. Diese wurde von einer unabhängigen Firma, die auf die Prüfung von Medizinprodukten spezialisiert ist, durchgeführt.

Die mechanischen Eigenschaften wurden ebenfalls innerhalb einer In-vitro-Studie am Universitätsklinikum Freiburg ermittelt [12]. Die gesinterte Keramik weist eine nach der Weibull-Statistik ermittelte Biegefestigkeit σ_0 von 339 MPa und einen Weibull-Modul m von 17 auf. Der im Vergleich zu anderen entsprechenden Dentalkeramiken [13] hohe Weibull-Modul bestätigt die Zuverlässigkeit der HPC-Keramik. Neben der Festigkeitsprüfung wurden an der Universitätsklinik Freiburg auch Kausimulator-Tests an reaktionsgesinterten Kronen durch-

geführt. Dabei wurden die Kronen 1,2 Mio. Zyklen mit 49 N (entspricht ca. fünf Jahren) belastet. Bei diesen Untersuchungen lag die Überlebensrate bei 100 %. Nach der Kausimulation wurden die Kronen in einer Prüfmaschine bis zum Bruch belastet. Diese so genannten Bruchlasten geben die maximale Belastung in N an, die zum Versagen der Keramik führen. Diese Werte sind stark von der Dicke und Geometrie der Kronen abhängig und erstreckten sich bei der In-vitro-Studie zur Befestigung von KaVo Everest® HPC-Kronen von 966 N bis 3964 N [14]. Im Rahmen dieser Studie wurden zwei verschiedene Befestigungszelemente auf ihre Eignung getestet. Aufgrund der sehr guten mechanischen Werkstoffeigenschaften kann festsitzender Zahnersatz aus HPC konventionell befestigt werden.

Neben der Werkstoffentwicklung war für den erfolgreichen Transfer dieses innovativen Werkstoffansatzes auch die Etablierung eines industriellen Prozesses von großer Bedeutung.

Industrielle Fertigung und Passgenauigkeit

Die Fertigung der HPC-Blanks erfolgt über typische Verfahren der keramischen Industrie. Hierbei konnte das Forschungszentrum Karlsruhe die KaVo Dental GmbH aufgrund der umfangreichen Erfahrungen sowie der technischen Ausstattung (Abb. 3) beim Aufbau eines industriellen Fertigungsverfahrens in erheblichem Umfang unterstützen. Bei der Auswahl der optimalen Prozessparameter stand stets die Prozesssicherheit im Vordergrund. Ein wichtiger Prozessschritt ist dabei die Einstellung



Abb. 3: Teil des Keramiktechnikums des Instituts für Materialforschung III.

der Schwindungsfreiheit. Exakt schwindungsfrei sinternde Keramiken erhält man, indem bei der isostatischen Verdichtung der Rohlinge die Dichte der Grünkörper $\rho_{\text{Grünkörper}}$ so eingestellt wird, dass folgende Beziehung erfüllt ist:

$$\rho_{\text{Grünkörper}} = \frac{\rho_{\text{Keramik}}}{1 + \Delta \tilde{m}}$$

Umfangreiche Untersuchungen zeigten, dass mit den industriell gefertigten Blanks Kronen bzw. spezielle Prüfkörper hergestellt werden können, die nach dem Sintern die gleichen Dimensionen aufweisen wie vor dem Reaktionssinterprozess. Hierbei wird eine Genauigkeit von wenigen Mikrometern erzielt [7]. Auch In-vitro-Untersuchungen der Abteilung für Zahnärztliche Prothetik am Universitätsklinikum Freiburg bestätigen die gute Passgenauigkeit der Kronen aus diesem Material [14]. Hierbei wurde aber nicht nur die Schwindungsfreiheit der Keramik betrachtet, sondern die Passung nach der gesamte Prozesskette, d. h. von der Abdrucknahme präparierter Zähne über die Herstellung entsprechender Modelle und der CAD/CAM-Fertigung mit dem KaVo Everest® System bis hin zum Sintern der Kronen und der Überprüfung der Passung auf den Zahnstümpfen. Die mittlere Randspaltbreite der Kronen liegt mit 33 μm vor bzw. 45 μm nach der Zementierung unter dem gewünschten Wert von 50 μm .

CAD/CAM-Fertigung und Indikationsbereich

Die HPC-Keramik zeichnet sich aber nicht nur durch ihre Werk-

stoffeigenschaften und gute Passung aus, sondern auch durch eine hohe Stabilität der Grünkörper. Die Rohlinge lassen sich dadurch im Grünzustand ideal bearbeiten und ermöglichen eine detailgetreue Abbildung selbst von sehr feinen Strukturen. Die Detailtreue wird vor allem bei der Gestaltung von Kauflächen deutlich (Abb. 4). Zudem wirkt sich die Grünkörperstabilität positiv auf die Kantenstabilität, insbesondere im Kronenrandbereich, aus. Das Material ist mit Hartmetallwerkzeugen ideal maschinell zu bearbeiten und das bei kurzen Bearbeitungszeiten und einem geringen Werkzeugverschleiß.

Die mittels CAD/CAM gefertigten Kronen werden über Nacht bei 1450 °C form- und dimensionstreu gesintert. Die nach dem Sintern dunkel erscheinenden Kronen werden zunächst durch Abstrahlen mit 50 μm Edelmetall behandelt [15]; die endgültige Fertigstellung erfolgt über eine einfache und schnelle Hochglanzpolitur der Oberfläche. Die polierten Vollkronen weisen eine hohe Oberflächengüte auf. Die Kronen können mit üblichen Befestigungsmaterialien beim Patienten eingegliedert werden. Die Indikation der KaVo Everest® HPC sind Vollkronen im Seitenzahnbereich. Zahnersatz aus HPC stellt eine preisgünstige keramische, biokompatible Alternative zu unverblendeten NEM- bzw. Goldkronen dar.

Schlussfolgerung

Durch die enge Kooperation zwischen dem Forschungszentrum Karlsruhe, der KaVo Dental GmbH und der Universitätsklinik Freiburg

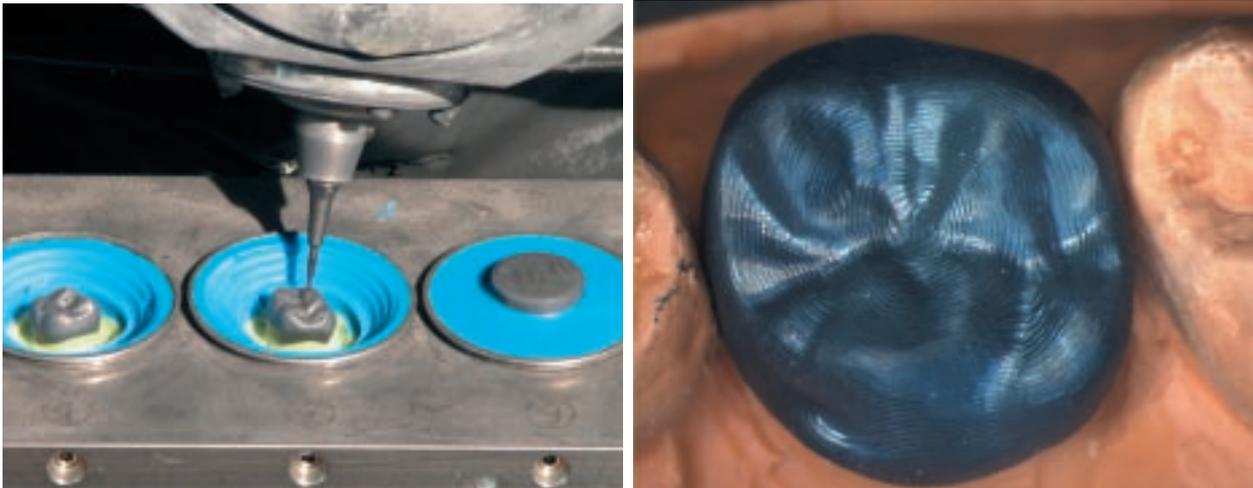


Abb. 4: Fräsen einer HPC-Zahnkrone mit dem KaVo Everest® CAD/CAM-System (links) und Blick auf die Kaufläche einer gefrästen HPC-Krone (rechts).

ist es gelungen, eine neuartige reaktionsgesinterte Keramik für die Anwendung in der Zahnmedizin zu entwickeln. Die Keramik zeichnet sich vor allem durch ihre Eigenschaften, wie gute mechanische Stabilität, hohe chemische Beständigkeit, Biokompatibilität und sehr gute Passgenauigkeit aus. Des Weiteren konnte eine

ideale CAM-Bearbeitbarkeit der HPC-Blanks durch gezielte Werkstoff- und Verfahrensentwicklungen erreicht werden. Seit der Markteinführung Ende 2006 wird die biokompatible Keramik in einem Farbton als vollkeramische Alternative zu metallischem Zahnersatz für den Seitenzahnbereich angeboten. Im Entwicklungssta-

dium befinden sich derzeit zum einem HPC-Keramiken in weiteren dentalen Grundfarben und zum anderen Malfarben, Glasurmassen und Verblendmassen, die eine individuellere Gestaltung des Zahnersatzes ermöglichen.

Literatur

- [1] P. Greil,
Mater. Chem. Phys. 61 (1999) 64–68
- [2] V.D. Hennige, J. Haußelt,
H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, T. Windmann,
J. Eur. Ceram. Soc. 19 (1999) 2901–2908
- [3] E. Klose, J.R. Binder,
H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, J. Haußelt,
Symposium D4 – Materials Week 2001, München
- [4] H. Geßwein,
Dissertation Universität Freiburg, 2005
- [5] H. Geßwein, J.R. Binder,
H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, J. Haußelt,
J. Eur. Ceram. Soc. 26 (2006) 697–702
- [6] H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, J.R. Binder,
E. Klose, J. Haußelt,
cfi/Ber. DKG 79 (2002) E9-E12
- [7] H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, J.R. Binder,
T. Gietzelt, J. Kotschenreuther,
Adv. Eng. Mater. 8 (2006) 983–988
- [8] G. Hoffmann,
Quintessenz Zahntech. 27 (2001) 1050–1053
- [9] J.R. Binder,
ZWL 7 (2004) 46–51
- [10] A. Baltzer, V. Kaufmann-Jonian,
Quintessenz Zahntech. 29 (2003) 1318–1342
- [11] H. Claus,
Quintessenz Zahntech. 16 (1990) 35–46
- [12] G. Heydecke, F. Butz, J.R. Binder,
J.R. Strub,
Dent. Mater. 23 (2007) 785–791
- [13] H. Fischer, R. Marx,
ZWR 109 (2000) 240–244
- [14] M. Okutan, G. Heydecke, F. Butz,
J.R. Strub,
J. Oral Rehabil. 32 (2006) 838–843
- [15] *Verarbeitungsanleitung für KaVo Everest® HPC-Blanks*

Messsysteme (Molche) zur Detektion von Rissen und Korrosion in Pipelines

M. Balzer, A. Herth, N. Flatinger, H. Stripf, H. Widmann, IPE; A. Hugger, PII Pipetronix GmbH

Einleitung

Pumpfähige Massengüter werden in Rohrleitungen (Pipelines) zuverlässig und ökonomisch über große Entfernungen zu Verbrauchszentren transportiert. Ohne Pipelines wäre es nahezu unmöglich, große Industrieregionen ausreichend mit Gas, Rohöl und chemischen Produkten zu versorgen. Pipelines zählen somit zu den wichtigsten Elementen einer modernen Infrastruktur. Derzeit werden weltweit Rohstoffe durch Pipelines mit einer Gesamtlänge von schätzungsweise mehr als 2 Mio. Streckenkilometern transportiert.

Da in solchen Rohrleitungen umweltgefährdende Stoffe transportiert werden, müssen hohe Anforderungen an die Sicherheit gestellt werden. Lecks in Öl- oder Gas-Pipelines können zu Katastrophen führen. Die Hauptgefahren für Pipelines lauern zumeist in Form von Korrosion, Umwelteinflüssen und Materialermüdung, wodurch sich die Wandstärke der Rohre lokal verringern kann. Solche Schwachstellen können zu Rissen oder Brüchen führen, durch die dann Öl oder Gas austritt (s. Abb.1).

Aus diesem Grund versuchen Pipelinebetreiber derartige Schwachstellen durch den Einsatz von Messsystemen (sogenannten Molchen) frühzeitig aufzuspüren. Solche „Molche“ sind kompakte, elektronische Inspektionsgeräte, die in die Pipeline eingeschleust und von dem jeweils geförderten flüssigen oder gasförmigen Medium mitbewegt werden. Ziel ist es, mit einem derartigen Molchlauf alle sicherheitsrelevanten Schädigungen zu detektieren und präzise zu lokalisieren.

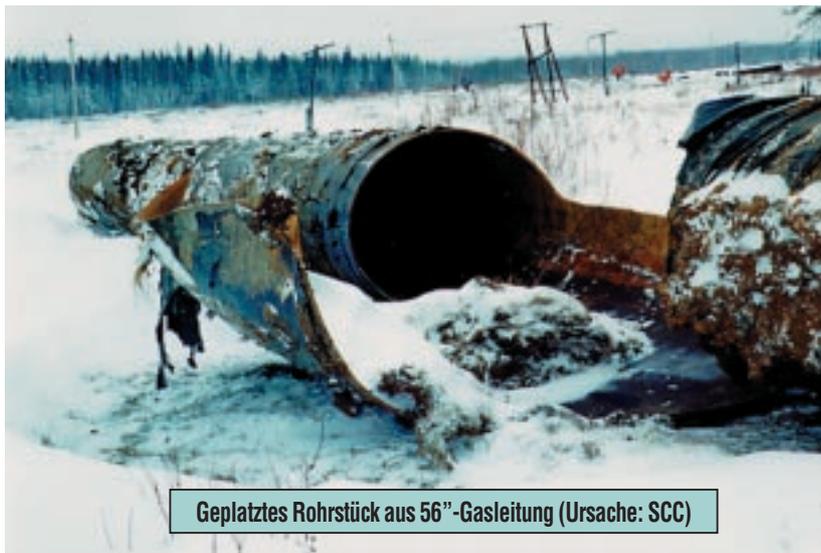


Abb. 1: Beispiel für einen Pipelineschaden, der durch Spannungsrisskorrosion verursacht wurde.

Das Forschungszentrum Karlsruhe und die Firma PII Pipetronix GmbH arbeiten seit mehr als zwanzig Jahren eng und erfolgreich an der Entwicklung von Molchsystemen zusammen. Dabei wurde auf der Grundlage der Ultraschall- und Magnetsensortechnologien Hardware und Software zur Erfassung, Komprimierung und Speicherung der Sensordaten entwickelt.

Durch die Kooperation mit dem Forschungszentrum erlangte die Firma PII Pipeline Solutions eine weltweit führende Stellung in der Pipeline-Inspektion. In einer Reihe von Technologietransfer-Projekten wurde ein ganzes Produktspektrum von Molchen gemeinsam neu entwickelt oder auf der Basis vorhandener Geräte verbessert:

- Korrosionsprüfmolche auf Basis von senkrecht einstrahlenden Ultraschallsensoren
- Korrosionsprüfmolche basierend auf magnetischer Streu-

flusstechnik für die quantitative Korrosionsüberwachung

- Rissprüfmolche zur Detektion und Größenbestimmung von Rissen mit Hilfe schräg einschallender Ultraschallsensoren
- Molche mit kombinierter Ultraschalltechnologie (gleichzeitige Messung von Korrosion und Rissen) auf Basis von Ultraschallgruppenstrahlern
- Rissprüfmolche zur Detektion von Rissen in Gaspipelines auf Basis der EMAT-Technologie (Electromagnetic Acoustic Transducer)

Die während des Molchlaufs anfallenden Daten werden direkt im Molch verarbeitet, komprimiert und abgespeichert. Dabei müssen die erfassten Daten in Echtzeit um bis zu einem Faktor 150 000 reduziert werden, bevor sie abgespeichert werden.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurden am Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (IPE) des Forschungszentrums stromsparende und platzsparende Supercomputer mit massiv paralleler Struktur entwickelt und gefertigt, die auch unter den extremen Bedingungen einer Pipeline zuverlässig funktionieren. Die Online-Algorithmen des Molches zur Datenreduktion arbeiten dabei nach modernsten Methoden der Datenreduktion, Datenkompression und Mustererkennung.

Nach Abschluss eines Molchlaufs werden die abgespeicherten Messdaten aufbereitet und auf externe Datenträger übertragen. Mit spezieller Auswertesoftware werden die Messdaten dargestellt und von einem Expertenteam bewertet. Als Ergebnis erhält der Pipelinebetreiber einen Bericht über den aktuellen Fehlerzustand des untersuchten Pipeline-Abschnitts [1, 2, 3, 4].

Molchaufbau am Beispiel eines Ultraschallmolches

Wie in Abb. 2 schematisch dargestellt, besteht der Molch aus verschiedenen separaten Einheiten (Molchkörpern), die über Gelenke und Kabel miteinander verbunden sind. Die Aufteilung ist notwendig,

damit der Molch Pipelinebögen durchfahren kann. Die Ultraschallmesstechnikeinheit steuert die Sensoren, die Ultraschallpulse aussenden und wieder empfangen. Die empfangenen Signale werden digitalisiert und entsprechend reduziert. Die so verarbeiteten Messdaten werden dann im Datenspeicher abgelegt.

Die Batterieeinheit versorgt den Molch mit der notwendigen elektrischen Leistung. Die Batteriekapazität wird auf die Länge des zu prüfenden Leitungsabschnitts ausgelegt, der bis zu 1000 km lang sein kann.

Die Dichtmanschetten bewirken, dass der Molch vom zu transportierenden Medium mitgeführt wird. Die Odometerräder liefern wegabhängig die Takte für die Auslösung der Ultraschallmessungen und die Information über den zurückgelegten Weg. Die Schussfrequenz der Ultraschallsensoren ist so gewählt, dass in Längsrichtung mit jedem der Ultraschallprüfköpfe ca. alle 3 mm eine Messung durchgeführt wird.

Der Sensorträger wird an die jeweilige Messtechnik angepasst. In Abb. 2 wird ein Sensorträger für den Korrosions- und Rissprüfmolch gezeigt. Der Sensorträger ist so ausgelegt, dass der gesam-

te Rohrfumfang durch die Sensoren abgedeckt ist. In Umfangsrichtung ergibt sich dabei ein Sensorabstand von etwa einem halben Sensordurchmesser (ca. 8 mm). Dadurch ist gewährleistet, dass jeder Bereich der Rohrwand in Umfangsrichtung mehrfach beschallt wird [2, 3, 4].

Molchtypen basierend auf Ultraschalltechnik

Molch zur Korrosionsprüfung

Beim Korrosionsprüfmolch basierend auf Ultraschalltechnik ist der Sensorkopf (Piezoschwinger) senkrecht zur Rohrwand ausgerichtet und wird dabei längs der Pipeline bewegt. Dabei wird die Wanddicke für jede Sensorposition nach dem Pulsecho-Prinzip ermittelt[2].

In Abb. 3 ist das Messprinzip verdeutlicht. Es sind für verschiedene Wanddicken die vom Sensor erfassten Echozeiten dargestellt: Das Rohrinnenwandecho (Vorlaufecho) hat die Laufzeit vom Sensor zur Wand und wieder zurück. Die Wanddicke ergibt sich aus der Differenz zwischen Innenwand- und erstem Außenwandecho bzw. aus der Differenz zweier benachbarter Folgeechos multipliziert mit der Schallgeschwindigkeit.

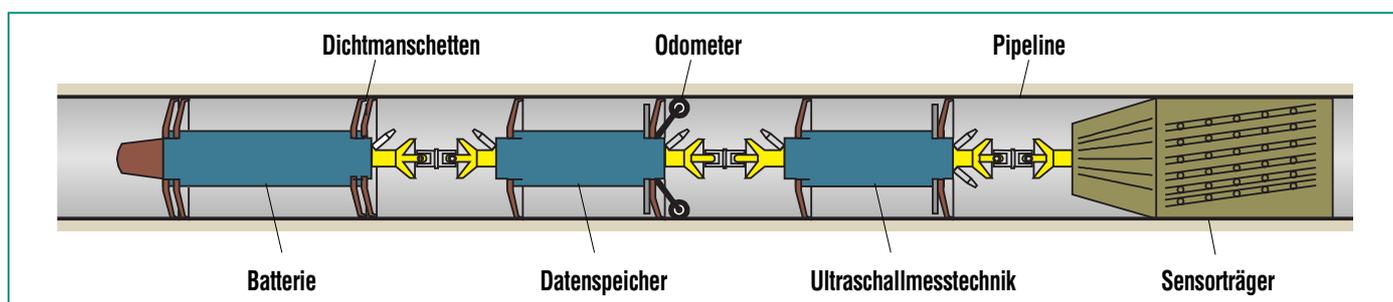


Abb. 2: Darstellung eines Ultraschallmolches bestehend aus vier Molchkörpern.

Die Sensorköpfe arbeiten in einem Frequenzbereich von ca. 5 MHz, damit kann eine Auflösung der Messung kleiner als 0,1 mm erzielt werden [1, 2].

Molch zur Rissprüfung

Im Gegensatz zur Wanddickenprüfung werden bei der Rissprüfung die Sensorköpfe nicht senkrecht, sondern unter einem Winkel von ca. 17° zur Normalen auf dem Sensorträger angebracht. Beim Auftreffen auf die Rohrwand werden die einfallenden Schallwellen nach dem Brechungsgesetz abgelenkt. Der Einschallwinkel ist so gewählt, dass die Ultraschallwellen sich in der Rohrwand unter einem Winkel von 45° zur Oberfläche ausbreiten. Radial verlaufende Außen- oder Innenrisse können damit empfindlich nachgewiesen werden, da der Ultraschall von diesen in der Regel stark reflektiert wird (Winkelspiegeleffekt) [2]. Eine schematische Darstellung des Verfahrens ist in der Abb. 4 gezeigt [3].

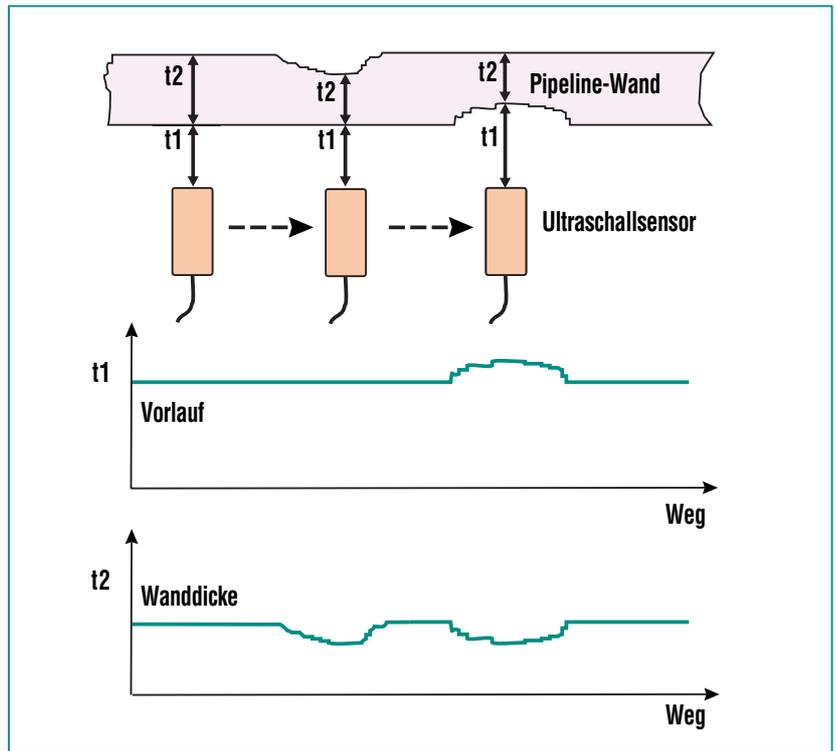


Abb. 3: Messprinzip der Wanddickenmessung. Durch den Vortrieb des Molches wird der Ultraschallsensor über die Wand bewegt. Die Vorlaufzeit (t_1) und die Differenz zwischen dem Vorlaufzeit und dem Außenwandecho (t_2) oder zwischen zwei Außenwandechos werden aufgezeichnet. Bei externen Defekten ändert sich die Laufzeit der Wandechos, die Vorlaufzeit bleibt gleich. Bei Innenkorrosion ändern sich beide Zeitwerte.

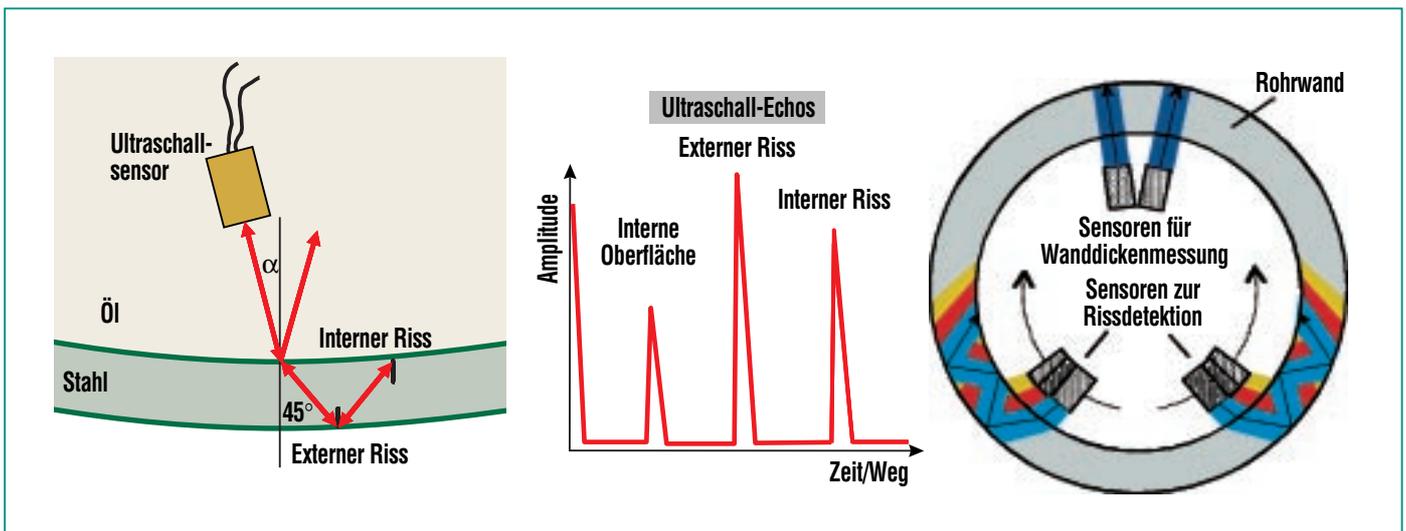


Abb. 4: Messprinzip der Rissmessung. Die Sensoren werden so angeordnet, dass ein Riss von mehreren Sensoren erkannt wird.

Molch mit Ultraschallgruppenstrahlern

Um unterschiedliche Messaufgaben wie Rissprüfung und die Detektion von Korrosion zu erfüllen, werden in der Regel unterschiedliche Inspektionsmolche mit den jeweils passenden Sensorenanordnungen eingesetzt. Dies ist mit entsprechend hohen Mobilisierungskosten verbunden. Messdaten, die mit unterschiedlichen Molchen aufgenommen worden sind, müssen zudem erst korreliert werden, bevor sie gemeinsam ausgewertet werden können.

Aus diesen Gründen wurde ein Inspektionsmolch entwickelt, welcher auf der Technologie von Gruppenstrahlern (engl. Phased Array) basiert. Der Hauptvorteil dieser Technologie besteht darin, dass man die Größe, die Form und die Richtung des Ultraschallbündels mit elektronischen Mitteln steuern kann. Dies eröffnet ganz neue Möglichkeiten:

- Rissprüfung und Korrosionsmessung können gemeinsam in einem Lauf durchgeführt werden.
- Größe und Überlappung der Ultraschallsensoren können elektronisch an die individuelle Messaufgabe angepasst werden.
- Der Einschallwinkel eines Sensors kann entsprechend dem aktuellen Pipeline-Medium variiert werden.

EMAT-Molch für Gaspipelines

Der Emat-Molch ist ein Inline-Inspektionstool, das zur Detektion von längsorientierten, rissartigen

Fehlern in Gaspipelines unter Verwendung von Ultraschall eingesetzt wird.

In Gaspipelines kann die „klassische“ Ultraschalltechnik nur eingesetzt werden, wenn der Molch in einem Flüssigkeitsbett geführt wird, da ein Koppelmedium zur Einbringung der Ultraschallenergie in die Pipelinewand benötigt wird. Bei der EMAT-Technologie wird der Ultraschall über elektromagnetische Kräfte in der Rohrwand selbst erzeugt, so dass kein flüssiges Ankoppelmedium benötigt wird.

Datenverarbeitung und Elektronik

Datenfluss

Die große Herausforderung beim Aufbau einer Molchelektronik besteht in der geforderten Echtzeitverarbeitung bei der hohen Datenrate, die im Molchsystem anfällt. Abhängig vom Durchmesser der zu untersuchenden Pipeline tasten bis zu 11000 Ultraschallsensoren die Pipeline-Wände auf Korrosion und Risse ab. Bei einer 250 km langen Pipeline kann dabei eine Datenmenge von mehr als 15 Mio. GBytes mit einer Datenrate von bis zu 67 GByte/s anfallen. Da diese Datenmenge online nicht auf einem robusten Massenspeicher abgelegt werden kann, mussten spezielle Rechnersysteme und Reduktionsalgorithmen entwickelt werden, die nur die relevanten Daten in komprimierter Form abspeichern. Je nach Molchtyp kommen verschiedenen Reduktionsverfahren zur Anwendung.

Bei der Korrosionsprüfung sind in erster Linie die gemessenen Wand-

dicken von Interesse. Daher werden an unkritischen Stellen nur die online berechneten Vorlauf- und Waddickenwerte gespeichert. An kritischen Stellen werden zusätzlich auch die gemessenen Ultraschallsignale abgespeichert.

Bei der Rissprüfung gilt es die Ultraschallsignale zu erkennen, die Rissinformationen tragen. Zum Nachweis von Längsrissen werden die Echos in den Signalen nach mehreren Kriterien geprüft. Zum einen müssen sie einen genügenden Abstand zum Rauschuntergrund aufweisen (Ansprechschwelle) und zum anderen über eine gewisse Länge in Längsrichtung (Längenkriterium) auftreten. Durch die Einbeziehung von Nachbarschaftskriterien werden auch schräg liegende Risse erkannt. Werden alle Kriterien erfüllt, so erfolgt eine komplette Abspeicherung der zu diesem Anzeigebereich gehörenden Ultraschalldaten.

In Abb. 5 ist der Datenfluss für die Rissprüfung mit dem Gruppenstrahlermolch in den einzelnen Verarbeitungsstufen dargestellt. Die Molchelektronik reduziert/komprimiert die Daten dabei online in vier Stufen:

1. Dephasing:

Es beinhaltet das Zusammenfügen der Daten der einzelnen Elemente eines virtuellen Sensors (Reduktion ca. Faktor 16).

2. Vektorisierung:

Es wird eine Vektorisierung der Ultraschalldaten durchgeführt, d. h. es wird die Laufzeit und die maximale Amplitude der Einhüllenden des Ultraschallechos berechnet und als Amplituden-Zeit-Vektor

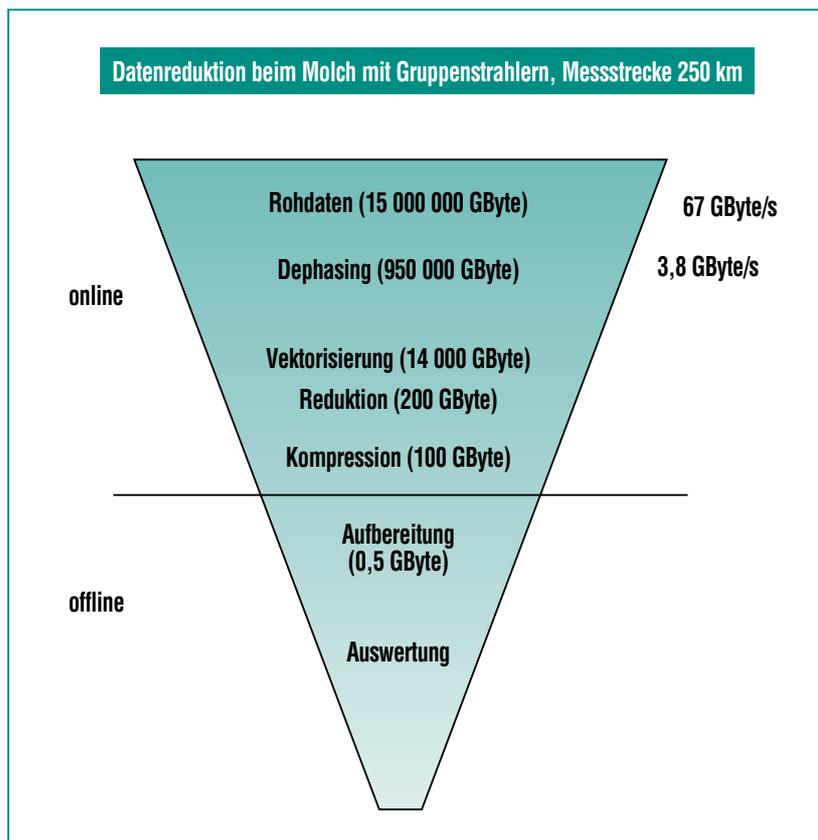


Abb. 5: Darstellung des Datenflusses beim Molch mit Gruppenstrahlern in der Rissprüfung.

weiterverarbeitet (Reduktion ca. Faktor 70).

3. Reduktion:

Es wird ein schnelles Online-Verfahren zur Erkennung und Selektion von rissähnlichen Strukturen durchgeführt. (Reduktion ca. Faktor 50).

4. Kompression:

Es beinhaltet ein einfaches und schnelles Verfahren zur Datenkompression (Kompression ca. Faktor 2).

Die verbleibenden 100 GByte an Daten werden online auf robuste Massenspeicher (Flash-Memories) abgelegt. Die Offline-Verarbeitung erfolgt nach dem Prüflauf.

Aufbau des Rechnersystems zur Datenerfassung und Reduktion

Für den Entwurf des Rechnersystems müssen neben der Datenverarbeitung noch weitere Aufgaben berücksichtigt werden, die für die Steuerung des Gesamtsystems notwendig sind. Grundsätzlich soll die Elektronik folgende Aufgaben erfüllen:

1. Ansteuerung der Sensorik
2. Datenaufnahme mit Digitalisierung der Sensorsignale
3. Datenreduktion
4. Datenkompression

5. Datenaufnahme der Umgebungsdaten (Odometer, Pendel, Druck, ...)

6. Generierung von Datenblöcken

7. Datenspeicherung auf Massenspeicher

8. Parametrisierung und Steuerung der Messsysteme

9. Fehlerbehandlung und Protokollierung

Konventionelle Computersysteme finden im Molch keinen Platz, auch benötigen sie zu viel Energie. Durch das vorgegebene maximale Volumen der Molchkörper und der beschränkten Kapazität der Batterie eines Molchsystems besteht die Anforderung an das Rechnersystem darin, auf möglichst kleinem Raum eine hohe Rechenleistung bei geringem Leistungsbedarf und hoher Flexibilität zu erzielen. Zudem muss dieses in der rauen Umgebung einer Pipeline störungsfrei arbeiten.

Diese Anforderungen wurden am IPE durch die Entwicklung und Fertigung von stromsparenden Supercomputern mit massiv paralleler Struktur, die auch unter den extremen Bedingungen in einer Pipeline zuverlässig funktionieren, erfüllt.

Für das Rechnersystem wurde ein modularer Aufbau gewählt. Es besteht aus einzelnen Rechnerkomponenten für spezielle Aufgabenbereiche, die durch möglichst einfache Kommunikationskanäle miteinander verbunden sind. In Abb. 6 ist das System in seinen einzelnen Komponenten dargestellt. Die vier Rechereinheiten sind: Frontend, Massenspeichereinheit, Systemkontroller und Überwachungs-

einheit. Sie besitzen alle ein einheitliches Prozessormodul.

Die Systemkomponenten und ihre Funktion:

- Ultraschallelektronik – Sensoransteuerung
- Frontends – Datenreduktion
- Systemkontroller – Gesamtsystemsteuerung
- Überwachungseinheit – Erfassung von Umgebungsdaten, Fehlerprotokoll
- Massenspeichereinheiten mit Flash-Memories – Datenspeicherung

Die Sensorsignale werden von der Ultraschallelektronik analog aufbereitet und an die Frontends gesendet. Die Frontends digitalisieren die analogen Signale der Ultraschalleinheiten und reduzieren sie nach vorgegebenen Algorithmen. Anschließend werden die Daten über Ethernet zur Massenspeichereinheit gesendet.

Der Systemkontroller hat die Kontrolle über den gesamten Molch. Er übernimmt die Steuerung des Messablaufs und organisiert das dafür nötige Zusammenspiel der anderen Rechereinheiten. Dabei reagiert er auch auf Zustands- und Fehlermeldungen, die er von allen anderen Einheiten empfängt. Somit überwacht er die Funktionstüchtigkeit der Systeme und kann bei etwaigen Ausfällen entsprechend reagieren. Er übernimmt außerdem die Erzeugung der Taktimpulse für die Ultraschallelektronik. Diese werden aus den Odometerimpulsen abgeleitet. Zudem sendet der Systemkontroller Weg- und Lageinformationen (Pendel) zur Massenspeichereinheit, wo sie

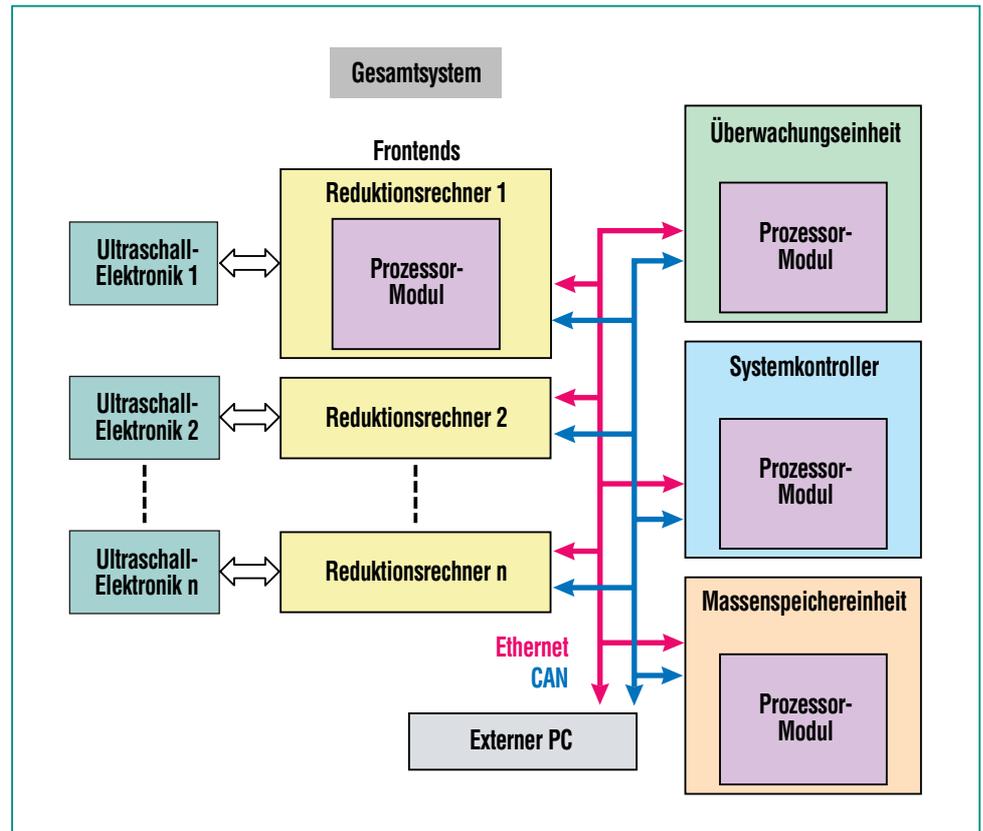


Abb. 6: Aufbau des Rechnersystems im Prüfmolch.

mit den Messdaten zusammen abgelegt werden.

Auf der Überwachungseinheit werden wichtige Umgebungsdaten wie Temperatur, Druck, Beschleunigungen etc. aufgenommen und abgespeichert. Zusätzlich protokolliert die Einheit sämtliche Fehlermeldungen, die von den anderen Einheiten versendet werden.

Durch Verwendung von einheitlichen Prozessor-Modulen, werden Programmierung und Wartung der verschiedenen Rechereinheiten vereinfacht. Um den Verdrahtungsaufwand zu reduzieren, sind die Kommunikationskanäle seriell ausgelegt. Die Rechereinheiten sind über Ethernet und CAN-Bus redundant miteinander

verbunden und können von einem externen PC programmiert und parametrieren werden.

Frontend-Elektronik

Zentrale Bestandteile der Rechereinheit Frontend sind die ADCs (Analog-to-Digital-Converter) zur Analog-Digital-Wandlung, ein FPGA (Field-programmable gate array) und ein Prozessormodul. Als Prozessor wurde ein Signalprozessor (DSP, digital signal processor) ausgewählt, der auch Mikrokontrollerfunktionen beinhaltet. Die Core-Spannung und die Taktfrequenz des Prozessors können in einem weiten Bereich dynamisch geändert werden, so dass sich die Leistungsaufnahme an die individuellen Anforderungen im Molch

anpassen lässt. Zudem bietet der ausgewählte DSP eine hohe Rechenleistung bei geringer Verlustleistung.

Die Verbindung zwischen komplexem, frei programmierbarem FPGA und DSP erlaubt ein Höchstmaß an Flexibilität und Parallelisierung, um die Anforderungen der verschiedenen Molchtypen bezüglich Rechenleistung, Volumenbedarf, Wärmebelastung und Leistungsaufnahme zu erfüllen. Die Datenreduktion, als zentraler Bestandteil des Systems, wird teilweise im FPGA und teilweise im DSP ausgeführt. Der Datenaustausch zwischen FPGA und DSP erfolgt über ein Shared RAM (Random access memory). Kommandos und Interrupt-Signale werden direkt ausgetauscht.

In Abb. 7 ist der Datenfluss auf dem Frontend vom ADC über FPGA zum DSP dargestellt. Die Datenverarbeitung erfolgt in mehreren Schritten und verteilt sich über die einzelnen Komponenten.

Jeder ADC digitalisiert Sensorsignale und speist sie nacheinander in den FPGA ein. Jedes Sensorsignal erfährt vier Verarbeitungsstufen im FPGA:

1. **Stufe E:**
Daten einlesen und filtern
2. **Stufe P:**
Peak-Detektion
3. **Stufe I:**
Peak-Selektionsalgorithmus
4. **Stufe L:**
Signalverfolgung

Wie in Abb. 7 zu sehen ist, ist die Verarbeitung im FPGA parallel und in einer Pipelinestruktur organisiert. Durch die Pipelinestruktur wird erreicht, dass die Verarbeitungsstufen parallel auf nacheinander folgenden Signalen arbeiten. Von vier ADCs werden nun gleichzeitig Signale eingelesen und das – wegen der Pipelinestruktur – im Takt einer Verarbeitungsstufe.

Der FPGA sendet die so reduzierten Signale an den DSP. Dort erfolgt

eine weitere Reduzierung auf der Grundlage von Merkmalsextraktion und Nachbarschaftsbetrachtungen. Die reduzierten Daten werden anschließend in einem zweistufigem Kompressionsverfahren (Delta Modulation und LZW-Verfahren) nochmals um den Faktor 2 verlustfrei verdichtet und anschließend über Ethernet zur Speichereinheit versendet [6].

Literatur

- [1] H. Goedecke, G. Krieg, H. Stripf *Ultrascan Survey in gas pipelines with batch technology*, Proc. 2nd Int. Conf. on pipeline inspection, Moscow, 1991
- [2] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer Verlag Berlin 1990
- [3] H. Willems, O.A. Barbian, H. Stripf, *UltraScan CD a new tool for crack detection*, Proc. 7. International Pipeline Monitoring Seminar, Houston, 1995
- [4] H. Gemmeke, *Crack Detection with Ultra Sound*, Proc. 3rd International Pipeline Symposium, Berlin, Germany, 2000
- [5] J. Bosch, A. Hugger, J. Franz, S. Falter, Y. Oberdörfer, *Phased Array-Technologie für automatisierte Pipeline-Inspektion*, Proc. DACH – Jahrestagung 2004, Salzburg
- [6] M. Balzer, H. Stripf, *DSP Multiprocessor System for online Ultrasonic Data Reduction*, Proc. GSPx The International Signal Processing Conference, Santa Clara, USA, 2004

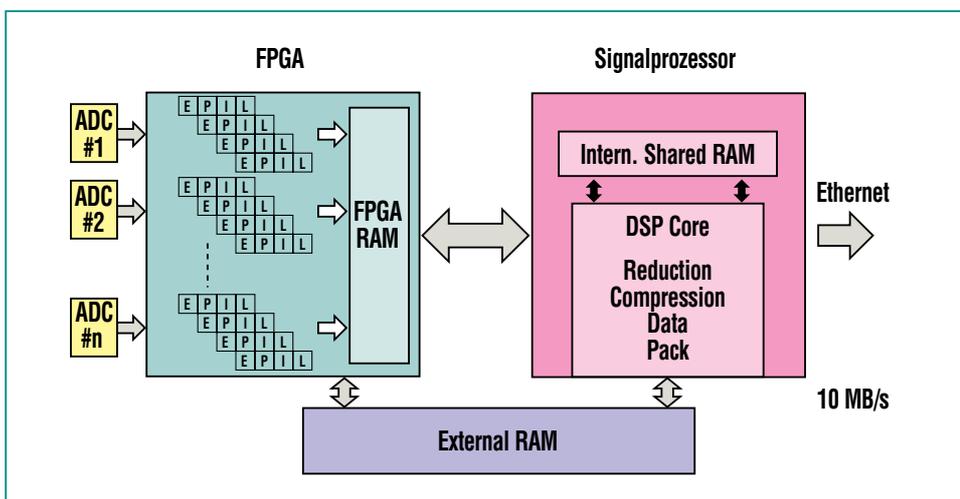


Abb. 7: Aufbau der Frontend-Recheneinheit. Der Datenfluss erfolgt von den ADCs, über den FPGA zum DSP und von dort über Ethernet zur Speichereinheit. Besonders effizient ist die Parallelverarbeitung im FPGA durch die Pipelinestruktur.

Entwicklung von NMR-Spektrometern – eine Technologietransfer-Erfolgsstory

M. Kläser, Th. Schneider, ITP

Einleitung

Die NMR-Spektroskopie (NMR – nuclear magnetic resonance) und ihre Anwendung bei biochemischen Fragestellungen haben sich zu einer Schlüsseltechnologie in der Biotechnologie entwickelt. Die Höchstfeld-NMR-Spektrometer mit Protonen-Resonanzfrequenzen ≥ 750 MHz stellen dabei ein unverzichtbares und sehr kraftvolles Werkzeug für die Strukturaufklärung und Dynamik von Biomolekülen dar, wie sie z. B. in der Aids-, SARS-, Rinderwahn- oder Alzheimer-Forschung benötigt werden.

Die wissenschaftliche Akzeptanz der NMR (z. B. Nobelpreis 1991 Prof. Dr. R. Ernst bzw. 2002 Prof. K. Wüthrich) und die Ausweitung auf weitere Forschungsgebiete – z. B. in Chemie und den Materialwissenschaften –, der damit verbundene technologische Nutzen und die enorme Nachfrage nach solchen hochauflösenden NMR-Spektrometern führten in den letzten Jahren deutschlandweit zur Gründung von NMR-Kompetenz-Zentren und Universitätsinstituten mit dem Schwerpunkt NMR-Forschung (Tab. 1).

Ausgerüstet sind diese Institutionen mit den NMR-Spektrometern (750 MHz, 800 MHz und 900 MHz),

die im Forschungszentrum Karlsruhe in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Bruker BioSpin GmbH (früher Bruker AG) in gemeinsam durchgeführten Technologietransfer-Projekten entwickelt, gebaut und getestet wurden.

Die NMR-Spektroskopie ist die einzige Methode zur Bestimmung der dreidimensionalen Struktur mit atomarer Auflösung und der Dynamik von biologischen Makromolekülen im Zeitfenster von Nanosekunden unter annähernd physiologischen Bedingungen. Die Resonanzsignale der Protonen in den Molekülen sind das Ziel der Untersuchungen. Im Magnetfeld nehmen die Protonen auf Grund ihres

NMR-Zentrum	Einweihung	Leitung
Europäisches NMR-Zentrum www.bmrz.uni-frankfurt.de	09.04.2006	Prof. Dr. Schwalbe Institut für Organische Chemie und Chemische Biologie Universität Frankfurt
Biomolekulares NMR-Zentrum Forschungszentrum Jülich www.fz-juelich.de	17.05.2005	Prof. Willbold Leiter der NMR-Abteilung Institut für Physikalische Biologie Universität Düsseldorf
Zentrum für Magnetische Resonanz der Universität Leipzig (MRZ) mrz.uni-leipzig.de	30.03.2004	Prof. Dr. Jürgen Haase Universität Leipzig
Bayrisches NMR-Zentrum www.org.chemie.tu-muenchen.de	18.11.2002	Prof. Dr. H. Kessler Ordinarius für Organische Chemie TU München
NMR Zentrum zur Strukturaufklärung von Biomolekülen Göttingen www.mpibpc.gwdg.de	04.11.2002	Prof. Dr. Ch. Griesinger MPI Göttingen Abteilung: NMR-basierte Strukturbioogie
Zentrum für Biomolekulare Magnetische Resonanz (BMRZ) Frankfurt www.bmrz.uni-frankfurt.de	04.09.2002	Prof. Dr. C. Glaubitz Institut für Biophysikalische Chemie Universität Frankfurt

Tab.1: Liste der deutschlandweit gegründeten NMR-Zentren.

Spins und dem damit gekoppelten magnetischen Moment zwei Energieniveaus mit unterschiedlichen Besetzungszahlen ein (siehe Abb. 1). Durch Einstrahlen einer elektromagnetischen Welle mit der Resonanzfrequenz lassen sich die Kernspins anregen, von einem Energiezustand in den anderen überzugehen. Die dabei auftretende Energiedissipation kann mit elektronischen Mitteln als Resonanzlinie aufgezeichnet werden. Bei Untersuchungen an Molekülen werden Linienaufspaltungen beobachtet, die durch Wechselwirkung des Kernspins mit der Elektronenhülle des Moleküls zustande kommen. Daraus lassen sich Aussagen über die Molekülstruktur machen. Diese so genannte „chemical shift“ ist proportional

zum Magnetfeld, die Separation der Linien umso größer, je größer das angelegte Magnetfeld. Die Breite der Resonanzlinien ist von der absoluten Homogenität des Magnetfeldes abhängig, das heißt, bei größerer Magnetfeldstärke ist die geforderte Auflösung der Resonanzlinien von 0,2 Hz nur dann zu erreichen, wenn gleichzeitig die relative Homogenität $\delta B/B_0$ verbessert wird.

Der Wunsch der Anwender nach immer höheren Protonen-Resonanzfrequenzen und die damit verbundene Steigerung der Dispersion der Resonanzlinien und der Signalintensität waren und sind Triebfedern für die Zusammenarbeit zwischen Bruker BioSpin und dem Forschungszentrum bei der

gemeinsamen Entwicklung von hochauflösenden NMR-Spektrometern mit Frequenzen ≥ 750 MHz, d. h. Zentralfeldstärken $\geq 17,6$ Tesla (T).

Der Synergie-Effekt als Keim der Technologietransfer-Projekte

„Was wir alleine nicht schaffen, das schaffen wir dann zusammen“, diese von Xavier Naidoo besungene Melodie hätte auch das Motto für die Gründer des ersten Technologietransfer-Projektes 1985 sein können. Ziel war es, ein hochauflösendes NMR-Spektrometer mit einer Zentralfeldstärke von mindestens 17,6 T zu entwickeln, was im Vergleich zu den damaligen kommerziellen Systemen mit einer

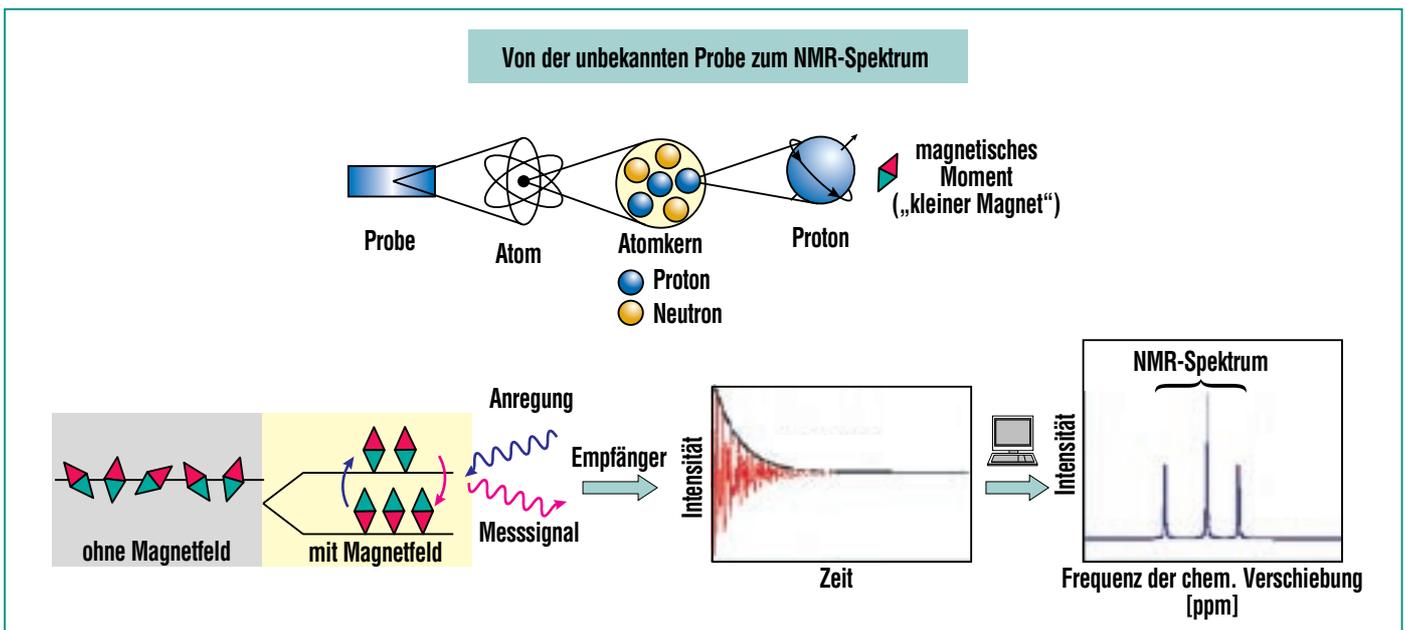


Abb. 1: Stark vereinfachte Darstellung der NMR-Spektroskopie: Die magnetischen Kernspins eines Atomkerns richten sich in einem äußeren Magnetfeld parallel oder antiparallel aus. Beide Zustände unterscheiden sich in ihrer Energie und man kann durch Einstrahlen der genauen Energiedifferenz (Radiofrequenzpuls) erreichen, dass einige Kerne ihren Spin umkehren und somit vom Grund- in den angeregten Zustand übergehen. Im Anschluss an die Anregung ist das System bestrebt, wieder in den Gleichgewichtszustand zurückzugelangen. Mit Hilfe eines entsprechenden experimentellen Aufbaus kann man dann die „Antwort“ der Probe aufzeichnen und durch Fouriertransformation in ein NMR-Spektrum umwandeln.

Feldstärke von 11,7 T (500 MHz) eine Feldsteigerung von 50 % und mindestens eine Verdopplung der gespeicherten elektrischen Energie und Lorentzkräfte bedeutete.

Dieses ehrgeizige Projekt konnte nur gelingen, wenn alle Erfahrungen seitens Bruker BioSpin und dem Forschungszentrum (Institut für Technische Physik – ITP) konstruktiv interferierten. Bruker BioSpin blickte dabei auf sein langjähriges Wissen über verlustarme Kryostate, Design von NMR-Probenköpfen und Hochfrequenzeinheiten, der Korrekturspulen (technisch: Shimspulen), sowie Erfassung und Aufbereitung der NMR-Daten zurück. Das Institut für Technische Physik hatte mit den Hoch-

feldexperimentieranlagen JUMBO und HOMER I [1] ein tiefgehendes Wissen über Konzeption, Bau, Test und Betrieb rein supraleitender Höchstfeldsolenoidmagnete, sowie über den Bau und Betrieb von komplexen Kryostaten mit einer Badtemperatur kleiner 4,2 K (Temperatur von flüssigem Helium).

Die Synergie beider Partner führte 1991 zur Markteinführung des weltweit ersten 750-MHz-NMR-Spektrometers und war das Fundament für die erfolgreiche Entwicklung aller nachfolgenden Generationen (Abb. 2).

Das Forschungszentrum kann inzwischen auf eine kontinuierliche 22-jährige Zusammenarbeit mit

Bruker BioSpin mit zahlreichen Kooperations- und Lizenzverträgen zurückblicken. Die NMR-Spektrometer mit Protonenresonanzfrequenzen von 750 MHz, 800 MHz und 900 MHz sind erfolgreich kommerzialisiert worden, die Arbeiten zum ersten 1000-MHz-NMR-Spektrometer sehr weit fortgeschritten. Bruker BioSpin konnte sich mit einem Marktanteil von weit mehr als 50 % am Weltmarkt etablieren. Dieser Erfolg spiegelt sich in über 100 verkauften NMR-Systemen und in Lizenzzahlung an das Forschungszentrum in Millionenhöhe wider.

Das Produkt „Hochauflösendes NMR-Spektrometer“

Die Ansprüche, die an hochauflösende NMR-Spektrometer als ein erfolgreiches kommerzielles Produkt gestellt werden, erscheinen simpel. Das Spektrometer muss in erster Linie die technischen Spezifikationen nach höchsten Feldstärken bzw. Protonenresonanzfrequenzen (zwischen 17,6 T bzw. 750 MHz und derzeit > 22,3 T bzw. 950 MHz) mit den hohen räumlichen und zeitlichen Stabilitätskriterien erfüllen (Tab. 2). Zusätzlich muss sich aber ein solches Spek-

Anforderungen an das supraleitende Hauptspulensystem (ohne Korrekturspulen)

Zentralfeld	17,6 T / 750 MHz
Räumliche Homogenität	$\delta B/B_0 < 1$ ppm
Zeitliche Stabilität	1 Hz/h

Tab. 2: Anforderungen an das supraleitende Hauptspulensystem, die bei Realisierung des weltweit ersten hochauflösenden 750-MHz-NMR-Spektrometers eingehalten wurden.

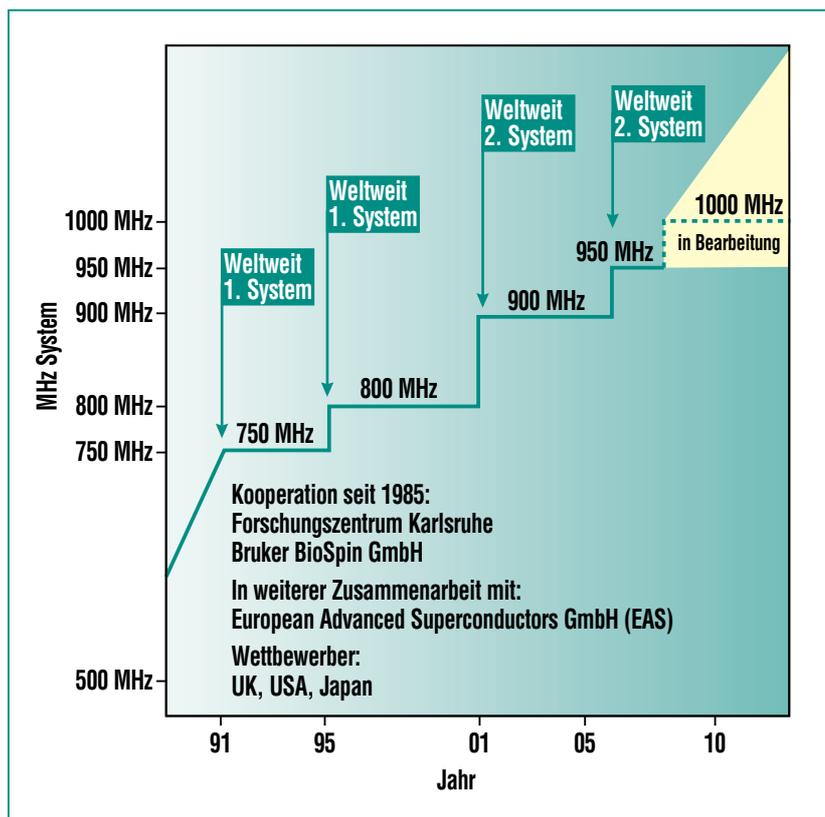


Abb. 2: Erfolgreiche Entwicklung von hochauflösenden NMR-Spektrometern im Rahmen der Technologietransfer-Projekte zwischen dem weltweit ersten hochauflösenden 750-MHz-NMR-Spektrometer im Rahmen der Technologietransfer-Projekte zwischen dem Forschungszentrum Karlsruhe und Bruker BioSpin GmbH.

trometer auch für den eigentlichen wissenschaftlichen Nutzer als ein nahezu wartungsfreies, sicheres, für spezielle Anwendungen praktisch einsetzbares, bedienerfreundliches und vor allem kompaktes Gerät präsentieren. Alle Aspekte sind Voraussetzungen, um zu einer Akzeptanz bei den Käufern zu führen, was sich dann in den Verkaufszahlen widerspiegelt.

Für die NMR-Spektrometer heißt das im einzelnen: Das Herzstück, das supraleitende Magnetsystem, muss die geforderte Zentralfeldstärke mit einer extrem hohen Auflösung von 0,2 Hz in einem Probendurchmesser von 5 mm und einer axialen Länge von 30 mm haben, das heißt z. B. bei einer Resonanzfrequenz von 1000 MHz besser als $2,0 \times 10^{-10}$. Um diese Auflösung realisieren zu können, ist neben einer sehr guten Basis-homogenität des supraleitenden Hauptspulen $\delta B/B_0 \leq 10^{-6}$ auch eine sehr gute zeitliche Stabilität des Feldes kleiner 1 Hz/h notwendig. Das komplette Magnetsystem mit allen Komponenten und der Kryostat dürfen vorgegebene Containergrenzen nicht überschreiten. Des Weiteren muss der Kryostat des Spektrometers verlustarm, für den unbemannten Langzeitbetrieb geeignet sein und natürlich alle Sicherheitskriterien erfüllen. Ein einfaches Handling beim Probenwechsel, gut abgestimmte Probenköpfe sowie exakte Datenerfassung und Auswertung sind ebenfalls unverzichtbar.

Dass die in unseren Technologietransfer-Projekten entstandenen NMR-Spektrometer (750 MHz bis 900 MHz) den Kriterien der Kunden entsprechen, ist an der Weltmarktstellung Bruker BioSpins ab-

leitbar. Details über die technische Realisierung sind natürlich Industriegeheimnisse. Trotzdem soll an dieser Stelle kurz auf die erbrachten Leistungen der Wissenschaftler des Instituts für Technische Physik am Forschungszentrum bezüglich der Kryotechnik und des supraleitenden Magnetsystems eingegangen werden.

Die grundlegendsten Verfahren und Methoden im Bereich der Kryotechnik wurden schon im ersten Technologietransfer-Projekt bis 1991 erfolgreich entwickelt ([2], [3]) Die Aufgabe bestand einerseits darin, einen verlustarmen Kryostaten zu entwerfen, der im Gegensatz zu den damals üblichen 4,2 K flüssig Helium (LHe)-Badkryostaten der Spektrometer bei einer tieferen Betriebstemperatur von 2,17 K, der so genannten Lambdatemperatur T_λ von Helium, arbeitet. Hierzu wurde in vielen Experimenten eine optimale Lösung für eine Unterkühlleinheit mit Joule-Thomson-Ventil, Wärmetauscher, thermischer Barriere und einem Innenrohr auf Raumtemperatur in Verbindung mit sehr geringen Verlusten des Kryostaten im 100-mW-Bereich gefunden, so dass zuverlässig T_λ als Magnetbadtemperatur eingestellt werden kann. Durch ein ausgeklügeltes Design in Verbindung mit den notwendigen Sicherheitseinrichtungen für den Quenchfall (spontaner Übergang vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand mit gleichzeitiger Thermalisierung der gespeicherten magnetischen Energie) und eines störungsfreien Langzeitbetriebs (redundante Pumpen mit USV-Versorgung) ist ein komfortables Kryostatkonzept entstanden, das bei allen NMR-Generationen bis zu den

heutigen modernen 950-MHz-NMR-Spektrometern beibehalten wurde.

Des Weiteren wurde ein leistungsstarker Versuchsstand, die Magnet-Test-Anlage MTA I, zum Test der Magnetsysteme im Langzeitbetrieb aufgebaut. Die Magnetsysteme konnten so auf ihre zeitliche Stabilität und räumliche Homogenität sowie auf ihr generellen Verhaltens z. B. beim Quench hin überprüft werden. Durch ihren relativ einfachen Aufbau ist MTA I ein ideales Testbett. In ihr sind alle ersten Spektrometer der verschiedenen Frequenzklassen bis 900 MHz getestet worden und konnten so in die Serienproduktion überführt werden.

Die Realisierung der supraleitenden Magnetsysteme umspannt ein sehr großes Kompetenzfeld. Einen einfachen und kompakten Überblick über die Komplexität soll Abb. 3 vermitteln.

Jeder Zweig dieser Grafik stellt schon für sich allein genommen eine enorme Herausforderung an die technische Machbarkeit dar. Wird ein neues Magnetsystem entwickelt, müssen immer alle Punkte genau durchdacht, bearbeitet und vor allem aufeinander abgestimmt werden.

Das Hauptaugenmerk bei der hochauflösenden NMR liegt dabei auf den zentralen Fragestellungen: Wie kann mit kommerziellen technischen Supraleitern die gewünschte Zentralfeldstärke unter Berücksichtigung der auftretenden hohen elektromechanischen Kräfte erreicht werden? Wie kann mit diesen Supraleitern die räumliche Homogenität und die zeitliche Stabilität von 1 Hz/h,

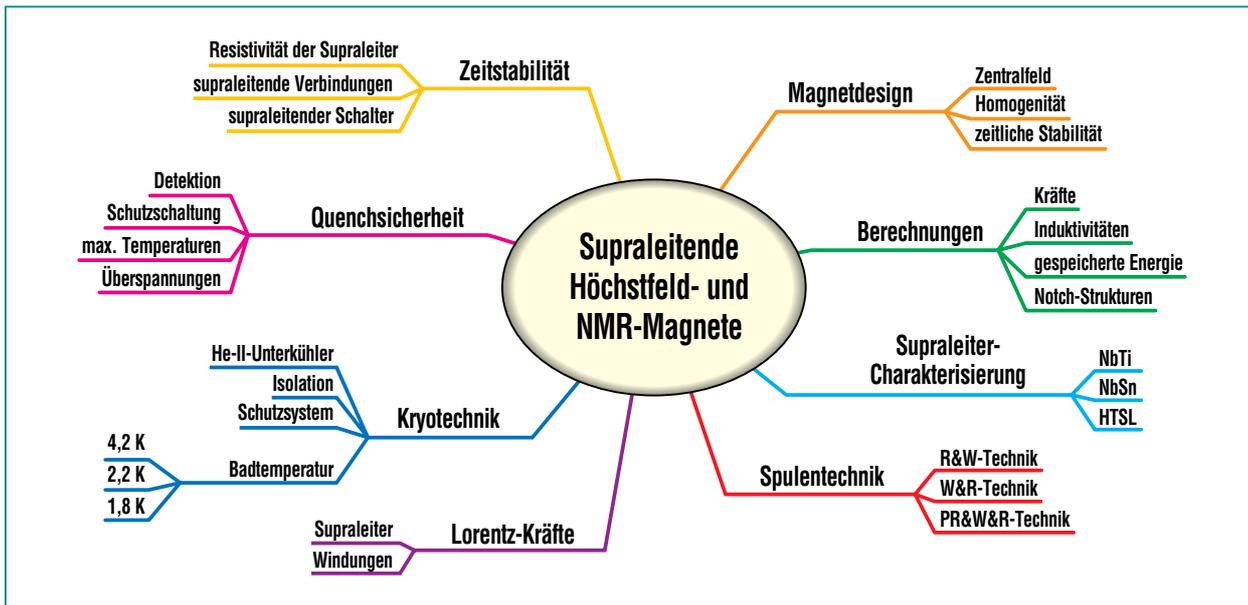


Abb. 3: Komplexität beim Bau supraleitender Höchstfeld- und NMR-Magnete.

was einem Gesamtwiderstand des Magnetsystems kleiner als $10^{-10} \Omega$ entspricht, erzielt werden?

Auch hier konnten sehr viele wichtige Details und Technologien z. B. in der Spulentechnik, Arbeitsvorschriften z. B. bei der Herstellung der Spulenkörper hinsichtlich den Maßhaltigkeiten oder beim Wickelzug, Berechnungsroutinen zur Magnetfeldberechnung oder das Schutznetzwerk im ersten Technologietransfer-Projekt erarbeitet werden. Vor allem aber konnte die Forderung nach zeitlicher Stabilität und Kompaktheit des Systems durch die Entwicklung hoch präziser Mess- und Auswerteroutinen zur Charakterisierung der Strom-Spannungskennlinie (U(I)-Kennlinie) der Supraleiter und neue, innovative Technologien zur Herstellung von supraleitenden Schaltern und supraleitenden Verbindungen [4], die das nahezu gleiche U(I)-Verhalten wie die Supraleiter aufzeigen, erfüllt werden.

Das Wissen und die Erfahrung über die gesamte Spulenfertigung, Quenchsicherheit, supraleitende Schalter, etc. ist wiederum auf die nachfolgenden Spektrometertypen übertragen worden. Jedoch erfüllen diese Spektrometer die Spezifikation nur, weil Kenntnisse über das physikalische Verhalten der Supraleiter, die in den Experimentieranlagen des Hochfeldlabors am ITP nahezu unter Betriebsbedingungen ermittelt werden können, vorliegen und angepasste, optimierte supraleitende Verbindungen vorhanden sind.

Supraleitende Höchstfeldmagnete – Hochfeldlabor des Instituts für Technische Physik

Die Erfolge in der Entwicklung supraleitender Magnetsysteme für die NMR-Spektroskopie waren ohne den vorangegangenen Aufbau der supraleitenden Labormagnete JUMBO und HOMER I nicht mög-

lich. Der Weltrekord von 20,1 T in einer freien Bohrung von 30 mm zeigte schon 1987 das Potenzial des supraleitenden Magnetbaus. JUMBO und HOMER I werden bis heute im Routinebetrieb eingesetzt. Sie sind unverzichtbare Werkzeuge bei den laufenden Technologietransfer-Projekten zur Entwicklung eines 1000-MHz-NMR-Spektrometers und stehen als Testbett in verschiedenen Kooperationen den Wissenschaftlern z. B. von IEKP und ISS/ANKA, der Siemens AG und GSI Darmstadt zur Verfügung.

Um die Grenzen des Machbaren auszuloten, ist derzeit die neueste Hochfeldexperimentieranlage HOMER II im Aufbau. Mit HOMER II wird das Ziel verfolgt, ein supraleitendes Magnetsystem (sole-noidförmige Spulen) mit einer Zentralfeldstärke von 25 T in einer freien Bohrung von 50 mm Durchmesser zu erstellen. Die erste enorm hohe Hürde auf dem Weg dorthin konnte im Juli 2006 über-

wunden werden. HOMER II hat als weltweit erstes, rein supraleitendes Magnetsystem in einer freien Bohrung von beachtlichen 185 mm Durchmesser eine Magnetfeldstärke von 20 T erreicht. Mit der bei 20 T und dem Durchmesser von 185 mm auftretenden Lorentzkraft ist diese Anlage sehr nahe an den Grenzen der mechanischen Belastbarkeit der kommerziell verfügbaren monolithischen $(\text{NbX})_3\text{Sn}$ Multifilamentsupraleiter (Supraleiterhersteller und -lieferant: European Advanced Superconductors EAS in Hanau (früher Vacuum-

schmelze VAC)). Mit HOMER II konnte wiederum eine Weltbestleistung aufgestellt werden, und er übernimmt damit wieder eine Vorreiterrolle.

Das Magnetsystem von HOMER II (Abb. 4) besteht aus zwei äußeren NbTi-Hintergrund-Solenoiden und drei $(\text{NbTaTi})_3\text{Sn}$ -Einsatzspulen. Die Weltrekordleistung ist nur erreichbar, wenn das Magnetsystem auf 1,8 K abgekühlt wird, da die mit abnehmender Temperatur steigende kritische Stromdichte im magnetischen Feld höhere Magnetströme und damit höhere Ma-

gnetfelder zulässt. Die Kryostattechnik, die schon bei HOMER I eingesetzt und auf die NMR-Spektrometer-Kryostate prinzipiell übertragen wurde, kommt auch hier zum Einsatz. Das LHe-Bad ist durch eine thermische Barriere in zwei Räume aufgeteilt, wobei oben eine Temperatur von $T = 4,2$ K und unten die Temperatur des superfluiden Heliums herrscht. Diese Temperatur wird durch Abpumpen eines separaten He-II-Bades erreicht, das über einen Wärmetauscher die Energie aus dem Magnetbad aufnimmt.

Das gesamte Magnetsystem ist am ITP entwickelt und gebaut worden, wobei umfangreiche weiterführende Erfahrungen in der Handhabung und im Verhalten der klassischen Supraleiter NbTi und $(\text{NbTaTi})_3\text{Sn}$ bis zu ihren Grenzwerten hin gesammelt wurden. Dieses Know-how ist in die Technologietransfer-Projekte mit Bruker BioSpin eingeflossen und bildet vor allem die Grundlage für das Magnetdesign, die Supraleiterspezifikationen und die Fertigung der Leiter zum 1000-MHz-Projekt.

Zum weiteren Ausbau des Hochfeldlabors gehört der Neubau einer größeren Magnet-Test-Anlage (MTA II), mit der NMR-Magnetsysteme ab 900 MHz bis etwa 1200 MHz auf ihre Funktion und NMR-Tauglichkeit hin untersucht werden können. MTA II ist ein vertikaler Helium-Weithals-Badkryostat bestehend aus einem äußeren Vakuumbehälter, einem Stickstoffbehälter, einem 4-K-Schild und einem inneren Heliumbehälter mit einem Sitz für eine thermische Barriere. Die Anlage hat einen Außendurchmesser von ca. 2,6 m, einen

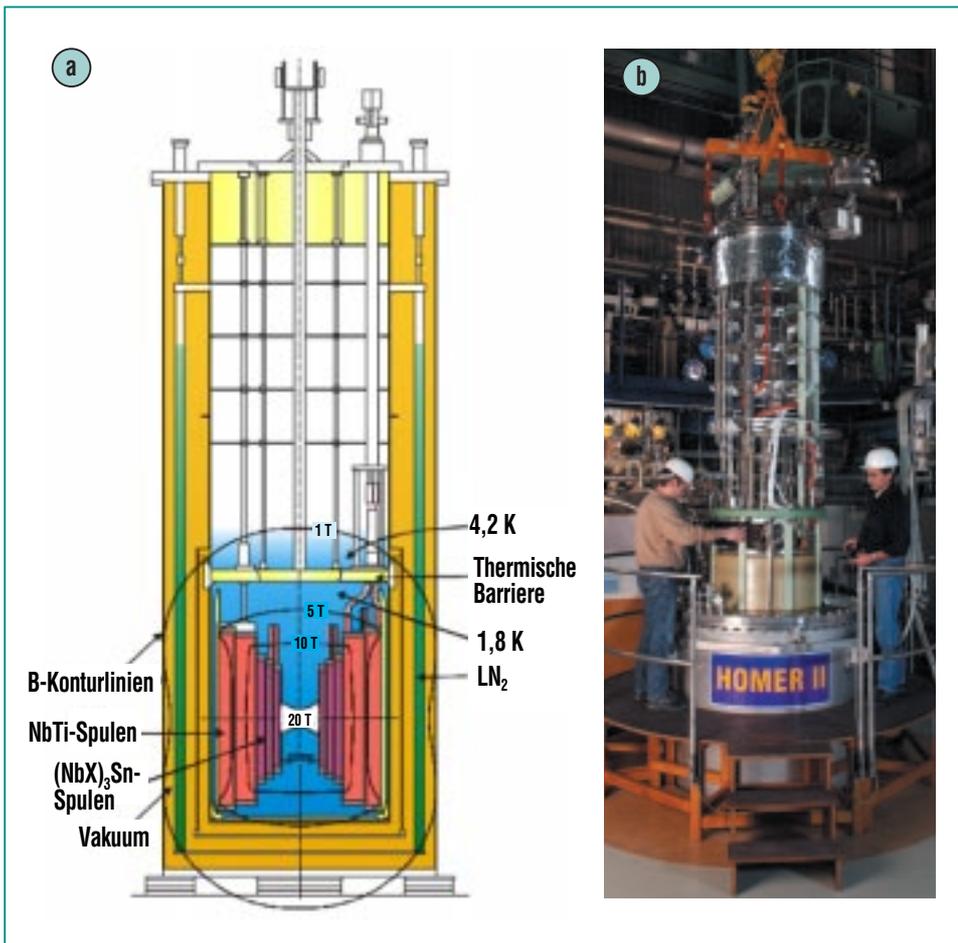


Abb. 4: Hochfeldexperimentieranlage HOMER II: a) Querschnitt durch die Experimentieranlage, b) HOMER-II-Magnetsystem beim Einbau in den Kryostaten.

Innendurchmesser von 1,2 m und eine Gesamthöhe von 5 m. Der Behälteraufbau ist abgeschlossen, und die ersten Dichtigkeits- und Temperaturtests ergaben zufriedenstellende Ergebnisse. Die Arbeiten zur kryogenen und elektrischen Versorgung sowie bezüglich der Schaltanlage und MSR-Technik sind am Laufen. MTA II wird voraussichtlich Ende 2008 in Betrieb gehen.

Zusammenfassung

Nach der über 20-jährigen Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Bruker BioSpin in zahlreichen Technologietransfer-Projekten mit umfangreichen Kooperations- und Lizenzverträgen lässt sich eine sehr positive Bilanz ziehen. Es konnten mit den hochauflösenden NMR-Spektrometern

mit Protonenresonanzfrequenzen ≥ 750 MHz kommerzielle Produkte entwickelt und äußerst erfolgreich vermarktet werden. Bruker BioSpin konnte zum Weltmarktführer aufsteigen und so Arbeitsplätze in der Region Karlsruhe schaffen und erhalten. Durch die Übernahme des Supraleiterherstellers EAS ist ein weiterer Schritt in die Zukunft getan worden.

Die technische Realisierung der hochauflösenden NMR-Spektrometer ist die Grundlage für die wissenschaftlichen Erfolge der NMR-Anwender. Dies spiegelt sich in den Gründungen deutscher NMR-Kompetenzzentren in den letzten Jahren und der Verleihung von Preisen, wie der Nobel-Preis im Jahr 2002 an Prof. Dr. K. Wüthrich oder des Leibziger Wissenschaftspreises 2006 an Prof. Dr. J. Haase (MPZ Leipzig) wider.

Das Forschungszentrum ist durch die bisherigen Lizenzzahlungen und mit laufenden Lizenzverträgen über das Jahr 2015 hinaus an diesem Erfolg beteiligt. Mit der Hochfeldexperimentieranlage HOMER II und der neuen Magnet-Test-Anlage MTA II ist das Zentrum für die bevorstehenden Aufgaben gerüstet. Beide Partner wollen daher den Synergieeffekt ausnutzen und diese fruchtbare Zusammenarbeit fortsetzen.

Literatur

- [1] P. Turowski, Th. Schneider, *Physica B* 164 (1990), 3
- [2] Patentschrift DE 4039365 C2 (8-33)
- [3] Patentschrift DE 4039332
- [4] Patentschrift DE 4017553 C1 (7-34)

Sensolute GmbH – Technologietransfer durch ein neuartiges Ausgründungsmodell

G. Müller, IPE

Das Ausgründungskonzept

Mit Energie sparenden Mikro-Vibrationsschaltern und einem neuen Ausgründungsmodell werden Wissenschaftler des Forschungszentrums Karlsruhe zu Vermarktern ihrer Arbeit.

Von der ersten Idee bis zur Gründung der Sensolute GmbH sind fünf Jahre vergangen. Seit 2001 arbeiten Prof. Dr. Hartmut Gemmeke, Leiter des Instituts für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (IPE) am Forschungszentrum Karlsruhe, und sein Mitarbeiter Thomas Blank mit ihrem Team an einem Mikro-Vibrationsschalter, der mit einem preiswerten Standard-Verfahren in großen Mengen produziert werden kann. Nach dem Aufbau einer Prototypenserie begannen sie 2005 mit den Planungen für die kommerzielle Vermarktung der Schalter. Das neuartige Ausgründungsmodell – die Wissenschaftler sind an der neuen Firma beteiligt, bleiben aber weiterhin an ihrem Institut tätig –

bewertet Hartmut Gemmeke sehr positiv: „Mit Hilfe der Technologietransfer-Abteilung des Forschungszentrums, der finanziellen Unterstützung der Helmholtz-Gemeinschaft und unserem regionalen Partner, der engage AG, haben wir einen gangbaren Weg für die Ausgründung unserer Technologie gefunden. Nun können wir uns weiterhin der Forschung und Entwicklung am Forschungszentrum widmen und zugleich die Kunden für Mikro-Vibrationssensoren zufrieden stellen.“

„Wir unterstützen mutige und engagierte Wissenschaftler, die ihre Ideen mit einer Ausgründung selbst umsetzen wollen“, erklärt Professor Dr. Jürgen Mlynek, Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft. Aus dem Impuls- und Vernetzungsfonds des Präsidenten der Helmholtz-Gemeinschaft wird der EEF-II-Fonds (Fonds zur Erleichterung für Existenzgründungen aus Forschungseinrichtungen) finanziert, mit dem auch die Ausgründung der Sensolute GmbH gefördert wird. Professor Dr. Hartmut Gemmeke und Thomas Blank (IPE) haben im Rahmen des Ausgründungsvorhabens Sensolute aus den EEF-II-Mitteln einen Mitarbeiter für Vertrieb und Marketing eingestellt. An der Ausgründung mitbeteiligt ist mit 20 Prozent auch das Forschungszentrum Karlsruhe selbst.

„Die Gründung von Sensolute ist ein tolles Beispiel dafür, wie Forschungsergebnisse in ein marktfähiges Produkt überführt werden können“, sagt Jens-Thomas Koberstad, kaufmännischer Geschäftsführer der Sensolute GmbH und Senior Venture Manager der engage AG (www.engage-venture.com).

„Wir und unser Gesellschafter, das Forschungszentrum Karlsruhe, zeigen, dass neue Wege des Technologietransfers auch in Deutschland möglich sind, und nicht nur in den USA.“

Das Produkt: Mikro-Vibrationssensoren

Vibrationssensoren werden schon seit vielen Jahren in Form von Kugelschaltern aufgebaut und als bedrahtete Bauteile mit einer Kugel oder einer Quecksilberperle, die sich in einem Becher befindet, für elektronische Produkte angeboten. Kugelschalter detektieren geringste Bewegungen, indem die Kugel zwei elektrische Kontakte überbrückt.

Am IPE wurde in den letzten Jahren eine neuartige Aufbautechnologie für Vibrationssensoren in Leiterplattentechnik entwickelt, die es ermöglicht, eine bewegungsempfindliche sensorische Schicht in die Leiterplatte zu integrieren (Abb. 1). Herzstück des Sensors ist eine vergoldete Mikro-Kugel mit nur 0,8 mm Durchmesser, die sich im Inneren eines Hohlraums einer mehrlagigen Leiterplatte frei bewegen kann. Je nach Ausgangslage überbrückt oder unterbricht die Kugel zwei Kontakte, so dass der Schalter aus einem hochohmigen in einen niederohmigen Zustand (oder umgekehrt) übergeht. Die daraus resultierenden Impulse (oder deren Ausbleiben) werden in einer Elektronik ausgewertet und in anwendungsspezifische Schaltbefehle umgesetzt.

Die Integration der Sensoren in Leiterplattentechnik erlaubt den Aufbau sehr kleiner und preisgünstiger Vibrationssensoren, die somit

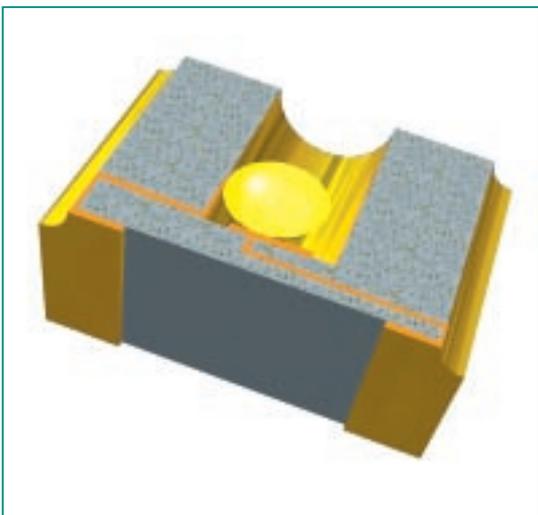


Abb. 1: Querschnitt durch einen einzelnen Mikro-Vibrationssensor.

Anwendung auch in sehr kompakten batteriebetriebenen elektronischen Geräten finden.

Im Gegensatz zu den bisher eingesetzten Kugelschaltern (Abb. 2.) bieten die Mikro-Vibrationssensoren von Sensolute folgende Vorteile:

- sehr klein (Abb. 3), Außenabmessungen nur ca. 2,8 mm x 2,4 mm x 1,7 mm
- enthalten kein Quecksilber und erfüllen die EU-Umweltstandards
- korrosionsfest durch vergoldete Kontaktflächen und hermetisch geschlossene Bauweise
- Test jedes einzelnen Sensors vor Auslieferung (Abb. 4)
- geräuschfreie Arbeitsweise
- SMD-montierbar
- preisgünstig durch Großserienfertigung

Die Bauweise des Mikro-Vibrationssensors in Leiterplattentechnologie ist patentrechtlich geschützt.

Die Anwendungsgebiete für den Sensor

Während der Sensor anfangs in Kombination mit Lichtsensoren ausschließlich zur automatischen bewegungs- und lichtabhängigen Steuerung von batteriebetriebenen Fahrradbeleuchtungen eingesetzt wurde, findet er sich inzwischen auch in Fahrrad-Computern, Werkzeugen mit Digitaldisplay, Sensornetzwerken, Datenloggern und Chipkarten, so-

nannten Smart Cards. Die Sensoren steuern in diesen Systemen maßgeblich den Betriebszustand (ein/aus), um so den Energieverbrauch zu reduzieren.

Zukünftig sollen weitere Anwendungen für den Mikro-Vibrationssensor erschlossen werden wie beispielsweise: Batterie-Spar-schaltungen in schnurlosen Headsets, optischen PC-Mäusen oder Fernbedienungen mit Digitaldisplay, die komfortable Abschaltung des Alarmtons von Weckern und Radio-Uhren durch einfaches Berühren oder Antippen des Geräts, die Bewegungsdetektion in Alarmanlagen oder die bewegungsabhängige Funktionsauslösung in Spielzeugen.

Die aktive Vermarktung des Mikro-Vibrationssensors durch Sensolute

Parallel mit der Gründung der Sensolute GmbH begann die aktive Vermarktung des Sensors. Zunächst wurden geeignete Zielmärkte definiert und Firmen direkt telefonisch und per Email angesprochen und über die innovative Technologie sowie die Vorteile des Mikro-Vibrationssensors informiert. Aus diesen Kontakten ergaben sich zahlreiche Projekte und erste Aufträge. Zeitgleich wurde die Sensolute-Homepage www.sensolute.com erstellt, was zu weiteren Anfragen, Kontakten und Aufträgen führte. Inzwischen erfolgt die Vermarktung auch international in Zusammenarbeit mit lokalen Vertretungen und Distributoren, teils auf Basis exklusiver Verträge, teils auf Projektbasis. So wurde erst kürzlich mit



Abb 2: Größenvergleich zwischen einem herkömmlichen Kugelschalter und dem Mikro-Vibrationssensor von Sensolute.

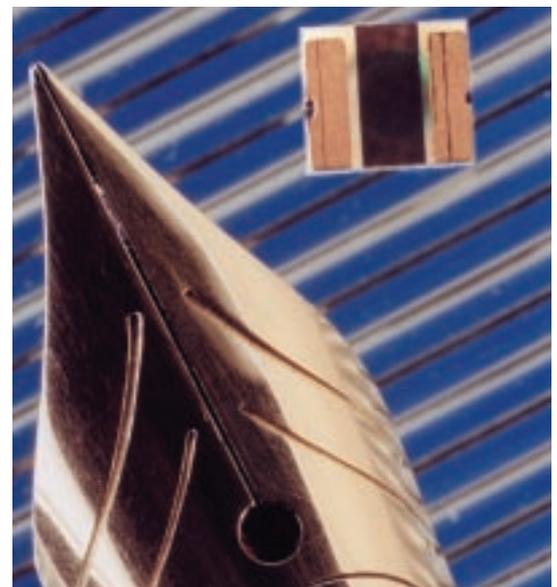


Abb. 3: Der Mikro-Vibrationssensor im Größenvergleich mit einer Schreibfeder.



Abb. 4: Vereinzeln der Sensoren: nur die als „gut“ getesteten werden durch einen Roboter von der Trägerfolie abgenommen, anschließend gegurtet und verpackt.

dem Distributor Fintronic OY, Helsinki, ein Vertriebspartner-Vertrag geschlossen. Die finnische Firma ist seit Jahren bestens in den finnischen und baltischen Märkten etabliert und eröffnet in Kürze auch in Moskau eine Niederlassung. Weitere Vertriebskooperationen zunächst in Europa, später auch im außereuropäischen Ausland, sollen abgeschlossen werden.

Die möglichen Weiterentwicklungen

Die Integration funktioneller Schichten in Leiterplatten schreitet stetig voran. Sie Ihr Ziel ist es, Systemkomponenten in die Leiterplatte zu integrieren, um die Systemfunktionalität zu erhöhen beziehungsweise deren Baugröße zu reduzieren. Der Aufbau sensorischer Mikrokomponenten mit Hilfe der Leiter-

plattentechnik stellt eine preiswerte Ergänzung und Alternative zu Mikrokomponenten aus Silizium dar. Die Erschließung und Modifikation der Leiterplattenfertigungsprozesse zum Aufbau von Vibrationsschaltern hat ein enormes Know-how generiert, das zukünftig für den Aufbau weiterer Sensorbauarten, zum Beispiel von Neigungssensoren, genutzt werden soll.

Vom Forscher zum Unternehmer

K. Balster, ADMEDES Schuessler GmbH

Einleitung

Dr. Andreas Schüßler, Gründer und geschäftsführender Gesellschafter der ADMEDES Schuessler GmbH, hat seine Vision mit der richtigen Strategie, mit Partnern, die das Unternehmen stützten und mit motivierten Mitarbeitern konsequent verfolgt: elf Jahre nach der Gründung ist die Admedes Schuessler GmbH das weltweit führende Unternehmen in der OEM-Herstellung von Komponenten für Gefäßimplantate. und gehörte in diesem Jahr zu den Finalisten des renommierten vom Prüfungs- und Beratungsunternehmen Ernst & Young ausgeschriebenem Wirtschaftspreis „Entrepreneur des Jahres 2007“.

Bei den Produkten des Unternehmens handelt es sich vornehmlich um vaskuläre Implantate, die, beginnend mit Rahmen für künstliche Herzklappen und Stent-Grafts für die Aorta, über selbstexpandier-

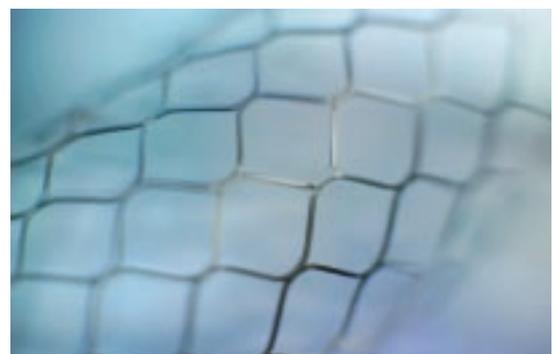
bare Stents für die Beinarterien bis hin zu Stents für die Herzkranzgefäße mit speziellen Technologien nach Spezifikationsvorgaben der Kunden gefertigt werden. Weiterhin bietet das Unternehmen umfangreiche Serviceleistungen, wie schnelle Musterfertigung, Begleitung der Kunden vom Erstmuster bis zur Serienproduktion und unterschiedliche Analyse- und Untersuchungsverfahren an, um die Produkte der Kunden möglichst schnell zur Marktreife zu bringen. Die Produktion erfolgt ausschließlich am Standort Pforzheim.

Anfänge im Forschungszentrum Karlsruhe

Dr. Schüßler leitete in den Jahren 1989 bis 1996 die Gruppe Lasermaterialbearbeitung am Institut für Materialforschung I, die sich zunächst schwerpunktmäßig mit der Modifizierung von Metall und Keramikoberflächen durch CO₂-Laserbehandlung beschäftigte. Mit der Neuorientierung des Forschungszentrums weg von der Kernforschung hin zur Mikrosystemtechnik hatte Dr. Schüßler die Möglichkeit einen Nd:YAG Laser zur Feinbearbeitung anzuschaffen. Nun konnten die wissenschaftlichen Arbeiten am IMT und am HVT durch die Fertigung von Komponenten für Shape-Memory-Alloy-Mikroaktoren und Teilen für die Medizintechnikentwicklung unterstützt werden. Um die Laserfein- und Mikrobearbeitung weiter voranzutreiben, baute Dr. Schüßler eine kleine, aber schlagkräftige Gruppe auf. Die Forschung im Team mit dem Diplom-Ingenieur Heino Besser und der Metallographin Beate Rabsch wurde durch eine Reihe studentischer Arbeiten

unterstützt. Dr. Schüßler konzentrierte seine wissenschaftlichen Arbeiten auf das Gebiet des Laserschneidens, -abtrags und -fügens von NiTi-Formgedächtnislegierungen (Nitinol). Ergebnis der Forschungen waren drei Diplomarbeiten, eine Doktorarbeit und zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen.

Mit der Verknappung der öffentlichen Mittel zu Beginn der 90er-Jahre mussten auch im Forschungszentrum Karlsruhe vermehrt sogenannte „Drittmittel“ eingeworben werden. Diese Entwicklung kam Dr. Schüßler und seinem Wunsch, seine Forschungsergebnisse in der praktischen Anwendung zu sehen, entgegen, und er begann, entsprechende Kontakte zur Industrie zu knüpfen. Bald waren die ersten Kooperationen etabliert und 1994 begann die Arbeitsgruppe, die ersten Teile aus Nitinol für nationale und internationale Kunden zu fertigen. Nach kurzer Zeit erwies sich das Laserschneiden von Stents als die am stärksten nachgefragte Dienstleistung, so dass schließlich in zwei Schichten am Forschungszentrum gefertigt wurde. Sehr bald war klar, dass eine Ausweitung der Produktion, zumal in industriellem Maßstab, an diesem Standort nicht möglich war und die Idee einer



technologieorientierten Ausgründung entstand.

Am 27. Juni 1996 wurde die Euroflex Schuessler GmbH gegründet, die Ihren Firmensitz zunächst im Gebäude der Pforzheimer Traditionsfirma G. Rau GmbH & Co. KG hatte. In der Vorbereitungs- und Planungsphase erhielt Dr. Schübler große Unterstützung durch Dr. Wüst, den damaligen Leiter der Abteilung Technologietransfer am Forschungszentrum. Dank dessen Hilfe war es ihm möglich, das Unternehmen bis Mai 1997 zunächst in einer Nebentätigkeit aufzubauen und danach bis Oktober 1997 in einer Teilzeitbeschäftigung zu führen. In dieser Zeit hatte das junge Unternehmen lediglich drei Mitarbeiter. Schon bald begann Dr. Schübler, neben dem Laserschneidgeschäft die Prozessentwicklung für die Wärmebehandlung und das Elektropolieren von Stents zu forcieren, um die Grundlagen für die Komplettfertigung von medizinischen Mikrokomponenten zu legen. Hier kam dem Forscher seine wissenschaftliche Ausbildung zugute.

Während die Auftragslage beim Laserschneiden von Stents ständig stieg, zeigte der Markt ein zunehmendes Interesse an der Komplettfertigung von selbstexpandierbaren Stents aus Nitinol. Der Gründer hatte die Notwendigkeit, die gesamte Wertschöpfungskette anzubieten, rechtzeitig erkannt, was dem Unternehmen zu einem geradezu stürmischen Wachstum verhalf. Das Engagement, der unternehmerische Geist und der Mut von Dr. Schübler wurde 1999 mit der Auszeichnung durch Bundespräsident Roman Herzog im Rahmen der Initiative „Mutige Unter-



nehmer braucht das Land“ gewürdigt.

Im Januar 2001 zog die Euroflex Schuessler GmbH – zu der Zeit immerhin schon Marktführer in Europa – mit etwa 25 Mitarbeitern in ihr erstes eigenes Gebäude im Industriegebiet „Wilferdinger Höhe“ in Pforzheim. Die Tatsache, dass Dr. Schübler schon frühzeitig auf die USA als Hauptmarkt für Stents gesetzt hatte, begann sich jetzt auszuzahlen und das Unternehmen konnte Jahr für Jahr neue Kunden gewinnen. Es wuchs so rasant, dass im Jahre 2004 bereits der zweite Bauabschnitt des Firmengebäudes in der Rastatter Straße bezogen wurde. Mit der Umstrukturierung der Fertigung und der deutlichen Ausweitung des Projekt- und Prozess-Engineerings war ein weiterer Flächenbedarf verbunden, so dass im Frühjahr 2007 der dritte Bauabschnitt mit mittlerweile knapp 300 Mitarbeitern bezogen wurde. Die etwa 8500 qm Fläche für Produktion, Entwicklung und Verwaltung sind zwar noch nicht ganz gefüllt, aber alle dürfen gespannt sein, wohin der Entwickler aus dem Forschungszentrum Karlsruhe das Unternehmen noch führen wird.

Für Dr. Schübler sind gute, hoch motivierte Mitarbeiter und eine zielgerichtete Entwicklung von Herstellprozessen und Prüftechniken Schlüssel zum Unternehmenserfolg. Diese Philosophie hat es so manchem ehemaligen Werkstudenten der Universität Karlsruhe ermöglicht, heute eine der Führungspositionen im Unternehmen zu bekleiden. Weiterhin werden im Bereich FuE Studien- und Diplomarbeiten durchgeführt. Diese Arbeiten werden längst nicht mehr von Dr. Schübler persönlich betreut, aber inhaltlich durchaus begleitet. Die ADMEDES Schuessler GmbH ist immer interessiert, motivierte Studenten und Absolventen zu integrieren und ihnen Chancen zu eröffnen. Interessenten können sich gern an Dr. Schübler persönlich wenden: aschuessler@admedes.com.



Forum Industrie und Forschung (FIF)

Th. Schaller, NANOMIKRO

Einleitung

„Der Weg von der Forschung in die Industrie muss schneller gehen“, so der Wunsch von Bundeskanzlerin Angela Merkel in ihrer Festrede zum 50-jährigen Jubiläum des Forschungszentrums Karlsruhe. Das Forum Industrie und Forschung (FIF) ist eine Initiative des Forschungszentrums Karlsruhe zur Verbesserung des Wissens- und Technologietransfers in den Bereichen Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie. Seit 1999 bietet FIF seinen Mitgliedsunternehmen interdisziplinäre Beratung und technologische Dienstleistungen. Als Forschungs- und Entwicklungspartner für Unternehmen jeder Größenordnung, vom Start-up bis zum Großkonzern, verknüpft FIF verlässliche Kooperation mit schneller und unkomplizierter Kommunikation und wird so, um das Bild der Bundeskanzlerin aufzugreifen, zur Überholspur der Straße zwischen Forschung und Industrie.

Der Forschungsbereich Schlüsseltechnologien im Forschungszentrum umfasst strategisch wichtige Technologien, deren Entwicklung ein großes Potenzial für industrielle Innovationen erschließt. Das Forschungszentrum konzentriert sich dabei auf solche Technologiebereiche, in denen höchst anspruchsvolle und komplexe wissenschaftliche Grundlagenforschung Voraussetzung für mögliche große Innovationsfortschritte ist. Zu solchen Schlüsseltechnologien gehört insbesondere die Mikrosystemtechnik, die als *enabling technology* viele Entwicklungen in den unterschiedlichsten Branchen erst möglich macht. An

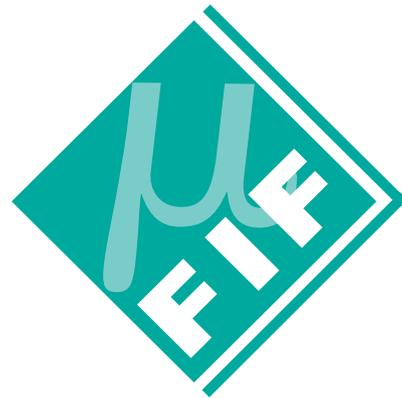
der Schnittstelle von Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie eröffnet sich mit neuartigen nanoskaligen Effekten ein weiteres Zukunftsfeld, von dem erwartet wird, dass es wesentliche Impulse für Innovationen geben wird. Die Arbeiten des Forschungszentrums zielen neben der Grundlagenforschung darauf ab, anwendungsgerechte Lösungen zu entwickeln und die Industrie bei der Umsetzung in die industrielle Praxis zu begleiten. Dabei verfolgt das Forschungszentrum interdisziplinäre Ansätze, die sich auf einen Technologiepool gründen, der mechanische, optische, magnetische, fluidische, elektrische, werkstoffkundliche und informationstechnische Kompetenzen umfasst. Vor diesem Hintergrund betreibt das Forschungszentrum seit 1999 das Forum Industrie und Forschung (FIF), vormals IndustrieForum Mikrofertigungstechnik, als Angebot an industrielle Nutzer der Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie.

Was ist FIF?

FIF ist ein Unternehmensclub, dessen Mitglieder in besonderer Weise Leistungen des Forschungszentrums in Anspruch nehmen können. FIF kann in unterschiedlicher Weise genutzt werden, nämlich als

- Förderer und Manager von Entwicklungen und Innovationen,
- Berater und Dienstleister,
- Netzwerk und Informationsplattform.

Den Mitgliedsunternehmen werden die Potenziale der Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie erschlossen. FIF hat die Aufgabe, im



intensiven Dialog mit den Mitgliedsunternehmen den Erfahrungsaustausch zwischen dem Forschungszentrum und der Industrie zu fördern.

Ziel ist das gegenseitige Kennenlernen der Anforderungen und Wünsche zu beiderseitigem Nutzen im Hinblick auf den Einsatz von Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie für innovative Komponenten, Systeme, Fertigungsprozesse und Produkte. FIF ist der Motor für den Erfahrungsaustausch und liefert den Unternehmen Informationen aus dem Forschungszentrum, vermittelt fachliche Beratung durch Experten und leistet praktische Unterstützung in Form von Dienstleistungen. Neben der industriellen Umsetzung von Forschungsergebnissen und der gezielten Nutzung der Infrastruktur im Forschungs-

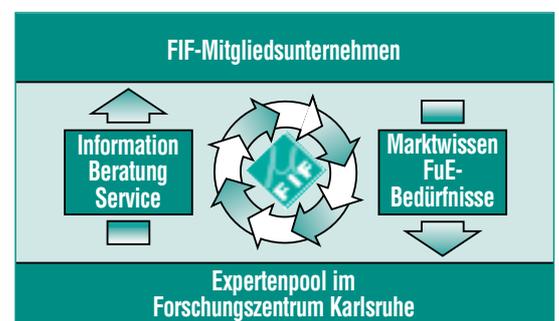


Abb. 1: FIF ist Motor für Kommunikation zwischen Forschung und Industrie.

zentrum sollen sich aus den Kontakten weitere Geschäftsbeziehungen zwischen dem Forschungszentrum und Mitgliedsunternehmen oder zwischen den Mitgliedsunternehmen ergeben. Durch die intensive Kommunikation zwischen Forschungszentrum und den FIF-Mitgliedsunternehmen erfolgt eine Rückkopplung der marktgetriebenen Bedürfnisse auf die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Forschungszentrums, wodurch künftige Handlungsfelder identifiziert und bearbeitet werden können.

Was bietet FIF?

Die FIF-Mitgliedsunternehmen stehen im Mittelpunkt des Interesses. FIF begleitet die Unternehmen bei Entwicklungen und Innovationsprozessen durch Projekte und Kooperationen, erarbeitet individuelle Problemlösungen und bietet



Abb. 2: FIF-Workshop.

Kontakt:

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Forum Industrie und Forschung (FIF)
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Tel. +49 7247 82-6272

Fax +49 7247 82-6273

E-Mail: fif@nanomikro.fzk.de

www.fzk.de/fif/

Technologieportfolio (Auszug)

- Mikrozerspanung
- Lithographie
- Lasermikrobearbeitung
- Galvanoformung
- Replikation (Spritzgießen, Heißprägen usw.)
- Dünnschichttechnik
- Elektronischer Systemaufbau
- Mikrohandhabung und Mikromontage
- Keramische Prozesstechnik
- Chemische und thermische Mikroverfahrenstechnik
- Simulations-, Analyse- und Prüfverfahren
- Werkstofftechnik
- Nanotechnologie

Tab. 1: Technologieportfolio des FIF.

Schulungs- und Trainingsmöglichkeiten bis hin zum Mitarbeiteraustausch. Beratung und Dienstleistung umfassen das gesamte Spektrum von Problemanalysen, Machbarkeitsstudien, Prototypenfertigung und Kleinserien bis hin zu Literaturrecherchen, Messe- und Konferenzreports. Die interdisziplinäre Kompetenz von FIF entspringt einem großen Netzwerk und ist von den Mitgliedsunternehmen über eine zentrale Hotline, Workshops, Newsletter und Internetseiten nutzbar.

Es gibt keine Fragestellung, die zu klein oder zu komplex für FIF ist. Ob wir bereits mit einer raster-elektronenmikroskopischen Aufnahme helfen können, ob eine materialwissenschaftliche Zuverlässigkeitsuntersuchung benötigt wird oder FIF Beiträge zur Entwicklung eines Fertigungsprozesses liefert: Wir stehen als Partner bereit. Die FIF-Leistungen sind dabei nicht auf das Technologieportfolio des

Forschungszentrums beschränkt. Durch die Einbindung von FIF in die Mikrosystemtechnik- und Nanotechnologie-Aktivitäten Baden-Württembergs kann der Zugang zu einem erheblich breiter gefächerten Technologieportfolio eröffnet werden.

FIF bietet einen besonderen, erstklassigen Zugang zu Technologien und Experten des Forschungszentrums, der in dieser Form einzigartig und nur für FIF-Mitgliedsunternehmen verfügbar ist. Mitglied kann jedes Unternehmen werden; der Jahresbeitrag staffelt sich nach Unternehmensgröße und beträgt 1.000, 3.000 oder 5.000 Euro. Bei FIF wird Wert auf eine langfristige Kooperation zum Aufbau einer vertrauensvollen Zusammenarbeit gelegt. Die besonderen Stärken von FIF bestehen im umfassenden Service aus einer Hand und der individuellen Problemlösung durch interdisziplinäre Teams.

Innovation durch Nanotechnik

R. Hedderich, NanoMat

Einleitung

Die strategische Allianz NanoMat schafft Lust auf Innovationen durch Ausschöpfung vorhandener Synergiepotenziale

NanoMat ist ein überregionales Netzwerk für Materialien der Nanotechnologie. Die 26 NanoMat-Partner aus Industrie und Wissenschaft haben das Ziel, Erkenntnisse der Nanotechnologie in Produkte und Dienstleistungen zu integrieren, um hochqualifizierte industrielle Arbeitsplätze in Deutschland zu schaffen.

Von Nanotechnologie spricht man heute im Allgemeinen, sobald Strukturen und Materialien mit einer Dimension oder Fertigungstoleranz typischerweise unter 100 Nanometern zum Tragen kommen. Die Hohensteiner Institute haben in Zusammenarbeit mit dem Netzwerk NanoMat eine Definition für Nanotechnologie gefunden, die sich auch auf den breiten Bereich der Textilien anwenden lässt. Unter Nanotechnologie versteht man Herstellungsverfahren, die zu einer systemischen Anordnung funktioneller Strukturen führen, die durch ihre Nanoskaligkeit zu größenabhängigen Eigenschaften und zu neuen Funktionalitäten und Anwendungsoptionen von Materialien und Produkten führen.

Nach einer von der Wirtschaftswoche veröffentlichten Befragung von Technologie-Unternehmen wird die Region Karlsruhe als das Zentrum der Nanowissenschaften in Deutschland aufgefasst. Dabei spielen zwei kooperierende For-



Abb. 1: www.nanomat.de

schungsinstitutionen eine Schlüsselrolle: das an der Universität Karlsruhe angesiedelte DFG-Forschungszentrum Funktionelle Nanostrukturen (CFN) und das Institut für Nanotechnologie (INT) am Forschungszentrum Karlsruhe. Neben technisch-wissenschaftlichen Fragestellungen widmet sich das Forschungszentrum technologiebegleitenden Aufgaben. Diese umfassen den Betrieb von Kompetenznetzwerken, die Politikberatung und die Technikfolgenabschätzung. Das Ziel der hieran geknüpften Aktivitäten ist es, durch öffentliche Information, zielgruppenspezifische Beratung und Akzeptanzschaffung den Transfer wissenschaftlich-technischer Erkenntnisse in die kommerzielle Anwendung zu beschleunigen. Für den Bereich der Nanowissenschaften befindet sich am Forschungszentrum Karlsruhe die Geschäftsstelle des 1998 gegründeten Bundesdeutschen Kompetenznetzwerks für Nanomaterialien (NanoMat).

Leistungsspektrum von NanoMat

Das Ziel von NanoMat ist es, die Kompetenzen der Partner zu bündeln, so dass deren Projekte interdisziplinär und durchgängig von

der Vorlaufforschung bis zum Transfer in wirtschaftlich verwertbare Resultate überführt werden können. Darüber hinaus operiert NanoMat in den Bereichen Technologiekommunikation und Politikberatung und versteht sich als Vorreiter bei der Zusammenführung von Forschung und industrieller Anwendung im Bereich KMU. NanoMat bietet die Möglichkeit, interdisziplinär und institutsübergreifend zusammenzuarbeiten und dabei zu neuen, unerwarteten Lösungen und Erkenntnissen zu gelangen; wobei die Möglichkeit, über neue Ansätze nachzudenken und sich mit den Netzwerkkollegen offen auszutauschen das Flair von NanoMat ausmacht.

NanoMat ist in das BMBF-Projekt „NanoCare“ eingebunden, dessen Ziel die Erzeugung wissenschaftlicher Erkenntnisse über mögliche gesundheitliche Auswirkungen von Nanopartikeln sowie die Einrichtung einer strukturierten und interpretierten Informationsbasis ist, die im Internet publik gemacht werden soll. Die Konsortialführung und Koordination dieses Projektes liegt beim Forschungszentrum Karlsruhe (Abb. 2).

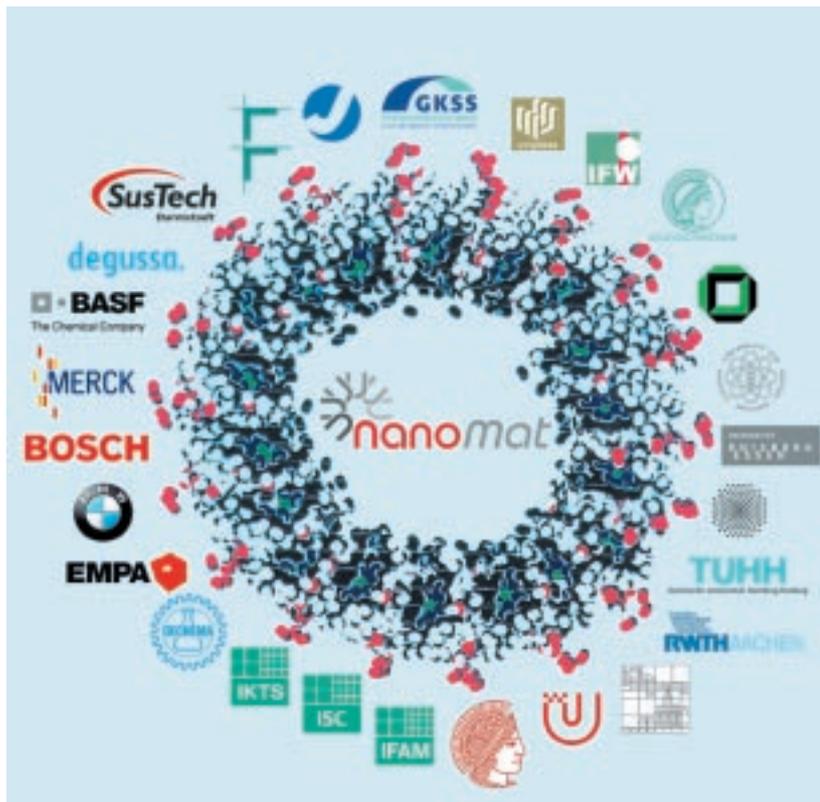


Abb. 2: Die NanoMat-Partner als Liganden des supramolekularen Lichtsammlermoleküls.

Technologietransfer

Deutschland gehört auf dem Gebiet der Nanotechnologie zu den forschungsintensivsten Ländern. Wie mühsam die Automatisierung eines im Labor sicher funktionierenden Prozesses sein kann, soll am Beispiel der automatisierten Antireflexbeschichtung von Uhrengläsern kurz beschrieben werden.

Antireflexschichten (AR) sind aus der technischen Welt kaum mehr wegzudenken. Waren sie lange Zeit nur hochwertigen optischen Instrumenten vorbehalten, so wurden schon Ende der 1970er Jahre fast alle Spiegelreflex-Kameras optisch vergütet. In den letzten beiden Jahrzehnten haben sich AR-

Schichten vor allem auf dem japanischen und dem westeuropäischen Brillenmarkt durchgesetzt. Dies geschah trotz empfindlicher Mehrkosten für den Endverbraucher. Gravierende Vorteile durch die Beschichtung (bessere Sicht bei extremen Beleuchtungssituationen und ästhetische Gesichtspunkte) haben dies bewirkt. Ähnliches könnte sich bald im Bereich der Uhrenindustrie abspielen. Auch hier können eine verbesserte Funktion (Ablesbarkeit) und eine schönere Gesamterscheinung erreicht werden. Gelingt es, ein extrem kostengünstiges und produktives Verfahren zur Verfügung zu stellen, so könnten bald alle Uhrgläser vergütet sein. Andere Massenmärkte wie Handys könnten folgen.

Dr. Stefan Walheim (Institut für Nanotechnologie) hat die Grundlagen für ein nanotechnologisches Verfahren zur Beschichtung von reflektierenden Substraten entwickelt, das diese entspiegelt. Es bietet durch seine kostengünstige Prozessführung und die vergleichsweise geringe Prozesszeit von weniger als einer Minute das Potenzial zur optischen Vergütung. Dies gilt speziell für Produkte, für die eine Antireflexbeschichtung zwar wünschenswert, aber bislang noch zu teuer ist. Eine solche Anwendung könnten beispielsweise Deckgläser von Armbanduhren sein. Die nanoskalige Porösität ermöglicht ein „Antireflex-Wasserzeichen“, welches als Sicherheitsmerkmal und/oder als Werbesignet eingesetzt werden kann (Abb. 3).

Nach einer aktuellen Schätzung des Kompetenznetzwerks NanoMat sind etwa 600 kleine und mittelständige Unternehmen (KMU) in Deutschland mit Entwicklung, Anwendung oder dem Vertrieb nanotechnologischer Produkte und Verfahren befasst. Allerdings verfügen KMU oftmals nicht über Zeit und Mittel, um sich rasch und effizient über neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu informieren und deren Relevanz für eigene Vorhaben einzuschätzen. Dies gilt auch für den Zugang zu Marktinformation und zur Entwicklung von firmenspezifischen „Roadmaps“. Zudem müssen KMU auf regionale Kooperationsbeziehungen setzen. Diese sind jedoch bisher wenig durch Netzwerke unterstützt. NanoMat hat deshalb eine Veranstaltungsreihe „NanoMat für den Mittelstand“ ins Leben gerufen, um die inhaltliche und organisatorische Vernetzung der KMU voran-



Abb. 3: Antireflexbeschichtetes Uhrenglas mit „Antireflex-Wasserzeichen“ (nanomat-Logo), welches nur in Reflexion – also nur unter einem bestimmten Betrachtungswinkel – zu sehen ist.

zutreiben. Durch die NanoMat-Partner aus Industrie und Wissenschaft und durch das Forschungszentrum

Karlsruhe wird der Zugang zu Wissen und moderner Infrastruktur ermöglicht. Durch die Etablierung ei-

nes „Nano-Valleys“ über die drei Metropolregionen Frankfurt, Rhein-Neckar und Basel soll eine kritische Masse geschaffen werden, die erfolgreiche technologische Entwicklungen mit wirtschaftlichem Potenzial erst ermöglicht. Zudem soll dadurch ein hohes Maß an thematischer Vielfalt und budgetärer Flexibilität erreicht werden, so dass zeitnah auf neue Erfolg versprechende Entwicklungen im Nanotechnologiebereich reagiert werden kann – und das bundesländerübergreifend.

Ziel ist es, gute Ideen schneller in marktfähige Produkte umzusetzen, z. B. durch den Abbau gedanklicher Barrieren, durch Förderung neuer Synergieeffekte und durch Stärkung mutiger Konzepte.

Literatur

[1] S. Walheim, E. Schäffer, J. Mlynek, U. Steiner,
Nanophase-Separated Polymer Films as High-Performance Antireflection Coatings,
Science 283, (1999), 520

[2] S. Walheim, R. Hedderich, Th. Schimmel,
Element, umfassend ein reflektierendes Substrat und eine Antireflexschicht, Verfahren zu seiner Herstellung und seine Anwendung,

Patente:
DE 102004015177.6-51,
(27.03.2004),
EP 05006058.1, EP-OS 1580816
(28.9.2005)