

Peter Görnert

## **Von der Grundlagenforschung bis zur industriellen Nutzung: Aktuelle materialwissenschaftliche Probleme<sup>1</sup>**

### **1. Einleitung**

Der Vortrag gliederte sich in einen wissenschaftspolitischen Teil, welcher sich vor allem auf die wirtschaftsnahe Forschung der neuen Bundesländer und - als positives Exempel - auf Innovent fokussierte. Im darauf folgenden physikalisch-technischen Teil wurden als Beispiele aktueller materialwissenschaftlicher Probleme sowohl die Magnetelektronik als auch die Hochtemperatur-Supraleiter betrachtet. In diesem Beitrag werden die wesentlichen Aussagen des Vortrages zusammenfassend dargestellt.

### **2. Von der Grundlagenforschung bis zur industriellen Nutzung**

Die aktuelle Forschungslandschaft in Deutschland und deren Hauptaktivitäten lassen sich in folgender, vereinfachter Weise zusammenfassen:

Universitäten und Hochschulen	GF
Max-Planck-Institute	GF
Institute der Helmholtz-Gemeinschaft	GF, AF, (VF)
Institute der Leibniz-Gemeinschaft	GF, AF
Fachhochschulen	(AF, GF)
Landesinstitute	AF, GF, VF
Fraunhofer-Institute	VF, AF, GF
<i>Wirtschaftsnahe Forschungseinrichtungen (nBL)</i>	<i>VF, AF, GF</i>
Forschung der Industrie	

Hierbei wird die Grundlagenforschung mit GF, die angewandte Forschung mit AF und die (industrielle) Vertragsforschung mit VF bezeichnet. Hauptaktivitäten bedeutet in diesem Zusammenhang - um das am Beispiel der Universitäten und Hochschulen zu verdeutlichen - daß diese sich z.B. ne-

1. Vortrag in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Soietät am 15. November 2001

ben ihrem Lehrauftrag vor allem mit Grundlagenforschung GF beschäftigen; wobei einzelne Einrichtungen auch angewandte AF und sogar Vertragsforschung VF betreiben.

Ein Spezifikum der Forschungslandschaft der neuen Bundesländer (nBL) besteht in der Existenz der sog. Wirtschaftsnahen Forschungseinrichtungen, die bei näherer Betrachtungsweise den Fraunhofer-Instituten sehr ähnlich sind und inzwischen sogar eine größere Effektivität aufweisen [1]. Um diese Wirtschaftsnahen Forschungseinrichtungen charakterisieren zu können, wollen wir deren Entstehungsgeschichte von der Ausgangssituation 1989/90 bis zur Gegenwart betrachten. Hierzu folgt der Autor dieses Beitrages im wesentlichen der Publikation [2].

## **2.1. Wirtschaftsnaher Forschung der neuen Bundesländer**

### **2.1.1. Historischer Rückblick**

Die DDR-Wirtschaft war weitgehend autark, verursacht durch die Embargopolitik des Westens und der Abgrenzungspolitik der DDR gegenüber dem Westen. Außerdem sollte beachtet werden, daß 80% des DDR-Exportes in die Sowjetunion (SU) ging. Das hatte eine breite Verteilung der Forschungs- und Entwicklungspotentiale zur Folge. Sehr bemerkenswert ist die Tatsache, daß nahezu 70% des Weltsortimentes von der DDR Industrie hergestellt wurde. Bei der metallverarbeitenden Industrie produzierte Ende der achtziger Jahre die DDR 65%, die USA 50% und die BRD 17 % des Weltsortimentes. Diese extrem breit gestreuten Kapazitäten von Forschung und Produktion hatten selbstverständlich Folgen sowohl auf die Effektivität als auch auf die Produktivität. Erschwert wurde beides durch den permanenten Mangel an Investitionen und an Kooperationsbeziehungen – insbesondere aus und mit dem Westen.

Aus einem Gutachten der DDR-Regierung (GVS 27.10.89) geht z.B. folgendes hervor [2]:

”Die Kosten für mikroelektronische Erzeugnisse betragen z.B. ein Mehrfaches des internationalen Standes. Ihr Einsatz in der Volkswirtschaft der DDR und im Export muß gegenwärtig mit über 3 Mrd. Mark pro Jahr gestützt werden. Die weitere Entwicklung verlangt dringend die Vertiefung der Kooperation, besonders mit der UdSSR.”

Die Industrieforschung der DDR war organisiert in

- betriebseigene FuE-Abteilungen sowie in FuE-Abteilungen oder -Bereiche der Kombinate, die ebenfalls weitgehend autark arbeiteten

- wissenschaftlich-technische Zentren der Branchen und es existierte eine
- enge Verflechtung mit der Hochschulforschung und der Akademie der Wissenschaften (AdW) - z.B. in Form komplexer Überführungsleistungen (KÜL).

Knapp ein halbes Jahr nach Inkrafttreten der Währungs-, Wirtschafts- und Sozialunion begann der Zusammenbruch der Industrieforschung und der Abwicklung der AdW (bis 12/91) sowie von Einrichtungen der Universitäten und Hochschulen. Wogegen im Jahre 1989 in der DDR noch 98 und in der BRD 107 FuE-Beschäftigte auf 10 000 Erwerbstätige entfielen, waren Ende 1994 von den Anfang 1990 rund 75 000 Industrieforschern nur noch etwa 12 000 in Ostdeutschland tätig, davon jeder Dritte in Arbeitsbeschaffungsmaßnahmen (ABM). In den alten Bundesländern waren es hingegen im gleichen Zeitraum 275 000 FuE-Beschäftigte.

Der Schrumpfungsprozeß des FuE-Personals in Ostdeutschland ging einher mit

- der Abwanderung in die alten Bundesländer und ins Ausland
- der Eingliederung in andere Berufe
- Umschulung und Weiterbildung<sup>1</sup>
- dem Übergang in den Vorruhestand oder in die Rente
- dem Übergang in die Arbeitslosigkeit
- der Abwicklung aus politischen Gründen.

Zur damaligen Situation ein Zitat aus Ref. [2], Seite 24:

”Der sicherlich notwendige Prozeß der Umstrukturierung hatte inzwischen eine Situation herbeigeführt, die für die neuen Bundesländer zu einem Entwicklungshemmnis wurde.”

Im Ergebnis dessen begann die forcierte Gründung und Förderung von Projekten wirtschaftnaher Forschungseinrichtungen zum Aufbau einer marktvorbereitenden Industrieforschung. Eine besondere Rolle spielten die sog. F-GmbHs in der Form von GmbH, gGmbH und e.V., die sich im Verlauf der Zeit immer besser profilierten und in Gestalt folgender Unternehmenstypen agierten:

- Innovative Unternehmen mit einem hohen Anteil an eigener FuE
- Industrieforschungseinrichtungen, die einen sehr großen Anteil ihres Umsatzes mit Auftragsforschung realisieren<sup>2</sup>

---

1. was i.a. mehr oder weniger sinnlos war

2. z.B. Innovent e.V. Technologieentwicklung Jena – vgl. Kapitel 2.2.

- FuE-Dienstleistungsunternehmen mit dem Ziel
- der "Scharnierfunktion zwischen Grundlagenforschung, angewandter Forschung, Produktion und Kunden"
- der Bildung von Keimzellen neuer Industrieansiedlungen.

### 2.1.2. Aktuelle Situation

Eine Zusammenstellung der jährlichen Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation in ostdeutschen KMU und externen Industrieforschungseinrichtungen durch Bund und Länder [2] vermittelt Tab. 1. Diese Tabelle zeigt, daß im Jahre 1999 für Forschung, Entwicklung und Innovation in ostdeutschen KMU und externen Industrieforschungseinrichtungen 923,8 Mio. DM verauslagt worden sind. Tab. 1 veranschaulicht weiterhin eine deutliche Steigerung um den Faktor zehn zwischen 1991 und 1999 hinsichtlich der Förderung durch die Länder.

Um diese Zahlen etwas zu relativieren sei auf die FuE-Ausgaben von Siemens im Jahre 1998/99 in Höhe 5,2 Mrd. EUR sowie auf ein Zitat aus der Süddeutschen Zeitung vom 18.10.01 hingewiesen: "Lediglich 6 % aller Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen der deutschen Wirtschaft entfielen auf Ostdeutschland. Während im westlichen Bundesgebiet lediglich 16 % des FuE-Personals in KMU's arbeiten, seien es in den neuen Ländern 65%".

Die erste Aussage läßt deutlich erkennen, daß der Kapitalfluß der deutschen Wirtschaft in die neuen Bundesländer sicher noch steigerungsfähig ist. Die zweite Aussage ist (außer der Jenoptik AG) dem Fehlen einer ostdeutschen Großindustrie geschuldet.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	Σ
<b>BMWi</b>	56,6	174,0	265,6	324,9	392,0	384,0	307,5	276,4	262,6	2443,6
<b>BMBF</b>	143,1	168,9	228,3	231,0	174,2	197,6	240,6	212,5	175,0	1771,2
<b>Bund gesamt</b>	199,7	342,9	493,9	499,1	566,2	581,6	548,1	488,9	437,6	4214,8
<b>neue Bdl.</b>	47,0	174,0	327,7	329,9	374,5	372,4	414,4	394,4	486,2	2920,1
<b>Summe</b>										
<b>Bund und Länder</b>	<b>246,7</b>	<b>516,9</b>	<b>821,6</b>	<b>829,0</b>	<b>940,7</b>	<b>954,0</b>	<b>962,5</b>	<b>883,3</b>	<b>923,8</b>	<b>7134,9</b>

Table 1:

Jährliche Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation in ostdeutschen KMU und externen Industrieforschungseinrichtungen durch Bund und Länder (in Mio. DM) [2]

## **2.2. INNOVENT e.V.**

Zur konkreten Veranschaulichung einer sich positiv entwickelnden Wirtschaftsnahen Forschungseinrichtung soll Innovent Technologieentwicklung Jena betrachtet<sup>1</sup> werden.

Innovent e.V. ist ein gemeinnütziger eingetragener Verein mit mehr als 100 Mitarbeitern ohne institutionelle Grundfinanzierung. Etwa 35 % der Einnahmen resultieren aus Industrieaufträgen. Die Kompetenzfelder sind

- Oberflächentechnologie (Leiter und Direktor Prof. Dr. H.-J. Tiller)
- Magnetische Werkstoffe & Systeme (Leiter und stellvertr. Direktor Prof. Dr. P. Görnert)
- Biomaterialien (Leiter Dr. M. Schnabelrauch).

Der Forschungsbereich des Autors „Magnetische Werkstoffe & Systeme“ betreibt Grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung auf ausgewählten Gebieten des Magnetismus, der Kristallzucht - einschließlich optischer Komponenten. Auf Grund langjähriger Erfahrungen werden der Industrie und den KMU's Forschungs- und Entwicklungsleistungen angeboten. Es werden spezifische Lösungen auf der Basis magnetischer und/oder optischer Werkstoffe, Systeme und Verfahren entwickelt und gemeinsam mit Unternehmen bis zur Produktionsreife geführt. Die Kompetenz dieses Bereiches kann durch folgende Punkte charakterisiert werden:

- Die Modellierung komplexer Systeme einschließlich ihrer materialspezifischen Eigenschaften wird in Computerexperimenten durchgeführt. Hierfür werden selbst entwickelte Simulationsprogramme eingesetzt, die durch leistungsfähige kommerzielle Software ergänzt wird. Damit können aufwendige experimentelle Untersuchungen minimiert werden.
- Die Modellierung wird bis zum Vorschlag (Design) der Anordnung geführt, indem auf anwendungsspezifische Zielparameter optimiert wird. Gleichzeitig werden auch Prüfkriterien und/oder Meßanordnungen vorgeschlagen, die in der Herstellung und im Betrieb die Funktion sichern.
- Die flexible Verflechtung der Arbeitsrichtungen sichert eine mögliche Kombination und alternative Anwendung unterschiedlicher Effekte. Synergieeffekte durch Kooperation mit den anderen Innovent-Bereichen erhöhen die Anwendungsbreite.
- Die Kooperation mit international führenden Forschungseinrichtungen im In- und Ausland sichert das innovative Niveau. Auf Grund der engen Ver-

---

1. vgl. auch: <http://www.innovent-jena.de>

bindung zur Industrie und den KMU's kann eine rasche Umsetzung in Produkte und Verfahren gesichert werden.

Aktuelle und öffentlich geförderte Projektschwerpunkte, die im Internet unter <http://www.innovent-jena.de> nachzulesen sind, betreffen numerische Simulationen statischer und dynamischer Magnetisierungsprozesse gekoppelter magnetoelektronischer Dünschichtsysteme; magnetische Strukturen und permanentmagnetische Marker, welche mittels Sensorarrays sehr genau hinsichtlich ihrer räumlichen Position geortet werden können; magnetische Abschirmfolien und -lacke sowie die magnetische Separation maligner Zellen in Hochgradientenkammern. Die Optik konzentriert sich auf neuartige Schichtstrukturen und die Kristallzüchtung auf die Flüssigphasenepitaxie magnetooptischer Granatschichten als auch auf die Abscheidung von Bronzen aus Flußschmelzen für zukünftige Sensoren.

Die numerischen Simulationen endlicher magnetoelektronischer Dünschichtsysteme wurden soweit voran getrieben, daß bereits eine kommerzielle Software für mikromagnetische Simulation „MicroMagus“ (<http://www.micromagus.de>) entstand, welche auch den kommerziellen internationalen Stand auf diesem Gebiet repräsentiert. Ähnliches gilt für die Optimierung optischer Schichtstrukturen.

Eine Kommerzialisierung zur Verbesserung permanentmagnetischer Strukturen – z.B. für lineare, Winkel- oder x-y-Encoder – ist z.Z. gerade in Arbeit.

### **3. Aktuelle materialwissenschaftliche Probleme**

Im Rahmen dieses Beitrages werden zwei wesentliche Beispiele aktueller materialwissenschaftlicher Probleme betrachtet, die Magnetelektronik und die Hochtemperatur-Supraleiter.

#### **3.1. Magnetelektronik**

Die Magnetelektronik hat seit der Entdeckung des GMR-Effektes durch Prof. Grünberg [3] im Jahre 1988 eine stürmische Entwicklung genommen. Prof. Grünberg erhielt für diese bedeutende Entwicklung den Deutschen Zukunftspreis 1998. Sehr verdient für die Entwicklung der Magnetelektronik in Deutschland hat sich ebenfalls Dr. Mengel [4] (früher VDI Düsseldorf, jetzt BMBF Bonn).

Bei der Magnetelektronik wird zur elektrischen Leitung nicht nur die Ladung der Elektronen sondern auch deren Spin genutzt. Mithin ergibt sich eine

Magnetfeldabhängigkeit des elektrischen Widerstandes  $R(H)$ , die ausgedrückt wird durch eine reduzierte maximale Widerstandsänderung  $\Delta R/R$ . Obwohl diese  $R(H)$ -Abhängigkeit sowohl in Dünnschichtsystemen als auch in partikulären Medien beobachtet wird, haben in der Technik bislang nur die Dünnschichtsysteme Bedeutung erlangt. Eine Übersicht über die Familie der magnetoelektronischen Effekte gibt Tabelle 2.

<b>magnetoelektronische Effekte</b>	<b>Größe: maximale relative Widerstandsänderung <math>\Delta R/R</math> [%] in äußerem Magnetfeld</b>	<b>physikalisches Wirkprinzip</b>
<b>AMR (anisotropic magnetoresistance)</b>	3 bis 4 %	anisotroper Streuquerschnitt im Volumen
<b>GMR (giant magnetoresistance)</b>	6 bis 8 % im Sandwich, über 100 % in Multischichten	spinabhängige Streuung an Grenzflächen in Multischichtsystemen
<b>TMR (tunneling magnetoresistance)</b>	bis 25 %	spinabhängiges Tunneln durch Isolatorschicht
<b>CMR (colossal magnetoresistance)</b>	bis 400 %	magnetfeldinduzierter Metall-Isolator-Übergang
<b>GMI (giant magnetoimpedance)</b>	$\Delta Z/Z$ bis 360 %	Impedanz in zweiter Ordnung abhängig von Permeabilität
<b>Magnet-Halbleiter-Hybrid</b>	noch nicht gemessen	Spininjektion und Spin-dephasierung im Halbleiter

Tabelle 2:  
Übersicht über die Familie der magnetoelektronischen Effekte [4]

Während der von Thomson im Jahre 1897 entdeckte AMR-Effekt in technischen Systemen bereits etabliert ist und dort auf Grund der um ein bis zwei Größenordnungen besseren Empfindlichkeit mehr und mehr die Hall-Sensoren verdrängt, befindet sich der GMR-Effekt gerade im Prozeß der Kommerzialisierung. Der TMR-Effekt wird insbesondere für die magnetischen RAM's die sog. MRAM's (Magnetic Random-Access Memories) favorisiert, welche die Speichergeneration dieses Jahrhunderts prägen soll (vgl. Abb. 1) und welche die gegenwärtigen DRAM's (Dynamic Random-Access Memories) ablösen sollen. Vorteile der MRAM's sind Nichtflüchtigkeit der Informationen beim Ausschalten des Computers, hohe Speicherdichte und geringer Energieverbrauch.

Der beachtliche CMR-Effekt leidet vor allem unter Einsatztemperaturen kleiner etwa 80°C. Die weiteren in Tabelle 2 angeführten Effekte (GMI und Magnet-Halbleiter-Hybrid) befinden sich noch im Stadium der Grundlagenforschung.

Das in [4] angegebene erhebliche Marktpotential der Magnetoelektronik und die deutsche Technologieposition verdeutlichen Tabelle 3.

Anwendung	Weltmarktgröße heute (Mrd. US\$)	technisches Risiko	erstes kommerzielles Produkt	Technologieposition in BRD (EU/USA/Japan)
Sensoren, Sensor-Speicher-Systeme	4	mittel	1996 (NVE) 1997 (Siemens)	gut. (gut/mittel/mittel)
Leseköpfe	40	klein	1998 (IBM)	schlecht, (mittel/gut/gut)
MRAM	100	groß	ca. 2005	gut (schle./gut/mittel)
Spintransistoren		sehr groß	> 2008	?

Tabelle 3  
Marktpotential der Magnetoelektronik [4]<sup>1</sup>

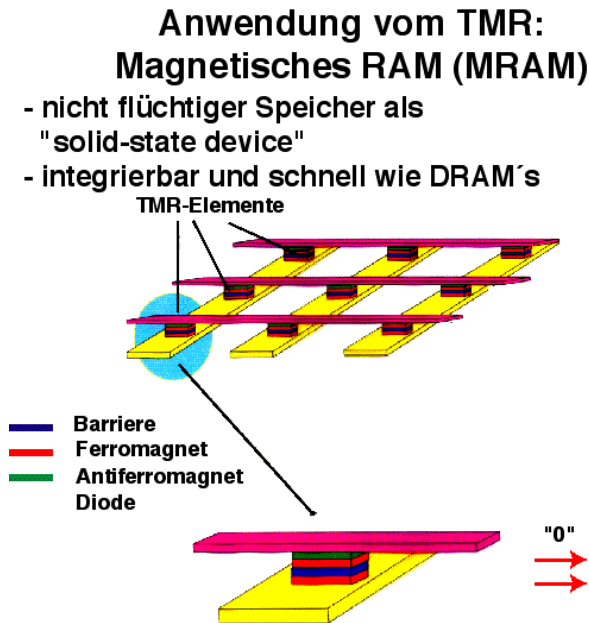


Abb.1:  
Schema eines MRAM [3]

1. Bezüglich der Quellen der Marktzahlen siehe ebenfalls [4]



Innovent verwendet AMR-Sensoren der Firma Sensitec Wetzlar (i) als Detektor des sinusförmigen Signals magnetischer gedruckter Encoder (arctan-Methode) auf Sr-Hexaferriitbasis und (ii) zur Ermittlung der räumlichen Position eines magnetischen Dipols – im einfachsten Fall eines Permanentmagneten. Die reproduzierbaren absoluten Genauigkeiten linearer Encoder (i) mit einer Länge von 30 cm liegen bei  $\pm 30 \mu\text{m}$  und die der Winkelencoder bei  $\pm 0.1^\circ$ . Bei unseren Winkelencodern sollte beachtet werden, daß diese absolute Winkelmessungen im Bereich von 0 bis  $360^\circ$  erlauben. Die Genauigkeiten der räumlichen Orientierung (ii) hängen von der Größe des magnetischen Dipolmomentes und von der Entfernung der Sensorarrays ab. Die von uns bislang nachgewiesenen Orientierungsgenauigkeiten betragen  $< 0.1^\circ$  und die Genauigkeit der Position  $< 1 \text{ mm}$ .

### Projected IBM MR/Spin Valve Head Evolution

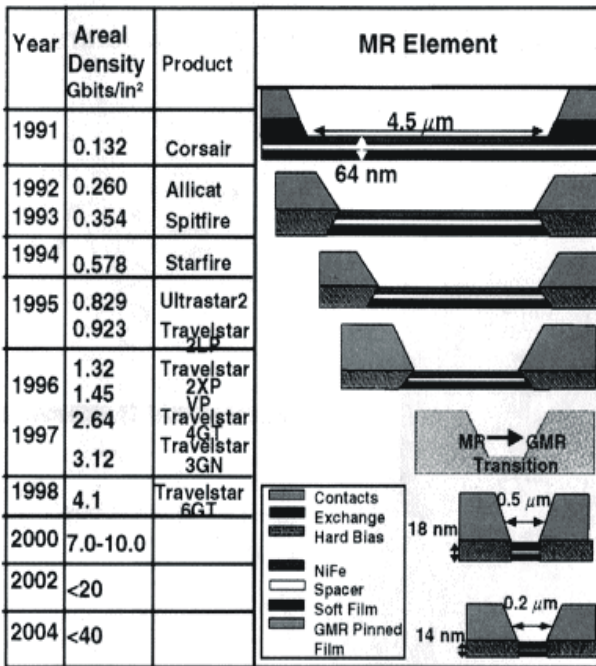


Abb. 2:  
Die Entwicklung magnetoresistiver (MR) Elemente in IBM-Leseköpfen für Parallelspeicherung

Technisch sehr wichtig ist der Einsatz von GMR-Sensoren in Leseköpfen von Festplattenspeichern (vgl. auch Tabelle 3). Hier haben die GMR-Sensoren die AMR-Sensoren bereits wieder verdrängt. Auf dem Gebiet der digitalen Informationsspeicherung vollzieht sich seit Jahren die in Abb. 2 illustrierte rasante Entwicklung, die zu einer jährlichen Steigerungsrate der Datenspeicherdichte von etwa 60% führt.

Geraume Zeit wurde die in Abb. 2 für das Jahr 2004 genannte Flächenspeicherdichte von 40 Gbit/inch<sup>2</sup> als maximale theoretische Dichte für die Parallelspeicherung auf Grund der sog. superparamagnetischen Schwelle angesehen. Unterdessen wurde im Jahre 2001 von Fujitsu eine Speicherdichte von 106 Gbit/inch<sup>2</sup> mittels Parallelspeicherung im Labor erreicht. Eine Produktion soll im Jahre 2003 erfolgen. Die Zielstellung für Senkrechtspeicherung liegt nun bei 1 Terra bit/inch<sup>2</sup>.

### 3.2. Hochtemperatur-Supraleiter

Formel	Sprungtemperatur in K
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	92
Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>1</sub> Cu <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	90
Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	120
Tl <sub>2</sub> Ba <sub>2</sub> Ca <sub>1</sub> Cu <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	110
Tl <sub>2</sub> Ba <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	127
HgBa <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	134
<b>MgB<sub>2</sub></b>	<b>39</b>

Tabelle 4:

*Materialklassen der aktuellen Hochtemperatur-Supraleiter und deren Sprungtemperaturen*

Die im Jahre 1986 von Müller und Bednarz entdeckten Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL) existieren bisher in Gestalt von fünf Materialklassen (siehe Tabelle 4): dem YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-γ</sub> (YBCO oder Y123)-System, der Bi-Familie, der Tl-Familie, der Hg-Familie und das MgB<sub>2</sub>. Die maximalen Sprungtemperaturen dieser HTSL können ebenfalls der Tabelle 4 entnommen werden. Das in der letzten Zeile der Tabelle 4 angeführte MgB<sub>2</sub> wurde erst im vergangenen Jahr entdeckt, wird aber nach Ansicht des Autors keine praktische Bedeutung erlangen. Gelegentlich gab es auch Meldungen hinsichtlich HTSL bei Raumtemperatur. Alle Meldungen dieser Art erwiesen sich schließlich als

Irrtum oder Fehler! Nicht sehr beliebt sind aus gesundheitlichen Gründen die Tl- und die Hg-Verbindungen.

Obwohl die HTSL etwa ebenso lange existieren wie die im vorigen Abschnitt beschriebenen GMR-Sensoren, blieb bislang ein industrieller Durchbruch der HTSL aus - trotz enormer staatlicher Förderung im internationalen Maßstab. Es sieht so aus, als ob dieser von vielen Bearbeitern ersehnte Durchbruch noch einige Zeit auf sich warten ließe. Die Industrie hat sich deshalb größtenteils zurückgezogen.

Potentielle Anwendungen [5] der HTSL ergeben sich z.B. in der

- Elektronik als SQUID's (jedoch mit einer Empfindlichkeit von "nur"  $10 \text{ fT}/(\text{Hz})^{1/2}$  verglichen mit der Empfindlichkeit von  $1 \text{ fT}/(\text{Hz})^{1/2}$  der Tieftemperatur-Supraleiter (LTSL)), als Spannungsnormale, Mikrowellenfilter und evtl. für ultraschnelle Computer
- Energietechnik für die Energieübertragung, für Strombegrenzer, Transformatoren, Energiespeicher (elektrisch und/oder mechanisch), Motoren, Lager, Permanentmagnete.

Nicht vergessen werden sollte die notwendige Kühlung der HTSL – möglichst ohne flüssige Medien wie flüssiger Stickstoff (77 K), flüssiger Wasserstoff (20,3 K) oder flüssiges Helium (4,2 K). Bei der Entwicklung von Kryokühlern ist in den letzten Jahren ein deutlicher Fortschritt erzielt worden.

Die HTSL-SQUID's scheinen auf Grund der geringeren Empfindlichkeit die konventionellen Tieftemperatur-SQUID's nicht zu verdrängen. Spannungsnormale werden ebenfalls vorrangig mit Tieftemperatur-Supraleitern hergestellt, das Marktpotential ist jedoch bescheiden. Mikrowellenfilter spielen eine Rolle, jedoch ist deren Anwendung bisher auf kleine Stückzahlen (einige Hundert in den USA) beschränkt. Die ultraschnellen Computer könnten eventuell zukünftige Bedeutung erlangen.

Bei Strombegrenzern gibt es berechtigte Hoffnung auf deren technischen Einsatz. Bei Transformatoren besteht vor allem das Kühlproblem. An Energiespeichern wird auch in Deutschland noch gearbeitet. Motoren werden wegen der notwendigen Kühlung oberhalb einer Leistung von 1 MW ökonomisch. Selbststabilisierende Lager mit sog. schmelztexturierten Massivmaterialien sollten Bedeutung erlangen, da das Kühlproblem relativ einfach zu beherrschen ist. Permanentmagnete könnten trotz des Kühlproblems auf Grund der gewaltigen Remanenzen (siehe weiter unten) in Spezialfällen zum Einsatz kommen.

Noch einige Bemerkungen sollen in diesem Zusammenhang hinsichtlich der sog. schmelztexturierten YBCO-Materialien gemacht werden, da sich der

Autor dieses Artikels in enger Kooperation mit der Gruppe um Prof. Krabbes (IFW Dresden) bis etwa 1997 im IPHT Jena intensiv mit dieser Problematik beschäftigt hat. Einen Überblick über den Entwicklungsstand bis zu dieser Zeit wird in [6] gegeben; den aktuellen Stand vermittelt [7,8].

Beim Herstellungsprozeß schmelztexturierter YBCO-Materialien wird eine YBCO-Keramik (mit Überschuß an  $Y_2O_3$  oder  $Y_2BaCuO_5$  (Y211)), welche auf Grund der Korngrenzen viele „weak links“ enthält und somit nur kritische Stromdichten von  $<10^2$  A/cm<sup>2</sup> erlaubt, über einen Kristallisationsprozeß mit einem Keim von einkristallinem  $SrBa_2Cu_3O_{7-\gamma}$  und einer partiell flüssig-festen Phase in einen Quasikristall mit vielen Defekten überführt. Diese erwünschten Defekte führen zum Pinning der Flußschläuche und damit zu kritischen Stromdichten von etwa  $10^5$  A/cm<sup>2</sup>. Damit erhält man ein Material, in das magnetische Flußdichten eingefroren werden können mit einer Stärke von mehreren Tesla (T) – allerdings bei Temperaturen  $\leq 77$  K, wie Abb.3 zu entnehmen ist. Zum Vergleich sei erwähnt, daß die stärksten konventionellen Permanentmagnete ( $Nd_2Fe_{14}B$ ) maximale Remanenzen von  $<1.5$  T erreichen – allerdings bei Raumtemperatur.

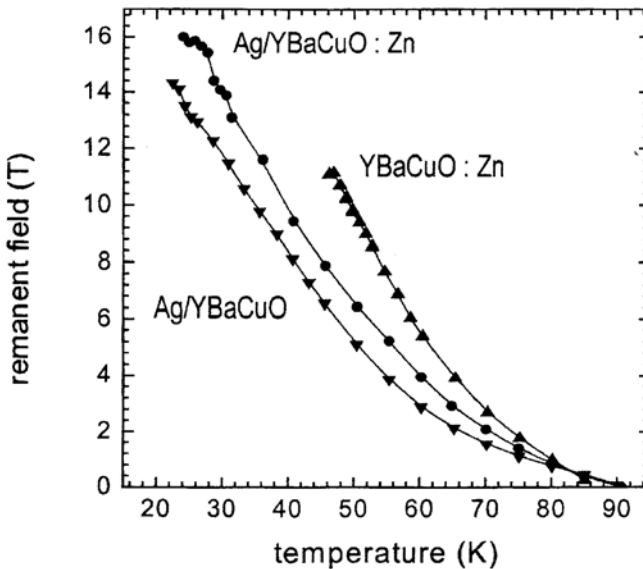


Abb. 3:  
Eingefrorene Flußdichten (remanente Felder) in zylindrischen schmelztexturierten YBCO-Magneten mit einem „Polschuhabstand“ von 2.5 mm [7]

#### **4. Schlußfolgerungen**

Auf Grund des sehr allgemeinen Charakters dieses Artikels sollen die Schlußfolgerungen ebenso allgemein gehalten werden und sowohl dessen wissenschaftspolitischen als auch fachlichen Charakters Rechnung tragen:

- In Wirtschaftswissenschaft und -politik besteht Konsens darüber, daß der Aufholprozeß in Ostdeutschland noch längere Zeit in Anspruch nehmen wird - FuE und Innovation spielen dabei eine entscheidende Rolle.
- Ostdeutsche Forschungseinrichtungen haben die Aufgabe und sind in der Lage, diese "entscheidende Rolle" mitzugestalten - wenn sie international konkurrenzfähig sind.
- Die magnetische Sensorik hat sich bereits industriell - trotz geringerer Förderung in der gleichen Zeit (von 1986/88 bis jetzt) verglichen mit den Hochtemperatur-Supraleitern (HTSL) - durchgesetzt. Bei den HTSL existieren potentielle Anwendungsfelder.

#### **Danksagung**

Ich möchte mich bei dem Direktor des TITK-Rudolstadt, Dr. Bürger, für die frühzeitige Überlassung der Materialien [1] und [2] bedanken. Kollegen Prof. Dr. Grünberg (FZ Jülich) und Prof. Dr. Krabbes (IFW Dresden) danke ich für Publikationen und für die Überlassung von Bildmaterial und für persönliche Mitteilungen.

#### **Literatur:**

- [1] "Wirksamkeit, Sicherung und Vorbildwirkung des ostdeutschen Innovationssystems", Strategiepapier des Verbandes Innovativer Unternehmen (VIU), Mai 2001
- [2] H. Kohn: „Externe Industrieforschung im Wettbewerb“, Schriften-Reihe des Verbandes Innovativer Unternehmen (VIU) Nr. 5, Dresden, Mai 2001
- [3] P. Grünberg, persönliche Mitteilungen und Publikationen
- [4] S. Mengel, Phys. Bl. 55 Nr.5 (1999) 53
- [5] F. Sicking und J. Fröhlingsdorf: Phys. Bl. 57 Nr.10 (2001) 57
- [6] P. Görnert: Cryst. Res. Technol. 32 (1997) 3
- [7] G. Fuchs und G. Krabbes: Phys. Bl. 57 Nr.5 (2000) 61
- [8] G. Krabbes, persönliche Mitteilungen und Publikationen

Innovent e.V.

<http://www.innovent-jena.de>

[pg@innovent-jena.de](mailto:pg@innovent-jena.de)

