

T. Fleischer
D. Oertel

Juli 1999



TAB

TA-Projekt
“Neue Materialien zur Energieeinsparung
und zur Energieumwandlung”

Vorstudie



TAB

Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag



TAB

Arbeitsbericht Nr. 62

Inhalt

Zusammenfassung.....	3
I. Einleitung.....	17
II. Werkstoffe für die Photovoltaik	21
1. Technologie- und Materialaspekte.....	22
2. Vergleichende Bewertung der verschiedenen Solarzellen	23
2.1 Kristallines Silizium	23
2.2 Dünnschichtzellen aus amorphem Silizium.....	24
2.3 Weitere Dünnschichtzellen	25
2.4 Potential und Zeithorizont für die industrielle Fertigung	29
3. FuE-Bedarf auf dem Gebiet der Produktionstechnologie	31
4. FuE-Bedarf auf dem Gebiet der Materialherstellung.....	32
5. Marktsituation bei Photovoltaik-Anlagen	33
6. Resümee.....	37
III. Hochtemperaturwerkstoffe für Gasturbinen	41
1. Der Gasturbinen-Prozeß	42
2. Möglichkeiten der Wirkungsgraderhöhung.....	42
3. Anforderungen an Hochtemperaturwerkstoffe im Gasturbinenbau	43
3.1 Metallische Werkstoffe	44
3.2 Keramische Werkstoffe.....	49
3.3 Faserverstärkte Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix	52
3.4 Oberflächenbeschichtungen	55
4. Resümee.....	57

IV. Supraleitende Materialien für energietechnische Anwendungen	63
1. Supraleitung - Eigenschaften und Materialien.....	64
1.1 Materialien für supraleitende Basisleiter.....	65
1.2 Anforderungen an technische Supraleiter.....	66
1.3 Eigenschaften der wichtigen Hochtemperatur-Superleiter (HTS)	68
1.4 Technische Supraleiter für energietechnische Anwendungen auf der Basis von HTS.....	69
1.5 Kosten für Leiter	71
2. Anwendungen der Supraleitung in der Energietechnik.....	72
3. Resümee	74
V. Fazit und Forschungsbedarf	81
Literatur	85
1. Vom TAB in Auftrag gegebene Gutachten	85
2. Weitere Literatur	85
Abkürzungsverzeichnis	91
Glossar	93

Zusammenfassung

Auf Anregung des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit sollten **Stand, Aussichten, Chancen und Risiken** der Entwicklung und des Einsatzes **neuer Materialien** für die **Energieeinsparung und -umwandlung** untersucht werden. Als Schwerpunkt wurden Hochtemperaturwerkstoffe für Gasturbinen, Materialien für Solarzellen und supraleitende Materialien gewählt. Da die verfügbaren bzw. zu entwickelnden Fertigungstechniken für die Realisierung von anwendungsreifen Lösungen von erheblicher, manchmal sogar entscheidender Bedeutung sind, wurde die Betrachtung nicht auf die einzusetzenden Materialien beschränkt.

Zur hiermit vorgelegten **Vorstudie** wurde ein umfangreicher **Materialienband** erarbeitet, in dem naturwissenschaftlich-technisch Zusammenhänge bei den einzelnen Materialgruppen vertieft dargestellt und einzelne Materialien und Anwendungen detaillierter untersucht wurden. Der Materialienband ist auf Anfrage beim TAB erhältlich.

Die Entwicklung, Herstellung und Verarbeitung von neuen Materialien für innovative Anwendungen hat herausragende Bedeutung für viele Technologiefelder und Wirtschaftsbranchen. Neue Werkstoffe bilden die Grundlage für Weiterentwicklungen in praktisch allen wichtigen Technologiebereichen. Die künftige **wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit** des **Standortes Deutschland** steht in engem Zusammenhang mit Innovationen im Werkstoffbereich. Zudem hat die Entwicklung neuer Werkstoffe und der zugehörigen Produktions- und Verarbeitungstechniken auch erhebliche **ökologische Auswirkungen** (Schadstoffminderung, Ressourcenschonung, etc.).

Die zentrale Rolle neuer Werkstoffe für die Entwicklung innovativer Technologien und neuer marktfähiger Produkte spielt in der öffentlichen Wahrnehmung eine eher untergeordnete Rolle. Dies hat seine Ursache unter anderem darin, daß die Funktionalität eines neuen bzw. weiterentwickelten Systems oder Produkts für den Nutzer im Vordergrund steht und damit häufig die eigentlich entscheidenden Bausteine - die verwendeten Werkstoffe - hinter diese zurücktreten. Aus industrieller Perspektive fallen zudem Erträge aus der Herstellung der Werkstoffe selbst - verglichen mit Erträgen aus Produkten und Systemen - in der Regel geringer aus.

Neue Entwicklungen im Werkstoffbereich zeigen nicht nur Auswirkungen in den direkt werkstoffbasierten Technologiefeldern. Auch Fortschritte bei Tech-

nologien, die nicht auf den ersten Blick mit neuen Werkstoffen in Verbindung gebracht werden, beruhen in erheblichem Maße auf neuen Werkstoffentwicklungen. Die Bedeutung neuer Materialien für Anwendungen in klassischen Technologiefeldern kann anhand ihrer **Anwendung im Energiesektor** verdeutlicht werden. Besonders anschaulich kann ihr Querschnittscharakter an der gebräuchlichen Zuordnung zu Funktions- und Strukturwerkstoffen dargestellt werden. Neue thermisch und chemisch höher belastbare Strukturmaterialien (v.a. Strukturkeramiken und Strukturmetalle) sollen Wirkungsgrade und Wirtschaftlichkeit konventioneller Energietechniken, vor allem bei der Umwandlung fossiler Energieträger in elektrische Energie, verbessern. Besondere physikalische Eigenschaften von Funktionsmaterialien macht man sich für neue Umwandlungstechniken (etwa die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie, die Photovoltaik) oder für eine Reduktion von Verlusten bei der Energieübertragung und -anwendung (beispielsweise durch die technische Anwendung der nahezu verlustfreien Stromleitung, der sogenannten Supraleitung) und damit für die Einsparung elektrischer Energie zunutze.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, anhand dreier Anwendungsfelder den aktuellen Entwicklungsstand sowie Besonderheiten der Herstellung hierfür ausgewählter Materialien zu analysieren.

Dabei ist zu beachten, daß in der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion keine scharfe Trennung zwischen den Begriffen "Material" und "Werkstoff" existiert, auch werden die **Begriffe "Neue Materialien" und "Neue Werkstoffe"** oft in Ermangelung einer allgemein anerkannten Definition nicht einheitlich verwendet. Die vorliegende Studie lehnt sich an die wissenschaftlich-technisch orientierte Auffassung an, die den Bereich der neuen Werkstoffe als den jeweils aktuellen Frontbereich von Werkstoffforschung und -entwicklung versteht. Neue Werkstoffe sind demnach Werkstoffe, die sich in ihrer physikalischen Struktur, ihrer chemischen Zusammensetzung oder in ihrer Funktion von vorhandenen Werkstoffen unterscheiden. Ihre Entwicklung erfolgt grundsätzlich auf zwei verschiedenen Pfaden, zum einen durch **Modifikation** der physikalischen Struktur oder chemischen Zusammensetzung **konventioneller Werkstoffe** oder auf der Basis **neuer Werkstoffkonzepte**.

Das Thema "Neue Materialien für die Energieeinsparung und Energieumwandlung" verknüpft verschiedene Themen- und Technologiebereiche sowie Materialgruppen. Die vorliegende Studie vertieft hierzu **drei ausgewählte Anwendungsbereiche** neuer Materialien, in denen bereits vereinzelte Anwendungen stattfinden und z.T. sich noch im Stadium der Forschung befinden:

- Hochtemperatur-Werkstoffe für Gasturbinen
- Materialien für die Photovoltaik
- Supraleitende Materialien für energietechnische Anwendungen

Das verbindende Element besteht im angestrebten Ziel, (elektrische) Energie effizient, kostengünstig sowie umwelt- und ressourcenschonend zu erzeugen, zu transportieren, zu speichern oder anzuwenden. Hierzu werden zahlreiche Ansätze verfolgt:

- Verbesserung der Effizienz klassischer Wandlungstechniken (etwa die Steigerung von Wirkungsgraden von Gasturbinen oder Dampferzeugern durch höhere Temperaturen oder Drücke) und damit Reduktion des Brennstoffverbrauchs
- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von technischen Systemen durch Reduzierung der Herstellungs- und Betriebskosten, durch Erhöhung von deren Leistung sowie durch Verlängerung der Lebensdauer
- Verbesserung der Umweltverträglichkeit durch Reduktion der Abgasemissionen
- Entwicklung und Verbesserung neuer Wandlungstechniken zur Nutzung regenerativer Energieressourcen
- Verbesserung der Wirkungsgrade von Elektrizitätsübertragungs- und -anwendungstechniken und damit Reduktion von Verlusten
- Entwicklung neuer, mit bisherigen Werkstoffen nicht (oder nicht annähernd wirtschaftlich) zu realisierender Techniken

Der heutige Kenntnisstand der Werkstoffentwicklung erlaubt zunehmend eine **maßgeschneiderte Herstellung oder Verbesserung von Werkstoffen**. Hierbei bestimmen nicht länger die Eigenschaften des Werkstoffes seine Nutzung, vielmehr werden aus den gewünschten Funktionen von Systemen oder Produkten Zielvorgaben für den Entwicklungsprozeß abgeleitet. Auf der Basis der Definition einer angestrebten technologischen Dienstleistung wird ein **Nutzungsprofil** entworfen, das die Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe beschreibt und das **Entwicklungsziel** definiert. Maßgeschneiderte Werkstoffe reflektieren damit einen **wesentlichen qualitativen Fortschritt im Werkstoffbereich**.

Photovoltaik

Die Nutzung der Solarenergie durch Photovoltaik oder Solarthermie zählt mittlerweile zum Stand der Technik. Der energiewirtschaftliche Durchbruch, ins-

besondere der Photovoltaik, wird bislang u.a. durch die verhältnismäßig hohen Herstellungskosten der photovoltaischen Solarzellen und deren geringen Wirkungsgrad sowie die aufwendigen Maßnahmen zur Systemeinbindung gehemmt. Lediglich der PV-Einsatz bei Inselösungen hat sich als schon heute wirtschaftlich erwiesen. Neben Arbeiten zur Verbesserung von Solarzellen-Konzepten auf Basis des "klassischen" Zellenmaterials Silizium wird deshalb weltweit nach neuen Materialien für photovoltaische Zellen gesucht. Diese Materialien sollen einen hohen Wirkungsgrad der Solarzellen ermöglichen, kostengünstig herstellbar und langlebig sein sowie zu geringen Umweltbelastungen bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung/Rezyklierung führen.

Die **Schlußfolgerungen** der Analyse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- In der **Kostenbilanz** von Photovoltaik-Anlagen ist die Solarzelle nur eine Komponente. Weitere Reduktionspotentiale, die bislang nicht ausgeschöpft sind, liegen in der Modulfertigung, in der Systemtechnik sowie in der Integration. Es ist aus heutiger Sicht nicht zu erwarten, daß allein zur Senkung der spezifischen Kosten der Zellen führende Innovationen den Kostennachteil der Photovoltaik in absehbarer Zeit wettmachen werden. Vielmehr sind auch Verbesserungen in den anderen Bereichen notwendig und ggf. sogar mit weniger Aufwand zu erreichen.
- Für die eigentliche Solarzelle sind neben dem PV-Material auch das Zell-Design, die eingesetzten Fertigungstechniken und ggf. das Substrat- bzw. Superstrat-Material von Bedeutung. Innovationen bei den Solarzellen sind also nicht nur durch die Einführung neuer bzw. Modifikation bekannter Materialsysteme zu erreichen. Auch durch **neue Zellkonzepte**, neue bzw. modifizierte Fertigungsverfahren oder durch Verwendung neuer "Hilfsmaterialien" lassen sich Wirkungsgradverbesserungen und/oder Kostenreduktionen erreichen.
- Derzeit und wohl auch für die nächsten 10 Jahre bleibt kristallines Silizium das wichtigste Material für die Solarzellenherstellung, da es viele Vorteile aufweist und von dem hohen Technologiestand der Mikroelektronik profitiert. Daneben sind **Dünnschicht-Technologien** mit amorphem Si bereits auf dem Markt, ausgewählte neue CdTe- CIS- und Si-basierte Dünnschicht-Techniken stehen kurz vor ihrer Einführung.
- Die kristalline Si-Solarzelle birgt noch erhebliche Verbesserungspotentiale sowohl im Hinblick auf die Effizienz als auch auf die Fertigungskosten. Durch **neue Fertigungstechniken** bei der Waferherstellung sollen die Ma-

terialverluste und die Fertigungszeiten reduziert werden, zudem sind auch in der Weiterverarbeitung zu Solarmodulen noch erhebliche Rationalisierungspotentiale nachgewiesen worden. Neue Zell-Designs, sogenannte high-efficiency-Zellen, versprechen Steigerungen bei den Wirkungsgraden. Inwieweit diese Zellen allerdings für die Serienproduktion geeignet sind und bei welchem Wirkungsgrad der Mehraufwand in der Fertigung in einer sinnvollen Relation zur höheren Energieausbeute steht, wird derzeit untersucht.

- **Längerfristig** könnten - wegen des großen Materialverbrauchs von kristallinem Silizium und wegen der aufwendigen Si-Wafertechnologie - Dünnschichttechnologien mit großflächiger Abscheidung die Solarzellentechnologien der Zukunft werden. Bis diese Dünnschichtzellen die c-Siliziumzellen in bezug auf Wirtschaftlichkeit übertreffen werden, ist aber noch ein **erheblicher Entwicklungsaufwand** notwendig.
- Die verschiedenen konkurrierenden Dünnschichtzellenkonzepte befinden sich in einem sehr **unterschiedlichen Entwicklungsstadium**. Derzeit ist es nicht möglich, **einer** Technologie für die Zukunft einen eindeutigen technisch-ökonomischen Vorteil gegenüber den anderen zuzusprechen. Neben technischen und ökonomischen Fragestellungen spielen zudem die Verfügbarkeit der Ressourcen sowie die Toxizität der eingesetzten Materialien - und damit deren Akzeptanz - in einem gegenwärtig eher "grünen" Markt eine wichtige Rolle bei Produktions- wie bei Kaufentscheidungen.
- Auf absehbare Zeit sollten **Forschung und Entwicklung** weiter "breitbandig" durchgeführt werden, um nicht eine wichtige Option zu verlieren. Es besteht noch auf zahlreichen Gebieten ein erheblicher FuE-Bedarf:
 - Die "etablierten" Technologien der kristallinen Silizium-Solarzellen müssen so weiterentwickelt werden, daß die Solarzellen einen höheren Wirkungsgrad aufweisen, weniger Material benötigen und kostengünstiger gefertigt werden können.
 - Die innovativen Dünnschichtzelltechnologien müssen diese drei Anforderungen natürlich auch erfüllen. Zunächst aber muß für alle (bis auf das amorphe Silizium) der Nachweis erbracht werden, daß sie großflächig und homogen hergestellt werden können.

Prinzipiell neue Solarzellenkonzepte und -materialien können zwar generell für die Zukunft nicht ausgeschlossen werden, sie sind aber gegenwärtig nicht in Sicht. Viele spektakulär angekündigte Neuerungen der letzten Jahre sind aufgegeben worden, noch ehe sie das Laborstadium verlassen haben.

Gasturbinen

Stationär betriebene Gasturbinen haben in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung in der weltweiten Stromerzeugung gewonnen, nicht zuletzt aufgrund von Liberalisierungstendenzen in den Energie- und Gasmärkten. Sie sind heute eine Standardtechnik in der Erzeugung elektrischer Energie. Gasturbinen sind im Sinne einer preiswerten, brennstoffvariablen und schnell verfügbaren Energieversorgung vielseitig einsetzbar und in einer dynamischen Entwicklung begriffen. Auch wenn ihr Wirkungsgrad nicht beliebig steigerungsfähig ist, so ist doch ein weiteres "Heranrücken" an die thermodynamisch definierte Grenze möglich. Eine weitere Wirkungsgradsteigerung ist sinnvoll, weil eine effizientere Brennstoffausnutzung natürliche Ressourcen schont und Schadstoffeinträge in die Umwelt verringert.

Bei der **Umsetzung einer Wirkungsgradsteigerung** spielen neu- und weiterentwickelte Materialien eine wesentliche Rolle. Der Schwerpunkt liegt auf vier Werkstoffklassen: Metallische Werkstoffe (Superlegierungen und intermetallische Phasen), keramische Werkstoffe (Strukturkeramiken), Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffe) sowie Oberflächenbeschichtungen (Wärmeschutzschichten). Dabei wird von **neuen Hochtemperaturwerkstoffen** mindestens ein gleichwertiges, eher ein gegenüber konventionellen Werkstoffen deutlich verbessertes Eigenschaftsprofil erwartet, das möglichst kostengünstig erreichbar sein soll. Auffallend ist, daß bei neuen Hochtemperaturwerkstoffen derzeit an vielen Einzelfragen geforscht wird. **Wesentliche Verbesserungen** wurden **bei einzelnen Gebrauchs- und Fertigungseigenschaften** erreicht (wobei Materialentwicklungen im Gasturbinenbau bisher wesentlich von Entwicklungen im Flugturbinenbau profitiert haben), eine Überlegenheit im gesamten Eigenschaftsprofil konnte jedoch noch nicht nachgewiesen werden.

Mit gerichtet bzw. einkristallin erstarrten **Superlegierungen** lassen sich bereits auf der Materialoberfläche Temperaturen von ca. 1.000°C realisieren. Eine Steigerung der Oberflächentemperatur auf ca. 1.100°C wird noch mit metallischen Komponenten, wie weiterentwickelten bzw. oxid-dispersionsverstärkten (ODS)-Superlegierungen, realisierbar sein. Für eine signifikante Steigerung der Temperaturen auf der Materialoberfläche auf ca. 1.400°C ist bereits die Entwicklung **keramischer Strukturwerkstoffe** erforderlich. Eine weitere Temperatursteigerung bedeutet in der Materialauswahl ein Wechsel in Richtung **Verbundwerkstoffe** (z.B. kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffe). Unter Berücksichtigung einer zeitlichen Entwicklungskomponente bedeutet dies:

- **Relativ kurzfristig** und mit hoher Erfolgswahrscheinlichkeit ist eine Weiterentwicklung eingesetzter Superlegierungen auf Nickelbasis zu erwarten. Verfahren zur gerichteten bzw. einkristallinen Erstarrung verleihen Bauteilen in ihrer Hauptbeanspruchungsrichtung günstige Eigenschaften. Stabilisierende Zusätze, z.B. von Oxiden, verbessern deren Hochtemperaturtauglichkeit weiter. Bei oxiddispersionsverstärkten Superlegierungen ist die Fertigung deutlich aufwendiger, da diese z.B. nicht für kostengünstige Gießverfahren geeignet sind. Einsatzgrenzen von Superlegierungen sind durch deren Schmelzpunkte sowie durch spezifische Schadensszenarien, wie die Ribbildung entlang der Korngrenzen bei einkristalliner Erstarrung, gegeben.
- **Eher mittelfristig** ist mit einem Einsatz vollkeramischer Turbinenschaufeln zu rechnen. Bei keramischen Materialien kann weitestgehend auf Kühlung und das Aufbringen von Wärmedämmschichten verzichtet werden. Ein mittelfristiges Einsatzpotential unter industriellen Gesichtspunkten ergibt sich auch für die zwischen metallischen und keramischen Werkstoffen einzuordnenden intermetallischen Phasen, welche sich durch Temperaturbeständigkeit und geringes spezifisches Gewicht auszeichnen. Bei beiden Materialklassen wirkt sich ihre Sprödigkeit negativ auf Einsatz und Herstellung aus. Die Neigung keramischer Materialien zum Spröbruch kann zwar vermindert, jedoch nicht grundsätzlich beseitigt werden. Daher ist eher davon auszugehen, daß deren Vorteile erst in keramik-spezifisch konstruierten Bauteilen voll zur Geltung kommen.
- **Eher längerfristig** ist das Einsatzpotential von Turbinenbauteilen aus Verbundwerkstoffen, wie kohlenstoffaserverstärkten Kohlenstoffen, einzuordnen. Der Charme dieser Werkstoffklasse liegt darin, "maßgeschneiderte Materialien" herstellen zu können. Einsatzbegrenzend wirken sich Sprödigkeit und Oxidationsempfindlichkeit der Fasern aus. Hoffnungen werden daher in die Entwicklung neuer Oberflächenschutzsysteme gesetzt.

Oberflächenbeschichtungen als Wärmeschutzschichten aufgebracht spielen bei fast jedem Hochtemperaturwerkstoff eine ergänzende, zumeist korrosive Bedingungen ausgleichende und damit stabilisierende Rolle. Dadurch wird eine Steigerung der Einsatztemperaturen einzelner Bauteile um bis zu 100°C möglich. Praxisrelevante Probleme, wie Stabilität und Haftung der Beschichtungen etwa bei Mehrschichtsystemen, erscheinen mittelfristig lösbar.

Den relativ hohen Erwartungen an neue Materialien steht bei den betrachteten Hochtemperaturwerkstoffen für Gasturbinen noch ein umfangreicher **FuE-Bedarf** z.B. in folgenden Themenfeldern gegenüber:

- Verbesserung des theoretischen Verständnisses des Materialaufbaus (z.B. kohlenstoffaserverstärkte Kohlenstoffe), von Verstärkungs- sowie Härtungsmechanismen (z.B. ODS-Superlegierungen, Konzepte der dreidimensionalen Verstärkung bei CFC) sowie des Materialverhaltens bei hohen Temperaturen (Wechselwirkungen der Materialienbestandteile untereinander, Schadensszenarien etc.),
- Optimierung der Materialgefüge (z.B. Eingrenzung der Streuung der Festigkeitswerte und Optimierung des Sinterprozesses bei Keramiken, Zusammenhang zwischen eingestellten Fertigungsparametern und den erhaltenen Bauteileigenschaften bei CFC),
- Weiterentwicklung von gängigen Herstellungsverfahren (z.B. für gerichtet erstarrte Superlegierungen, Aufbringen von Wärmeschutzschichten), Entwicklung von neuen, kostengünstigen Fertigungsverfahren (z.B. zur Serienfertigung von intermetallischen Phasen) und
- Entwicklung geeigneter Prüfverfahren zur Qualitätssicherung im Fertigungsprozeß insbesondere im Hochtemperaturbereich (zur Reproduzierbarkeit von Materialeigenschaften im Herstellungsprozeß, da vielfach noch keine spezifischen Werkstoff- und Bauteilkennwerte existieren etc.).

Supraleiter

Supraleiter können - theoretisch - im Rahmen der Elektrizitätswirtschaft auf allen Produktionsstufen (Umwandlung, Transport und Verteilung) eingesetzt werden. Die Energietechnik wird seit geraumer Zeit als ein wesentliches Anwendungsgebiet für supraleitende Materialien angesehen. Neben Verbesserungen bei **bekannten technischen Systemen** (supraleitende Generatoren, Transformatoren, Kabel), wo sich **aufgrund der geringen elektrischen Verluste der Supraleiter höhere Wirkungsgrade** erzielen lassen und die hohe Leistungsdichte reduzierte Volumina und Gewichte ermöglicht, werden auch **neue Konzepte** (bspw. Fehlerstrombegrenzer auf der Basis supraleitender Materialien und der Einsatz supraleitender magnetischer Energiespeicher) diskutiert. Allerdings sind insbesondere für die **Kühlung der Supraleiter aufwendige** Techniken notwendig, die durch ihren Eigenverbrauch die energetischen Vorteile der verlustarmen Leitung reduzieren oder überkompensieren. Zudem ist die Fertigung der Leiter verglichen mit konventionellen Kupferleitern erheblich schwieriger und aufwendiger, die Systeme selbst sind häufig komplizierter, so daß erhebliche Anstrengungen unternommen werden müssen, um die gleiche Zuver-

lässigkeit und Verfügbarkeit wie bei den heute verfügbaren konventionellen Alternativen zu erzielen, was wiederum zu höheren Anlagenkosten führt.

Die Entdeckung von Hochtemperatursupraleitenden Materialien Mitte der achtziger Jahre ließ alte **Erwartungen** bezüglich des baldigen Einsatzes supraleitender Techniken in der Elektrizitätswirtschaft wiederauferstehen. Dabei wurden durch die neuen Materialien die den energietechnischen Anwendungen zugrundeliegenden physikalisch-technischen Prinzipien und die Rahmenbedingungen ihres Einsatzes nicht grundlegend geändert. Durch die Nutzung eines "höheren" Temperaturbereichs für die Kühlung könnten jedoch einfachere und billigere Kühltechniken Anwendung finden, zudem könnte der Aufwand für die thermische Isolation reduziert werden. Dem stand gegenüber, daß die Eigenschaften der neuen Materialien zunächst untersucht und verstanden werden mußten und Verfahren für die Fertigung von für die jeweilige Anwendung geeigneten Leitern zu entwickeln waren.

Bei den "klassischen" Hochtemperatursupraleitern ist an einer Weiterentwicklung der bekannten sowie an der Entwicklung neuer Konzepte und Herstellungsprozesse für für energietechnische Anwendungen geeignete Leiter zu arbeiten.

Die "Kontrollierbarkeit" eines Materials ist ein fundamentaler Faktor für seine praktische Anwendung. Bei den Hochtemperatursupraleitern wurden in den vergangenen zehn Jahren zahlreiche Fortschritte erzielt, das Verständnis der wichtigsten Materialien ist inzwischen ausreichend. Eine akzeptierte physikalische Theorie der Hochtemperatur-Supraleitung ist jedoch - trotz verbreiteter Anstrengungen und zahlreicher origineller und stimulierender Ideen - bislang nicht in Sicht. Weitere Grundlagenforschung erscheint hier notwendig.

Es wurden in den letzten Jahren zahlreiche Verfahren zur **Fertigung von Leitern auf der Basis von HTS-Materialien** entwickelt. Jedes davon weist spezifische Stärken und Schwächen auf. Für eine Umsetzung der Prozesse in eine industrielle Fertigung scheint sich (sowohl aus physikalisch-technischen wie auch aus wirtschaftlichen Gründen) als Leitprinzip herauszukristallisieren, diese Prozesse möglichst flexibel und einfach zu halten und nur so viele Prozeßschritte durchzuführen, wie zum Erreichen der geforderten Parameter notwendig.

Unter den heute umfangreich untersuchten HTS-Materialien weist YBCO im Vergleich zu den Bi-Materialien bei 77 K signifikant höhere Stromdichten auf. Aufgrund struktureller Eigenschaften des Materials ist seine Anwendung in Form gewalzter Bänder oder Drähte ausgeschlossen. Beschichtungsverfahren zur Leiterherstellung waren erst bei Längen von wenigen Zentimetern erfolgreich. Besonders aussichtsreich scheint gegenwärtig die Abscheidung dicker

Schichten von YBCO auf flexiblen Metallsubstraten und deren anschließende Weiterverarbeitung mittels verschiedener technischer Ansätze zu sein. Bis damit längere Leiter produziert werden können, werden aber wohl noch einige Jahre Entwicklungstätigkeit notwendig sein. Bi-basierte Leitermaterialien (BSCCO-Verbindungen) erlauben eine einfachere Herstellung von Drähten und Bändern. Allerdings verlieren sie die Supraleitfähigkeit bei 77 K bereits bei Magnetfeldern mittlerer Stärke, die bei vielen energietechnischen Anwendungen als integraler Bestandteil des Funktionsprinzips auftreten. Im Bereich von 20-30 K zeigen PIT-gefertigte Bi-Leiter jedoch gute technische Daten. Durch neue Techniken hofft man, die Supraleitung auch bei "höheren" Temperaturen und/oder stärkeren Magnetfeldern erhalten zu können. Mit kurzen Drähten wurden bereits vielversprechende Ergebnisse erzielt. Ob diese Techniken jedoch für größere Leiterlängen praktikabel und wirtschaftlich sind, bleibt abzuwarten.

Obwohl heute bereits mehr als 100 Verbindungen bekannt sind, die als Hochtemperatur-Supraleiter bezeichnet werden können, sollte die **Suche nach weiteren Materialien fortgesetzt** werden. Dabei sollte das Hauptaugenmerk weniger auf Materialien mit höheren kritischen Temperaturen gelegt werden. Für die meisten energietechnischen Anwendungen wird es vielmehr darauf ankommen, Supraleiter zu finden, die

- sich fertigungstechnisch vergleichsweise einfach in die für die Anwendung notwendige Form (vor allem lange Drähte) bringen lassen,
- in der Lage sind, auch bei starken Magnetfeldern, bei höheren Temperaturen (mindestens des flüssigen Stickstoffes) sowie ggf. bei moderaten mechanischen Beanspruchungen die Supraleitung aufrechtzuerhalten,
- geringe Probleme im Hinblick auf Ressourcenverfügbarkeit, Toxizität und Entsorgbarkeit aufweisen.

Dabei wird die **empirische** Suche nach neuen Materialien - auch wenn in Zukunft eine geeignete theoretische Erklärung des Mechanismus der Hochtemperatur-Supraleitung gefunden werden sollte - weiter die zentrale Rolle einnehmen.

Supraleitende Komponenten für Anwendungen in der elektrischen Energietechnik gestatten - zunächst hier ungeachtet des eingesetzten Supraleiters - entweder völlig neue technische Systeme oder sollen konventionelle Systeme aufgrund günstigerer techno-ökonomischer Parameter ablösen. Der entscheidende Durchbruch für energietechnische HTS-Anwendungen bei 77 K wird erst dann eintreten können, wenn sich diese in geeigneten technischen Konfigurationen fertigen lassen. Unklar ist, mit welchen elektrischen Parametern und zu welchen Kosten geeignete technische Supraleiter auf HTS-Basis tatsächlich in

industriellem Maßstab gefertigt werden können. Festzuhalten ist, daß es **den** "Allzweck"-Supraleiter für energietechnische Anwendungen nicht geben wird. Vielmehr werden technisch-ökonomische Optimierungen bei der Wahl des supraleitenden Materials wie auch der Leiterkonfiguration zu vielfältigen Konzepten führen.

Für die **Einsatzmöglichkeiten** der einzelnen Anwendungen läßt sich - die Verfügbarkeit geeigneter und "bezahlbarer" Leiter vorausgesetzt - aus heutiger Sicht zusammenfassend feststellen:

- Bei **rotierenden Maschinen (große Motoren und Generatoren)** ist eine Verbesserung des Wirkungsgrades von vergleichsweise geringer Bedeutung. Solche Systeme erreichen heute Wirkungsgrade um 98 %, der Einsatz supraleitender Materialien läßt Steigerungen von 1-1,5 %-Punkten erwarten. Dies kann - vor allem bei den großen Motoren, von denen größere Stückzahlen in Deutschland betrieben werden - gesamtwirtschaftlich durchaus relevant sein. Allerdings liegen wesentlich höhere Effizienzpotentiale bei den mit den elektrischen Maschinen verbundenen Systemen, etwa den Dampfturbinen bei den Generatoren bzw. Pumpen oder Lüftern bei den Motoren. Supraleitende Generatoren sind erst bei Baugrößen von mehreren hundert MVA wirtschaftlicher als konventionelle Systeme, die Nachfrage nach Generatoren dieser Größenordnung ist angesichts der momentanen Entwicklung im Kraftwerksbereich eher klein. Inwieweit weitere Eigenschaften wie geringere Baugröße, reduziertes Gewicht und verbesserte betriebliche Eigenschaften tatsächlich vom Markt honoriert werden, ist offen.

Längerfristig dürften sich Perspektiven für den supraleitenden Generator vor allem dann bieten, wenn wieder größere (nukleare ?) Kraftwerke gebaut werden sollten.

- Die nahezu widerstandsfreie Stromleitung in **supraleitenden Kabeln** gilt in der Öffentlichkeit als die attraktivste Anwendung der Supraleitung. Zahlreiche Projekte auf der Basis von HTS-Materialien werden gegenwärtig durchgeführt. Dabei liegt die kurzfristige Perspektive der meisten Arbeiten beim Einsatz solcher Kabel für den Stromtransport in Ballungsgebieten (vor allem bei der Leistungserhöhung ("Retrofit") bestehender Systeme). Längerfristig wird ihr Einsatz in einem - noch zu konzipierenden und vor allem auf seine über die reine Funktionalität hinausgehenden Aspekte zu diskutierenden - weltumspannenden Elektrizitätsnetz gesehen, wobei hier Hochspannungsgleichstromübertragung in beträchtlichem Umfang Anwendung finden dürfte.

- Auch bei **supraleitenden Transformatoren** spielen Effizienzverbesserungen - auch wenn sie durchaus nicht vernachlässigbar sind - aus Anwendersicht eine geringere Rolle als ihre verbesserten betrieblichen Eigenschaften, die Vorteile durch den Wegfall des Isolierstoffes Öl sowie die spezifische Gewichts- und Volumenreduktion, die Märkte vor allem im Retrofitting-Bereich in dicht besiedelten Räumen eröffnen könnte. Gegenwärtig befinden sich mehrere Prototypen in der Felderprobung.
- Die **Energiespeicherung in supraleitenden Spulen (SMES)** ist mit kleinen Anlagen für Zwecke der Sicherung der Qualität der Stromversorgung bereits kommerziell verfügbar. Mehrere LTS-Anlagen befinden sich im Regelbetrieb, mehrere Unternehmen arbeiten an LTS- oder HTS-basierten Systemen. In Abhängigkeit von der Entwicklung der wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen in den Elektrizitätsmärkten können solche Systeme in Zukunft wachsende Bedeutung erlangen.
- Größere SMES-Anlagen zum Zwecke des Tageslastausgleichs sind aus heutiger Sicht nicht wirtschaftlich. Abhängig von der elektrizitätswirtschaftlichen Struktur, in die die Speichertechnik eingebunden wird, könnten sie zudem ökologische Nachteile bringen. Langfristig könnte - unter der Voraussetzung starker Veränderungen in den Organisationsstrukturen der Elektrizitätswirtschaft und in der Zusammensetzung des Kraftwerksparks - verstärkter Bedarf an Speichertechnologien entstehen. Der gegenwärtige Stand der Technik zeigt allerdings für den Tagesspeichereinsatz keine eindeutige technische oder wirtschaftliche Überlegenheit von SMES gegenüber anderen konventionellen Speichertechniken. Es sind keine Pläne für die Entwicklung großer SMES bekannt.
- Eine denkbare Alternative zu den kleinen SMES sind **Schwungmassenspeicher (Schwungräder) mit supraleitenden Lagern**. Grundsätzlich für die gleichen Anwendungen wie kleine SMES einsetzbar, wird die weitere Entwicklung entscheiden müssen, welche Technik aus wirtschaftlicher und betrieblicher Sicht attraktiver ist.
- Unter den supraleitenden Techniken stoßen derzeit allein die **supraleitenden Strombegrenzer** auf größeres Interesse. Man verspricht sich von ihnen vor allem eine Verbesserung der Spannungsqualität und geringere Netzzrückwirkungen. Unklar ist bislang jedoch noch, welches Funktionsprinzip die günstigen Realisierungschancen hat und in welchem Konzept es tatsächlich umgesetzt wird. Hier sind noch weitere Entwicklungsarbeiten vonnöten.

Bei den komplexen energietechnischen Systemen und deren langen Entwicklungs- und Erprobungszeiten sowie den derzeit ungewissen Aussichten auf einen kommerziellen Erfolg von supraleitenden Systemen erscheint es unwahrscheinlich, daß eine rein industrielle Forschung und Entwicklung in diesem Bereich in größerem Umfang realisiert wird. Im Wettbewerb mit den über lange Zeit erprobten und weiterentwickelten konventionellen Betriebsmitteln in der elektrischen Energietechnik sind neue Techniken beim Nachweis der Funktionalität, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit immer im Nachteil. Staatliche Unterstützung wäre - neben der Grundlagenforschung - vor allem bei Pilotprojekten und Demonstrationsanlagen unumgänglich, sollen diese Techniken weiterentwickelt und erprobt werden.

Für die Beurteilung der langfristigen Perspektive von supraleitenden Energietechniken wird es nicht ausreichend sein, diese jeweils den konventionellen Alternativen gegenüberzustellen. Von Interesse wäre es, ein "supraleiterbasiertes" Elektrizitätsversorgungssystem - und den Weg dorthin - zu entwerfen und gesamtwirtschaftlich mit dem gegenwärtigen und sich in neuen Rahmenbedingungen weiter entwickelnden System in Bezug zu setzen.

Eine **ökologische Bewertung** des Einsatzes neuer Werkstoffe in der Energietechnik ist gegenwärtig nur in Ansätzen möglich. Einerseits lassen beispielsweise hochtemperaturfeste Werkstoffe für den Einsatz in Gasturbinen eine Steigerung des Wirkungsgrades und damit reduzierte Energieverbräuche und Emissionen erwarten. Die gewünschte - und erzeugte - hohe Widerstandsfähigkeit dieser Materialien gegenüber thermischen und chemischen Einflüssen könnte jedoch deren Recycling-Fähigkeit reduzieren. Materialien für Solarzellen leisten einen Beitrag zur im Betrieb emissionsfreien Stromerzeugung, jedoch sind für ihre Herstellung erhebliche Energieeinsätze aufzuwenden. Generell kann festgehalten werden, daß - bis auf Ausnahmen - zur Zeit Forschungsergebnisse und aufgearbeitete Informationen fehlen, um die ökologischen Folgen des Einsatzes neuer Werkstoffe befriedigend beurteilen zu können. Für das Erstellen von Ökobilanzen fehlen vielen - vor allem kleinen und mittleren - Unternehmen sowohl Bilanzdaten konventioneller und vor allem neuer Werkstoffe sowie häufig auch personelle Kapazitäten. Es wäre wünschenswert, Aspekte der ökologischen Bewertung der Werkstoffentwicklung stärker als bisher in die FuE-Aktivitäten einzubeziehen.

I. Einleitung

Die Entwicklung, Herstellung und Verarbeitung von neuen Werkstoffen/Materialien für innovative Anwendungen hat herausragende Bedeutung für viele Technologiefelder und Wirtschaftsbranchen. Neue Werkstoffe bilden die Grundlage für Weiterentwicklungen in praktisch allen wichtigen Technologiebereichen. Die künftige **wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit des Standortes Deutschland** steht in engem Zusammenhang mit Innovationen im Werkstoffbereich. Zudem hat die Entwicklung neuer Werkstoffe und der zugehörigen Produktions- und Verarbeitungstechniken auch erhebliche **ökologische Auswirkungen** (Schadstoffminderung, Ressourcenschonung, etc.).

Die zentrale Rolle neuer Werkstoffe für die Entwicklung innovativer Technologien und neuer marktfähiger Produkte spielt in der öffentlichen Wahrnehmung eine eher untergeordnete Rolle. Dies hat seine Ursache unter anderem darin, daß die Funktionalität eines neuen bzw. weiterentwickelten Systems oder Produkts für den Nutzer im Vordergrund steht und damit häufig die eigentlich entscheidenden Bausteine - die verwendeten Werkstoffe - hinter diese zurücktreten. Aus industrieller Perspektive fallen zudem Erträge aus der Herstellung der Werkstoffe selbst - verglichen mit Erträgen aus Produkten und Systemen - in der Regel geringer aus.

Neue Entwicklungen im Werkstoffbereich zeigen nicht nur Auswirkungen in den direkt werkstoffbasierten Technologiefeldern. Auch Fortschritte bei Technologien, die nicht auf den ersten Blick mit neuen Werkstoffen in Verbindung gebracht werden, beruhen in erheblichem Maße auf neuen Werkstoffentwicklungen. Die Bedeutung neuer Materialien für Anwendungen in klassischen Technologiefeldern kann anhand ihrer **Anwendung im Energiesektor** verdeutlicht werden. Besonders anschaulich kann ihr Querschnittscharakter an der gebräuchlichen Zuordnung zu Funktions- und Strukturwerkstoffen dargestellt werden. Neue thermisch und chemisch höher belastbare Strukturmaterialien (v.a. Strukturkeramiken und Strukturmetalle) sollen Wirkungsgrade und Wirtschaftlichkeit konventioneller Energietechniken, vor allem bei der Umwandlung fossiler Energieträger in elektrische Energie, verbessern. Besondere physikalische Eigenschaften von Funktionsmaterialien macht man sich für neue Umwandlungstechniken (etwa die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie, die Photovoltaik) oder für eine Reduktion von Verlusten bei der Energieübertragung und -anwendung (beispielsweise durch die technische Anwendung der

nahezu verlustfreien Stromleitung, der sogenannten Supraleitung) und damit für die Einsparung elektrischer Energie zunutze.

Ziel der vorliegenden Studie, deren Thematik zurückgeht auf eine Initiative des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, ist es, anhand dreier Anwendungsfelder den aktuellen Entwicklungsstand sowie Besonderheiten der Herstellung/Fertigung hierfür ausgewählter Materialien zu analysieren.

Dabei ist zu beachten, daß in der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion keine scharfe Trennung zwischen den Begriffen "Material" und "Werkstoff" existiert, auch werden die **Begriffe "Neue Materialien" und "Neue Werkstoffe"** oft in Ermangelung einer allgemein anerkannten Definition nicht einheitlich verwendet. Die vorliegende Studie lehnt sich an die bereits in früheren Arbeiten des TAB vertretene wissenschaftlich-technisch orientierte Auffassung an, die den Bereich der neuen Werkstoffe als den jeweils aktuellen Frontbereich von Werkstoffforschung und -entwicklung versteht. Neue Werkstoffe sind demnach Werkstoffe, die sich in ihrer physikalischen Struktur, ihrer chemischen Zusammensetzung oder in ihrer Funktion von vorhandenen Werkstoffen unterscheiden. Ihre Entwicklung erfolgt grundsätzlich auf zwei verschiedenen Pfaden, zum einen durch **Modifikation** der physikalischen Struktur oder chemischen Zusammensetzung **konventioneller Werkstoffe** oder auf der Basis **neuer Werkstoffkonzepte**.

Das Thema "Neue Materialien für die Energieeinsparung und Energieumwandlung" verknüpft verschiedene Themen- und Technologiebereiche sowie Materialgruppen. Die vorliegende Studie vertieft hierzu **drei ausgewählte Anwendungsbereiche** neuer Materialien, in denen bereits vereinzelte Anwendungen stattfinden und z.T. sich noch im Stadium der Forschung befinden:

- Materialien für die Photovoltaik
- Hochtemperatur-Werkstoffe für Gasturbinen
- Supraleitende Materialien für energietechnische Anwendungen

Das verbindende Element besteht im angestrebten Ziel, (elektrische) Energie effizient, kostengünstig sowie umwelt- und ressourcenschonend zu erzeugen, zu transportieren, zu speichern oder anzuwenden. Hierzu werden zahlreiche Ansätze verfolgt:

- Verbesserung der Effizienz klassischer Wandlungstechniken (etwa die Steigerung von Wirkungsgraden von Gasturbinen oder Dampferzeugern durch höhere Temperaturen oder Drücke) und damit Reduktion des Brennstoffverbrauchs

- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von technischen Systemen durch Reduzierung der Herstellungs- und Betriebskosten, durch Erhöhung von deren Leistung sowie durch Verlängerung der Lebensdauer
- Verbesserung der Umweltverträglichkeit durch Reduktion der Abgasemissionen
- Entwicklung und Verbesserung neuer Wandlungstechniken zur Nutzung regenerativer Energieressourcen
- Verbesserung der Wirkungsgrade von Elektrizitätsübertragungs- und -anwendungstechniken und damit Reduktion von Verlusten
- Entwicklung neuer, mit bisherigen Werkstoffen nicht (oder nicht annähernd wirtschaftlich) zu realisierender Techniken

Der heutige Kenntnisstand der Werkstoffentwicklung erlaubt zunehmend eine **maßgeschneiderte Herstellung oder Verbesserung von Werkstoffen**. Hierbei bestimmen nicht länger die Eigenschaften des Werkstoffes seine Nutzung, vielmehr werden aus den gewünschten Funktionen von Systemen oder Produkten Zielvorgaben für den Entwicklungsprozeß abgeleitet. Auf der Basis der Definition einer angestrebten technologischen Dienstleistung wird ein **Nutzungsprofil** entworfen, das die Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe beschreibt und das **Entwicklungsziel** definiert. Maßgeschneiderte Werkstoffe reflektieren damit einen **wesentlichen qualitativen Fortschritt im Werkstoffbereich**.

II. Werkstoffe für die Photovoltaik

Eine photovoltaische Energiewandlung ist die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie in Solarzellen. Sie ermöglicht eine direkte Nutzung der Strahlungsenergie der Sonne. Der photovoltaische Effekt ist bereits seit 1839 - nach der Entdeckung durch den französischen Physiker Edmond Becquerel - bekannt. Seine praktische Nutzung wurde jedoch erst im Zuge der frühen Raumfahrtprogramme sowie mit Fortschritten in der Halbleiterentwicklung in den fünfziger Jahren dieses Jahrhunderts realisiert. Hauptziel war zunächst eine leichte und strahlungsresistente Elektrizitätsquelle für Weltraumanwendungen. Erst im Zuge der Ölpreiskrisen in den siebziger Jahren wurden auch terrestrische Anwendungen der Photovoltaik ins Auge gefaßt.

Solarzellen fertigt man aus Halbleitermaterialien, die die Eigenschaft besitzen, durch Einlagerung von Fremdatomen (genannt Dotierung) elektrisch leitfähig zu werden. Die einfachste funktionsfähige Solarzelle besteht aus zwei Schichten mit unterschiedlichem elektrischem Verhalten. Treffen Lichtteilchen auf die Solarzelle auf, dann lösen sie damit Elektronen aus ihrer Bindung. So beweglich gemacht, wandern diese durch den Kristall, wodurch zwischen beiden Schichten eine elektrische Spannung auftritt. Mit Hilfe von metallischen Kontakten auf Vorder- und Rückseite der Solarzelle können die Elektronen aus der einen Schicht über einen äußeren Stromkreis wieder in die andere Schicht zurückfließen. Diesen Elektronenfluß nennt man Strom.

Der Entwicklungsstand und die künftigen Chancen der erneuerbaren Energien und hier speziell der Photovoltaik (PV) sind in besonderer Weise von Ergebnissen der Materialentwicklung abhängig. Während derzeit die industrielle Solarzellenfertigung fast ausschließlich auf Silizium basiert, befinden sich eine Reihe anderer Solarzellen in der Entwicklung, von denen man sich für die Zukunft eine bedeutende Material- und Fertigungskostenersparnis verspricht. Eine Bewertung dieser Materialien muß neben den Problemen der Herstellungstechnologie auch Fragen der Materialkosten und der Umweltverträglichkeit bei Herstellung, Gebrauch und Entsorgung in Betracht ziehen. Da in einer zukünftigen Großproduktion von PV-Modulen auch bedeutende Mengen bzw. Flächen hergestellt und im Freien aufgestellt werden, müssen auch Fragen der Verfügbarkeit der Materialien behandelt werden.

1. Technologie- und Materialaspekte

Wichtig für das Verständnis von Materialentscheidungen für die Photovoltaik sind einige Grundkenntnisse über zugrundeliegende physikalische Größen und Phänomene.

Durch Solarzellen soll ein möglichst großer Teil des einfallenden Sonnenlichtes in Elektrizität umgewandelt werden. Dazu muß das Licht zunächst absorbiert werden. Das Absorptionsverhalten ist durch materialspezifische Größen bestimmt: die sogenannte (optische) Bandlücke (oder auch Energielücke) und den Absorptionskoeffizienten. Für eine größtmögliche Effizienz einer Solarzelle ist die Bandlücke so zu wählen, daß ein möglichst großer Teil des Lichtspektrums durch das Zellmaterial absorbiert wird. Eine **geeignete optische Bandlücke** liegt zwischen 1,0 und 2,0 eV. Wünschenswert ist desweiteren eine weitgehende Absorption des Lichtes bereits bei geringen Dicken des Halbleitermaterials, also eine **große optische Absorption**. Ohne auf die strukturellen Eigenschaften von unterschiedlichen Halbleitern hier tiefer eingehen zu wollen, sei noch folgendes angemerkt: Bei sogenannten **direkten Halbleitern** erreicht der Absorptionskoeffizient weit höhere Werte als bei indirekten Halbleitern, bei denen der physikalische Mechanismus der Absorption komplizierter abläuft. Darum ist direkten Halbleitern für Solarzellen eigentlich der Vorzug zu geben (allerdings basiert die bisher kommerziell erfolgreichste Solarzelle auf dem indirekten Halbleiter Silizium).

Weitere wichtige Materialeigenschaften sind die **Dotierbarkeit**, d.h. die Möglichkeit, p- und n-leitende Schichten aus diesem Material fertigen zu können, sowie eine ausreichend große **Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger**. Nicht zuletzt sollte die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit möglichst niedrig sein.

Neben bestimmten physikalischen Eigenschaften müssen Materialien für die Photovoltaik zudem bestimmten technischen Kriterien genügen. Einige wichtige Kriterien sind im folgenden aufgelistet:

- Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien in ausreichenden Mengen
- Möglichkeit einer kostengünstigen Produktion der Solarzelle
- hohe Sicherheit in der Produktion und im Betrieb (geringe, wenn möglich keine toxikologischen Umweltbeeinflussungen)
- hohe Reproduzierbarkeit des Prozesses und damit eine große Ausbeute

Leider existiert momentan kein Material, das alle Kriterien gleichzeitig erfüllt, so daß die PV-Entwicklung in einer gewissen Breite durchgeführt werden muß.

2. Vergleichende Bewertung der verschiedenen Solarzellen

2.1 Kristallines Silizium

Die Solarzelle aus kristallinem Silizium (c-Si) dominiert mit großem Abstand die Photovoltaik-Anwendungen. Weit mehr als 80 % der weltweiten Zellfertigung des Jahres 1998 basieren auf kristallinem Silizium, etwa je zur Hälfte auf einkristallinem und polykristallinem Material. Seine Spitzenstellung in der Photovoltaik verdankt es nicht zuletzt einer hochentwickelten Technologie, die auf die Erfahrungen und Entwicklungen in der Mikroelektronik- und Leistungshalbleiterforschung zurückgreifen kann.

Bis jetzt haben kristalline Siliziumzellen auf Grund ihrer ausgereiften und als zuverlässig anerkannten Technologie und der relativ hohen Wirkungsgrade noch einen Vorteil gegenüber den anderen Solarzellentypen. Allerdings besitzen sie die Nachteile eines hohen Materialbedarfs bei der Herstellung der Wafer sowie einer relativ aufwendigen (teilweise hohe Temperaturen erfordernden) Prozessierung und damit hoher Prozeßkosten. Noch sind nicht alle neuartigen technischen Möglichkeiten in die Produktion eingebunden, so daß zu erwarten ist, daß der Preis für Silizium-Solarzellen bei höherem Produktionsvolumen noch sinken wird.

Für die besten kommerziell gefertigten Zellen aus Si beträgt der Wirkungsgrad - da sie kostengünstig und mit möglichst geringem technologischem Aufwand produziert werden müssen - ca. 16 % für monokristallines Silizium und ca. 15 % für multikristallines Silizium. Für die Zukunft sollten für die multikristallinen bzw. Cz-Silizium-Solarzellen Wirkungsgrade von 18 bzw. 20 % in der Serienfertigung möglich sein. Die Werte für die Module sollten daher auf mindestens 16-18 % steigen können.

Bei hoch- und höchstwertigen Si-basierten Zellen ("high efficiency"-Solarzellen) werden durch zusätzliche Strukturen, die in der Regel weitere Prozeßschritte notwendig machen, die optischen und elektrischen Verluste verringert und deren Wirkungsgrade weiter erhöht. Sie erreichen im Labormaßstab zur Zeit stabile Wirkungsgrade bis zu 25 %. Ihr allgemeiner Vorteil liegt in der

großen Bedeutung, die dem Wirkungsgrad beim Senken der Modulkosten zukommt. Ein erheblicher Nachteil dieser Technologie ist aber der komplizierte Aufbau der Zellen, der eine Produktion im industriellen Maßstab zu teuer erscheinen läßt. Hoch- und höchstwertige Zellen werden wohl auch in Zukunft nur bei Spezialanwendungen wie der Raumfahrttechnik zum Einsatz kommen.

Die wichtigste Aufgabe für die zukünftige FuE im Bereich kristalliner Si-Zellen besteht darin, die Fertigungskosten zu reduzieren und den großen Abstand zwischen den Wirkungsgraden von Labor- und Produktionszellen zu verringern und damit die Produktionswirkungsgrade zu erhöhen, ohne die Kosten wesentlich zu steigern. Dazu müssen die Technologieprozesse der "high efficiency"-Labortechnologie stark vereinfacht und in die Fertigung überführbar gemacht werden. Wegen des relativ großen Anteils der Waferkosten an der Silizium-Solarzelle müssen außerdem die Zellen möglichst dünn gemacht werden (ca. 150 μm), um Material zu sparen. Die Silizium-Solarzelle der Zukunft wird außerdem größer sein als die heute überwiegend hergestellten Zellen von 10x10 cm^2 Fläche.

2.2 Dünnschichtzellen aus amorphem Silizium

Nach dem kristallinen Silizium wird derzeit das amorphe Silizium (a-Si) am häufigsten in der Solarzellenproduktion zur Fertigung von Solarmodulen eingesetzt. Sein Anteil an der weltweiten PV-Zellproduktion betrug 1998 etwa 13 %. Interessant ist hierbei, daß etwa die Hälfte der a-Si-Zellen in sogenannten "indoor"-Anwendungen - Solarzellen für Kleingeräte wie Taschenrechner oder Uhren - genutzt wird. Die Kostenvorteile, die man sich von der a-Si-Technologie erhofft, basieren überwiegend auf der besseren produktionstechnischen Handhabbarkeit sowie dem deutlich niedrigeren Materialverbrauch. Sie weist allerdings auch einen gravierenden Nachteil auf: Die Probleme der a-Si-Solarzelle bestehen in der Degradation des Materials (Staebler-Wronski-Effekt) und dem daraus resultierenden zu niedrigen Wirkungsgrad; der Wirkungsgrad von industriell gefertigten Dünnschichtzellen liegt nur bei etwa 6 bis 7 %. Diese Nachteile neutralisieren die Kostenvorteile der Dünnschichttechnologie im Produktionsbereich vollständig.

Die Zukunft der a-Si-Dünnschichtzelle ist unter Fachleuten umstritten. Aussagen der Firma Canon, wonach bei Labormustern nach der Anfangsdegradation noch stabile Wirkungsgrade von über 9 % gemessen wurden, werden von anderen Unternehmen für nicht haltbar in der Serienfertigung betrachtet; diese ge-

ben der Technologie langfristig keine großen Chancen mehr. Derzeitig verfolgte Lösungswege zur Wirkungsgradsteigerung sind zwar aussichtsreich, werfen aber gleichzeitig neue, bislang ungelöste Probleme auf. Auch hier besteht natürlich die Notwendigkeit, die Kosten so weit zu senken, daß das a-Si-Modul billiger als das c-Si-Modul werden kann.

2.3 Weitere Dünnschichtzellen

Die größten Hoffnungen liegen derzeit in Dünnschichttechnologien, die einerseits höhere Wirkungsgrade als das amorphe Silizium aufweisen und andererseits deutlich billiger herstellbar sind als Zellen aus kristallinem Silizium. Als Hoffnungsträger gelten Dünnschichtzellen aus Cadmium-Tellurid/Cadmium-Sulfid (CTS), Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) und aus polykristallinem Silizium auf Fremdsubstrat. Mit ihnen soll bei großflächiger Abscheidung industriell ein Wirkungsgrad zwischen 10 und 12 % erreicht werden. Verschiedene Studien kommen zu dem Ergebnis, daß Dünnschichtsolarzellen ab einem stabilisierten Wirkungsgrad von 10 % konkurrenzfähig zu konventionellen Dickschichtzellen sind.

2.3.1 Kristalline Dünnschicht-Si-Solarzelle

Seit einigen Jahren, aber mit deutlich weniger FuE-Aufwand als bei den anderen Dünnschichtzellen, wird an der Entwicklung einer kristallinen Dünnschicht-Si-Solarzelle (tfc-Si-Zelle = **thin film crystalline Si-Zelle**) gearbeitet, bei der auf einer Trägerunterlage (Substrat) eine ca. 30 bis 50 µm dicke Schicht aus mc-Silizium abgeschieden wird, aus der dann eine Solarzelle prozessiert wird. Die kristalline Dünnschicht-Silizium-Solarzelle soll die Vorteile der kristallinen Silizium-Zelle auf Wafer-Basis mit den Vorteilen der Dünnschichttechnik (Materialersparnis, großflächige Abscheidung) vereinigen. Von den verschiedenen Ansätzen zur Realisierung einer solchen Zelle hat aber bisher noch keine das Stadium einer sicheren Laborreife, geschweige denn das einer Pilotfertigung, erreicht, da die Schwierigkeiten der Abscheidung einer geeigneten Si-Schicht auf einem geeigneten Substrat groß sind. Dennoch sind die bisherigen Erfolge vielversprechend, so daß die tfc-Si-Zelle eine wichtige Option in der Solarzellen-FuE darstellt.

Da hier die Entwicklung noch in den Anfängen steht, ist die Zahl der zu lösenden Probleme vergleichsweise groß. Geeignete hochtemperaturfeste kostengünstige Substrate müssen entwickelt werden, die Abscheidung von mc-Si-

Schichten muß schnell, gleichmäßig und in guter Qualität erfolgen, die elektrische Passivierung der Oberflächen muß sehr gut sein, ein gutes "light trapping" (Lichtfallen) muß gewährleistet sein. Falls poröse Substrate verwendet werden, müssen Trockentechnologien für Reinigen und Ätzen eingesetzt werden. Vor allem aber muß ein großflächiger Wirkungsgrad von deutlich über 10 % erreicht werden, um mit anderen Dünnschichttechniken mithalten zu können. Diese Entwicklung wird noch 5 bis 10 Jahre bis zur Fabrikationsreife benötigen. Auch die Multilayer-Dünnschicht-Zelle muß noch so weit entwickelt werden, daß die Vorteile gegenüber der konventionellen pn-tfc-Si-Zelle erkennbar sind.

2.3.2 Cadmiumtellurid-Solarzellen

Solarzellen aus Cadmiumtellurid (CdTe) wurden schon vor über 30 Jahren im Labor hergestellt, da die Bandlücke von CdTe mit 1,44 eV optimal ist und der theoretische Grenzwirkungsgrad bei etwa 28 % liegt. Es gelang allerdings erst in den letzten 10 Jahren, das Material soweit zu verbessern, daß Wirkungsgrade über 10 % möglich wurden. CTS-Solarzellen weisen nach den kristallinen und den amorphen Silizium-Solarzellen gegenwärtig die am weitesten entwickelte Technologie auf. Die Vielfalt der gewählten Abscheideverfahren ist vom Standpunkt der Massenproduktion her gesehen aber eher ein Zeichen einer noch jungen und unausgereiften Technologie. Dazu kommen speziell bei CTS-Zellen die Fragen der Umweltverträglichkeit des in CdTe und CdS gebundenen Cadmiums. Cd ist ein hoch toxisches Element und gesundheitsschädlich. Daher müssen während der Produktion hohe Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Auch sind die CdTe-Module im Gegensatz zu den Si-basierten Solarzellen-Modulen auch während ihrer Betriebsdauer nicht ganz unproblematisch. Durch Bruch und gleichzeitige Auslaugung durch Wasser können im Prinzip erhebliche Mengen von Cd in die Umwelt gelangen. Zudem sind sowohl Cd als auch Te selten vorkommende Elemente, was Fragen der Materialverfügbarkeit bei einer Großproduktion aufkommen läßt.

Auch bei CTS-Zellen muß die Lücke zwischen Labor- und Fertigungswirkungsgrad noch geschlossen werden, was in diesem Falle vor allem bedeutet: Die Vergrößerung der Zell/Modulflächen von wenigen cm^2 auf etwa m^2 -Größe muß ohne substantiellen Wirkungsgradverlust bewerkstelligt werden können. Das stellt hohe Anforderungen an die Abscheidetechniken. Die Stabilität der Kontakte muß verbessert werden. Die höchsten Laborwirkungsgrade wurden außerdem mit Abscheidungen bei hohen Temperaturen auf Spezialglas (Borsili-

catglas) erzielt, in der Fertigung muß aber einfaches Na-haltiges Glas eingesetzt werden können. Selbstverständlich müssen auch hier die Kosten so weit reduziert werden, daß das CdTe-Modul konkurrenzfähig wird.

2.3.3 Kupferindiumdiselenid-Solarzellen

Neben CdTe-Solarzellen sind die CIS-Zellen (copper-indium-diselenide solar cells) eine mögliche zukünftige Alternative zur kristallinen Silizium-Solarzelle. Seit 1978 werden sie intensiv entwickelt. CIS-Solarzellen benötigen einen sog. Heteroübergang, da diese Chalkopyrite rein p-leitende Halbleitermaterialien sind. Dabei befindet sich eine n-leitende Schicht, das sog. Fenster, auf dem Kupferindiumdiselenid CuInSe_2 und hat die Aufgabe, den erzeugten Photostrom zu sammeln. Durch Zugabe von Gallium und Schwefel läßt sich der Bandabstand variieren, so daß Solarzellen mit einem in bezug auf das Sonnenspektrum optimierten Bandabstand hergestellt werden können. Die Anreicherung der Kupferindiumdiselenid-Solarzelle mit Ga brachte für den Wirkungsgrad eine Verbesserung, so daß heute fast ausschließlich sogenannte CIGS (copper-indium-gallium-selenide solar cells) produziert werden.

Die Hauptaufgabe von FuE besteht hier im Hochskalieren der Flächen unter Beibehaltung der guten Laborwirkungsgrade und in der Entwicklung kostengünstiger Abscheideverfahren. Die Schwierigkeit bei der Herstellung einer guten CIS-Zelle resultiert aus der Komplexität des Phasendiagramms. Das bedeutet, daß es schwierig ist, eine definiert stöchiometrische Schicht von Kupferindiumdiselenid (CIS) oder gar der quaternären Verbindung (CIGS) abzuscheiden. Dieses Problem stellt besonders dann hohe Anforderung an die Homogenität aller Prozesse, wenn großflächige Schichten (m^2) hergestellt werden sollen. Auch die langzeitstabile Haftfestigkeit der Schichten an den Metallkontaktschichten scheint schwierig zu sein.

Auch bei CIS- und CIGS-Solarzellen ist die Herstellung von der Toxikologie her etwas problematisch. Während des Prozesses wird Se und Cd verwandt. Bei Se hängt die Giftigkeit und damit die Gesundheitsschädigung von der Art seiner Verbindung ab. Cd und In sind ebenfalls giftig. In der Nutzungsphase - etwa bei Bruch oder Brand - besteht die Gefahr des Austritts toxischer Substanzen. Wenngleich die Gesundheitsgefahr durch die Nutzung cadmiumhaltiger Solarzellen - bei sachgemäßer Nutzung und Wiederverwertung - für gering gehalten wird, hat das "schlechte Image" Cd-haltiger Solarzellen zu Befürchtungen seitens der Produzenten geführt, daß diese Zellen vor allem bei den um-

weltbewußten Nutzern im Heimbereich nicht angenommen würden. Darum gibt es in der Industrie die Tendenz, ganz auf Cadmium zu verzichten.

Festzuhalten ist des weiteren, daß Indium wegen seiner geringen Verfügbarkeit - es kommt fast genauso selten vor wie Silber - das kritische Element bei einer Großproduktion wäre. Wenn die gegenwärtige weltweite Indium-Produktion ausschließlich für die Herstellung von CIS-Modulen verwendet würde, wäre die maximale Herstellung auf 4 GW/Jahr begrenzt. Der Umfang der bekannten Indium-Reserven würde das maximal mögliche Produktionsvolumen an CIS-Modulen auf 200 GW limitieren.

2.3.4 Farbstoffsensibilisierte Solarzelle (Graetzel-Zelle)

Waren die bis hierhin betrachteten Solarzellen solche, die Halbleiter-pn-Übergänge besitzen, gehört die nachfolgend diskutierte Zelle zur Kategorie der photoelektrochemischen Solarzellen. Diese besticht in ihrem Aufbau und in ihrer Herstellung durch ihre Einfachheit. Die Solarenergieumwandlung geschieht bei dieser Art von Solarzelle über einen Halbleiter/Elektrolyt-Kontakt. Wie die Photosyntheseprozesse in der Natur wandeln dabei Farbstoffe Lichtenergie in Strom um. Charakteristisch für diesen Zellentyp ist, daß die lichtabsorbierende Schicht extrem dünn gewählt wird (0,0005-0,05 μm), so daß die Strecken, die die Ladungsträger zurückzulegen haben, entsprechend kurz werden. Zur vollständigen Absorption des Sonnenlichts muß die absorbierende Oberfläche extrem stark vergrößert werden. M. Graetzel baute zusammen mit seiner Forschungsgruppe in Lausanne auf der Basis von TiO_2 und eines Elektrolyten (Jod) in Verbindung mit einem Farbstoffkomplex aus Ruthenium eine relativ leicht herzustellende Solarzelle, die er 1991 patentieren ließ. Graetzel selbst nennt diese Art von Zellen "nanokristalline Titandioxid-farbstoffsensibilisierte Solarzellen". Weil eine stromleitende Lösung in dem System sein muß, wird diese Solarzellentechnik auch "nasses Solarsystem" genannt.

Da sich diese Zellen noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, lassen sich kaum Wirkungsgrade bzw. Wirkungsgradpotentiale angeben. M. Graetzel veröffentlichte für eine Laborzelle einen Wirkungsgrad von ca. 10 % und für Module ca. 4 %. Sie sollten aber nach seiner Einschätzung im Laufe der Zeit für Laborzellen auf über 15 % gesteigert werden können und für Module auf ca. 15 %. Das INAP Gelsenkirchen gibt für Solarmodule aus der Laborfertigung Wirkungsgrade um 8 % an.

Im Verhältnis zu den Halbleiter-Solarzellen ist die nasse Farbstoff-Solarzelle derzeit noch sehr instabil und nur begrenzt haltbar. Ob eine solche Solarzelle jemals zwanzig Jahre halten können, darüber sind sich die Fachleute nicht einig. Die Schwierigkeiten dieser Zelle und damit die wichtigsten Aufgaben von FuE liegen darin, diese Zelle so zu modifizieren, daß sie über größere Zeiträume stabil bleibt (Elektrolyt, Farbstoff, Verklebung). In den nächsten Jahren soll untersucht werden, ob die Produktionskosten und die Langzeitstabilität wirklich so sind, wie erste Anzeichen aus Laboruntersuchungen versprechen. Auch sind die großflächigen Wirkungsgrade noch zu verbessern bzw. Muster von Modulen zu entwickeln. Sollte sich erweisen, daß diese Wirkungsgrade erreicht und die oben aufgeführten Probleme gelöst werden können, so ist diese Zelle auf Grund ihrer einfachen und kostengünstigen Herstellung (beispielsweise infolge des möglichen Verzichts auf die sonst notwendige Reinraumtechnik und der geringeren Anforderungen an die Qualifikation der Mitarbeiter in der Fertigung) ein Favorit für die zukünftige Solarzellenproduktion. Da an dieser Zelle derzeit sehr intensiv entwickelt wird, werden rasche Fortschritte (oder aber ein Verschwinden) dieser Technologie erwartet.

Bei der farbstoffsensibilisierten Solarzelle gibt es von der Verfügbarkeit her zwei Elemente, die Probleme bei einer Großproduktion aufwerfen könnten, nämlich das Jod und das Ru. Ru liegt mit seinem Wert in der Größenordnung des Silbers. Allerdings wird von diesem Stoff nur sehr wenig für eine Solarzelle benötigt, so daß dieser Punkt wohl keine Rolle spielt. Ti und die anderen Materialien wie z.B. Glas sind in ausreichender Menge vorhanden.

2.4 Potential und Zeithorizont für die industrielle Fertigung

Eine Aufschlüsselung der gegenwärtigen Produktionszahlen nach Technologien zeigt die nach wie vor überragende Bedeutung der kristallinen Silizium-(c-Si)-Solarzelle (einkristallin und multikristallin). Nur in Japan dominiert für "consumer product"-Anwendungen noch immer die amorphe Silizium-Solarzelle, obwohl auch dort der Anteil der c-Si-Solarzellen gewachsen ist. Andere Technologien wie CdTe-, Folien-Silizium- und Konzentrator-Module haben nur Pilotproduktionsgröße erreicht. Eine vergleichende Bewertung verschiedener Solarzellenmaterialien und -technologien fällt folglich schwer, weil sie einen sehr verschiedenen Reifegrad haben: c-Si und a-Si-Zellen sind schon seit Jahren in der Produktion, CdTe wird in einer Pilotlinie gefertigt, CIS, kristalline Si-Dünnschicht-

zellen und farbstoffsensibilisierte Zellen befinden sich noch im Laborstadium, wobei CIS näher vor der Produktion steht.

Daß die Situation der Photovoltaik in FuE und in der Industrieproduktion so vielgestaltig und z.T. unübersichtlich ist, hängt mit ihrer speziellen Situation zusammen:

- Aus der Vielfalt der existierenden Materialien und Technologien konnte noch keine unter der Bedingung echter Massenproduktion (die bei etwa 30 MWp/Jahr gesehen wird) ihre Wirtschaftlichkeit gegenüber anderen Technologien erweisen.
- Neue und vielversprechende Technologien bzw. Materialien bleiben aus Finanzmangel unverhältnismäßig lange im Laborstadium, wo über ihr wirtschaftliches Potential natürlich kaum realistische Prognosen erstellt werden können. Sie bleiben damit zu lange "Hoffnungsträger" der Photovoltaik.

Diese Situation wird sich erst dann ändern, wenn das Produktionsvolumen der PV-Industrie und ihre Ertragslage sich deutlich verbessert haben. Erst dann werden neue Technologien schnell in die Praxis umgesetzt werden können und nicht geeignete Technologien aus der Entwicklung "herausfallen".

Aussagen über die zukünftig wirtschaftlich relevanten Materialien und Technologien für PV-Anlagen müssen derzeit eher spekulativ sein. Es ist aus heutiger Sicht sehr schwer abzuschätzen, ob und in welchem Umfang in nächster Zukunft, also etwa bis zum Jahre 2005, der Anteil an Modulen aus amorphem Silizium (a-Si) und anderen Dünnschicht-Solarzellen zunehmen wird. Einerseits gab es mehrere Ankündigungen über die Errichtung großer Fertigungskapazitäten für a-Si in den USA. Zusätzlich bereiten derzeit eine Verknappung und Verteuerung des Grundstoffes Silizium für die Photovoltaik der c-Si-Produktion einige Schwierigkeiten, die, wenn sie länger anhalten sollten, den Dünnschichttechnologien Auftrieb geben dürften. Andererseits scheint es bisher noch nicht gelungen zu sein, mit einer anderen Technologie deutliche Kostenvorteile gegenüber der "konventionellen" c-Si-Produktionstechnologie zu erzielen. Zudem wird in Zukunft zunächst hauptsächlich die kristalline Si-Technologie die Kostenreduktionspotentiale, die in einer vergrößerten Produktion liegen, ausnützen können. Aus diesen Überlegungen heraus erscheint die Prognose realistisch, daß die **kristalline Silizium-Solarzelle für die nächste Dekade die wichtigste PV-Technologie bleiben** wird. Sie wird innerhalb dieser Zeitspanne vermutlich größer (150 bis 200 cm²) und dünner (<200 µm) werden und einen höheren Wirkungsgrad (16 bis 19 %) erreichen. Danach - wenn sich der PV-Markt gegenüber heute vervielfacht hat - könnten Dünnschicht-Solarzellen die Marktführerschaft

übernehmen, da sie die Vorteile der großflächigen Abscheidung mit geringerem Materialverbrauch vereinigen. Es gibt allerdings auch Studien, die eine längerwährende Dominanz des c-Si prognostizieren, da sie das Kostenreduktionspotential für c-Si höher einschätzen.

Die Frage, welche der heute erforschten Dünnschichttechnologien (a-Si, tfc-Si, CdTe, CIS oder Graetzel-Zelle) das Stadium der Massenproduktion erreichen wird, ist allerdings aus der heutigen Perspektive noch nicht eindeutig zu klären. Vorliegende vergleichende Studien ergaben bislang fast keinen Unterschied zwischen den Technologien. Mit anderen Worten: Der technologische Reifegrad wie auch die Basis unseres Wissens über die zukünftige Entwicklung der einzelnen Technologien sind zu gering, als daß man **einer** Zelle die größten Zukunftschancen geben kann. Es kann aber mit ziemlicher Sicherheit davon ausgegangen werden, daß außer den hier beschriebenen Materialien in absehbarer Zeit keine neuen Solarzellenmaterialien das Stadium der Produktionsreife erlangen werden.

3. FuE-Bedarf auf dem Gebiet der Produktionstechnologie

Gegenwärtig werden nur kristalline (c-Si) und amorphe (a-Si) Siliziumzellen in größerem Umfang produziert werden, darum können hier nur diese beiden Zelltypen unter dem Gesichtspunkt der Produktionstechnologie behandelt werden.

Die wichtigste Aufgabe der Produktionstechnologie besteht darin, Zellen bzw. Module kostengünstiger herzustellen und ihre Wirkungsgrade weiter zu verbessern.

Für c-Si bedeutet das vor allem, daß

- die Materialausbeute an c-Silizium erhöht wird durch Prozessierung dünnerer Wafer und Erhöhung der Prozeßausbeute (yield),
- Prozeßschritte in die Fertigung überführt werden, die höhere Wirkungsgrade (16-20%) ermöglichen,
- die Fertigungstechnik stärker automatisiert wird.

Es ist zu erwarten, daß diese drei Aufgaben gemeinsam gelöst werden können, wenn mit wachsendem PV-Markt die Produktionskapazitäten ausgeweitet und vor allem die Gewinnmargen der Photovoltaikindustrie verbessert werden.

An dieser Stelle muß darauf hingewiesen werden, daß die Produktionstechnologie der kristallinen Si-Solarzelle bisher in großem Umfang von den hochentwickelten Technologien der Mikroelektronik profitiert hat. In Zukunft wird die PV-Produktionstechnologie aber eigene Wege gehen müssen, da der Trend der Mikroelektronik zu immer größeren Wafern und immer feineren und komplexeren Strukturen andere (wesentlich aufwendigere) Prozesse erfordert, als sie in der Solarzellenherstellung benötigt werden. Das wird bei einzelnen Solarzellenherstellungsschritten eigene Entwicklungen erfordern, damit Solarzellen kostengünstig und mit großem Produktionsvolumen hergestellt werden können. Eine mögliche Entwicklung ist ein von den Entwicklern als Rapid Thermal Processing (RTP) bezeichnetes Herstellungsverfahren, das eine Halbierung der Herstellungszeiten - bei einer Kontaktierung der Solarzelle durch Drucktechniken sogar eine Reduktion um 90 % - ermöglichen soll.

Für die a-Si-Solarzellenproduktion besteht die vordringlichste Aufgabe in der Entwicklung einer Prozeßlinie, die es gestattet, stabilisiert 10 % Modulwirkungsgrad auf großer Fläche zu erzielen. Hier sind insbesondere innovative großflächige Abscheide- und Beschichtungsverfahren nötig, mit denen sehr homogene hochreine Schichtsysteme mit großer Geschwindigkeit aufgebracht werden können. Wenn das kostengünstig gelingt, hat diese Technologie die Chance, gegenüber dem c-Silizium wieder Marktanteile zurückzugewinnen. Die diesbezüglichen Entwicklungsmöglichkeiten sind innerhalb von Wissenschaft und PV-Industrie allerdings umstritten.

4. FuE-Bedarf auf dem Gebiet der Materialherstellung

Die Verhüttungs- und Herstellungstechniken der einzelnen Materialien zeigen infolge jahrelanger Forschung und Weiterentwicklung bereits ein hohes Maß an Perfektion. Es ist aber zu betonen, daß bei der derzeitigen kleinen Solarzellenproduktion in allen Fällen die PV-Hersteller nicht die Hauptabnehmer der Ausgangsmaterialien sind. Diese Situation wird sich grundlegend ändern, wenn die PV-Produktion um Größenordnungen gegenüber der heutigen Produktion anwachsen wird. Dann müßten neue und effektive Verfahren zur Bereitstellung der hochreinen Ausgangsmaterialien entwickelt werden. Es ist jedoch heute nicht möglich vorherzusehen, welche der PV-Technologien den stärksten Zuwachs und damit den größten Materialbedarf haben wird.

Der seit einigen Jahren anhaltende Boom in der Mikroelektronik hat zu einer weltweiten Verknappung von "electronic grade"-Silizium geführt, von der auch die Si-Solarzellenherstellung als Abnehmer des Überschusses und Abfalles betroffen ist. Hier werden sicher die Marktkräfte in Kürze für Abhilfe sorgen und genügend Material für die Elektronikindustrie zur Verfügung stellen. Für die Si-Photovoltaik kann das aber bedeuten, daß Si in Zukunft teurer wird, da die Mikroelektronik in zunehmendem Maße ihre "Abfälle" ("heads and tails") selbst verwertet und dies dann nicht für die Solarzellenproduktion zur Verfügung steht. Aus diesem Grunde wird an verschiedenen Stellen geprüft, ob es sich lohnt, ein speziell für die Photovoltaik geeignetes Rohsilizium ("solar grade"-Silizium) herzustellen. Hier besteht noch großer Forschungsbedarf, da an die Reinheit des Materials große Anforderungen gestellt werden und andererseits nach kostengünstigen Produktionsverfahren gesucht werden muß.

Forschungsbedarf auf der Materialseite der PV besteht weiterhin in der Wiederverwertung aller für die Produktion eingesetzten Hilfsstoffe und PV-Materialien. Dies gilt jedoch nicht nur für die Photovoltaik allein, sondern für alle Bereiche der Industrieproduktion. Infolgedessen müssen die Recyclingverfahren allgemein, und nicht nur für die PV-Industrie entwickelt bzw. weiterentwickelt werden.

5. Marktsituation bei Photovoltaik-Anlagen

Verglichen mit anderen Techniken der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen ist die Photovoltaik noch eine junge Technologie mit einem geringen Anteil am Elektrizitätsmarkt. Insgesamt wird die weltweite Photovoltaik-Produktion zwischen 1976 und 1998 vom TAB auf Zellen mit einer Gesamtleistung von etwa 950 MW_p geschätzt. Allerdings sind die Marktdaten im Bereich der Photovoltaik generell mit nicht unbeträchtlichen Ungenauigkeiten behaftet. Der Photovoltaikmarkt war in den vergangenen zehn Jahren gekennzeichnet durch ein stetiges und ziemlich starkes Wachstum aus niedrigem Niveau, die jährliche Wachstumsrate der Produktion liegt bei durchschnittlich etwa 15 %. Belastbare Daten zur weltweiten Stromerzeugung aus Photovoltaik sind uns nicht bekannt, was vor allem durch die ungenügende statistische Erfassung dezentraler Anlagen bedingt ist.

Im Jahr 1998 wurden weltweit etwa 150 MW_p an PV-Modulen gefertigt. Davon entfallen 20 % auf Europa, 35 % auf die USA und 32 % auf Japan. Nach dem

Exodus der Solarproduktion Mitte der neunziger Jahre spielt die Bundesrepublik derzeit keine nennenswerte Rolle, für die nächsten Jahre ist jedoch ein beträchtlicher Zubau an Fertigungskapazitäten geplant. Der Zuwachs der weltweiten PV-Modulproduktion lag in den letzten Jahren über dem Durchschnitt der Vorjahre. Dieser Anstieg ist vor allem bedingt durch ein massives Nachfrage-Wachstum in Japan und Deutschland, wobei insbesondere netzgekoppelte Kleinanlagen aufgebaut sowie einige spektakuläre Großprojekte umgesetzt worden sind.

Das Überschreiten der 100-MW-Marke bei der PV-Jahresproduktion - das 1997 erfolgte - bedeutet allerdings keine signifikante Kostenreduktion für die Photovoltaik. Erst bei einem bedeutend größeren Produktionsvolumen (es wird auf weltweit 500 bis 1000 MW_p pro Jahr geschätzt) können die Kostenvorteile einer hochautomatisierten und vollausgelasteten Fertigungstechnik (hierfür dürften Produktionsstätten mit mindestens 30 MW Jahresproduktion erforderlich sein) zum Zuge kommen. Ein solcher Produktionsumfang dürfte aber erst im Laufe des kommenden Jahrzehnts erreicht werden, wenn die Entwicklung der PV-Modulproduktion der letzten zehn Jahre unter der Annahme von 15 % Wachstum pro Jahr auch im kommenden Jahrzehnt anhält.

Ein Grund für die **langsame Entwicklung des Photovoltaikmarktes** liegt in den hohen Kosten dieser Technik. Diese begrenzen die Nachfrage auf einige Nischenmärkte, beispielsweise die Versorgung netzferner Verbraucher oder mobile Systeme. Eine Reduktion der Kosten auf ein mit konventionellen Techniken vergleichbares Niveau ist derzeit nicht abzusehen. Auch die Preise für die fossilen Energien blieben weit unter den Anfang der 80er Jahre erwarteten Werten, so daß die Stromerzeugungskosten nicht zunehmen, sondern angesichts des Preisverfalls von Mineralöl und Erdgas seit 1986 und weiterer erheblicher technischer Effizienzverbesserungen der fossilen Kraftwerke seit einigen Jahren real rückläufig sind. Drastische Steigerungen der Energieträgerpreise werden von den Prognoseinstituten in den nächsten Jahren auch nicht erwartet.

Das niedrige Niveau der Produktion hat für den PV-Markt wachstumshemmende Konsequenzen, da sich Innovation und Automatisierung der Produktion, d.h. kostengünstige Fertigungsverfahren von Modulen und Systemen, langsamer als erwartet entwickeln, was zu einer unbefriedigenden Ertragslage, unzureichenden Kapitalrückflüssen und daher zu geringen Neuinvestitionen führte. Trotz dieser schwierigen Marktsituation dringt die Photovoltaik in neue Marktsegmente vor, und zwar bevorzugt dort, wo die Bereitstellung von Strom teuer ist. Demnach sind die größeren Anwendungen in den Bereichen der netzunabhängigen Stromversorgung von Kommunikationseinrichtungen, einzeln stehen-

der Häuser und Ansiedlungen, von Verkehrssignalen und Wasserpumpen, Freizeitanwendungen und Korrosionsschutz.

Die Photovoltaik dürfte aus heutiger Sicht - außer bei einigen Nischenanwendungen - in den meisten Industrieländern zumindest für die nächsten 10-15 Jahre wirtschaftlich nicht rentabel betrieben werden können und weiterhin von staatlicher Unterstützung abhängig sein. Die wirtschaftliche Zukunft der von Geographie und Infrastruktur her für den Einsatz der Photovoltaik prädestinierten Entwicklungsländer ist nur schwer vorherzusagen. Die Marktentwicklung in den nächsten Jahren wird wohl wesentlich durch die Gestaltung und weitere Fortsetzung der großen Förderprogramme in den Industrienationen - beispielsweise das amerikanische Ein-Millionen-PV-Dächer-Programm, das japanische Entwicklungsprogramm "New Sunshine Project" und das 70.000-Dächer-Programm (davon 30.000 Anlagen mit 90 MW_p Gesamtleistung bis zum Jahr 2000) sowie das europäische Vorhaben eines Eine-Million-Dächer-Photovoltaik-Programmes - getragen werden.

Die **Photovoltaik-Produktion in Deutschland** war in den letzten Jahren starken Schwankungen unterworfen. Eine wichtige Rolle spielte dabei die Tatsache, daß die nationalen Märkte in fast allen europäischen Ländern von einheimischen Unternehmen dominiert werden, wobei - neben staatlichen Initiativen zur Förderung einer nationalen PV-Produktion - vor allem die hohen Transportkosten der Module eine Rolle spielen. Mitte der neunziger Jahre konzentrierte sich die PV-Produktion in Deutschland auf zwei Unternehmen: die Angewandte Solarenergie ASE GmbH (im Besitz der RWE-Tochter Nukem und der zur DaimlerChrysler AG gehörenden DASA) und die Siemens Solar GmbH, eine Tochter der VIAG-eigenen Bayernwerk AG und der Siemens AG. Sowohl Siemens Solar als auch ASE sind weltweit agierende Akteure, die auch bedeutende Produktionen im Ausland besitzen. Ein einschneidendes Ereignis war die Schließung der Modulfabrik Wedel der ASE und die Verlagerung der Produktion an den Standort der ASE Americas in Billerica (USA) im Jahre 1995. Da auch die Firma Siemens Solar (SSG) zu diesem Zeitpunkt in Deutschland nur eine Entwicklungs- und Pilotlinie in München betrieb, bedeuteten diese Veränderungen einen drastischen Rückgang der industriellen PV-Aktivitäten in Deutschland. Gleichzeitig kam der erwähnte starke Zuwachs der Produktion von 1994 auf 1995 in den USA den amerikanischen Töchtern beider Firmen zugute. Ab 1997 kann jedoch eine Trendwende verzeichnet werden. Zur Zeit gibt es zahlreiche Versuche, am Standort Deutschland neue Solarzellenfertigungen und Modulfertigungen aufzubauen:

- In Gelsenkirchen wird die Deutsche Shell AG gemeinsam mit dem Kölner Unternehmen Pilkington Solar International GmbH, das am gleichen Ort schon photovoltaische Fassadenelemente produziert, polykristalline Zellen im Umfang von 25 Megawatt jährlich produzieren.
- Die Angewandte Solarenergie-ASE GmbH wird eine Solarzellenproduktion im bayrischen Alzenau, dem erst kurz zuvor zugunsten der Produktion bei ASE Americas aufgegebenen Standort, aufbauen. Hier soll in einem ersten Schritt die Fertigung für Standardsolarzellen mit einer Gesamtproduktion von 13 Megawatt jährlich entstehen, ein Ausbau auf 25 MW ist möglich.

Zudem soll bei ASE Americas in Billerica die Produktion von EFG-Wafern, mit einem speziellen Verfahren (Edge-defined Film-fed Growth) als achteckige Röhre aus der Siliziumschmelze gezogenen Siliziumscheiben, auf elf Megawatt jährlich gesteigert werden. Die EFG-Zellen dienen als Grundmaterial für die industrielle Fertigung von Solarzellen am Standort Alzenau. Daher muß die USA-Produktion zeitparallel zum Hochfahren der neuen Anlage in Alzenau in Betrieb genommen werden.

- Weitere Fertigungstätten realisieren bzw. planen unter anderem die Würth-Gruppe (die bereits mit einer Elektronik-Tochter Photovoltaik-Module vertreibt), die Firma Antec Solar GmbH - ein Joint Venture der Firmen Antec Angewandte Neue Technologien GmbH und der Balcke-Dürr Technologie GmbH - in Thüringen, die Solarfabrik Freiburg GmbH, die Ersol Solarstrom GmbH in Erfurt, die Berliner Solon AG, die Firma RAP Mikrosysteme in Wernigerode, die Sunways GmbH in Konstanz sowie die Solarnova Produktions- und Vertriebsgesellschaft mbH in Wedel bei Hamburg.

Ob den kleineren mittelständischen Unternehmungen allerdings längerfristig Erfolg beschieden sein wird, bleibt abzuwarten. Gegenwärtig überwiegt die Skepsis, da auf einem engen Markt bereits mehrere große Unternehmen mit langjähriger Erfahrung präsent sind. Im Erfolgsfall könnte aber die gesamte "PV-Szene" verändert werden, weil die PV-Modulproduktion von den Großunternehmen und Energieversorgern auf mittelständische Unternehmen überginge, was eine neue Dynamik in diesen Wirtschaftszweig bringen könnte.

Keine der bundesdeutschen Produktionsstätten ist bisher in der Lage, ein Verfahren der Massenproduktion anzuwenden. Eine solche Massenproduktion dürfte bei einem Umfang von jährlich 30 MW erreicht sein. Die gegenwärtig praktizierten Produktionsverfahren sind von erheblichem Aufwand geprägt (Reinraumtechnik). Ob diese allerdings für eine automatisierte Produktion überhaupt geeignet sind, ist umstritten. Industrievertreter sehen gute Automatisierungs-

möglichkeiten eher bei den Dünnschichttechniken als bei den gegenwärtig praktizierten Verfahren.

6. Resümee

Grundsätzlich existiert eine Vielzahl von Materialien, die aus physikalisch-technischer Sicht für eine Anwendung in Solarzellen in Frage käme. Nur ein Teil dieser Materialien ist bislang intensiv untersucht worden. Von den Materialien, die derzeit in der Forschung bearbeitet werden, wurden für die vorliegende Untersuchung nur diejenigen ausgewählt und diskutiert, die schon in oder kurz vor einer Pilotfertigung stehen. Es ist derzeit nicht zu erwarten, daß andere Materialien als die hier angeführten in absehbarer Zeit Pilotfertigungsreife erlangen werden.

Die Schlußfolgerungen der Analyse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die gegenwärtig hohen Kosten der Photovoltaik begrenzen ihre Anwendung auf einige Nischenmärkte. Für eine breitere Anwendung sind - nicht zuletzt aufgrund der niedrigen Preise für Strom aus konventionellen Kraftwerken - weitere Kostenreduktionen notwendig.
- In der Kostenbilanz von Photovoltaik-Anlagen ist die Solarzelle nur eine Komponente. Weitere Reduktionspotentiale, die bislang nicht ausgeschöpft sind, liegen in der Modulfertigung, in der Systemtechnik sowie in der Integration. Es ist aus heutiger Sicht nicht zu erwarten, daß allein zur Senkung der spezifischen Kosten der Zellen führende Innovationen den Kostennachteil der Photovoltaik in absehbarer Zeit wettmachen werden. Vielmehr sind auch Verbesserungen in den anderen Bereichen notwendig und ggf. sogar mit weniger Aufwand zu erreichen.
- Für die eigentliche Solarzelle sind neben dem PV-Material auch das Zell-Design, die eingesetzten Fertigungstechniken und ggf. das Substrat- bzw. Superstrat-Material von Bedeutung. Innovationen bei den Solarzellen sind also nicht nur durch die Einführung neuer bzw. Modifikation bekannter Materialsysteme zu erreichen. Auch durch neue Zellkonzepte, neue bzw. modifizierte Fertigungsverfahren oder durch Verwendung neuer "Hilfsmaterialien" lassen sich Wirkungsgradverbesserungen und/oder Kostenreduktionen erreichen.
- Derzeit und wohl auch für die nächsten 10 Jahre bleibt kristallines Silizium das wichtigste Material für die Solarzellenherstellung, da es viele Vorteile

aufweist und von dem hohen Technologiestand der Mikroelektronik profitiert. Daneben sind Dünnschicht-Technologien mit amorphem Si bereits auf dem Markt, ausgewählte neue CdTe-, CIS- und Si-basierte Dünnschicht-Techniken stehen kurz vor ihrer Einführung.

- Die kristalline Si-Solarzelle birgt noch erhebliche Verbesserungspotentiale sowohl im Hinblick auf die Effizienz als auch auf die Fertigungskosten. Durch neue Fertigungstechniken bei der Waferherstellung sollen die Materialverluste und die Fertigungszeiten reduziert werden, zudem sind auch in der Weiterverarbeitung zu Solarmodulen noch erhebliche Rationalisierungspotentiale nachgewiesen worden. Neue Zell-Designs, sogenannte high-efficiency-Zellen, versprechen Steigerungen bei den Wirkungsgraden. Inwieweit diese Zellen allerdings für die Serienproduktion geeignet sind und bei welchem Wirkungsgrad der Mehraufwand in der Fertigung in einer sinnvollen Relation zur höheren Energieausbeute steht, wird derzeit untersucht.
- Längerfristig könnten - wegen des großen Materialverbrauchs von kristallinem Silizium und wegen der aufwendigen Si-Wafertechnologie - Dünnschichttechnologien mit großflächiger Abscheidung die Solarzellentechnologien der Zukunft werden. Bis diese Dünnschichtzellen die c-Siliziumzellen in bezug auf Wirtschaftlichkeit übertreffen werden, ist aber noch ein erheblicher Entwicklungsaufwand notwendig.
- Die verschiedenen konkurrierenden Dünnschichtzellenkonzepte befinden sich in einem sehr unterschiedlichen Entwicklungsstadium. Derzeit ist es nicht möglich, **einer** Technologie für die Zukunft einen eindeutigen technisch-ökonomischen Vorteil gegenüber den anderen zuzusprechen. Neben technischen und ökonomischen Fragestellungen spielen zudem die Verfügbarkeit der Ressourcen sowie die Toxizität der eingesetzten Materialien - und damit deren Akzeptanz - in einem gegenwärtig eher "grünen" Markt eine wichtige Rolle bei Produktions- wie bei Kaufentscheidungen.
- Auf absehbare Zeit sollten Forschung und Entwicklung weiter "breitbandig" durchgeführt werden, um nicht eine wichtige Option zu verlieren. Es besteht noch auf zahlreichen Gebieten ein erheblicher FuE-Bedarf:
 - Die "etablierten" Technologien der kristallinen Silizium-Solarzellen müssen so weiterentwickelt werden, daß die Solarzellen einen höheren Wirkungsgrad aufweisen, weniger Material benötigen und kostengünstiger gefertigt werden können.
 - Die innovativen Dünnschichtzelltechnologien müssen diese drei Anforderungen natürlich auch erfüllen. Zunächst aber muß für alle (bis auf das

amorphe Silizium) der Nachweis erbracht werden, daß sie großflächig und homogen hergestellt werden können.

Bei der Vielfalt an zu entwickelnden Technologien und Materialien kann es nicht ausbleiben, daß verschiedene Länder etwas verschiedene FuE-Strategien verfolgt haben. So haben in den 80er Jahren die führenden Länder, ganz grob gesagt, die folgenden Schwerpunkte gesetzt:

- In Japan wurde vor allem das amorphe Silizium entwickelt und vermarktet. Auf dem Gebiet der photovoltaischen Kleingeräteversorgung (Uhren, Taschenrechner) ist Japan weltweit Marktführer.
- In den USA wurden ebenfalls das a-Si und daneben die anderen Dünnschichttechnologien bevorzugt entwickelt.
- In Deutschland/Europa lag der FuE-Schwerpunkt auf der kristallinen Si-Technologie.

In den letzten Jahren hat sich das Bild etwas geändert: In Deutschland wurden intensiv die a-Si- und andere Dünnschicht-Zellen (CIS) gefördert, in Japan wurde ein sehr starkes Förderprogramm auf dem Gebiet der kristallinen Si-Zellen aufgelegt. Die alten Schwerpunkte sind zwar noch erkennbar, aber insgesamt sind die jeweiligen Länderprogramme etwas vielseitiger und im Vergleich untereinander ähnlicher geworden.

Prinzipiell neue Solarzellenkonzepte und -materialien können zwar generell für die Zukunft nicht ausgeschlossen werden, sind aber gegenwärtig nicht in Sicht. Viele spektakulär angekündigte Neuerungen der letzten Jahre sind aufgegeben worden, noch ehe sie das Laborstadium verlassen haben.

Das konstante Marktwachstum im PV-Bereich hat bislang nicht dazu geführt, daß die PV-Branche ausreichende und stabile Erträge aufweisen kann. Dies ist vor allem dadurch begründet, daß relativ hohe Aufwendungen im Bereich von Forschung und Entwicklung wie auch in der Fertigung einem kleinen Markt gegenüberstehen. Aufgrund des kleinen Marktes sowie relativ kleiner Produktionsanlagen konnten noch keine ausreichenden Skalen- und Lernkurveneffekte (Fixkostendegression etc.) realisiert werden, die die bestehenden Systempreise deutlich verringern könnten. Die Schätzungen bezüglich der zukünftigen Marktentwicklung im Photovoltaikbereich gehen weit auseinander. Allgemein wird aber eine Einschätzung von 200-500 MW bis zum Jahr 2000 als realistisch erachtet.

Die Anteile verschiedener PV-Anwendungen am Gesamtmarkt werden sich in Zukunft vermutlich deutlich verschieben. Dabei wird der Bereich der netzgekoppelten Anlagen vermutlich am stärksten wachsen. Der anteilig größte Markt wird

jedoch weiterhin im Bereich der netzfernen Inselanlagen, vorwiegend in südlichen Ländern mit schlecht ausgebauter Infrastruktur, gesehen. Hier ist die Sonneneinstrahlung stärker und der Solarstrom muß sich nicht mit billigem, von konventionellen Kraftwerken erzeugten Netzstrom messen. Allerdings sieht sich die PV-Industrie einem massiven Finanzierungsproblem gegenübergestellt, da die meisten in Frage kommenden Länder äußerst finanzschwach sind. Auch hier dürfte mittelfristig eine Unterstützung von staatlicher Seite unerlässlich sein.

III. Hochtemperaturwerkstoffe für Gasturbinen

Die Bedeutung der Gasturbinen-Technologie für die Energieversorgung nahm in den letzten Jahren stetig zu. Auch in Zukunft ist eher von einem sich verstärkenden Trend hin zum Einsatz von Gasturbinen, etwa im Zuge der Liberalisierung der Elektrizitätsmärkte, auszugehen. Technische Weiterentwicklungen an stationär eingesetzten Gasturbinen zielen hierbei hauptsächlich auf verbesserte Wirkungsgrade ab. Insbesondere Turbinenschaufeln müssen dabei immer höheren Heißgastemperaturen zuverlässig standhalten. Hier ist ein Einsatz entsprechender Materialien (Hochtemperaturwerkstoffe, Oberflächenbeschichtungen) unumgänglich.

Unter der Annahme, daß auch künftig - zumindest kurz- und mittelfristig - fossil befeuerte Kraftwerke den größten Anteil bei der Stromerzeugung ausmachen werden, ist mit Blick auf Umweltbelastung und Ressourcenverbrauch das Interesse nachvollziehbar, die **Wirkungsgrade konventioneller Technologien zur Stromerzeugung zu erhöhen**. Eine absehbare Zunahme des Stromverbrauches und des Ausbaus von Kraftwerkskapazitäten wird wesentlich durch Faktoren wie Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung, Entwicklung der Energiepreise und Verbraucherverhalten bestimmt. Dagegen wird die **zukünftige Struktur der Stromerzeugung** durch globale Trends wie Liberalisierung, Globalisierung und Privatisierung signifikant beeinflusst. Vor diesem Hintergrund spielen in der zukünftigen Kraftwerkstechnik Zielgrößen, wie niedrige Investitionen, kurze Bauzeiten, geringe Emissionen, hohe Verfügbarkeit und hohe Wirkungsgrade eine zentrale Rolle. Eine kostengünstige Stromerzeugung steht im Mittelpunkt des energiewirtschaftlichen Interesses. Dies ist einer der Gründe, weshalb der Anteil an Gasturbinen- und an kombinierten Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerken (GuD-Anlagen) am Kraftwerksmix deutlich zugenommen hat.

Die Gasturbinen-Technologie weist neben deutlich geringeren Investitionen im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken ein variabel einsetzbares Brennstoffband auf und ist aus fertigungstechnischer Sicht flexibler in verschiedenen Leistungsklassen produzierbar, was sich weiter verkürzenden Planungshorizonten in der Energiewirtschaft, u.a. im Zuge der Liberalisierung des Elektrizitätsbinnenmarktes, entgegenkommt.

1. Der Gasturbinen-Prozeß

Im Gasturbinen-Prozeß wird Wärmeenergie in mechanische Energie umgewandelt. Die Wärmeenergie wird durch Verbrennen eines Energieträgers (Erdgas, Öl, etc.) bereitgestellt. Gasturbinen sind relativ breit sowohl im stationären (z.B. Industriegasturbinen) als auch im mobilen Bereich (z.B. Flugzeugantriebe) einsetzbar. Vom Flugzeugtriebwerksbau gingen wesentliche Entwicklungsimpulse für die Materialforschung aus. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf stationäre Gasturbinen für den Einsatz in der Elektrizitäts- und Wärmeversorgung.

Gasturbinen werden stationär einzeln oder kombiniert, etwa mit einem Abhitzedampferzeuger, betrieben. Eingesetzt werden sie inzwischen nicht mehr nur zur Deckung des Energiebedarfes zu Spitzenlastzeiten, zur Reservehaltung und Notstromversorgung, sondern auch zur Energieversorgung im Mittel- und Grundlastbereich. Kombianlagen weisen einen höheren Wirkungsgrad auf als der einfache Gasturbinenprozeß, wobei verschiedene Kraftwerkskonzepte realisiert wurden. Zu diesen gehören die Kombinationen von Gas- und Dampfturbinen (GuD), die Verbundfeuerung, die Vorschaltung einer Kohlevergasung (IGCC) oder auch die Fahrweise in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK).

Heute kommerziell verfügbare Gasturbinen erreichen im Solobetrieb elektrische **Wirkungsgrade** von ca. 38 %. Im Kombibetrieb in einem Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk (GuD-Anlage) werden 58 bzw. 54 % (elektrisch) erreicht. Zum Vergleich: bei konventionellen Kondensationskraftwerken (auf Steinkohlenbasis) werden durch technische Weiterentwicklungen elektrische Wirkungsgrade bis zu 50 % erwartet. Bei Gasturbinen ist hinsichtlich des elektrischen Wirkungsgrades eine Überschreitung der 40 %-Marke und bei kombinierten Gas- und Dampfturbinen-Anlagen der 60 %-Marke realisierbar.

2. Möglichkeiten der Wirkungsgraderhöhung

Aus thermodynamischen Gründen ist der Gasturbinen-Prozeß wirkungsgradseitig um so günstiger, je höher die Temperatur der Heißgase am Turbineneintritt ist. Da aus verbrennungstechnischer Sicht das Wirkungsgradpotential der Gasturbinen-Technologie weitgehend ausgeschöpft ist, ist ein weiterer **Anstieg des Wirkungsgrades** wesentlich **an eine Erhöhung der Turbineneintrittstemperatur der Heißgase gekoppelt**. Bei Temperaturangaben für Heißgase in Gastur-

binen wird dabei zwischen der real vorhandenen Temperatur der Gase am Turbineneintritt und der sog. **ISO-Turbineneintrittstemperatur** unterschieden. Letztere liegt typischerweise ca. 200°C unterhalb der tatsächlichen Verbrennungstemperatur. Die Differenz zwischen beiden Temperaturangaben berücksichtigt die mit der Bauteilkühlung verbundene Abkühlung der Rauchgase. Die ISO-Turbineneintrittstemperatur stellt somit die **für den Wirkungsgrad** der Gasturbine bzw. des Gas- und Dampfturbinen-Prozesses **entscheidende thermodynamische Größe** dar.

Höhere Turbineneintrittstemperaturen der Heißgase sind prinzipiell auch bei aus konventionellen Materialien bestehenden, heißgasführenden Bauteilen (Turbinenschaufeln, Brennkammern) realisierbar, indem diese stärker gekühlt werden. Zum Kühlen müßte dann etwa 10-15 % der eingangs verdichteten Luft eingesetzt werden, die dann wiederum nicht dem eigentlichen Verbrennungsvorgang zur Verfügung stünde. Weiterhin wird Luft zur Optimierung des Verbrennungsvorganges benötigt, da eine Erhöhung der Verbrennungstemperatur mit einer unerwünscht verstärkten Bildung von Stickoxiden einhergeht, zu deren Vermeidung oft überstöchiometrisch (z.B. mit einem Luftüberschuß) gefahren wird. In summa würde oberhalb einer bestimmten ISO-Turbineneintrittstemperatur (ca. 1.150°C) dann mehr Luft zur Kühlung benötigt werden, als vom Verdichter für Kühlung und Verbrennung zusammen zur Verfügung gestellt wird. Ein hoher Kühlaufwand und eine nichtoptimale Verbrennung mangels Sauerstoff sind aus technischer Sicht nicht sinnvoll, auch wenn bisher verwendete Materialien belassen werden könnten. Eine signifikante **Steigerung der Turbineneintrittstemperatur der Heißgase** ist somit nur durch eine **verminderte Kühlung** heißgasführender Bauteile möglich. Das bedeutet wiederum, daß die betroffenen Bauteile in der Gasturbine höheren Temperaturen standhalten müssen. Hier kommt der Einsatz neuer Materialien zum Tragen.

3. Anforderungen an Hochtemperaturwerkstoffe im Gasturbinenbau

Heißgasführende Bauteile in modernen Gasturbinen sind hohen thermischen und mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt. Die Temperaturen in der **Brennkammer** liegen etwa bei 1.500 °C, wobei vorübergehend auch höhere Werte auftreten können. Kurzfristig auftretende Temperaturschwankungen - bedingt durch Störungen, plötzliche Lastabschaltungen, Zünden der Flamme oder auch

reguläre An- und Abfahrvorgänge - führen zu **thermischen Spannungen**, die mit zunehmendem Wärmeübergangskoeffizienten häufiger auftreten. Die thermischen und mechanischen Anforderungen an die **Turbinenbeschaufelung** sind wesentlich höher, da Wärmeübergangskoeffizienten und wirkende Kräfte rund eine Zehnerpotenz höher sind als in der Brennkammer. Aus diesen Randbedingungen lassen sich Eigenschaftsprofile moderner Werkstoffe ableiten, die daraus gefertigte Bauteile bei gegebenem Temperaturprofil erfüllen müssen, um gängige Betriebsperioden ohne Auftreten von irreversiblen Schäden an der Materialstruktur zu "überstehen". Üblicherweise muß eine Gasturbine mindestens für 10.000 reguläre Starts und wenigstens einige hundert Schnellabschaltungen ausgelegt sein.

Hochtemperaturwerkstoffe gehören zu den Strukturwerkstoffen, da insbesondere mechanische Eigenschaften im Vordergrund des Interesses stehen. Zu den geforderten **Gebrauchseigenschaften** gehören u.a. hohe thermische und mechanische Belastbarkeit (Kriech- und Ermüdungsfestigkeit), hohe chemische Beständigkeit (Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit der Materialoberflächen auch bei aggressiven Reaktionsbedingungen), geringes spezifisches Gewicht und hohe Zähigkeit, um eine entsprechend lange Lebens- bzw. Betriebsdauer bei wirtschaftlichem Betrieb - die geforderte Lebensdauer von Gasturbinen liegt bei ca. 100.000 h - zu gewährleisten. Zu den **fertigungstechnischen Eigenschaften** moderner Werkstoffe gehören u.a. die Verarbeitbarkeit mit Hilfe etablierter Verfahren sowie - zur reproduzierbaren Herstellung (von Werkstoffen und Bauteilen) - das Vorhandensein entsprechender Prüfkriterien. Gerade hier liegen wesentliche Vorteile klassischer metallischer Werkstoffe, die von neuen Werkstoffen in wesentlichen Eigenschaften übertroffen werden müssen. Die folgenden Ausführungen gehen auf ausgewählte Hochtemperaturwerkstoffe sowie Oberflächenbeschichtungen ein, die insbesondere für die Auslegung heißgasführender Bauteile (Brennkammer, Turbinenschaufeln) von Interesse sind. Im Vordergrund der Betrachtungen steht das langfristige Ziel in der Gasturbinen-Entwicklung, möglichst ungekühlte Turbinenschaufeln bei Turbineneintrittstemperaturen der Heißgase von ca. 1.300 bis 1.500°C einzusetzen.

3.1 Metallische Werkstoffe

Metallische Werkstoffe gehören zu den "Klassikern" im Gasturbinenbau, sie zeichnen sich u.a. durch hohe Festigkeit bei gleichzeitig guter plastischer Verformbarkeit aus. In der Brennkammer sowie an den Turbinenschaufeln sind - mit

zunehmender Temperatur - zunächst konventionelle Legierungen, dann sog. **Superlegierungen** und schließlich sog. **intermetallische Phasen** einsetzbar. Metallische Werkstoffe werden dort, wo es auf mechanische Eigenschaften ankommt, vorwiegend in legierter Form eingesetzt. **Legierungen** sind aus metallischen (oder metallischen und nichtmetallischen) Komponenten aufgebaute **Mehrstoffsysteme**.

Das Kristallgefüge, welches die Legierungsbestandteile bilden, besteht aus vielen aneinandergrenzenden Kristalliten. Metalle können durch "Baufehler" in dieser Mikrostruktur gehärtet werden. Die wichtigste Methode zur Härtung von Legierungen ist die **Ausscheidungshärtung**. Das Prinzip der Ausscheidungshärtung beruht darauf, daß in einem Grundgitter in sehr fein verteilter Form eine zweite Phase ausgeschieden wird; diese feinverteilten Partikel (Teilchen, Atome etc.) wirken als Hindernisse bei der Bewegung des vorher "ideal" aufgebauten Kristallgitters.

3.1.1 Superlegierungen

Eine wesentliche Gruppe der aushärtbaren Legierungen besteht in der Hauptmatrix aus Nickel, Chrom und Kobalt, in die **Zusätze** weiterer Legierungselemente (z.B. Aluminium, Silizium, Titan, Molybdän, Niob, Wolfram) eingebettet sind. Diese Legierungen werden - bedingt durch ihre vergleichsweise hohe Hitzebeständigkeit - auch als **Superlegierungen** bezeichnet. Durch Zusätze können deren Eigenschaften weiter verbessert werden. Beispielsweise erhöht ein bestimmter Gehalt an Chrom (ca. 10-20 %) den Oxidationswiderstand der Legierung bei hohen Temperaturen. Superlegierungen auf der Basis von Nickel werden bereits standardmäßig als Gußlegierungen in Flugturbinen eingesetzt.

Heute eingesetzte, konventionell gegossene Superlegierungen weisen zwar eine relativ hohe Hitzebeständigkeit auf, sind jedoch nur bei Temperaturen unterhalb 1.000°C zuverlässig einsetzbar. Reale Heißgastemperaturen am Turbinenaustritt reichen heute bereits an 1.400°C heran, so daß ein Einsatz konventioneller Superlegierungen nur unter Kühlung erfolgen kann.

Wesentliche Weiterentwicklungen von Superlegierungen - von denen kurzfristige Entwicklungserfolge erwartet werden - zielen auf eine Erhöhung der Einsatztemperaturen der Materialien bei gleichzeitig ausreichender Festigkeit und angemessener Lebensdauer ab. Die wichtigsten Aktivitäten konzentrieren sich auf verfahrenstechnische Verbesserungen und die Entwicklung neuer Legierungen.

Verfahrenstechnische Verbesserungen beim klassischen Herstellungsprozeß von Legierungen (Zusammenschmelzen einzelner Komponenten, Sintern verschiedener Metallpulver etc.) bzw. der eigentlichen Bauteilherstellung (z.B. Turbinenschaufel durch Formguß) setzen an zwei Stellen an: Ausschließen unkontrollierbarer Nebenreaktionen der Legierungsbestandteile (Verunreinigungsfreie Schmelzverfahren) und Erzielen einer möglichst geordneten und damit sicherheitstechnisch kalkulierbaren Legierungsstruktur bei der Bauteilabkühlung (Erstarrung mit hohem Gradienten). Werden Turbinenschaufeln gerichtet erstarrt oder (noch besser) als Einkristall gegossen, kann bei gleicher Kühlung die Turbineneintrittstemperatur um mindestens 50°C angehoben werden. Die Festigkeit von Superlegierungen kann weiter erhöht werden, wenn Korngrenzen im Material komplett vermieden bzw. der Korngrenzenverlauf optimiert wird. Bei einkristallin gerichtet erstarrten Superlegierungen kann beispielsweise auf einzelne Elemente, wie Kohlenstoff oder Zirkonium, verzichtet werden. Ursprünglich wurden beide Elemente zugesetzt, um Korngrenzen zu stabilisieren, was jedoch wiederum mit der Herabsetzung des Schmelzpunktes der Legierung einher ging.

Durch den **Zusatz weiterer Elemente** kann das mechanische Verhalten der Legierungen bei hohen Temperaturen erheblich verbessert werden. Die durch Zusatz von bestimmten Elementen erzielbare Härtung (sog. Mischkristallhärtung) ergibt eine stabile Gefügestruktur, insbesondere dann, wenn große und langsam diffundierende Atome, wie Wolfram oder Rhenium, eingesetzt werden. Nachteilig ist die bei Zusatz dieser Elemente zunehmende Tendenz der Legierung, beim Erstarren Ungleichmäßigkeiten (sog. Seigerungen) auszubilden. Werden diese Ungleichmäßigkeiten während des Gießverfahrens nicht ausreichend abgebaut, führt dies zur Bildung von Sprödphasen und einem deutlichen Verlust an Zeitstandfestigkeit beim Material. Diesen Erscheinungen kann bei der Materialherstellung entgegengewirkt werden durch die weiterentwickelte Gießverfahren, die durch hohe Temperaturgradienten und Erstarrungsgeschwindigkeiten der Ausbildung von Seigerungen entgegenwirken. Die Minimierung des Auftretens von Seigerungen ist für die weitere Nutzung dieser Art von Superlegierungen von entscheidender Bedeutung.

Eine weitere Möglichkeit der Verfestigung von Legierungen, die auch bei hohen Temperaturen Bestand hat, ist das Einbringen von möglichst stabilen Teilchen (z.B. Oxiden) in die Legierung, die nicht in deren Matrix löslich sind bzw. nicht mit dieser reagieren. Beim Verfahren der Dispersionshärtung werden Versetzungsbewegungen im Material zusätzlich durch diese thermisch stabilen, feinverteilten keramischen Teilchen behindert. Für eine Verbesserung der Warmfestigkeit von Superlegierungen eignen sich insbesondere Dispersio-

nen von Teilchen aus Thorium-, Aluminium-, Yttrium- oder Magnesiumoxid in kleineren Mengen mit typischen Volumenanteilen bis 5 %. Derart verstärkte Legierungen sind unter der Bezeichnung **Oxid-dispersionsverstärkte** (Oxide Dispersion Strengthened, ODS) **Superlegierungen** bekannt. ODS-Superlegierungen werden in Flugtriebwerken bereits eingesetzt.

Vorteile von ODS-Super- im Vergleich zu konventionellen Legierungen liegen in einer höheren Heißgaskorrosionsbeständigkeit sowie -festigkeit, was bis zu 100°C höhere Einsatztemperaturen ermöglicht. Nachteilig ist, daß ODS-Superlegierungen nicht für Gießverfahren geeignet sind. Die alternative Fertigung auf pulvermetallurgischem Wege ist beim heutigen Stand der Prozeßtechnik für komplizierte Strukturen nur mit relativ hohem Aufwand möglich. Darüber hinaus müssen aufgrund der möglicherweise geringen Zeitstandfestigkeit ODS-Turbinenschaufeln dickwandiger oder auch massiv gefertigt werden. Dies bedeutet wiederum, daß Wärmespannungen bei Schnellabschaltungen zunehmen. Gleichzeitig wird dadurch eine andere Eigenschaft, nämlich das Spannungs-Dehnungs-Verhalten als Maß für die Zugfestigkeit des Materials, negativ beeinflusst, welche insgesamt bereits geringer als bei konventionellen Superlegierungen ausfällt. Damit sind ODS-Superlegierungen voraussichtlich nicht bei höheren absoluten Heißgastemperaturen einsetzbar. Da ODS-Turbinenschaufeln jedoch weniger bzw. überhaupt nicht gekühlt zu werden brauchen, kann durch eine reduzierte Kühlung trotzdem eine Erhöhung der thermodynamisch wirksamen ISO-Turbineneintrittstemperatur erreicht werden.

Forschungsbedarf besteht in der Verbesserung des theoretischen Verständnisses und damit der Suche nach Möglichkeiten zur gezielten Verstärkung des den ODS-Superlegierungen zugrundeliegenden Härtungsmechanismus. Weitere Steigerungen der Kriechfestigkeit werden auch von der Optimierung der Oxidteilchen-Matrix-Grenzflächen erwartet.

3.1.2 Intermetallische Phasen

Intermetallische Phasen nehmen eine **Sonderstellung** bei den metallischen Werkstoffen ein. Sie bestehen aus zwei oder mehreren Elementen, die eine neue Phase mit eigener Zusammensetzung, Kristallstruktur und spezifischen Eigenschaften bilden. Dabei stehen intermetallische Phasen hinsichtlich ihres Bindungscharakters zwischen den Metallen und den Keramiken, was sich auch in ihrem Eigenschaftsprofil widerspiegelt. Eingesetzt werden intermetallische Phasen bisher vor allem im Bereich der Funktionswerkstoffe (z.B. magnetische Materialien,

Supraleiter). Im Bereich der Strukturwerkstoffe sollen intermetallische Phasen in Zukunft auf dem Gebiet der Hochtemperaturwerkstoffe den Bereich zwischen den bereits ans "Ende ihrer Möglichkeiten" gelangten metallischen Superlegierungen und den noch im Entwicklungsstadium befindlichen Strukturkeramiken abdecken. Intermetallische Phasen sollen die Vorteile beider Materialklassen miteinander verbinden.

Intermetallische Phasen zeichnen sich durch hohe Schmelztemperaturen, eine hohe Steifigkeit in den Gitterstrukturen und einen hohen Oxidations- und Kriechwiderstand aus. Wesentliche Vertreter dieser Werkstoffgruppe sind die **Aluminide** (wie Titanaluminide (z.B. TiAl, Ti₃Al) oder Nickelaluminide (z.B. NiAl, Ni₃Al)). Die Steifigkeit der intermetallischen Phasen ergibt sich aus einer "**geordneten Kristallstruktur**", in denen z.B. Titan- und Aluminium-Atome spezifische Gitterplätze einnehmen und nicht zufällig auf die Gitterplätze verteilt sind. Dies erschwert Versetzungsbewegungen und bedeutet hohe Festigkeit; andererseits resultiert hieraus ein mangelhaftes Verformungsvermögen (Duktilität). Die damit verbundene inhärente **Sprödigkeit** dieser Werkstoffe bei niederen Temperaturen führt zu technischen Problemen bei der Herstellung. Prinzipiell können intermetallische Phasen sowohl auf pulvermetallurgischem Wege als auch mittels Schmelz- und Gießverfahren und Warmverformung hergestellt werden. Die Abstimmung des Kristallaufbaus auf das gewünschte Eigenschaftsprofil des Bauteils, ist insbesondere bei großtechnischer Herstellung, mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden.

Intermetallische Phasen im Gasturbinenbau basieren auf Titan- und Nickelaluminiden sowie Metallsiliziden. Werkstoffe auf Basis der **Nickelaluminide** (Ni₃Al und NiAl) sind leichter, oxidations- und korrosionsbeständiger sowie kriechfester als Nickelbasis-Superlegierungen. Nickelaluminide, für den Temperaturbereich zwischen 800 und 1.300°C entwickelt, können Nickelbasis-Superlegierungen in allen Teilen der Technik ersetzen. Das momentan aussichtsreichste Potential besitzt das Nickelaluminid **NiAl**, welches bei Einsatz in Turbinenkomponenten eine Gewichtsersparnis bis zu 25 % aufweist, was bei bewegten, rotierenden Bauteilen wie Turbinenschaufeln vorteilhaft ist. Das Nickelaluminid NiAl hat unter vergleichbaren Bedingungen eine höhere Lebensdauer als konventionelle Superlegierungen. Zur Fertigung von Bauteilen aus dem Nickelaluminid NiAl sind Verfahren entwickelt worden (z.B. das sog. Pulververformspritzen und die Einkristall-Gußtechnik), mit denen bereits einige Prototypen hergestellt wurden.

Das Interesse an **Titanaluminiden** beruht auf deren höherem Temperaturpotential im Vergleich zu konventionellen Titanlegierungen. Darüber hinaus

sind sie vom Gewicht her um die Hälfte leichter als Nickelbasis-Superlegierungen. Titanaluminide sind besonders geeignet für Komponenten des Hochdruckverdichters und der Niederdruckturbine. Im Vordergrund der Materialentwicklung steht ein Einsatz im Turbinengehäuse, in Dichtungen sowie als Leit- und Laufschaufeln. Zur Herstellung von Bauteilen aus Titanaluminiden sind umformtechnische, pulvermetallurgische und feingußtechnische Verfahren entwickelt worden, wobei mit letzteren besonders kostengünstig gefertigt werden kann. In Feingußtechnik gegossene Prototypen als Turbinengehäuse und -schaufeln werden bereits in Triebwerken getestet, wobei sich abzeichnet, daß für Bauteile aus dem Titanaluminid TiAl bei Einsatztemperaturen oberhalb von 700°C über einen Zeitraum von etwa 2.000 Stunden ein **Korrosionsschutz** (z.B. eine Oberflächenbeschichtung) erforderlich ist.

Für einen Temperaturbereich von 1.200 bis 1.600°C (in welchem typischerweise auch Keramiken eingesetzt werden) wurden **Metallsilizide** entwickelt. Für einen Einsatz in Gasturbinen kommen neben dem schon länger bekannten Molybdänsilizid (MoSi_2) auch Titansilizide (z.B. TiSi_2 , Ti_5Si_3) in Betracht. Ein hohes Entwicklungspotential weisen Disilizide (Di = zwei, wie in Titandisilizid TiSi_2) auf. Diese zeichnen sich u.a. durch eine hohe Oxidationsfestigkeit aus.

Zusammenfassend ist anzumerken, daß sich aus der Sprödigkeit intermetallischer Phasen erhebliche Probleme bei deren Herstellung und Anwendung ergeben. Zur Verringerung ihrer Sprödigkeit werden Kombinationen verschiedener Phasen und das gezielte Einbringen von Verstärkungsmechanismen untersucht, wobei in den meisten Fällen eine Überführung in die industrielle Anwendung noch nicht abzusehen ist. Trotz dieser Schwierigkeiten wird den intermetallischen Phasen ein beträchtliches Einsatzpotential als Strukturwerkstoffe mit geringer Dichte und hoher Temperaturfestigkeit bescheinigt. Realisierbar ist der Einsatz intermetallischer Phasen jedoch nur, wenn gleichzeitig akzeptable Entwicklungs- und Herstellungskosten gewährleistet werden können. Derzeit läßt sich noch nicht abschließend beurteilen, ob überhaupt bzw. für welche Komponenten einer Gasturbine intermetallische Phasen entwickelt werden können, die ihren klassischen oder auch neuen Konkurrenten im Eigenschaftsprofil überlegen sind.

3.2 Keramische Werkstoffe

Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff sowie Silizium und Aluminium gehören zu den am häufigsten vorkommenden Elementen in der Erdkruste, der Atmo-

sphäre und den Weltmeeren. Sie sind Hauptbestandteile keramischer Werkstoffe, die allgemein Verbindungen von Metallen mit Nicht- oder Halbmetallen darstellen. Herkömmliche Keramikwerkstoffe, wie Porzellan oder Steingut, sind aus mehreren kristallinen Phasen aufgebaut, die in einer glasigen, amorphen Phase eingebettet sind; keramische Hochleistungswerkstoffe bestehen hauptsächlich aus Silikaten. Im Bereich der technischen Werkstoffe dominieren dagegen sogenannte **Oxidkeramiken** (wie Aluminium- oder Zirkoniumoxid) und **Nichtoxidkeramiken** (wie Nitride, Karbide, Boride, Silizide von Silizium, Bor oder Titan) bzw. Kombinationen beider. Keramiken verfügen auch über eine Reihe nichtmechanischer (z.B. elektrischer, optischer, magnetischer) Eigenschaften, die sie als Funktionswerkstoffe/-keramiken für viele Anwendungen (z.B. Supraleitung, Mikrowellenkeramiken) bereits unverzichtbar gemacht haben. Für Anwendungen im Gasturbinenbau ist jedoch ausschließlich ihr Einsatz als Strukturkeramiken von Interesse.

Keramiken sind in ihrer Mikrostruktur durch steife und gerichtete Bindungen charakterisiert, die ihnen eine hohe Härte und Hochtemperaturstabilität verleihen. Keramische Hochleistungswerkstoffe verfügen über einen hohen Verschleißwiderstand, ein niedriges spezifisches Gewicht und eine gute chemische Beständigkeit. Diese Eigenschaften sind bei einigen Oxidkeramiken, jedoch vor allem bei Nichtoxidkeramiken, wie Siliziumnitrid oder -karbid, besonders ausgeprägt. Allerdings muß deren Fertigung wegen der Oxidationsanfälligkeit der Ausgangsstoffe unter Vakuum oder Schutzgas erfolgen.

Die **Fertigung** moderner keramischer Hochleistungswerkstoffe erfolgt prinzipiell mit klassischen Verfahren zur Herstellung keramischer Werkstoffe (d.h. Pulverherstellung, Formgebung, Endverdichtung und Nachbearbeitung). Wesentliche Unterschiede bestehen in der Qualität der verwendeten Grundstoffe (hochreine, synthetische Grundstoffe, die in aufwendigen Prozeßschritten weiterverarbeitet werden) und in dem Verfahrensschritt der Endverdichtung des Materials (dem sog. Sintern). Beim Sintern werden Prozeßtemperaturen eingestellt, die ein schnelles Ablaufen von Transportprozessen an den Korngrenzen des Pulvermaterials bewirken.

Keramische Hochtemperaturwerkstoffe sind, wie traditionelle Töpferware, einerseits extrem fest, andererseits auch durch eine gewisse **Sprödigkeit** gekennzeichnet; sie sind nicht so widerstandsfähig gegenüber Rißwachstum wie etwa die meisten Metalle. Risse verlaufen in keramischen Werkstoffen zumeist entlang der Korngrenzen, genau dort, wo die Bindung zwischen den Atomen am schwächsten ist. An dieser Stelle setzen FuE-Arbeiten zur **Optimierung der Gefügestruktur** an. Wesentliche Fortschritte sind dabei durch den Einbau einer

zweiten Phase möglich, die im Mikrobereich durch Einleiten energieumwandelnder Mechanismen den Widerstand gegen eine Rißausbreitung erhöht. Eine andere Möglichkeit ist das **Einlagern von feinen Verstärkungsfasern** in die keramische Matrix. Über den gesamten Temperaturbereich aussichtsreich ist die Verstärkung der keramischen Matrix mit Keramik- oder Kohlenstofffasern (evtl. in Kombination mit einer Umwandlungsverstärkung). Insbesondere von keramikfaserverstärkten Keramiken, die sich momentan noch weitgehend im Entwicklungsstadium befinden, werden wesentliche Verbesserungen erwartet. Dies betrifft etwa Verstärkungen mit langen, über das gesamte Bauteil reichenden Fasern.

Einsatzmöglichkeiten sog. Hochleistungsstrukturkeramiken sind u.a. im Motoren-, Turbinen- und allgemeinen Maschinenbau zu sehen, wobei wesentliche Verbesserungen z.B. im tribologischen Bauteilverhalten bzw. durch eine Gewichtsverringerung (träger) Massen erwartet werden.

Aktivitäten zum Einsatz keramischer Werkstoffe im Gasturbinenbau konzentrieren sich auf heißgasführende Bauteile wie Brennkammern, Turbinenschaufeln und Wärmetauscher. In der Praxis bewährt hat sich in stationären Gasturbinen die **Auskleidung** von Brennkammern sowie heißgasführender Bauteile zwischen Brennkammer und Turbine mit keramischen Wärmedämmschichten. Dagegen konnten **vollkeramische Leit- und Laufschaufeln** bisher noch nicht eingesetzt werden.

Für den Hochtemperatureinsatz wird **nichtoxidische Keramik** favorisiert, wobei der derzeit aussichtsreichste "Kandidat" zur Herstellung von bewegten Bauteilen **Siliziumnitrid (Si_3N_4)** ist. Nachteilig ist die zum gegenwärtigen Entwicklungszeitpunkt begrenzte Lebensdauer des Siliziumnitrids. Die Kriecheigenschaften des keramischen Materials sollen durch eine gezielte Änderung der chemischen Zusammensetzung insbesondere an den Korngrenzen verbessert werden. Zur Verringerung der unterkritischen Rißausbreitung wird auf neue Konzepte gesetzt, die aus Phänomenen der Rißausbreitung bei hohen Temperaturen abgeleitet werden sollen.

Für **Einsatztemperaturen oberhalb 1.500°C** sollen u.a. **oxidkeramische Verbundwerkstoffe** mit kriechfesten einkristallinen Oxidfasern (z.B. Saphirfasern) geeignet sein. Bei mit nichtoxidischen Langfasern verstärkten keramischen Verbundwerkstoffen werden bei Verwendung von Fasern aus Siliziumkarbid (SiC) Fortschritte für Hochtemperaturanwendungen erwartet.

Internationale FuE-Anstrengungen zur Nutzbarmachung keramischer Werkstoffe scheinen sich insgesamt zu verstärken, was an einer Reihe von Verbundvorhaben dokumentierbar ist. Gerechtfertigt werden diese Anstrengungen u.a.

vermutlich aus der Tatsache heraus, daß metallische Werkstoffe in Gasturbinen (trotz verbesserter Kühleffektivität, Einsatz von Oberflächenbeschichtungen etc.) immer näher an ihrem Schmelzpunkt betrieben werden müssen. Damit stellt der Einsatz vollkeramischer Materialien für Gasturbinen-Komponenten die (einzige) Alternative zur Weiterentwicklung des Wirkungsgrades in Gasturbinen dar, wenn grundlegende Verbesserungen bzgl. Hochtemperaturfestigkeit erreicht werden sollen. Außerdem könnte bei keramischen Werkstoffen die Oxidations- bzw. Korrosionsschutzschicht entfallen. Allerdings sind die gestellten Anforderungen an die potentiellen strukturkeramischen Komponenten im Vergleich zu den bisher erreichbaren Materialeigenschaften außerordentlich hoch. Dazu gehört auch eine verlässliche Prognose der Lebensdauer des Materials als eine entscheidende Grundlage für bautechnische Konstruktionen. Da die Streuung der Festigkeitswerte keramischer Werkstoffe wesentlich von den beim Verdichtungsprozeß (Sintern) auftretenden Defekten abhängt, stellt die Optimierung der Materialgefüge bei der Herstellung ein herausragendes Entwicklungsziel dar. Dazu gehören u.a. Verfahren in staub- bzw. verunreinigungsfreier Umgebung, die Nutzbarmachung hochreiner und hochfeiner Pulver sowie neue Herstellungsverfahren, die eine gezielte Beeinflussung des Mikrogefüges erlauben.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, **daß die anfangs hohen Erwartungen** an keramische Materialien inzwischen **einer gewissen Ernüchterung gewichen sind**. Dabei hat es sich gezeigt, daß es noch umfangreicher FuE-Anstrengungen bedarf, um spezifische Nachteile keramischer Werkstoffe (wie Sprödigkeit, geringe Reproduzierbarkeit von Werkstoff- und Bauteilkennwerten, hoher Fertigungsaufwand mit entsprechend hohen Kosten) zu überwinden. Die Neigung keramischer Materialien zum Sprödbruch kann zwar vermindert, aber nicht grundsätzlich beseitigt werden. Daher ist davon auszugehen, daß ihre **Vorteile erst in keramikspezifisch konstruierten Systemen** voll zur Geltung kommen werden, in denen sie nicht einfach vorhandene Bauteile aus anderen Werkstoffen zu ersetzen haben.

3.3 Faserverstärkte Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix

Faserverstärkte Werkstoffe finden großes Interesse in der Technik, da sie die Möglichkeit bieten, "maßgeschneiderte" Werkstoffe und Bauteile herzustellen. Dies bedeutet, daß durch eine Veränderung der Dichte und der Faserorientierung der Werkstoff an verschiedene Belastungen im Inneren des Bauteils angepaßt werden kann. Dabei sind Kombinationen aller Werkstoffgruppen mitein-

ander möglich und z.T. bereits in Gebrauch, wobei die Fasern jeweils in eine Grundmasse eingebettet sind.

Eine wichtige Funktion der eingebetteten Fasern in Werkstoffen besteht darin, ausgewählte Eigenschaften der Grundmasse (wie z.B. Sprödigkeit bei Keramik) positiv zu beeinflussen. Einzelne Fasern (z.B. aus Kohlenstoff) sind in der Lage, enorme Zugkräfte übertragen zu können (z.B. in Form eines Seils). Jedoch können Fasern bereits bei geringer Schub- oder Druckbelastung beschädigt werden (sog. Ausknicken). Um die enorme Festigkeit und Steifigkeit von (z.B. Kohlenstoff-)Fasern nutzen zu können, werden diese in einer Grundmasse (z.B. Keramik) eingebettet. Die Grundmasse überträgt dann die Schubkräfte zwischen den Fasern und verhindert damit das Ausknicken. Daneben fixiert diese die Fasern in einer bestimmten Anordnung, so daß auch komplexe Bauteile fertigbar sind, und übernimmt eine Schutzfunktion gegenüber aggressiven Medien.

Für Hochtemperaturanwendungen bietet sich ein Verbundwerkstoff an, bei dem Kohlenstofffasern in eine ebenfalls aus Kohlenstoff bestehende Matrix eingebettet sind. Sogenannte **kohlenstoffverstärkte Kohlenstoffe** (CFC oder Carbon-Carbon-Composites oder C/C) können damit als **Spezialtyp langfaserverstärkter Keramik** aufgefaßt werden. Kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffe sind "**Werkstoffhybride**", bei denen die ausgezeichnete Steifigkeit und Festigkeit der Kohlenstofffaser mit den positiven Eigenschaften der Grundmasse "verbunden" werden sollen.

Von allen technisch verfügbaren Strukturwerkstoffen weisen die CFC die mit Abstand **höchste Temperaturbeständigkeit** auf. Ihre mechanische Festigkeit ist erwartungsgemäß in Faserrichtung besonders hoch und fällt in nichtoxidierender Umgebung auch bei Einsatztemperaturen von über 2.000°C nicht ab. Damit dringen CFC in Temperaturbereiche vor, in denen andere, z.B. langfaserverstärkte Keramiken aufgrund von Rekristallisationsprozessen auf Dauer nicht mehr einsetzbar sein werden. Dies wird vermutlich auch dann nicht der Fall sein, wenn deren Probleme hinsichtlich Herstellung und Anwendbarkeit gelöst wären. Im Gegensatz zu vielen anderen Materialien nimmt die Festigkeit von CFC mit steigender Temperatur sogar zu, da aufgrund des unterschiedlichen thermischen Ausdehnungsverhaltens bei höheren Temperaturen eine festere Einbindung der Fasern in die Grundmasse erfolgt. Ein Nachteil besteht darin, daß bei hohen Temperaturen gleichzeitig die **Sprödigkeit** des Materials wieder zunimmt. Auch die Langzeitstabilität der Fasern in oxidierender Umgebung nimmt bei Temperaturen über 450°C derart ab, daß Oberflächenschutzschichten aufgebracht werden müssen, womit dann prinzipiell auch Langzeiteinsätze

bei Temperaturen über 1.200°C möglich sind. Bei Raumtemperatur zeigen CFC jedoch kein Sprödbbruchverhalten, so daß auch geschädigte Bauteile u.U. mehrfach wiederbelastet werden können (sog. Pseudoplastizität). Daneben zeichnen sich CFC durch ein besonders **geringes spezifisches Gewicht** sowie beachtliche Strahlungs- und Thermoschockbeständigkeit aus, was sie für Hochtemperaturanwendungen prädestiniert.

Trotz einer Reihe von herausragenden Eigenschaften werden CFC bisher ausschließlich für **Spezialanwendungen** eingesetzt. Ein Grund hierfür ist im **hohen Fertigungsaufwand** zu sehen. Technisch nur sehr aufwendig lösbare Probleme, wie die Oxidationsanfälligkeit des ungeschützten Materials bei hohen Temperaturen, und damit verbundene hohe Kosten, etwa für das Arbeiten in Schutzgasatmosphäre oder das Aufbringen von zusätzlichen Oberflächenbeschichtungen, stellen Argumente gegen einen Einsatz von CFC im Gasturbinen-Bau dar. Bei der **Fertigung** von CFC-Bauteilen muß die Anisotropie (Richtungsabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften wie Zugbelastung von der Faserrichtung) berücksichtigt werden. Die konzipierte Faseranordnung muß bei der Bauteilherstellung außerordentlich präzise umgesetzt werden, da bereits geringste Abweichungen gravierende Auswirkungen etwa auf die Tragleistung einer Schicht haben können. Konventionelle Fertigungsverfahren, mit denen z.B. metallische Bauteile hergestellt werden, eignen sich daher nur bedingt für den Einsatz von CFC. Häufig werden Verfahren und Fertigungsanlagen an das zu fertigende Bauteil angepaßt, um bei der Verarbeitung die Fasern möglichst nicht zu beschädigen. Großformatige Bauteile mit langen Fasern werden durch Verfahren der kontinuierlichen Verstärkung der keramischen Matrix gefertigt.

FuE-Arbeiten konzentrieren sich auf:

- Optimierung interlaminarer Eigenschaften der CFC (Wechselwirkungen zwischen Fasern und Grundmasse (Matrix etc.)),
- Verbesserung der Querfestigkeit von CFC durch Konzepte zur dreidimensionalen Verstärkung,
- Verbesserung des theoretischen Verständnisses (Materialverhalten bei hohen Temperaturen, Zusammenhang zwischen eingestellten Fertigungsparametern und den erhaltenen Bauteileigenschaften),
- Entwicklung schnellerer Prozeßvarianten mit Eignung zur Serienfertigung (Kostensenkung),
- Entwicklung von Computersimulationen und Designmethoden für die Konstruktion mit anisotropen Werkstoffen bzw. von Automationskonzepten für eine hochpräzise Fertigung sowie

- Entwicklung experimenteller Verfahren zur Materialprüfung insbesondere im Hochtemperaturbereich.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß kohlenstoffaserverstärkte Kohlenstoffe von allen in der Entwicklung befindlichen neuen Werkstoffen für den Einsatzzweck in Gasturbinen **noch am weitesten von einer konkreten Anwendung entfernt** sind. Grundlage des Interesses an CFC im Hochtemperaturbereich ist die Tatsache, daß zur Faser verstreckte Werkstoffe oft wesentlich höhere Festigkeiten aufweisen als in kompakter Form. Für einen konkreten Einsatz, z.B. in der Gasturbinen-Technik, müssen noch grundlegende Probleme gelöst werden. Dazu gehören die Optimierung der Langzeitstabilität von Fasern in oxidierender Umgebung, des Sprödverhaltens sowie von Fertigungszeiten. Wesentliche Fortschritte gegenüber anderen hochtemperaturfesten Materialien werden durch die Entwicklung neuer Oberflächenschutzsysteme erwartet, die Voraussetzung dafür sind, daß CFC die ihnen zugesprochene Schlüsselrolle als Hochtemperaturwerkstoffe im Gasturbinenbau auch tatsächlich einnehmen können. Hiermit ist eher langfristig zu rechnen.

3.4 Oberflächenbeschichtungen

Die gewünschten Eigenschaften im Werkstoffinneren, z.B. Zugfestigkeit, sind völlig unabhängig von den Eigenschaften, die die Bauteiloberfläche aufweisen soll, wie etwa chemische Beständigkeit in oxidierender Umgebung. Die Oberflächenbeschichtungstechnik bietet die Möglichkeit, den Einsatzbereich weiterentwickelter Hochtemperaturwerkstoffe (wie Superlegierungen, intermetallische Phasen, kohlenstoffaserverstärkter Kohlenstoffe) auszubauen bzw. einen Einsatz unter praxisrelevanten Bedingungen überhaupt erst zu ermöglichen. Durch eine Beschichtung entsteht ein Verbundwerkstoff mit neuen Eigenschaften, der einen Beitrag zum Verschleiß- und Korrosionsschutz und damit zur Erhöhung der Lebensdauer liefert.

Beschichtungen sind dadurch charakterisiert, daß sich die Materialoberfläche nicht nur durch andere mechanische Eigenschaften (z.B. erhöhte Härte), sondern auch durch ihre chemische Zusammensetzung vom Grundwerkstoff unterscheidet. Dazu werden ausgewählte chemische Elemente in die Bauteiloberfläche eingebaut, die z.B. über die Gasphase oder in fester bzw. flüssiger Form an die Oberfläche herangebracht werden und ggf. mit ihr unter Bildung stabiler Verbindungen reagieren (z.B. Aufkohlen, Nitrieren, Borieren). Aufgrund ihrer

höheren Umweltfreundlichkeit nimmt die technische und wirtschaftliche Bedeutung von **Gasphasen-Verfahren** stark zu.

Zum Stand der Technik gehört die Verwendung von Korrosions- bzw. Oxidationsschichten in der Brennkammer und an den Schaufeln von Gasturbinen. Dagegen sind temperaturbeständige keramische Schichten (**Wärmeschutzschichten**) zur Erhöhung der Einsatztemperatur von Turbinenschaufeln etc. bisher nur bei Flugzeugtriebwerken eingesetzt worden. In Zukunft ist mit einer wachsenden Bedeutung von Oberflächenschutzschichten auch für stationäre Gasturbinen zu rechnen, da mit ihrer Hilfe eine Steigerung der Einsatztemperaturen einzelner Bauteile um ca. 100°C möglich wird. Eine Wärmeschutzschicht setzt sich aus mindestens zwei Teilschichten zusammen (sog. Duplexsysteme), wobei die äußere aus einem keramischen Material besteht, das aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit den Wärmeübergang in das Bauteil begrenzt. Dazu wird üblicherweise mit Yttrium stabilisiertes Zirkoniumdioxid (ZrO_2) verwendet. Die innere Schicht ist eine metallische Bindungsschicht, sog. "Bondcoat", und besteht zumeist aus einem Material der Verbindungsfamilie M-Chrom-Aluminium-Yttrium, wobei M für Cobalt und/oder Nickel steht.

Zum **Aufbringen von Wärmeschutzschichten auf den Grundwerkstoff** eignen sich thermische Aufspritzverfahren, z.B. Flamm- und Plasmaspritzen (**Dickschichttechnik**), und Aufdampfverfahren, z.B. physikalische Dampfabcheidung (physical vapour deposition, PVD) (**Dünnschichttechnik**). Letztere wird bevorzugt in Kombination mit der sog. Elektronenstrahlverdampfung eingesetzt (Electron-Beam-PVD). Thermische Spritzverfahren sind wesentlich kostengünstiger als Aufdampfverfahren; sie werden bereits im Flugzeugtriebwerksbau zur Beschichtung von Laufschaufeln eingesetzt. PVD-Verfahren erlauben das Aufbringen von extrem dünnen Schichten. Bei Kombination des PVD-Verfahrens mit der Elektronenstrahlverdampfung ist durch gezielte Variation von Prozeßparametern eine Optimierung der Eigenschaften von Schichtstrukturen möglich. So ist beispielsweise der Einbau alternativer Stabilisatoren möglich (z.B. Zugabe von Ceroxid zwecks Erhöhung der Einsatztemperatur der Beschichtung insbesondere unter korrosiven Bedingungen). Die Möglichkeit zur Veränderung der Abscheideparameter führt außerdem zu einer wichtigen Neuentwicklung, den sog. Gradientenwerkstoffen.

Den **Gradientenwerkstoffen** liegt die Idee zugrunde, Verbundwerkstoffe zu schaffen, bei denen abrupte Übergänge zwischen den verschiedenen Phasen vermieden werden. Durch gezielte Gradierung der chemischen Zusammensetzung und des Gefüges wären neue Schichtsysteme mit stufenlosen Übergängen und damit extrem hoher Thermoschockbeständigkeit realisierbar. Jedoch befinden

sich Gradientenwerkstoffe im Gegensatz zu konventionellen Verbundwerkstoffen zumeist noch im Forschungsstadium.

Wesentliche **Schadensmechanismen** solcher auf Turbinenteilen stationärer Gasturbinen aufgebrachtter keramischer Wärmebarrieren sind das Abplatzen aufgrund thermischer Dehnungsspannungen und die sog. Bondcoat-Oxidation (verursacht durch Schichten diffundierende Sauerstoffatome). Diese macht sich oft erst nach längeren Betriebszeiten bemerkbar und hat dann negative Auswirkungen auf die Thermoschockbeständigkeit des gesamten Schichtsystems. Daher wird neben der **Minimierung der Dicke der keramischen Schicht** (z.B. unter 0,25 mm) auch eine **Optimierung der Schichtstruktur** (z.B. Bondcoat-Material mit minimaler Oxidationsempfindlichkeit, Einsatz von Ceroxid zur thermischen Stabilisierung des Zirkondioxids) angestrebt. Interessante Entwicklungen zeichnen sich bei sog. **Mehrschichtsystemen** ab, wo einzelne Schichtlagen verschiedene Funktionen wahrnehmen und damit spezifisch wirksam sind z.B. gegen Korrosion, Oxidation oder Thermoschock. Prinzipiell ist es auch möglich, Diffusionssperren gegen den Eintritt von Sauerstoff in die Bondcoat-Schicht zu errichten. Nachteile von Mehrschichtsystemen sind derzeit u.a. in der aufwendigen Herstellung, in auftretenden Haftungsmängeln einzelner Schichten untereinander sowie in einer bisher ungenügend ausgeprägten Sperrschichtwirkung gegen Diffusion zu sehen. Da Mehrschichtsysteme ein hohes Anwendungspotential besitzen, werden intensive FuE-Anstrengungen unternommen, ihre Struktur und Wirkung einzelnen Anwendungsprofilen anzupassen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß die Bedeutung von Oberflächenbeschichtungen (Wärmeschutzschichten) bzw. -systemen (Mehrschichtsysteme, Gradientenwerkstoffe) in Zukunft im Hochtemperatureinsatzbereich zunehmen wird, da mit ihrer Hilfe eine Steigerung der Einsatztemperaturen einzelner Bauteile um ca. 100°C möglich sind. Die mit ihrem praxisrelevanten Einsatz verbundenen Probleme (Stabilität, Haftung etc.) erscheinen mittelfristig lösbar.

4. Resümee

Stationär betriebene Gasturbinen haben in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung in der weltweiten Stromerzeugung gewonnen, nicht zuletzt aufgrund von Liberalisierungstendenzen in den Energie- und Gasmärkten. Gasturbinen sind im Sinne einer preiswerten, brennstoffvariablen und schnell verfügbaren

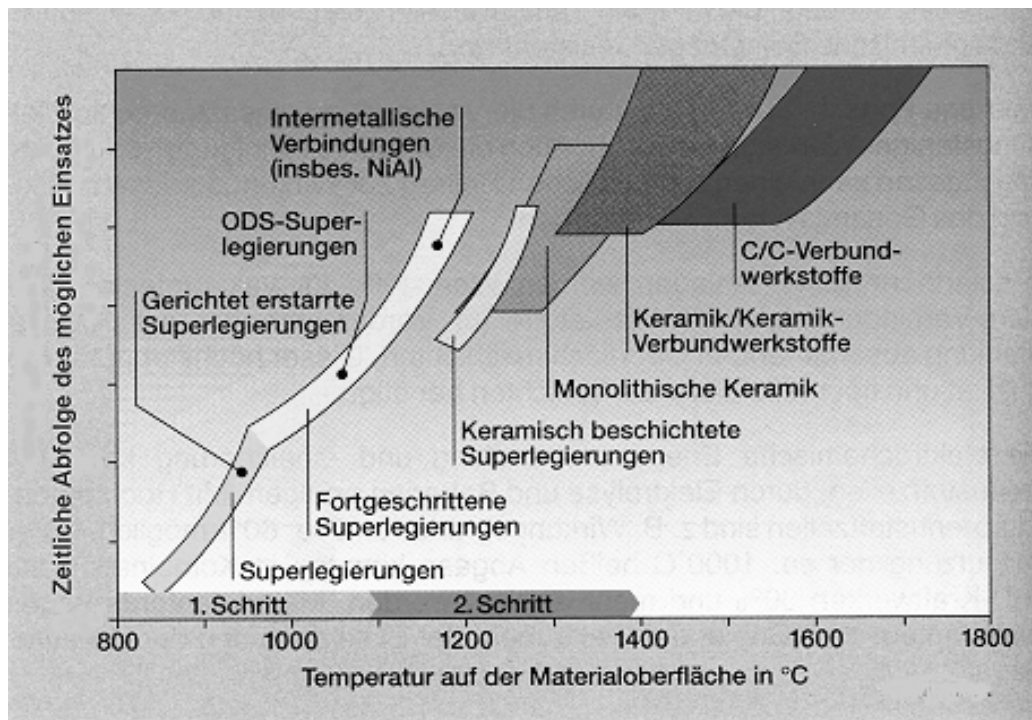
Energieversorgung vielseitig einsetzbar und in einer dynamischen Entwicklung begriffen. Auch wenn ihr Wirkungsgrad nicht beliebig steigerungsfähig ist, so ist doch ein weiteres "Heranrücken" an die thermodynamisch definierte Grenze möglich. Eine weitere Wirkungsgradsteigerung ist sinnvoll, weil eine effizientere Brennstoffausnutzung natürliche Ressourcen schont und Schadstoffeinträge in die Umwelt verringert.

Bei der Umsetzung einer Wirkungsgradsteigerung spielen neu- und weiterentwickelte Materialien eine wesentliche Rolle. Der Schwerpunkt liegt auf vier "Werkstoffklassen". Dies sind metallische Werkstoffe (Superlegierungen und intermetallische Phasen), keramische Werkstoffe (Strukturkeramiken), Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (kohlenstoffaserverstärkte Kohlenstoffe) sowie Oberflächenbeschichtungen (Wärmeschutzschichten).

Von neuen Hochtemperaturwerkstoffen wird mindestens ein gleichwertiges, eher ein gegenüber konventionellen Werkstoffen deutlich verbessertes Eigenschaftsprofil erwartet, das möglichst kostengünstig erreichbar sein soll. Im einzelnen kann dies festgemacht werden an geforderten **Materialeigenschaften im Gebrauch**, wie hohe thermische und mechanische Belastbarkeit, hohe chemische Beständigkeit auch unter korrosiven Bedingungen, geringes spezifisches Gewicht, als auch an **Materialeigenschaften in der Fertigung**, wie Verarbeitbarkeit mit Hilfe verfügbarer, etablierter Verfahren, Schweißbarkeit, Oberflächenbearbeitbarkeit (Härtbarkeit) etc. Auffallend ist, daß bei neuen Hochtemperaturwerkstoffen derzeit an vielen Einzelfragen geforscht wird. Wesentliche Verbesserungen wurden bei einzelnen Gebrauchs- und Fertigungseigenschaften erreicht (wobei Materialentwicklungen im Gasturbinen-Bau bisher wesentlich von Entwicklungen im Flugturbinenbau profitiert haben), eine Überlegenheit im gesamten Eigenschaftsprofil konnte jedoch noch nicht nachgewiesen werden.

Thermisch hoch beanspruchte Bauteile in Gasturbinen sind die Brennkammer sowie die Turbinenschaufeln. Das **thermodynamisch wesentliche Kriterium** zur weiteren Steigerung des Wirkungsgrades ist die ISO-Turbineneintrittstemperatur der Heißgase, welche die mit der Bauteilkühlung verbundene Abkühlung der Heißgase berücksichtigt. Ausgehend von derzeit gängigen (Super-) Legierungen im Gasturbinenbau als Stand der Technik kann die Einsetzbarkeit neuer und weiterentwickelter Materialien in Abhängigkeit ihrer Einsatztemperatur Abbildung 1 entnommen werden.

Abb. 1: Zeitliche Abfolge eines möglichen Einsatzes neuer Materialien in der Turbinentechnik in Abhängigkeit von der Einsatztemperatur



Quelle: BMBF 1994 (geändert); diese Abbildung basiert auf einer inzwischen häufig zitierten Quelle der NASA, die in bezug auf die konkreten Einführungsdaten für neue Materialien nicht mehr aktuell erscheint, so daß diese hier weggelassen wurden.

Mit gerichtet bzw. einkristallin erstarrten **Superlegierungen** lassen sich bereits auf der Materialoberfläche Temperaturen von ca. 1.000°C realisieren. Dies entspricht in etwa einer ISO-Turbineneintrittstemperatur von ca. 1.200°C sowie einer Heißgastemperatur von ca. 1.400°C. Eine Steigerung der Oberflächentemperatur auf ca. 1.100°C wird noch mit metallischen Komponenten, wie weiterentwickelten bzw. oxid-dispersionsverstärkten (ODS)-Superlegierungen, realisierbar sein. Für eine signifikante Steigerung der Temperaturen auf der Materialoberfläche auf ca. 1.400°C ist bereits die Entwicklung **keramischer Strukturwerkstoffe** erforderlich (BMBF 1995; FhI-INT 1996, S. 27). Eine weitere Temperatursteigerung bedeutet in der Materialauswahl ein Wechsel in Richtung **Verbundwerkstoffe** (z.B. kohlenstoffaserverstärkte Kohlenstoffe). Unter Berücksichtigung einer zeitlichen Entwicklungskomponente bedeutet dies:

- **Relativ kurzfristig** und mit hoher Erfolgswahrscheinlichkeit ist eine Weiterentwicklung eingesetzter Superlegierungen auf Nickelbasis zu erwarten. Verfahren zur gerichteten bzw. einkristallinen Erstarrung verleihen Bautei-

len in ihrer Hauptbeanspruchungsrichtung günstige Eigenschaften. Stabilisierende Zusätze, z.B. von Oxiden, verbessern deren Hochtemperaturtauglichkeit weiter. Bei oxid-dispersionsverstärkten Superlegierungen ist die Fertigung deutlich aufwendiger, da diese z.B. nicht für kostengünstige Gießverfahren geeignet sind. Einsatzgrenzen von Superlegierungen sind durch deren Schmelzpunkte sowie durch spezifische Schadensszenarien, wie die Rißbildung entlang der Korngrenzen bei einkristalliner Erstarrung, gegeben.

- **Eher mittelfristig** ist mit einem Einsatz vollkeramischer Turbinenschaufeln zu rechnen. Bei keramischen Materialien kann weitestgehend auf Kühlung und das Aufbringen von Wärmedämmschichten verzichtet werden. Ein mittelfristiges Einsatzpotential unter industriellen Gesichtspunkten ergibt sich auch für die zwischen metallischen und keramischen Werkstoffen einzuordnenden intermetallischen Phasen, welche sich durch Temperaturbeständigkeit und geringes spezifisches Gewicht auszeichnen. Bei beiden Materialklassen wirkt sich ihre Sprödigkeit negativ auf Einsatz und Herstellung aus. Die Neigung keramischer Materialien zum Spröbruch kann zwar vermindert, jedoch nicht grundsätzlich beseitigt werden. Daher ist eher davon auszugehen, daß deren Vorteile erst in keramik-spezifisch konstruierten Bauteilen voll zur Geltung kommen.
- **Eher längerfristig** ist das Einsatzpotential von Turbinenbauteilen aus Verbundwerkstoffen, wie kohlenstoffaserverstärkten Kohlenstoffen, einzuordnen. Der Charme dieser Werkstoffklasse liegt darin, "maßgeschneiderte Materialien" herstellen zu können. Einsatzbegrenzend wirken sich Sprödigkeit und Oxidationsempfindlichkeit der Fasern aus. Hoffnungen werden daher in die Entwicklung neuer Oberflächenschutzsysteme gesetzt.

Oberflächenbeschichtungen als Wärmeschutzschichten aufgebracht spielen bei fast jedem Hochtemperaturwerkstoff eine ergänzende, zumeist korrosive Bedingungen ausgleichende und damit stabilisierende Rolle. Dadurch wird eine Steigerung der Einsatztemperaturen einzelner Bauteile um bis zu 100°C möglich. Praxisrelevante Probleme, wie Stabilität und Haftung der Beschichtungen etwa bei Mehrschichtsystemen, erscheinen mittelfristig lösbar.

Den relativ hohen Erwartungen an neue Materialien steht bei den betrachteten Hochtemperaturwerkstoffen für Gasturbinen noch ein umfangreicher **FuE-Bedarf** z.B. in folgenden Themenfeldern gegenüber:

- Verbesserung des theoretischen Verständnisses des Materialaufbaus (z.B. kohlenstoffaserverstärkte Kohlenstoffe), von Verstärkungs- sowie Härtungsmechanismen (z.B. ODS-Superlegierungen, Konzepte der dreidimensiona-

len Verstärkung bei CFC) sowie des Materialverhaltens bei hohen Temperaturen (Wechselwirkungen der Materialienbestandteile untereinander, Schadensszenarien etc.),

- Optimierung der Materialgefüge (z.B. Eingrenzung der Streuung der Festigkeitswerte und Optimierung des Sinterprozesses bei Keramiken, Zusammenhang zwischen eingestellten Fertigungsparametern und den erhaltenen Bauteileigenschaften bei CFC),
- Weiterentwicklung von gängigen Herstellungsverfahren (z.B. für gerichtet erstarrte Superlegierungen, Aufbringen von Wärmeschutzschichten), Entwicklung von neuen, kostengünstigen Fertigungsverfahren (z.B. zur Serienfertigung von intermetallischen Phasen) und
- Entwicklung geeigneter Prüfverfahren zur Qualitätssicherung im Fertigungsprozeß insbesondere im Hochtemperaturbereich (zur Reproduzierbarkeit von Materialeigenschaften im Herstellungsprozeß, da vielfach noch keine spezifischen Werkstoff- und Bauteilkennwerte existieren etc.).

IV. Supraleitende Materialien für energietechnische Anwendungen

Konventionelle Materialien, die für das Leiten elektrischen Stromes verwendet werden, weisen einen vom gewählten Material abhängigen sogenannten elektrischen Widerstand auf. Der elektrische Widerstand führt zur Erwärmung der Leiter, elektrische Energie geht verloren und wird in zumeist unerwünschte Wärmeenergie umgewandelt.

Anfang dieses Jahrhunderts entdeckten Physiker, daß sich bei einigen Materialien bei tiefen Temperaturen deren elektrischer Widerstand (und damit die elektrischen Leitungsverluste) auf unmeßbar kleine Werte reduziert. Daraus erwuchs die Hoffnung, dieses als Supraleitung bezeichnete Phänomen für die elektrische Energietechnik nutzen zu können. Allerdings dauerte es bis in die fünfziger Jahre, bis überhaupt technisch nutzbare Supraleiter vorlagen. Deren Einsatz beschränkt sich jedoch bis heute auf wenige Nischenanwendungen, wie etwa in der Medizin- und in der Forschungstechnik. Wesentliche Ursache dafür ist, daß diese als **"klassische" Supraleiter, Tieftemperatur-Supraleiter oder Low Temperature Superconductor (LTS)** bezeichneten Materialien ihre supraleitenden Eigenschaften nur bei Temperaturen unter -250 °C aufweisen, sie bei ihrem Einsatz also mit erheblichem technischen und energetischen Aufwand gekühlt werden müssen.

Mitte der achtziger Jahre wurden keramische Materialien entdeckt, die Supraleitung auch bei, verglichen mit den bis dahin bekannten Materialien, wesentlich höheren Temperaturen zeigen und die darum auch als **Hochtemperatur-Supraleiter (HTS)** bezeichnet wurden. Der Begriff führt allerdings in die Irre: Auch diese Materialien müssen, sollen sie supraleitende Eigenschaften aufweisen, gekühlt werden, und zwar in der Regel auf die Temperatur von flüssigem Stickstoff (-196 °C oder 77 K). Da dieses technisch einfacher, billiger und weniger energieintensiv ist als die bis dahin notwendigen Kühlverfahren, setzte ein Boom bei der Forschung zu den neuen sogenannten Hochtemperatur-Supraleitern ein. Dieser wurde nicht zuletzt durch die Hoffnung gefördert, mit diesen Materialien der Supraleitung technische Anwendungsbereiche zu erschließen, die den metallischen Supraleitern aus einer Reihe von Gründen verschlossen geblieben waren. Die elektrische Energietechnik wurde dabei als ein wesentliches Anwendungsgebiet für supraleitende Materialien gesehen.

Die hohen Erwartungen an den Einsatz supraleitender Materialien basieren in der Hauptsache auf drei Eigenschaften:

- aufgrund der geringen elektrischen Verluste der Supraleiter lassen sich höhere Wirkungsgrade elektrischer Anlagen und Systeme erzielen,
- die hohe Leistungsdichte ermöglicht reduzierte Volumina und Gewichte der elektrischen Systeme, und
- Supraleiter könnten die Realisierung einiger völlig neue Systeme für elektrotechnische Anwendungen gestatten.

Diesen Hoffnungen steht die Tatsache gegenüber, daß insbesondere für die Kühlung der Supraleiter aufwendige Techniken notwendig sind, die durch ihren Eigenverbrauch die energetischen Vorteile der verlustarmen Leitung reduzieren oder überkompensieren. Zudem ist die Fertigung der Leiter verglichen mit konventionellen Kupferleitern erheblich schwieriger und aufwendiger, die Systeme selbst sind häufig komplizierter, so daß erhebliche Anstrengungen unternommen werden müssen, um die gleiche Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit wie bei den heute verfügbaren konventionellen Alternativen zu erzielen, was wiederum zu höheren Anlagenkosten führt.

1. Supraleitung - Eigenschaften und Materialien

Kühlt man Materialien ab, so stellt man fest, daß bei einigen von diesen bei einer bestimmten Temperatur deutlich unterhalb der Umgebungstemperatur in einem sehr kleinen Temperaturintervall der elektrische Widerstand auf unmeßbar kleine Werte abnimmt. Dieses Phänomen wird **Supraleitung** genannt. Der **supraleitende Zustand** ist unter anderem durch die Fähigkeit vom Materialien gekennzeichnet, elektrischen Gleichstrom verlustfrei zu leiten. Bei Wechselstromanwendungen zeigen allerdings auch supraleitende Materialien Verluste.

Die Existenz der Supraleitung ist von drei gleichzeitig zu erfüllenden Bedingungen abhängig, deren Werte materialspezifisch verschieden sind:

- Unterschreiten einer bestimmten Temperatur (Sprungtemperatur oder kritische Temperatur),
- Unterschreiten der im Material auftretenden kritischen Stromdichte sowie
- Unterschreiten eines kritischen Wertes für die magnetische Induktion.

Diese drei kritischen Werte sind voneinander abhängig. Darum genügt es niemals, zur Charakterisierung eines Supraleiters allein die kritische Temperatur

anzugeben. Vielmehr sind auch die jeweiligen Randbedingungen (Magnetfeld und Stromdichte) von Bedeutung. Wird nur einer der kritischen Werte überschritten, so tritt wieder Normalleitung ein. Dieses Ereignis wird als **Quench** bezeichnet.

Für energietechnische Anwendungen wichtig ist die Feststellung, daß die sogenannte **Stromtragfähigkeit** - die maximal mögliche Stromdichte in einem Supraleiter - grundsätzlich begrenzt und zudem von der Betriebstemperatur und dem Magnetfeld abhängig ist. Da die kritische Temperatur sowohl durch das Magnetfeld als auch durch den Transportstrom herabgesetzt wird, muß ein stromtragender technischer Supraleiter bei einer Temperatur betrieben werden, die deutlich unterhalb der kritischen Temperatur liegt. Die Stromtragfähigkeit nimmt - konstante Temperatur vorausgesetzt - mit wachsendem Magnetfeld ab. Da viele energietechnische Anwendungen prinzipbedingt ein magnetisches Feld erfordern bzw. mit sich bringen, ist für diesbezügliche Supraleiterentwicklungen also weniger die - in Publikationen häufig angegebene - kritische Stromdichte im Nullfeld als vielmehr die kritische Stromdichte bei anwendungsrelevanten Feldern entscheidend.

1.1 Materialien für supraleitende Basisleiter

Das Auftreten von Supraleitung wurde im Jahre 1911 durch Heike Kamerlingh Onnes an Quecksilber bei 4,15 K (-269 °C) erstmalig gefunden. In den folgenden Jahren wurde Supraleitung an einer Vielzahl von metallischen Elementen, Legierungen und Verbindungen nachgewiesen. So sind 26 Elemente des Periodischen Systems bei Normaldruck supraleitend; fast unzählbar groß ist die Zahl der Legierungen und Verbindungen, die Supraleitung zeigen. Die damals und bis 1986 gefundenen Materialien mit Sprungtemperaturen bis etwa 25 K werden als klassische Supraleiter (abgekürzt LTS vom englischen low temperature superconductors) bezeichnet. Um die kritischen Temperaturen zu erreichen und zu unterschreiten, bedarf es hier spezieller Kühltechniken. Im allgemeinen wird der größte Teil der einströmenden Wärme mit flüssigem Stickstoff bis etwa 77 K (dies entspricht -196 °C) abgefangen, der Supraleiter selbst wird mit Helium auf dessen Siedetemperatur 4,2 K (-269 °C) gekühlt. Dieses Verfahren ist technisch aufwendig und hat insbesondere im Heliumteil einen geringen Wirkungsgrad.

Im Jahre 1986 wurde - von Bednorz und Müller - erstmals über die Beobachtung von Supraleitung oberhalb 30 K berichtet. Der besonders überraschen-

de Aspekt dieser Entdeckung war, daß das untersuchte Material ein Mischoxid der Metalle Lanthan, Barium und Kupfer darstellte, während die bis zu diesem Zeitpunkt entdeckten Supraleiter hingegen fast durchweg Metalle, Legierungen oder intermetallische Verbindungen waren. Weltweit begann die Suche nach Supraleitung in verwandten Oxidverbindungen. Diese führte in erstaunlich kurzer Zeit zum Erfolg. Bereits 1987 wurde $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ mit einer Übergangstemperatur von 92 K entdeckt, kurz darauf fand man mehrere Verbindungen mit Sprungtemperaturen von über 100 K. Für diese "neuen" Materialien genügt bereits eine wesentlich weniger aufwendige Kühlung mit flüssigem Stickstoff bei 77 K, um den supraleitenden Zustand zu erreichen. Diese Tatsache weckte die Hoffnung auf eine ausgedehnte technische Anwendung der Supraleitung.

1.2 Anforderungen an technische Supraleiter

Zwingende Voraussetzung für nahezu alle Anwendungen von Supraleitern in der Energietechnik ist es, aus dem Supraleiter (und weiteren Materialien) einen technischen Leiter fertigen zu können. **Technisch angewandte Supraleiter zeigen einen relativ komplexen Aufbau**, der zum einen aus prinzipiellen physikalischen Gründen notwendig, zum anderen das Ergebnis von anwendungsspezifischen Anforderungen und Optimierungen ist. Neben den für die Aufrechterhaltung der Supraleitung wichtigen Parametern (Temperatur, Stromdichte und Magnetfeld) sind dabei vor allem der Maximalstrom, mechanische Eigenschaften, die mögliche Fertigungslänge sowie die Kosten von Bedeutung. Generell läßt sich feststellen: **Ein allgemein anwendbares Leiterkonzept für technische Supraleiter gibt es nicht.**

Der überwiegende Anteil der heute technisch genutzten Supraleiter basiert auf NbTi oder den sogenannten A15-Phasen (z.B. Nb_3Sn , V_3Ga und Nb_3Al). In einem über 35-jährigen Reifeprozess haben sich diese Materialien etabliert und bilden die Grundlage einer eigenen Industrie. Die derzeit wohl an häufigsten eingesetzten supraleitenden Werkstoffe sind das NbTi und das Nb_3Sn . Obgleich letzteres günstigere physikalische Grenzwerte aufweist, wird wegen der einfacheren mechanischen Verarbeitbarkeit und Technologie zumeist das NbTi bevorzugt. Aus den weiteren Materialien wurden Prototypenleiter hergestellt, die für einige Anwendungen interessant sein könnten, deren Weiterentwicklung wegen der Priorität der Forschungen zu Hochtemperatur-Supraleitern jedoch derzeit zurückgestellt wurde.

Für Leiter aus metallischen Supraleitern existieren mehrere etablierte und gut beherrschte Fertigungsverfahren. Das wesentliche Know-how steckt in der Qualität des Ausgangsmaterials, in der Sorgfalt der Verarbeitung sowie vor allem im notwendigen Wechsel von Kaltverformungs- und Warmbehandlungsschritten, um möglichst hohe Stromtragfähigkeiten zu erzielen. Die heute gebräuchlichen Basisleiter sind im allgemeinen Multifilamentleiter (auch Vielkernleiter). Bei diesen sind zwischen einem und bis zu 100.000 supraleitende Filamente mit einer Dicke im Bereich von einigen Zehntel Mikrometern bis zu etwa 100 Mikrometern in einer Matrix aus normalleitendem Material eingebettet. Die Filamente bilden den stromtragenden Kern im Supraleitungsfall, die Matrix sorgt für elektromagnetische Stabilität des Leiters und trennt die Filamente voneinander. Multifilamentdrähte bilden das Grundbauelement technischer Supraleiter. Sie lassen sich verseilen, verkabeln, verflechten und zu rechteckigem Querschnitt kompaktieren.

Metallische Supraleiter werden vor allem in - kommerziell verfügbaren - Geräten zur magnetischen Tomografie und für die hochauflösende Kernspinresonanzspektroskopie eingesetzt. Daneben spielen Forschungsgeräte der Kern- und Teilchenphysik eine wesentliche Rolle. Entwicklungsarbeiten für supraleitende Magnete für solche Forschungsgeräte haben die Materialforschung und die Technologieentwicklung für metallische Supraleiter wesentlich geprägt und vorangetrieben.

Aus den Strukturelementen der neuen keramischen Hochtemperatur-Supraleiter wurden ab 1988 - mit wachsendem technischen Aufwand - eine Vielzahl von Kombinationen synthetisiert und analysiert. Zwischen 1986 und 1994 wurde an mehr als 40 chemisch verschiedenen Kupferoxid-basierten Keramiken Supraleitung nachgewiesen, insgesamt sind bis heute mehr als 100 HTS-Verbindungen bekannt. Trotz der regen Aktivitäten im Bereich der Materialforschung sind die bereits 1987 und 1988 entdeckten Verbindungen YBCO, Bi-2212 und Bi-2223 sowie (zu einem deutlich geringerem Umfang, u.a. wegen der Giftigkeit des Materials) Tl-1223 die für technische Anwendungen am intensivsten untersuchten Supraleiter.

1.3 Eigenschaften der wichtigen Hochtemperatur-Superleiter (HTS)

Neben der Sprungtemperatur sind bei Entscheidungen für den Einsatz von HTS in energietechnischen Anwendungen weitere Parameter von Bedeutung. Für die vier wichtigsten HTS sollen diese hier kurz zusammengefaßt werden.

Triaxial orientiertes (epitaktisches) YBCO zeigt im Vergleich zu den Bi-Materialien bei 77 K deutlich bessere Verankerungseigenschaften für den magnetischen Fluß und weist damit signifikant höhere Stromdichten auf. Bei polykristallinem oder c-Achsen-orientiertem Material bleiben zwar die hohen Stromdichten in jedem einzelnen Kristallit erhalten, jedoch kann dieses Potential durch den schlechten Interkorn-Kontakt (durch das deutliche "weak link"-Verhalten) nicht für Volumenproben genutzt werden. Höchste Werte für die kritische Stromdichte werden derzeit nur in auf einkristallinen Substraten epitaktisch aufgewachsenen dünnen YBCO-Schichten (wobei die triaxiale Ausrichtung durch das einkristalline Substrat induziert wird) sowie bei schmelztexturierten Volumenkörpern nachgewiesen. Durch die wesentlich geringere Anisotropie des YBCO fehlen ausgeprägte Gleitebenen, was seine Anwendung in Form gewalzter Bänder oder Drähte ausschließt. **Für die Herstellung technischer Leiter aus YBCO sind daher bislang nur aufwendige Beschichtungsverfahren aussichtsreich. Allerdings waren entsprechende Versuche erst bei Längen von wenigen Zentimetern erfolgreich.**

Bi-basierte Leitermaterialien werden weit weniger von "weak links" kontrolliert. Die BSCCO-Verbindungen verlieren die Supraleitfähigkeit bei 77 K bereits bei Magnetfeldern mittlerer Stärke, im Bereich von 20-30 K zeigen sie jedoch gute technische Daten.

Das billiger und preiswerter zu produzierende **Bi-2212** ist aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften für einen technischen Einsatz bei 77 K wohl nicht geeignet. Die limitierenden Effekte sind bei tieferen Temperaturen (<30 K) allerdings weit weniger bedeutsam, so daß Bi-2212-Bandleiter hier durchaus Einsatzmöglichkeiten, z.B. in Höchstfeldspulen, erwachsen könnten.

Bi-2223 scheint das für die meisten energietechnischen Anwendungen gegenwärtig wohl am besten geeignete HTS-Material zu sein. Zwar führen seine physikalischen Eigenschaften ("Flußkriechen") bei steigenden Temperaturen vor allem in Magnetfeldern zu einer drastischen Reduktion der kritischen Stromdichte. Diese dürfte jedoch für Niederfeldanwendungen auch bei Stickstofftemperatur noch ausreichend sein. Zugleich weist Bi-2223 eine hohe Ani-

sotropie und damit ausgeprägte Gleitebenen auf, die eine bessere mechanische Texturierung - z.B. durch Walzen - und damit die Herstellung von Drähten und Bändern erlauben.

Die Tl-Verbindungen (etwa Tl-1223) liegen in ihren für energietechnische Anwendungen relevanten Eigenschaften "zwischen" dem YBCO und den Bi-Verbindungen. Die "links" sind stärker als beim YBCO, die Flußverankerung jedoch weniger gut. Tl-Verbindungen bieten im Vergleich zu YBCO aufgrund der höheren Sprungtemperaturen für technische Anwendungen bei 77 K den Vorteil größerer Sicherheitsreserven gegenüber Störfällen im Betrieb. Die Flüchtigkeit und Giftigkeit ihrer Komponenten (Thallium) macht es jedoch für den praktischen Einsatz aus heutiger Sicht weniger attraktiv. Gleiches gilt für die supraleitenden Quecksilber-Verbindungen.

1.4 Technische Supraleiter für energietechnische Anwendungen auf der Basis von HTS

Für viele energietechnische Anwendungen entscheidend ist die Herstellung technisch nutzbarer Konfigurationen aus den HTS. Technische Supraleiter müssen für viele energietechnische Anwendungen neben der Grundbedingung der Supraleitung - Beibehalten der supraleitenden Eigenschaften bei Betriebstemperatur, Betriebsfeldstärke und Betriebsstromdichte - einer Vielzahl weiterer technischer und wirtschaftlicher Anforderungen nicht nur an ihren Betrieb, sondern auch an ihre Fertigung genügen. **Für Hochtemperatur-Supraleiter existiert - trotz umfangreicher Forschungsarbeiten und z.T. beachtlicher Erfolge - bis heute kein ausgereiftes Fertigungsverfahren.**

Viele Herstellungsverfahren für technische Supraleiter sind konzipiert und untersucht worden. Dabei wurden neue Verfahren entwickelt und bekannte Techniken modifiziert, mit verschiedenen Vorläufersubstanzen und Substraten experimentiert, Verfahrensparameter variiert und aussichtsreiche Ansätze in großer Vielfalt miteinander kombiniert. Dies hat zu einer beinahe unüberschaubaren Zahl von Prozeßvarianten geführt, von denen sich ein Großteil als nicht umsetzbar erwiesen hat.

Die bekannten Hochtemperatur-Supraleiter sind keramische Materialien. Da eine keramische Substanz nicht in einen Leiter gezogen oder gerollt (gewalzt) werden kann, müssen andere Methoden verwendet werden. Im Labormaßstab existieren derzeit einige erfolgversprechende Ansätze für die Fertigung von Drähten und Bändern auf HTS-Basis.

Das **bislang verbreitetste Verfahren für die Herstellung technischer Supraleiter auf HTS-Basis** ist der **Pulver-im-Rohr-Prozeß**, vom engl. powder-in-tube auch als **PIT-Prozeß** bezeichnet. Beim PIT-Prozeß wird entweder ein metallischer precursor (MP) oder ein Oxid-Pulver (OPIT) als Vorprodukt für den gewünschten Supraleiter verwendet. Dieses wird dann in ein Metallrohr - typischerweise Silber - eingebracht. Durch mechanische Verfahren wird der Supraleiter in die gewünschte Form (Draht oder Band) gebracht. Nach jedem Verformungsschritt wird er wärmebehandelt. Im Falle des MP-PIT geschieht dies in einer sauerstoffreichen Umgebung, der Sauerstoff diffundiert durch die Metallhülle und bildet den gewünschten Supraleiter. Eine zweite Produktionsmethode - eine Modifikation des PIT-Prozesses - ist das **"silver-wire-in-tube"**-Verfahren. Da in einem Leiter, der im PIT-Verfahren gefertigt wurde, der Strom meistens durch die am nächsten zum Silber gelegene Pulver-Schicht getragen wird, wird hierbei vor dem Einfüllen des Pulvers ein Silberdraht in der Mitte des Silbergefäßes platziert. Diese Methode ist im Vergleich zum PIT-Verfahren weniger kostenintensiv, weil weniger des - gegenwärtig noch sehr teuren supraleitenden Pulvers - Anwendung findet.

Multifilamentleiter aus HTS, die mit der PIT-Technik hergestellt werden, werden aus gebündelten Einzelleitern gefertigt. Der PIT-Prozeß nutzt weitgehend etablierte, für eine Massenfertigung geeignete Verfahrensschritte, weshalb ihm für die kommerzielle Fertigung von HTS-basierten Leitern bislang die größte Bedeutung eingeräumt wird. Allerdings läßt er sich nur für Supraleiter auf Bi-Basis anwenden, da diese Materialien wegen ihrer Struktur eine vergleichsweise einfache Texturierung gestatten. Andere HTS zeigen diese Eigenschaft nicht.

Zwei weitere Techniken für die Leiterfertigung - **IBAD (ion-beam-assisted deposition, ionenstrahlunterstützte Deposition)** und **RABiTS (rolling-assisted biaxial texture substrate)** - sind gegenwärtig Gegenstand intensiver FuE-Tätigkeit. Sie führen zu dicken Schichten mit einer makroskopischen, biaxialen Textur. Diese Verfahren sind insbesondere auch für YBCO und Tl-2223 (also Materialien, die wesentlich günstigere intrinsische Eigenschaften als die Bi-basierten HTS aufweisen) geeignet. Auf ihrer Basis hergestellte Leiter werden - in Abgrenzung zu den PIT-Leitern - gelegentlich auch als "Leiter der zweiten Generation" bezeichnet.

Die Herstellung langer Leiter mit hohen kritischen Stromdichten ist erst beim Bi-2223 (über 1 km) und beim Bi-2212 (etwa 0,5 km) gelungen. Aufgrund des kleinen Irreversibilitätsfeldes können beide Bi-Materialien bei einer Temperatur von 77 K derzeit allerdings nur bei kleinen Magnetfeldern eingesetzt

werden: Das einfacher und preiswerter zu produzierende Bi-2212 ist nur im Nullfeld anwendbar, für Bi-2223 ist eine Anwendung bei Feldern unterhalb 1 T denkbar. Damit ließen sich auf der Basis von Bi-2223-Bandleitern bereits HTS-Kabel und Transformatoren mit einer Betriebstemperatur von 77 K realisieren, für andere energietechnische Anwendungen sind die Feldwerte noch zu niedrig. Um dem Rechnung zu tragen, wird bei diesen bei Labormustern und Demonstratoren (mit Bi-2212 oder bei höheren Feldern) der Temperaturbereich zwischen 20 und 30 K genutzt.

Bei dem Material YBCO ist es bislang nicht gelungen, längere Bänder mit einem hohen Grad von Textur herzustellen. Für YBCO sind wegen der erforderlichen Stromdichten im Betriebsmagnetfeld bislang hauptsächlich Beschichtungsverfahren erfolgreich, bei denen YBCO-Schichten aus der Dampfphase auf einkristalline Substrate abgeschieden werden. Einkristalle scheiden für Leiteranwendungen aus, für technische Leiter werden Schichtverfahren erprobt. Aus YBCO wurden Testleiter mit den für energietechnische Anwendungen erforderlichen Stromdichtewerten bei 77 K in Meterlänge gefertigt, größeren Leiterlängen stehen gegenwärtig aber die hohen Anforderungen an den Orientierungsgrad der Kristallite und die geringen Produktionsgeschwindigkeiten der eingesetzten Abscheideverfahren entgegen.

Bei den HTS-Volumenproben sind schmelztexturiertes YBCO ("ST-YBCO") wegen seiner Magnetfeldverankerung sowie der daraus resultierenden hohen kritischen Stromdichte und Bi-2212 wegen seiner Verfügbarkeit in großen, mechanisch leicht bearbeitbaren Volumenkörpern bei einem für viele Anwendungen ausreichenden Wert für die kritische Stromdichte die einzigen anwendungsrelevanten Materialien. Schmelztexturierungsverfahren sind allerdings wegen der geringen Produktionsgeschwindigkeiten von einigen Millimetern pro Stunde sowie der Tatsache, daß auch hier die (wenigen) Korngrenzen den Stromfluß limitieren, für die Herstellung von Drähten und Bändern wohl nicht geeignet. Sie haben jedoch - neben den o.g. Anwendungen - auch gute Chancen für spezielle Anwendungen in HTS-Stromzuführungen.

1.5 Kosten für Leiter

Projektionen über die zu erwartenden Kosten von HTS-Leitern sind - nicht nur wegen der unklaren Preisentwicklung bei den Ausgangsmaterialien, sondern vor allem, weil die tatsächlich zur Anwendung gelangenden Fertigungstechniken weder bekannt noch gar kalkulierbar sind - mit großen Unsicherheiten behaftet.

Als unter den Entwicklern weitgehend akzeptiert gilt aber das vom amerikanischen Energieministerium aufgestellte Kosten-/Leistungsfähigkeitsziel für HTS-Leiter, das bei 10 US\$/(kA m) bei 77 K und 0 T liegt und etwa dem Preis von "high-quality"-Nb₃Sn-Draht für 4,2 K und 0 K entspricht. Dem Kostenziel liegt die Annahme zugrunde, daß ein potentieller Kunde bereit sei, den sonst für den Nb₃Sn-Draht aufzuwendenden Preis auch für den noch nicht so weit entwickelten, aber bei höherer und damit leichter zugänglicherer Temperatur arbeitenden HTS-Draht zu zahlen.

2. Anwendungen der Supraleitung in der Energietechnik

Die Elektrizitätsversorgung steht seit geraumer Zeit im Mittelpunkt von Überlegungen zu Anwendungen von Supraleitern in der Energietechnik. Seit Jahrzehnten werden Arbeiten zum Einsatz von Tieftemperatur-Supraleitern bei Anlagen und Systemen der elektrischen Energietechnik durchgeführt. Mit der Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleiter Mitte der achtziger Jahre kam es zu einem neuen "Boom" in diesem Bereich, in einigen Staaten machte sich gar eine gewisse Euphorie breit. Dieser "zweite Anlauf" wurde nicht zuletzt von der Hoffnung getragen, die Aufwendungen für die Kühltechnik, die zur Unwirtschaftlichkeit nahezu aller tieftemperatursupraleiterbasierter Anwendungen führten, zu reduzieren und damit der Supraleitung in diesem Bereich zum Durchbruch verhelfen zu können.

Bis heute ist kein supraleitendes Betriebsmittel für die Elektrizitätsversorgung - weder auf der Basis von Tieftemperatur- noch gar von Hochtemperatur-Supraleitern - über den Status von Prototypen hinausgekommen, keines hat längere Testreihen unter Realbedingungen im Netz absolviert. Die Ursachen dafür liegen nach unserer Einschätzung eher auf der Seite der erwarteten Nachfrage.

Die Ausgangssituation für die Einführung neuer Techniken in der Elektrizitätsversorgung in Deutschland (und dies gilt in ähnlicher Form auch für viele andere Industrieländer, vor allem in Europa) ist derzeit ungünstig: Die Versorgungsnetze sind gut ausgebaut, die Lastzuwächse sind gering oder stagnieren, die Elektrizitätsversorger decken nur den Ersatzbedarf, der in Anbetracht der Langlebigkeit der Betriebsmittel und dem noch nicht weit zurückliegenden Ausbau der Netze eher gering einzuschätzen ist. Forschung und Entwicklung der

Elektrizitätsversorger konzentrieren sich weniger auf neue Technologien als auf die Optimierung der bekannten konventionellen Betriebsmittel.

Dieser geringe Innovationsbedarf hat auch Auswirkungen auf den Forschungsbereich. Das Engagement der industriellen FuE ist vergleichsweise gering, derzeitige Untersuchungen finden vor allem in Universitäten und staatlichen Forschungseinrichtungen statt.

Problematisch ist bei einigen supraleitenden Betriebsmitteln aufgrund technischer und wirtschaftlicher Gegebenheiten die Integration in die bestehenden Netze. Zudem werden seitens der EVU zur Gewährleistung einer hohen Versorgungsqualität hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Betriebsmitteln gestellt, deren Erreichbarkeit für supraleitende Anlagen bislang nicht nachgewiesen ist. Neue, nicht innerhalb der Elektrizitätswirtschaft "gewachsene" Techniken wie einige Anwendungen der Supraleitung stoßen außerdem bei manchen Vertretern der Elektrizitätsversorger auf eine "psychologische Hürde".

Anforderungen an supraleitende Komponenten in der elektrischen Energietechnik

Supraleitende Komponenten für Anwendungen in der elektrischen Energietechnik gestatten entweder völlig neue technische Systeme oder sollen konventionelle Systeme aufgrund günstigerer techno-ökonomischer Parameter ablösen.

Betriebsmittel in elektrischen Versorgungsnetzen stehen untereinander in funktionalen Beziehungen. Dieser Tatsache wird durch ihre Auslegung Rechnung getragen, wobei nicht nur elektrische Anforderungen und Beanspruchungen (wie Betriebsstromtragfähigkeit, Kurzschlußstromtragfähigkeit und Isoliervermögen), sondern auch Systemanforderungen (Betriebsverhalten, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, An- und Abfahrverhalten), andere technische Anforderungen (z.B. Wartungs- und Reparatüreigenschaften, Transportierbarkeit, Masse, Volumen und Hilfsenergieverbrauch) sowie nicht zuletzt wirtschaftliche Randbedingungen in die Optimierung eingehen.

Bei supraleitenden Betriebsmitteln fallen in der Regel nennenswerte Verluste nur durch die Kühlung an, wohingegen bei konventionellen Betriebsmitteln vor allem die ohmschen Leitungsverluste von Bedeutung sind. Letztere sind in der Regel höher. Kapitalisiert man diese über die gesamte Lebensdauer des Betriebsmittels, so zeigt sich, daß supraleitende Betriebsmittel höhere Investitionskosten (je nach Anwendung zwischen 150 und 350 %) als konventionelle Betriebsmittel aufweisen dürfen. Bedingt durch die vergleichsweise hohen Kosten für den Leiterwerkstoff und die Zusatzkosten für die erforderliche Kryotechnik

wird der break-even-Punkt für supraleitende Betriebsmittel dort erwartet, wo hohe Leistungen umgesetzt bzw. transportiert werden sollen.

Allgemein wird seitens der EVU die Forderung aufgestellt, daß neue Betriebsmittel - und dies gilt auch für supraleitende Betriebsmittel - die Versorgungsqualität eines Netzes keineswegs negativ beeinflussen dürfen. Das Niveau der Spannungs- und Frequenzqualität sowie die Versorgungszuverlässigkeit müssen mindestens erhalten bleiben, eher sogar noch verbessert werden - und dies möglichst bei sinkendem Aufwand.

Supraleitende Betriebsmittel, die die gleichen Aufgaben wie konventionelle Betriebsmittel erfüllen sollen, besitzen veränderte elektrische und betriebliche Eigenschaften. Diese erschweren zum einen ihre Integration in die existierenden Versorgungsstrukturen: Gegenwärtige Versorgungsnetze sind aus physikalisch-technischen und wirtschaftlichen Gründen hierarchisch aufgebaut. Wegen der mit dem Quadrat des Stromes wachsenden ohmschen Verluste werden in konventionellen Systemen hohe Leistungen mit hohen Spannungen - und entsprechend reduzierten Strömen - transportiert. In supraleitenden Betriebsmitteln spielen die Übertragungsverluste praktisch keine Rolle, hier kann die Hochleistungsübertragung auch bei niedrigeren Spannungen und entsprechend höheren Strömen erfolgen (auch wirtschaftlich-technische Kriterien sprechen für eine solche Auslegung). Problematisch ist hierbei, daß am Endpunkt einer supraleitenden Übertragung eine hohe Leistung auf niedriger Spannungsebene angeboten wird, das konventionelle System für eine Weiterübertragung aber - wie oben angeführt - nicht geeignet ist.

Ein weiteres Problem bei der Markteinführung supraleitender Betriebsmittel erwächst aus der Tatsache, daß supraleitende Betriebsmittel wegen der vorhandenen Kühlanlage und der Möglichkeit eines Quenches als theoretisch weniger zuverlässig gelten. Gesicherte Aussagen über die tatsächliche Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit supraleitender Betriebsmittel, die diese Annahmen möglicherweise relativieren könnten, sind jedoch erst nach einigen Jahren Betriebserfahrung möglich. Bislang existieren jedoch keine längere Zeit unter Alltagsbedingungen getestete Demonstratoren oder gar im Netz eingesetzte Prototypen.

3. Resümee

Die Anwendung der Supraleitung in der elektrischen Energietechnik wurde schon kurz nach ihrer Entdeckung Anfang dieses Jahrhunderts diskutiert. Tat-

sächlich dafür geeignete Materialien (sogenannte Typ-II-Supraleiter) wurden jedoch erst in den fünfziger und sechziger Jahren gefunden. Drähte aus konventionellen (Tieftemperatur-) Supraleitern sind heute Stand der Technik. Sie finden Anwendung vor allem in der MRI und bei Beschleunigermagneten. In den siebziger und achtziger Jahren wurden auch energietechnische Anwendungen der LTS untersucht. Die meisten Projekte (v.a. Kabel und rotierende Maschinen) wurden jedoch wegen fehlender Wirtschaftlichkeit - die sich nicht zuletzt infolge geänderter Rahmenbedingungen durch die Entwicklungen auf den Energiemärkten entgegen den ursprünglichen Erwartungen entwickelte - wieder aufgegeben.

Die Entdeckung von hochtemperatursupraleitenden Materialien Mitte der achtziger Jahre ließ alte Erwartungen bezüglich des baldigen Einsatzes supraleitender Techniken in der Elektrizitätswirtschaft wiederauferstehen. Dabei wurden durch die neuen Materialien die den energietechnischen Anwendungen zugrundeliegenden physikalisch-technischen Prinzipien und die Rahmenbedingungen ihres Einsatzes nicht grundlegend geändert. Durch die Nutzung eines "höheren" Temperaturbereichs für die Kühlung könnten jedoch einfachere und billigere Kühltechniken Anwendung finden, zudem könnte der Aufwand für die thermische Isolation reduziert werden. Dem stand gegenüber, daß die Eigenschaften der neuen Materialien zunächst untersucht und verstanden werden mußten und Verfahren für die Fertigung von für die jeweilige Anwendung geeigneten Leitern zu entwickeln waren.

Bei den "klassischen" Hochtemperatursupraleitern ist an einer Weiterentwicklung der bekannten sowie an der Entwicklung neuer Konzepte und Herstellungsprozesse für für energietechnische Anwendungen geeignete Leiter zu arbeiten.

Die "Kontrollierbarkeit" eines Materials ist ein fundamentaler Faktor für seine praktische Anwendung. Bei den Hochtemperatursupraleitern wurden in den vergangenen zehn Jahren zahlreiche Fortschritte erzielt, das Verständnis der wichtigsten Materialien ist inzwischen ausreichend. Eine akzeptierte physikalische Theorie der Hochtemperatur-Supraleitung ist jedoch - trotz verbreiteter Anstrengungen und zahlreicher origineller und stimulierender Ideen - bislang nicht in Sicht. Weitere Grundlagenforschung erscheint hier notwendig.

Es wurden in den letzten Jahren zahlreiche Verfahren zur Fertigung von Leitern auf der Basis von HTS-Materialien entwickelt. Jedes davon weist spezifische Stärken und Schwächen auf. Für eine Umsetzung der Prozesse in eine industrielle Fertigung scheint sich (sowohl aus physikalisch-technischen wie auch aus wirtschaftlichen Gründen) als Leitprinzip herauszukristallisieren, diese Prozesse möglichst flexibel und einfach zu halten und nur so viele Prozessschritte durchzuführen, wie zum Erreichen der geforderten Parameter notwendig.

Unter den heute umfangreich untersuchten HTS-Materialien zeigt YBCO im Vergleich zu den Bi-Materialien bei 77 K deutlich bessere Verankerungseigenschaften für den magnetischen Fluß und weist damit signifikant höhere Stromdichten auf. Durch seine wesentlich geringere Anisotropie fehlen jedoch ausgeprägte Gleitebenen, was seine Anwendung in Form gewalzter Bänder oder Drähte ausschließt. Beschichtungsverfahren zur Leiterherstellung waren erst bei Längen von wenigen Zentimetern erfolgreich. Besonders aussichtsreich scheint gegenwärtig die Abscheidung dicker Schichten von YBCO auf flexiblen Metallsubstraten und deren anschließende Weiterverarbeitung mittels verschiedener technischer Ansätze (IBAD; RABiTS) zu sein. Bis damit längere Leiter produziert werden können, werden aber wohl noch einige Jahre Entwicklungstätigkeit notwendig sein. Bi-basierte Leitermaterialien (BSCCO-Verbindungen) weisen jene hohe Anisotropie auf, die eine bessere mechanische Texturierung - z.B. durch Walzen - und damit die Herstellung von Drähten und Bändern erlauben. Allerdings verlieren sie die Supraleitfähigkeit bei 77 K bereits bei Magnetfeldern mittlerer Stärke, die bei vielen energietechnischen Anwendungen als integraler Bestandteil des Funktionsprinzips auftreten. Im Bereich von 20-30 K zeigen PIT-gefertigte Bi-Leiter jedoch gute technische Daten. Durch neue metallurgische und andere Fertigungstechniken hofft man, die Flußverankerung in Bi-Leitern zu verbessern und so die Supraleitung auch bei "höheren" Temperaturen und/oder stärkeren Magnetfeldern erhalten zu können. Mit kurzen Drähten wurden bereits vielversprechende Ergebnisse erzielt. Ob diese Techniken jedoch für größere Leiterlängen praktikabel und wirtschaftlich sind, bleibt abzuwarten.

Obwohl heute bereits mehr als 100 Verbindungen bekannt sind, die als Hochtemperatur-Supraleiter bezeichnet werden können, sollte die Suche nach weiteren Materialien fortgesetzt werden. Dabei sollte das Hauptaugenmerk weniger auf Materialien mit höheren kritischen Temperaturen gelegt werden. Für die meisten energietechnischen Anwendungen wird es vielmehr darauf ankommen, Supraleiter zu finden, die

- sich fertigungstechnisch vergleichsweise einfach in die für die Anwendung notwendige Form (vor allem lange Drähte) bringen lassen,
- in der Lage sind, auch bei starken Magnetfeldern, bei höheren Temperaturen (mindestens des flüssigen Stickstoffes) sowie ggf. bei moderaten mechanischen Beanspruchungen die Supraleitung aufrechtzuerhalten,
- geringe Probleme im Hinblick auf Ressourcenverfügbarkeit, Toxizität und Entsorgbarkeit aufweisen.

Dabei wird die **empirische** Suche nach neuen Materialien - auch wenn in Zukunft eine geeignete theoretische Erklärung des Mechanismus der Hochtemperatur-Supraleitung gefunden werden sollte - weiter die zentrale Rolle einnehmen.

Perspektiven für den Einsatz supraleitender Techniken

Supraleitende Komponenten für Anwendungen in der elektrischen Energietechnik gestatten - zunächst hier ungeachtet des eingesetzten Supraleiters - entweder völlig neue technische Systeme oder sollen konventionelle Systeme aufgrund günstigerer techno-ökonomischer Parameter ablösen. Die Substitution konventioneller technischer Systeme durch solche, die unter Nutzung von Supraleitern arbeiten, hängt von zahlreichen Bedingungen ab. Neben Verbesserungen der Gesamtwirtschaftlichkeit, d.h. der Wirtschaftlichkeit über die gesamte Lebensdauer des Betriebsmittels, sind zahlreiche weitere Randbedingungen zu erfüllen. So müssen supraleitende Betriebsmittel den betrieblichen Anforderungen, insbesondere im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit sowie bezüglich der Auswirkungen ihres Einsatzes auf die Stabilität und die Funktionsfähigkeit des Elektrizitätsversorgungssystems, Rechnung tragen. Selbst wenn sich energietechnische Anwendungen von Supraleitern also als machbar erweisen, so müssen sie sich doch dem technisch-ökonomischen Wettbewerb mit - sich ständig weiter entwickelnden - konventionellen Techniken stellen und ihre Überlegenheit nachweisen. Nicht in jedem Falle werden dabei die supraleitenden Lösungen zum Zuge kommen.

Der entscheidende Durchbruch für energietechnische HTS-Anwendungen bei 77 K wird erst dann eintreten können, wenn sich diese in geeigneten technischen Konfigurationen fertigen lassen. Unklar ist, mit welchen elektrischen Parametern und zu welchen Kosten geeignete technische Supraleiter auf HTS-Basis tatsächlich in industriellem Maßstab gefertigt werden können. Festzuhalten ist, daß es **den** "Allzweck"-Supraleiter für energietechnische Anwendungen nicht geben wird. Vielmehr werden technisch-ökonomische Optimierungen bei der Wahl des supraleitenden Materials wie auch der Leiterkonfiguration zu vielfältigen Konzepten führen.

Für die Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Anwendungen läßt sich - die Verfügbarkeit geeigneter und "bezahlbarer" Leiter vorausgesetzt - aus heutiger Sicht zusammenfassend feststellen:

- Bei **rotierenden Maschinen (große Motoren und Generatoren)** ist eine Verbesserung des Wirkungsgrades von vergleichsweise geringer Bedeutung.

Solche Systeme erreichen heute Wirkungsgrade um 98 %, der Einsatz supraleitender Materialien läßt Steigerungen von 1-1,5 %-Punkten erwarten. Dies kann - vor allem bei den großen Motoren, von denen größere Stückzahlen in Deutschland betrieben werden - gesamtwirtschaftlich durchaus relevant sein. Allerdings liegen wesentlich höhere Effizienzpotentiale bei den mit den elektrischen Maschinen verbundenen Systemen, etwa den Dampfturbinen bei den Generatoren bzw. Pumpen oder Lüftern bei den Motoren. Supraleitende Generatoren sind erst bei Baugrößen von mehreren hundert MVA wirtschaftlicher als konventionelle Systeme, die Nachfrage nach Generatoren dieser Größenordnung ist angesichts der momentanen Entwicklung im Kraftwerksbereich eher klein. Inwieweit weitere Eigenschaften wie geringere Baugröße, reduziertes Gewicht und verbesserte betriebliche Eigenschaften tatsächlich vom Markt honoriert werden, ist offen.

Längerfristig dürften sich Perspektiven für den supraleitenden Generator vor allem dann bieten, wenn wieder größere (nukleare ?) Kraftwerke gebaut werden sollten.

- Die nahezu widerstandsfreie Stromleitung in **supraleitenden Kabeln** gilt in der Öffentlichkeit als die attraktivste Anwendung der Supraleitung. Zahlreiche Projekte auf der Basis von HTS-Materialien werden gegenwärtig durchgeführt. Dabei liegt die kurzfristige Perspektive der meisten Arbeiten beim Einsatz solcher Kabel für den Stromtransport in Ballungsgebieten (vor allem bei der Leistungserhöhung ("Retrofit") bestehender Systeme). Längerfristig wird ihr Einsatz in einem - noch zu konzipierenden und vor allem auf seine über die reine Funktionalität hinausgehenden Aspekte zu diskutierenden - weltumspannenden Elektrizitätsnetz gesehen, wobei hier Hochspannungsgleichstromübertragung in beträchtlichem Umfang Anwendung finden dürfte.
- Auch bei **supraleitenden Transformatoren** spielen Effizienzverbesserungen - auch wenn sie durchaus nicht vernachlässigbar sind - aus Anwendersicht eine geringere Rolle als ihre verbesserten betrieblichen Eigenschaften, die Vorteile durch den Wegfall des Isolierstoffes Öl sowie die spezifische Gewichts- und Volumenreduktion, die Märkte vor allem im Retrofitting-Bereich in dicht besiedelten Räumen eröffnen könnte. Gegenwärtig befinden sich mehrere Prototypen in der Felderprobung.
- Die **Energiespeicherung in supraleitenden Spulen (SMES)** ist mit kleinen Anlagen für Zwecke der Sicherung der Qualität der Stromversorgung bereits kommerziell verfügbar. Mehrere LTS-Anlagen befinden sich im Regelbetrieb, mehrere Unternehmen arbeiten an LTS- oder HTS-basierten Sy-

stemen. In Abhängigkeit von der Entwicklung der wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen in den Elektrizitätsmärkten können solche Systeme in Zukunft wachsende Bedeutung erlangen.

Größere SMES-Anlagen zum Zwecke des Tageslastausgleichs sind aus heutiger Sicht nicht wirtschaftlich. Abhängig von der elektrizitätswirtschaftlichen Struktur, in die die Speichertechnik eingebunden wird, könnten sie zudem ökologische Nachteile bringen. Langfristig könnte - unter der Voraussetzung starker Veränderungen in den Organisationsstrukturen der Elektrizitätswirtschaft und in der Zusammensetzung des Kraftwerksparks - verstärkter Bedarf an Speichertechnologien entstehen. Der gegenwärtige Stand der Technik zeigt allerdings für den Tagesspeichereinsatz keine eindeutige technische oder wirtschaftliche Überlegenheit von SMES gegenüber anderen konventionellen Speichertechniken. Es sind keine Pläne für die Entwicklung großer SMES bekannt.

- Eine denkbare Alternative zu den kleinen SMES sind **Schwungmassenspeicher (Schwungräder) mit supraleitenden Lagern**. Grundsätzlich für die gleichen Anwendungen wie kleine SMES einsetzbar, wird die weitere Entwicklung entscheiden müssen, welche Technik aus wirtschaftlicher und betrieblicher Sicht attraktiver ist.
- Unter den supraleitenden Techniken stoßen derzeit allein die **supraleitenden Strombegrenzer** auf größeres Interesse. Man verspricht sich von ihnen vor allem eine Verbesserung der Spannungsqualität und geringere Netzzrückwirkungen. Unklar ist bislang jedoch noch, welches Funktionsprinzip die günstigen Realisierungschancen hat und in welchem Konzept es tatsächlich umgesetzt wird. Hier sind noch weitere Entwicklungsarbeiten vonnöten.

Bei den komplexen energietechnischen Systemen und deren langen Entwicklungs- und Erprobungszeiten sowie den derzeit ungewissen Aussichten auf einen kommerziellen Erfolg von supraleitenden Systemen erscheint es unwahrscheinlich, daß eine rein industrielle Forschung und Entwicklung in diesem Bereich in größerem Umfang realisiert wird. Im Wettbewerb mit den über lange Zeit erprobten und weiterentwickelten konventionellen Betriebsmitteln in der elektrischen Energietechnik sind neue Techniken beim Nachweis der Funktionalität, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit immer im Nachteil. Staatliche Unterstützung wäre - neben der Grundlagenforschung - vor allem bei Pilotprojekten und Demonstrationsanlagen unumgänglich, sollen diese Techniken weiterentwickelt und erprobt werden.

Für die Beurteilung der langfristigen Perspektive von supraleitenden Energietechniken wird es nicht ausreichend sein, diese jeweils den konventionellen Alternativen gegenüberzustellen. Von Interesse wäre es, ein "supraleiterbasiertes" Elektrizitätsversorgungssystem - und den Weg dorthin - zu entwerfen und gesamtwirtschaftlich mit dem gegenwärtigen und sich in neuen Rahmenbedingungen weiter entwickelnden System in Bezug zu setzen.

V. Fazit und Forschungsbedarf

In der hier vorgelegten Studie werden mehrere Werkstoffgruppen für energietechnische Anwendungen vertieft untersucht:

- Hochtemperatur-Werkstoffe für Gasturbinen
- Photovoltaik-Materialien
- Supraleitende Materialien

Diese sowohl aus Materialsicht wie aus der Perspektive der möglichen Einsatzfelder heterogene Auswahl sowie die unterschiedlichen Zeithorizonte eines möglichen Einsatzes dieser Materialien in neuen Techniken machen ein vergleichendes Fazit schwierig.

Gasturbinen sind heute eine Standardtechnik in der Erzeugung elektrischer Energie, aber auch bei Antrieben. Es wird erwartet, daß sie - bedingt durch wirtschaftliche und technische Vorteile gegenüber anderen Kraftwerkstypen - in der Elektrizitätsversorgung wachsende Bedeutung erlangen werden. Eine Verbesserung ihrer Wirkungsgrade kann damit - bei konstantem Stromverbrauch - erheblich zur Reduktion des Brennstoffverbrauchs und damit der CO₂-Emissionen beitragen.

Die für den Wirkungsgrad entscheidende, d.h. thermodynamisch relevante Größe ist die sog. ISO-Turbineneintrittstemperatur, die die mit der notwendigen Bauteilkühlung verbundene Abkühlung des Gases berücksichtigt. Die maximalen Heißgastemperaturen sind deutlich höher, die tatsächlichen Bauteiltemperaturen auf der Oberfläche liegen aufgrund der Kühlung niedriger. Eine Erhöhung der Einsatztemperatur der verwendeten Werkstoffe kann nun einerseits zur Steigerung der absoluten Heißgastemperaturen bei gleichbleibender Kühlung und andererseits zur Verringerung des Kühlaufwandes bei konstanten Verbrennungstemperaturen genutzt werden. Auch eine Kombination dieser Maßnahmen ist möglich. Im Vordergrund steht heute die Verringerung des Kühlaufwandes, da bei Zunahme der absoluten Heißgastemperaturen eine verstärkte Bildung etwa von Stickoxiden zu verzeichnen ist. Technische Möglichkeiten der Verbrennungsführung hinsichtlich einer minimierten Schadstoffbildung müßten entsprechend weiterentwickelt werden.

Weitere wichtige Probleme bei der Entwicklung hochtemperaturfester Werkstoffe entstehen aus den thermischen Spannungen aufgrund stationärer und instationärer Temperaturdifferenzen, den beträchtlichen mechanischen Belastungen v.a. aufgrund der großen Fliehkraftbeanspruchung, den erforderlichen Oxi-

dations- und Korrosionsfestigkeiten sowie der notwendigen hohen Zuverlässigkeit der verwendeten Werkstoffe.

Der heutige Stand der Technik beim Bau der gegenwärtig anspruchsvollsten stationären Gasturbinen ist durch den Einsatz gerichtet bzw. einkristallin erstarrter Superlegierungen für die Ausrüstung der Turbinenlaufschaufeln gegeben. Relativ kurzfristige und mit hoher Erfolgswahrscheinlichkeit realisierbare Verbesserungen verspricht man sich von der Weiterentwicklung der heute standardmäßig als Gußlegierungen eingesetzten Superlegierungen auf Nickelbasis. Hier wird laufend an Veränderungen der Legierungsbestandteile und an neuen Prozeßtechnologien gearbeitet. Da mit dem Einsatz vollkeramischer Schaufeln wegen der mangelnden Schadenstoleranz in absehbarer Zeit nicht zu rechnen ist, erlangt die Nutzbarmachung von geeigneten keramischen Wärmedämmschichten eine zunehmende Bedeutung. Bei diesen sollten in Zukunft auch gradierte Strukturen eine wichtige Rolle spielen. Weitere entscheidende Steigerungen von Eintrittstemperatur und Wirkungsgrad durch Verwendung massiver Bauteile aus neuen Werkstoffen wie Intermetallischen Phasen, Strukturkeramiken (einschl. langfaserverstärkten Keramiken) oder kohlenstoffaserverstärktem Kohlenstoff sind frühestens mittelfristig zu erwarten. Inwieweit die genannten Werkstoffe in der Summe ihrer Eigenschaften überhaupt Vorteile gegenüber ihren ebenfalls ständig weiterentwickelten klassischen Konkurrenten werden bieten können, kann derzeit nicht abschließend beurteilt werden.

Die Nutzung der Solarenergie durch **Photovoltaik** oder Solarthermie zählt mittlerweile zum Stand der Technik. Der energiewirtschaftliche Durchbruch, insbesondere der Photovoltaik, wird bislang u.a. durch die verhältnismäßig hohen Herstellungskosten der photovoltaischen Solarzellen und deren geringen Wirkungsgrad sowie die aufwendigen Maßnahmen zur Systemeinbindung gehemmt. Lediglich der PV-Einsatz bei Insellösungen hat sich als schon heute wirtschaftlich erwiesen. Neben Arbeiten zur Verbesserung von Solarzellen-Konzepten auf Basis des "klassischen" Zellenmaterials Silizium wird deshalb weltweit nach neuen Materialien für photovoltaische Zellen gesucht. Diese Materialien sollen einen hohen Wirkungsgrad der Solarzellen ermöglichen, kostengünstig herstellbar und langlebig sein und zu geringen Umweltbelastungen bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung/Rezyklierung führen.

Die bisher vorgeschlagenen neuen Materialien (etwa Galliumarsenid, Cadmiumtellurid oder Kupferindiumdiselenid) für Solarzellen konnten sich nicht gegenüber photovoltaischen Zellen auf Siliziumbasis durchsetzen. Derzeit und für die nächsten 10 Jahre wird kristallines Silizium wohl das wichtigste Material für die Solarzellenherstellung bleiben, da es viele Vorteile aufweist und von

dem hohen Technologiestand der Mikroelektronik profitiert. Nachteilig sind der große Materialverbrauch von kristallinem Silizium und die aufwendige Si-Wafer-Technologie, darum könnten Dünnschichttechnologien mit großflächiger Abscheidung die Solarzellentechnologien der Zukunft werden. Bis diese Dünnschichtzellen die kristallinen Siliziumzellen in bezug auf Wirtschaftlichkeit übertreffen werden, ist aber noch ein erheblicher Entwicklungsaufwand notwendig. Die verschiedenen konkurrierenden Dünnschichtzellenkonzepte befinden sich in einem sehr unterschiedlichen Entwicklungsstadium. Derzeit ist es nicht möglich, einer Technologie einen eindeutigen technisch-ökonomischen Vorteil gegenüber den anderen zuzusprechen, Forschung und Entwicklung müssen deshalb auf absehbare Zeit "breitbandig" durchgeführt werden, um nicht eine wichtige Option zu verlieren. Bedarf wird vor allem in folgendem gesehen: Die "etablierten" Technologien der kristallinen Silizium-Solarzellen müssen so weiterentwickelt werden, daß die Solarzellen einen höheren Wirkungsgrad aufweisen, weniger Material benötigen und kostengünstiger gefertigt werden können. Die innovativen Dünnschichtzelltechnologien müssen diese drei Anforderungen natürlich auch erfüllen. Zunächst aber muß für alle (bis auf das amorphe Silizium) der Nachweis erbracht werden, daß sie überhaupt großflächig und homogen hergestellt werden können.

Während Photovoltaik systematisch im Bereich der Energieumwandlung angesiedelt werden könnte, ist die Anwendung von **Supraleitern** in der Energiewirtschaft anders einzuordnen. Supraleiter können - theoretisch - im Rahmen der Elektrizitätswirtschaft auf allen Produktionsstufen (Umwandlung, Transport und Verteilung) eingesetzt werden. Die Energietechnik wird seit geraumer Zeit als ein wesentliches Anwendungsgebiet für supraleitende Materialien angesehen. Neben Verbesserungen bei bekannten technischen Systemen (supraleitende Generatoren, Transformatoren, Kabel), wo sich aufgrund der geringen elektrischen Verluste der Supraleiter höhere Wirkungsgrade erzielen lassen und die hohe Leistungsdichte reduzierte Volumina und Gewichte ermöglicht, werden auch neue Konzepte (bspw. Fehlerstrombegrenzer auf der Basis supraleitender Materialien und der Einsatz supraleitender magnetischer Energiespeicher) diskutiert. Allerdings sind insbesondere für die Kühlung der Supraleiter aufwendige Techniken notwendig, die durch ihren Eigenverbrauch die energetischen Vorteile der verlustarmen Leitung reduzieren oder überkompensieren. Zudem ist die Fertigung der Leiter verglichen mit konventionellen Kupferleitern erheblich schwieriger und aufwendiger, die Systeme selbst sind häufig komplizierter, so daß erhebliche Anstrengungen unternommen werden müssen, um die gleiche Zuverlässig-

keit und Verfügbarkeit wie bei den heute verfügbaren konventionellen Alternativen zu erzielen, was wiederum zu höheren Anlagenkosten führt.

Große Hoffnungen verbinden sich mit den Hochtemperatursupraleitern (HTS), die eine weitgehend verlustfreie Stromleitung bereits bei deutlich höheren Temperaturen als bei den klassischen Supraleitern ermöglichen. Viele Herstellungsverfahren für technische Supraleiter aus HTS sind konzipiert und untersucht worden. Dabei wurden neue Verfahren entwickelt und bekannte Techniken modifiziert, mit verschiedenen Vorläufersubstanzen und Substraten experimentiert, Verfahrensparameter variiert und aussichtsreiche Ansätze in großer Vielfalt miteinander kombiniert. Dies hat zu einer beinahe unüberschaubaren Zahl von Prozeßvarianten geführt, von denen sich ein Großteil als nicht umsetzbar erwiesen hat, da entweder erforderliche technische Parameter nicht erreicht wurden oder das Verfahren nicht für einen industriellen Einsatz geeignet war. Die Anwendung von HTS in der Energietechnik scheitert an der bislang nicht ausreichend beherrschten Herstellung von langen Drähten, Bändern oder Kabeln hoher Stromtragfähigkeit. Der Nachweis der technischen und wirtschaftlichen Einsatzreife konnte bei vielen Systemen bislang nicht geführt werden, zudem wird bei einem Großteil der vorgeschlagenen Techniken seitens der Anwender in der Elektrizitätswirtschaft - zumindest in Europa - derzeit kein Bedarf bzw. kein Potential gesehen. Lediglich dem supraleitendem Fehlerstrombegrenzer werden in absehbarer Zeit Einsatzchancen eingeräumt.

Eine **ökologische Bewertung** des Einsatzes neuer Werkstoffe in der Energietechnik ist gegenwärtig nur in Ansätzen möglich. Einerseits lassen beispielsweise hochtemperaturfeste Werkstoffe für den Einsatz in Gasturbinen eine Steigerung des Wirkungsgrades und damit reduzierte Energieverbräuche und Emissionen erwarten. Die gewünschte - und erzeugte - hohe Widerstandsfähigkeit dieser Materialien gegenüber thermischen und chemischen Einflüssen könnte jedoch deren Recycling-Fähigkeit reduzieren. Materialien für Solarzellen leisten einen Beitrag zur im Betrieb emissionsfreien Stromerzeugung, jedoch sind für ihre Herstellung erhebliche Energieeinsätze aufzuwenden. Generell kann festgehalten werden, daß - bis auf Ausnahmen - zur Zeit Forschungsergebnisse und aufgearbeitete Informationen fehlen, um die ökologischen Folgen des Einsatzes neuer Werkstoffe befriedigend beurteilen zu können. Für das Erstellen von Ökobilanzen fehlen vielen - vor allem kleinen und mittleren - Unternehmen sowohl Bilanzdaten konventioneller und vor allem neuer Werkstoffe sowie häufig auch personelle Kapazitäten. Es wäre wünschenswert, Aspekte der ökologischen Bewertung der Werkstoffentwicklung stärker als bisher in die FuE-Aktivitäten einzubeziehen.

Literatur

1. Vom TAB in Auftrag gegebene Gutachten

FhI-INT (Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-technische Trendanalysen) (1996): Neue Werkstoffe für Gasturbinen (Autoren: J. Kohlhoff, Th. Kretschmer). Euskirchen

FhI-ISE (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme); FhI-ISI (Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung) (1996): Entwicklungsstand und -trends neuer Materialien für Solartechnologien (Autoren: W. Wettling, J. Kopp, G. Jaeckel, R. Neurohr). Freiburg, Karlsruhe

GERHOLD, J. (1996b): Neue Werkstoffe für Supraleiterkabel. Gutachten für das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (unter Mitarbeit von M. Hubmann und E. Telser). Graz

2. Weitere Literatur

Im vorliegenden Bericht wurde auf die explizite Angabe von Literaturverweisen verzichtet. Um dem Leser einen Überblick über weitere verwendete Quellen zu geben und ein vertiefendes Einarbeiten in die Thematik zu ermöglichen, wird nachfolgend das Literaturverzeichnis des zugehörigen, separat veröffentlichten Materialienbandes angeführt.

ABB (1997): A new member of the ABB high performance gas turbine family. Produktinformation

ABRAHAM, TH. (1998): Markets for Low- and High-Temperature Superconductors. In: JOM - Journal of the Minerals Metals and Materials Society, October, S. 37

ARTHUR D. LITTLE INTERNATIONAL INC. (1993): Studie zur Evaluierung des Programms Materialforschung (Autoren: Braun, M., Gerybadze, A., Rätz, A., Witzel, M.). Wiesbaden

BALDUS, A., BETT, A., BLIESKE, U., SULIMA, O.V., WETTTLING, W. (1994): AlGaAs/GaAs solar cells grown by horizontal and vertical LPE etchback-regrowth process. In: Proc. 12th EC-PVSC, Amsterdam, S. 1485

BARNETT, A.M., COLLINS, S.R., COTTER, J.E., FORD, D.H., HALL, R.B., RAND, J.A. (1994): Polycrystalline silicon-filmTM solar cells: Present and future. In: Progress in Photovoltaics Vol. 2, S. 163

- BASORE, P.A., GEE, J.M. (1994): Crystalline-silicon photovoltaics: necessary and sufficient. In: Proc. 1st WCPEC, Hawaii, S. 2254
- BEDNORZ, J.G., MÜLLER, K.A. (1986): Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System. In: Z. Phys. B 64, S. 189-193
- BLAUGHER, R.D. (1996): Superconducting Electric Power Applications. In: Summers, L.T. (Ed.): Adv. in Cryogenic Engineering Vol. 42, New York
- BLOSS, W.H., PFISTERER, F., SCHUBERT, M., WALTER, T. (1995): Thin-film solar cells. In: Progress in Photovoltaic 3(1), S. 3
- BMBF (Bundesministerium für Forschung und Technologie) (Hg.) (1994): Neue Materialien für Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts - MaTech. Bonn
- BMBF (Bundesministerium für Forschung und Technologie) (Hg.) (1995): Neue Materialien für Schlüsseltechnologien - MaTech. Bonn
- BOLZA, A., METRA, P., NASSI, M., RAHMAN, M.M. (1997): Recent Developments in HTS Power Cable Applications. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 7(2), S. 339-344
- BORNEMANN, H.J., SANDER, M. (1997): Conceptual Design of a 5 MWh/100MW Superconducting Flywheel Energy Storage Plant for Power Utility Applications. In: IEEE Transactions on Applied Superconductivity 7(2), S. 398-401
- BORNEMANN, H.J. et al. (1997): Neuartige Schwungmassenspeicher-Systeme (SMSS) in elektrischen Netzen. In: Brennstoff-Wärme-Kraft 49(5), S. 54-57
- CAVA, R.J. (1995): Update On Copper Oxide Superconductors. In: Am. Chem. Soc. Bull. 74(5), S. 85-88
- DEMARMELS, A. (1995): Die Aspekte supraleitender Transformatoren. In: VDI-Berichte 1187, S. 195-203
- DIMMLER, B., SCHOCK, H.-W. (1996): CIS-Dünnschichtsolarzellen-Technologie. In: Forschungsverbund Sonnenenergie, Photovoltaik 3, S. 52
- EASTERLING, K., ZSCHECH, E. (1997): Werkstoffe im Trend. Berlin
- EIA (U.S. Department of Energy, Energy Information Administration) (1998): International Energy Outlook. Washington
- EW (Elektrizitätswirtschaft) (1997): Siemens/KWU: Auf wandelnde Kundenanforderungen vorbereitet. In: Elektrizitätswirtschaft 96(24), S. 1471-1473
- FhI-INT (Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-technische Trendanalysen) (1993): Vertiefende Untersuchung der technologischen Hauptentwicklungslinien und -trends im Bereich neuer Werkstoffe. Euskirchen
- FLEISCHER, T., JÜNGST, K.P., BRANDL, V., MAURER, W., NIEKE, E. (1995): Energiespeicherung in Supraleitenden Spulen (SMES) - Ergebnisse einer Technikfolgenabschätzung. FZK-Bericht Nr. FZKA-5575, Karlsruhe
- FLÜKIGER, R. (1994): Hoch- T_c -Supraleiter in der Energietechnik. In: Bulletin SEV/VSE 11/1994, S. 22-30

- GAS (Gesellschaft für Angewandte Supraleitung) (1995): Lagebericht 1995 zur Angewandten Supraleitung. Karlsruhe
- GAY, R.R. (1997): Status and Prospects for CIS-based photovoltaics. In: Sol. Energy Mat. Sol. Cells 47, S. 19-26
- GERHOLD, J. (1996a): Kurzschlußstrombegrenzer mit Hochtemperatursupraleitern. Forschungszentrum Karlsruhe, unveröffentlichtes Manuskript, Juni
- GRANT, P.M. (1997): Superconductivity and Electric Power: Promises, Promises ... Past, Present and Future. In: IEEE Transactions on Applied Superconductivity 7(2), S. 112-133
- GRAWE, J., WAGNER, E. (1997): Nutzung erneuerbarer Energien durch die Elektrizitätswirtschaft, Stand 1996. In: Elektrizitätswirtschaft 96, S. 1407-1413
- GREEN, M.A., WENHAM, S.R., ZHAO, J. (1993): Progress in high efficiency cell and module research. In: Proc. 23rd IEEE-PVSC, Louisville (USA), S. 8
- GREEN, M.A., WANG, A., ZHAO, J., WENHAM, S.R. (1995): Enhanced light-trapping in 21.5 % efficient thin silicon solar cells. In: Proc. 13th EC-PVSEC, Nice (France), S. 13
- GREEN, M.A., EMERY, K., BÜCHER, K., KING, D.L., IGARI, S. (1997): Solar Cell Efficiency Tables (Version 10). In: Progress in Photovoltaics Vol. 5, S. 265-268
- GREEN, M.A., EMERY, K., BÜCHER, K., KING, D.L., IGARI, S. (1998): Solar Cell Efficiency Tables (Version 11). In: Progress in Photovoltaics Vol. 6, S. 35-42
- HEBLING, C., GAFFKE, R., STERK, S., WARTA, W. (1995): Interdigitated grid for silicon thin film solar cells on SiO₂ layers. In: Proc. 13th EC-PVSEC Nice (France), S. 1512
- HEINLOTH, K. (1993): Energie und Umwelt. Stuttgart
- HEZEL, R. (1997): Recent Progress in MIS Solar Cells. In: Prog. Photovolt. Res. Apps. Vol. 5, S. 109-120
- HÖLTER, D.W., RADKE, U. (1995): Elektrische Anforderungen an supraleitende Komponenten der Energieversorgung. In: VDI-Berichte 1187, S. 205-220
- HOHMEYER, O., WEINREICH, S. (1995): Long term integration of photovoltaics into the european energy system. In: Proc. 13th EC-PVSEC, Nice (France), S. 863
- HORNBOGEN, E. (1994): Werkstoffe, Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen. Berlin u.a.O.
- HÜTTL, A.J. (1997): Struktur und Entwicklungstrends der Stromerzeugung weltweit. In: ETG-Fachbericht 65, Berlin, Offenbach, S. 35-52
- IEA/OECD (1994): International Energy Agency - Implementing agreement on photovoltaic power systems. Annual report, Paris
- INTICHAR, L. (1995): Entwicklungsstand supraleitender Turbogeneratoren. VDI-Berichte 1187, S. 165-175

- INTICHAR, L., LAMBRECHT, D.: (1989): Entwicklung supraleitender Kraftwerksgeneratoren. VDI-Berichte 733, S. 121-135
- JÄGER, K.; HEZEL, R. (1992): Proc. 7th PVSC, New Dehli (India), S. 168
- JAKUBKE, H.-D., JASCHKEIT, H. (Hg.) (1987): Brockhaus ABC Chemie. Leipzig
- JÜNGST, K.P. (1992): Schriftliche Mitteilung, Forschungszentrum Karlsruhe
- KEMPKENS, W. (1995): Mut zur Größe. In: Wirtschaftswoche Nr. 40, S. 150
- KENWARD, M. (1996): Superconductors Get Ready to Transform Industry. In: Physics Today, June, S. 29-31
- KLEIMEIER, M. (1996): Mündliches Statement. Zitiert in R. Hott: Bericht vom 5. Statusseminar Supraleitung und Tieftemperaturtechnik 10./11. Juni 1996 Köln, GAS Online 5/96
- KNAAK, W., REISS, H. (1993): Wechselstromtaugliche Hochtemperatur-Supraleiter für Kabel, Strombegrenzer, Magnete und Transformatoren. In: ABB Technik 1, S. 9-18
- KNOBLOCH, J., GLUNZ, S.W., HENNINGER, V., WARTA, W., WETTLING, W. (1995): 21% efficient solar cells processed from Czochralski grown silicon. In: Proc. 13th EC-PVSEC, Nice (France), S. 9
- KOMAREK, P. (1995): Hochstromanwendungen der Supraleitung. Stuttgart
- KURTZ, S.R., OLSEN, J.M., KIBBLER, A. (1990): High efficiency GaAs solar cells using GaInP₂ window layer. In: Proc. 21st IEEE-PVSC, Kissimimee (USA), S. 138
- LANDIS, G.A., YOUNGER, P.R. (1979): IEEE-CHMT-2, No. 3, S. 350
- LARBASTELIER, D.C., MALEY, M.P. (1993): Conductors From Superconductors: Conventional Low-Temperature and New High-Temperature Superconducting Conductors. In: MRS Bulletin XVIII(8), S. 50-56
- LARBASTELIER, D.C. (1997): The Road to Conductors of High Temperature Superconductors: 10 Years do make a difference. In: IEEE Transactions on Applied Superconductivity 7(2), S. 90-97
- LEMME, H. (1997): Billigere Solarzellen in Aussicht - Kostensenkung durch Automation und Dünnschicht-Technologien. In: Elektronik 25, S. 54-68
- LENNERTZ, H. (1989): Aspekte des Einsatzes der Supraleitung in der Energieversorgung. In: VDI-Berichte 733, S. 255-274
- LEUNG, E. (1997): Surge Protection for Power Grids. In: IEEE Spectrum, July, S. 26-30
- LEWERENZ, J., JUNGBLUT, H. (1997): Photovoltaik. Berlin u.a.O.
- METRA, P. (1995): Worldwide Developments of High Temperature Superconducting Cables (HTSC) for Electric Power Transmission. In: VDI-Berichte 1187, S. 59-74
- MUSIC (1996): Multimegawatt upscaling of silicon and thin film solar cell and module manufacturing. MUSIC FM, Venedig

- NADENAU, V., BRAUNGER, D., HARISKOS, D., KAISER, M., KÖBLE, CH., OBERACHER, A., RUCKH, M., RÜHLE, U., SCHÄFFLER, R., SCHMID, D., WALTER, T., ZWEIGART, S., SCHOCK, H.-W. (1995): Solar cells based on CuInSe₂ and related compounds: Material and device properties and processing. In: Progress in Photovoltaics Vol. 3, S. 363
- NEUMÜLLER, O.-A. (Hg.) (1979): Römpps Chemie-Lexikon. 8. Auflage. Stuttgart
- NEUMÜLLER, H.-W. (1995): Stand der Entwicklung von hochtemperatursupraleitenden (HTSL) Drähten und Bändern. In: VDI-Berichte 1187, S. 17-42
- NOE, M., HARMS, G., OSWALD, R. (1997): Supraleitende Strombegrenzer in der Energietechnik. In: Elektrie 51(11/12) S. 414-424
- OESTERGAARD, J. (1997): Superconducting Power Cables in Denmark - A Case Study. In: IEEE Transactions on Applied Superconductivity 7(2), S. 719-722
- OSWALD (1996): Persönliche Mitteilung, Siemens Solar
- OTA (1990): High-Temperature Superconductivity in Perspective. OTA-E-440. U.S. Congress, Office of Technology Assessment (OTA), Washington D.C., April
- OTA (1995): Renewing our energy future. OTA-ETI-614. U.S. Congress, Office of Technology Assessment (OTA), Washington D.C., September
- PAUL, W., RHYNER, J., PLATTER, F. (1995): Supraleitende Strombegrenzer. Vortrag auf der Tagung "Supraleitung in der Energietechnik II". München, 10./11. Mai
- RIETSCHEL, H. (1997): Zehn Jahre Hochtemperatur-Supraleiter: Stand der Anwendungen. In: Phys. Bl. 53(4), S. 335-338
- RILEY, G.N. et al. (1994): Advances in the Design and Fabrication of High-T_c Composite Conductors. In: Appl. Supercond. Vol. 2(3-4), S. 155-162
- RIS, H.R. (1993): Mehr Dampf im Verbund. In: Technische Rundschau Transfer Nr. 47
- ROSENBAUM, U. (1994): Kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe. Landsberg/Lech
- SCHAEFER, H. (Hg.) (1994): VDI-Lexikon Energietechnik. Düsseldorf
- SCHULENBERG, D., DEBLON, B. (1990): Anforderungen an Werkstoffe in der Entwicklung stationärer Gasturbinen. In: 22. Vortragsveranstaltung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge in Zusammenarbeit mit dem DVM-Arbeitskreis Betriebsfestigkeit, S. 19-29
- SHI, Z., WENHAM, S.R. (1994): Polycrystalline silicon thin-film solar cells: The future of photovoltaic. In: Progress in Photovoltaics Vol. 2, S. 153
- SINTON, R.A., KWARK, Y., GAN, J.Y., SWANSON, R.M. (1986): Electr. Dev. Lett., EDL-7, No. 10, S. 567
- SMARSLY, W., SINGHEISER, L. (1995): Intermetallische Phasen - Werkstoffe für zukünftige Gasturbinen. In: VDI-Berichte 1151

STEINBERGER, H., KETTRUP, A., THUMMS, W., MOSKOWITZ, P.D. (1996): Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen der Herstellung und Anwendung sowie Entsorgung von Dünnschichtsolarzellen und Modulen. In: Statusreport Photovoltaik, S. 77

TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (1994): TA-Projekt "Neue Werkstoffe" - Endbericht: (Autoren: Socher, M., Rieken, Th., Baumer, D.). TAB-Arbeitsbericht 26, Bonn

UNKELBACH, K.-H. (1989): Magnetische Separation. In: VDI-Berichte 733, S. 255-274

VAN ROOSMALEN, J.A.M. (1995): Thin film solar cells. ECN Netherlands

VDI (1996): Sonnige Aussichten für amorphes Silicium. In: VDI-Nachrichten, 26.1.96

VEAUX, CH., RENTZ, O. (1994): Entwicklung von Gasturbinen und Gasturbinenprozessen. Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) der Universität Karlsruhe (unveröffentlichter Bericht), Karlsruhe

WAGNER, B.F., FRIEDRICH, F., SCHILLINGER, N., EYER, A. (1992): Crystalline thin film silicon solar cells (CTFSSC). In: Proc. 11th EC-PVSEC, Montreux (Switzerland), S. 397

WETTTLING, W. (1995): Hocheffiziente Silicium-Solarzellen: Technologie und Potential. FhI-ISE Freiburg

WETTTLING, W. (1996a): Exportchancen der Photovoltaikindustrie. FhI-ISE Freiburg

WETTTLING, W. (1996b): Solarzellentechnologie - Stand der Technik und Trends. Eine kritische Bewertung. In: Bericht 10. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut (OTTI), 15.-17. März

WETTTLING, W. (1997): Solarzellen - Stand der Technik. In: Phys. Bl. 53(12), S. 1197-1202

WISSENSCHAFTSRAT (1996): Stellungnahme zur außeruniversitären Materialforschung. Berlin

WTEC (World Technology Evaluation Center) (1997): WTEC Panel Report on Power Applications of Superconductivity in Japan and Europe. September

ZWEIBEL, K. (1995): Thin films: Past, present, future. Progress in Photovoltaics 3(5), S. 279 (Revised and updated version 4/97 unter <http://webdev.nrel.gov/research/pv/thinfilm.html>)

ZWEIBEL, K., ULLAL, H.S., VON ROEDERN, B. (1996): Progress and issues in polycrystalline thin-film PV technologies. In: Proc. 25th IEEE-PVSC, Washington, S. 159

Abkürzungsverzeichnis

APCVD	Atmospheric Pressure Chemical Vapour Deposition, chemische Abscheidung aus der Gasphase bei Normaldruck (Atmosphärendruck)
Bi-2212	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$; Bismut-Strontium-Calcium-Kupfer-Oxid; ein Material mit hochtemperatursupraleitenden Eigenschaften
Bi-2223	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$; Bismut-Strontium-Calcium-Kupfer-Oxid; ein Material mit hochtemperatursupraleitenden Eigenschaften
BSCCO	Bismut-Strontium-Calcium-Kupfer-Oxide, eine Gruppe von Materialien mit hochtemperatursupraleitenden Eigenschaften
CBD	Chemical Bath Deposition, chemische Abscheidung
C/C	Carbon-Carbon-Composites
CFC	kohlenstoffaserverstärkte Kohlenstoffe
CFK	kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe
EB-PVD	Electron Beam - Physical Vapour Deposition
ED	Electrodeposition, elektrochemische Abscheidung
el	elektrisch
GuD	Gas- und Dampfturbine
HTS	High Temperature Superconductor, Hochtemperatur-Supraleiter
IGCC	Integrated Coal Gasification Combined Cycle Gas Turbine
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LPCVD	Low-Pressure Chemical Vapour Deposition, chemische Abscheidung aus der Gasphase bei niedrigem Druck
LPE	Liquid Phase Epitaxy, Flüssigphasenepitaxie
LTS	Low Temperature Superconductor, konventioneller (Tieftemperatur-) Supraleiter
MBE	Molecular Beam Epitaxy, Molekularstrahlepitaxie
MoSi₂	Molybdänsilizid
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapour Deposition, Chemische Abscheidung aus der Gasphase mit metallorganischen Verbindungen als Reaktanden
MOVPE	Metal Organic Vapour Phase Epitaxy, Gasphasenepitaxie mit metallorganischen Verbindungen als Reaktanden
Ni₃Al, NiAl	Nickelaluminide
NO_x	Stickoxide

ODS	Oxid-Dispersionsverstärkung
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition, chemische Abscheidung aus der Gasphase mit Plasmaunterstützung
Photo-CVD	chemische Abscheidung aus der Gasphase mit Photonenunterstützung
PIT-Prozeß	Pulver-im-Rohr-Prozeß (von engl. powder-in-tube); das bislang verbreitetste Verfahren für die Herstellung technischer Supraleiter auf HTS-Basis
PVD	Physical Vapour Deposition, Hochvakuumaufdampfen
SiC	Siliziumcarbid
Si₃N₄	Siliziumnitrid
SP	Spray-Pyrolyse
SPD	Sputter Deposition, Kathodenzerstäubung
SPR	Screen Printing, Siebdruck
Ti₃Al, TiAl	Titanaluminide
TiSi₂, Ti₅Si₃	Titansilizide
VPE	Vapour Phase Epitaxy, Gasphasenepitaxie
YBCO	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} , Yttrium-Barium-Kupfer-Oxid; ein Material mit hochtemperatursupraleitenden Eigenschaften
ZrO₂	Zirkoniumdioxid
λ	Luftzahl-Kennzahl in der Verbrennungstechnik, Maß für das Verhältnis aus zugeführter Luftmenge und theoretischer Mindestluftmenge

Glossar

Abscheidung - Schichtbildung durch Anlagerung kondensierbarer Teilchen an der Schichtoberfläche

anisotrop, Anisotropie - Richtungsabhängigkeit physikalischer Eigenschaften (Elastizität, Härte, thermische Ausdehnung etc.) und des Verhaltens von (Werk)Stoffen (z.B. bei CFC von der Faserrichtung abhängige Eigenschaften; tritt insbesondere bei Kristallen auf)

Aufwachsen - Schichtbildung durch chemische Reaktion der Substratoberfläche mit dem umgebenden Medium

Ausscheidungshärtung - ein Härtungsmechanismus (beruht auf der Bildung verschiedener Phasen (γ, γ') ähnlicher Struktur)

Chemical Vapour Deposition, CVD - Bei den CVD-Verfahren wird eine Schicht dadurch erzeugt, daß eine gasförmige reaktive chemische Verbindung im Prozeßreaktor durch den Eintrag von Energie ionisiert wird. Die entstehenden Teilchen schlagen sich auf der heißen Oberfläche eines Werkstückes nieder und reagieren miteinander zu einer Schicht, die sich in ihrer Zusammensetzung vom ursprünglichen Ausgangsmaterial unterscheidet. Es können sowohl verdampfbare als auch gasförmige Ausgangsmaterialien eingesetzt werden. Durch die Mischung verschiedener Materialien lassen sich sehr unterschiedliche Schichten erzeugen. Die entgültige Reaktion zur gewünschten Schicht findet auf der Oberfläche des Werkstückes statt. Man unterscheidet zwischen thermischen CVD-Verfahren, bei denen die Beschichtung bei Temperaturen zwischen 600- und 1300°C stattfindet und die benötigte Reaktionsenergie thermisch zugeführt wird, und den Plasma-CVD-Verfahren, die ein Plasma als Energiequelle nutzen. Hier liegt die Beschichtungstemperatur im Bereich von Raumtemperatur bis ca. 500°C.

Dispersionshärtung - ein Härtungsmechanismus (beruht auf einer Zugabe von z.B. Kohlenstoff (Carbide) zu Legierungen, wobei während der Härtung ein "feines Netzwerk" an Carbidpartikeln ausgebildet wird, welches Versetzungsbewegungen im Gitter behindert)

Epitaxie - Unter Epitaxie versteht man das Aufwachsen von monokristallinem Material auf einem Kristall unter Beibehaltung der Kristallstruktur. Dabei lagert sich extern zugeführtes Material bei genau definierten Prozeßbedingungen (Temperatur, Druck, Konzentration) an der freien Oberfläche des Substrates an.

Ermüden - Bezeichnung für den Zustand eines Werkstoffs nach Einwirken sich periodisch ändernder Zug-/Schub-Beanspruchungen bis zum Brechen des Werkstoffs

Ermüdung - Form der Werkstoffschädigung durch fortschreitendes Rißwachstum, das durch Spannungszyklen verursacht wird. Die Spannung, bei welcher der Werkstoff durch Ermüdung zerstört wird, liegt deutlich unter dessen Zugfestigkeit (Easterling/Zschech 1997, S. 144).

Eutektikum - Gefüge einer Legierung aus zwei Komponenten, die im festen Zustand nicht mischbar sind; es bildet sich ein mikroskopisch feines Gemenge beider Kristalle. Diese Feinkörnigkeit bedingt gute Festigkeitseigenschaften.

Flüssigphasenepitaxie, Liquid Phase Epitaxy, LPE - Dabei wird das Substrat mit einer knapp unter den Erstarrungspunkt unterkühlten Schmelze in Berührung gebracht. Das Substrat wirkt als Kristallkeim, und die in der Schmelze enthaltenen Atome wachsen auf das Substrat auf. Die nach diesem Verfahren hergestellten Schichten weisen im allgemeinen keine sehr gute Kristallqualität auf und gute Uniformität der Schichten läßt sich nur auf kleinen Flächen erzielen. Die Vorteile liegen in den relativ geringen Kosten und der relativen Einfachheit des Verfahrens.

Funktionswerkstoffe - Werkstoffgruppe, die primär durch nicht-mechanische Eigenschaften, speziell elektrischer, magnetischer, optischer, akustischer oder biologischer Art, charakterisiert ist. Haupteinsatzgebiete sind die Elektrotechnik/Elektronik sowie die Kommunikations- und Informationstechnik, aber auch die Energie-, Verkehrs- und Medizintechnik etc.

Gasturbinen - sind Verbrennungskraftmaschinen, bei denen die Arbeitstakte Ansaugen, Verdichten, Expandieren und Ausstoßen kontinuierlich in verschiedenen Komponenten ablaufen und nicht, wie bei Hubkolbenmotoren im Zylinder (FhI-INT 1996).

GuD-Anlage - Kombination eines Gasturbinen- und eines Dampfturbinenprozesses. Bei dieser Kopplung werden die noch heißen Abgase der Gasturbine zur Dampferzeugung in einem unbefeuerten Abhitzeessel eingesetzt.

Hochtemperaturwerkstoffe - sind Metalle, Nichtmetalle sowie deren Verbindungen, wie Boride, Carbide, Silicide, Nitride und Oxide, die bei Temperaturbedingungen in der Größenordnung von ca. 800 bis 1.600°C beständig und mechanisch belastbar sind. Gegenüber atmosphärischen Komponenten und anderen Medien sind insbesondere metallische Hochtemperaturwerkstoffe sehr korrosionsanfällig, wobei durch Beschichtung, etwa mit Hochtemperaturboriden, carbiden oder nitriden, die chemische Resistenz bedeutend erhöht werden kann.

IGCC (Integrated Coal Gasification Combined Cycle Gas Turbine) - s. GuD, wobei zur Befeuerung der Gasturbine Kohlegas (aus separater Kohlevergasung) eingesetzt wird.

ISO-Turbineneintrittstemperatur - stellt eine abstrakte Größe dar, die die mit der Bauteilkühlung verbundene Abkühlung des Verbrennungsgases berücksichtigt und somit die für den Wirkungsgrad entscheidende Temperatur darstellt. Sie kann bei Gasturbinen ca. 200°C unter der real vorhandenen Gastemperatur am Turbineneintritt liegen.

kohärent - zusammenhängend

Kohlegas - durch Ent- oder Vergasung von Steinkohle hergestelltes Heizgas.

Korrosion - Reaktion eines metallischen Werkstoffs mit seiner Umgebung, die eine meßbare Veränderung der Werkstoffs bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteils führen kann. Ursache von Korrosionsreaktionen

ist die thermodynamische Instabilität von Metallen gegenüber Oxidationsmitteln wie Luft oder wässrigen Medien (Easterling/Zschech 1997, S. 145).

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) - gleichzeitige Umwandlung von eingesetzter Energie in mechanische oder elektrische Energie und Wärme in einer technischen Anlage. (Anmerkung: Soweit die elektrische Energie und die Wärme in der Anlage selbst verbleiben, handelt es sich nicht um KWK (z.B. zur regenerativen Speisewassernerzeugung)) (vgl. VDEW/BGW).

Kraft-Wärme-Kopplungsanlage - Einrichtung, in der der technische Prozeß der KWK stattfindet. KWK-Anlagen können z.B. sein; Dampfturbinen-, Gasturbinen-, Verbrennungsmotoren- und Brennstoffzellen-Anlagen.

Kriechen - Bezeichnung für plastische Verformung (Deformation) eines Werkstoffs unter bestimmten Zug-/Schub-Beanspruchungen; zur Werkstoffbeurteilung von Interesse (Dehnung einer Werkstoffprobe in Abhängigkeit von der Zeit der Beanspruchung bei konstanter Temperatur), (verwendete Wortkombinationen: Kriechwiderstand; Kriecheigenschaften etc.)

(Kristall)Gefüge - Mikrostruktur eines Werkstoffs; es werden verschiedene Gefügeelemente unterschieden, die sich durch Störungen des idealen Gitteraufbaus bilden

Kristallgitter - geometrische Darstellung der (idealen) Kristallstruktur (z.B. eines Metalls)

Kristallstruktur - räumliche Anordnung der Atome; atomare Struktur(en), die beim Erstarren eines Werkstoffs (Kristallisation aus dem flüssigen Zustand) automatisch ausgebildet werden; zumeist "angestrebte" Atomanordnungen sind regelmäßig, ideal und symmetrisch.

Legierung - aus verschiedenen metallischen (oder metallischen und nichtmetallischen) Komponenten aufgebautes Mehrstoffsystem. Die meisten technischen Gebrauchsmetalle sind Legierungen (z.B. Stahl, Messing).

Materialien - Materialien sind Stoffe, die sich bei Vorhandensein einer geeigneten Technologie oder nach Abschluß einer dazu geeigneten Entwicklung zu **Werkstoffen** verarbeiten lassen, aus denen **Bauteile** herstellbar sein müssen. (vgl. Schmidt 1994 S. 13)

Mischkristallhärtung - ein Härtungsmechanismus (beruht auf gezielter Härtung durch Zusatz von großen und damit langsam diffundierenden Atomen (wie Molybdän oder Wolfram))

Molekularstrahl-Epitaxie, molecular beam epitaxy, MBE - Bei der Molekularstrahl-Epitaxie werden im Ultrahochvakuum in speziellen Öfen verschiedene Elemente verdampft und auf dem beheizten Substrat angelagert. Durch die Anordnung verschiedener, einzeln steuerbarer Verdampfungsquellen in derselben Vakuumkammer läßt sich bei dieser Methode die Zusammensetzung der aufwachsenden Schicht Atomlage für Atomlage genau definieren und kontrollieren. Das Verfahren ist sehr flexibel, die Qualität der Kristallstruktur ist durch die sehr geringen Verunreinigungen im Vakuum außerordentlich gut. Durch Rotieren des Substrates während des Aufwachsens erreicht man auch sehr gute Uniformität der Schichten. Die Nachteile ergeben

sich hauptsächlich aus der niedrigen Geschwindigkeit des Prozesses, woraus Probleme für den Einsatz in der Großserienfertigung entstehen. Dazu sind die Kosten für die komplizierte Technik, die zur Erzeugung des Vakuums und die Reaktionskammer benötigt wird, sehr hoch.

Oxid-Dispersionsverstärkung (ODS) - Zugabe/Einbringen von Oxidpartikeln in Legierungen, die stabilisierende Wirkung in der Gitterstruktur haben

Oxidkeramik - Sinterwerkstoffe aus reinen, hochschmelzenden Metalloxiden (z.B. Al_2O_3), die i.w. nur aus einer einzigen Phase bestehen

Phasen - strukturelle "Ebene" eines Werkstoffs (z.B. Anordnung von Atomen); durch geeignete Anordnung von verschiedenen Phasen können die Eigenschaften eines Werkstoffs in weiten Grenzen (mehr oder weniger gezielt) verändert werden (vgl. Hornbogen 1994, S. 167 ff)

Physical Vapour Deposition, PVD - Bei den PVD-Verfahren erzeugt man eine Schicht auf der Oberfläche eines Werkstückes, dem Substrat, indem man das Beschichtungsmaterial in die Gasphase bringt. Dieses Material scheidet sich dann auf der Oberfläche des Substrates ab und erzeugt eine haftfeste dünne Schicht. PVD-Prozesse sind Vakuumverfahren, die sich nach der Art der Verdampfung des Beschichtungsmaterials in das Aufdampfen, das Ionenplattieren, die Arc-Verfahren und das Sputtern (Kathodenzerstäuben) unterteilen lassen. Bei allen Verfahrensvarianten wird das zu beschichtende Werkstück in eine Vakuumkammer eingebracht, dann wird das Beschichtungsmaterial in die Gasphase überführt und schlägt sich auf dem Werkstück als dünne Schicht nieder. Mit den PVD-Verfahren lassen sich fast alle Metalle, ihre Legierungen und metallische Verbindungen auf so gut wie allen Materialien (Glas, Keramik, Metalle, Stahl, Kunststoff) abscheiden.

refraktär - unempfindlich (z.B. im Sinne von chemisch stabil, schwer beeinflussbar)

Seigerungen - Entmischungsvorgänge bei der Erstarrung mehrkomponentiger Schmelzen (Erstarrung im Nicht-Gleichgewichtszustand); bewirken ungleichmäßige Zusammensetzung von Legierungen nach dem Erstarren und verursachen z.B. Warmbrüchigkeit

Sintern - Verdichtung eines Pulvergemisches; ist in der Pulvermetallurgie ein wesentlicher Arbeitsschritt der Formgebung. Dabei werden kleine Teilchen (Pulver des Materials) in eine gewünschte Form gepreßt und bei hohen Temperaturen gehalten, so daß sich allmählich die Poren des Materials auffüllen und sich damit das Porenvolumen insgesamt verringert.

Sputtern - Läßt man in einer Gasatmosphäre Edelgasionen auf eine Metallquelle (Target) treffen, so werden Metallionen aus dem Target heraus geschlagen (gesputtert), die dann durch das Anlegen einer negativen Spannung auf das zu beschichtende Werkstück hin beschleunigt werden können. Je nach Höhe der angelegten Spannung können Oberflächeneigenschaften wie Härte, Struktur, Haftfestigkeit, elektrische Leitfähigkeit oder chemische und thermische Stabilität beeinflusst und gezielt eingestellt werden. Dieses als Sputtern oder Kathodenzerstäubung bezeichnete Verfahren wird heute in zunehmenden Maße zur Erzeugung von verschleißschützenden und dekorati-

ven Schichten eingesetzt. Besonders im Bereich der Hartstoffschichten wie TiN spielt es eine bedeutende Rolle. In der Industrie sind verschiedene Varianten des Sputterverfahrens bekannt.

Strukturwerkstoffe - Werkstoffgruppe, die primär durch ihre mechanischen Eigenschaften, wie Festigkeit, Steifigkeit, Verschleiß, spezifisches Gewicht (Dichte), Härte sowie Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen, charakterisiert ist. Haupteinsatzgebiete sind im konstruktiven Sektor mechanisch beanspruchte Bauteile.

Substrat - Als Substrat bezeichnet man das zu beschichtende Werkstück. Zur Beschichtung der unterschiedlichen Materialien, aus denen das Substrat bestehen kann (Substratmaterialien) wie Stahl, Metall, Glas, Keramik, Kunststoff u.ä. kann man Oberflächenbeschichtungstechniken einsetzen.

Superlegierungen - Gruppe von Mehrstofflegierungen, zumeist auf Nickel- und Kobaltbasis, die sich durch hohe Hitzebeständigkeit auszeichnen

Vapour Phase Epitaxy, VPE - Bei der VPE (Epitaxie aus der Gasphase) werden die abzuscheidenden Stoffe mittels verschiedener Trägergase mit dem Substrat in Kontakt gebracht und wachsen dort unter Ablauf komplexer chemischer Reaktionen auf. Heute werden meistens organische Moleküle zum Transport verwendet (MOVPE). Ein Vorteil ist die größere Flexibilität hinsichtlich der Zusammensetzung der Materialien. Einer der schwerwiegendsten Nachteile sind die aufwendigen Sicherheitsvorkehrungen, die durch den Einsatz hochgiftiger Substanzen notwendig werden.

Verbundfeuerung - s. GuD, wobei der im Abhitzeessel erzeugte Dampf dem Dampfprozeß eines konventionell befeuerten Kessels zugeführt wird. Positive Eigenschaften des GuD-Prozesses (weitgehende Nutzung der Abwärme im ungefeuerten Abhitzedampferzeuger) und die Eigenschaften der konventionellen Feuerungstechnik (Einsatz beliebiger Brennstoffe) werden durch die Verbund-Technik gekoppelt.

Versetzungen - lineare Störungen eines ideal aufgebauten Kristallgitters; sie treten i.a. beim Übergang von einer Schmelze in den festen Zustand oder bei Materialverformungen auf.