

KfK 4003  
November 1985

# **Verbundwerkstoffe zwischen Wunsch und Wirklichkeit**

G. Ondracek  
Institut für Material- und Festkörperforschung

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRÜHE

Institut für Material- und Festkörperforschung

KfK 4003

Verbundwerkstoffe zwischen  
Wunsch und Wirklichkeit

G. Ondracek

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe



# **Verbundwerkstoffe zwischen Wunsch und Wirklichkeit**

*Prof. Dr. Gerhard Ondracek*

*Universität und Kernforschungszentrum Karlsruhe*

---



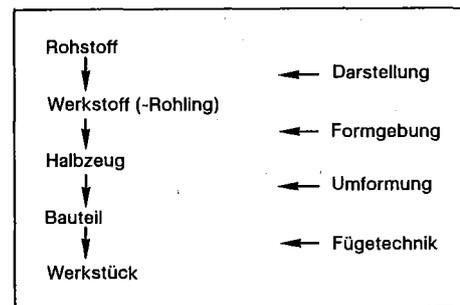
# Verbundwerkstoffe zwischen Wunsch und Wirklichkeit

Im Rahmen des Schwerpunkts Materialforschung und -entwicklung rücken neben keramischen Werkstoffen zunehmend Verbundwerkstoffe und Stoffverbunde in den Mittelpunkt des Interesses [1]. Nicht zuletzt unter dem Aspekt der Substitution sowohl verknappender als auch ökologisch bedenklicher Komponenten in Verbundwerkstoffen gewinnt die „Konstruktion maßgeschneiderter“ Werkstoffe immer mehr an Bedeutung. Die Verbesserung der Eigenschaften durch theoretisch gestützte Gefügeoptimierung und Phasenkombination sowie Phasenverbindung (Benetzung, Grenzflächenenergie) nimmt dabei neben der technologischen Anpassung und Fügung der Bestandteile eine Schlüsselstellung in der Verbundwerkstoffforschung und -entwicklung ein. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Verbundwerkstoffen und Stoffverbunden eröffnen besonders in der Biotechnik neue Perspektiven.

**E**in Material wird zum Werkstoff, wenn es in mindestens einem Aggregatzustand technisch verwertbare Eigenschaften besitzt und darüber hinaus technologisch und wirtschaftlich machbar ist. Ein Werkstoff ist ein aus Atomen einer oder verschiedener Art und Menge zusammengesetztes System (stoffliche Zusammensetzung), das als ganzes durch

äußere Grenzflächen (Oberflächen) von seiner Umgebung abgegrenzt, aber nicht isoliert ist und dessen Bestandteile durch innere Grenzflächen (Korngrenzen, Phasengrenzen) miteinander verbunden sind [2].

Technologisch machbar – das bedeutet nicht nur, daß der Werkstoff aus Rohstoffen (Mineralien) darstellbar ist, sondern auch, daß dieser „Werkstoff-Rohling“ durch Formgebung, Umformung und Fügung Halbzeuge, Bauteile und Werkstücke ergibt (*Bild 1*) [2].



**Bild 1:** Der technische Weg vom Rohstoff zum Werkstück

Der Aufbau eines solchen Werkstoffes ergibt sich aus [3]

- der Struktur seiner Bausteine (atomistische Struktur)
- der inneren Struktur seiner aus diesen Bausteinen gebildeten Mikrobereiche (Feinstruktur)
- der Geometrie dieser Bestandteile und ihrer geometrischen Anordnung im Werkstoffinneren (Gefügestruktur), durch die auch die inneren Grenzflächen bestimmt sind
- seiner äußeren Geometrie, makroskopischen Erscheinungen an seiner Oberfläche und in seinem Inneren (Seigerungen, Lunker) sowie seinem makroskopisch beurteilbaren Aggregatzustand (Grobstruktur), wobei sich die Strukturbereiche in etwa linearen Abmessungen zuordnen lassen (*Bild 2*).

Mit diesen Überlegungen und unter Bezug auf charakteristische Bindungsarten lassen sich nun drei Hauptgruppen von Werkstoffen unterscheiden:

- 1. Metallische Werkstoffe** bestehen ausschließlich aus Atomen metallischer Elemente, die überwiegend metallisch miteinander verbunden sind. Sie sind meist in Gittern mit höchster Raumerfüllung kristallisiert und werden nach verschiedenen Gesichtspunkten weiter unterteilt:
  - nach Technologie: Schmelzmetalle, Sintermetalle,
  - nach Dichte: Leichtmetalle (z. B. Al, Be), Schwermetalle (z. B. Co, Pb),
  - nach Farbe: Buntmetalle (z. B. Cu), Weißmetalle (z. B. Ag), Schwarzmetalle (z. B. Fe),

- nach stofflicher Zusammensetzung: Nicht-Eisenmetalle, Eisen und Stahl.

- 2. Keramische (oder nichtmetallisch-organische) Werkstoffe** bestehen aus Atomen metallischer und nichtmetallischer Elemente, die überwiegend heteropolar miteinander verbunden sind. Man unterteilt sie

- nach stofflicher Zusammensetzung: tonkeramische Werkstoffe (Aluminiumoxid-Basis) und sonderkeramische Werkstoffe

- nach Aufbau: Grobkeramik (Inhomogenitäten > 0,1 bis 0,2 mm) und Feinkeramik (Inhomogenitäten < 0,1 bis 0,2 mm)

- nach der Wasseraufnahmefähigkeit: poröse Grobkeramik (Wasseraufnahmefähigkeit > 6%), poröse Feinkeramik (Wasseraufnahmefähigkeit > 2%), dichte Grobkeramik (Wasseraufnahmefähigkeit < 6%), dichte Feinkeramik (Wasseraufnahmefähigkeit < 2%),

- 3. Nicht-metallhaltige (oder nichtmetallisch-organische) Werkstoffe** bestehen ausschließlich aus Atomen nicht-metallischer Elemente (SCHON = Schwefel, Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff u. a.), die überwiegend homöopolar und dipolar miteinander verbunden sind. Hier erfolgt eine Unterteilung in:

- Naturstoffe (Elfenbein, Holz, Wolle, Seide u. a.) und abgewandelte Naturprodukte (z. B. Grafit)

- Kunststoffe (Polymere)
  - nach Technologie und Aufbau: Polymerisate, Polykondensate, Polyaddukte;
  - nach Eigenschaften und Aufbau: Plastomere (Thermoplaste), Elastomere, Duromere (Duroplaste).

Dies also sind die Bestandteile – oder Phasen –, deren Verbund zum Verbundwerkstoff führt (*Bild 3*). Verbundwerkstoffe sind mehrphasig (heterogen), mindestens zweiphasig und makroskopisch homogen (mikroskopisch quasihomogen). Ihre Bestandteile – oder Phasen – gehören in der Regel nicht einer einzigen Werkstoffhauptgruppe an. Sie können Kombinationen aus

- metallischen und keramischen
- keramischen und polymeren (nicht-metallhaltigen)

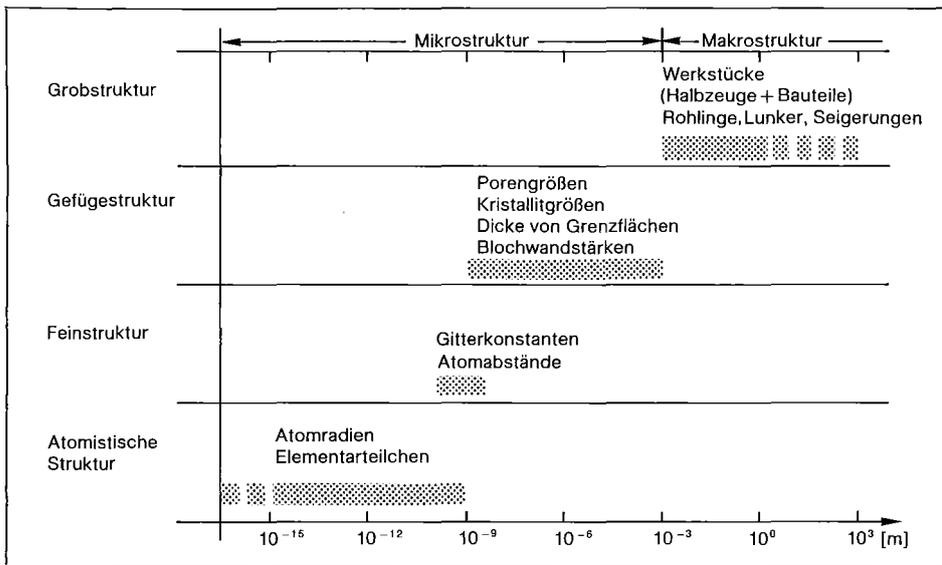


Bild 2: Struktureinteilung und Größenordnung

● polymeren (nicht-metallhaltigen) und metallischen Bestandteilen (Phasen) sein oder auch metallische und keramische und nichtmetallhaltige Bestandteile (Phasen) enthalten (Bild 3).

Verbundwerkstoffe aus keramischen und metallischen Bestandteilen oder Phasen beispielsweise nennt man CER-METS (CERamic + METal).

Makroskopisch inhomogene Verbunde von Bestandteilen oder Phasen, die verschiedenen Werkstoffgruppen angehören, sind daher keine Verbundwerkstoffe im engeren Sinne der Definition, sondern Stoffverbunde (Verbundhalbzeuge, -bauteile, -werkstücke: z. B. plattierte Halbzeuge, Schichtverbunde).

Es wurde bei diesen Begriffsbestimmungen stets zwischen Bestandteilen und Phasen unterschieden, da der Phasenbegriff streng genommen an das thermochemische Gleichgewicht gebunden ist. Verbundwerkstoffe oder Stoffverbunde, deren Bestandteile miteinander in Wechselwirkung treten, befinden sich nicht im thermochemischen Gleichgewicht. Sie sind instabil. Sind die Bestandteile eines Stoffverbundes dagegen im thermochemischen Gleichgewicht, so handelt es sich um einen Phasenverbund.

Wie alle Definitionen und Einteilungen besitzen auch die o. a. eine gewisse Unschärfe und sind der Entwicklung des Fachgebiets ständig anzupassen. So ist beispielsweise Stahl (Fe + Fe<sub>3</sub>C) ein Verbundwerkstoff im strengen Sinne der Definition, wird aber als Metall behandelt. Dagegen sind Verbunde, deren Phasen/Bestandteile sich bei gleicher stofflicher Zusammensetzung lediglich in der Fein- oder Gefügestruktur unterscheiden, keine Verbundwerkstoffe oder Stoffverbunde im strengen Sinne der Definition, sondern mehrphasige Werkstoffe ihrer Hauptgruppe (plattierte

Metalle = mehrphasige Metalle mit Schichtaufbau; C-Faser/C-Matrix = mehrphasiger nicht-metallhaltiger Werkstoff mit Matrixgefüge).

### Verbundwerkstoffforschung und -entwicklung

Ein Material wird zum Werkstoff, wenn es in wenigstens einem Aggregatzustand technisch verwertbare Eigenschaften besitzt und technologisch und wirt-

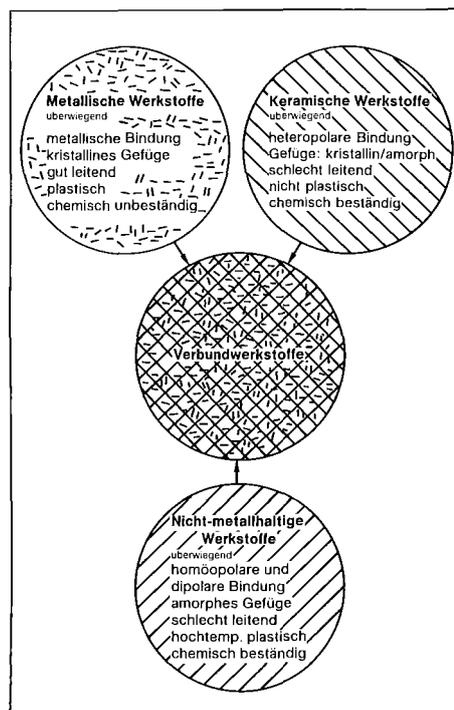


Bild 3: Verbundwerkstoffe und Werkstoffhauptgruppen

schaftlich machbar ist [2]. Aus dieser bereits angeführten allgemeinen Begriffsbestimmung des Werkstoffs ergibt sich die allgemeine Zielsetzung der Werkstoffforschung und -entwicklung:

- Verbesserung der Werkstoffeigenschaften (wissenschaftlich-technischer Aspekt).
- Ökonomisch effizientere Werkstoffherstellung (ökonomischer Aspekt).

Der ökonomische Aspekt wird speziell in unseren Tagen durch die Forderung akzentuiert, sich verknappte Elemente in Werkstoffen durch andere, hinreichend vorhandene, möglichst inländische zu ersetzen. Hinzu kommt ein weiterer, ökologischer Aspekt, nämlich umweltbelastende Komponenten (z. B. Beryllium, Schwermetalle, Asbest) durch ökologisch unbedenkliche zu substituieren. Vielleicht läßt sich danach die Zielsetzung für Verbundwerkstoffe am besten so formulieren: Es geht um die Erforschung und Entwicklung mehrphasiger Werkstoffe mit optimierten Eigenschaften, wobei die Optimierung ökonomische und ökologische Gesichtspunkte einschließen muß. Sie soll durchgeführt werden

- durch Kombination (extrem) unterschiedlicher Bestandteile (Phasen) wie Keramik-Metall, Metall-Polymer, Polymer-Keramik und
- durch technologische Verwirklichung vorausberechneter Gefügestrukturen einschließlich „gradierter“ Gefüge (= unterschiedliche Gefügestrukturen in einem Bauteil, die den lokal verschiedenen Belastungen dieses Bauteils im Betrieb angepaßt sind), d. h. theoretisch gestützte Gefügeoptimierung.

Verbundwerkstoffe sollten die vorteilhaften Eigenschaften ihrer Bestandteile vereinen – so lautet der Wunsch. Aber in ihnen sind auch die nachteiligen Verhaltensweisen ihrer Phasen kombiniert – oder sogar potenziert. Das ist die Wirklichkeit. Daher besteht die Aufgabe in der Optimierung zwischen den gegenläufigen Effekten.

Eine derartige wissenschaftliche Optimierung setzt – zunächst einmal – die theoretische Kenntnis der Zusammenhänge zwischen jenen Größen voraus, die die effektive Eigenschaft des Verbundwerkstoffes bestimmen:

- Wie beeinflussen die Eigenschaften seiner Bestandteile die effektive Eigenschaft des Verbundwerkstoffes?
- Wie beeinflusst die (Mikro-)Geometrie und geometrische Anordnung der im Verbundwerkstoff zusammengefügt Bestandteile seine effektive Verhaltensweise?

Selbstverständlich gelten diese Fragen für jeden mehrphasigen Werkstoff und sind daher von grundlegendem werkstoffkundlichem Interesse. Hat man

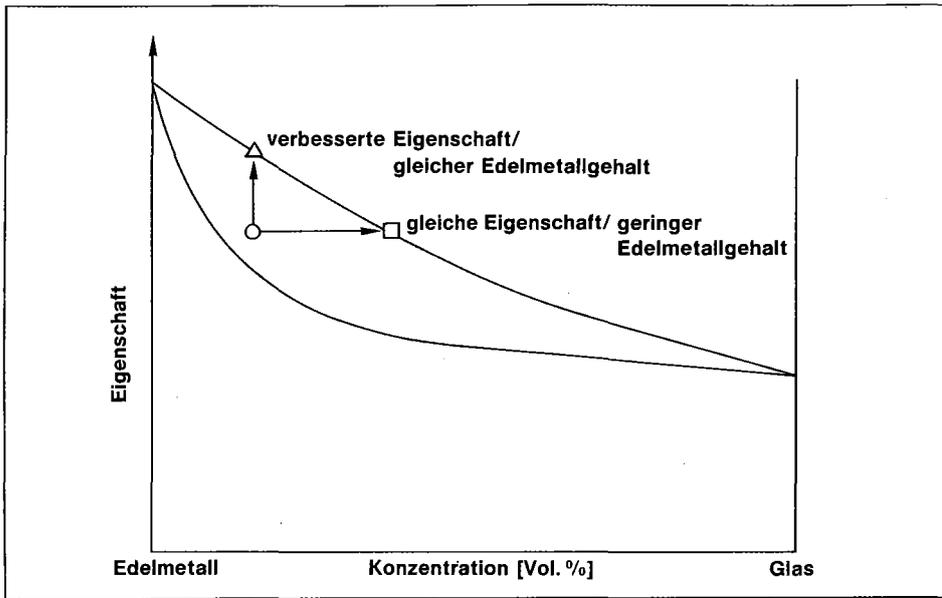


Bild 4: Eigenschafts-Grenzkurven und -optimierung von Verbundwerkstoffen

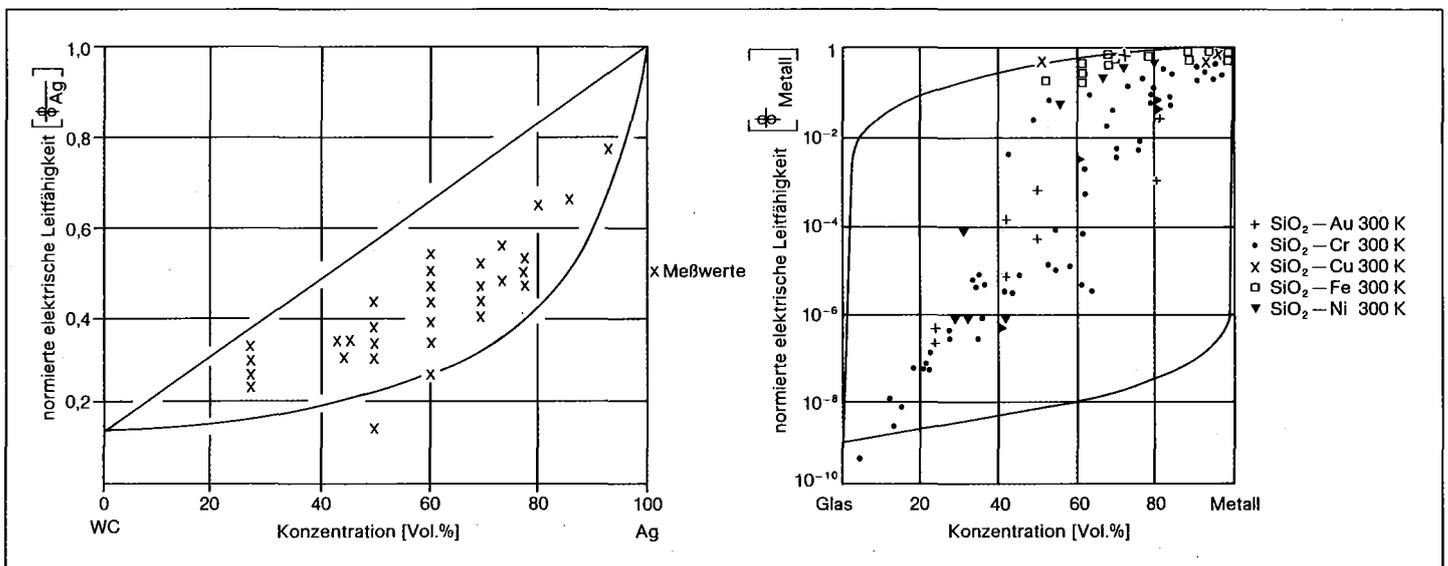
jedoch eine entsprechende theoretische Korrelation gefunden, die das Verständnis dieser Zusammenhänge eröffnet und vertieft, so sind Verbundwerkstoffe für die experimentelle Prüfung ihrer praktischen Belastbarkeit, d. h. für die Bestätigung ihrer ingenieurmäßigen Brauchbarkeit besonders geeignet. Aufgrund der recht unterschiedlichen Eigenschaften ihrer Bestandteile sind nämlich die durch Änderung der Konzentration der Phasen und der Gefügestruktur hervorgerufenen Effekte sehr deutlich. Obwohl also diese Zusammenhänge für alle mehrphasigen Werkstoffe gelten, sind sie mit Verbundwerkstoffen besonders verlässlich zu verifizieren. Da dieser wissenschaftliche Aspekt technische Konsequenzen hat, soll er an einem Beispiel näher erläutert werden.

Es ist für Eigenschaften wie die Leitfähigkeit oder den Elastizitätsmodul bereits bekannt, daß sich – theoretisch – die effektiven Eigenschaften für einen Verbundwerkstoff aus zwei Bestandteilen bei gegebener Konzentration der Bestandteile zwischen zwei Grenzwerten bewegen müssen. Trägt man diese Grenzwerte für alle möglichen Konzentrationen eines zweiphasigen Verbundwerkstoffes auf, so ergeben sich Grenzkurven (Bild 4). Für eine bestimmte Glas-Konzentration kann die elektrische Leitfähigkeit des Verbundwerkstoffes beispielsweise zwischen einem maximalen und einem minimalen Wert variieren. Wo sie wirklich liegt, wird durch seine Gefügestruktur entschieden [4, 5]. Für die Leitfähigkeit [5, 16, 17] und den Elastizitätsmo-

dul sind solche theoretischen Korrelationen auch experimentell verifiziert. Sie bieten zweierlei technisch relevante Möglichkeiten für den maßgeschneiderten Werkstoff, die am Beispiel eines fiktiven Verbundwerkstoffs erläutert werden sollen. Angenommen, ein konventioneller Werkstoff (vgl. O in Bild 4) besteht aus teurem Edelmetall und ökologisch belastenden Legierungselementen wie Beryllium oder Schwermetallen. Er soll durch einen geeigneten Verbundwerkstoff ersetzt werden. Wählt man nun als einen Bestandteil dieses Verbundwerkstoffes das Edelmetall, so muß man für die andere Phase einen billigen, ökologisch unverdächtigen Werkstoff wie Glas oder Keramik so wählen, daß die theoretisch vorausberechenbaren Grenzkurven für die Eigenschaften dieses Verbundwerkstoffes den Eigenschaftswert des konventionellen Werkstoffes (O in Bild 4) einschließen. Die spezifische Eigenschaft des Verbundwerkstoffes hängt letztlich von seiner Gefügestruktur ab. Zwei Wege mit dem maßgeschneiderten Werkstoff sind möglich: Entweder man konstruiert einen Edelmetall-Glas-Werkstoff mit gleicher Eigenschaft wie der konventionelle Werkstoff (vgl. □ in Bild 4), spart dabei Edelmetall und eliminiert das ökologische Risiko – oder man erzielt einen besseren Eigenschaftswert bei gleichem Edelmetallgehalt (vgl. Δ in Bild 4) und substituiert ebenfalls vollständig die ökologisch problematische Komponente.

Daß der Variationsbereich im Falle von Verbundwerkstoffen dabei unterschiedlich groß sein kann (Bild 5) und in aller Regel sehr viel größer ist als bei anderen mehrphasigen Werkstoffen, liegt an dem extremen Unterschied ihrer Phaseigenschaften und weist ihr besonderes Entwicklungspotential aus. Nicht nur

Bild 5: Die elektrische Leitfähigkeit von zweiphasigen Verbundwerkstoffen mit geringem (links) und großem Unterschied (rechts) der elektrischen Leitfähigkeit ihrer Phasen



Edelmetall in Schmuck und Medaillen konnte auf diese Weise bereits eingespart werden, wobei die gesetzliche Goldqualität (z. B. „585“er Gold) erhalten bleibt, sondern auch Asbest in Kfz-Bremsbelägen läßt sich auf diese Weise ersetzen. Es ist kein Zufall, daß die Wahl jener ökologisch und ökonomisch günstigen Bestandteile für Verbundwerkstoffe dabei vornehmlich auf silizium- und aluminiumhaltige Komponenten fällt – und künftig fallen sollte; denn diese Elemente kommen am reichhaltigsten in der Erdkruste vor.

Mit dem Verbundwerkstoff SiC-Si für Brenner, Gleitlager und Gleitringdichtungen beispielsweise wurde der generelle Nachteil keramischer Werkstoffe – ihre Sprödigkeit und schlechte Wärmeleitfähigkeit und die daraus resultierende geringe Temperaturwechselfestigkeit – im Falle von SiC reduziert [6, 7]. Geringer Abrieb bei Verschleiß und ihre Korrosionsbeständigkeit unterstreichen die Umweltfreundlichkeit solcher Verbundwerkstoffe. Für die – wirtschaftlich allerdings aufwendigeren – Hartmetalle werden solche Kombinationen von Binde- metall und keramischem Hartstoff seit langem genutzt.

„Die Klasse Verbundwerkstoffe hat“ – so schrieb P. Sahn 1976 [8] – „aufgrund der interdisziplinären Eigenart ihrer Entwicklung Anleihen aus anderen Gebieten der Materialwissenschaften machen müssen.“ Dieser Prozeß der „Standortsuche“, der diese „neue“ Werkstoffklasse für längere Zeit naturgemäß auf „die Warteliste“ im Rahmen der etablierten Werkstoffe verwies, ist nicht nur abgeschlossen, sondern kehrt sich – wie das SiSiC-Beispiel zeigt – in einigen Fällen bereits um: Etablierte Werkstoffe „entleihen“ Lösungen, die die Verbundwerkstoffe anbieten. Das „Selbstverständnis“ der Verbundwerkstoffe – ihre Abgrenzung gegenüber anderen Werkstoffgruppen und die Einordnung ihrer Problemschwerpunkte in die Systematik ihrer Behandlung – ist gefunden. Die Kapitel

- Aufbau
- Eigenschaften
- Technologie und Prüfung

von Verbundwerkstoffen bilden den Rahmen, in dem ihre Untergruppen wie Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe (Cermets, Hartmetalle), Keramik-Polymer-Verbundwerkstoffe und Polymer-Metall-Verbundwerkstoffe zu behandeln sind. Und welche Probleme auftreten, ist für Verbundwerkstoffe an Beispielen bereits absehbar:

- Um die für die gewünschte Eigenschaftskombination optimale Gefügestruktur zu erkennen, müssen – wie bereits erörtert – theoretische Gefüge-Eigenschafts-Korrelationen exi-

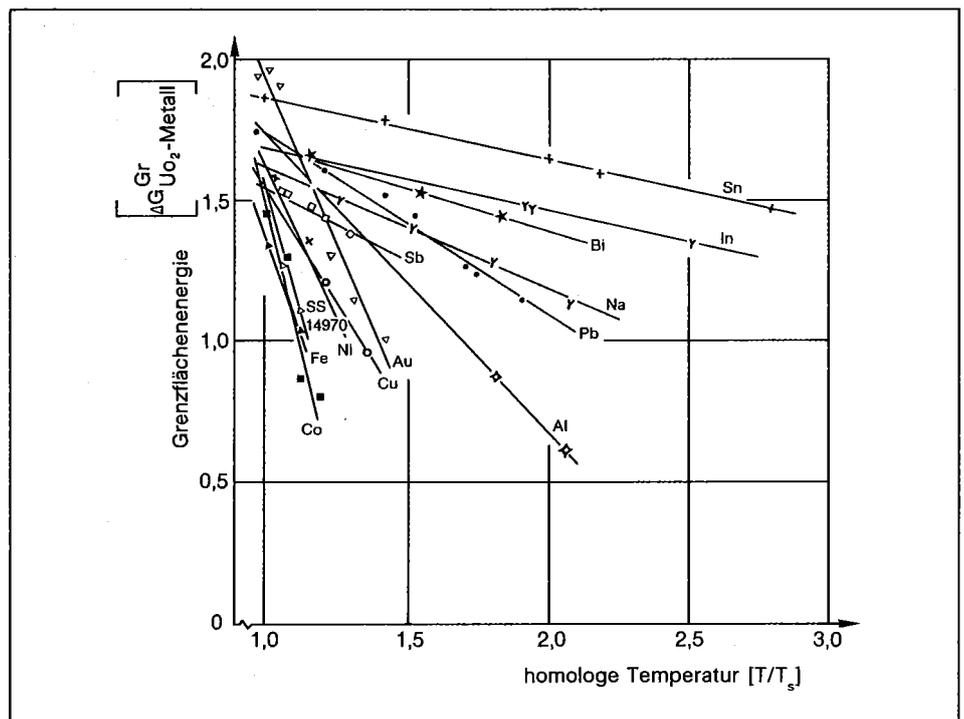


Bild 6: Studien zur Benetzbarkeit – Verlauf der Temperaturfunktion der Grenzflächenenergien zwischen Uranoxyd und Metallschmelzen [14, 15].

stieren, die die Vorausberechnung bestimmter Eigenschaften bei definierter Gefügestruktur ermöglichen. Hier besteht das Problem, daß solche Gefüge-Eigenschafts-Gleichungen – insbesondere mit Bezug auf ihre praktische Verwendbarkeit – nur begrenzt verfügbar sind.

- Um extreme oder bestimmte Eigenschaftskombinationen zu erzielen, muß der Verbund von solchen Bestandteilen/Phasen in einem Werkstoff möglich sein, deren Phaseneigenschaften der gewünschten Eigenschaftskombination entsprechen. Schwierigkeiten bereiten hier die Phasenbindung und -haftung (Wechselwirkung, Grenzflächenenergie, innere Spannungen).

- Um Phasenkombinationen in optimalen Gefügestrukturen technologisch zu verwirklichen, müssen geeignete Verfahren praktisch erprobt sein. Hier kann zwar die Pulvertechnologie generell als favorisierte Formgebung für Verbundwerkstoffe angesehen werden, weil – der flüssige Aggregatzustand vermieden oder nur teilweise und kontrolliert zu Hilfe genommen wird – sich dadurch im Pulverpreßling vorgegebene Gefügestrukturen auf den fertigen Werkstoff übertragen lassen – durch die im Vergleich zu Schmelztemperaturen niedrigen Sintertemperaturen innere Spannungen und Wechselwirkungen an den inneren Grenzflächen gering gehalten werden können, was auch für die Abdampfverluste gilt und damit den ökologischen Aspekt der Pulvertechnologie verdeutlicht, aber es muß Benetzbarkeit gegeben sein oder durch „Sinterhilfen“ herbeigeführt werden (technologische Anpassung der Bestandteile). Eines ist dazu bereits getan (Bild 6).

Zur Klärung und Selektion weiterer Problemschwerpunkte, die es zu bearbeiten gilt (Verbundwerkstoffforschung), bedarf es systematischer Literaturanalysen. Detaillierte Literaturanalysen zu bestimmten ausgewählten Systemen sind nötig für definierte Anwendungen (Verbundwerkstoffentwicklung).

### Einsatzgebiete für Verbundwerkstoffe

Wo immer die Technik ihrer Aufgabe nachgeht, wissenschaftliche Erkenntnisse für Problemlösungen nutzbar zu machen, benötigt sie Werkstoffe. Dies gilt selbstverständlich auch für Verbundwerkstoffe und Stoffverbunde: Glas-, kohlenstoff-, SiC- und aramidfaserhaltige Verbundwerkstoffe werden seit längerer Zeit in der Sportgerätekunst (Skier, Surfbretter u. a.) und Luftfahrttechnik (Wickelbauteile, beulsichere Schalenbauweisen) erfolgreich angewendet. Aus glasfaserhaltigen Polymeren werden serienmäßige Glasfaserfilter und Homogenisatoren hergestellt [9]. Trotzdem müssen auch hier Faserherstellung und -eigenschaften optimiert werden [10, 11].

Metall-Keramik-Stoffverbunde erhöhen die Verschleißfestigkeit von Kolben-

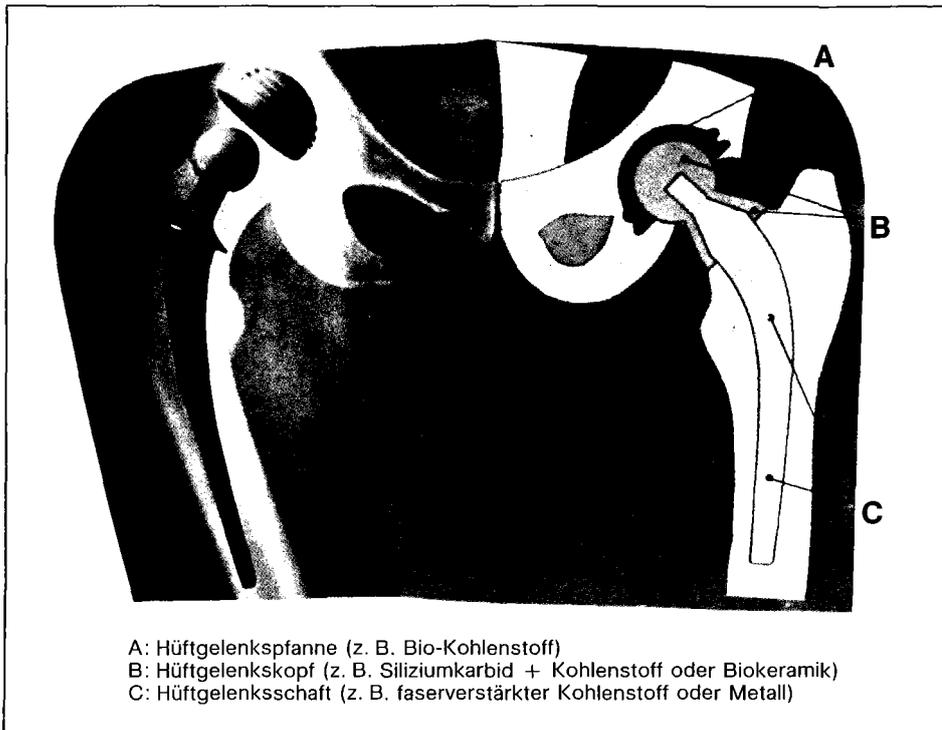


Bild 7: Verbundwerkstoffe und Stoffverbunde in Hüftgelenksendoprothesen

böden, Zylindern und beschichteten Ventilsitzen von Motoren. Aber die Anpassung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten beispielsweise begrenzt die Temperaturschock- und wechselbelastbarkeit solcher Stoffverbunde.

Keramik-Polymer-Verbunde in Schleifscheiben und -spindeln sowie Alu-Polymer-Verbunde in der Verpackungs- und Möbelindustrie [13] und das große Gebiet der verschleißfesten Hartmetalle sind weitere Anwendungsbeispiele im Maschinen-, Werkzeug- und Gerätebau.

Im Bauwesen sind neben Spannbeton auch architektonische Außen- und Innenverkleidungen aus Al-Polymer-Verbunden [13] Beispiele für den Einsatz von Verbundwerkstoffen und Stoffverbunden. Das gleiche gilt in der Elektrotechnik für Kontaktwerkstoffe oder flexible Hülsen für Thermolemente.

Jünger zwar, aber um so engagierter ist der Einsatz von Verbundwerkstoffen in der Biotechnik: Al-Titanbasis-Cermets etwa in der Dentalimplantologie; SiC-, C-Metall- oder Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Polymer-Verbundwerkstoffe und Stoffverbunde bei Hüftgelenksendoprothesen (Bild 7); kohlenstofffaserhaltiger Grafit in der Mittelohr- und Nasenhöhlenchirurgie.

Die Bedeutung dieses Gebietes wird vermutlich zunehmen, weil einmal durch ökologische Probleme „Zivilisationskrankheiten“ häufiger und schon im früheren Lebensalter auftreten und zum anderen die Lebenserwartung steigt und die Sicherung der Lebensqualität eine gesellschaftliche Aufgabe ist.

Daß die Anpassung an die innere Geometrie etwa eines Knochens durch maßgeschneiderte Strukturierung sich bei Verbundwerkstoffen nicht nur anbietet, sondern durch pulvertechnologische Verfahren auch möglich ist, erhöht die Erfolgchance des Implantats. Wenn allerdings Verbundwerkstoffe als potentielle Biowerkstoffe behandelt werden sollen, kann dies nicht durch die Übernahme von bekannten Forschungs- und Lehrkonzepten aus der konventionellen Werkstoffkunde geschehen. In die Behandlung von Bioverbundwerkstoffen gehen nämlich eine Reihe von Aspekten ein, die für die Werkstoffkunde bisher unbekannt oder irrelevant waren. Anzuführen sind hier etwa

- Biokompatibilität zu den verschiedenen Formen der „lebenden Materie“ (Knochen, Gewebe, Blut usw.) und werkstoffspezifische Beeinflussung des Stoffwechsels
- Benetzbarkeit mit Gewebeflüssigkeiten (Sulcus/Mundhöhle, Synovialflüssigkeit/Gelenke) sowie Blut- und Grenzflächenproblematik bei Werkstoff-Zellkulturen (bioaktive Schichten)
- Komplexe Belastungsformen (Zahn„lockerung“, Sprunggelenke) und deren theoretische wie meßtechnische Erfassung
- Doppelkorrosion (z. B. Speichel an Zahnimplantatoberseiten, Gewebeflüssigkeit an der im Kiefer verankerten Seite) und Elektrophysiologie (Tastsensibilität der Sinnessphäre, werkstoffbedingter Resensibilisierungsgrad, Biokybernetik, Reflexvermögen).

Daß die Bearbeitung solcher Probleme zusätzlich andere, interdisziplinäre Organisationsformen in Forschung, Entwicklung und Lehre erfordert – etwa die Zusammenarbeit mit medizinischen Kliniken – versteht sich von selbst und wird bei bereits etablierten Unternehmungen dieser Art im Ausland auch deutlich. In der Bundesrepublik Deutschland allerdings gibt es bisher keine systematisch organisierte Forschung über Bio- und Verbundwerkstoffe und auch kein entsprechendes, an einer Universität etabliertes Lehrgebiet, und dies, obwohl sich zusammenfassend feststellen läßt:

- daß Verbundwerkstoffe bereits mehrfach erfolgreich eingesetzt werden,
- daß sie besonders überall dort eine zukünftige Werkstoffalternative bieten, wo es um den Ersatz verknappender oder ökologisch problematischer Elemente und Komponenten in Phasen und Bestandteilen konventioneller Werkstoffe geht,
- daß zu ihrer Optimierung die Bearbeitung verbundwerkstoffspezifischer Probleme erforderlich ist, wobei die Erfolgsaussichten durchaus positiv zu beurteilen sind.

Wie überall in Wissenschaft und Technik bestimmt auch bei den Verbundwerkstoffen das „Wenn-dann-Prinzip“ das zulässige Erwartungsniveau: Wenn die Ansprüche zu hoch gesetzt werden, dann müssen Hoffnungen unerfüllt bleiben. Hoffnungen gründen auf Wünschen. Behält man bei diesen Augenmaß, dann rechtfertigt die Verbundwerkstoffwirklichkeit „im Prinzip Hoffnung“.

**Literatur:**

[1] Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Entwurf Materialforschungsprogramm, BMFT (1984) 60  
 [2] Ondracek, F.: Leitfaden der Werkstoffkunde, 2. Auflage, expert Verlag, Grafenau-Sindelfingen (1985).  
 [3] Ondracek, G.: Jahrbuch für Ingenieure, expert Verlag, Grafenau (1980) 274  
 [4] Ondracek, G.: Metall 36 (1982), 523, 1288  
 [5] Ondracek, G.: Metall 37 (1983) 1016  
 [6] Krauth, A.: UMSCHAU 11 (1983) 335  
 [7] Petzow, G., Lorenz, J.: UMSCHAU 11 (1983) 340  
 [8] Sahn, P.: Programmhft Verbundwerkstofftagung der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde, Konstanz (1976) 3  
 [9] Reichelt Katalog, Thomapor, Englerstr. 18, Heidelberg (1984) 3,14  
 [10] Fitzer, E., Jäger, E.: Zeitschrift für Werkstofftechnik, im Druck (1985)  
 [11] Forschungsinstitut Berghof, Gesamtlieferprogramm, Postfach 1523, Tübingen (1982)  
 [12] Mück, C.: Zeitschrift für Werkstofftechnik 9 (1984) 315  
 [13] Alusuisse, Alucobond Rh 10952.02 (1976)  
 [14] DGM Buchband Verbundwerkstoffe, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, Oberursel (1981) 391  
 [15] Nikolopoulos, P., Ondracek, G. Zeitschrift für Werkstofftechnik 13 (1982) 60  
 [16] Ondracek, G.: Proc. Int. Pulvermet. Tagung Dresden (1981) 19/241 und (1985) im Druck  
 [17] Nikolopoulos, P.; Ondracek, G.: Z. Metallkde. 74/1 (1983) 49 und J. Am. Ceram. Soc. 66/4 (1983) 238 und J. Nucl. Mat. 144 (1983) 231