

Zeitschrift: Ferrum : Nachrichten aus der Eisenbibliothek, Stiftung der Georg Fischer AG
Herausgeber: Eisenbibliothek
Band: 63 (1991)

Artikel: Neue Materialien und Verfahren Versuch eines Ausblickes in das Jahr 2000
Autor: Gut, K.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-378269>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 08.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Neue Materialien und Verfahren

Versuch eines Ausblickes in das Jahr 2000

Die Materialwissenschaften unterteilen sich in die drei klassischen Gebiete: Metalle, Kunststoffe und Keramik.

Da die Kunststoffe bereits in einem vorangehenden Referat behandelt worden sind, werde ich mich auf Metalle und Keramik beschränken, wobei ich aber auch die Mischformen, die Kompositen, nicht ganz vernachlässigen möchte.

Wenn man eine solche Arbeit vorbereitet, besteht die Gefahr, dass man sich vom Optimismus der Entwickler, welche die betreffenden Artikel schreiben, mitreißen lässt. Andererseits darf man auch nicht allzu kritisch sein, denn dann muss man damit rechnen, dass man fast nichts Neues zu berichten weiss. Ich versuche also, mit den Füssen auf dem Boden zu stehen, aber den Kopf doch so hoch zu halten, dass ich über einen gewissen Weitblick verfüge.

Was ist wichtig, ist es das Material oder das Verfahren? Man stellt fest, dass in Zukunft mehr und mehr Material und entsprechende Verfahren sowohl in der Herstellung wie in der Weiterverarbeitung zusammengehören, und als Oberbegriff kommt schlussendlich das Produkt als Folge von Material und Verfahren als wichtigste Grösse hinzu.

Metalle

Stahl

Beim Literaturstudium wurde ich überrascht, dass forschungsmässig dem alten Produkt Stahl oder Eisen ein sehr hoher Entwicklungsstellenwert zukommt.

Die Schmelzverfahren resp. die metallurgischen Prozesse der Stahlherstellung werden sehr intensiv bearbeitet. Dabei geht es nicht darum, die Kosten zu senken, sondern in viel höherem Masse Eigenschaften zu verbessern oder bestimmte Eigenschaften zu erzeugen.

Neuerdings werden Kohlenstoffstähle Entgasungsprozessen unterzogen. Dazu muss ich erklärend sagen, dass die Entgasungsprozesse vor etwa 20 Jahren entwickelt, aber nur für Spezialstähle, hochlegierte austenitische Stähle und Sonderstähle angewendet wurden. Dies wegen der erhöhten Behandlungskosten. Nun wendet man diese Verfahren auch für unlegierte Stähle an. Es ist möglich, damit den Kohlenstoffgehalt auf Werte um drei Tausendstel Prozent zu senken. Solche Stähle sind die Ausgangsmaterialien für hochzähe, sehr gut schweiszbare Stähle. Sie werden IF-Stähle genannt (interstitial free), d. h., die Zwischengitterplätze zwischen den Eisenatomen sind nicht oder wenig belegt. Durch gezielte Zugaben von sehr wenig Niob, Titan oder Vanadin werden Verfestigungseffekte erreicht, welche zusätzlich durch thermoplastische Verformungen verstärkt werden. Das muss ich jetzt etwas genauer erklären.

Es ist Ihnen sicher schon aufgefallen, dass auf den Dächern von Alphütten Steine aufliegen. Diese Steine sind da, damit im Winter der Schnee nicht von den Dächern rutscht. Ähnlich wirken im Atomgitter Elemente auf den Zwischengitterplätzen. Sie verhindern das Gleiten von Atomebenen, und genau das macht man mit diesen IF-Stählen, indem man Niob und Titan legiert und sie nach bestimmten Regeln plastisch verformt. Man hat vor zwei oder drei Jahren in der Schweiz versucht, in einem Nationalfonds-Projekt solche Stähle zu entwickeln und Interessenten zu finden. Der Erfolg war sehr bescheiden.

Superplastizität

Sehr viele kristallin aufgebaute Materialien haben die Eigenschaft dieser Superplastizität. Es bedeutet, dass auch spröde Materialien unter gewissen Bedingungen sich wie eine viskose Flüssigkeit verhalten. So sind hochfeste, wenig deformierbare Stähle superplastisch im Gebiet um 900 °C bei relativ hoher aufgezwingener Verfor-

Dr. K. Gut

Georg Fischer AG
CH-8201 Schaffhausen

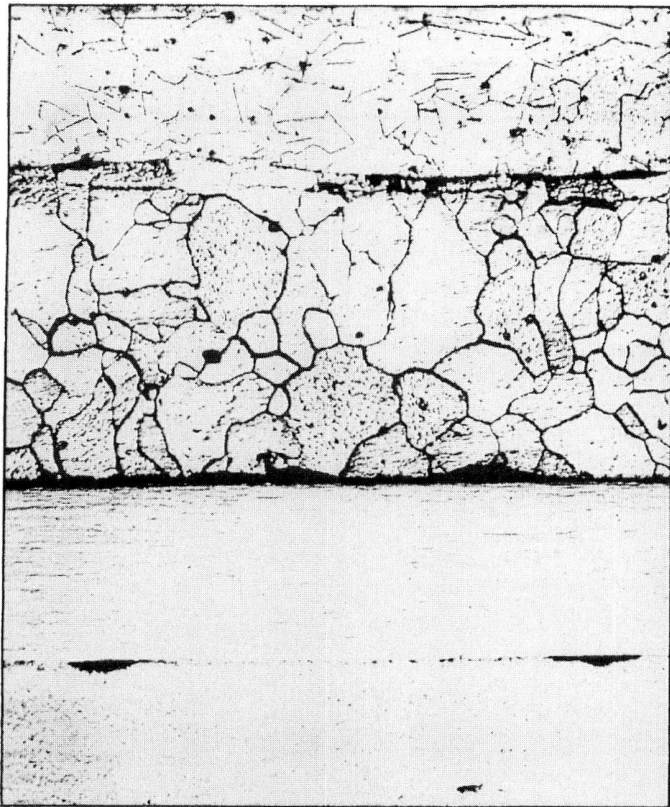
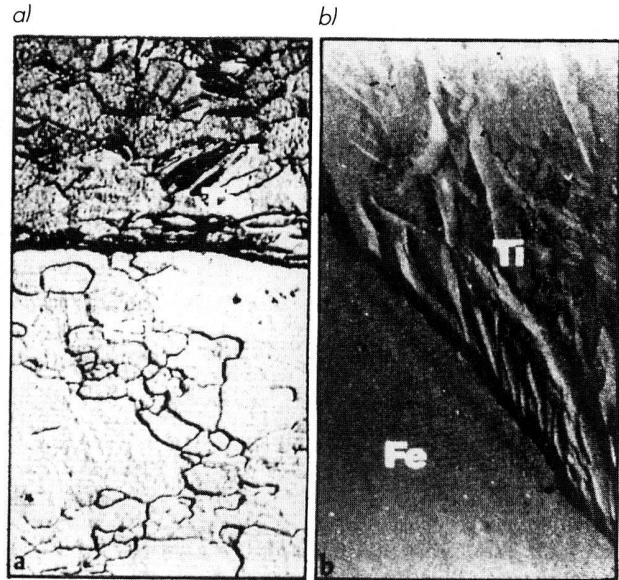


Bild 1.

Links: 4 Metallschichten im Vacuum in einem einzigen Stauchvorgang zusammenplattiert. Von oben nach unten: 18/8-Cr-Ni-Stahl, Stahl, Molybdän, 18/8-Cr-Ni-Stahl.

Rechts: Die Verbindung bei höherer Vergrößerung. a) 300 x, b) 2700 x. Saubere Verbindungszone.



mungsgeschwindigkeit. Es wird darüber berichtet, dass es gelingt, Stähle mit etwa 1,5% C zu sehr komplizierten Formen umzuformen. Neuerdings weiss man auch, dass sich Keramik superplastisch verformen lässt, allerdings bei wesentlich höheren Temperaturen und nur ganz geringer Umformgeschwindigkeit. Ich möchte hier darauf aufmerksam machen, dass auch bei der Alpenfaltung eine superplastische Umformung im Spiel ist, und zwar bei mässig hohen Temperaturen, aber sehr langsamer Verformungsgeschwindigkeit.

Oberflächenschutz

Dem Schutz der metallischen Oberfläche kommt mehr und mehr Bedeutung zu. Man versucht bewusst, eine klare Funktionstrennung zu machen, indem man zu den mechanischen Eigenschaften des Stahles auf den Oberflächen viel besseren Schutz gegen äussere Angriffe anbringt. Das normale Verzinken wird verbessert, indem man Zink-Nickel-Legierungen aufbringt, womit man gezwungen ist, galvanisch zu verzinken. Kombinationen dieser Schichten mit zusätzlichen organischen Schutzschichten werden sehr stark in Japan gefördert.

Es scheint, dass das Vakuumplattieren einen sehr hohen Stellenwert erhält. Es ist im wesentlichen auf Bleche beschränkt. Das Verfahren an sich ist sehr alt, die ersten Arbeiten stammen aus den 50er Jahren. Es geht von folgenden Voraussetzungen aus: Die meisten Metalle, mit Ausnahme der Edelmetalle, haben die Eigenschaft, an der Luft eine dünne Oxidschicht zu bilden. Bei höheren Temperaturen und Vakuum ist es möglich, dass sich diese Schicht zurückbildet. Dies sind die Voraussetzungen für das Vakuumplattieren. So ist es z. B. möglich, bei 800 °C und 10^{-4} Atmosphäre Titan auf Stahl aufzulegen, ohne dass oxidische oder intermetallische Verunreinigungen in der Metallschicht vorkommen. Ähnlich verhalten sich Mo- und austenitische Stähle. Wenn die Verbindungszone fehlerfrei ist, verhält sich das Material, wie wenn es aus einem Stück wäre. Bei den heutigen Plattierungsprozessen muss man die Oxidhaut durch plastische Verformungen verdünnen. Dies geschieht in mehreren Walz-Schritten. Dabei entstehen intermetallische chemische Verbindungen zwischen den beiden Materialien, welche im Normalfall sehr spröde sind, was in vielen Fällen zur örtlichen

Bezeichnung	Hersteller	Gehalt, %					
		Cr	Ni	Mo	Cu	N	PRE _N
AL-6XN (UNS-N08367)	Allegheny	20,8	25,0	6,5		0,20	45,4
Uranus SB 8	Creusot-Loire	25,0	25,0	5,0	1,5	0,15	43,9
254 SMO (UNS S31243)	Avesta	20,0	18,0	6,1	0,7	0,20	43,3
A 965 (UNS S31254)	VEW	20,0	18,0	6,1	0,7	0,20	43,3
HR 8N	Sumitomo	21,0	24,5	5,8	0,8	0,20	43,3
AL-6X (UNS N08366)	Allegheny	20,3	24,5	6,3			41,4
Cronifer 1925 hMO (UNS N08925)	VDM	21,0	25,0	5,9		0,14	42,7
Sanicro 28 (UNS N08028)	Sandvik	27,0	31,0	3,5	1,0		38,9
Alloy Nr. 20 Mod. (UNS N08320)	Haynes	22,0	26,0	5,0			38,8

Bild 2. Die chemische Zusammensetzung einiger Duplexstähle.

Quelle: Nickel Development Technical Series Nr. 10011.

Beschädigung der Schutzschicht führen kann, wobei ein allfälliger Korrosionsschutz hinfällig wird (Bild 1).

Duplexstähle

Die bis anhin gut bekannten 18/8 CrNi-Stähle genügen hinsichtlich Korrosionswiderstand in Meerwasserumgebung und Chemie den Anforderungen nicht mehr. Sie werden ersetzt durch sogenannte Duplexstähle, bei welchen der Cr-Gehalt gesteigert ist und zusätzlich Elemente wie Molybdän, Kupfer und Stickstoff hinzukommen (Bild 2). Duplexstähle heißen sie, weil sie nicht rein austenitisch, sondern ferritisch-austenitisch sind. Es scheint, dass sie in sehr vorteilhafter Weise die guten Eigenschaften des Austenits mit dem Ferrit kombinieren. Der Austenit bringt eine allgemein gute Korrosionsbeständigkeit und Schweißbarkeit, der Ferrit schützt gegen Spannungsrisskorrosion und erzeugt eine deutliche Steigerung der Festigkeit (Bild 3).

Superlegierungen

Superlegierungen werden in Turbinen eingesetzt, wobei es auf hohe Festigkeit bei hohen Temperaturen ankommt. Die konventionellen Ni-Basislegierungen können in Extremfällen bei über 1000 °C eingesetzt werden. Man weiss schon sehr lange, dass die Verbindung, welche die Warmfestigkeit erzeugt, Nickel-Aluminid ist (NiAl₃).



Bild 3. Gegossene Pumpenräder aus Duplexstahl.

Dieses Material ist sehr spröde und hat die Tendenz, sich in der metallischen Grundmasse aufzulösen. Das bedeutet, dass schlussendlich sehr kritische Warmbehandlungen im Gebiet um 1100/1150 °C durchgeführt werden müssen. Es kann vorkommen, dass, wenn die vorgeschriebene Temperatur um 5 °C überschritten wird, bereits lokale Aufschmelzungen vorkommen, was zur irreparablen Zerstörung des ganzen Stückes führt. In einem Projekt des Nationalfonds Nr. 19 führt BBC eine rechnergestützte Untersuchung zur Erzeugung von solchen Materialien durch.

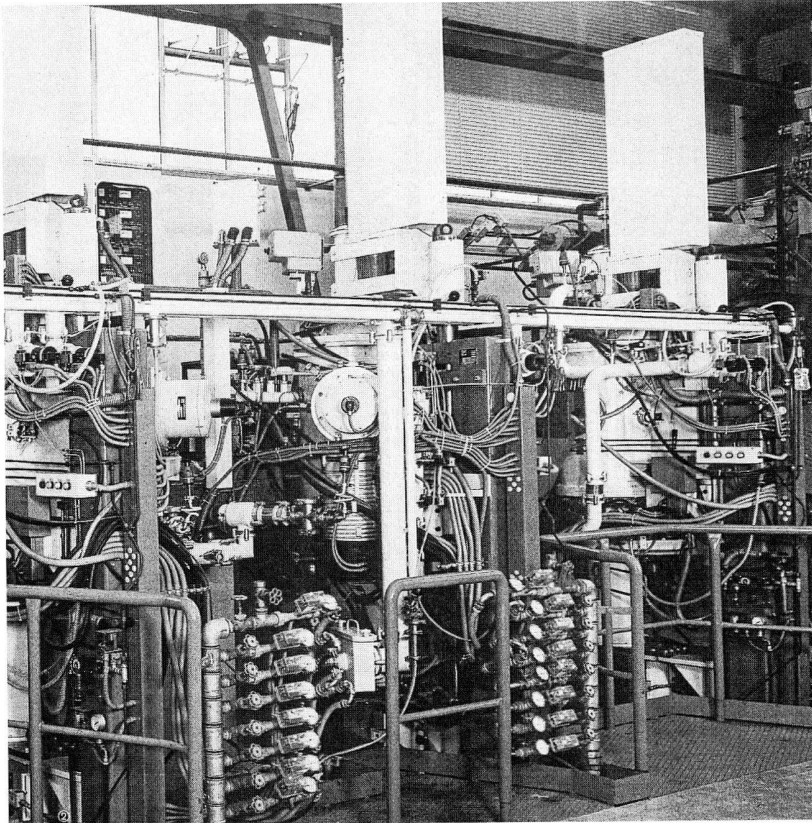


Bild 4a. Schmelz- und Vergiessanlage für Einkristall-Gussstücke.

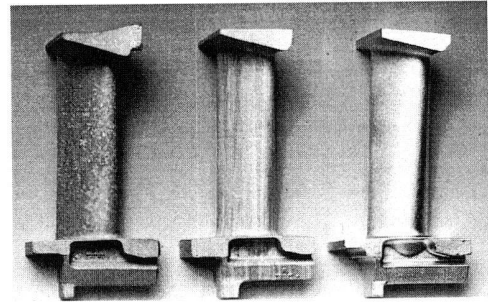


Bild 4b. Turbinenschaufeln.
Links: normal erstarrt (polykristallin).
Mitte: gerichtet erstarrt.
Rechts: Einkristall.

Bild 4a) zeigt, wie komplett die Schmelzeinrichtungen sind, welche zur Herstellung von Turbinenschaufeln eingesetzt werden. Bild 4b) zeigt drei Schaufeln, welche verschiedenartig erstarrt sind. Links eine Schaufel mit normalem kristallinem Gefüge, in der Mitte eine gerichtet erstarrte Schaufel und rechts ein sogenannter Einkristall. Die Schaufel rechts kann bei ca. 60 °C höheren Temperaturen eingesetzt werden als die Schaufel links.

Titan

Noch vor gar nicht so langer Zeit wäre der Hauptanteil über neue Materialien von Titan bestritten worden. Titan hat sich als Material für Gelenkprothesen eine gewisse Anwendung erschlossen. Dies hauptsächlich, weil sein E-Modul relativ niedrig und dementsprechend knochenähnlicher ist als Stahl, und weil es wahrscheinlich sehr gut bioverträglich ist. Man nimmt an, dass Titan sich chemisch mit den Knochen verbindet.

Aluminium

Aluminium wird allgemein eine gute Zukunft vorausgesagt. Zu erwähnen sind die an und für sich bekannten Aluminium-Lithium-Legierungen, welche sich langsam zum Stand der Technik hochentwickelt haben. Durch Zulegieren von 2 bis 3 % Li werden das spezifische Gewicht im Vergleich zu Aluminium um fast 10 % reduziert, der E-Modul erhöht und die Streckgrenze fast verdoppelt (Bild 5). Im Flugzeugbau versprechen sich die Al-Hersteller eine Umkehrung des Trends zum faserverstärkten Kunststoff.

Magnesium

Magnesium kann viel reiner als vor 10 Jahren hergestellt werden. Damit

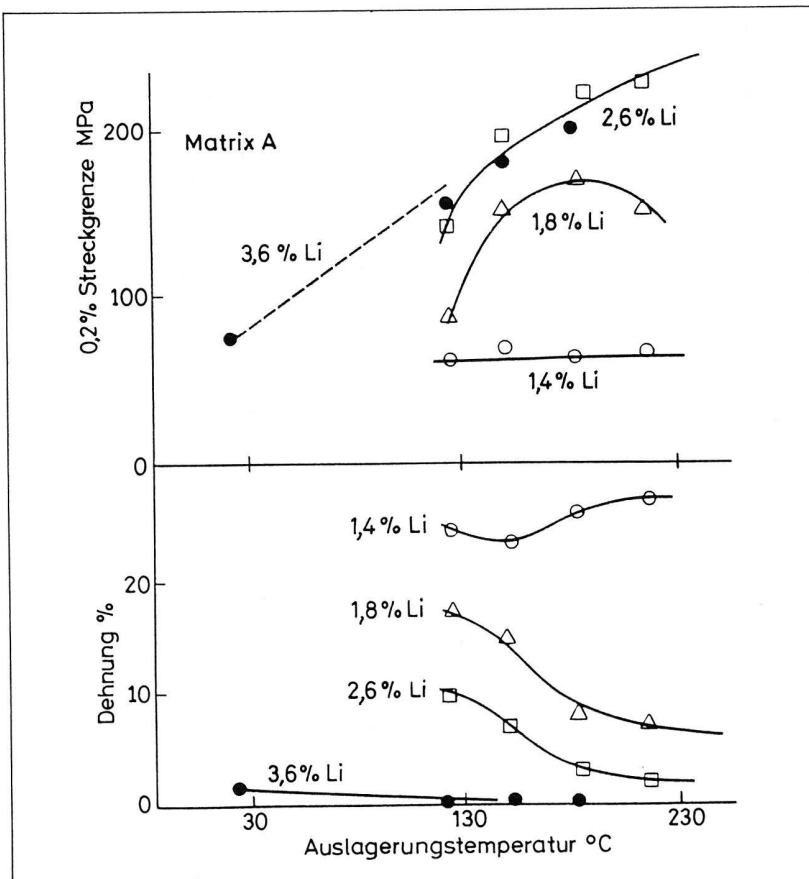


Bild 5. In Al-Li-Legierungen steigt die Streckgrenze und sinkt die Dehnung mit steigendem Li-Gehalt. Die Ausscheidung besteht aus feinkörnigen Al_3Li -Teilchen.

soll die Korrosionsfestigkeit dieses Materials so gut geworden sein, dass es im Automobilbau auch für Aussen-teile verwendet werden kann. Die Älteren unter uns wissen, dass die Firma Georg Fischer AG vor etwa 30 Jahren in der damaligen Räder-abteilung Mg-Felgen in Fahrversuchen hatte, welche aber wegen Korrosion – ich nehme an wegen Unverträglichkeit mit dem Reifenmaterial – nie zum Einsatz gelangten.

Ein besonderes Kapitel sind die Voraus-sagen in die Zukunft, welche in grosser Zahl von einzelnen Forschern gemacht werden und welche in den meisten Fällen nur Ausdruck von Wunschvorstel-lungen sind. Sie werden aber in man-chen Fällen als Mittel für die Beschrei-bung der Zukunft eingesetzt und stiften viel Unsicherheit. Eine magische Zahl ist das Jahr 2000, wo dann sehr plötz-lich viele Neuheiten passieren werden.

Hier einige Beispiele:

- Der Einsatz von Kunststoffen wird sich im Automobilbau von 1990 bis 2000 umsatzmässig verdoppeln (Bild 6).
- In Überschallflugzeugen wird Alumi-nium durch Kompositmaterialien ersetzt werden (Bild 7).
- Bis zum Jahr 2010 werden im Flug-zeugbau die konventionellen Mate-

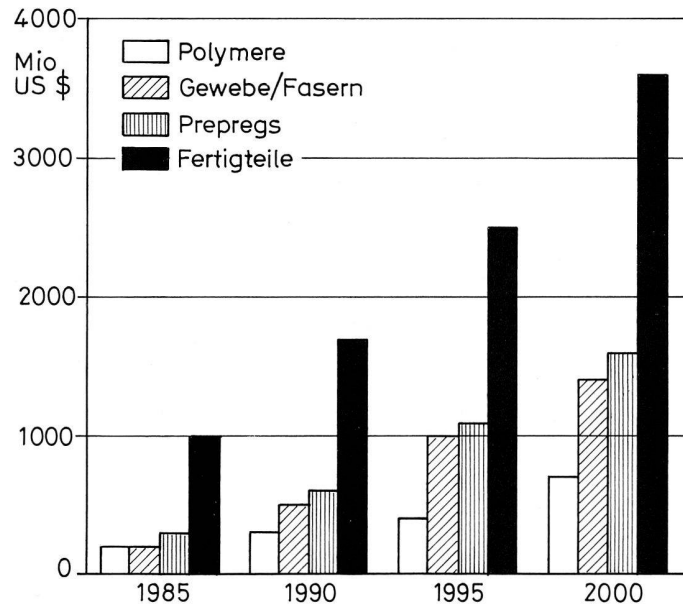


Bild 6. Hochleistungsverbundwerkstoffe: Umsatz weltweit im Fahr-zeugbereich (Mio. US \$).

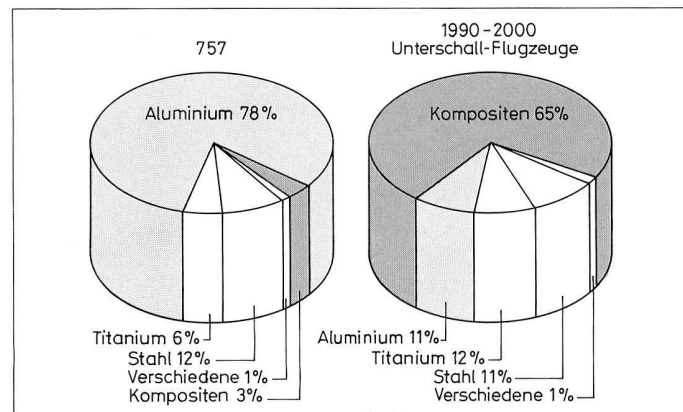


Bild 7. Anteil der neuen Werkstoffe beim Flugzeugbau. (Quelle: Boeing Commercial Airplane Co.)

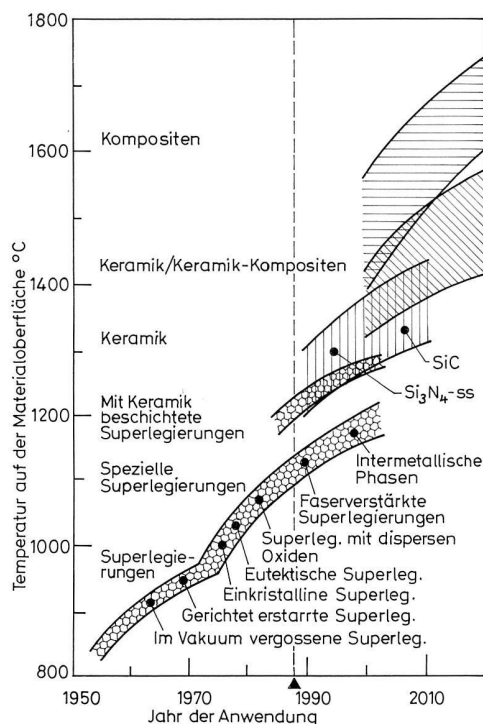


Bild 9. Entwicklungstrends für Hochtemperaturwerkstoffe im Turbinenbau (NASA).

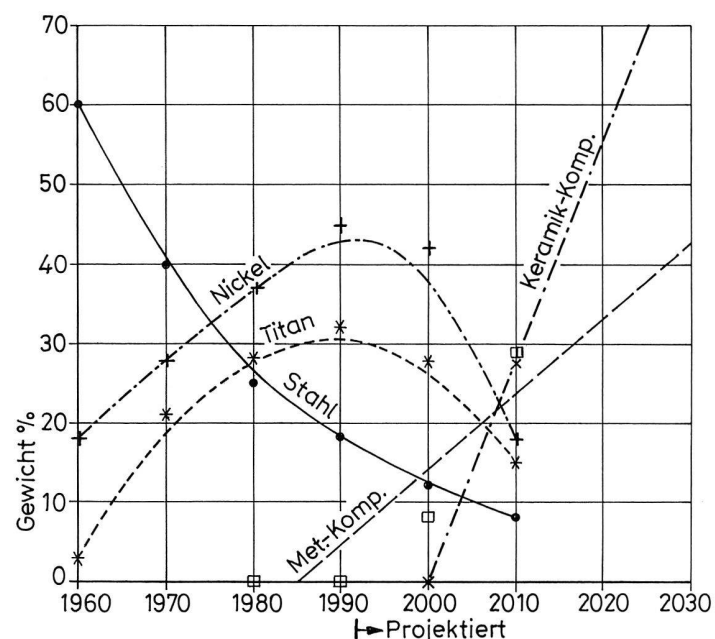


Bild 8. Werkstoffe für Flugzeuge: Zukunftstrends. (Quelle: Rolls-Royce 1988.)

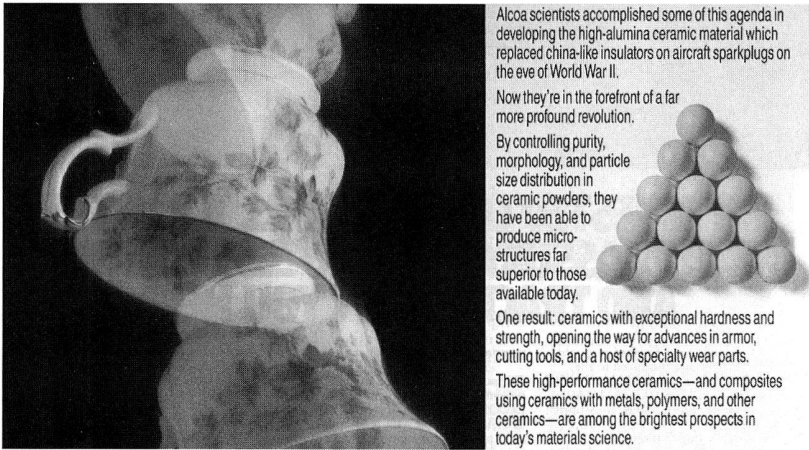


Bild 10. Keramik aus Al_2O_3 (Tonerde): die unzerbrechliche Teetasse; Schutzplatten für Panzer.

rialien weitgehend durch Kompositmaterialien, insbesondere Keramikkomponenten, ersetzt werden (Bild 8).

- Im Jahr 2010 werden für Turbinenschaufeln Materialien zur Verfügung stehen, welche bei Temperaturen bis zu $1600^\circ C$ eingesetzt werden können. Heute ist man auf Temperaturen von 1000 und $1100^\circ C$ beschränkt (Bild 9).

Keramik

Hier möchte ich nur auf Entwicklungen auf dem Gebiet der Strukturkeramik oder Feinkeramik eintreten. Im Englischen heisst sie Engineering oder Structural Ceramic. Über die allgemeine Tendenz wurde in «Advanced Materials & Processes», 1/1989, S. 29, berichtet. Die Kommerzialisierung der Keramik bereitet Schwierigkeiten, es sind vor allem Probleme der Sprödigkeit.

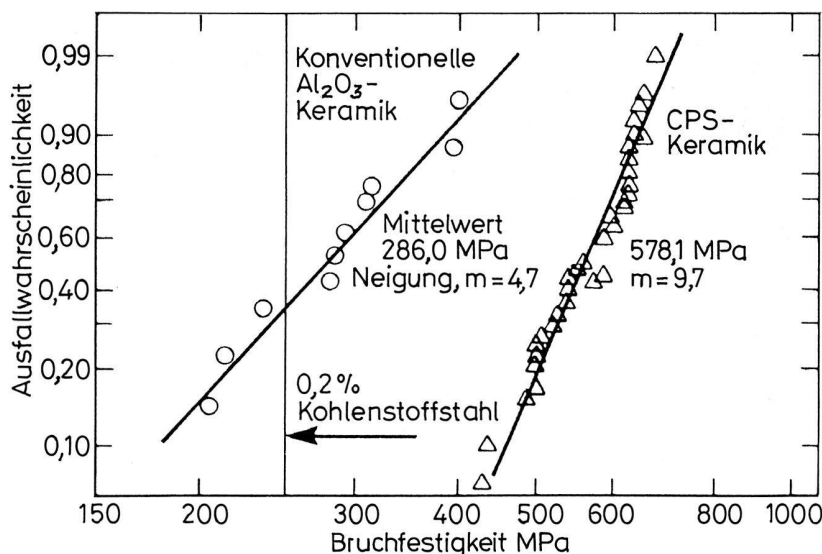


Bild 11. Die Ausfallwahrscheinlichkeit von Keramikbauteilen ist ausserordentlich breit gestreut. Die Wahrscheinlichkeit eines Bruches bei sehr tiefer Belastung ist zwar gering, aber nicht mit Sicherheit auszuschliessen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit von Stahlbauteilen ist unterhalb der Streckgrenze gleich null.

Die Ausgangsmaterialien für Keramik sind Pulver, und sie bestehen aus Oxiden, Nitriden, Karbiden und Boriden der Metalle Aluminium, Silizium, Zirkon und anderen. Im Bild 10 sehen Sie den Ausschnitt einer Reklame über die unzerbrechliche Teetasse; was uns aber mehr interessiert, sind die Kügelchen auf der rechten Seite. Eine Lehrmeinung bei der Keramikherzeugung ist, dass man möglichst einheitlich grosse Kügelchen verarbeiten müsste. Diese haben aber eine sehr schlechte Raumerfüllung. Eine andere Gruppe von Forschern sieht als ideal Kugeln von verschiedenen Grössen, wobei die Durchmesser dieser Kugeln so zusammengestellt sind, dass sie eine ideale Raumerfüllung geben. Auch über die Grösse der Kugeln ist man sich nicht sicher. Man weiss, dass sie sehr fein sein müssen und dass es wahrscheinlich ist, dass die Keramik um so besser wird, je feiner die Kugeln sind. Dies ist aber andererseits wieder ein Problem der Handhabung, der Machbarkeit und des Preises. Auch wie man solche Kugeln erzeugt, ist noch nicht abgeklärt. Ein Verfahren ist das sogenannte Gel-Sol-Verfahren. Es ist eine Abscheidung aus einer übersättigten Lösung, also ein chemisches Verfahren. Ein weiteres Verfahren ist, dass man bereits pulverförmige Substanzen in einem Plasmabrenner weiter zerstäubt. Konventionelles Mahlen wird auch gemacht. Solche Pulver mit ihren sehr grossen Oberflächen sind sehr schwierig zu verarbeiten. Damit sie überhaupt in Formen gepresst werden können, müssen organische Gleitmittel zugegeben werden, die dann beim Brennvorgang wieder entfernt werden müssen. Dieses Vorgehen hat relativ grosse Schwindung zur Folge, und Fehlstellen lassen sich bis jetzt wenigstens nicht vermeiden. Damit komme ich zum Hauptproblem der Keramik, einer inhärenten Sprödigkeit als Folge ihres Aufbaues. Jedes Keramikstück birgt die Gefahr, dass die Wahrscheinlichkeit eines Bruches auch bei tiefen Beanspruchungen nicht ausgeschlossen werden kann. Die Theorie der Bruchmechanik kann dies erklären. Metallische Werkstoffe vertragen Fehler in der Grössenordnung von $1/10$ mm, ohne dass das Bruchverhalten des Werkstoffes beeinträchtigt wird. Wegen seiner hohen Plastizität fließen die Spannungen um kleine Fehler herum. In keramischen Materialien

mit ihrer grossen Härte und ganz geringen Duktilität lösen Fehler in der Gröszenordnung im μ -Bereich bereits spröde Risse aus. Dieses Problem ist heute noch nicht gelöst, und deshalb ist der Grosseinsatz von Keramik um mehrere Jahre hinausgezögert worden. Bild 11 zeigt die Wahrscheinlichkeit des Brucheintritts in Abhängigkeit von der Belastung. Wenn man die Kurven extrapoliert, sieht man, dass – zwar sehr selten – Brüche bei extrem niedrigen Belastungen auftreten können. Zu beachten ist die senkrechte Linie von normalem Kohlenstoffstahl bei ca. 250 MPa.

Dabei hätte die Keramik einen ganzen Strauss von vorzüglichen Eigenschaften. Sie besitzt z. B. eine natürliche Warmfestigkeit, die sich auf Temperaturgebiete bezieht, die weit über denen der Metalle liegen. Dazu ist sie, weil es sich ja um träge chemische Verbindungen handelt, von Natur aus korrosionsfest. Keramische Werkstoffe sind wegen ihrer hohen Härte verschleissfest, wobei die Verschleissfestigkeit aber immer Eigenschaften von zwei Partnermaterialien beinhaltet. Unerwarteterweise erwies sich der Reibungskoeffizient eines Keramikknokens als ungünstiger als die bekannten metallischen Paarungen. Keramik kann ausserdem ein idealer elektrischer Isolator sein.

Keramik wäre wegen dieser Eigenschaften ein ideales Einsatzgebiet im Maschinenbau. Im Automobilbau hat man sich sehr viel von Keramikbauteilen versprochen. Bild 12 zeigt, um welche Teile es sich im Moment handelt. Es zeigt aber auch, dass die grossserienmässigen Einführungen kaum vor dem Jahr 2000 erfolgen werden. Und damit komme ich zum Kyocera und Keramikdieselmotor. Die Japaner haben sich zum Ziel gesetzt, einen Motor soweit wie möglich aus Keramikteilen zu bauen. Die Keramik wurde vornehmlich um den Verbrennungsraum herum gebaut. Dieser Motor war bedauerlicherweise eine grosse Enttäuschung, was den thermischen Wirkungsgrad anbelangte. Die Thermodynamik lehrt, je weniger Wärme bei einem Wärmeprozess durch die Wände abgeführt wird, desto heisser läuft die Verbrennung, und desto höher wird der thermische Wirkungsgrad. Dies war beim Keramikmotor mit Sicherheit nicht der Fall. Eine echte Erklärung habe ich aber nirgends gefunden.

Bauteil	Stand der Entwicklung	Jahr	Zeitraum
Turbolader-Rotoren	Markteinführung 5% Marktanteil Kostengleichheit mit Metallteil	1990 1995 2000	1989–1990 1995–2000 1998–2010
Kipphebel Schlepphebel	Markteinführung 5% Marktanteil Kostengleichheit mit Metallteil	1990 1995 2000	1989–1991 1995–1997 1998–2005
Ventil	Markteinführung 5% Marktanteil Kostengleichheit mit Metallteil	1995 2000 2010	1995 1998–2000 2003–2010
Ventilführung	Markteinführung 5% Marktanteil Kostengleichheit mit Metallteil	1992 2000 2003	1990–1995 1995–2000 2000–2009
Ventilsitz	Markteinführung 5% Marktanteil Kostengleichheit mit Metallteil	1993 2000 2005	1991–1995 1995–2000 2000–2005
Kolbenoberteil	Markteinführung 5% Marktanteil Kostengleichheit mit Metallteil	1995 2000 2005	1993–1995 1998–2005 2000–2010
Kolben	Markteinführung 5% Marktanteil Kostengleichheit mit Metallteil	2000 2005 2020	1999–2000 2005–2010 2010–2020
Kolbenbolzen	Markteinführung 5% Marktanteil Kostengleichheit mit Metallteil	1995 2000 2010	1994–1997 1998–2005 2005–2010
Zylinderbüchse	Markteinführung 5% Marktanteil Kostengleichheit mit Metallteil	1995 2002 2010	1993–2000 2000–2010 2005–2015
Kolbenringe	Markteinführung 5% Marktanteil Kostengleichheit mit Metallteil	1995 2000 2005	1992–2000 1999–2005 2003–2010
Auslass-Portliner	Markteinführung 5% Marktanteil Kostengleichheit mit Metallteil	1990 1995 2000	1989–1990 1994–1995 1998–2000

Meine bisherigen Ausführungen zeigen, dass es für eine grossangelegte Keramikproduktentwicklung noch etwas früh ist. Die Entwicklung auf dem Keramiksektor kann eher als Grundlagenentwicklung bezeichnet werden. Es geht darum, mit den Fehlstellen in der Keramik fertig zu werden. Man versucht, Verarbeitungsmethoden zu finden, bei welchen sie nicht entstehen; eine zweite Möglichkeit ist, dass man in die Keramik eine zweite Phase einbaut, welche zäh ist und entstandene Risse auffangen kann, ähnlich, wie man eine Fallmasche zuklebt.

Solche Stoffe können Whiskers sein. Whiskers sind chemische Verbindungen, welche überhaupt keine Fehlstellen aufweisen. Ein reiner Stahl ohne Fehlstelle würde eine Festigkeit von 1000 kg/mm² ergeben, bei konventionellen Stählen sind wir schon stolz, wenn wir über 200 kg/mm² kommen. Dieses Beispiel zeigt die potentiellen Eigenschaften von solchen Whiskers-Materialien.

Bild 12. Die Einführung von Keramik-Komponenten im Automobilbau.

Quelle: *Advanced Materials and Processes 1/89.*

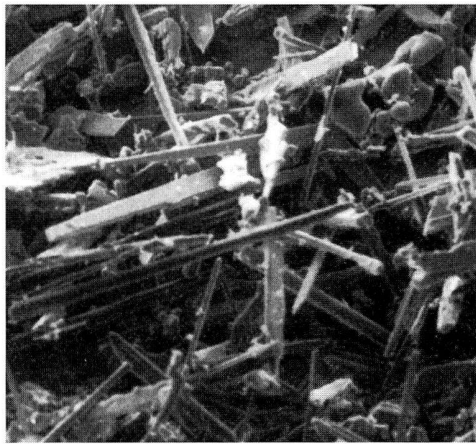
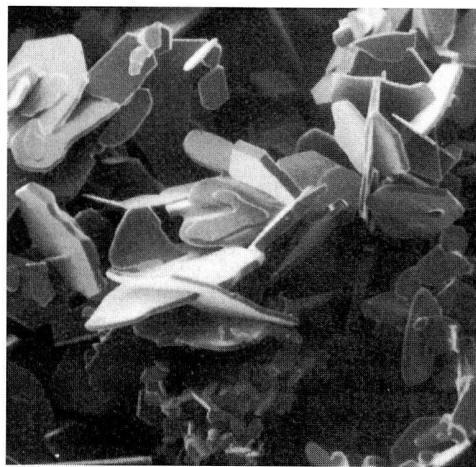
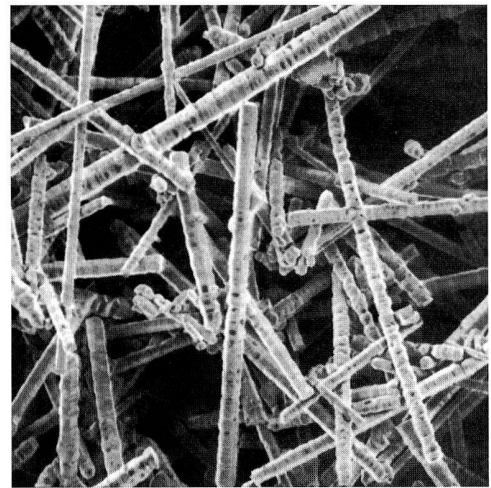
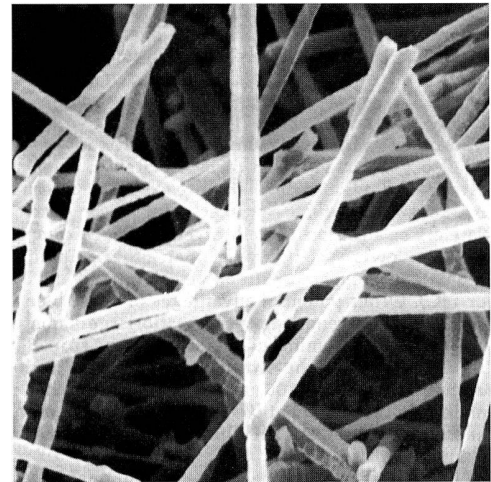


Bild 13.
a) Bor-Karbid-Plättchen (1000 ×).



b) Sechseckige Einkristallplättchen aus Silizium-Karbid (220 ×).



c) + d) Stengelförmige Silizium-Karbid-Fasern.

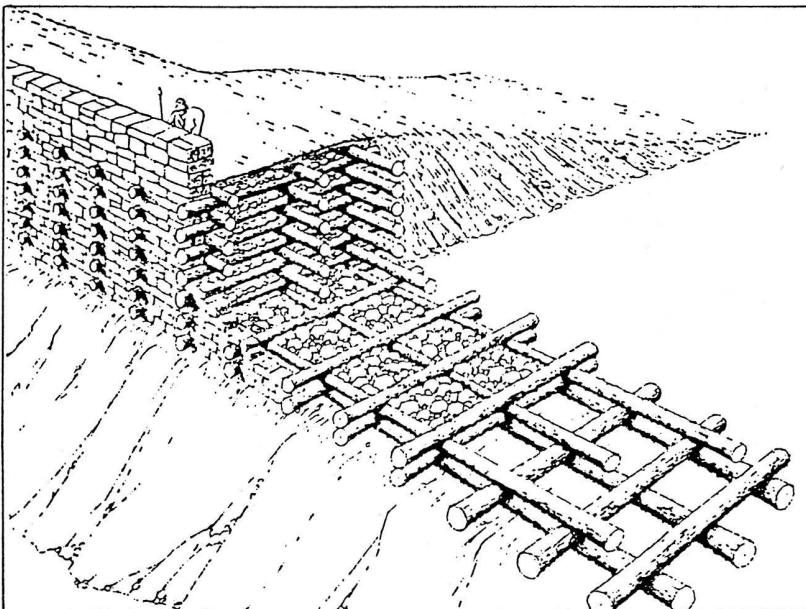


Bild 14. Unempfindlich gegen Feuer und Rammböcke war die gallische Mauer – oder murus gallicus, wie Cäsar sie in seinen Schriften nannte. Die Kernstruktur bestand aus Längs- und Querbalken, die an den Kreuzungsstellen zusammenge-nagelt oder -gebunden wurden, um maximalen Halt zu geben. Der Hohlraum dazwischen wurde mit Steinen und Schotter aufgefüllt. Eine Steinwand bildete die feuersichere Stirnseite der Mauer. Auf der Innenseite führten breite Rampen aus Erde zur Mauer hinauf und erlaubten den keltischen Verteidigern bequemen Zugang zu ihren Kampfposten hinter einer fast schulterhohen schützenden Steinbrüstung.

Die Bilder 13 a) bis d) zeigen, wie solche Whiskers unter starker Vergrößerung aussehen.

Unter den Verarbeitungsverfahren zur Herstellung von Keramiktteilen möchte ich die Mikrowellenerhitzung anführen. Sie beruht auf denselben Prinzipien wie die Mikrowellenherde in der Küche. Die Mikrowellenerhitzung hat den Vorteil, dass die Temperatur nicht von aussen nach innen kriechen muss, was unweigerlich zu sehr hohen Spannungen führt, sondern ein Keramiktteil über den ganzen Querschnitt mehr oder weniger gleichmässig erhitzt werden kann. Die Folge ist, dass die Keramik beim Brennen eine höhere Dichte annimmt, was direkt zu einer Reduktion der Grösse, aber nicht der Anzahl der Fehlstellen führt.

Als ich die Whiskers erwähnte, bin ich bei den Kompositen angelangt. Kompositen nennt man Materialien, bei welchen zwei oder mehr Bestandteile mit sehr verschiedenen Eigenschaften zusammengebracht werden.

Wenn man das richtig macht, hat man die Chance, dass sich die guten Eigenschaften der beiden Partner stärker auswirken als die schlechten Eigenschaften. Normalerweise versteht man unter Kompositen Materialien, bei welchen die Gefügebestandteile klein sind, sehr feine Glasfasern in Kunststoffen und eben herunter bis zu den Whiskern.

Es gibt aber auch grobe Kompositen, Eisenbeton z. B. oder, um im Historischen zu bleiben, die keltische Mauer, der «*murus gallicus*», welche den Soldaten Caesars grosse Mühe bereitete, weil sich die keltischen Mauern mit den damaligen Rammgeräten nicht zusammenschlagen liessen (Bild 14).

Die meisten Kompositen sind Kombinationen mit dem Basismaterial Kunststoff und irgendwelchen Fasern. Auf diese möchte ich nicht eingehen, weil sie in das Gebiet der Kunststoffe gehören. Es gibt aber auch Kompositen auf dem Gebiet der Metalle. Als Beispiele möchte ich Ihnen die Kombinationen, welche im Bild 15 zusammengestellt sind, zeigen. Technologisch vor der industriellen Verwertung ist Aluminium, welches mit sehr feinkörnigem Siliziumkarbid aufgeladen wird. Dieses Material wird, wie im Bild 16 gezeigt, in Rugelform geliefert. Durch sekundäre Verformungsprozesse wird es dann in die endgültige Form gebracht. Festigkeitssteigerungen von 20 bis 30% sind durchaus realistisch.

Meine Damen und Herren, damit bin ich am Ende angekommen. Gestatten Sie mir im Sinne einer Zusammenfassung nur noch den folgenden Gedanken:

Der technische Fortschritt auf dem Gebiet der Materialien ist schnell, aber nicht rasant, er erfolgt kontinuierlich und nicht unstetig. Die Materialwelt des Jahres 2000 wird sich von der heutigen, 1990, nicht viel unterscheiden. Die grossen Veränderungen in der Welt geschehen nicht auf diesem Gebiet, sondern in der Anwendung der Mikroelektronik. ■

Metall	Fasern	Anwendungen
Aluminium Magnesium Blei Kupfer	Graphit	Strukturmaterial für Satelliten, Raketen und Helikopter Strukturmaterial für Satelliten und Raumfahrzeuge Platten für Batterien elektrische Kontakte und Lager
Aluminium Magnesium Titan	Bor	Schaufeln für Kompressoren Strukturmaterial für Antennen Schaufeln für Flugzeugturbinen
Aluminium Titan	Bor-Silizium	Schaufeln für Flugzeugturbinen Hochtemperaturanwendung, Turbinenschaufeln
Aluminium Blei Magnesium	Al ₂ O ₃ (Tonerde)	Halterungen für Supraleiter im Reaktorbau Batterieplatten Helikopterbau
Aluminium Titan Superlegierungen (Kobalt-Basis)	Silizium-Karbid	Hochtemperaturanwendung Hochtemperaturanwendung Hochtemperaturanwendung im Maschinenbau
Superlegierungen	Molybdän	Hochtemperaturanwendung im Maschinenbau
Superlegierungen	Wolfram	Hochtemperaturanwendung im Maschinenbau

Bild 15. Repräsentative Metall-Matrix-Kompositen (MMC-Materialien).
Quelle: *Advanced Materials & Processes incl. Metal Progress 2/90.*

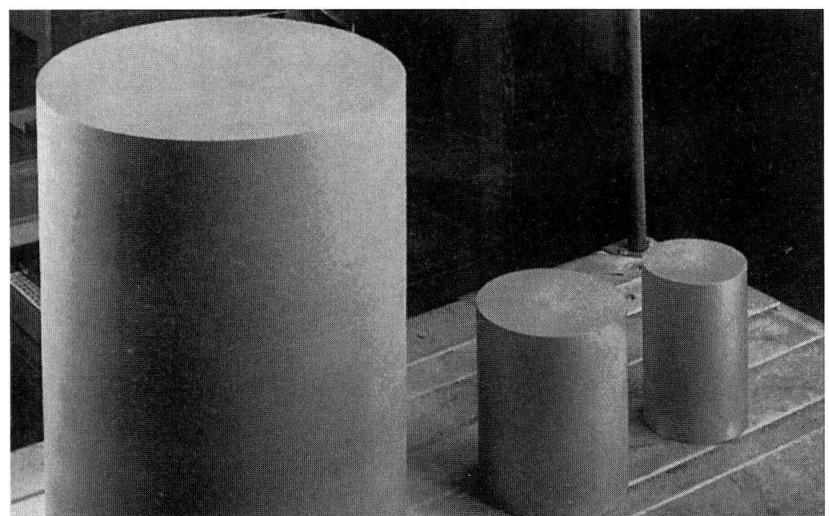


Bild 16. Mit Si-C-Teilchen verstärktes Aluminium. Unten: Rohlinge; oben: Durch Umformen erzeugte Bauteile.