

Vom Triebwerk zum Mikrochip: Über die Grundlagen neuer Materialentwicklungen

Prof. Dr. EDUARD ARZT
Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart

Einführung

Der Traum vom Fliegen ist so alt wie die Menschheit selbst. Pieter Brueghel hat vor 400 Jahren die bekannte Erzählung aus der griechischen Mythologie ins Bild gesetzt (Abb. 1): Dädalus, der Architekt des kretischen Labyrinths, muß mit seinem Sohn Ikarus von der Insel fliehen. Sie benutzen dabei – dem Stand der damaligen „Technologie“ folgend – selbstgebaute Flügel aus Federn, die mit Wachs an den Schultern befestigt waren. Trotz der Mahnungen seines Vaters kommt es zur Katastrophe, wie sie Ovid in seinen „Metamorphosen“ beschreibt:

„..... da erweicht der näheren Sonne
zehrende Glut das duftende Wachs, die Fessel der Feder.
Hingeschmolzen das Wachs; er rührt die nackenden Arme,
kann, seiner Flügelrunder beraubt, keine Lüfte mehr fassen.
Und seinen Mund, der Vater noch ruft, verschlingen die dunklen
Wogen der blauen Flut, die seinen Namen erhalten.“

Das übrige Leben geht unbeirrt weiter, der Bauer und der Fischer bemerken nicht einmal, was passiert ist. Über dieses Bild, das in zwei verschiedenen Ausführungen erhalten ist, wurde viel Interessantes diskutiert und geschrieben. Die Moral des Gemäldes war den Zeitgenossen Brueghels wohlbekannt: Die Warnung vor dem ungezügelten Höhenflug, davor, dem Unmöglichen nachzujagen. Dem aufmerksamen Betrachter entgeht auch ein weiterer Bezug nicht: mit dem Pflug, dem Dolch und dem Geldbeutel bezeichnet Brueghel eine Epoche der Furchen und Einschnitte – Saat, Eisen und Gold als Symbole für den Aufbruch ins eiserne – wir würden heute sagen ins technische – Zeitalter.

Aus neuzeitlicher Sicht bekommt die Botschaft der Ikarus-Erzählung eine zusätzliche Komponente: Wissenschaft und Technik haben nämlich die Grenze zum Unmöglichen immer weiter hinausgeschoben. Die Frage der Möglichkeit oder Unmöglichkeit ist im naturwissenschaftlichen Bereich zum großen Teil eine Frage der Werkstoffe – eine *Materialfrage* geworden. Ich möchte dies an zwei aktuellen Entwicklungsrichtungen, die wir in Stuttgart intensiv bearbeiten, illustrieren: Triebwerkmaterialien oder allgemeiner Werkstoffe für hohe Temperaturen einerseits, Mikromaterialien, d.h. Werkstoffe mit extrem kleinen Dimensionen, andererseits.



Abb. 1: Pieter Brueghel: „Der Sturz des Ikarus“, ca. 1558 (Musées Royaux des Beaux-Arts de Belgique, Brüssel): Symbol für den Aufbruch ins „technische“ Zeitalter und für „Materialprobleme“.

Betrachten wir zunächst ein modernes Triebwerk eines Passagierflugzeugs: Die im Kompressor angesaugte und verdichtete Luft wird in den Brennkammern mit Treibstoff vermischt und gezündet. Dabei entsteht ein heißes Gas, das mit Überschallgeschwindigkeit durch die Turbine expandiert. Es leistet Arbeit, indem es Vorwärtsschub erzeugt und andererseits die Laufräder der Turbine in Rotation versetzt. Das am höchsten beanspruchte Teil einer Turbine ist das erste Laufrad. Seine Schaufeln sind nicht nur den hohen Temperaturen eines hochkorrosiven Gases ausgesetzt, sondern aufgrund der enormen Zentrifugalkräfte auch großen mechanischen Belastungen unterworfen. Die Entwicklung von hierfür geeigneten Materialien gehört zweifelsohne zu den Triumphen der modernen Werkstoffforschung. Bei der Weiterentwicklung der Hochtemperaturlegierungen ist über die Jahre eine enorme Entwicklung in der Temperatur-Einsatzgrenze zu verzeichnen (Abb. 2). Dank intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeit können heutige Turbinen bei Materialtemperaturen von über 1000°C betrieben werden. Ein Ende des Trends ist nicht abzusehen; neue Vorhaben wie z. B. Überschallpassierflugzeuge werden in Zukunft noch wesentlich höhere Temperatureinsatzgrenzen erfordern. Die prinzipiell besten Ergebnisse erreicht man über die sogenannte Dispersionshärtung – d. h. das Einfügen fein verteilter keramischer Teilchen (Dispersoide) in den metallischen Grundwerkstoff – ich werde auf dieses Prinzip noch ausführlich zurückkommen.

Worin liegt nun der Vorteil der hohen Temperaturen? Jede Wärmekraftmaschine ist um so wirkungsvoller und leistungsfähiger, je höher die Temperatur des Arbeitsgases liegt. Dies schlägt sich unmittelbar in einer Treibstoffersparnis und Leistungssteigerung bei Flugzeugen, aber auch in besserer Energieausnutzung bei der Elektrizitätserzeugung durch Gasturbinen nieder. Der Betrieb von Verbrennungsmotoren lässt sich bei höheren Tempe-

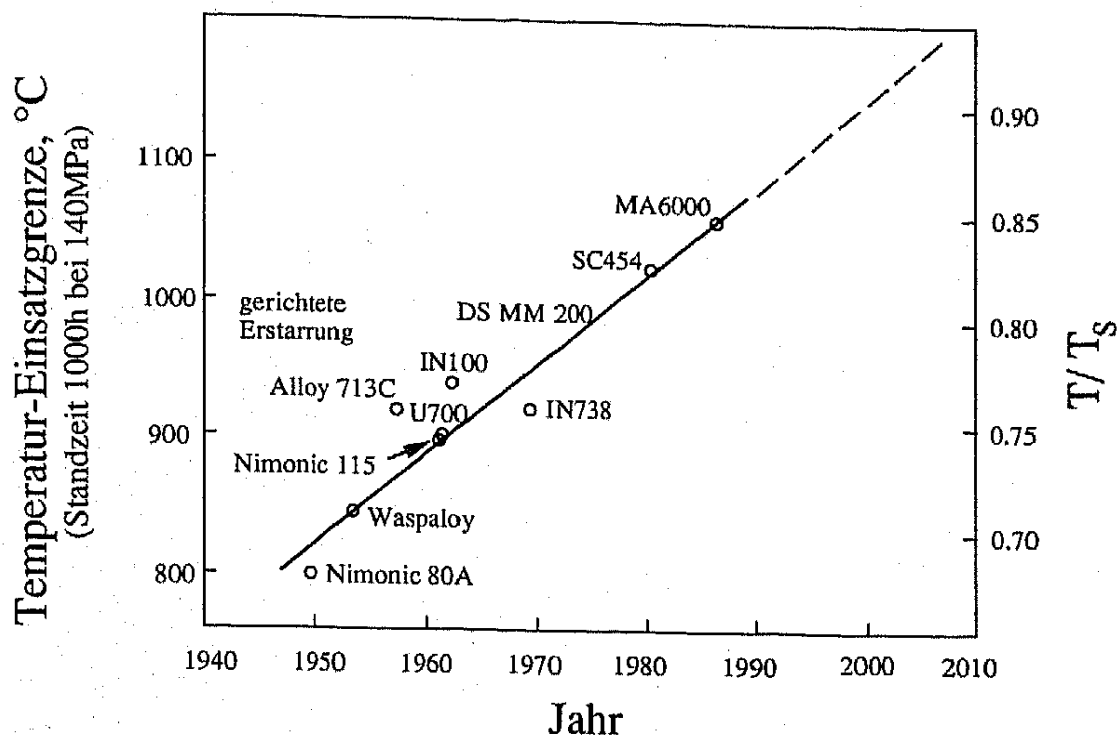


Abb. 2: Der unaufhaltsame Trend zu höheren Werkstofftemperaturen bei metallischen Turbinenwerkstoffen: Bessere Hochtemperaturlegierungen erlauben zunehmende Treibstoffersparnis, günstige Energienutzung und Umweltschonung. (Die Abkürzungen im Diagramm bezeichnen Legierungstypen, die Skala rechts bezieht die Temperaturen auf den jeweiligen Schmelzpunkt.)

raturen zudem meist emissionsärmer gestalten, so daß Hochtemperaturwerkstoffe in vielen Fällen auch zur Schonung der Umwelt beitragen können.

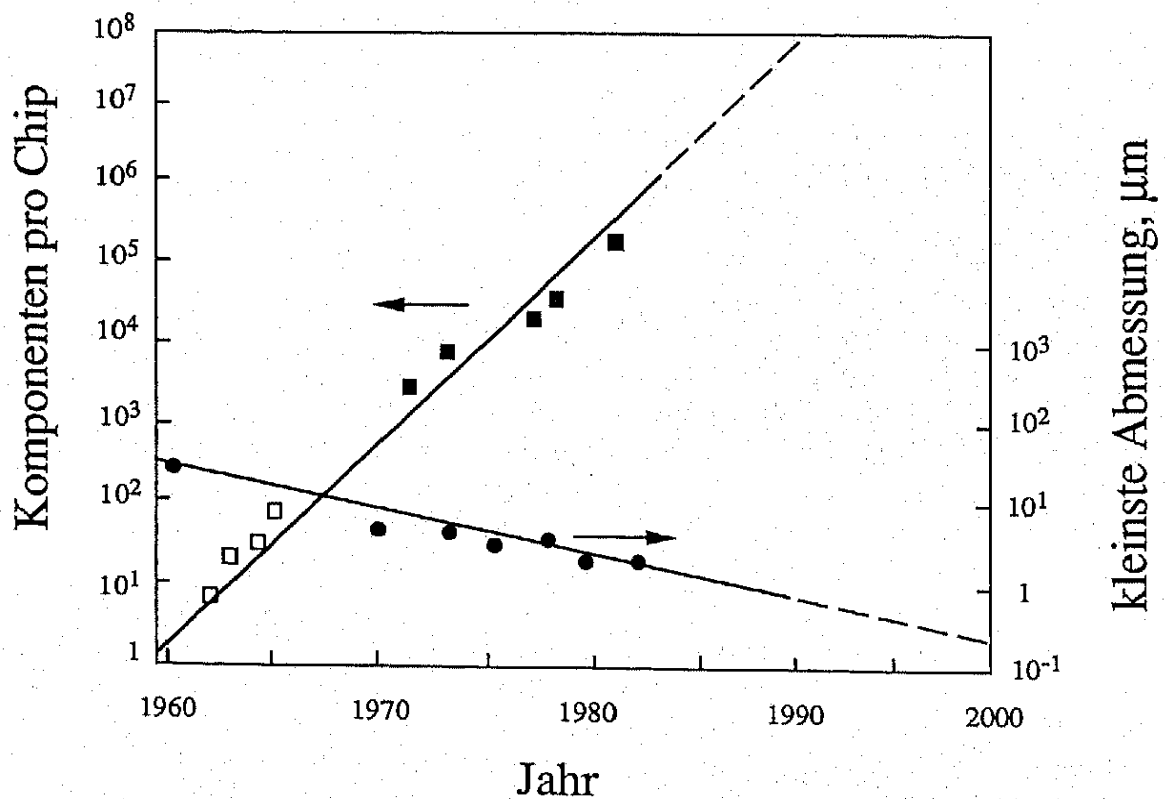
Die Betriebsgrenzen werden jedoch häufig durch die verfügbaren Werkstoffe diktiert. Das Hauptproblem haben Hochtemperaturlegierungen mit Eiswürfeln gemeinsam (Abb. 3): Beim Betrieb darf der Schmelzpunkt eines Materials natürlich unter keinen Umständen erreicht werden; andererseits ist aber schon deutlich darunter ein starker Abfall der Materialeigenschaften zu verzeichnen. Dies liegt daran, daß ein Kristall bei hohen Temperaturen mit einem aufgebrachtten Bienenschwarm zu vergleichen ist: Bis zu 1000mal pro Sekunde tauschen die Atome mit ihren Nachbarn in rasender Geschwindigkeit ihre Plätze. Unter diesen Umständen noch Festigkeit, d. h. Beständigkeit gegenüber einwirkenden Kräften, zu erreichen, erfordert gezielte Maßnahmen auf der Grundlage eines tiefgehenden Werkstoffverständnisses. Ein weiteres Problem liegt in der sogenannten Thermoschockbeständigkeit, d. h. dem Widerstand gegenüber wechselnden Temperaturen: In ein Glas Whisky geworfen, zerspringt ein Eiswürfel deutlich hörbar unter dem Einfluß der Wärmespannungen. Dies darf selbstverständlich beim Anfahren einer Turbine nicht passieren. Ich möchte Ihnen in diesem Vortrag am Beispiel der Hochtemperaturfestigkeit zeigen, daß die gezielte Beeinflussung neuer Werkstoffe eine ungemein interessante intellektuelle Herausforderung für die Grundlagenforschung darstellt.

Szenenwechsel: Betrachten wir nun ein völlig anderes Bauteil, nämlich einen Mikrochip aus einem Computer. Was für Triebwerksmaterialien die Temperatursteigerungen bedeuten, entspricht auf dem Gebiet der Mikroelektronik dem Trend zur unaufhaltsam fortschreitenden Miniaturisierung. Die



Abb. 3: Hohe Temperaturen belasten alle Werkstoffe – nicht nur Eiswürfel, wie hier symbolisch gezeigt. Bei Temperaturen knapp unterhalb des Schmelzpunktes noch ausreichende Festigkeit zu erzielen, ist eine der großen Herausforderungen der Werkstoffforschung.

Vorteile dieser Miniaturisierung liegen ebenfalls in der Leistungsfähigkeit: höhere Speicherdichte, schnellere Funktion und niedrigere Stromaufnahme. Die Anzahl der Komponenten auf einem Chip hat daher über die Jahre rapide zugenommen (Abb. 4).



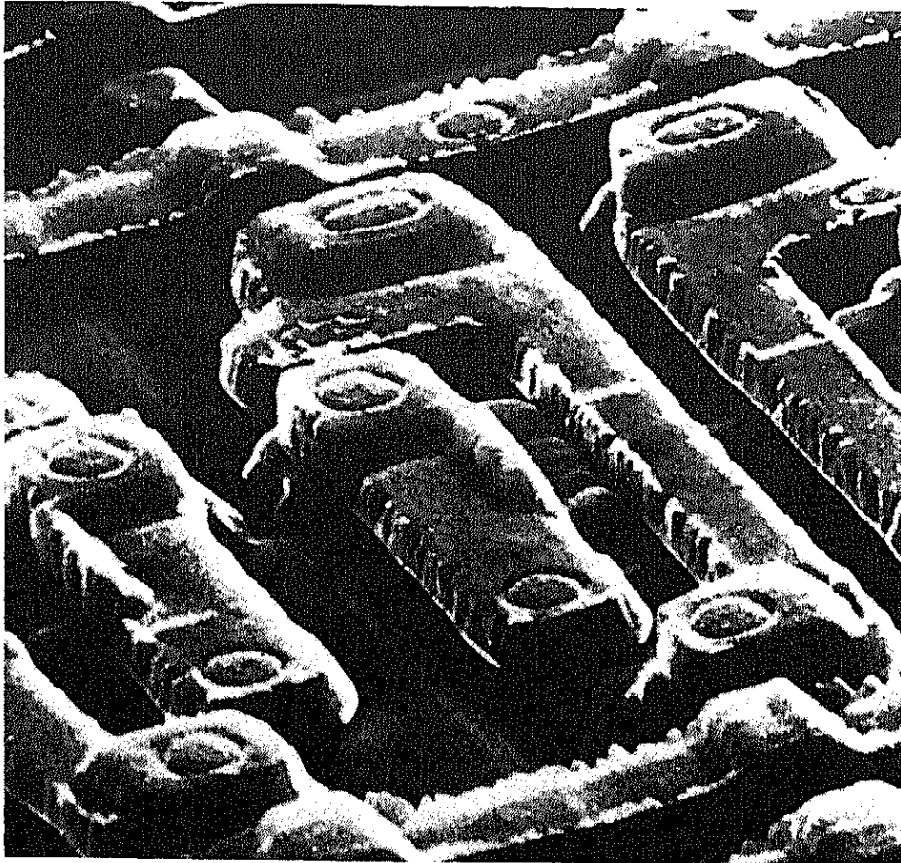


Abb. 5: Leiterbahnen auf einem Mikrochip (elektronenmikroskopische Aufnahme): Diese delikaten „Bauteile“ unterliegen hohen mechanischen Belastungen und werden durch den Stromdurchgang geschwächt; Werkstoffprobleme sind die Folge.

Wo liegt hier das Werkstoffproblem? Um auf einem Chip von der Größe eines Fingernagels 10 Mio. Bauteile unterzubringen, müssen die Abmessungen einzelner Teile deutlich unter $1/1000$ mm liegen. Das bedeutet, daß beispielsweise erst ein Bündel von 10 000 elektrischen Leiterbahnen (Abb. 5) die Dicke eines Haares ergibt. Derart delikate Bauteile müssen ebenfalls ungeheuren Belastungen standhalten. Wie ich Ihnen im Verlauf des Vortrages zeigen werde, unterliegen die Leiterbahnen bei fortschreitender Miniaturisierung wachsenden mechanischen Spannungen, nicht unähnlich denen, die in einer Gasturbinenschaufel auftreten. Dies liegt einerseits an den kleinen Abmessungen, andererseits aber an einer Schwächung des Materials durch den transportierten elektrischen Strom.

Der Trend zur Miniaturisierung hat im übrigen inzwischen auch den Maschinenbau erfaßt. Das noch ganz junge Gebiet der Mikrosystemtechnik nutzt die mechanischen Eigenschaften von kleinen Bauteilen bei der Herstellung mikroskopisch kleiner Sensoren, Aktoren und Motoren gezielt aus: Solche Mikromotoren (Abb. 6), von denen etwa 10 000 auf einem Fingernagel Platz hätten, werden in den USA und in Japan, aber auch in Deutschland intensiv entwickelt, da man sich beispielsweise Anwendungen in der Mikrochirurgie verspricht.

Abb. 4: Die fortschreitende Miniaturisierung mikroelektronischer Bauteile: Die Zahl der Komponenten, die auf einem Chip untergebracht werden, steigt rapide an; wegen der kleiner werdenden Abmessungen, z. B. der Leiterbahnen, verschärfen sich die Werkstoffprobleme.

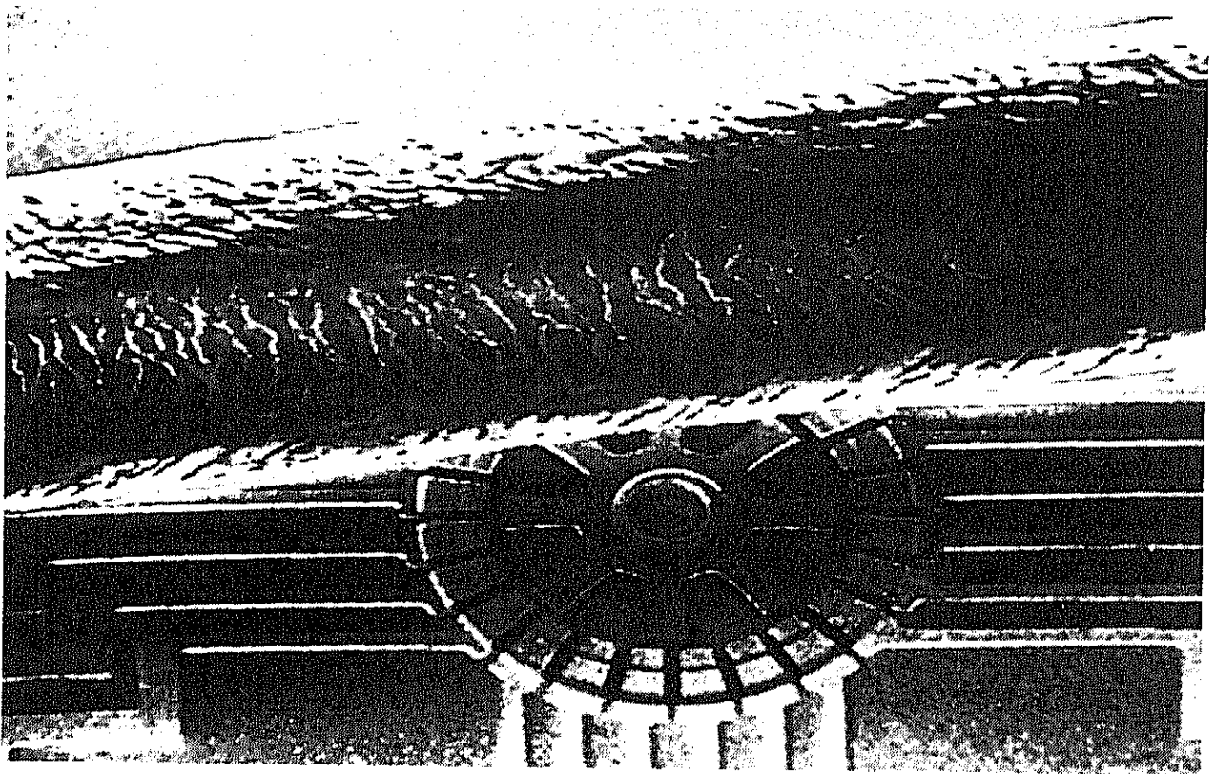


Abb. 6: Mikromotor im Vergleich zu einem menschlichen Haar (Herstellung und Aufnahme von R. Howe, Berkeley Sensor and Actuator Center, University of California, Berkeley, USA): Mikro-
maschinen versprechen künftige Anwendungen in der Mikrochirurgie und der Robotertechnik.

Auch auf diesem neuen Gebiet werden Werkstoffe mit gezielten Eigenschaften eine immer wichtigere Rolle spielen. Als Ergebnis unserer Untersuchungen zeigen sich im übrigen erstaunliche, bisher nicht vermutete Parallelen zwischen Gasturbinenwerkstoffen und Mikromaterialien. Der Vergleich belegt aber auch zunehmend, daß in der Mikrowelt neue Phänomene auftreten, mit denen man in konventionellen Werkstoffe nicht konfrontiert war und die neue grundlegende Fragen aufwerfen. Einige dieser Punkte sollen ebenfalls diskutiert werden.

Grundlagen neuer Hochtemperaturlegierungen

Betrachten wir die ganze bisherige Werkstoffpalette in einer Auftragung der Festigkeit als Funktion der Temperatur (Abb. 7), so bilden die Werkstoffklassen Polymere, Metalle, Keramik und Verbundwerkstoffe charakteristische Bereiche, deren Lage vom Typ der Bindungen zwischen den Atomen bestimmt wird. *Polymere* und ihre Verbunde mit nur schwachen Van-der-Waals-Bindungen zwischen den Molekülketten fallen für Temperaturen deutlich 300° bislang aus. *Keramische Werkstoffe*, wie z. B. Siliziumnitrid, Siliziumkarbid oder Magnesiumoxid, sind aufgrund ihrer festen kovalenten oder ionischen Bindungen prädestiniert als Hochtemperaturwerkstoffe. Diese noch relativ junge Werkstoffklasse ist deshalb auch in rasanter Entwicklung begriffen. Die *Metalle* schließlich stellen in Form von komplexen *Legierungen* für sicherheitskritische Komponenten, wie z. B. Turbinenschaufeln, die verbreitetsten Hochtemperaturwerkstoffe, da sie außergewöhnliche Eigen-

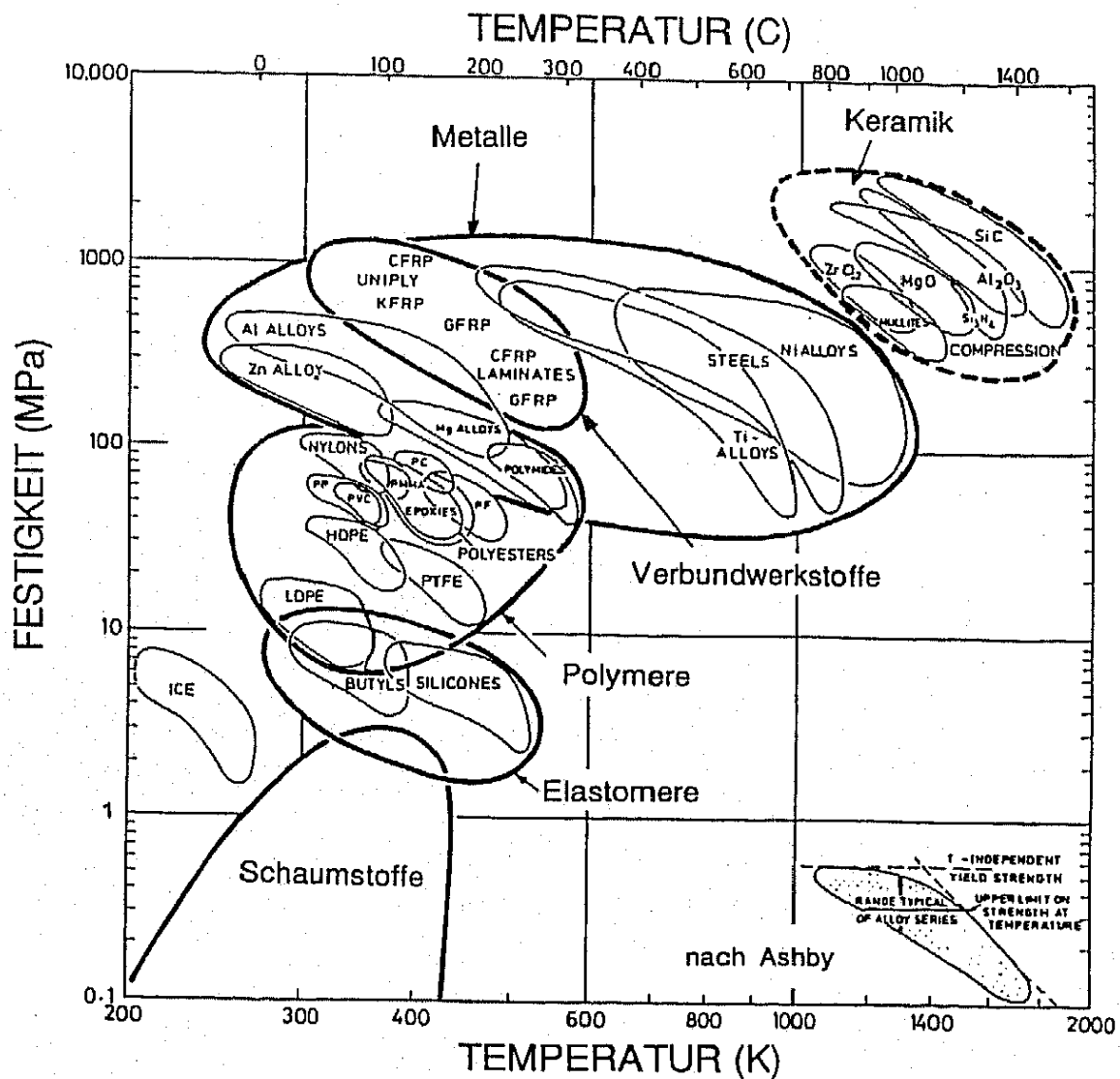


Abb. 7: Festigkeit von Werkstoffen als Funktion der Temperatur (nach M.F. Ashby, Cambridge University): Als Hochtemperaturwerkstoffe kommen Metalle und Keramiken in Frage.

schaftskombinationen erreichen. Nicht zu übersehen ist dabei aber, daß sich die einzelnen Legierungsklassen immer mehr ihrem Schmelzpunkt nähern. Dieser Bereich hoher „homologer“ Temperaturen ist aber wissenschaftlich besonders interessant: Wie bereits erwähnt, sind hier die Atombeweglichkeiten und Diffusionsgeschwindigkeiten – wie in einem Bienenschwarm – so hoch, daß Festigkeit nur über ungewöhnliche Mechanismen erreicht werden kann.

Wodurch die Festigkeit metallischer Kristalle bestimmt wird, ist eine klassische Frage der Metallphysik. Entscheidend ist, daß es in fast jedem kristallinen Werkstoff Fehlstellen gibt, d. h. Abweichungen vom regelmäßigen Strickmuster der Atome. Da diese Fehlstellen die Festigkeit herabsetzen, müssen sie auf irgendeine Weise unschädlich gemacht werden. Ein wichtiges Beispiel ist die sogenannte „Korngrenze“, die „Nahtstelle“, an der zwei Kristalle verschiedener Orientierung innerhalb eines Werkstoffes zusammenstoßen. Wird nun eine solche Korngrenze bei hohen Temperaturen belastet, so geben die sehr beweglichen Atome nach und erlauben die Bildung von Poren, die zu Rissen zusammenwachsen (Abb. 8) und damit das vorzeitige

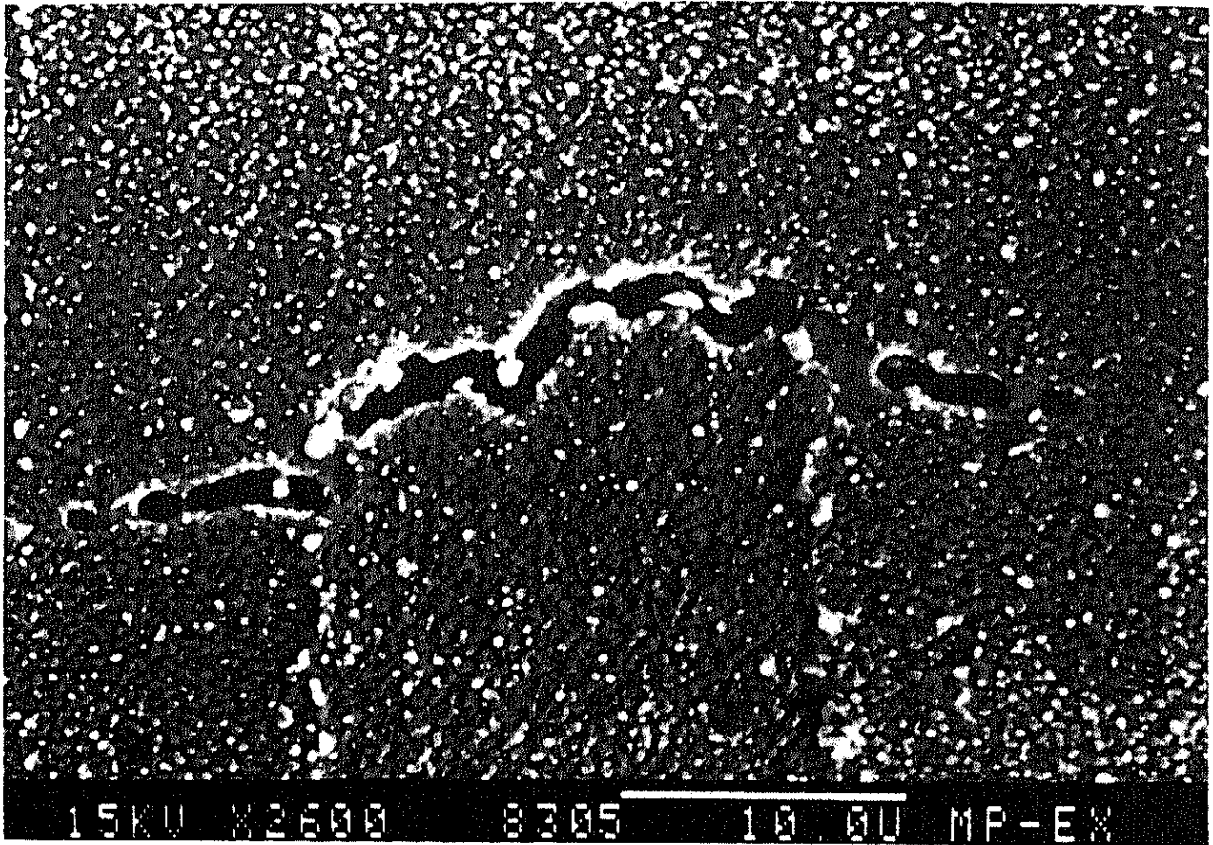


Abb. 8: Eine „Korngrenze“, Nahtstelle zwischen Kristallen verschiedener Orientierung, schwächt bei Hochtemperaturbelastung den Werkstoff: Die Atome weichen aus und bilden Poren und Risse entlang der Nahtstelle (Foto: D. Elzey, Max-Planck-Institut für Metallforschung).

Versagen des Werkstoffes herbeiführen können. Um diesem Schädigungsmechanismus zu begegnen, müssen die Korngrenzen aus dem Material entfernt oder unschädlich gemacht werden. Ein erfolgreiches Beispiel zeigt Abb. 9: die Korngrenzen verlaufen nur noch in Längsrichtung, wodurch sich extrem hohe Festigkeit in dieser Richtung erreichen läßt.

Aber auch das Korninnere muß vor Verformung geschützt werden. Man weiß heute, daß die entscheidenden Gitterbaufehler sogenannte „Versetzungen“ sind, die im Elektronenmikroskop als linienförmige Defekte (Abb. 10) abgebildet werden können. Da die Bewegung dieser unvermeidlichen Störungen die Festigkeit herabsetzt, *müssen die Versetzungen im Kristall, z. B. durch feine Teilchen, verankert werden.* Wie dies bei hohen Temperaturen noch funktionieren kann, ist ein wichtiges Problem der werkstoffwissenschaftlichen Grundlagenforschung. Wir haben uns mit dieser Thematik in den letzten Jahren ausführlich befaßt, und ich möchte einen kurzen Abriß neuerer Erkenntnisse hierzu geben.

Die wirksamsten festigkeitssteigernden Gefügeelemente in Hochtemperaturlegierungen sind feine keramische Teilchen, die nur mit elektronenmikroskopischen Methoden sichtbar gemacht werden können (Abb. 11). Mißt man die Geschwindigkeit, mit der sich ein derart verstärkter Werkstoff bei hohen Temperaturen verformt – wir nennen diesen Vorgang „Kriechen“ – dann zeigt sich ein drastischer Festigkeitszuwachs gegenüber dem „reinen“ Material (Abb. 12). Die Kriechrate ist bei niedrigen Spannungen um viele Größenordnungen geringer als bei einem unverstärkten Werkstoff. Gleichzei-

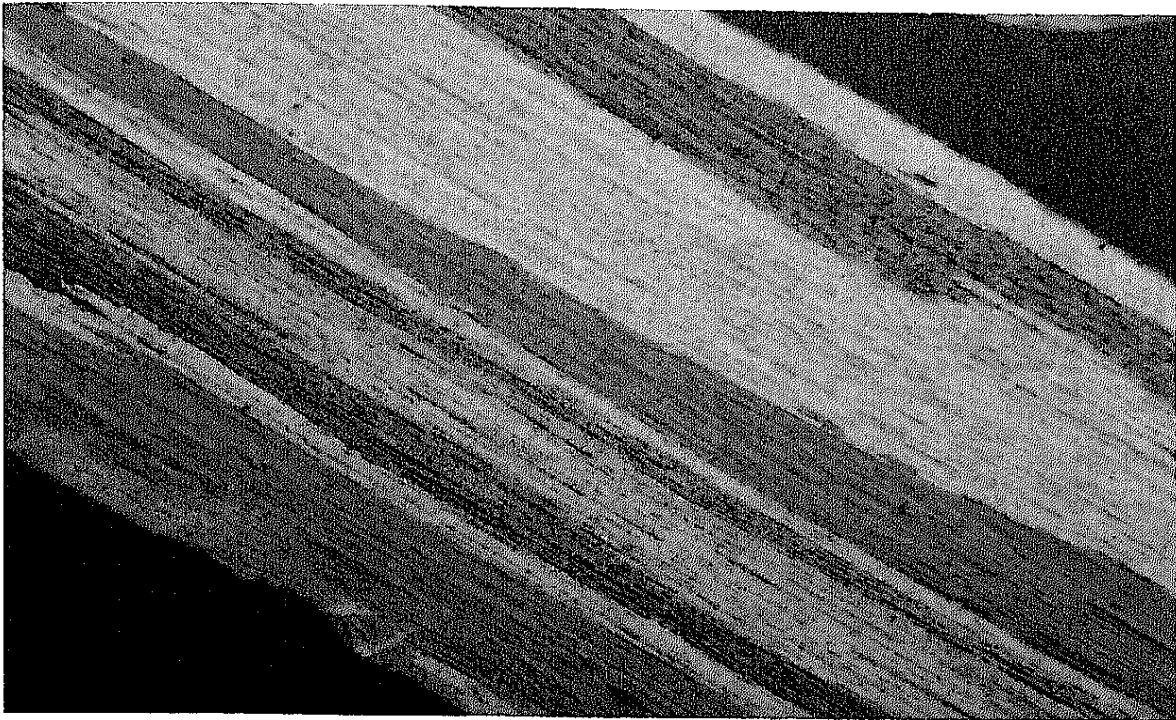
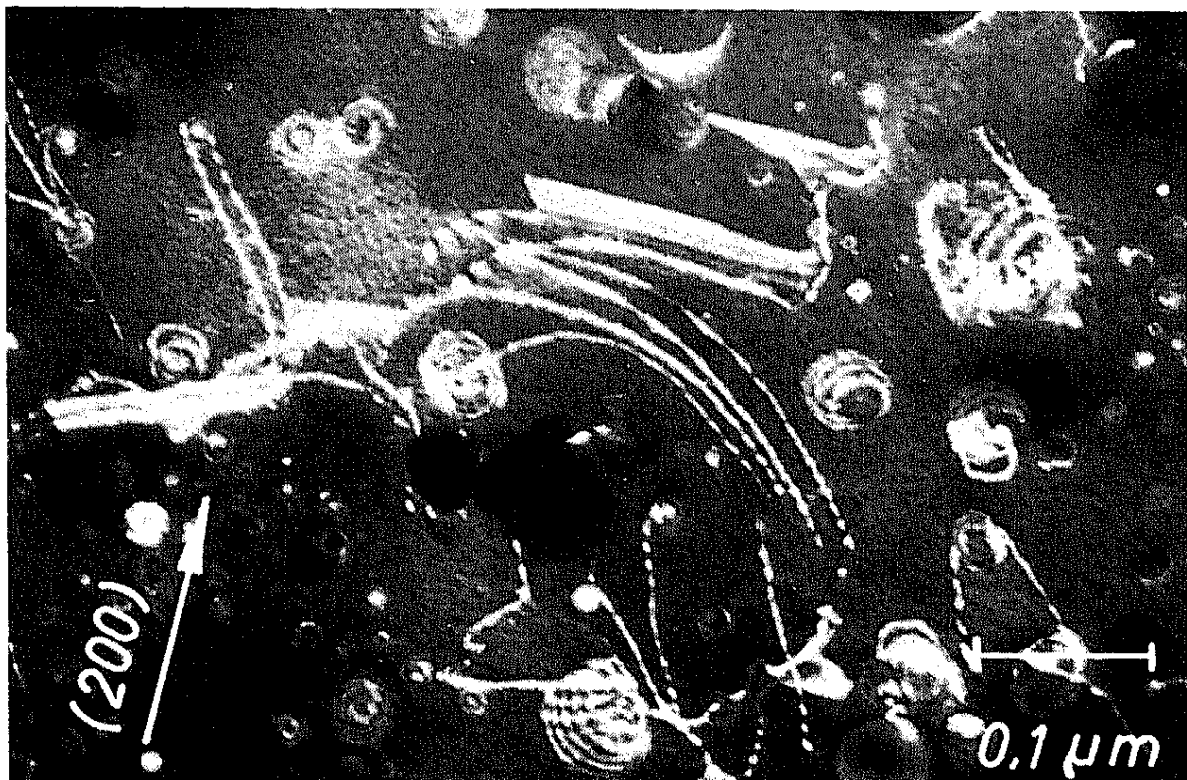


Abb. 9: In dieser Legierung konnten die Korngrenzen durch gezielte Ausrichtung unschädlich gemacht werden; bei Belastung in Längsrichtung sind sie nicht mehr spürbar. (Foto: R. Joos, Max-Planck-Institut für Metallforschung)

Abb. 10: Die weißen Linien entsprechen den im Elektronenmikroskop sichtbaren „Versetzungen“, d. h. Gitterbaufehlern im Kristall. Diese Fehler müssen im Kristall verankert werden (z. B. durch Teilchen), um hohe Festigkeit der Legierung zu erzielen. Diese elektronenmikroskopische Aufnahme (Vergrößerung ca. 100 000fach) unterstreicht den ästhetischen Reiz werkstoffwissenschaftlicher Untersuchungen.



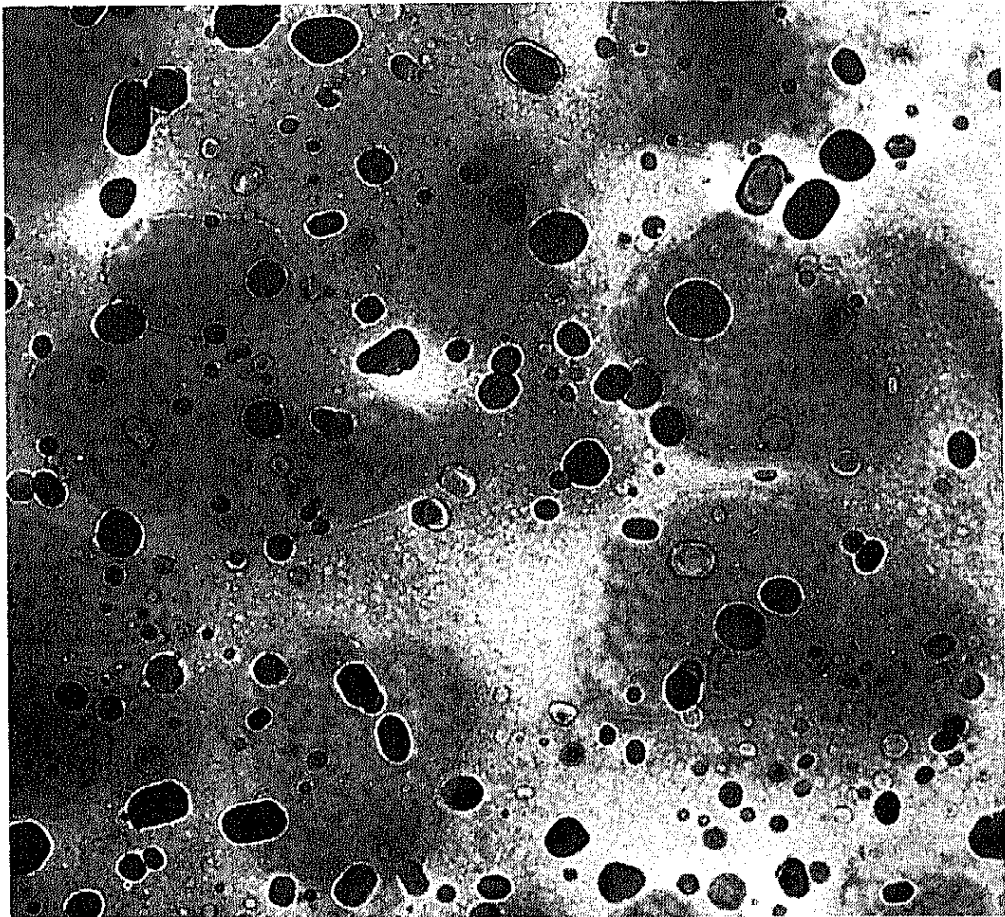


Abb. 11: Feine keramische Teilchen in einer Metallegierung zur Steigerung der Festigkeit knapp unterhalb des Schmelzpunkts; typische Teilchengröße 30 Millionstel Millimeter (elektronenmikroskopische Aufnahme).

tig erreicht die Steigung der Kurve extrem hohe Werte, so daß man geneigt ist, von einer Schwellspannung, unterhalb der keine Kriechverformung auftritt, zu sprechen. Für den Fachmann liegt es nun nahe, diese Schwellspannung mit der Orowan-Spannung, einem klassischen Maß für die Raumtemperaturfestigkeit, zu korrelieren. Dabei zeigt sich jedoch ein unerwarteter Effekt: Versetzungen lassen sich nämlich bei hohen Temperaturen nicht so leicht wie bei Raumtemperatur von Teilchen blockieren, sie können sich vielmehr durch einen als „Klettern“ bezeichneten Vorgang an den Teilchen „vorbeiswindeln“. Es galt nun lange Zeit als umstritten, ob dieser Kletterprozeß, wenn man ihn theoretisch behandelt, zu realistischen Festigkeitswerten führt.

Wir haben ausführlich zeigen können, daß das Klettern *nicht* der entscheidende Mechanismus sein kann. Es bewirkt lediglich eine Verlangsamung der Verformung, erklärt aber nicht den enorm hohen Festigkeitszuwachs in dispersionsgehärteten Legierungen, wie der schraffierte Bereich in Abb. 12 zeigt. Bestünde also der einzige Effekt der Dispersoide darin, die Versetzungen zum Klettern zu zwingen, dann würde die Festigkeit mit steigender Temperatur rasch auf ein bedeutungsloses Maß abnehmen. Der Grund dafür liegt wieder einmal darin, daß bei hohen Temperaturen die Beweglichkeit der Atome viel zu hoch ist, um kleine Teilchen zu ernsthaften Hindernissen werden zu lassen. Die wissenschaftliche Erklärung der Hoch-

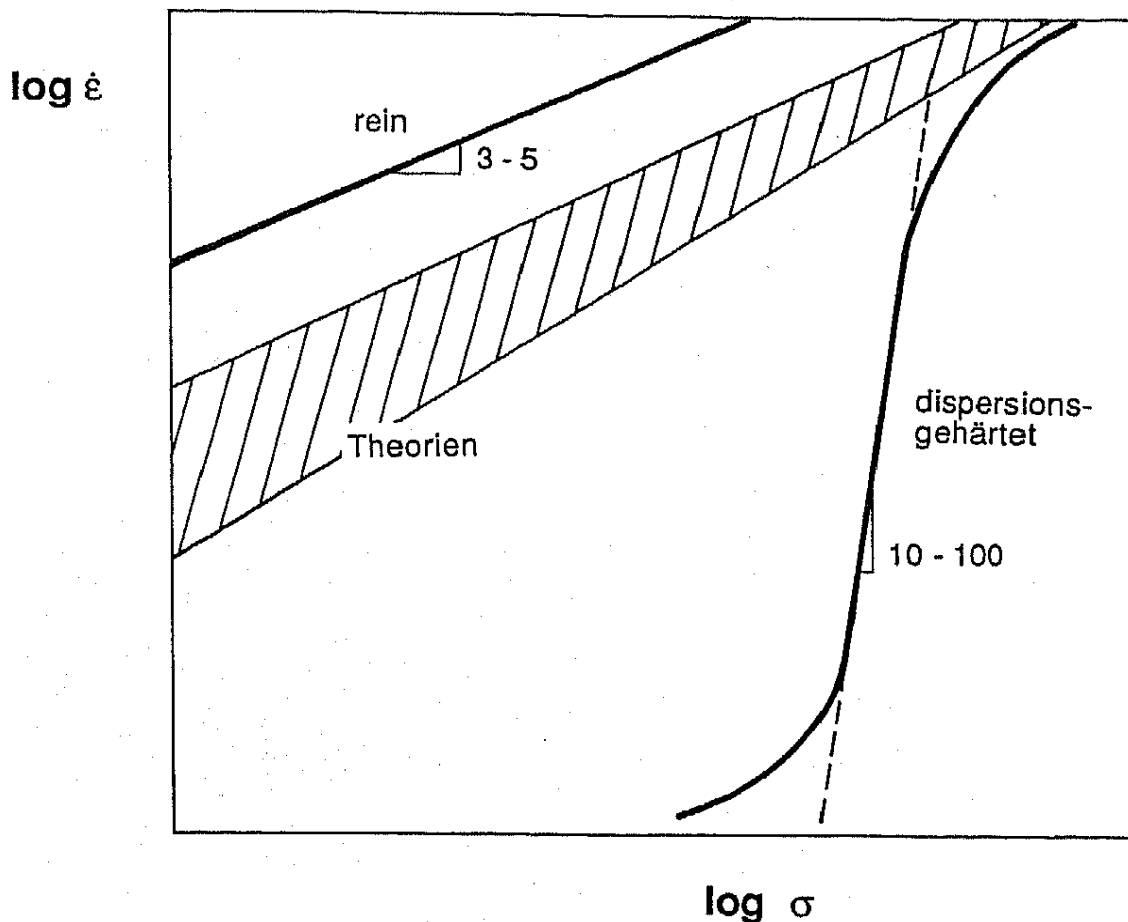


Abb. 12: Die Verformungsgeschwindigkeit ($\dot{\epsilon}$) eines reinen Metalls (Kurve „rein“) wird, bei einer bestimmten Belastung σ , durch keramische Teilchen stark herabgesetzt (Kurve „dispersionsgehärtet“). Dieser Festigkeitszuwachs wird durch herkömmliche Theorien (schraffiertes Feld) nicht richtig wiedergegeben.

temperaturfestigkeit in diesen Legierungen stellte sich damit als schwieriger als erwartet heraus.

Folgender anschaulicher Vergleich drängt sich auf: Nehmen wir an, jemand wollte die Zeit zum Durchqueren einer Großstadt mit einem Auto berechnen. Fußt seine Überlegung auf der Höchstgeschwindigkeit des Wagens – dies entspricht in unserem Fall der Diffusionsgeschwindigkeit – dann ergäbe sich für eine Stadt wie Berlin eine Transitzeit von mehreren Minuten. Daß dies bekanntlich nicht stimmt, liegt daran, daß der falsche Prozeß als der geschwindigkeitsbestimmende Schritt angenommen wurde. Nicht die Höchstgeschwindigkeit des Wagens, sondern die Verweilzeiten vor roten Ampeln und in Staus bestimmen die durchschnittliche Durchquerungszeit.

Einen ganz ähnlichen Sachverhalt konnten wir im übertragenen Sinn in Hochtemperaturlegierungen feststellen. Nach gezielten Experimenten und vielen elektronenmikroskopischen Aufnahmen machten wir nämlich eine überraschende Entdeckung (Abb. 13): Versetzungen werden nie im Stadium des Kletterns, das sie tatsächlich schnell überwinden, beobachtet, sondern sie bleiben fast ausschließlich an der Teilchenrückseite hängen und können sich von dort nur schwer befreien. Die Verformung des Werkstoffs ist also nicht durch die Klettergeschwindigkeit bestimmt, sondern durch einen unerwarteten „Klebeffekt“ – ganz analog der roten Ampel in unserem Vergleich.



Abb. 13: Ergebnis ausführlicher elektronenmikroskopischer Untersuchungen: Versetzungen unterliegen bei hohen Temperaturen einem unerwarteten Effekt, sie bleiben an den Teilchen „kleben“. Die auf dieser Beobachtung aufbauende Theorie erklärt die Festigkeit vieler Hochtemperaturlegierungen und erlaubt ihre gezielte Weiterentwicklung (Foto: J. Schröder, Max-Planck-Institut für Metallforschung).

Aber diese Beobachtungen warfen ernste grundlegende Fragen auf. Klassisch würde gegenüber einem harten Teilchen nämlich eine Abstoßung der Versetzung erwartet. Was könnte diesen „Klebeffekt“ also verursachen? Hier zeigten Rechnungen, daß gerade bei hohen Temperaturen durch die erhöhte Atombeweglichkeit eine Anziehungskraft entstehen kann. Das Verzerrungsfeld der Versetzung wird nämlich in der Grenzfläche durch schnelle Diffusion abgeschwächt, wodurch sich ein Zustand niedrigerer Energie und somit eine Anziehungskraft einstellt. Es handelt sich hier um einen prinzipiellen neuen Härtungseffekt, der auf thermischer Aktivierung beruht und daher nur bei hohen Temperaturen auftreten kann. Mit anderen Worten: Die Wärmeschwingungen der Atome erzeugen bemerkenswerterweise einen Festigkeitsgewinn, die sonst schädliche „Bienenschwarm“-Bewegung wird mit eigenen Waffen geschlagen!

Ausführliche Rechnungen zeigten uns an, daß eine Versetzung, die ein Teilchen passieren will, im wesentlichen zwei Hindernisse „spürt“. Der erste Berg entspricht dem Energieaufwand beim Klettern, der zweite der erschwerten Ablösung vom Teilchen. Es zeigte sich sehr schnell, daß tatsächlich die Ablösung in den meisten Fällen der geschwindigkeitsbestimmende Schritt sein muß, wie es auch elektronenmikroskopisch beobachtet wurde. Unser Modell führt zu einer neuen Kriechgleichung für dispersionsgehärtete Werkstoffe. Sie enthält neben einem Wechselwirkungsparameter, der die Anziehung zwischen Teilchen und Versetzung beschreibt, insbesondere auch den Teilchenradius.

Aus dieser Theorie lassen sich nun wertvolle neue Hinweise für die Weiterentwicklung von Hochtemperaturlegierungen ableiten. Ein wichtiges Beispiel ist die Voraussage einer optimalen Teilchengröße. Für größere Teilchen ist der Abstand zu groß und die Versetzungen können dazwischen ausbauchen; andererseits erleichtern zu kleine Teilchen das Losreißen der Versetzungen durch thermische Fluktuationen. In vielen technischen Legierungen übertrifft die tatsächliche Teilchengröße das Optimum bei weitem. Die Dispersoidgrößeneinstellung ist daher eine wichtige neue Zielrichtung, die bisher aufgrund des fehlenden theoretischen Hintergrunds nicht verfolgt worden ist. Ich meine, daß dieses Beispiel die Rolle der Theorie in der Werkstoffentwicklung gut demonstriert: Wenn wir auch aufgrund diverser Näherungen in den Rechnungen die Lage des Maximums nicht exakt voraussagen können, so veranlaßt uns doch die Voraussage der Existenz eines Maximums dazu, gezielt danach zu suchen.

Ein weiteres „Rezept“, das sich aus unserer Theorie ergibt, besteht darin, die Haftfestigkeit der Grenzfläche zwischen Dispersoid und Grundwerkstoff zu vermindern. Eine Möglichkeit dazu wäre die gezielte Segregation bestimmter Legierungselemente, was wir derzeit in einem ausführlichen Programm erproben. Auch das Einbringen elastisch weicher Dispersoide würde die Anziehungskraft zwischen Teilchen und Versetzung verbessern. Ideal wären aus dieser Sicht stabile Poren, also feine Löcher im Werkstoff. Daß diese Schlußfolgerung nicht unvernünftig ist, beweisen die Wolframdrähte in Glühbirnen, deren Lebensdauer durch einen ähnlichen Mechanismus erheblich verlängert wird.

Lassen Sie mich noch kurz auf ein aktuelles Thema zu sprechen kommen, das wir neuerdings intensiv untersuchen. Es zeichnet sich nämlich ab, daß man mit bestimmten neuen „geordneten“ Legierungen noch höhere Einsatztemperaturen erreichen kann als mit herkömmlichen Hochtemperaturlegierungen. Diese Hoffnung gründet sich auf einem in der Werkstoffwissenschaft einzigartigen Phänomen. In manchen dieser Werkstoffe kommt es nämlich – entgegen der allgemeinen Tendenz – bei *höheren* Temperaturen zu einer *steigenden* Festigkeit. Der dafür verantwortliche Mechanismus basiert auf einem besonderen Kristallaufbau. Die Verteilung verschiedener Atomsorten ist nicht etwa zufällig, sondern schachbrettähnlich geordnet. Das bedeutet, daß der Durchgang einer Versetzung während der Verformung die Ordnung lokal zerstört. Das Material wehrt sich nun gegen die Zerstörung der von ihm gewollten atomaren Ordnung dadurch, daß es eine zweite Versetzung nachschickt, die die Ordnung wieder herstellt. Es handelt sich hier also um ein kooperatives Phänomen, wie es in der Natur gar nicht selten vorkommt.

Die Paarbildung läßt sich im Elektronenmikroskop beobachten (Abb. 14): statt einzelner Linien treten kompliziertere Strukturen – sogenannte „Superversetzungen“ – auf, die aus zwei oder mehreren Teilversetzungen bestehen. Diese vermeintlich günstigere Lösung stellt sich aber als kurzfristig für die Verformbarkeit des Kristalls heraus: Die Bewegung der Superversetzungen wird nämlich durch einen mikroskopischen Prozeß behindert, den man als „Seitensprünge“ des einen Partners bezeichnen könnte. Da diese Seitensprünge die Bewegung behindern und außerdem mit steigender Temperatur immer häufiger werden, kommt es zu einer zunehmenden Festigkeit des Werkstoffs – ein wunderbarer Mechanismus, der noch nicht in allen Details aufgeklärt ist, ohne den moderne Triebwerkmaterialien aber undenkbar wären.

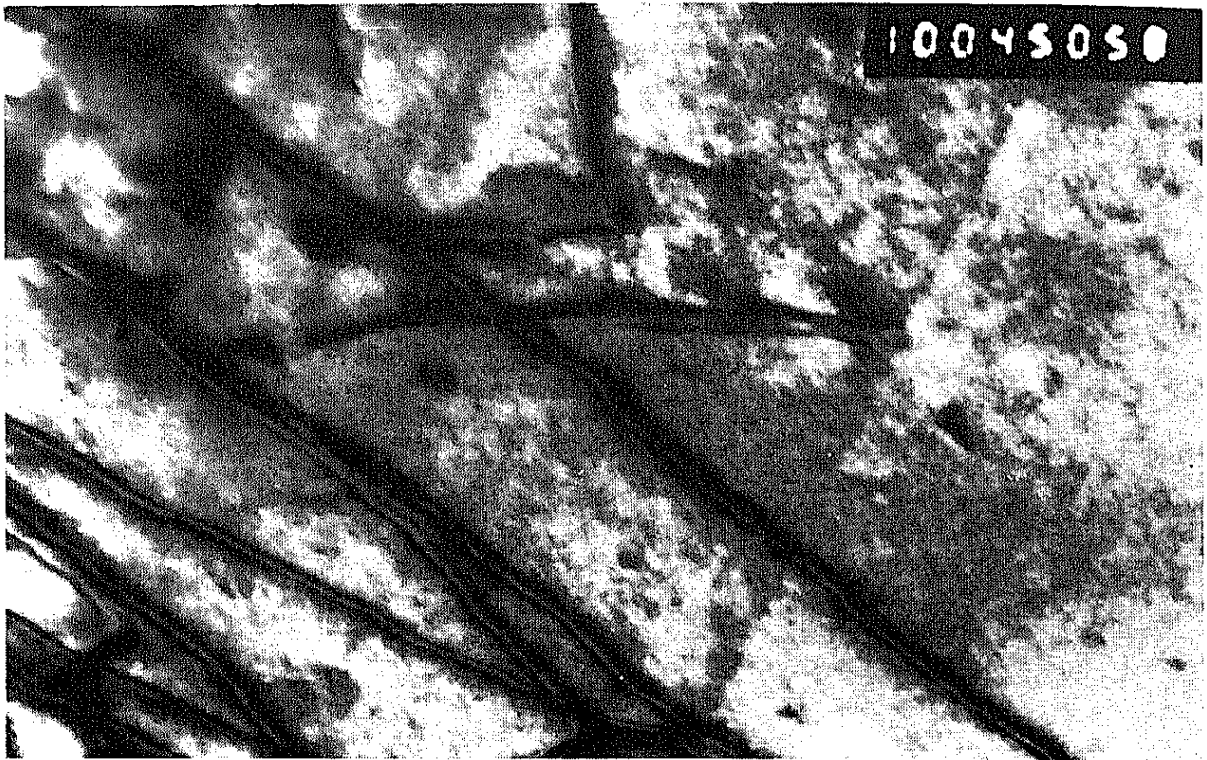


Abb. 14: Komplizierte Versetzungsstrukturen in Legierungen mit geordneter Verteilung verschiedener Atomsorten, sichtbar gemacht im Elektronenmikroskop: Die Doppellinien entsprechen Superversetzungen, die zu interessanten Effekten führen (Foto: E. Göhring, Max-Planck-Institut für Metallforschung).

Die Idee liegt nun nahe, daß man dieses Prinzip mit der vorhin besprochenen Härtung durch feine keramische Teilchen verbinden könnte. Um die Größe des zu erwartenden Synergieeffekts voraussagen zu können, bemühen wir wiederum unsere Theorie der Dispersionshärtung. Wir müssen nun allerdings die komplizierte Versetzungsstruktur beim Überwinden eines Teilchens berücksichtigen (Abb. 15). Einerseits werden die Teilversetzungen aufgrund elastischer Wechselwirkungen voneinander abgestoßen, andererseits versucht der Kristall den Bereich der Fehlordnung zwischen ihnen möglichst klein zu halten. Die Weite der Superversetzung ist das Ergebnis eines Kompromisses zwischen beiden Tendenzen. Die Berechnungen des Kletter- und Klebe-Effekts werden durch diese Komplikation äußerst aufwendig. Beispielsweise zeigt sich, daß die zu erwartenden Festigkeiten empfindlich davon abhängen, wie sich die Versetzungsweite zur Teilchengröße verhält. Aus diesen Vorstellungen entwickeln wir derzeit grundlegende Aussagen über die Einstellung der optimalen Teilchengröße, die in geordneten Legierungen völlig verschieden ist von der in ungeordneten Werkstoffen.

Welche Festigkeitswerte konnten wir durch Anwendung dieser Prinzipien bisher erreichen? Die Werkstoffe, die wir bisher synthetisieren konnten, reichen gerade erst an die Eigenschaften der fortgeschrittenen Hochtemperaturwerkstoffe heran, es sind aber in diesen neuen Materialien aufgrund der Theorie noch deutliche Eigenschaftssprünge zu erwarten. Nur die Zukunft wird zeigen, ob dieses neue Konzept, das ganz wesentlich von Grundlagenuntersuchungen angeregt wird, vielleicht zu einer neuen Generation von Hochtemperaturwerkstoffen führen wird.

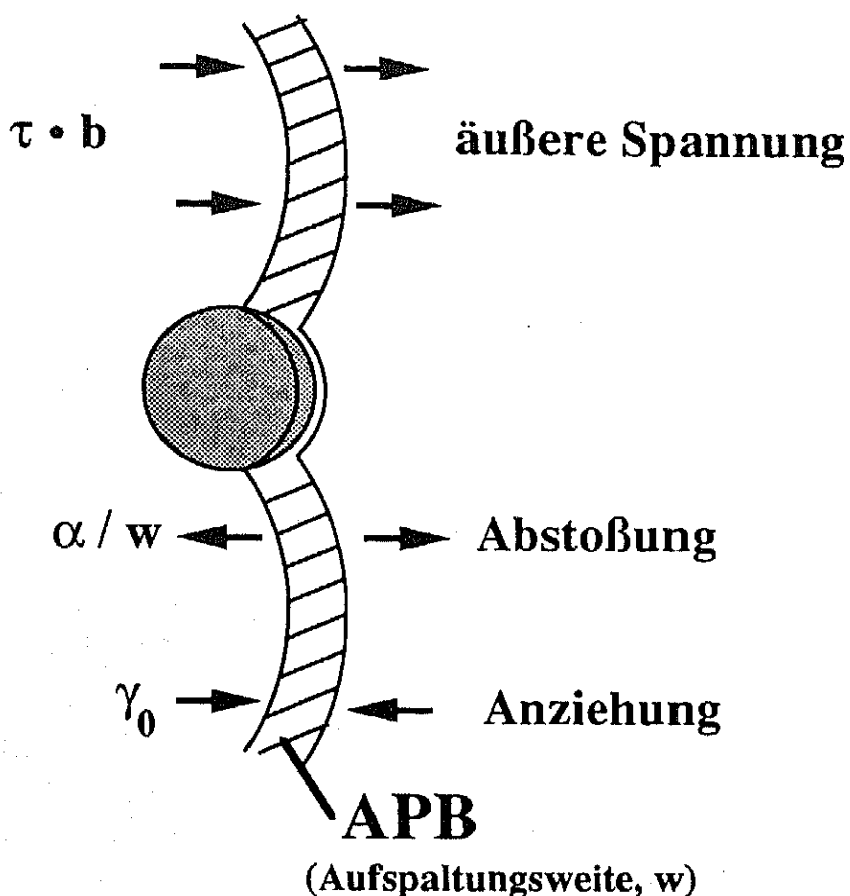


Abb. 15: Die Kräfte zwischen den Teilen einer Superversetzung müssen bei der Berechnung der zu erwartenden Festigkeitssteigerung durch keramische Teilchen mit berücksichtigt werden. An diesem grundlegenden Konzept für neue Hochtemperaturwerkstoffe wird derzeit theoretisch und experimentell gearbeitet.

Mikromaterialien:

Neue Herausforderungen für die Materialwissenschaft

Der zweite Teil meiner Ausführungen führt in die Welt der Mikromaterialien, in der mit fortschreitender Miniaturisierung neben den elektronischen gerade auch die Festigkeitseigenschaften stärker in den Vordergrund treten. Welchen mechanischen Belastungen sind solche Werkstoffe, z. B. für Leiterbahnen auf Chips, unterworfen?

Eine Ursache für extrem hohe Kräfte auf Leiterbahnen liegt in ihrer Herstellung begründet (Abb. 16): Bereits die metallische Dünnschicht, auf eine Silizium-Scheibe aufgebracht, unterliegt Wachstumsspannungen. Durch Ätzprozesse wird sie zu einem System von Leiterbahnen strukturiert und bei erhöhter Temperatur von einer keramischen Schutzschicht überzogen. Bei der Abkühlung entstehen in der eingesperrten metallischen Bahn, die sich stärker zusammenziehen will, es aber nicht kann, enorm hohe Zugspannungen. Wir wissen heute aus röntgenographischen Messungen, daß bereits diese Belastungen weit über denen von konventionellen Werkstoffen liegen. Doch damit nicht genug: das Material wird im Betrieb durch den Stromdurchgang noch zusätzlich belastet und gleichzeitig geschwächt. Die Elektronen, die die Computerinformation transportieren, erzeugen einen sog. „Elektronenwind“,

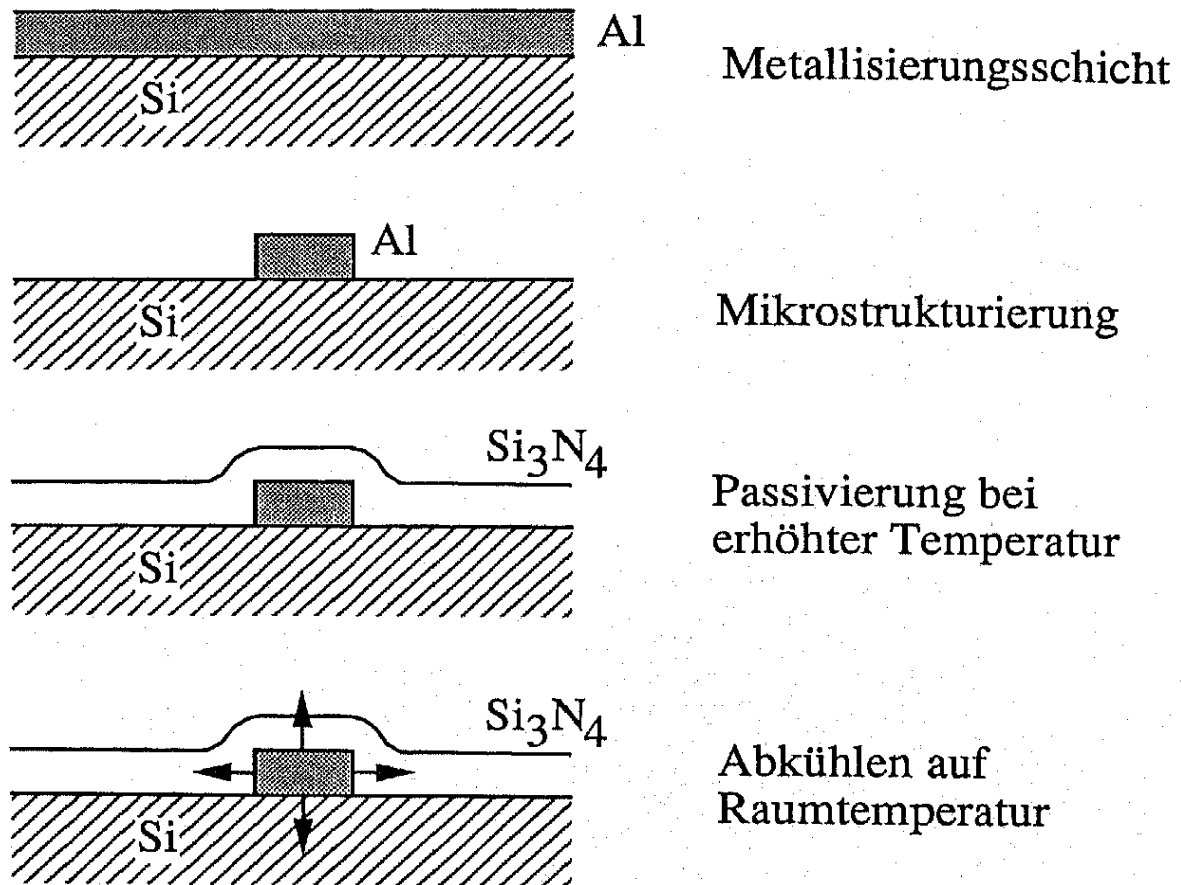


Abb. 16: Leiterbahnen in Mikrochips sind oft großen mechanischen Belastungen unterworfen. Die Bahn, aus einer Metallschicht strukturiert und mit Keramik überzogen („passiviert“), schrumpft beim Abkühlen von der Herstelltemperatur stärker als der Grundwerkstoff. Die Folge ist eine enorm hohe Zugspannung in der Leiterbahn.

der um viele Größenordnungen stärker ausgeprägt ist als in jeder Haushalts-sicherung. Durch Stöße der Elektronen gegen die Metallionen kommt es – vorwiegend entlang den Korngrenzen – zu gerichteter Atombewegung, die sich an bestimmten Stellen staut und dadurch zusätzliche mechanische Spannungen erzeugt (Abb. 17).

Ein Mechanismus für den Spannungsabbau in der Leiterbahn besteht in der Rückdiffusion von Atomen aus Druckbereichen – d. h. aus Stauzonen – in die Zugspannungsbereiche. Dadurch wird der Elektronenwind kompensiert, und die Leiterbahn wäre immun gegen den Effekt. Entscheidend für diese Kompensation ist ein hoher Spannungsgradient, der seinerseits durch die Festigkeit des Materials begrenzt wird. Andererseits sollte der Abstand zwischen den Zug- und den Druckspannungsbereichen möglichst klein sein. Doch welchen Einfluß können wir darauf nehmen?

Betrachten wir eine Leiterbahn, die unter extremen Bedingungen getestet wurde, im Mikroskop (Abb. 18). An den Staustellen ist es zur Bildung von Hügeln gekommen, an zugbeanspruchten Stellen haben sich Poren oder Risse entwickelt. Beide Fehler sind potentielle Ausfallsursachen für den Chip, durch Stromunterbrechungen oder Kurzschlüsse mit anderen Bahnen. Welche Stellen einer Leiterbahn für diese Schädigungen prädestiniert sind, ist noch nicht restlos geklärt. In vielen Fällen zeichnet sich ab, daß auch hier – ähnlich

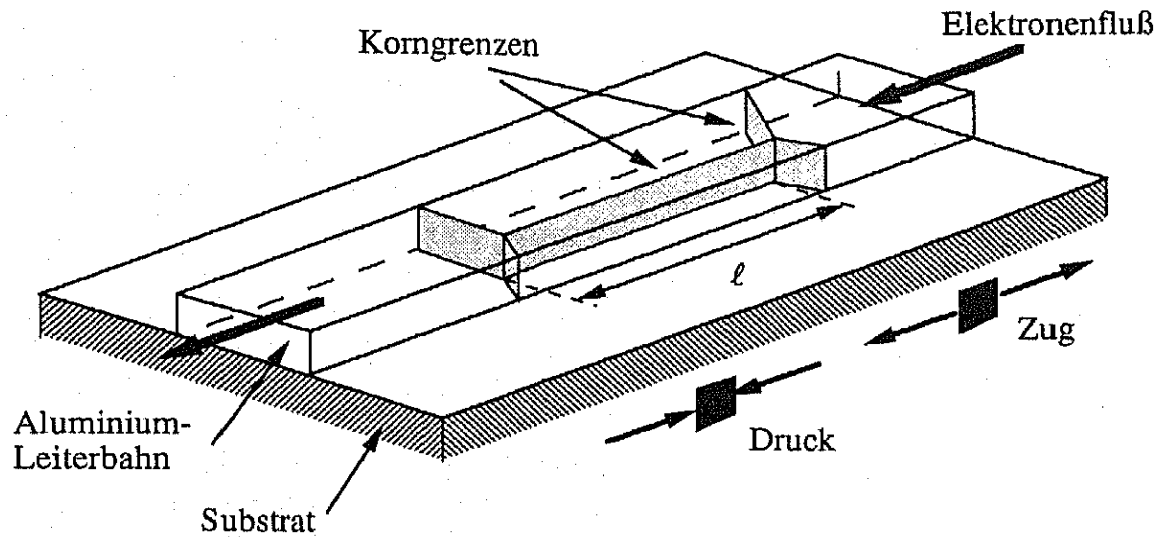
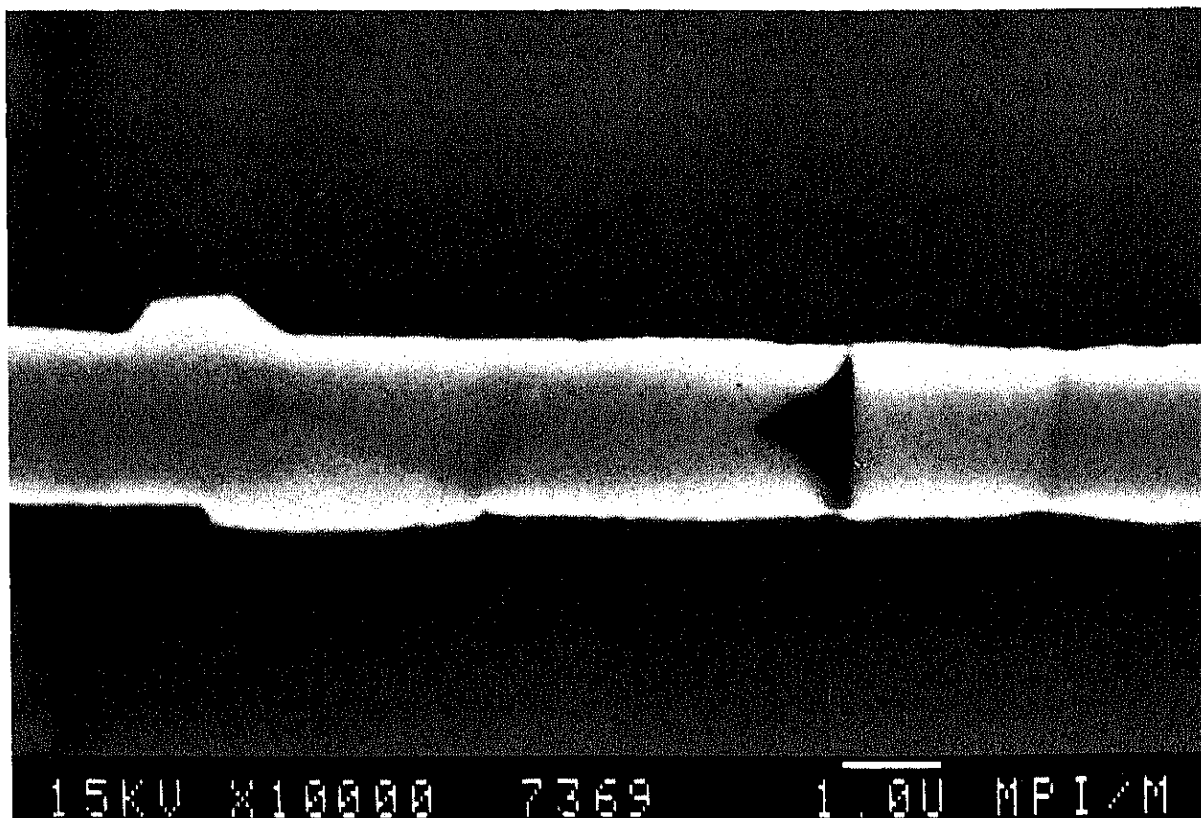


Abb. 17: Der Stromdurchgang erzeugt in der Leiterbahn einen „Elektronenwind“, der die Atome umverteilt. Dadurch entstehen zusätzliche mechanische Kräfte in der Form von Zug- und Druckzonen.

Abb. 18: Ergebnis eines Leiterbahntests am MPI für Metallforschung (durchgeführt von O. Kraft): Durch Stromdurchgang und die resultierende Atomumverteilung kommt es zur Bildung von Poren und Hügel; der Mikrochip versagt. (Foto: O. Kraft, Max-Planck-Institut für Metallforschung).

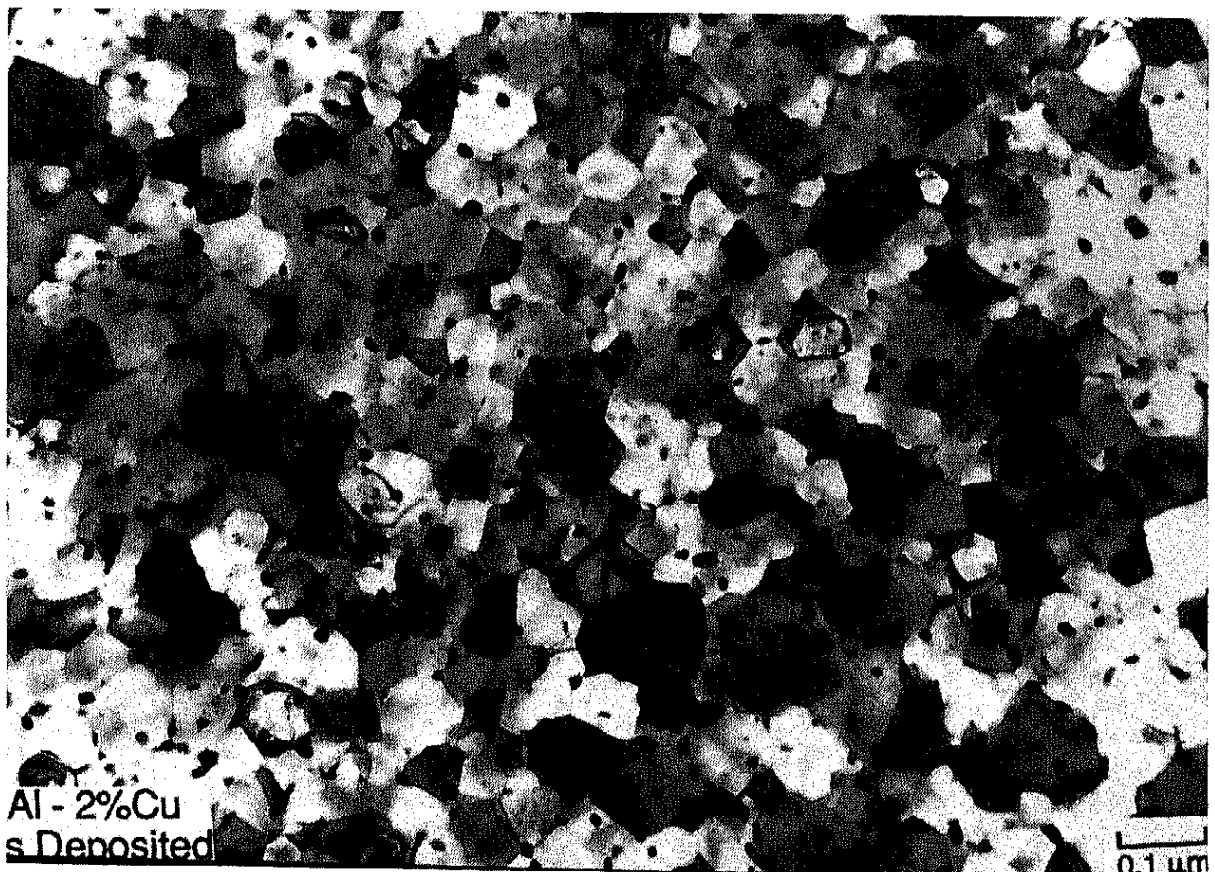


wie in Hochtemperaturlegierungen – die Kornstruktur eine wesentliche Rolle spielt. Übersteigt die Linienbreite die Korngröße, dann findet sich immer ein kontinuierlicher Transportpfad, und die Schädigung kann sich ungebremst entwickeln. Sind allerdings die Körner groß im Verhältnis zur Linienbreite, dann werden die Pfade in kürzere Segmente aufgetrennt, und die Beständigkeit sollte dementsprechend steigen. Tatsächlich ergibt sich in diesem Fall bei fortschreitender Miniaturisierung ein Gewinn an zu erwartender Lebensdauer, den wir kürzlich auch theoretisch modellieren konnten.

Gleichzeitig konnten wir aus unserem Modell ableiten, daß für dünner werdende Leiterbahnen die Festigkeit immer entscheidender wird. Wir stellten fest, daß sich das Verhalten extrem feiner Leiterbahnen nur durch die Beteiligung von Gitterversetzungen erklären läßt, insbesondere durch den erwähnten Kletterprozeß, der bei hohen Temperaturen auch das Umgehen von Teilchen in Gasturbinenwerkstoffen erlaubt; ein analoger Vorgang ist verantwortlich für das Hügelwachstum, das sich mit der Dichte und Beweglichkeit von Versetzungen theoretisch in Zusammenhang bringen läßt.

Insgesamt legen diese sehr verkürzt dargestellten Überlegungen eine verblüffende Schlußfolgerung nahe: Die Entwicklung zukünftiger Leiterbahnlegierungen sollte zunehmend nach werkstoffwissenschaftlichen Erwägungen erfolgen, in denen Korngröße und mechanische Festigkeit eine ähnlich entscheidende Rolle spielen wie in Hochtemperaturwerkstoffen. Neue Ent-

Abb. 19: Korngrenzen und Teilchen in einer Metallschicht, aus der in einem späteren Stadium die Leiterbahnen eines Mikrochips herausgearbeitet werden (siehe Abb. 16). Die Entwicklung zukünftiger Leiterbahnlegierungen wird zunehmend nach Gesichtspunkten erfolgen, bei denen Korngröße und Festigkeit eine ähnliche Rolle spielen wie z. B. in Hochtemperaturlegierungen (Foto: J. Sanchez, Max-Planck-Institut für Metallforschung).

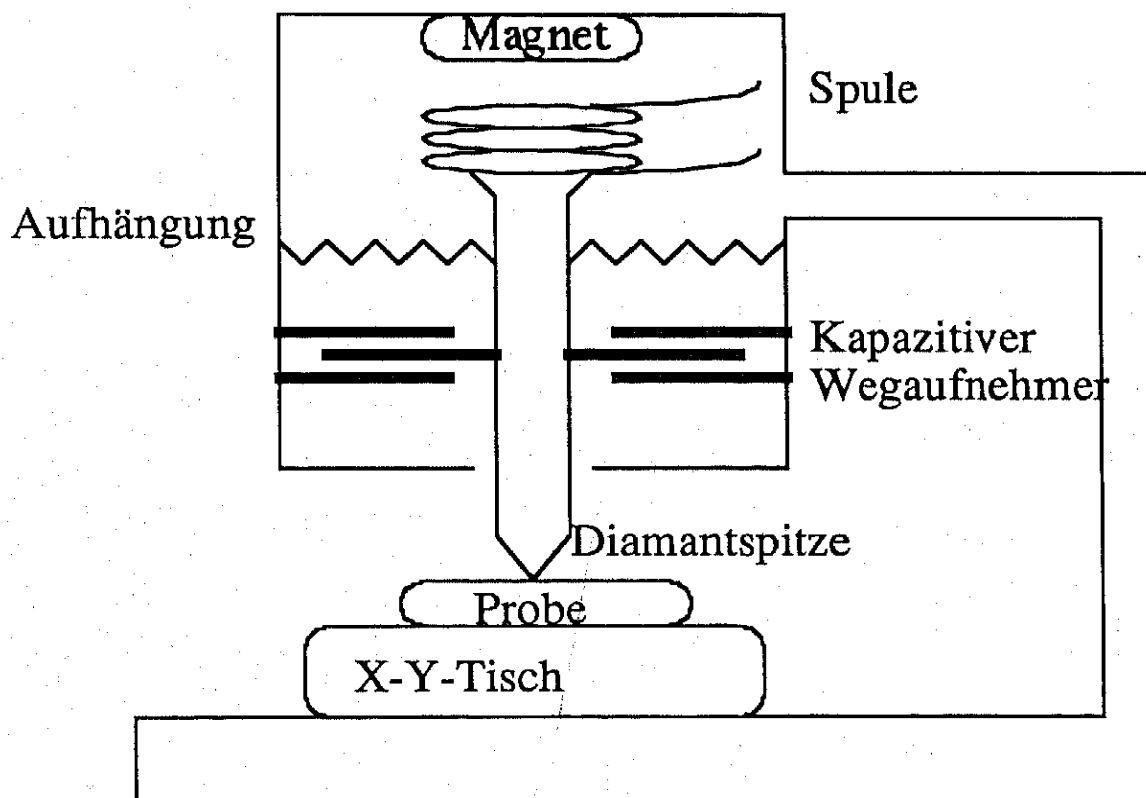


wicklungen auf diesem Gebiet gehen bereits – teilweise unbewußt – in diese Richtung. Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Leiterbahnschichten zeigen – ähnlich wie in konventionellen Legierungen – verfestigende Teilchen, die durch Legierungselemente verursacht werden (Abb.19). Auf diesem spannenden Gebiet, das wir derzeit intensiv bearbeiten, sind sicherlich noch viele interessante werkstoffwissenschaftliche Probleme verborgen.

Ganz allgemein stellt sich hier zunehmend die grundlegende Frage, ob man denn die wissenschaftlichen Prinzipien, die für makroskopische Werkstoffe entwickelt wurden, unbedenklich in den Mikrobereich übertragen darf. Einige Anzeichen deuten darauf hin, daß dies nicht immer zulässig ist. Bekanntlich verdanken viele konventionelle Werkstoffe ihre Festigkeit feinsten Teilchen. Doch welche neuen Effekte sind zu erwarten, wenn die Bauteilgröße auf die Abmessungen dieser Teilchen schrumpft? Wie funktioniert die Mechanik im Mikrobereich und welche Kriterien müssen Werkstoffe erfüllen? Wie lassen sich Festigkeiten in kleinen Dimensionen überhaupt messen? Fragen, die sich aus heutiger Sicht nur ansatzweise beantworten lassen. Hier eröffnet sich ein neues Gebiet für die Materialwissenschaft, in dem besonders intensive Grundlagenforschung vonnöten ist.

Zunächst zur Frage der Meßmethoden. Herkömmliche Materialprüfmaschinen sind hier natürlich fehl am Platz. Ein Gerät, das wir seit kurzem betreiben, der sogenannte Nanoindenter, sei beispielhaft hier erwähnt (Abb.20). Eine feine Diamantspitze wird an der gewünschten Stelle kaum

Abb. 20: Ein Verfahren zur Messung mechanischer Eigenschaften von Mikromaterialien am MPI für Metallforschung: Der „Nanoindenter“ ist ein hochempfindliches Härteprüfgerät, mit dem das elastische und plastische Werkstoffverhalten kleiner Proben „gezielt“ untersucht werden kann.

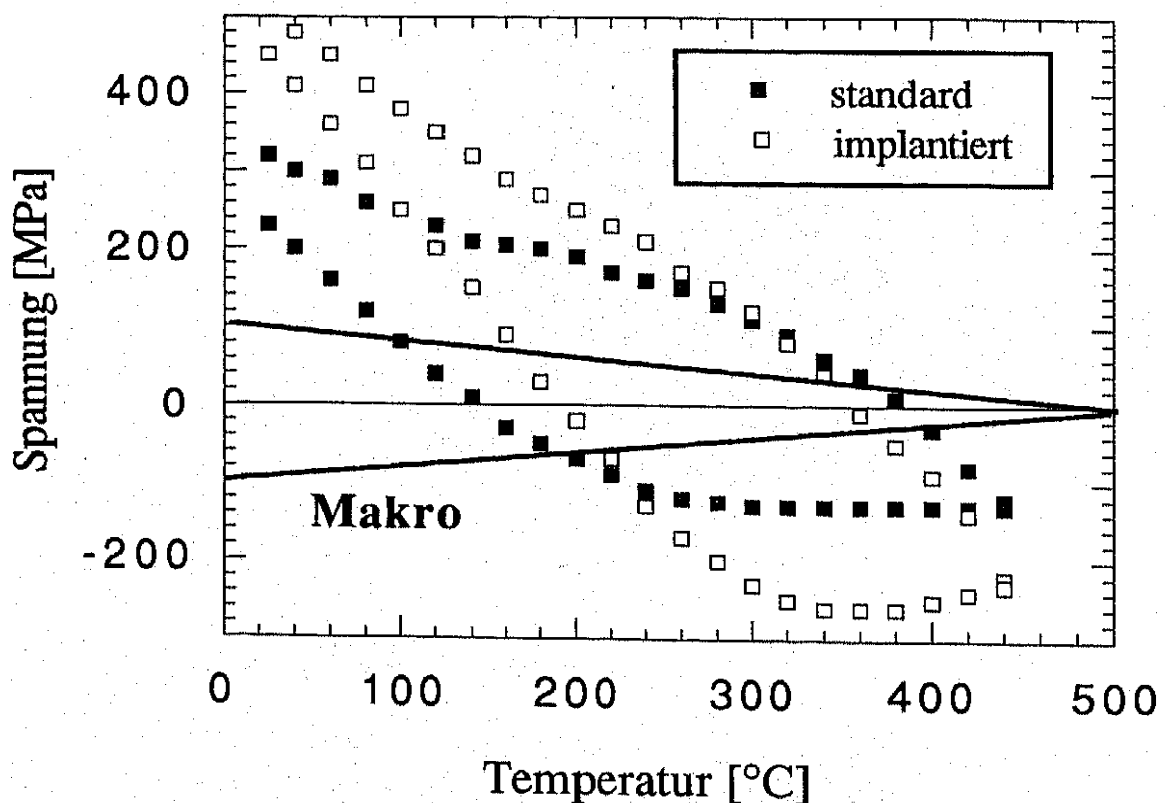


merklich ins Material, also beispielsweise in die Leiterbahn, gedrückt – ähnlich einem Härteeindruckverfahren, nur um viele Größenordnungen empfindlicher. Diese Feinfühligkeit ist auch notwendig, um tatsächlich die Eigenschaften des Werkstoffs und nicht die des darunterliegenden Substrats zu messen. Aus den Meßdaten lassen sich nun Rückschlüsse sowohl bezüglich Elastizität als auch Festigkeit ziehen, und zwar hochgenau und mit guter Ortsauflösung.

Ein anderes Verfahren, das der Messung der Festigkeit von dünnen Schichten dient, nutzt den Effekt, der vom Bi-Metall her bekannt ist: die mechanische Spannung in einer dünnen Schicht auf einem Grundwerkstoff führt zur Verbiegung der Probe, bis sich Gleichgewicht einstellt. Aus der Krümmung läßt sich umgekehrt unter Kenntnis der Substrateigenschaften auf die mechanische Belastung der Schicht schließen. Wir benötigen hier eine Auflösung, die Krümmungsradien von mehr als einem Kilometer erkennen läßt. Dies wird durch eine Laseranordnung erreicht. Durch Temperaturwechsel lassen sich nun verschiedene Spannungen einstellen; wir haben auf diese Weise eine Art Prüfmaschine für dünne Schichten erhalten, die neue Informationen über Schichtfestigkeit liefert.

Typische Meßergebnisse für eine Aluminiumschicht auf Silizium zeigt Abb. 21 (dunkle Quadrate). Bei Raumtemperatur zu Beginn des Versuchs läßt

Abb. 21: Der Verlauf der mechanischen Spannung in dünnen Aluminium-Schichten auf Silizium-Substrat, gemessen über die Verbiegung der Probe, als Funktion der Temperatur. Elastische und plastische Verformung der Schicht führen zu geschlossenen Hysteresen. Die Spannungswerte liegen zum Teil beträchtlich über der Festigkeit desselben Materials als makroskopische Probe (durchgehende Linien). Durch Ionenbeschuß läßt sich eine zusätzliche Verfestigung aufgrund von entstehenden Teilchen erreichen („ionenimplantiert“: helle Quadrate) (Foto: S. Bader, Max-Planck-Institut für Metallforschung).



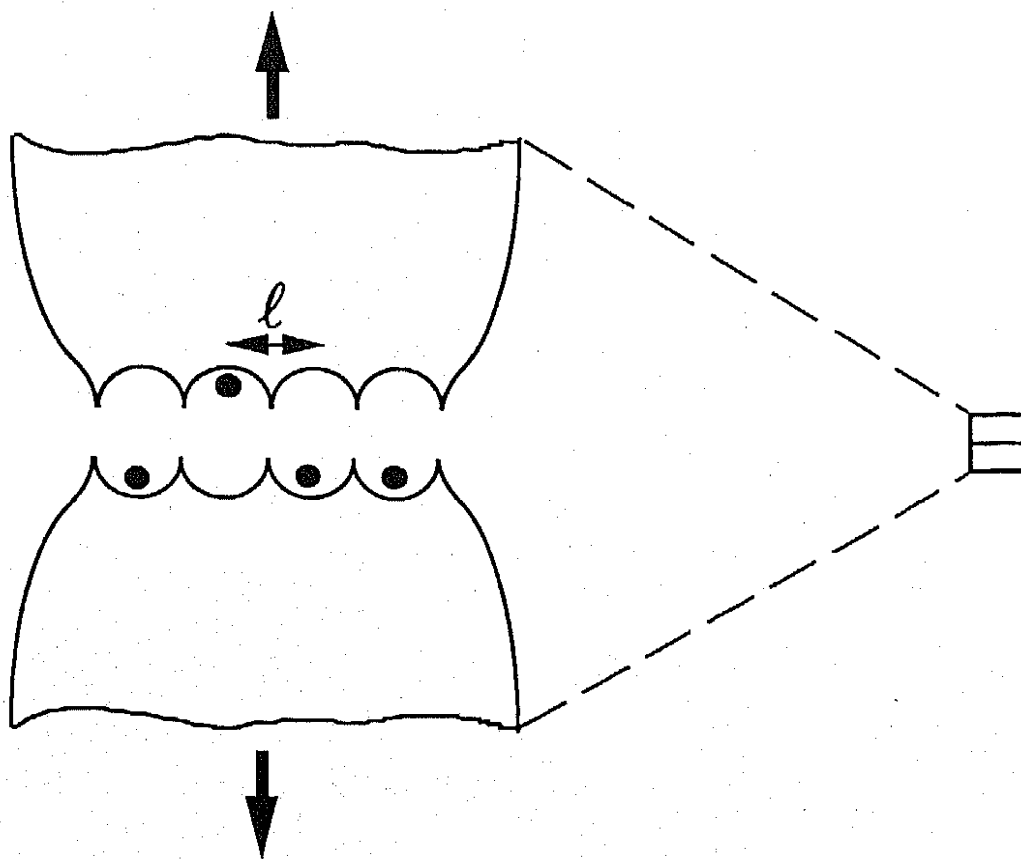


Abb. 22: Verformbarkeit („Duktilität“) von Mikrobauteilen: Während ein makroskopischer Werkstoff durch „Grübchenbildung“ den Bruch lange hinauszögert, wird ein Mikromaterial eher zum glatten („spröden“) Bruch neigen.

die Verbiegung auf eine beträchtliche Zugspannung in der Aluminiumschicht schließen: Dies ist das bereits beschriebene Ergebnis des Abkühlens nach der Herstellung der Aluminiumschicht. Mit steigender Temperatur nimmt die Spannung im Aluminium linear ab (entsprechend dem elastischen Verhalten), um bei etwa 140° sogar in eine Druckspannung überzugehen. Diese Druckspannung knickt bei einem charakteristischen Wert ab, was auf das Eintreten von plastischer Verformung schließen läßt. Die Fließgrenze nimmt nun bei weiterer Temperatursteigerung nur langsam ab. Wird die Probe wieder abgekühlt, dann schließt sich die Kurve zu einer geschlossenen Hysterese. Ebenfalls eingezeichnet sind die Zug- und Druckfestigkeiten, die für eine makroskopische Probe aus demselben Werkstoff zu erwarten wäre (durchgezogene Linien). Es ist deutlich zu erkennen, daß die *Festigkeit der Aluminiumschicht*, insbesondere bei höheren Temperaturen, *weit über der von makroskopischen Proben* liegt. Es zeichnet sich also ab, daß im Mikrobereich unter bestimmten Bedingungen mit wesentlich höheren Werkstofffestigkeiten zu rechnen ist als bei ähnlichen großvolumigen Legierungen. Die direkte Übertragung von Materialkennwerten aus makroskopischen Messungen ist daher für den Mikrobereich äußerst fragwürdig. Dies gilt besonders dann, wenn man in die Schicht noch zusätzliche Härtingsmechanismen einbringt. Dazu wurde die Probe mit Sauerstoffionen beschossen, die kleine Teilchen bildeten. Dadurch konnten die Spannungswerte noch beträchtlich gesteigert werden (helle Quadrate in Abb. 21).

In diesem Fall liefert wieder die Elektronenmikroskopie einen Schlüssel für die mögliche Erklärung: Versetzungen müssen sich in Mikrowerkstoffen stark krümmen, um in das Bauteil „hineinzupassen“. Dies führt zu einer hohen Festigkeit, die stark von der Komponentengröße beeinflusst wird.

Materialwissenschaftliche Probleme, die an konventionellen Werkstoffen erforscht wurden, müssen also für den Mikrobereich neu überdacht werden. Welche weiteren Besonderheiten von Proben in kleinen Dimensionen zeichnen sich außer dem Festigkeitszuwachs noch ab? Ein wichtiges Werkstoffkriterium ist die Duktilität oder Verformbarkeit, bevor bei Überlast Bruch eintritt (Abb. 22). Man weiß, daß sich in duktilen Werkstoffen Grübchen bilden, die den Bruch möglichst lange hinauszögern. Ein Mikrowerkstoff kann sich diesen Luxus aus geometrischen Gründen nicht leisten: Er wird eher zum unerwünschten glatten Sprödbbruch neigen (Abb. 23).

Auch der Begriff der Zähigkeit verdient im Zusammenhang mit Mikrowerkstoffen eine neue Betrachtung. Man versteht darunter die Fehlerfreundlichkeit gegenüber vorhandenen Rissen. Voraussetzung für akzeptable Zähigkeit ist ein energieverzehrender Mechanismus in einer sogenannten Prozeßzone, der den Riß bremst. Nun ist die Größe dieser Prozeßzone eine Materialkonstante: In Mikromaterialien kann das geringe Werkstoffvolumen diesen Effekt gar nicht nutzen. Für kritische Konstruktionen wird es daher notwendig sein, diesen Materialkennwert mit der Bauteilgröße abzustimmen – ein neuartiger Weg zu optimalen Konstruktionen.

Dies hätte auch wichtige Auswirkungen auf die Werkstoffwahl für Mikro-

Abb. 23: Beispiel für den glatten „Sprödbbruch“ einer Leiterbahn aus einem an sich gut verformbaren Material (Foto: J. Sanchez, Max-Planck-Institut für Metallforschung).



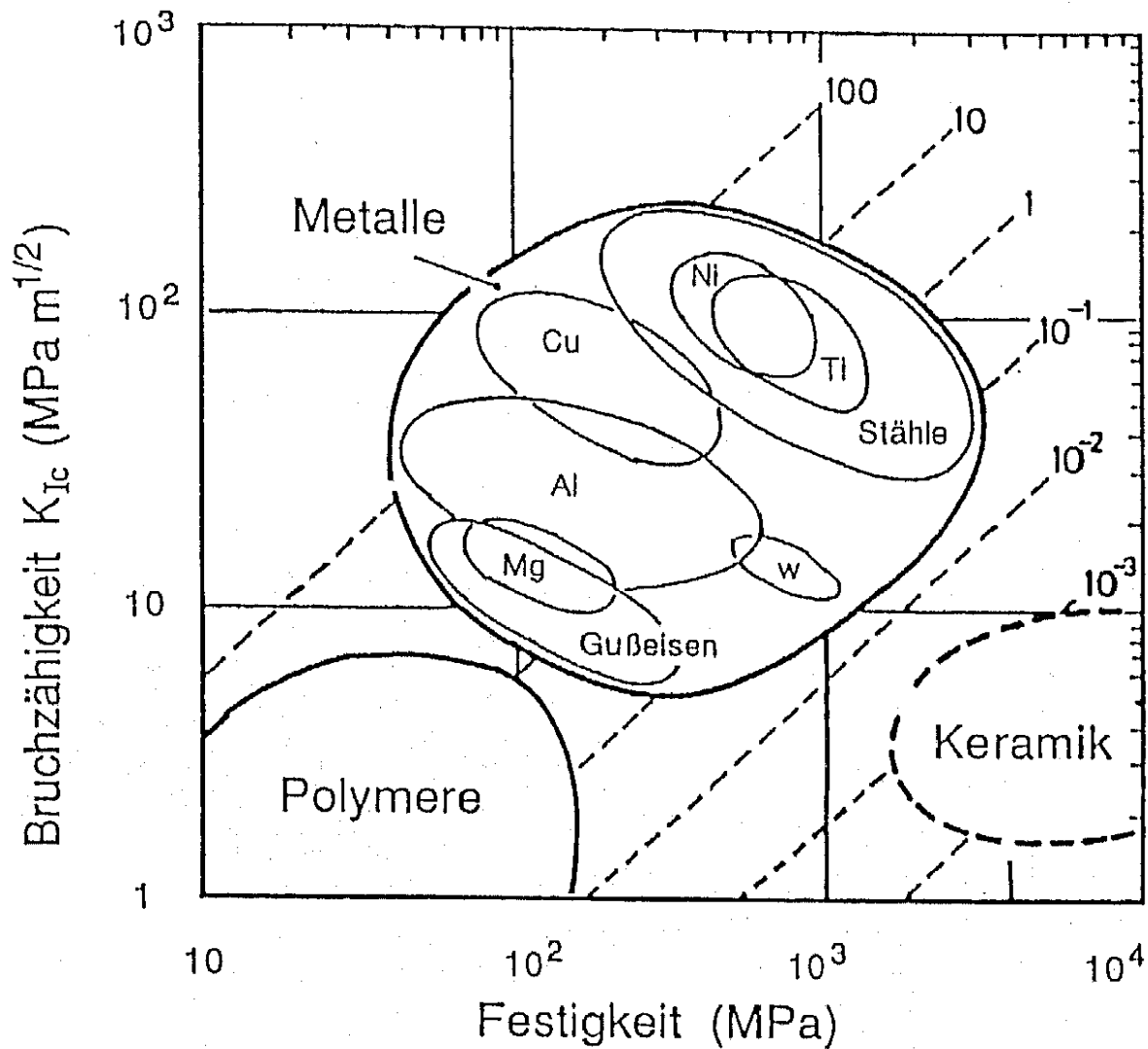


Abb. 24: Bruchzähigkeit und Festigkeit verschiedener Werkstoffe; die Linien geben die Eigenschaftskombinationen an, die zu gleichen Prozeßzonengrößen (angegeben in mm) führen. Um maßgeschneiderte Eigenschaften von Mikromaterialien zu entwickeln, wird die Prozeßzonengröße auf die Bauteildimensionen abgestimmt werden müssen.

komponenten. Trägt man die Bruchzähigkeit einiger Materialien gegen die Fließgrenze auf (Abb. 24), dann entsprechen den strichlierten Linien konstante Prozeßzonengrößen. Nimmt man beispielsweise den Bereich von $1\text{--}100\ \mu\text{m}$ als typische Bauteildimension, dann zeigt sich, daß keramische und sehr hochfeste metallische Werkstoffe gerade diese Zonengröße aufweisen. Auch wird klar, warum Keramiken, wie z. B. Siliziumnitrid, und auch Wolframlegierungen für mikromechanische Anwendungen brauchbar sind, obwohl sie als Makrowerkstoffe viel zu spröde wären. Insgesamt wird also deutlich, daß in Mikrowerkstoffen die Kriterien Festigkeit und Zähigkeit einen völlig anderen Stellenwert einnehmen werden. Erst wenn man diese neuen Effekte richtig versteht, wird man auch für die Mikrosystemtechnik Werkstoffe mit maßgeschneiderten Eigenschaftsprofilen entwickeln können.

Schlußbemerkung

Neue Technologien erfordern neue Werkstoffe – dies gilt seit Ikarus in zunehmendem Maße. Die Werkstoff- und Materialwissenschaft ist daher zu einem dynamischen Forschungsgebiet geworden: Noch nie hat die Menschheit über so viele Materialien mit definierten Eigenschaften verfügt, noch nie wurden so viele neue Werkstoffe gezielt entwickelt wie heute. Außerdem ist die Komplexität und damit die Notwendigkeit der wissenschaftlichen Durchdringung von Werkstoffen und ihrem Verhalten stark gestiegen. In diesem Vortrag sollten einige Parallelen in den Grundlagen von sehr verschiedenen Materialien aufgezeigt werden – Hochtemperaturwerkstoffe und Mikromaterialien. Solche zunächst nicht offensichtlichen Gemeinsamkeiten in den Mechanismen zu verstehen, aber gleichzeitig offen zu bleiben für neue unerwartete Effekte, ist ein lohnendes Ziel für die Grundlagenforschung auf diesem Gebiet.