Der Mensch, seine Werkstoffe und Technik im Dreiklang des Fortschritts

Professor Dr. Günter Petzow

Sehr verehrter Herr Burkhardt, liebe Freunde, Kollegen und Mitarbeiter, meine sehr verehrten Damen, meine Herren.

Für mich ist heute ein ganz besonderer Tag, an dem ich Dankbarkeit und große Freude empfinde. Dankbar bin ich den Mitgliedern des Kuratoriums, des Wissenschaftlichen Beirats der Arthur-Burkhardt-Stiftung und in erster Linie Ihnen, Herr Burkhardt, dafür, daß Sie mich ausgewählt haben: Es ist sehr ehrenvoll zu den Burkhardt-Preisträgern zu gehören. Ich sehe in der Ehrung auch eine Anerkennung für unser Institut und für meine Mitarbeiter.

Die vielen guten Worte, die über mich gesagt wurden, haben mich gerührt. Vor allem die Verbundenheit, die bei aller Objektivität aus Ihrer schönen Laudatio, lieber Herr Wilke, hervorging, stimmt mich froh und läßt einen bescheidenen Stolz aufkommen.

Besonders glücklich bin ich auch darüber, daß Sie alle, die zur Feststunde gekommen sind, mich durch Ihre Anwesenheit auszeichnen.

Einleitung

Meine Damen und Herren, auch die mit der Annahme des Arthur-Burkhardt-Preises eingegangene Verpflichtung, einen Vortrag außerhalb der engeren Fachroutine zu halten, hat meine Freude nicht trüben können.

Wie Herr Engell ausgeführt hat, soll dieser Vortrag, den Richtlinien der Stiftung folgend, eine Brücke zwischen Natur- und Sozialwissenschaften bauen und so mithelfen, die vom Stifter als schmerzlich empfundene Verständnislücke zu schließen. Die Notwendigkeit hierfür haben Sie, Herr Burkhardt, frühzeitig erkannt - zunächst als Wissenschaftler und Techniker, dann als Unternehmer die gesellschaftliche Bedeutung des Machbaren ständig vor Augen habend. Ganz in Ihrem Sinne möchte ich mit meinem Vortrag den Versuch machen, das Bewußtsein füreinander zu stärken. Das von mir gewählte Thema

spiegelt dieses Bestreben wider, wobei ich mit der Wortanleihe bei der Musik nicht nur dem einfühlsamen Musikfreund Arthur Burkhardt eine Referenz machen möchte, sondern mir auch erhoffe, das Zusammenspiel der drei Größen deutlicher machen zu können als mit technischem Vokabular.

Selbstverständlich muß der Mensch das Leitmotiv in dieser Symphonie sein, in der keineswegs immer Harmonien vorherrschen, sondern auch dissonante Spannungen laut werden. Doch muß der Wohlklang den Mißklang übertreffen; denn letztendlich dürfen als Fortschritt nur positive, mit dem Menschen und seiner Welt in Einklang stehende Entwicklungen gelten. Es kann nur einen Fortschritt für aber keinen gegen die Gesellschaft geben.

Zur geschichtlichen Entwicklung

"Die Geschichte der Werkstoffe ist die Geschichte der Menschheit", so heißt es. Man kann es natürlich auch umgekehrt formulieren: "Die Geschichte der Menschheit ist die Geschichte der Werkstoffe." Man sagt: "Neue Werkstoffe sind die Voraussetzung für neue Technologien." Das Umgekehrte trifft auch zu. Genauso gilt, daß die Technik den Menschen beeinflußt und umgekehrt. So gesehen ist die Frage nach dem Primat der drei Partner Mensch-Werkstoff-Technik per se ein ähnlich intellektuelles Gedankenspiel wie der Streit um das Erstlingsrecht zwischen Hahn, Henne und Ei.

Die Basis des Fortschritts ist eine Dreierbeziehung, die unabdingbar zusammenhängt, so wie es in sehr vereinfachter und schematischer Weise in Bild 1 zum Ausdruck kommt. Es ist die Evolution des Menschen, seiner Werkstoffe und Technik aufgetragen.

Wir sehen, daß sich die Erdbevölkerung vom ersten Auftreten des Frühmenschen etwa 2 Millionen Jahre vor unserer Zeitrechnung ständig vermehrt. Sie verhundertfacht sich in rund 500.000 Jahren von 100.000 auf 10 Millionen, die etwa 4000 v. Chr. erreicht sind. Der zweite Schub um den Faktor 100 auf 1 Milliarde Menschen wird dann bereits nach knapp 6000 Jahren trotz Naturkatastrophen, Pestilenzen und verheerender Kriege bei etwa 1820 erreicht. Heute gibt es 5 Milliarden Menschen und die Verdoppelungsrate liegt bei 33

Jahren; in knapp 200 Jahren könnte es demnach voraussichtlich schon 100 Milliarden menschliche Erdbewohner geben.

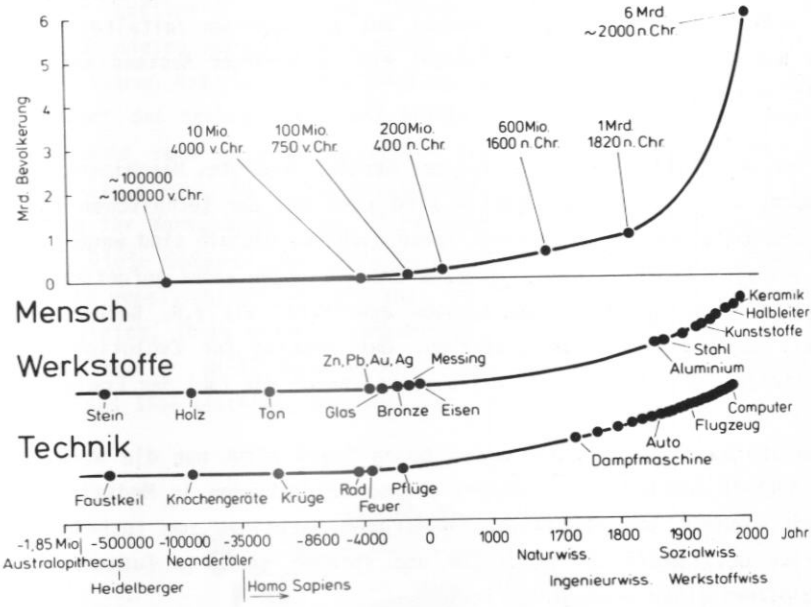

Bild 1: Die Evolutionskurve von Mensch, Werkstoff und Technik

Die Voraussetzungen für das Gedeihen der Species Homo sapiens haben sich mit der Zeit derart verbessert, daß er sich die Erde untertan machen konnte. Durch seine Werkstoffe und ihren Gebrauch in technischen Geräten und Verfahren hat er für sich günstige Lebensbedingungen geschaffen, die er sich und denen er sich ständig anpaßt.

Die Werkstoffe gehören zu unseren ältesten Kulturgütern. Ausgedehnte Zeiträume der Geschichte sind nach den dominierenden Werkstoffen benannt: die Steinzeit, die Kupfer- und Bronzezeit und die Eisenzeit, deren Ende wir vielleicht miterleben. Neue Werkstoffe wie Kunststoffe, Halbleiter, Hochleistungslegierungen und -keramiken, die amorphen Metalle und mehr und mehr die Verbundwerkstoffe betreten die Szene und geben Impulse für technische

Entwicklungen, oft genug mit weitreichenden Konsequenzen. Weitere neue Werkstoffe sind zu erwarten; jede chemische Verbindung, jede Legierung ist ein potentieller Werkstoff und kann über kurz oder lang unser Leben in ähnlicher Vehemenz revolutionieren wie seinerzeit der Griff des Urmenschen zum Stein. Wir sollten daher mit der Benennung des aufkommenden Zeitalters vorsichtig sein und sie der Zukunft überlassen; ein zu geringer Abstand kann die Perspektive verfälschen.

Aus den Werkstoffen werden Werkzeuge, Geräte, Apparate, Maschinen, Häuser und Straßen. Wie bei den Werkstoffen wird auch bei der technischen Entwicklung die Ereignisfolge in der Neuzeit immer dichter. Deshalb sind wegen der besseren Übersichtlichkeit viele wichtige Entwicklungen nicht aufgeführt, die das Spektrum günstiger Lebensbedingungen erweitern, wie z.B. Buchdruck, Radar, Funk, Telefon, Satelliten, Raketen. Der Anstieg der Evolutionskurven für Werkstoffe und Technik in Bild 1 berücksichtigt die Zahl der Ereignisse.

Natürlich haben zu dem erreichten hohen Stand nicht nur die Werkstoffe und die Technik beigetragen, sondern ebenso Entdeckungen in Medizin, Landwirtschaft, Chemie und Pharmazie. Sie tragen Wichtiges zum technischen Fortschritt bei, profitieren von ihm und spielen somit im Zusammenwirken der Disziplinen einen bedeutenden Part.

Durch Werkstoffe und Technik kann sich der Mensch aus der Naturabhängigkeit befreien, die seine Entwicklung hemmt. Diese Befreiung scheint grenzenlos zu sein. Aber kein Mensch vermag zu sagen, ob sie uns in ein gutes Land oder eine Wüstenei führen wird.

Die Entwicklung hat einen langen Anlauf genommen, bis sie das hohe Tempo unserer Tage erreicht hat. Aber sind die steil ansteigende Populationskurve und die immer dichter werdende Folge technischer Neuerungen von zum Teil hoher sozialer Brisanz der wahre Fortschritt? Bedingt der steigende Bedarf an Werkstoffen nicht auch die "Plünderung unseres Planeten" an unwiederbringlichen Rohstoffen? Kommt der Tag, an dem wir die Technik nicht mehr im Griff haben werden und der menschliche Geist dem Fortschritt nicht mehr gewachsen ist? Das sind Fragen unserer Zeit, an deren Beantwortung Natur- und Ingenieurwissenschaften und ihr interdisziplinärer Trieb, die Werkstoffwissenschaft, genauso mitwirken müssen wie die Sozialwissenschaften. Es ist unser aller Aufgabe, den Weg zu finden, der ins gute Land führt!

Innerhalb der Dreierbeziehung Mensch-Werkstoff-Technik ist diejenige zwischen Mensch und Technik in der Realität vordergründig und steckt oft voller Emotionen. Spätestens seit Beginn des Industriezeitalters, aber, wie gezeigt werden kann, auch schon Jahrhunderte vorher, gibt es in dieser Beziehung immer wieder heftige Kontroversen, leider allzu oft mit Gewalttätigkeit verbunden. In diesem Spannungsfeld werden die Werkstoffe und damit die dem Menschen nutzbaren Materialien durchweg vernachlässigt, obgleich sie häufig die "Auslöser" des technischen Fortschritts waren und sind und vermutlich auch in Zukunft sein werden. Sie treten jedoch meistens hinter dem Zweck zurück, dem sie dienen. So selbstverständlich sind uns die Werkstoffe geworden, daß uns ihr Vorhandensein gar nicht immer bewußt wird, geschweige denn, daß wir uns viele Gedanken über ihre Entstehung und Entwicklung machen oder gar über ihre gesellschaftliche Relevanz. Ich finde es deshalb angemessen und reizvoll zugleich, Ihnen einen Gedankengang von Georgius Agricola (Bild 2) vorzutragen, den er im 1. Band seines 12bändigen Werkes "De re metallica libri XII", das 1556 erschien, geäußert hat.

Bild 2: Georgius Agricola (Georg Bauer)

Er schreibt: "Wenn die Metalle aus dem Gebrauch der Menschheit verschwinden, so wird jede Möglichkeit genommen, sowohl die Gesundheit zu schützen und zu erhalten als auch ein unserer Kultur entsprechendes Leben zu führen. Denn, wenn die Metalle nicht wären, so würden die Menschen das abscheulichste und elendeste Leben unter wilden Tieren führen; sie würden zu den Eicheln und dem

Waldobst zurückkehren, würden Kräuter und Wurzeln herausziehen und essen, würden mit Fingernägeln Höhlen graben, in denen sie nachts lägen, würden tagsüber in den Wäldern und Feldern nach der Sitte der wilden Tiere umherschweifen. Da solches der Vernunft des Menschen, der schönsten und besten Mitgift der Natur, gänzlich unwürdig ist, wird da jemand überhaupt so töricht und hartnäckig sein, nicht zuzugeben, daß zur Nahrung und Kleidung die Metalle notwendig sind und daß sie dazu dienen, das menschliche Leben zu erhalten?"

Auch nach über 400 Jahren gibt es daran nichts zu aktualisieren. Alles, was über die Metalle gesagt wird, läßt sich auf die Werkstoffe allgemein übertragen. Agricola hat die soziale Seite der Werkstoffe deutlich angesprochen: Fragen des Gesundheitswesens und der Kultur ebenso wie solche des Lebensstandards ganz generell. Agricola hat für sich in seiner Zeit den Brückenschlag zwischen Werkstofftechnik und Gesellschaft vollzogen. Als Bürgermeister von Chemnitz, der sich sein Einkommen als Stadtarzt verdiente, war er der beste Kenner der damaligen Bergbautechnik und Metallurgie.

Die Werkstoffwissenschaft

Vor Agricola und auch nachher bis in unser Jahrhundert hinein entstanden neue Werkstoffe zufällig durch Probieren oder technische Praktiken. Ihre Verarbeitung erfolgte über Jahrtausende hinweg aufgrund handwerklicher Kenntnisse und überlieferter Rezepturen. Empirie und praktisches Wissen waren dem grundlegenden wissenschaftlichen Verständnis weit vorausgeeilt.

Die wissenschaftliche Durchdringung der Werkstoffe setzte erst Anfang dieses Jahrhunderts mit dem beginnenden Verständnis vom atomaren Aufbau der Materie ein. Eine intensive Untersuchung der metallischen, der nichtmetallisch anorganischen und der organischen Werkstoffe begann. Anfangs streng getrennt nach diesen Werkstoffgruppen, aber schon bald und sehr nachdrücklich vor etwa 40 bis 50 Jahren wurde klar, daß es für alle Werkstoffgruppen gültige Gemeinsamkeiten gibt. Ein neuer Sproß wuchs aus dem interdisziplinären Grund der Natur- und Ingenieurwissenschaften: die Werkstoffwissenschaft.

Die Werkstoffwissenschaft, die Aufbau, Eigenschaften, Herstellung und Verarbeitung der Werkstoffe ergründet, konnte sich in vielen Fällen auf Modelle und Vorstellungen der Physik, Chemie und Kristallographie stützen. Ihre

beachtlichen Anfangserfolge lagen in der Erklärung der empirischen Befunde, die sich in großer Zahl angesammelt hatten, und den daraus abzuleitenden Verbesserungen und weiterführenden Maßnahmen. Ihre enorme Bedeutung für den technischen Fortschritt liegt darin, daß aus dem grundlegenden Verständnis des inneren Aufbaus neue Werkstoffe erfunden und für bestimmte Anwendungen maßgeschneidert werden können.

Das Gefüge

Der innere Aufbau der Werkstoffe ist bestimmt durch die Art der beteiligten Atome und ihrem dreidimensionalen Arrangement zu bestimmten Ordnungszuständen.

Viele anorganische Werkstoffe sind kristallin und bestehen aus einer regellosen Vielfalt aneinandergepackter Kristalle. Der regelmäßige Aufbau größerer Bereiche ist immer wieder gestört. Aber auch die Kristallite in sich können erhebliche Abweichungen von einer idealen Symmetrie und Ordnung aufweisen, ja, das ist sogar die Regel. Selbst die schönsten Kristalle aus der mineralischen Welt, wie der Calcit in Bild 3, mit denen wir gefühlsmäßig Klarheit, Schönheit und Makellosigkeit assoziieren, weisen Gitterbaufehler auf. In einem einzigen Kubikzentimeter eines solchen schönen Kristalls sind viele Millionen Fehlstellen enthalten.

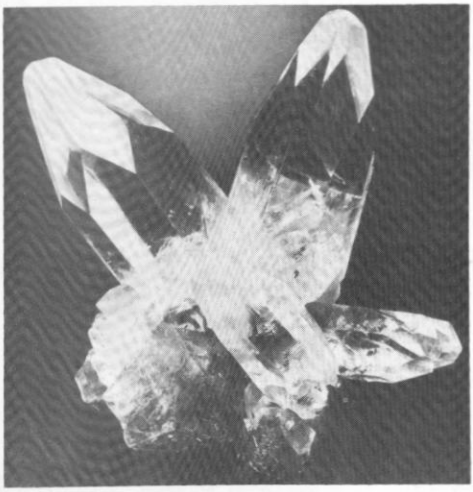

Bild 3: Calcit - Kristalle

Der perfekte Idealkristall höchster Ordnung, in dem jedes Atom genau auf seinem Platz sitzt, ist ein Wunschtraum. Die Symmetrie spielt als Bauplan der Natur eine Rolle, aber die Abweichungen davon, die Gitterbaufehler, prägen die Realität der Werkstoffe. Art, Größe, Form und Anordnung der Gitterbaufehler in einem Werkstoff werden als Gefüge bezeichnet. Das Gefüge beeinflußt die Eigenschaften maßgeblich, ihm wird daher eine große Beachtung in der Werkstoffwissenschaft zuteil. Die Lehre vom Gefüge und seiner Eigenschaftswechselwirkung ist eine Domäne der Werkstoffwissenschaft, durch die sie sich gegenüber anderen Disziplinen wie z.B. der Physik und Chemie profiliert.

Besser als Worte vermittelt Bild 4 einen Eindruck vom Wesen der Gefüge. Es handelt sich um ein bei 2220 °C gesintertes SiC, einem vielversprechenden Hochtemperaturwerkstoff. Untersucht wurde das sekundäre Kornwachstum mit Hilfe der Durchlichtmikroskopie. Wir erkennen z.B. das gerichtete Wachstum der Kristallspieße. Die mittlere Kristallänge entspricht etwa 200 µm. Aus Form, Größe, Art und Verteilung der Kristallite erhält der Werkstoffwissenschaftler sehr konkrete Informationen über die Vorbehandlung und die Eigenschaften des Materials, zumal es heute keine große Mühe mehr macht, solche Gefüge auch quantitativ zu erfassen. Dieses Bild, das von Frau Täffner in unserer Metallographie angefertigt wurde, zeige ich deshalb besonders gern, weil es gerade erst in der letzten Woche Gesamtsieger eines mikrophotographischen Wettbewerbs der American Ceramic Society geworden ist.

Bild 4: Lichtmikroskopische Durchstrahlungsaufnahme einer mit Bor und Kohlenstoff dotierten Siliciumcarbidprobe

Gefügeoptimierung

Je höher die Anforderungen an einen Werkstoff, desto anspruchsvoller sind auch die Vorgaben für das Gefüge. Das kann so weit gehen, daß aus bestimmten Stoffen erst dann Werkstoffe werden, wenn es gelingt, ihre Gefüge in bestimmter Weise zu gestalten, also zu optimieren. Ein typisches Beispiel aus jüngster Zeit sind Oxide, Nitride, Karbide und Boride. Das sind schon sehr lange bekannte chemische Verbindungen, aus denen man jedoch erst in den zurückliegenden Jahren Hochleistungskeramiken mit extremen Eigenschaften herstellen konnte. Die Voraussetzung dafür war eine Verfahrenstechnik, mit der die Einstellung bestimmter, feinkörniger Gefüge möglich wurde. Ich möchte Ihnen das durch Bild 5 verdeutlichen. Es sind rasterelektronenmikroskopische Gefügeaufnahmen von einem Gemisch aus Aluminiumoxid und Zirkoniumoxid der gleichen Zusammensetzung. Die hellen Teilchen sind Zirkoniumoxid-Einlagerungen in der grau erscheinenden Aluminiumoxid-Matrix. Beide Proben wurden aus den gleichen Ausgangspulvern durch Verdichtung hergestellt. Allerdings waren die Verdichtungsprozesse unterschiedlich. Aus dieser an sich gar nicht so stark voneinander abweichenden Behandlung ergibt sich eine große Differenz der Festigkeit beinahe um den Faktor 2. Der Grund dafür ist der an sich geringe Gefügeunterschied: Die für die linke Probe angegebene Behandlung hatte stärkeres Kornwachstum zur Folge; die damit verbundene Gefügevergröberung bewirkt die markante Abnahme der Festigkeit.

Die Zirkoniumoxid-Teilchen, die einen Durchmesser von etwa einem Mikrometer, das ist 1/1000 mm, aufweisen, haben eine bemerkenswerte Eigenschaft: Sie treten in verschiedenen Modifikationen auf, die bei unterschiedlichen Temperaturen existent sind, so wie wir das vom Eisen her kennen. Die Hochtemperaturmodifikation wandelt sich beim Abkühlen in die stabile Tieftemperaturmodifikation um, die ein um etwa 5% größeres Volumen aufweist. Diese Volumenausdehnung der in der Matrix eingeschlossenen Zirkoniumoxid-Teilchen ruft Spannungen hervor, die den äußeren Spannungen entgegenwirken und die Voraussetzung für eine Reihe energieabsorbierender Mechanismen sind, die sich günstig auf den Bruchwiderstand auswirken. Diese Erscheinung ist die Grundlage für die Umwandlungsverstärkung, mit deren Hilfe die Festigkeit und in gewisser Weise auch die "Zähigkeit" der Hochleistungskeramiken erhöht werden kann. Auch bei der Wärmebehandlung der Stähle wird so ein Modifikationswechsel ausgenutzt. Man nennt deshalb Zirkoniumoxid auch den keramischen Stahl, zumal ähnlich hohe Festigkeiten möglich sind.

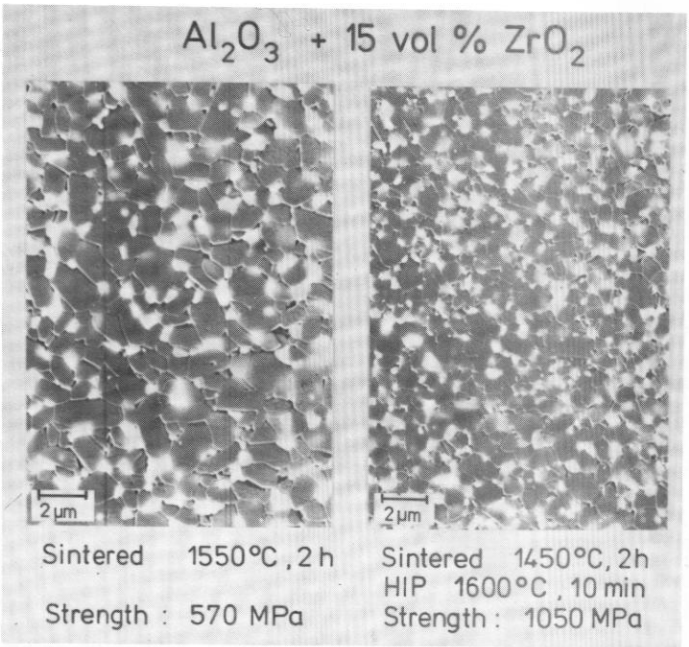

Bild 5: Beispiel für ein auf Festigkeit optimiertes Gefüge (rechts) einer Al_2O_3/ZrO_2 Dispersionskeramik

In einem kurzen Filmausschnitt möchte ich Ihnen das Umwandlungsverhalten von Zirkoniumoxid zeigen, das in situ in unserem 1250 KV Hochspannungselektronenmikroskop von Herrn Rühle aufgenommen wurde. Gleich anschließend daran möchte ich die großen Vorteile dieser gefügeoptimierten Keramik als Schneidwerkstoff für die spanabhebende Bearbeitung von Metallen, und zwar im Vergleich zu einem herkömmlichen Hartmetall demonstrieren.*

---

* Da die Filmszenen hier nicht wiedergegeben werden können, muß eine kurze Beschreibung genügen:
Die Umwandlung ist erkennbar durch die schnelle (martensitische) Bildung neuer Gefügebestandteile. Damit einhergehend entstehen durch Volumenzuwachs Druckspannungen in der Matrix, die an auftretenden Spannungskonturen zu erkennen sind.
Diesen Gefügeeffekt können wir technisch in Schneidkeramiken ausnutzen, deren Überlegenheit an dem im nächsten Filmabschnitt gezeigten Versuch hervorgeht. Bei diesem Versuch, der bei der Feldmühle in Plochingen aufgenommen wurde, wird ein Stahlknüppel, der eine stark korrodierte Außenschicht aufweist, abgedreht. Einmal (oben) mit einem Hartmetall, das ist eine Wolframkarbid-Kobalt-Legierung. Es sei bemerkt, daß Kobalt ein Material ist, das nur begrenzt zur Verfügung steht. Demgegenüber (unten) arbeitet der oxidische Werkstoff aus Al_2O_3 und ZrO_2 nicht nur doppelt so schnell, sondern trägt auch noch eine doppelt so starke Schicht ab. Darüberhinaus sind Aluminium- und Zirkoniumoxid nahezu unbegrenzt verfügbar.

Die Hochleistungskeramiken, die ich als Beispiel herausgesucht habe, um Ihnen Gefühl und Verständnis für die Bedeutung der Gefüge zu vermitteln, befinden sich zur Zeit in einer faszinierenden Phase des Aufschwungs, und mit weiteren spektakulären Durchbrüchen in die Anwendung ist zu rechnen. Ein solcher zeichnet sich bereits ab.

Supraleitende Oxide

Ein besonders aufregendes Beispiel ist die jüngste Entdeckung der supraleitenden Oxide, die eine geradezu hektische Tätigkeit auf dem Gebiet der supraleitenden Werkstoffe auslöste, auf dem die Entwicklung bereits auf vermeintliche Grenzen zu stoßen schien. Doch das Bild 6, das die zeitliche Entwicklung der Sprungtemperaturen von Supraleitern zeigt, macht eindringlich klar, daß dies nicht zutrifft.

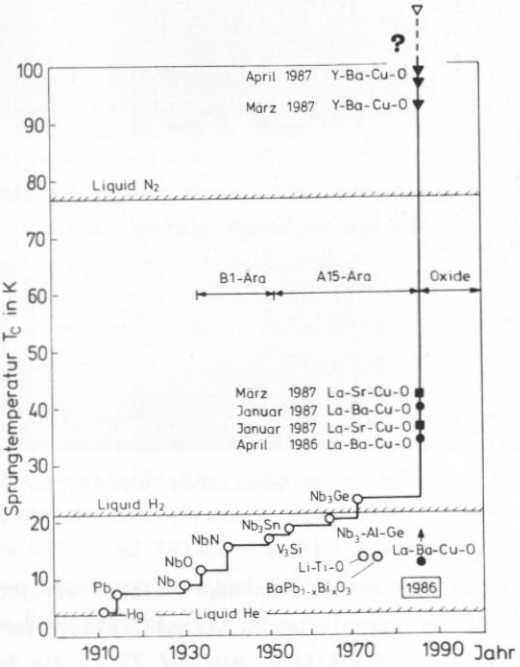

Bild 6: Die zeitliche Entwicklung der Sprungtemperaturen von supraleitenden Materialien

Seit Anfang dieses Jahrhunderts die sensationelle Entdeckung gemacht wurde, daß Metalle nahe dem absoluten Nullpunkt, also bei 0 Kelvin oder -273°C, jeden elektrischen Widerstand verlieren, führte die Suche nach und nach von den supraleitenden Metallen hauptsächlich zu einigen intermetallischen Verbindungen des Niobs, die ihre supraleitenden Eigenschaften erst knapp oberhalb von 20 K verlieren, also oberhalb des Wasserstoffsiedepunktes. Dieser Stand, der trotz intensiver Forschung noch beinahe 15 Jahre unverändert blieb, wurde im letzten Jahr förmlich überrollt, als eine Meldung aus dem IBM-Forschungslabor Rüschlikon bei Zürich auf supraleitende Metalloxide der Zusammensetzung La/Ba/CuO hinwies. Das löste einen wahren Wettlauf zwischen vielen Laboratorien in der Welt aus, der immer höhere Sprungtemperaturen zur Folge hatte. Heute schon liegen die Sprungtemperaturen bei etwa 100 K und vielleicht morgen schon darüber.

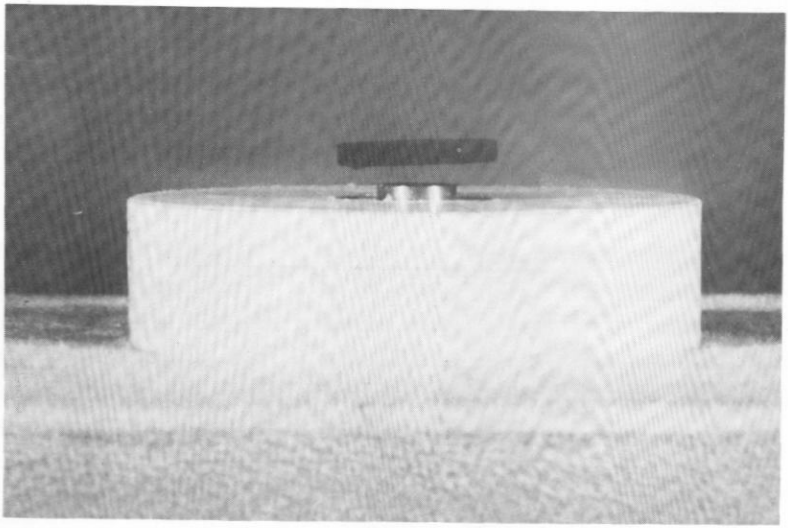

Bild 7: Der schwebende Supraleiter

Der einfache Versuch des schwebenden Supraleiters vermittelt einen anschaulichen Eindruck von der supraleitenden Keramik. Dieser Versuch, den wir Herrn Politis verdanken, zeigt das Bild 7. Die auf 77 K, die Temperatur des flüssigen Stickstoffs, abgekühlte und damit supraleitend gewordene Keramikprobe wird in das Feld eines Permanentmagneten eingebracht. Hierdurch werden in der Probe Ringströme induziert. Diese Ringströme fließen verlustfrei und klingen daher nicht ab wie in Normalleitern. Die Ringströme bauen in der Probe ein

Magnetfeld auf, das dem Feld des Permanentmagneten entgegengerichtet ist. Im Kräftegleichgewicht zwischen abstoßendem Magnetfeld und ihrem Gewicht schwebt die Probe. Die Keramikprobe ist diamagnetisch, sie versucht den Ort im Feldstärkeminimum einzunehmen. Dieses Minimum befindet sich oberhalb des Eisenkerns, über dem sie pendelt. Sobald sich die Probe aus $YBa_2Cu_3O_7$ über 95 K erwärmt, also ihre Supraleitung verliert, fällt sie herunter. Dieser Versuch, den ich Ihnen gerne vorgeführt hätte, ist zu klein, so daß er schon ab der dritten Reihe nicht mehr zu erkennen gewesen wäre. Deshalb haben wir im Labor einen Film* davon gemacht, den wir ansehen wollen. Wir haben das Experiment aufgebaut, und Sie können es sich nachher anschauen.

Dieser Versuch zeigt etwas, das vor einem Jahr buchstäblich als ausgeschlossen galt. Es sind immer weniger tiefe Temperaturen nötig, um Werkstoffe supraleitend zu machen. Schon jetzt reicht verflüssigter Stickstoff, der zehnmal billiger als Helium ist, zur Kühlung aus. So rücken technische Anwendungen in greifbare Nähe, die bisher wegen der hohen Kühl- und Heliumkosten unwirtschaftlich waren. Mit den neuen Materialien wird die Supraleitung in breitem Umfang für die Elektrotechnik verfügbar, der Phantasie sind dabei keine Grenzen gesetzt: schnellere Computer, sparsamere Elektromotoren, supraleitende Stromnetze mit enormen Energieeinsparungen; in den üblichen und häßlichen Überlandleitungen gehen vom Kraftwerk bis zum Verbraucher etwa 30% der Energie als Wärmestrahlung verloren. Diese Werkstoffe, die gestern noch Exoten waren, haben eine fundamentale Bedeutung und sicherlich starke wirtschaftliche, ökologische und soziale Konsequenzen.

Die Konstitution

Mehr und mehr wird sich Ihnen jetzt die Frage aufdrängen, ob bei der schon gegebenen Vielfalt der Werkstoffe ihre Entwicklung nicht bald am Ende ist? Die Antwort ist eigentlich verblüffend klar und lautet: nein! Potentielle Werkstoffe gibt es in Hülle und Fülle. Unendlich vielfältig scheint das von der Natur vorgegebene Kombinations- und Variationspotential zu sein, jede menschliche Phantasie übersteigend.

---

* Die Filmsequenzen, die hier nicht wiedergegeben werden, zeigen anschaulicher als es Bild 7 vermag das Schweben der Probe über dem Magneten (Meißnereffekt)

Lassen Sie mich das durch einige Zahlenbeispiele erläutern und dabei gleichzeitig zu einem zweiten Teilgebiet der Werkstoffwissenschaft überleiten.

Gehen wir davon aus, daß von den knapp über 100 bekannten Elementen 86 als Bestandteile in Werkstoffen eine Rolle spielen können. Das trifft meines Erachtens für die Edelgase und Transurane nicht zu, die ich deshalb in dieser Überlegung weggelassen habe. Werden nun die Elemente zu Systemen kombiniert, wie beispielweise zum Eisen-Kohlenstoff-System, dann ergibt sich der in Bild 8 dargestellte Kurvenverlauf, der die Abhängigkeit der Anzahl der möglichen Systeme von der Komponentenzahl ausdrückt.

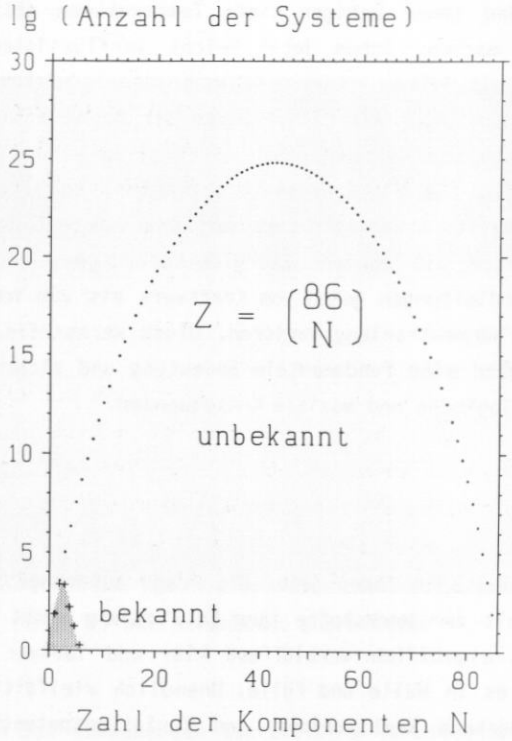

Bild 8: Konstitutionsberg

Die Anzahl der möglichen Systeme ist so groß, daß wir die logarithmische Auftragung wählen mußten, sonst wäre unsere Ordinate bis in die Milchstraße hinein zu verlängern. Diese Zahlen sind die Exponenten also z.B. 10^{-5} sind hunderttausend. Die Kurve steigt an bis zu 6,6 10^{24}. So groß ist die Zahl der möglichen Systeme mit 43 Komponenten. Danach nehmen die Zahlen wieder ab. Es gibt nur ein System mit 86 Komponenten, das alle anderen Systeme als Subsysteme enthält.

Demgegenüber fallen die Zahlen der untersuchten Systeme schnell mit der Komponentenzahl ab. Insgesamt dürften derzeit 7000 Systeme untersucht worden sein, deren Anteil durch die schraffierte Fläche charakterisiert ist. In diesem Bereich liegen alle bekannten Werkstoffe. Durch die logarithmische Darstellung täuscht das Verhältnis der Flächen einen höheren Prozentsatz an untersuchten Systemen vor. In Wirklichkeit beträgt der Anteil der untersuchten Systeme nur etwa 10^{-22}. Das wird durch folgenden Vergleich deutlicher: Wäre die ganze Erdoberfläche einschließlich der Weltmeere, gleichmäßig mit den möglichen Systemen bedeckt, würden die bisher untersuchten und bekannten Systeme von dieser Riesenfläche knapp einen Quadratmillimeter ausmachen.

Dieser von uns so benannte Konstitutionsberg ist also kaum erschlossen und stellt ein riesiges Reservoir an Werkstoffen dar. Trotz der zahlreichen Elementkombinationen, die in den heute verwendeten Werkstoffen eingesetzt werden, bleibt eine noch sehr viel größere Vielzahl bisher unerforschter Möglichkeiten. Darunter können zahlreiche technische Materialkombinationen sein, die dereinst eine ebenso wichtige Rolle spielen werden, wie heute beispielsweise Aluminiumlegierungen oder die supraleitenden Werkstoffe. Dieses Reservoir kriegt noch eine ganz andere Dimension, wenn man bedenkt, daß ein Legierungssystem mit vielen technischen Legierungen, wie es z.B. für das Eisen-Kohlenstoff-System zutrifft, in dieser Darstellung nur einmal gezählt wird. Eine weitere Vervielfältigung der Möglichkeiten ergibt sich aus der Tatsache, daß Elementmodifikationen wie z.B. zwischen Graphit, Diamant und Kohlenstoff genausowenig berücksichtigt wurden wie metastabile Zustände, wie sie bei allen Gläsern vorliegen. Weiter kommen noch die ganzen Möglichkeiten hinzu, wie sie sich bei den organischen Werkstoffen durch Variationen in der molekularen Anordnung ergeben. Eine unvorstellbare Fülle an möglichen Materialien und Werkstoffen steht also zur Verfügung.

In dieser nahezu unerschöpflichen Vielfalt liegt noch eine große Aufgabe, aber auch eine reizvolle Herausforderung für die Konstitutionsforschung, einem wichtigen Teilgebiet der Werkstoffwissenschaft. Eine Aufgabe, die sich m.E. von Bedeutung und Umfang her durchaus mit der Eroberung des Weltraums messen kann.

Dieser kurze Blick auf aktuelle Facetten der Werkstoffwissenschaft deutet die mannigfaltige Auffächerung innerhalb dieses Wissensgebietes an, das sich nicht nur auf die Ermittlung von Aufbau und Eigenschaften, sondern auch auf die Teilgebiete Herstellung und Verarbeitung von Werkstoffen erstreckt.

Vor einiger Zeit hat der bekannte Physiker John Ziman an maßgeblicher Stelle gesagt, daß die nächsten Jahrzehnte das Zeitalter der Werkstoffwissenschaft sein werden. Dem ist von meiner Seite nichts hinzuzufügen.

Der Materialkreislauf

Nun könnte man meinen, beeindruckt von der ungeheuren Vielfalt der möglichen Werkstoffe, die eingangs aufgeworfene Frage nach den Materialreserven und ihrer Plünderung wäre damit ad absurdum geführt. Das ist jedoch leider nicht der Fall, denn unter den unzähligen Kombinationsmöglichkeiten sind vermutlich viele, die nie eine Bedeutung erlangen werden. Es ist auch zu berücksichtigen, daß die quantitative Verfügbarkeit der Elemente nicht mit dem gegebenen Bedarf übereinstimmt.

Wie aus Bild 9 hervorgeht, wird von relativ wenigen Werkstoffen viel gebraucht. Hier ist für einige anorganische Werkstoffe der Pro-Kopf-Verbrauch der US-Amerikaner im Jahre 1981 angegeben. Das sind große Zahlen, die anderswo nicht so hoch sein mögen wie bei der amerikanischen Wegwerfgesellschaft, aber im Schnitt auch etwa 10% der Gesamtwirtschaft ausmachen dürften. Sicherlich sind Sie auch überrascht von der Höhe des Materialverbrauchs pro Kopf, dem natürlich auch eine erhebliche wirtschaftliche, soziale und ökologische Bedeutung zukommt.

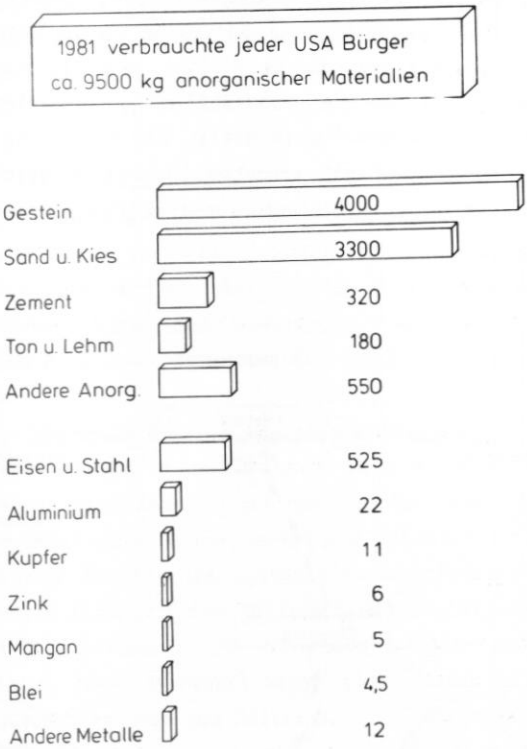

Bild 9: Pro-Kopf- und Jahresverbrauch in kg einiger anorganischer Werkstoffe in den USA

Materialverbrauch muß nicht gleichbedeutend sein mit "unwiederbringlich" verloren, wie es z.B. für den Energieverbrauch zutrifft, sondern kann im glücklichsten Falle nur ein Schritt im Materialkreislauf sein, der schematisch in Bild 10 dargestellt ist. Der Weg, den die Stoffe durchlaufen, führt über die Rohstoffe, die Grundstoffe zu den Werkstoffen, die nach der Verwendung der Produkte im Dienste des Menschen in den verschiedensten Bereichen der Technik zu Abfall werden. Im günstigen Fall kann der Abfall der Wiederverwendung zugeführt werden, im ungünstigsten Fall muß er in Deponien gelagert werden. Aber auch die zur Wiederverwendung ungeeigneten Abfälle sind dem Kreislauf nur dann verloren, wenn sie nicht durch chemische Prozesse oder Mikroorganismen abgebaut, in ihre Bestandteile zerlegt und als Rohstoffe wiederverwertet werden. Auch die Abfälle müssen als Produkte angesehen wer-

den, derer man sich nicht einfach entledigen darf, sondern um deren Nutzung man sich bemühen muß. Es gibt viele Beispiele dafür, daß dieses gelingt. Durch den Ausbau dieses Weges, des Recyclings, und im Zusammenhang mit ganz neuen Werkstoffen, verlieren die grundsätzlich berechtigten Sorgen von der Plünderung der Werkstoffvorräte an Dramatik. Die Verwendung häufig vorhandener Materialien und solchen mit erhöhtem Widerstand gegen Verschleiß und Korrosion weisen ebenso wie verbesserte Konstruktionen einen zusätzlichen Weg aus dem Dilemma.

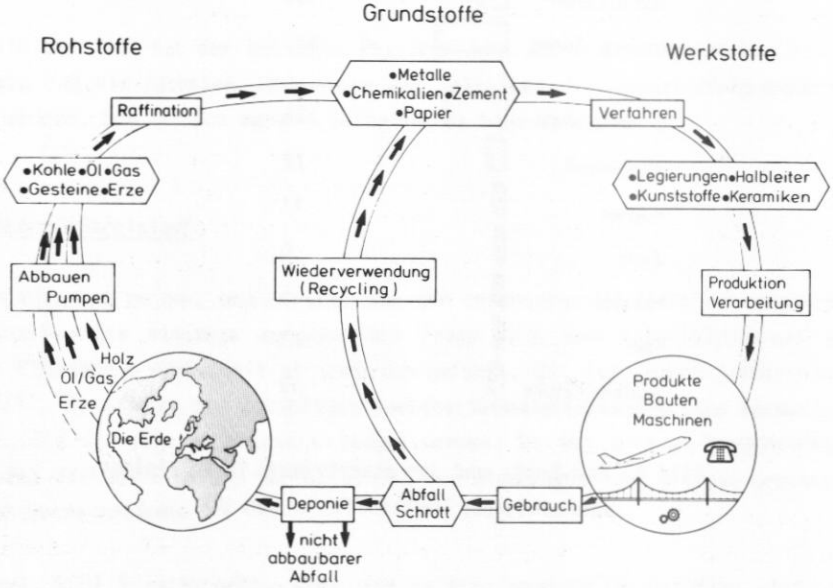

Bild 10: Der geschlossene Kreislauf der Stoffe

Schlußfolgerungen

Diese im Dreiklang störende Dissonanz, die Furcht vor begrenzten Werkstoffreserven, beginnt sich damit aufzulösen. Andere dagegen sind schriller, fordernder. Darunter ist auch das eingangs erwähnte Unbehagen, das viele Menschen angesichts der immer dichter werdenden Folge technischer Neuerungen erfüllt, die oft mit erheblichen sozialen Konsequenzen belastet sind. Unruhe

und Besorgnis über den Zerfall alter Ordnungen und über extrem anmutende neue Lebensformen, sowie Angst vor dem schnellen und beispiellosen Wandel unserer Umwelt sind heute weit verbreitet und arten allzuoft sogar zu Technikfeindlichkeit aus.

So hat der in Bild 11 wiedergegebene humanoide Roboter, die Sensation der Ausstellung in Tsukuba vor zwei Jahren, nicht nur Bewunderung ausgelöst, sondern eben auch dieses schlecht zu definierende Unbehagen. Er ist 180 cm groß, 80 kg schwer und verfügt über eine beachtliche Intelligenz: Er kann gehen, sitzen, sehen, hören und sprechen, er versteht die Sprache seines Operators, er kann Partituren lesen und ... Orgel spielen.

Manchem von Ihnen mag es so ergehen wie mir damals, als ich ihm das erste Mal gewissermaßen Auge in Auge gegenüberstand. Zunächst war ich merkwürdig betroffen, bis diese Betroffenheit der Neugier für die technischen Details wich: Ein ganzes Spektrum moderner Werkstoffe ist hier zu einem komplizierten, funktionierenden technischen System zusammengefaßt. Die "Gelenke" sind aus verschleißfester Keramik, die "Glieder" und Strukturteile aus leichten kohlefaserverstärkten Polymeren und pulvermetallurgisch hergestelltem, hochlegiertem Aluminium, die "Nervenstränge" sind Spezialglasfasern und das "Gehirn" sind Mikroprozessoren aus Silizium.

Das Wahrzeichen der Tsukuba-Expo, der Roboter, demonstriert die Nützlichkeit neuer Werkstoffe und ebenso die Fähigkeit eines Roboters, den Menschen zu entlasten. Selbstverständlich sind da, wo körperliche Schwerstarbeiten, monotone Arbeiten in gesundheitsschädigender Umgebung und am Fließband zu verrichten sind, Roboter zu begrüßen, damit niemand mehr als Handlanger einer unfertigen Technik herhalten muß. Roboter tragen dort zur Humanisierung der Arbeitswelt bei. Aber als Orgelspieler sind sie natürlich eine technische Spielerei, die von manchem nicht einmal als besonders gut empfunden wird.

Man mag den japanischen Konstrukteuren des orgelspielenden Roboters nachsehen, daß sie unsere westliche Einstellung zum Orgelspiel nicht kennen, aber sie haben unbewußt eine Pointe zu meinem Vortrag geliefert: Der Mensch im Dreiklang des Fortschritts mit seinen Werkstoffen und seiner Technik ist hier verkörpert.

Aber ist das wirklich so? Nein! Denn der Mensch ist nur indirekt vertreten. Der vermenschlichte, aber seelenlose Roboter ist kein Mensch; er ist ent-

menschlicht - ähnlich wie die Puppe Olympia in Hoffmanns Erzählungen. Er ist durch optimierte Werkstoffe und künstliche Intelligenz zu einer fast beängstigend funktionablen Technik geworden. Aber er ist und bleibt eine vom Menschen geschaffene Maschine. Die dem Orgelspiel inhärente Beseeltheit, seine humane Möglichkeit der Selbstfindung, so wie wir es empfinden, kommt hier nicht zum Ausdruck. Sehen wir dagegen in dankbarer Erinnerung Albert Schweitzer an der zu Bachs Zeiten erbauten Orgel in Ruffach, die er für Schallplattenaufnahmen erprobt (Bild 12).

Bild 11: Orgelspielender Tsukuba-Roboter

Bild 12: Albert Schweitzer an der Orgel in Ruffach

Das ist beinahe ein Schock. Welch ein Kontrast liegt zwischen den Bildern! Hier dominiert der Mensch, dort bleibt er hinter der von ihm geschaffenen Technik verborgen. Hier erfassen wir die Zusammenhänge, dort dagegen sind sie gar nicht oder zunächst nicht erkennbar. Dieses Nichterkennen, das allzuoft auch ein Nichtverstehen ist, belastet und beängstigt, aber das Erkennen und Verstehen macht vertraut.

Der Unterschied zwischen Unbehagen und Verständnis liegt in der humanen Dimension, die das einzige stabile Fundament für das komplexe und heterogene "Gefüge" der menschlichen Gesellschaft ist. Die aus dem technischen Fort-

schritt entstehenden Krisen werden wir nur dann meistern, wenn wir alle unsere Fähigkeiten, insbesondere Wissenschaft und Technik, humanisieren, d.h. den Zielen unserer Wertvorstellungen unterordnen. Inhalte solcher Wertvorstellungen zu entwerfen ist nicht die primäre Aufgabe eines Werkstoffwissenschaftlers. Aus seiner fachspezifischen Verpflichtung gegenüber der belebten Welt sollte er jedoch den technischen Wandel so mitgestalten, daß nicht nur unsere Lebensgüter Rohstoffe und Energie besser genutzt, sondern auch die Umweltmedien Luft, Wasser und Boden mehr als bisher geschont bleiben. Kurz gesagt: Mit weniger Rohstoffen, weniger Energie und weniger Umweltbelastung könnte aufgrund intelligenterer, neuer Werkstoffe und Technologien versucht werden, den heute in der westlichen Welt erreichten Lebensstandard für alle Menschen zu ermöglichen und vielleicht zu verbessern.

Die Mikroelektronik ist ein besonders eindrucksvolles Beispiel dafür, daß ein ökologisch sauberes Wachstum möglich ist. Das Material der Mikroelektronik ist auf absehbare Zeit Silizium, ein faktisch unerschöpflicher mineralogischer Rohstoff. Ähnliches gilt für die vorhin erwähnten Hochleistungskeramiken, die ökologisch und ökonomisch äußerst hochwertig sind. Ihre Verfügbarkeit ist groß, Schädigungen durch Korrosion und Verschleiß sind gering, sie helfen Energie sparen, sind biokompatibel und umweltfreundlich.

Mit weniger genauso viel noch besser machen ist also die Devise, mit der ein qualitatives Wachstum, das eine bessere Lebensqualität zur Folge hat, zu erreichen ist. Damit tragen wir alle nicht unwesentlich zum sich vollziehenden Wandel der Industriekultur in eine umweltbewußte, ökologische bei und setzen Akzente für eine technikfreundliche Zukunft, in der sich der Mensch mit seinen Werkstoffen und seiner Technik in lebenswerter Harmonie befindet. Dazu ist kein Umsturz bestehender Ordnungen nötig und auch kein "zurück zur Natur", sondern einiges an Anpassung und Umdenken.

In seinem beachtenswerten Buch "Die Regenbogengesellschaft" führt Josef Huber aus, daß das zurückliegende Industriezeitalter ein Anfang einer erst jetzt richtig beginnenden wissenschaftlich-technischen Zivilisation sei, die viel stärker als bisher ökologiebezogen sein muß. Er tut das so klar, daß ich mit einem entsprechenden Zitat aus seinem Buch enden möchte: "Ökologie kann nicht neben der Industrie, nicht ohne sie und schon gar nicht gegen sie verwirklicht werden. Die Industrie hat nur eine Wahl, nämlich sich ökologisch anzupassen. Handhabungen dafür bieten neue Werkstoffe und neue Technologien. Es scheint keinen anderen, zumindest keinen nicht-katastrophischen und nicht-

geschichtsrückfälligen Weg zur Lösung der ökologischen Probleme zu geben, als die breit gefächerte Entfaltung neuer Werkstoffe und Technologie."

Ich persönlich halte die Verwirklichung dieser Vision im Dreiklang des Fortschrittes zwischen dem Menschen, seinen Werkstoffen und seiner Technik in Harmonie für möglich.