

# Die Rolle maßgeschneiderter Werkstoffe für zukünftige Technologien

Prof. Dr. rer. nat. **H. Schmidt**, Saarbrücken

## 1. Einleitung

Die Nutzung von Werkstoffen durch den Menschen ist fast so alt wie die Menschheit selbst und hat die Entwicklung des menschlichen Geschlechtes nachhaltig geprägt. Dies beginnt mit den einfachen, natürlichen Werkstoffen (Steine, Knochen, Fasern) und setzt sich über die einfachen „synthetischen“ Werkstoffe (z. B. Metalle, Gläser, keramische Werkstoffe) bis zu den über chemische Synthesen hergestellten Materialien (wie z. B. Kunststoffe oder Spezialwerkstoffe) fort. Unter Werkstoffen sind dabei ingenieurmäßig nutzbare, gut charakterisierte Materialien zu verstehen. Dies bedingt, daß für den Werkstoff letztendlich eine Herstellungs- und Anwendungstechnologie vorhanden sein muß, die ihn vom reinen Material unterscheidet. Die Unterscheidung zwischen Materialien und Werkstoffen ist wichtig, da sonst die Gefahr von Mißverständnissen entsteht. Da die Naturwissenschaften wie Physik oder Grundlagenchemie wenig Unterschied zwischen Material und Werkstoff machen, da sie nicht mit technologieorientierten Ansätzen arbeiten, entsteht häufig der Eindruck, daß mit der Synthese eines neuen Materials gleichzeitig ein Werkstoff für technische Problemlösungen zur Verfügung steht. Dies ist ein mitunter folgenschwerer Irrtum, da von der Herstellung des reinen Materials bis zum Aufbau einer Technologie meistens noch Zeiträume von zehn Jahren vergehen und eine Ernüchterung vor dem Hintergrund der hohen Erwartungshorizonte unumgänglich ist.

Eine wichtige Ursache für die langen Zeiträume zur Entwicklung werkstoffbasierter Technologien ist für die Notwendigkeit zur interdisziplinären Kooperation, die zur Lösung der Probleme erforderlich ist. Dies beginnt bei den Wissenschaften, die für die Materialsynthese und für Grundlagenphänomene zuständig sind, und setzt sich in wissenschaftlich-technische, mehr ingenieurmäßig orientierte Bereiche fort, die für die Entwicklung der notwendigen Technologien, von der Werkstoffherstellung über die Verarbeitung bis zur Prozeßtechnik, Formgebung und Produktherstellung, eingeschaltet werden müssen. Verfolgt man die Wertschöpfungskette entlang dieser Linie, so wird man sehr leicht feststellen, daß die Wertschöpfung exponentiell mit der Integration des Werkstoffs in das Endbauteil oder das Endprodukt steigt. Dies wiederum bedeutet, daß die reine Werkstoffherstellung in der ersten (und niedrigsten) Stufe der Wertschöpfungskette steht. Betrachtet man die etablierten industriellen Abläufe einer Technologie vom Werkstoff bis zum

fertigen System, so stellt man fest, daß die Gesamtentwicklung arbeitsteilig geschieht. Auf der einen Seite werden Werkstoffe entwickelt und hergestellt (z. B. Kunststoffe, Stahl und andere Metalle), auf der anderen Seite stehen dem Unternehmen gegenüber, die diese Werkstoffe erwerben und sie zu Halbfertigzeugen oder Endprodukten weiterverarbeiten. Die Konsequenz aus dieser Situation ist, daß der Werkstoff angesichts des Wertschöpfungsprinzips nur dann entwickelt und hergestellt wird, wenn er in ausreichenden Mengen am Markt absetzbar ist. Vor dem Hintergrund der auch für die Werkstoffentwicklung benötigten langen Zeiten und hohen Kosten werden damit Ausschlußgrenzen definiert, unterhalb derer ein Werkstoff nicht mehr entwickelt wird. Dies bedeutet jedoch, daß infolge der zunehmenden Forderung nach Spezialisierung von Systemen (und auch von dazu benötigten Werkstoffen) viele benötigte Werkstoffe besonders im Funktionsbereich in ihrer Herstellung und Bereitstellung defizitär werden, da sie für den typischen Werkstoffhersteller nicht mehr lohnend vertreibbar sind. Auf der anderen Seite kann dem typischen Werkstoffanwender (in der Regel ingenieurmäßig orientierte Unternehmen aus der Produktionstechnik, der Optik, der Mikroelektronik, des Kraftfahrzeugbaus) nicht zugemutet werden, die gesamte Werkstoffentwicklungstechnologie selbst aufzubauen, da sie zu teuer wird und in der Vielfalt auch vom einzelnen Anwender nicht beherrschbar ist.

Damit entsteht eine Situation, die besonders solche Werkstoffe defizitär werden läßt, die für den Wettbewerb in zukunftssträchtigen Technologien (z. B. Optik, Nachrichtentechnik, Medizintechnik, Umwelttechnik, Fahrzeugbau, Energietechnik) notwendig sind.

## **2. Bedarf an Werkstoffentwicklungen**

Der größte Teil an Forschungs- und Entwicklungskapazität ging und geht immer noch in die Werkstoffe im Massen Anwendungsbereich. Dies sind Metalle einschließlich neuer Legierungen, Kunststoffe in ihrer inzwischen relativ weiten Vielfalt von Thermoplasten und Beschichtungsmaterialien bis hin zu Duroplasten und Elastomeren sowie nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe wie Gläser und keramische Materialien. Besonders die keramischen Werkstoffe sind in den letzten Jahren in den Mittelpunkt gerückt, da ihr interessantes Potential den Versuch eines Substitutionswerkstoffes für Metalle initiiert hat. Diese Versuche sind zwar noch nicht als gescheitert zu beurteilen, jedoch hat eine realistische Ernüchterung der anfänglichen Euphorie Platz gemacht. Dies ist auch vor dem Hintergrund der zu wenig beachteten Wertschöpfungskette zu sehen, die bei den herstellenden Unternehmen angesichts der relativ geringen Märkte zu hohe Kostenfaktoren verursacht hat.

Dem stehen Werkstoffentwicklungen im Bereich der Anwenderindustrien gegenüber, die zum großen Teil beim Anwender selbst stattfinden und nach außen hin nicht in Erscheinung treten. Beispiele

hierfür sind die Mikroelektronik mit einer Fülle von Entwicklungen im Bereich der Halbleiter-, aber auch der Aufbau- und Verbindungstechnik.

Das Prinzip der Trennung von Werkstoffherstellung und Werkstoffanwendung, wie es für die meisten westlichen Industrienationen typisch ist, bedingt für die systemorientierte Werkstoffentwicklung allerdings eine ausreichende Unternehmensgröße und kann vom Mittelstand in der Regel nicht geleistet werden. Das Prinzip ist den zunehmenden Nachfragen nach spezialisierten Werkstoffen immer weniger gewachsen. Während sich in Fernost Industriestrukturen gebildet haben, die über verschiedene Mechanismen zur Akquisition von neuen Werkstoffen verfügen (z. B. Integration chemische Werkstoffe herstellender Unternehmen in werkstoffverarbeitende Konzerne oder die Einbindung von „chemisch“ orientierten Zulieferern), hat dies im deutschen bzw. europäischen Raum bisher keinen entsprechenden Niederschlag gefunden. Dies bedeutet, daß im Augenblick keine ausreichenden Strukturen zur Abdeckung des Defizits an den benötigten Spezialwerkstoffen existieren. Hinzu kommt, daß besonders in der Bundesrepublik mittelständige Unternehmen einen hohen Anteil der produzierenden Unternehmen stellen. Da es eher unwahrscheinlich ist, daß sich die werkstoffverarbeitenden Unternehmen kurzfristig in Richtung der aufwendigen Werkstoffentwicklung für ihre eigenen Bedürfnisse engagieren können, entsteht hier eine staatliche Aufgabe zur Schaffung von Rahmenbedingungen, die wiederum F+E-Strukturen generieren, die eine „Versorgung“ mit den benötigten Werkstoffen gewährleisten. Dazu sind Einrichtungen erforderlich, die in der Lage sind, neben der langfristigen Know-How-Erzeugung auf hohem Niveau und dem dadurch erzielten hohen Innovationspotential auch für die Entwicklung der für die Verwendung der Werkstoffe benötigten Technologien zu sorgen.

Interessante Werkstoffgebiete mit zukünftiger Bedeutung sind Oberflächentechniken, aufbauend auf neuen Werkstoffen mit spezieller Funktion. Bei Gasphasen- oder Vakuumtechniken ist inzwischen ein relativ hoher Stand der Technik entwickelt worden. Diese Verfahren wurden jedoch technologiebasiert entwickelt, d.h. die Technologie stand im Vordergrund. Die Werkstoffpalette, die zur Verfügung stand und steht, ist dagegen relativ klein. Umgekehrt lassen sich über chemische Synthesen eine Vielzahl von hochintegrierten multifunktionellen oder sogar intelligenten Werkstoffen entwickeln und als Beschichtungsmaterial verwenden. Allerdings findet die Entwicklung nur in sehr begrenztem Umfang statt.

Andere Beispiele sind Werkstoffe für die Nachrichtentechnik, die für eine konsequente Bewältigung der zukünftigen Nachrichten- und Informationflut notwendig sind, weil ohne solche Werkstoffe eine prozeßtechnische Verarbeitung der über Langstreckenübertragung übermittelten Signale nur auf konventionellem Wege über die Mikroelektronik durchgeführt werden kann. Besonders benötigt werden Werkstoffe für optische Schalter und optische Verstärker („onboard a chip“). Auch hier gilt

wieder, daß die Menge an benötigten Werkstoffen so klein ist, daß sich traditionelle Werkstoffhersteller dieser Thematik nicht widmen können. Im folgenden soll anhand einiger durchgeführter Entwicklungen verdeutlicht werden, welche Ansätze zur Lösung der anstehenden Problematik genutzt werden können.

### **3. Beispiele für Werkstoffentwicklungen mit querschnittstechnologischem Effekt**

#### **3.1 Die anorganische Synthesechemie als ein wichtiges Instrument zur Werkstoffentwicklung**

Wie schon eingangs erläutert, spielen Syntheseverfahren eine zunehmend wichtige Rolle für die Entwicklung neuer Werkstoffe. Die wichtigsten Vertreter von Werkstoffen, hergestellt durch chemische Synthesen, sind die Kunststoffe, die nahezu ausschließlich von der chemischen Industrie hergestellt werden. Allerdings gilt auch hier die oben geschilderte Einschränkung, daß im wesentlichen nur Werkstoffe mit großen Absatzmärkten hergestellt, weiter- bzw. neuentwickelt werden. Demgegenüber spielen Werkstoffe über anorganisch-chemische Synthesemethoden eine untergeordnete Rolle, wenn man von einigen wenigen Rohstoffen (z. B.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -,  $\text{SiC}$ -,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Pulver) und anderen Produkten, wie z. B. Füllstoffen für Polymere, z. B.  $\text{TiO}_2$ , absieht. Dies hängt im wesentlichen mit der Tatsache zusammen, daß anorganische Werkstoffe deutlich kleinere Marktvolumina aufweisen als Kunststoffe oder Metalle. Für nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe als Spezialwerkstoffe eröffnen sich verschiedene interessante Perspektiven, z. B. als Beschichtungswerkstoffe, als Werkstoffe für die Mikroelektronik und die Optik. In diesem Zusammenhang ist es noch von Interesse, daß durch Kombinationen zwischen anorganischen und organischen Werkstoffen mit sehr kleinen Phasendimensionen (molekulare oder nanoskalige Ebene) der Zugang zu vollkommen neuen Werkstofftypen gelingt (z. B. Ormocere [1] oder Nanokomposite [2]).

In Form von Beschichtungen haben sich solche Werkstoffe schon am Markt durchgesetzt, z. B. bei der Beschichtung von Flachglas nach dem Tauchverfahren (z. B. Calorex<sup>®</sup> der Fa. Schott) oder ein Beschichtungssystem auf Edelstahl der Fa. Nisshin Steel, Japan. Weitere interessante Anwendungen sind z. B. Katalysatorwerkstoffe (z. B. Washcoat auf den Automobilkatalysatoren). Die Beschichtungswerkstoffe wurden vom jeweiligen Systemhersteller entwickelt. Sie erzeugen im Endsystem eine hohe Wertschöpfung. Damit können auch die Entwicklungskosten kompensiert werden.

Die Möglichkeiten, die die anorganische Synthesechemie zur Werkstoffentwicklung bietet, sind nahezu unbegrenzt. Vor dem Hintergrund der kleinen Werkstoffmärkte ist nur ein geringer Bruchteil der Möglichkeiten genutzt. Damit entsteht die an sich paradoxe Situation, daß auf der einen Seite ein außerordentliches Potential zur Verfügung steht, auf der anderen Seite massive Defizite existieren und trotzdem keine Entwicklungen zur Deckung dieser Defizite durchgeführt wurde. Im Folgenden werden im wesentlichen Beschichtungswerkstoffe definiert, da sie als Spezialwerkstoffe nur in kleinen Mengen benötigt werden, aber hohe Wertschöpfungen erzeugen können.

### 3.2 Beispiele für Werkstoffentwicklungen

#### 3.2.1 Entwicklung von Antihaftbeschichtungswerkstoffen

Antihaftbeschichtungswerkstoffe spielen in der Verfahrenstechnik, aber auch bei Endprodukten (sowohl Investitionsgüter als auch Gebrauchsgüter) eine wichtige Rolle. Dies trifft besonders bei Formgebungsprozessen zu. Die in der Regel eingesetzten Beschichtungswerkstoffe auf der Basis von Polytetrafluoroethylen haben mehrere gravierende Nachteile. Dies sind schwierig zu lösende Haftungsprobleme auf den entsprechenden Substraten, sehr geringe Oberflächenfestigkeit und mangelnde Transparenz, die den Einsatz als optischer Werkstoff kaum zulassen. Aus den genannten Gründen wurden Entwicklungen durchgeführt, die, aufbauend auf Überlegungen zur Grenzflächen-thermodynamik, zu einem Werkstoff geführt haben, der in Form einer Naßbeschichtung auf Oberflächen auftragbar ist, ein Mehrkomponentensystem darstellt und sich während des Trocknungsvorganges selbst „arrangiert“, d. h. eine Phasenseparation durchmacht. Diese Phasenseparation einzelner Komponenten führt dazu, daß ein Schichtsystem entsteht, das Haftungsmechanismen zum jeweiligen Substrat entwickelt, zur Oberfläche hin jedoch eine Aufkonzentration von perfluorierten Kohlenwasserstoffketten bewirkt, die zu einer Niedrigenergieoberfläche führen und einen Antihafteffekt erzeugen. Durch die Ausbildung von nanoskaligen anorganischen Partikeln ( $ZrO_2$  bzw.  $SiO_2$ ) während der Synthese oder des nachträglichen Eintrags solcher Teilchen in das Beschichtungssystem erhalten diese Schichten eine relativ hohe Oberflächenfestigkeit, die sie deutlich von Kunststoffen abhebt, ohne daß die Transparenz darunter leidet [3]. In Bild 1 ist eine schematische Darstellung solcher Schichten gezeigt.

Die Schichtsysteme sind inzwischen für verschiedene Anwendungen entwickelt worden. Sie unterscheiden sich dabei in der Zusammensetzung. Für Anwendungen auf Glas wurden Werkstoffe entwickelt, die bei 350 °C thermisch verdichtet werden können und sich von der Glasoberfläche kaum unterscheiden. Diese Schichtsysteme können auch für Metalle angewendet werden. Für

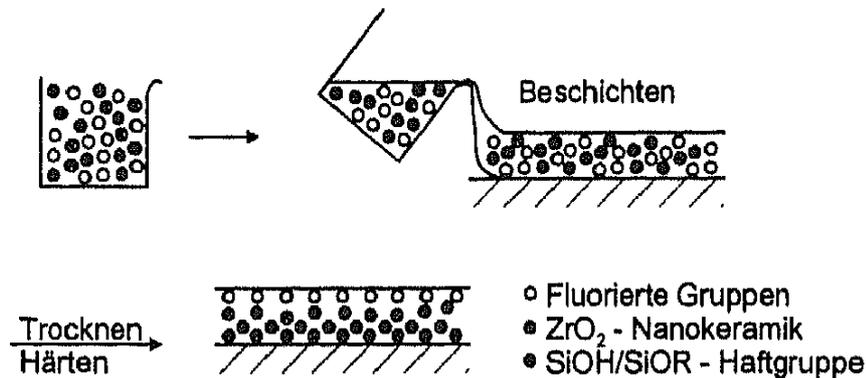


Bild 1: Schematischer Aufbau eines Gradientenschichtsystems mit dem thermodynamisch bedingten selbstarrangierenden Prinzip [3].

Kunststoffe wurden Systeme mit niedriger Aushärtungstemperatur (90 - 150 °C) bzw. UV-härtende Systeme entwickelt. Die antiadhäsiven Schichten können für viele Zwecke verwendet werden. Die beiden wichtigsten Bereiche sind ihre Anwendung als schmutzabweisende Schicht oder als Trennschicht bei Entformungsprozessen. In der Kunststoffertigungstechnik kann die Entformung aus den Formgebungswerkzeugen mitunter problematisch sein, da viele Kunststoffe zur Haftung an den Formen neigen. Es ist dann der Einsatz von Trennmitteln notwendig. Hierfür werden häufig Silicone verwendet, oder die Formen werden mit PTFE beschichtet. Als ein erfolgreiches Entwicklungsbeispiel sei hier die teppichverarbeitende Industrie angeführt. Auslegeware wird in der Regel in einem kontinuierlichen Prozeß mit einer aufgeschäumten Kunststoffrückseite versehen. Dies erfolgt häufig auf Transportbändern aus Edelstahlgeflechten (ca. 30 m lang und 5 - 6 m breit). Der Aufschäumprozeß erfolgt auf dem Transportband, wobei gleichzeitig der Kaschierprozeß mit der textilen Seite durchgeführt wird. Zur Vermeidung von Haftung wird das Transportband mit Siliconen beschichtet. Die Siliconschicht muß jedoch nach wenigen Tagen erneuert werden, da sie ihre Wirkung verliert. Dabei muß das Band vor Neubeschichtung gründlich von anhaftenden Kunststoffresten gereinigt werden. Zu diesem Zweck muß die ganze Anlage stillgelegt werden. In Bild 2 ist ein Teilstück eines solchen Edelstahltransportbandes gezeigt.

Zum Ersatz von Siliconen wurden einige solcher Bänder vor Ort mit der Tieftemperaturantihaftschicht beschichtet und die Produktion wieder gestartet. Selbst nach einem Jahr arbeitet die Schicht noch fehlerfrei, so daß keine Produktionsunterbrechung mehr notwendig war und die Anwendung von Silicon unterbleiben konnte. Damit entfiel auch die Notwendigkeit der intensiven Reinigung der Teppichrückseiten, da anhaftende Siliconbestandteile auch Probleme bei der Verklebung der Böden nach sich ziehen.



Bild 2: Ausschnitt aus einem Edelstahltransportband, wie es in der Teppichindustrie verwendet wird.

Ähnlich gute Ergebnisse wurden mit der Schicht bei Prozessen wie der Papierherstellung (z. B. Beschichten von Transportwalzen) sowie bei der Herstellung geschäumter Polystyrolformteile erzielt. Da das Schichtsystem relativ einfach an unterschiedliche Beschichtungsprozesse anpaßbar ist bzw. mit unterschiedlichen prozeßtechnischen Eigenschaften ausgestattet werden kann, besitzt es ein breites Potential für Entformungsprozesse.

Eine andere Anwendung besteht in der schmutzabweisenden Wirkung der Schicht. In Bild 3 sind zwei Glasscheiben abgebildet, die mit einer Suspension aus Kieselgel und Motoröl besprüht sind. Während auf der beschichteten Seite die Suspension abrollt und damit der größte Teil des Schmutzes nicht auf der Scheibe haften bleibt, zeigt die unbeschichtete Seite einen hohen Verschmutzungsgrad.

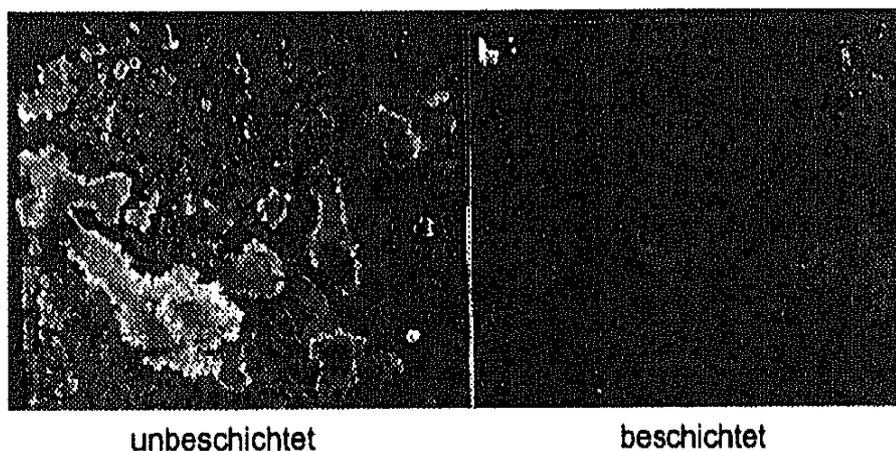


Bild 3: Beschichtete und unbeschichtete Glasscheibe nach einem Verschmutzungstest [3].

Die dazu verwendete Schicht wird bei mehreren 100 °C auf der Glasoberfläche eingebrannt und steht in der Abriebsfestigkeit der natürlichen Glasoberfläche praktisch nicht nach.

In ähnlicher Weise lassen sich Kunststoffoberflächen beschichten, die dann ebenfalls schmutzabweisend oder selbstreinigend sind. Hier bietet sich ein breites Anwendungspotential, z. B. für Sichtfenster in schmutzbelasteten Bereichen, im Architektur- und im Automobilbereich.

Ein anderes Beispiel ist die Reinhaltung von Transportsystemen, wie z. B. Rohrleitungen. Besonders dann, wenn durch Rohrleitungssysteme unterschiedliche Flüssigkeiten nacheinander transportiert werden, ist es notwendig, intensive Reinigungsprozesse dazwischenschalten. Es hat sich herausgestellt, daß die Antihafschichten den Anteil an an der Rohrrinnenseite anhaftendem Flüssigkeitsfilm drastisch reduzieren. In engen Rohrssystemen kann sogar mit einem „Null-carry-over“ gerechnet werden. In Bild 4 ist dies schematisch dargestellt.

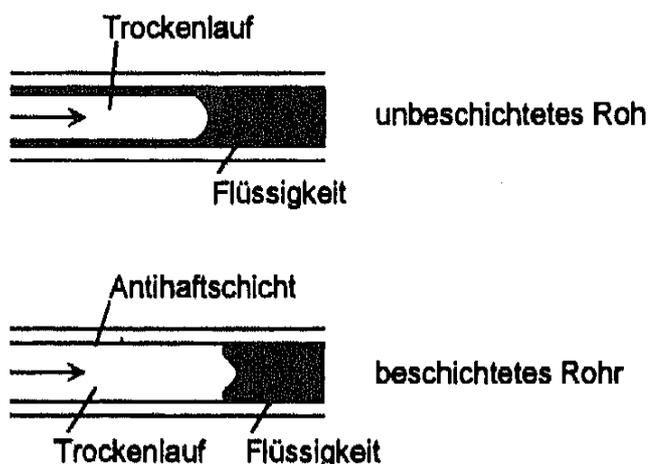


Bild 4: Schematische Darstellung des Null-carry-over-Effektes in engen Rohrleitungssystemen.

Damit können intensive Reinigungs- und Spülprozesse eingespart werden. Anwendungsmöglichkeiten bieten sich in der automatisierten Analytik, in Transportsystemen, besonders im Lebensmittelbereich. Die Schichten sind heißwasserbeständig, so daß Sterilisationsprozesse durchgeführt werden können.

### 3.2.2 Korrosionsschutz- und Kratzfestschichten

Korrosionsschutz auf Metallen ist eine permanente Thematik, die besonders durch die Verwendung neuer Legierungen bzw. Aluminium wieder Auftrieb bekommen hat, da es erforderlich ist,

verschiedene bisher gängige Korrosionsschutzverfahren aus ökologischen Gründen zu verändern. Beim Aluminium sind dies besonders Passivierungsprozesse (Chromatierung) und die Eloxierung. Vor diesem Hintergrund wurden neue Antikorrosionssysteme entwickelt [5], die neben einem hohen Korrosionsschutz gleichzeitig auch noch wesentlich kratzfester sind als übliche Polymer- oder Eloxalschichten. Grundprinzip dieser Systeme ist eine Maßschneiderung der Grenzfläche, bei dem das Beschichtungssystem reaktiv an der Aluminiumoberfläche angebunden wird, wie in Bild 5 schematisch dargestellt ist.

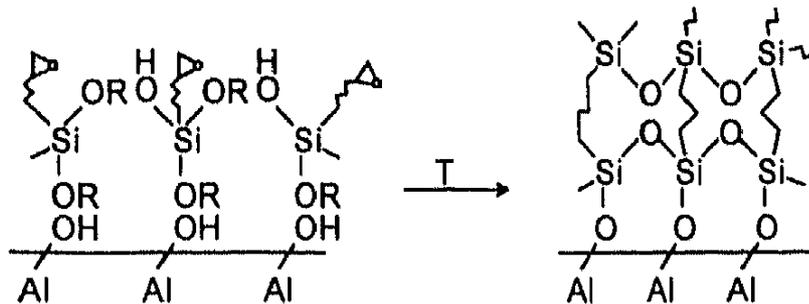


Bild 5: Schema der chemischen Anknüpfung eines anorganisch-organischen Komposit-Antikorrosionssystems auf Al.

Durch die im Härtungsschritt erfolgende starke Vernetzung des anorganisch-organischen Kompositensystems [6] wird die Grenzfläche so stabil, daß durch permeierenden Wasserdampf zwar einzelne Bindungen gespalten werden können, die Reaktionsprodukte dieser Bindungsspaltung jedoch nicht abtransportiert werden. Damit wird eine thermodynamisch stabilisierte Grenzfläche erzeugt, und der Korrosionsprozeß tritt praktisch nicht ein. Die Wirksamkeit des Prinzips wird auch durch die praktisch fehlende Unterwanderung der Schichten bei Verletzung dokumentiert.

In Bild 6 ist eine Aluminiumfelge nach einer Korrosionsprüfung mit einer beschichteten und einer unbeschichteten Seite dargestellt.

Die Beschichtung kann über Sprüh- und Tauchverfahren erfolgen; eine Vorbehandlung (mit Ausnahme einer Reinigung) ist nicht erforderlich. Das Beschichtungssystem ist unabhängig von der jeweiligen Aluminiumlegierung und läßt sich auch für Magnesium verwenden. Es wurden inzwischen Außenbewitterungstests durchgeführt und die Schichtsysteme so weit entwickelt, daß sie für Aluminiumaußenfassadenplatten ebenfalls eingesetzt werden können. Durch die Einfärbbarkeit der Schichten können verschiedene Farbeffekte erzeugt werden. Ein anderes Korrosionsschutzprinzip ist die Erzeugung von dünnen Glasschichten auf Metalloberflächen (Edelstahl, Stahl, Aluminium). Dabei wird ein System auf die Oberfläche gebracht, das sich bei Temperaturen



Bild 6: Beschichtete und unbeschichtete Ansicht einer Aluminiumfelge nach dem Korrosionsschutz.

zwischen 300 und 500 °C in eine dünne Glasschicht umwandelt, die die Oberfläche hermetisch abschließt. Diese Glasschichten sind praktisch nicht sichtbar; der ursprüngliche Charakter der Metalloberfläche bleibt erhalten. Allerdings werden die Oberflächen deutlich abriebsfester und auch hochtemperaturkorrosionsgeschützt. Die so behandelten Oberflächen sind auch sehr säurebeständig. In Bild 7 sind zwei Edelstahlflächen nach einem Hochtemperaturkorrosionstest dargestellt, bei der ein Teil der Oberfläche beschichtet, der andere unbeschichtet ist.

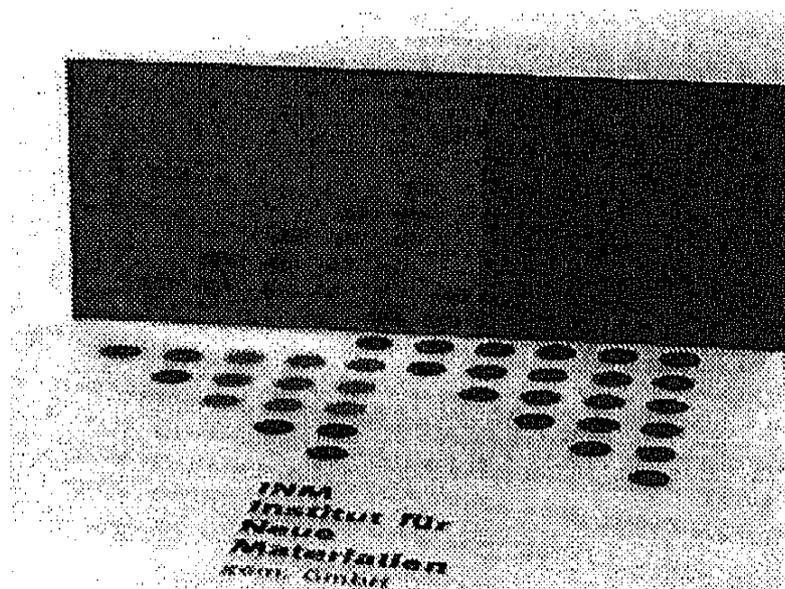


Bild 7: Edelstahlflächen, mit einer dünnen SiO<sub>2</sub>-Glasschicht beschichtet und unbeschichtet nach einem Hochtemperaturtest bei 700 - 900 °C.

Die Schichten können mit allen üblichen Naßbeschichtungsverfahren aufgetragen werden.

Bedingt durch den anorganischen oder Kompositcharakter sind die geschilderten Beschichtungssysteme im Vergleich zu Polymerbeschichtungen extrem abriebsfest. Diese Eigenschaften in Verbindung mit niedrigen Aushärtetemperaturen um 90 °C wurden schon vor längerer Zeit [7 - 8] für die Beschichtung von Kunststoffbrillengläsern zur Erhöhung der Kratzfestigkeit genutzt. In neueren Entwicklungen wurden die Schichtsysteme dahingehend verbessert, daß sie in ihren Gebrauchseigenschaften den Oberflächen anorganischer Gläser kaum noch nachstehen. Dies wurde mit dem Einbau nanoskaliger keramischer Partikel erzielt, die in Verbindung mit Polymersystemen zu Schichtmaterialien mit hervorragenden Oberflächeneigenschaften führen [9]. Die Schichtsysteme wurden mit verschiedenen Tests geprüft und mit existierenden Hartbeschichtungen bzw. anorganischem Glas verglichen. In Bild 8 sind die Ergebnisse in zwei Diagrammen dargestellt.

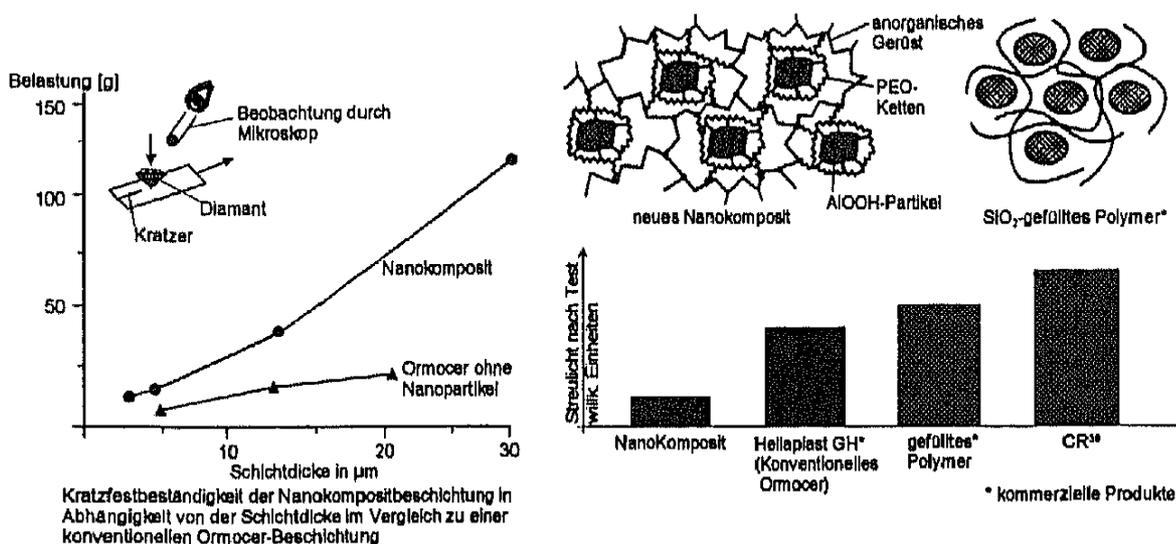


Bild 8: Oberflächentests verschiedener Schichtsysteme.

Das Beschichtungsverfahren wurde 1994 in die industrielle Praxis eingeführt und ist seitdem sehr erfolgreich am Markt. Mit diesem System lassen sich auch Polycarbonat- und andere Kunststoffoberflächen beschichten. An planen Proben hat sich dabei herausgestellt, daß Abriebswerte erzielt werden, die ebenfalls in den Bereich anorganischer Gläser kommen (Taber-Abraser: 1000 Umdrehungen, Aluminiumoxid-Reibrad; Streulicht um 1 %). Damit stehen Beschichtungssysteme zur Verfügung, die, auf Kunststoffen eingesetzt, deren Oberflächenqualität deutlich erhöhen und die trotzdem hochtransparent bleiben.

Die Schichtsysteme können auch mit zusätzlichen Funktionen ausgestattet werden, z. B. mit tensidhaltigen Komponenten, die einen Antibeschlageffekt erzeugen (Bild 9).

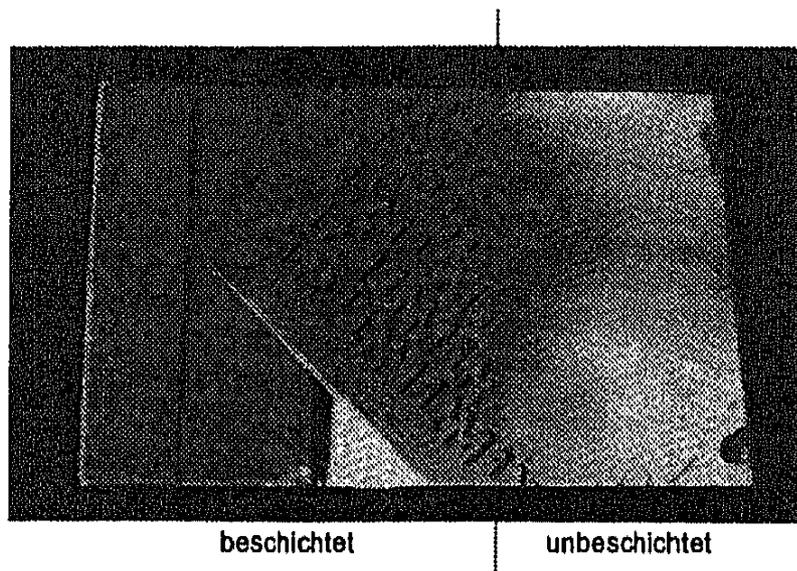


Bild 9: Teilweise antibeschlagbeschichtete Glasscheibe nach dem Beschlagtest. Rechte Seite: unbeschichtet; linke Seite: beschichtet.

#### 4. Optische Werkstoffe

Optische Werkstoffe sind aus vielerlei Hinsicht interessant: einmal als Beschichtungswerkstoffe auf „weichen“ Oberflächen (z. B. auf Brillengläsern aus Kunststoff, wie oben gezeigt), als Werkstoffe für die Lichtleitung, im Bereich der Nachrichtentechnik für Licht, als intelligente Werkstoffe mit nichtlinear-optischen Eigenschaften oder optisch schaltbaren Eigenschaften (z. B. elektrochrome Werkstoffe oder Werkstoffe für optische Schalter und Verstärker), darüber hinaus auch für passive Bausteine.

Sie spielen auch für die Nachrichtentechnologie in der Zukunft eine wichtige Rolle, da sie für den Aufbau von Netzwerken bis zum Endverbraucher für optische Datenstrecken von entscheidender Bedeutung sind. Besonders fehlen Werkstoffe für optische Schalter und Verstärker, die in kleinen Dimensionen auf optische Bausteine montiert werden können. Weiterhin sind optische Werkstoffe dann gefragt, wenn es darum geht, Lichttransmissionen zu steuern (z. B. im Architektur- oder Automobilbereich für das Wärmemanagement), für die Displaytechnik oder für optische Datenspeicherung. Für spezielle abbildende Optiken sind Mikrolinsensysteme von Interesse (Kontrastverstärker für Displaytechnik oder Kopiersysteme). Für meßtechnische Anwendungen oder Sensorzwecke sind Gitterarrays gefordert. Während Mikrostrukturierungsprozesse mit Polymeren relativ einfach über Abformtechniken realisierbar sind, haben diese Werkstoffe jedoch den Nachteil einer hohen Temperaturempfindlichkeit, verbunden mit einer geringen Oberflächenfestigkeit. Daher

wurden Entwicklungen durchgeführt [10], Zwitterwerkstoffe zwischen anorganischen und organischen Werkstoffen zu entwickeln (anorganisch-organische Polymere, Ormocere, Nanokomposite), die sich grundsätzlich wie Polymere verarbeiten lassen, in ihren Eigenschaften jedoch eher Werkstoffen wie Glas und Keramik ähnlich sind. Diese Werkstoffe sind in ihren optischen Eigenschaften einstellbar (z.B. Variation des Brechwertes), können Photopolymerisationsreaktionen unterworfen werden und eignen sich daher zur Mikroformgebung über photolithographische Verfahren und Abformverfahren. In Bild 10 ist die Herstellung eines Mikrolinsenarrays über ein Prägeverfahren dargestellt, wobei über einen mechanischen Prozeß zunächst einmal ein Master mit hoher Präzision hergestellt wird. Von diesem Master lassen sich Mikrolinsenarrays abformen, sowohl in konkaver als auch in konvexer Ausführung.

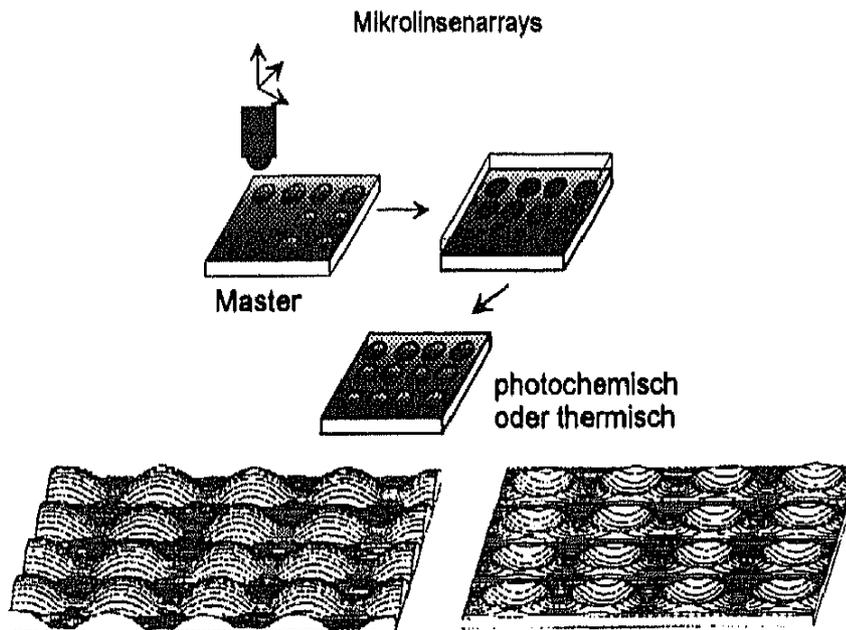


Bild 10: Schematische Darstellung der Abformtechnik von Mikrolinsenarrays und (im unteren Bildteil) Profilmeterplots von über diese Technik hergestellten Linsenarrays.

Mit Hilfe dieser Werkstoffe lassen sich auch über holographische Prozesse Gitter sowie Mikrofresnellinsen unter Heranziehung des Colburn-Haines-Effektes herstellen [11]. Eine schematische Darstellung ist in Bild 11 gegeben.

Der Belichtungsprozeß zur Mikrostrukturierung erfolgt über einen Zweiwellenmischprozeß, die Aushärtung über eine flächige Belichtung. Damit sind Volumen hologramme herstellbar. Wird, wie in Bild 10 gezeigt, ein Entwicklungsprozeß dazwischengeschaltet, so erhält man Oberflächenhologramme bzw. Oberflächenfresnellinsenarrays. In Bild 12 ist eine profilometrische Abbildung eines Querschnitts einer solchen Fresnellinse mit einem Durchmesser von 20  $\mu\text{m}$  gezeigt.

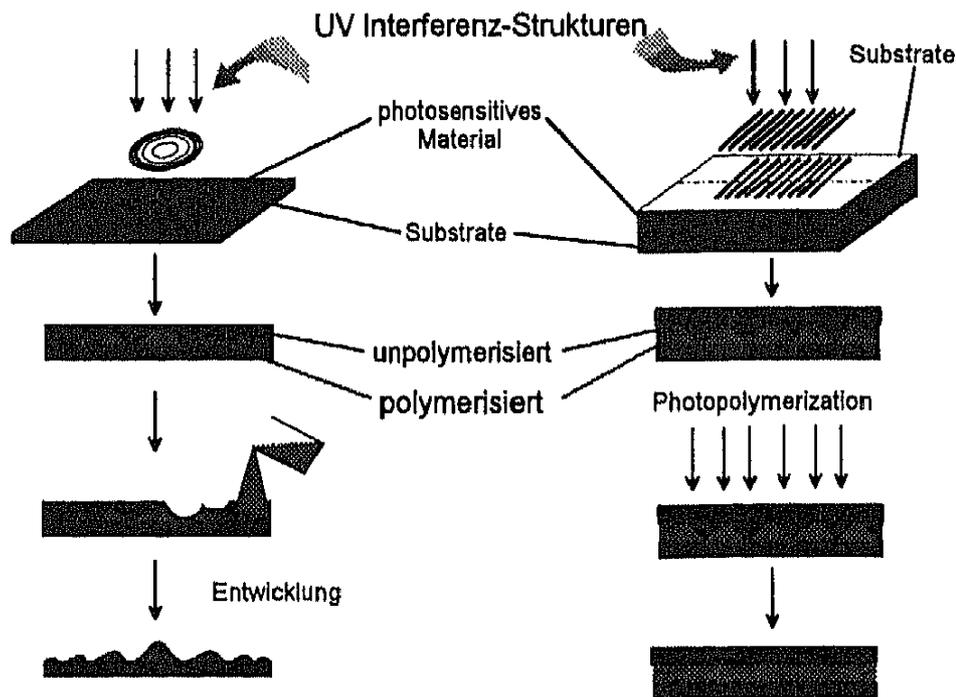


Bild 11: Herstellung von Mikrofresnellinsen über einen holographischen Prozeß [11].

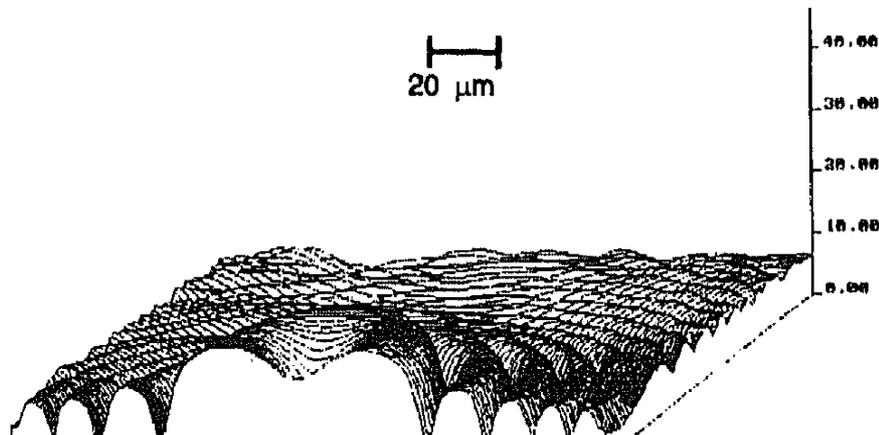


Bild 12: Profilometerplot einer über einen Zweiwellenmischprozeß photolithographisch hergestellten Mikrofresnellinse.

Mit diesen Systemen lassen sich Lichtwellenleiter und optische Bausteine wie z. B. Verzweiger herstellen. Die Dämpfungswerte im sichtbaren Bereich liegen deutlich unter 1 dB/cm, wenn unter Reinraumbedingungen gearbeitet wird.

Werden diese passiven Werkstoffe mit aktiven Komponenten dotiert, die nichtlineare optische Eigenschaften haben, so lassen sich daraus grundsätzlich optische Schalter erzeugen. Zu diesem Zweck wurden die Werkstoffe mit Goldkolloiden dotiert, und es hat sich herausgestellt, daß sich

durch die Gestaltung der Grenzfläche der Kolloide im Durchmesser ca. 5 - 10 nm Werkstoffe mit sehr hohen nichtlinearoptischen Koeffizienten ( $\chi^3$ -Suszeptibilitäten) herstellen lassen, die im Bereich von  $10^{-6}$  esu liegen. Das sind Werte, die schon in den Bereich der praktischen Nutzbarkeit kommen. Dazu müssen nanoskalige Metallteilchen in einer Polymer- oder Glasmatrix hergestellt werden. Ein solches Goldteilchen mit einem Durchmesser von ca. 6 nm ist im elektronenmikroskopischen Bild in Bild 13 gezeigt [12].

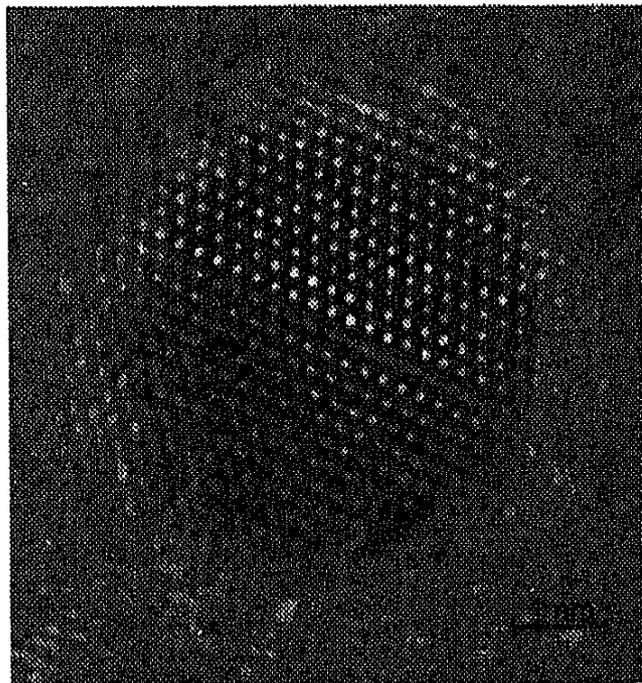


Bild 13: TEM-Aufnahme eines Goldteilchens in Glas. Durchmesser: 6 nm.

Andere aktive optische Werkstoffe sind sogenannte elektrochrome Systeme, die sich zur Variation der Lichttransmission, z. B. durch Fenster eignen. In Bild 14 ist der Ablauf einer Herstellung eines elektrochromen Systems, basierend auf naßchemischen Beschichtungstechniken, dargestellt. Diese Systeme sind relativ preisgünstig herstellbar sowie thermisch und langzeitstabil.

Die Liste der Entwicklungen ließe sich noch lange fortführen. Aus den Nanokompositwerkstoffen wurden inzwischen optische Linsen für medizintechnische Anwendungen, nicht schmutzende Fensterscheiben, Absorbermaterialien für Lösungsmittelabreinigung und andere entwickelt. Neue Wege wurden auch bei keramischen Werkstoffen beschritten, die inzwischen in rationellen Formgebungsprozessen als dünne Folien bzw. als Membranen hergestellt werden können [14].

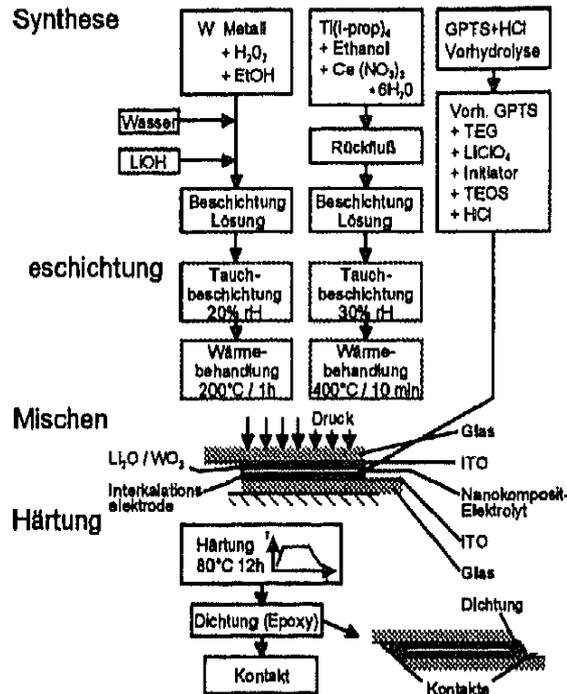


Bild 14: Schematische Darstellung eines elektrochromen Systems, basierend auf Sol-Gel-Techniken [nach 13].

## 5. Schlußfolgerungen

Die vorgestellten Werkstoffentwicklungsbeispiele zeigen alle eine breite Querschnittsfähigkeit, d. h. sie sind in sehr vielen verschiedenen industriellen Bereichen einsetzbar. Typisch für alle diese Beispiele ist es, daß die Werkstoffentwicklung nicht von klassischen werkstoffentwickelnden Industriebranchen durchgeführt wird, da die benötigten Mengen, von vielleicht wenigen Ausnahmen abgesehen, in Dimensionen liegen, die sich für die klassische Werkstoffherstellung nicht lohnen. Die genannten Beispiele weisen jedoch in allen aufgeführten (und vermutlich auch noch neuen weiteren) Einsatzgebieten eine hohe innovative Wirkung verbunden mit einer hohen Wertschöpfung auf.

Damit lassen sich zwei Aussagen treffen: Der Typ der vorgestellten Funktionswerkstoffe mit hoher Wertschöpfung wird in der Zukunft für neue Technologien mit Schlüsselfunktion eine zunehmende Rolle spielen, und es werden sich für die Entwicklung, Herstellung und Zurverfügungstellung andere Mechanismen ausbilden müssen als die bisher existierenden.

## Literatur

- [ 1] H. Schmidt: Organically modified ceramics, materials with "history" or "future"? In: *Ultrastructure Processing of Advanced Materials*, Hrsg.: D. R. Uhlmann und D. R. Ulrich. John Wiley and Sons, New York, 1992, 409 - 423.
- [ 2] H. Schmidt: Chemical routes to nanostructured ceramics and composites. In: *Proceedings NATO ARV on Applications of Organometallic Chemistry in the Preparation and Processing of Advanced materials*, Cap d'Agde/Frankreich, September 1994 (in print).
- [ 3] R. Kasemann, H. Schmidt, S. Brück: *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vid.* **31-C** 1992, **7**, 75.
- [ 4] R. Kasemann and H. Schmidt: Oral presentation at "Fluorine in Coatings" Conference, Sept. 28 - 30, 1994, Salford, Great Britain.
- [ 5] H. Schmidt: Sol-gel-synthesis of ceramic-organic nano composites. In: *Submicron Multiphase Materials*, Hrsg.: R. H. Baney, L. R. Gilliom, S.-I. Hirano und H. Schmidt. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **274** (1992), 121 - 132.
- [ 6] H. Schmidt, R. Kasemann, T. Burkhart, G. Wagner, E. Arpac und E. Geiter: Inorganic-organic hybrid coatings for metal and glass surfaces. In: *ACS Symposium Series on Hybrid Organic-Inorganic Composites*, Hrsg.: J. E. Mark, P. A. Bianconi und C. Y-C Lee. American Chemical Society, Washington (in print).
- [ 7] H. Schmidt, B. Seiferling, G. Philipp und K. Deichmann: Development of organic-inorganic hard coatings by the sol-gel process. In: *Ultrastructure Processing of Advanced Ceramics*, Hrsg.: J. D. Mackenzie und D. R. Ulrich. John Wiley & Sons, New York (1988), 651 - 660.
- [ 8] H. Schmidt und B. Seiferling: Chemistry and applications of inorganic-organic polymers (Organically modified silicates). *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **73** (1986), 739 - 750.
- [ 9] R. Kasemann, H. Schmidt und E. Wintrich: New type of a sol-gel derived inorganic-organic nanocomposite. In: *Proceedings 1994 MRS Spring Meeting, Symposium „Better Ceramics Through Chemistry VI“*, April 1994, San Francisco/USA. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **346** (in print).
- [10] H. Schmidt und H. Krug: Sol-gel based inorganic-organic composite materials. In: *ACS Symposium Series 572 „Inorganic and Organometallic Polymers II: Advanced Materials and Intermediates“*. Hrsg.: P. Wisian-Neilson, H. R. Allcock, K. J. Wynne, American Chemical Society, Washington (1994), 183 - 194.
- [11] C. Becker, M. Zahnhausen, H. Krug und H. Schmidt: Characterization of the photopolymerization behaviour of inorganic-organic nanocomposite materials by photo-DSC. In: *Extended Abstracts of the Fourth SAAR-LOR-LUX Meeting on Functional*

- Advanced Materials. Hrsg.: G. Kugel, CLOES-SUPELEC, Technopole de Metz/Frankreich, November 1994.
- [12] M. Mennig, M. Schmitt, U. Becker, G. Jung und H. Schmidt: Gold colloids in sol-gel derived  $\text{SiO}_2$  coatings on glass and their linear and nonlinear optical properties. In: SPIE Vol. 2288 „Sol-Gel Optics III“, Hrsg.: J. D. Mackenzie. SPIE, Bellingham/ Washington (1994), 130 - 139.
- [13] Collection of Presentations of the Interdisciplinary Workshop „Organic-inorganic Polymer-Systems“, 12. - 15.03.1995 in Napa Valley, Napa/Kalifornien, USA.
- [14] Jahrestätigkeitsbericht 1993 des Instituts für Neue Materialien, Saarbrücken.