

## Gegenwärtiger Stand und Zukunftsaussichten von Beschichtungsverfahren



Prof. Dr. Ing. Bernhard Wielage. Jahrgang 1946. Studium des Faches Maschinenbau/Konstruktion an der Fachhochschule Paderborn. 1969-1973 Studium des Faches Maschinenbau/Werkstoffe/Kraftfahrzeugtechnik an der Universität Hannover. 1973-1976 Forschungsingenieur an der Arbeitsgruppe für angewandte Materialforschung, Bremen. 1976 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Dortmund.

1979 Promotion und Oberingenieur am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der Universität Dortmund. 1984 Habilitation und Erteilung der „venia legendi“ für das Fach „Werkstoffe/Hochtemperaturwerkstoffe“. 1986 Berufung zum Professor an der Universität Dortmund für das Lehr- und Forschungsgebiet „Werkstoffe/Hochtemperaturwerkstoffe“. Arbeitsgebiete: Das Fügen von metallischen und metall-keramischen Verbindungen mit Hilfe der Löttechnik, Probleme der Schweißtechnik, metallische und keramische Hochtemperaturwerkstoffe.



Prof. Dr. Ing. Hans-Dieter Stefens. Jahrgang 1931. 1951-1958 Studium des Maschinenbaus an der Technischen Universität Hannover. 1958-1963 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffkunde A der Universität Hannover. 1963 Promotion, 1967 Habilitation. Mitbegründer und Leiter der AFAM „Arbeitsgruppe für angewandte Materialforschung“, später umbenannt in IFAM „Fraunhofer-Institut für angewandte Materialforschung“.

1975 Ruf an die Universität Dortmund, Abteilung Maschinenbau, Inhaber des „Lehrstuhls für Physikalische Fertigungsverfahren“, später umbenannt in „Lehrstuhl für Werkstofftechnologie“. Persönliches Mitglied im DVS, AWS, DGM, VDI. Darüber hinaus Mitarbeit in verschiedenen Ausschüssen von DFG, DIN, DECHEMA, AIF, IIW. Sprecher des Sonderforschungsbereichs 316 „Herstellung, Be- und Verarbeitung sowie Prüfung von metallischen und metall/keramischen Verbundwerkstoffen“. Arbeitsgebiet: Werkstofftechnologie, Oberflächentechnik, thermisches Fügen, thermisches Spritzen, PVD-Technik, HIP-Technik, Korrosion.

Herkömmliche Werkstoffe können den gestiegenen Anforderungen, z.B. in bezug auf die Festigkeit oder den Widerstand gegen Verschleiß und Korrosion, nicht immer gerecht werden. Daher wird eine Aufteilung der Gesamtfunktion eines Bauteils in mehrere Funktionsträger angestrebt. Im Falle der Schichtverbundwerkstoffe wird die Oberflächenfunktion von einem hochwertigen Werkstoff übernommen, während der Grundwerkstoff aus einem preiswerten Werkstoff bestehen kann.

Basierend auf dem Beanspruchungsprofil für das Bauteil (z.B. tribologische oder korrosive Beanspruchung) und dem Anforderungsprofil für den Werkstoff (z.B. Temperaturbelastbarkeit, Härte) erfolgt die Schichtentwicklung mit dem Ziel, einen aufgabenangepaßten Werkstoff herzustellen. Um zu einem optimalen Schichtsystem zu gelangen, ist es notwendig, stets das gesamte Umfeld mit allen Randbedingungen zu berücksichtigen.

Im Rahmen dieses Beitrages werden der gegenwärtige Stand und die Zukunftsaussichten folgender Beschichtungsverfahren betrachtet (Abb. 1):

- Dünnschichttechnologien (PVD, CVD)
- Thermische Spritzverfahren
- Auftragschweißverfahren

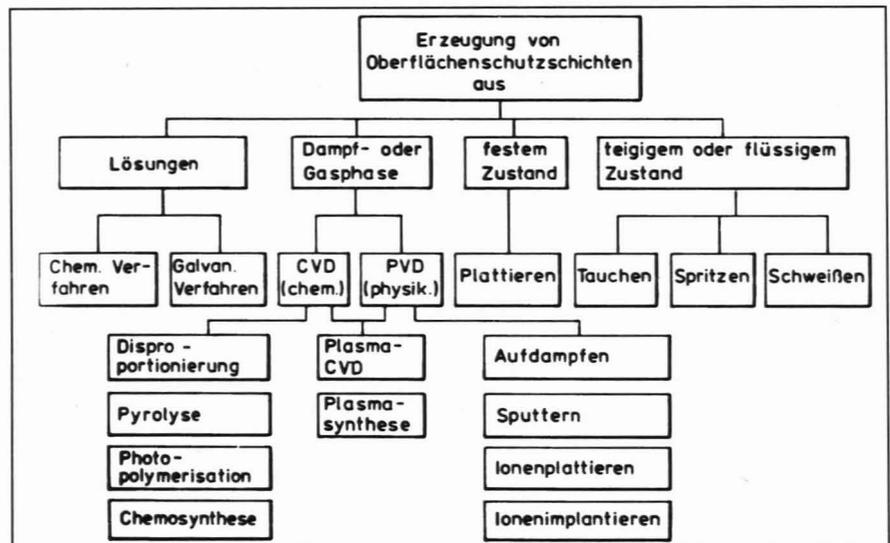


Abb. 1: Einteilung der Beschichtungsverfahren

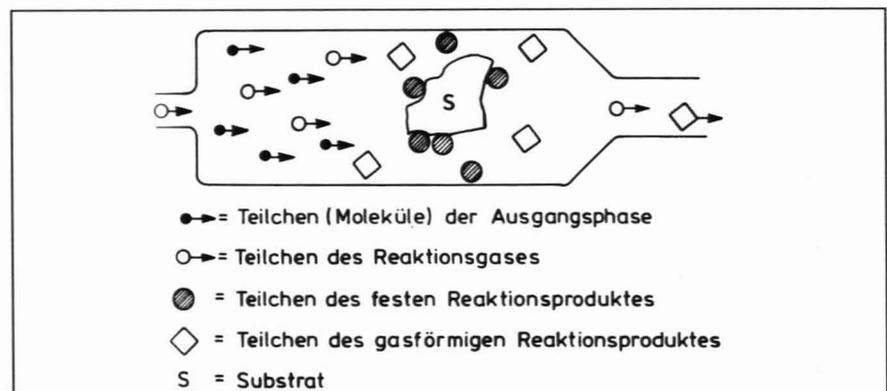


Abb. 2: Prinzip des CVD-Prozesses

## Dünnschichttechnologien

### Chemical Vapour Deposition

Der CVD-Prozeß ist ein Verfahren, bei dem chemische Reaktionen in der Gasphase im Grobvakuum bei i.a. hohen Temperaturen (Bauteiltemperaturen von bis zu 1000°C und mehr) unter Zufuhr thermischer Energie ablaufen und dabei Festkörperprodukte und flüchtige Nebenprodukte bilden. Die einzelnen Gaskomponenten werden zusammen mit einem inerten Trägergas (meist Argon) durch die Reaktorkammer geleitet (Abb. 2). Auf den Substraten (Bauteilen) findet die gewünschte Reaktion und die Anlage der Reaktionsprodukte (Schichten) statt.

Anwendungsgebiete sind u.a. der Verschleißschutz z.B. TiN/TiC für Hartmetallwendeschneidplatten sowie die Glasfaserherstellung. Durch CVD-Innenbeschichtung eines Rohres, das anschließend zur Glasfaser weiterverarbeitet wird, lassen sich maßgeschneiderte Brechungsindexprofile erzielen. Aufgrund der guten Streufähigkeit sind neben Innenbeschichtungen auch konturgetreue Beschichtungen komplex geformter Bauteile möglich. Die durch CVD aufgetragenen Schichten weisen eine hohe Dichte auf. Nachteilig sind die hohen Prozeßtemperaturen, die häufig Verzug oder Härteverluste zur Folge haben. Zudem müssen die Reaktionsprodukte (HCl, HF) kostenintensiv entsorgt werden.

Hauptziel neuerer Entwicklungsarbeiten ist das Absenken der Beschichtungstemperaturen. So werden zur Zeit Untersuchungen mit Plasma-CVD-Verfahren durchgeführt, die reduzierte Substrattemperaturen im Bereich von 300 - 500 °C erwarten lassen.

### Physical Vapour Deposition (PVD)

Bei den PVD-Verfahren wird der Beschichtungswerkstoff im Vakuum ( $10^2 - 10^6$  hPa) durch Verdampfen (Elektronenstrahl, widerstandsbeheizte Schiffchen, Vakuum-Lichtbogen) oder durch Ionenbeschuß (Sputtern) in

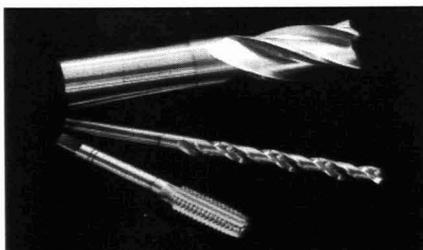


Abb. 3: TiN-beschichtete Werkzeuge



Abb. 4: Dekorative PVD-Beschichtungen

die dampfförmige Phase überführt. Setzt man die Substrate während des Beschichtens einem Ionenbeschuß aus, so spricht man vom Ionenplattieren. Das Ionenbombardement führt zu einer erhöhten Keimdichte auf der Substratoberfläche. Zudem werden die Schichten durch den Aufprall der Ionen verdichtet sowie lose anhaftende Atome abgesputtert. Dies führt zur Abschreibung sehr dichter und haftfester Schichten bei gleichzeitig geringer Temperaturbelastung des Substrates.

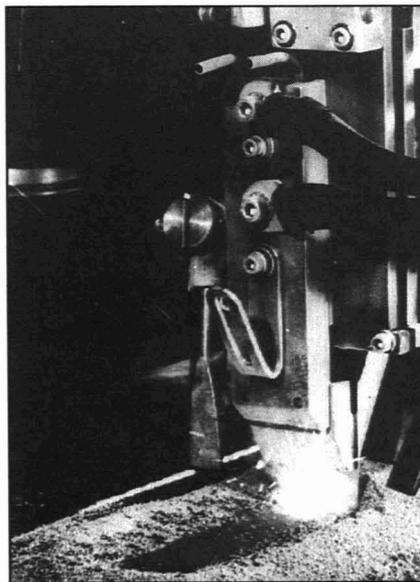


Abb. 5: Prinzip des Pulverflammspritzens

Die bei den PVD-Verfahren auftretenden Substrattemperaturen ( $\gg 500^\circ\text{C}$ ) erlauben neben der Beschichtung von Metallen auch die Beschichtung von Kunststoffen. Im Vergleich zum CVD-Verfahren können relativ hohe Abscheideraten von bis zu 30  $\mu\text{m}/\text{min}$  erzielt werden. Aufgrund der eingeschränkten Streufähigkeit sind Innenbeschichtungen nur sehr begrenzt möglich. Anwendungen der PVD-Verfahren liegen z.B. in der Beschichtung von Werkzeugen mit TiN, wodurch sich beträchtliche Standzeiterhöhungen erzielen lassen (Abb. 3). PVD-Schichten mit speziellen optischen und elektrischen Eigenschaften kommen in der Mikro- und Optoelektronik zur Anwendung. Ferner werden auch Laserspiegel und Magnetbänder beschichtet sowie dekorative Schichten aufgebracht (Abb. 4).

## Thermische Spritzen

### Flammspritzen

Beim Flammspritzen wird der Spritzzusatz in einer Brenngas-Sauerstoffflamme auf- bzw. angeschmolzen und mittels Zerstäubergas (allgemein Preßluft) auf die vorbereitete Werkstückoberfläche geschleudert (Abb. 5). Je nach Spritzverfahren kommen dabei draht-, stab-, schnur- oder pulverförmige Spritzzusätze zum Einsatz. Typische Einsatzgebiete des Drahtflammspritzens sind z.B. das Aufbringen von Zink- und Aluminiumschichten zum Korrosionsschutz von Stahlkonstruktionen sowie die Herstellung verschleißbeständiger Molybdän-schichten.

Bei den Pulverflammspritzverfahren geht der Trend zu Hochgeschwindigkeitsverfahren, die das Aufbringen sehr dichter und haftfester Schichten, z.B. aus WC-Co, erlauben. Eine andere Entwicklung für das Erzeugen derartiger Schichten stellt das Flammshockspritzen dar. Die sogenannte Detonationskanone besteht aus einem ca. 1,2 m langen Austrittsrohr, an dessen Ende sich die Brennkammer befindet. In dieser wird das zugeführte

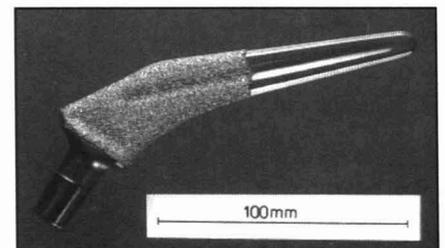


Abb. 6: Vakuum-lichtbogengespritzte Titanschicht auf einer Hüftendoprothese.



teile im Off-Shore-Bereich als auch an das Plasmaspritzen konventioneller Bauteile gedacht. Neben der guten Schichtqualität steht dabei auch die Humanisierung des Arbeitsplatzes durch reduzierte Staub-, Geräusch- und Strahlungsbelastung im Vordergrund.

Darüber hinaus beschäftigen sich zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit Prozeßkontroll- und Diagnosesystemen. Diese haben die Aufgabe, den Beschichtungsprozeß zu überwachen, gegebenenfalls die Parameter nachzuregulieren und bei Störungen die defekten Bauteile bzw. Baugruppen zu detektieren.

## Auftragschweißen

Das Auftragschweißen wird seit über 50 Jahren im Maschinen-, Apparate- und Kraftwerksbau erfolgreich eingesetzt. Je nach Funktion der Beschichtung unterscheidet man das Panzern (Auftragschweißen als Verschleißschutz) und das Plattieren (Auftragschweißen als Korrosionsschutz). Der Zusatzwerkstoff wird in Form von Draht, Band, Stab oder Pulver eingebracht. Dabei wird vorwiegend das Gasschmelz-, Lichtbogen- und Widerstandsschweißen eingesetzt (Abb. 8).

## Unterpulverauftragschweißen

Beim Unterpulverauftragschweißen (UP) mit Banelektrode geht die Entwicklung zu neuen Elektroden, speziell zu Füllbändern. Diese verknüpfen die Vorteile der Massivbanellektroden (hohe Abschmelzleistung) mit denen

der Fülldrähte (i.a. gute Anpassungsfähigkeit des Füllstoffs an das gestellte Anforderungsprofil, auch bei kleinen Chargen). Derartige Beschichtungen werden vorwiegend auf Rollgangsrollen oder auf Walzen im Stahlwerk eingesetzt.

## Elektroschlackeauftragschweißen

Das Elektroschlackeauftragschweißen (Abb. 9) bietet gegenüber dem UP-Schweißen Vorteile aufgrund niedrigerer Aufmischung und höherer Abschmelzleistung. Gegenstand intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist die Beherrschung des Schmelzbades. Ziel ist die Bereitstellung einer Technologie zum wendelförmigen Beschichten von Bauteilen mit einem Durchmesser »500 mm. Im Vergleich zum axialen Auftragen ergeben sich Vorteile, da kein Verzug der Bauteile auftritt.

Haupt Einsatzgebiete sind Rollgangsrollen in Stahlwerken, Grubenstempel im Bergbau, Antriebswellen im Schiffsbau sowie Rührwerkswellen im chemischen Apparatebau.

## Plasma-Heißdraht-Auftragschweißen

Eine noch niedrigere Aufmischung bei hohen Abschmelzleistungen kann beim Plasma-Heißdraht-Auftragschweißen erzielt werden. Hier wird der Grundwerkstoff durch das Plasma aufgeschmolzen, während der Zusatzwerkstoff mit Hilfe einer gesonderten Stromquelle abgeschmolzen wird (Heißdraht). Bei gleichen Einsatzge-

bieten steht das Verfahren in Konkurrenz zum UP- und RES-Schweißen.

## Plasma-Pulver-Auftragschweißen

Beim Plasma-Pulver-Auftragschweißen wird mit der Entwicklung kleinerer Brenner das Ziel verfolgt, künftig auch Komponenten geringer Größe, wie z.B. Ventile für Pkw-Motoren, beschichten zu können.

## Laser-/Elektronenstrahl-Auftragschweißen

Die in der Entwicklung befindlichen Laser- bzw. Elektronenstrahl-Auftragschweißverfahren bieten den Vorteil, daß auf der Oberfläche der reine Beschichtungswerkstoff vorliegt, d.h. es tritt keinerlei Beeinflussung durch den Grundwerkstoff bzw. das Erstarrungsgefüge der Beschichtung auf wie bei den übrigen Auftragschweißverfahren.

## Resümee

Zusammenfassend bleibt festzustellen, daß jedes Verfahren der Beschichtungstechnik seine spezifischen Vorteile aufweist und daher für bestimmte Anwendungsfälle prädestiniert ist. Nur durch eine sorgfältige Analyse des Beanspruchungsprofils des Bauteils und des Anforderungsprofils für den Werkstoff läßt sich ein optimales Schichtsystem konzipieren.

Die Entwicklung der Beschichtungsverfahren verfolgt einerseits das Ziel, den Beschichtungsprozess zu automatisieren und damit exakt reproduzierbar ablaufen zu lassen, um einen optimalen Prozeßverlauf sicherzustellen und damit ein qualitativ hochwertiges Schichtsystem zu erhalten. Andererseits wird die Palette der zu verarbeitenden Werkstoffe ständig erweitert, wodurch neue Anwendungsgebiete erschlossen werden können.

## Literatur

- [1] N.N.: Schweißtechnische Beschichtungsverfahren, DVS-Bericht 81, Mai 1983
- [2] KILLING, R.: Handbuch der Schweißverfahren, Teil 1, Lichtbogenschweißverfahren, DVS-Verlag, 1984
- [3] FISCHMEISTER, H.; JEHN, H.: Hardstoffschichten zur Verschleißminderung, DGM Informationsgesellschaft Verlag, Oberursel 1987
- [4] FREY, H.; KIENEL, G.: Dünnschichttechnologie, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1987
- [5] SIMON, H.; THOMA, M.: Angewandte Oberflächentechnik für metallische Werkstoffe, Carl Hanser-Verlag, 1985
- [6] STEFFENS, H.-D.; BUSSE, K.-H.; FISCHER, U.: Moderne Entwicklungen auf dem Gebiet des thermischen Spritzens, Jahrbuch Oberflächentechnik 1986, Bd. 42, S. 264 - 282.

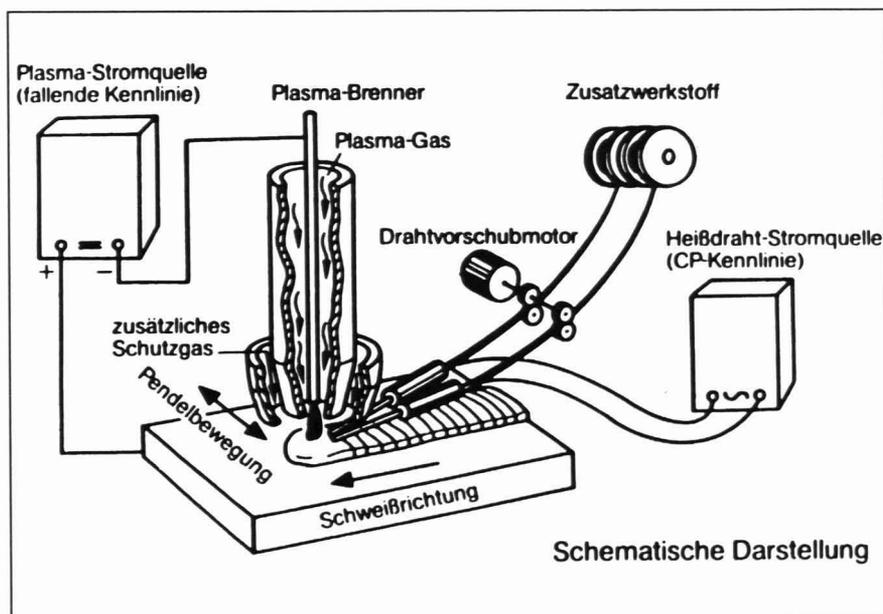


Abb. 9: Prinzip des Plasma-Heißdraht-Auftragschweißens



## Neuere Entwicklungen im Projekt-Management

Reinhard Haberfellner – Wolfgang Keplinger

(Das ist der zweite Teil des im Heft 2/90 begonnenen Artikels.)

### 2.2 Prototyping

Die Prototyping-Idee wurde im Bereich der Datenverarbeitung im Zusammenhang mit der Entwicklung von Anwendungssoftware aufgegriffen und stellt die Möglichkeit und die Zweckmäßigkeit des Phasenkonzepts - und damit unausgesprochen auch das Vorgehensprinzip „vom Groben zum Detail“ in Frage (vgl. [4], S. 292).

#### 2.2.1 Kritik an Phasenkonzepten

Als die beiden wichtigsten Argumente gegen die Anwendung von Phasenkonzepten, die jeweils gleich aus der Sicht des SE-Konzepts kommentiert werden sollen, gelten:

a) Phasenkonzepte behindern die Entwicklung, ein überlapptes Vorgehen wäre schneller.

Dieses Argument ist nicht stichhaltig, da Phasenkonzepte durchaus auch ein überlapptes Vorgehen ermöglichen. Mit der Programmierung (Systembau) braucht also nicht gewartet zu werden, bis alle Detailkonzepte fertig sind. Ein ausgearbeitetes Detailkonzept kann und soll durchaus in die nächste Phase gehen - auch wenn die anderen Detailkonzepte noch nicht fertig sind. Dies ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn vorher ein Gesamtkonzept (Masterplan) erarbeitet wurde, das eine Orientierungshilfe darstellt und es ermöglicht, die Nahtstellen zu definieren und die Prioritäten für die Erarbeitung von Detailkonzepten und die anschließende Realisierung zu setzen.

b) Bei Phasenkonzepten sieht der Anwender erst spät konkrete Ergebnisse und kann die Lösung oft erst nach der Einführung beurteilen.

Der Wartungs- bzw. nachträgliche Änderungsaufwand kann dadurch erheblich steigen. „Prototyping“ könnte diesen Effekt mildern.

#### 2.2.2 Grundidee des Prototyping

Prototyping zählt zur Kategorie der sog. „Evolutionären Systementwicklungen“. Als Charakteristiken evolutionärer Software-Lebenszyklen können gelten [5]:

– Aufhebung der Trennung von Spezifikation und Konstruktion bzw.

Implementierung aufgrund ihrer engen Verknüpfung.

– Schrittweise Entwicklung eines Gesamtsystems bei häufiger Rückkopplung zwischen Anwendungsbereich und DV-Entwicklung.

– Ablauffähige Systemmodelle als Grundlage für die Beurteilung der Zweckmäßigkeit (d.h. Bewertung nicht aufgrund abstrakter Beschreibungen, sondern aufgrund vorzeigbarer Prototypen).

Vereinfacht kann die Prototyping-Idee in zweifacher Hinsicht interpretiert werden:

– Prototyping I, das primär als Entwurfshilfe verstanden werden soll und

– Prototyping II als Hilfsmittel zur raschen Realisierung einer Lösung

#### Prototyping I (Entwurfshilfe)

Hier geht es in der Datenverarbeitung darum, dem Benutzer rasch und mit geringem Aufwand konkrete „Prototypen“ eines Programms vorführen zu können. Dies soll ihm ermöglichen, seine Bedürfnisse und Wünsche besser zu erkennen und zu artikulieren.

Ein einfacher Vergleich soll dies verdeutlichen: Man kann die Anforderungen an sein zukünftiges Wohnhaus z.B. dadurch spezifizieren, daß man ein Raum- und Funktionsprogramm in Form einer Liste erstellt (welche Räume, wie groß, bevorzugte Lage). Wenn nun ein Architekt auf dieser Basis das Haus entwirft und fertigstellt, wird man möglicherweise vom Ergebnis enttäuscht sein - auch wenn das Raum- und Funktionsprogramm voll erfüllt ist. Die Vorgehensweise des „Prototyping“ würde hier darin bestehen, daß der Architekt zunächst ein paar Grundriß- bzw. Ansichtsskizzen entwickelt, die dem Auftraggeber einen Einblick in die konkrete Art der Realisierung bieten und daß er für eine oder eventuell sogar mehrere bevorzugte Varianten zunächst ein maßstäbliches Modell baut. Weder die Skizzen noch das Modell sind dabei das spätere Haus, sie sind lediglich Hilfskonstrukte, welche das spätere Ergebnis besser vorstellbar und damit auch besser diskutierbar machen.

Auf EDV- und insbesondere auf Software-Entwicklungsprojekte übertragen, würde dies bedeuten, daß mit Hilfe mächtiger Software-Tools (z.B. Maskengeneratoren, Programmgeneratoren, Very High Level Languages, Editoren etc.) und mit relativ geringem Aufwand eine für den Anwender und Benutzer greifbare Vorstellung und Diskussionsgrundlage der angestrebten Lösung geschaffen wird - z.B. indem man dem Anwender konkrete Bildschirmmasken vorführen kann, aus denen Inhalt und Aufbau ersichtlich sind. Dies kann zu einer Bestätigung, aber auch zu einer Änderung, Verbesserung bzw. zu zusätzlichen Wünschen führen. Im Anschluß daran wird die Lösung EDV-technisch ausgefeilt, bevor sie dem Benutzer übergeben wird.

Prinzipiell ist diese Vorgehensweise natürlich zu begrüßen. Der Benutzer gewinnt schneller Beurteilungskompetenz, er kann früher substantiell gehaltvolle Aussagen machen. EDV-Spezialist und Anwender sind einem intensiven Lernprozeß bereits im Entwicklungsstadium ausgesetzt, was auch die spätere Implementierung erleichtert und den späteren Wartungsaufwand reduzieren kann.

Ohne Zweifel vorteilhaft ist dieses Vorgehen bei komplizierten Problemen, deren Struktur erst im Verlauf des Projektes erkennbar wird.

Als eventuelle Stolpersteine dieser Entwicklungsstrategie gelten Argumente, wie: zusätzlicher Entwicklungsaufwand durch u.U. aufwendige Diskussionen, welche außerdem meist nicht zu einer Reduktion, sondern zu einer Erweiterung der Wünsche führen, wovon wiederum Auswirkungen auf die Termin- und Kostensituation befürchtet werden müssen.

#### Prototyping II (rasche Lösung)

Die Grundidee besteht darin, rasch zu einer Lösung zu kommen, die nicht ausgefeilt bzw. perfekt zu sein braucht und zu Beginn nur die wesentlichsten Funktionen erfüllt. Im Stadium der Benutzung kann die Lösung dann erweitert bzw. verbessert und angepaßt werden.