

## Denkleistungen beim Konstruieren

Prof. Dr. rer. nat. habil. **W. Hacker**, Dr. **P. Sachse**,  
Dr. **R. von der Weth**, Dresden

### Zusammenfassung

Konstruieren wird als Problemlöseprozeß beschrieben. Konstrukteure unterschiedlicher Produktivität unterscheiden sich kaum hinsichtlich formaler Intelligenzmerkmale, aber in Merkmalen ihres denkenden Vorgehens, insbesondere der Problem- und Zielanalyse, der Art des Suchens nach Prinziplösungen und der Art des Entwickelns von Lösungen. Dabei kommt eine besondere Rolle den Wechselbeziehungen zwischen Denken und Skizzieren sowie weiteren Formen der Prototypenentwicklung zu. Aus der Analyse von Vorgehensbesonderheiten, insbesondere bei berufserfahrenen Konstrukteuren werden Konsequenzen für Unterstützungsmöglichkeiten des Entwurfsprozesses und für die Ausbildung abgeleitet.

### 1 Einordnung: Konstruieren als Denktätigkeit

Konstruieren gehört wie andere Entwurfstätigkeiten, beispielsweise wie das Entwerfen eines technischen Verfahrens, einer Herstellungstechnologie oder von Software zu den Arbeitstätigkeiten mit dem größten Einfluß auf zwei Kernfragen der Wirtschaftsentwicklung, nämlich auf die markterschließenden Produktinnovationen und auf die wettbewerbsentscheidenden Herstellungskosten von Produkten. Damit ist das Konstruieren ein Schlüssel zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit.

Was ist Konstruieren?

Konstruieren ist nach Steuer /1/, S. 14 „schöpferisches und lückenloses Vorausdenken eines technischen Gebildes, das den Anforderungen des historisch bedingten Standes der technischen Entwicklung entspricht, und Schaffen aller zweckmäßigen Unterlagen für seine stoffliche Verwirklichung. Konstruieren besteht aus Entwerfen und Gestalten.“ Diese Definition konzentriert sich auf zwei Teilklassen von Konstruktionsaufgaben, nämlich auf die Neukonstruktion und die Anpassungskonstruktion, weniger jedoch

auf die Variantenkonstruktion als Rekombinieren von baukastenartig vorgegebenen Modulen. Wir folgen dieser Schwerpunktsetzung.

Im Sinne der Definition ist Konstruieren Denktätigkeit und zwar innerhalb der vielfältigen Arten von Denktätigkeiten sogar die anspruchvollste. Konstruieren ist nicht Bedenken des Gegebenen, sondern Vorausdenken, also denkendes Entwerfen des noch nicht Gegebenen, eines noch nicht existierenden künftigen Gebildes. Mehr noch, dieses Vorausdenken muß mindestens teilweise schöpferische Qualität haben, denn das zu entwerfende Gebilde soll nützliche neue Eigenschaften aufweisen.

Dieses Konstruieren als anspruchsvollste Denktätigkeit von der Art schöpferisch entwerfenden Problemlösens hat Phasen. Seine Hauptphasen sind das Erfassen und Klären des Problems, das Konzipieren, das Entwerfen und das Ausarbeiten /2/. Dabei ist entscheidend, daß gerade die am wenigsten sichtbaren und am wenigsten formalisierbaren frühen Phasen der Problemerkfassung und -klärung sowie des Konzipierens eines Lösungsprinzips den ausschlaggebenden Einfluß auf die Innovativität der Lösung und auf die Kosten haben. Ehrlenspiel /3/ hat das eindrucksvoll verdeutlicht für die Möglichkeit der Kostenbeeinflussung: Sie ist unvergleichlich größer in der frühesten Phase der Problemerkfassung und -klärung, aber - und das ist ein dialektischer Widerspruch - hier auch am wenigsten sicher beurteilbar. Übertrieben formuliert: Wirklich sichere Kostenbeurteilung wird erst dann möglich, wenn es zu spät dafür ist.

Damit ist Konstruieren in seinen ergebnisbestimmenden frühen Phasen entwerfendes Problemlösen (design problem-solving; /4/) mit hoher Ergebnisunsicherheit. Diese Unsicherheit ist einerseits eine Chance und Herausforderung, mit der eigenen Denktätigkeit zum Sicherem vorzudringen. Aber Unsicherheit bedeutet auch Risiko, die Möglichkeit zu Umwegen, Fehlwegen oder sogar des Scheiterns. Risiko kann nicht nur Herausfordern, sondern auch kleinmütig und ängstlich machen und dadurch die neue schöpferische Lösung verfehlen lassen. Konstruieren ist also schöpferisch-entwerfendes Problemlösen mit einem unaufhebbaren Kernwiderspruch zwischen anspornender Chance und beeinträchtigendem Risiko .

An diesem Punkt entsteht die Frage nach Unterstützungsmöglichkeiten des Konstruierens zum Bewältigen dieses Widerspruchs.

Jeder Arbeitsprozeß benötigt eine Technologie, eine Bearbeitungslehre in Form von heuristischen Rahmenprogrammen, die angeben, welche Spielräume auf welche Weise effizient auszuschöpfen und welche Fehlwege dabei unsicherheitsreduzierend auf welche Weise vermeidbar sind. Das gilt für das Bearbeiten materieller wie geistiger Güter. Was also ist eine Technologie effizienten Konstruierens als Denktätigkeit, genauer als schöpferisch-entwerfendes Problemlösen?

Die Frage könnte zunächst befremdend erscheinen. Es gibt jedoch keine stichhaltigen Gründe dafür, daß es keine Denktechnologie geben sollte, die sogar Lehrgegenstand, u. a. beim Erlernen des Konstruierens sein kann, so, wie andere Technologien gleichfalls selbstverständliche Lehrgegenstände sind. Auch effiziente Denkstrategien sind lehrbar. Wichtige Module dafür zeichnen sich ab, erste Systematisierungsansätze liegen vor und werden erfolgreich genutzt /5/. Beispiele beim Konstruieren sind der als heuristische Hilfe einsetzbare Problemlösezyklus im Sinne der VDI 2221 /6/ und - diesen untersetzend - die Konstruktionsmethodiken verschiedener Schulen /7/, /8/, /2/, /9/, /3/.

Was bietet die Denkpsychologie für den weiteren Ausbau einer Konstruktionstechnologie an?

Zunächst ist entscheidend, daß leistungsstarke und weniger leistungsstarke Konstrukteure sich nicht unterscheiden in ihrer Intelligenz im Sinne herkömmlicher Intelligenztests /9/. Auch das räumliche Vorstellen trägt nur begrenzt bei zum Erklären guter im Unterschied zu weniger guten konstruktiven Lösungen. Sogar die Berufserfahrung erklärt allein noch nicht die Lösungsgüte. Was aber dann?

Was den leistungsstarken vom weniger leistungsstarken Konstrukteur nach heutigem Wissen unterscheidet, sind Vorgehensweisen, sogenannte Strategien, seiner Denktätigkeit. Hierfür ist zum Verständnis zu beachten, daß Konstruieren eine Tätigkeit, nämlich Denktätigkeit ist. Wir sprechen von Denktätigkeit, weil Denken ein Handeln im Kopfe ist. Dieses Handeln im Kopfe darf nicht mißverstanden werden als ein Nutzen logischer Gesetze oder anderer Regelsysteme. Das Denkhandeln kann zwar Logik nutzen, öfter folgt es aber nicht-logischen Prinzipien. Das Denkhandeln kann desweiteren rationale und abstrakte Begriffssysteme nutzen, es kann aber ebenso gut vorstellungsmäßig-bildhaft ablaufen. Es kann wissenschaftliche Begriffe nutzen, häufiger aber finden die unscharfen Alltagsbegriffe Verwendung. Es kann bewußt und damit aussagbar und kontrollierbar ablaufen, öfter aber verläuft es unbewußt, implizit und

wird erst im Ergebnis als sogenannter Einfall bewußt. Denken als Handeln im Kopf verbindet schließlich ein Neuausdenken von Lösungen mit dem Einsetzen von begrifflich-faßbaren oder implizitem, unbewußtem (schweigendem) Wissen um fertige Lösungen.

Für das Konstruieren ergibt diese Einordnung als geistiges Handeln mindestens zwei nützliche Einsichten:

- (1) Effizientes Handeln benötigt verallgemeinerte und damit auf unterschiedliche Aufgaben übertragbare Vorgehensweisen, die Handlungs-, enger die Problemlöse- und noch spezieller die Entwurfsstrategien.
- (2) Handeln vereinigt stets „innere“, geistige und „äußere“, bewegungsmäßige Anteile. Verkümmierungen auf einer Seite schaden dem Ganzen. Eine theoretische Verallgemeinerung dieses Sachverhalts bietet das Interiorisations-/Exteriorisationskonzept geistigen Handelns von Galperin /10/.

Was also kennzeichnet die Vorgehensweisen, die zu guten konstruktiven Lösungen führen? Und weiter: Weshalb werden sie nicht stets und von allen Konstrukteuren eingesetzt? Wie kann man ihren Einsatz unterstützen?

## 2 Erfolgreiche Vorgehensweisen

Erfolgreiche Vorgehensweisen kennzeichnen Merkmale sowohl in der Art der Zielsetzung und Zielverfolgung (der Antriebsregulation des Handelns) als auch der Art der zur Zielverwirklichung eingesetzten geistigen Mittel (der Ausführungsregulation des Handelns) /11/; /12/; /13/; /14/; /15/; /9/; /16/; /17/; /18/.

Antriebsregulatorisch kennzeichnet ein erfolgreiches Vorgehen die zielgerichtete Steuerung und Planung. Dabei werden die Ziele ausnehmend gründlich geklärt, zu einem Plan geordnet, aber dennoch flexibel genutzt. Ausführungsregulatorisch ist das erfolgreiche Vorgehen eine Integration von Wissensnutzung und Neuausdenken, bei der zwar eingehend verschiedene Prinziplösungen entwickelt und verglichen werden, aber dennoch der Lösungssuchraum rationell eingegrenzt wird.

Betrachten wir drei wichtige Merkmale näher:

### a) Art des Erfassens und Analysierens des Problems

Der „erste Einfall“ spielt beim Vorgehen sowohl von Anfängern wie von Könnern nur eine untergeordnete Rolle. Beide Gruppen durchmustern zunächst ihr Erfahrungswissen auf Ansatzmöglichkeiten von Analogien /15/. Was das erfolgreiche Vorgehen von Könnern von dem weniger erfolgreichen von Anfängern unterscheidet, ist eine umfangreichere Problem- einschließlich Zielanalyse und dabei das gründlichere Herausarbeiten der für die Funktion des Gebildes wesentlichen Merkmale.

Im einzelnen sind hierbei Merkmale erfolgreichen Vorgehens /12/, /14/, /15/

- die eingehendere Problemanalyse mit
- der Konzentration auf Elemente, die für die Funktionsfindung wichtig sind - nicht also auf auffällige Elemente;
- das vollständige Bestimmen der Hauptfunktionen;
- ein gewichtiges Zusammenfassen der Zielmerkmale und
- ihr schriftliches bzw. zeichnerisches Fixieren sowie
- ein auf das Gesamtziel bezogenes, aber flexibles Umgehen mit den herausgearbeiteten Zielmerkmalen.

Zwischen der Anzahl der in die Analyse einbezogenen Merkmale und der Lösungsgüte wurde ein gesicherter Zusammenhang nachgewiesen /15/.

### b) Art der Suche von Prinziplösungen

Der Kern des Entwerfens besteht im Herausarbeiten mehrerer Varianten eines Lösungsprinzips. Es geht nämlich nicht kurzer Hand um Problemlösen als Lösen des fertig gegebenen Problems, sondern zunächst um das Problemfinden als das Entwerfen von Problemvarianten, deren verheißungsvollste herauszufinden und dann zu lösen ist. Das ist kein deduktives Denken, welches durch Regeln geleitet wird, sondern induktives, schöpferisches Denken, für das es keine erlernbare, systematisch anwendbare Methode gibt, die zum Ziel führt.

Im einzelnen sind hierbei Merkmale erfolgreichen Vorgehens /19/, /12/, /20/, /21/, /15/, /9/:

- Ein Vorgehen, das neue Lösungen erzeugt im Gegensatz lediglich zum Korrigieren von schon gegebenen Lösungen (generierende versus korrigierende Lösungserzeugung, /3/) dabei
- das Konzipieren mehrerer verschiedener Lösungsprinzipien vor dem weiteren Entwerfen eines ausgewählten Prinzips.

Bei aller Bedeutung dieses divergenten schöpferischen Suchens vielfältiger Prinzipillösungen bleibt das erfolgreiche Vorgehen jedoch nicht dabei stehen. Es schließt an

- das konvergierende Eingrenzen der Lösungsvielfalt, des sogenannten Suchraums, auf möglichst wenige Varianten, die weiter durch Entwurfsschritte auszuarbeiten sind.
- Beim erfolgreichen Vorgehen erfolgt dieses Entwerfen methodisch geordnet. Es stellt sachlogisch gereichte Teilziele auf, denen es folgt. Dieses Aufstellen geordneter Teilziele führt zu raschen und anforderungsnahen Lösungen /22/. Trotz dieser Ordnung wird aber keineswegs gleichsam „stur geradeaus“ gearbeitet. Vorgriffe auf spätere Schritte und korrigierende Rücksprünge auf schon bearbeitete treten auf. Jedoch beschränken sie sich beim erfolgreichen Vorgehen deutlich stärker auf eine geringe Anzahl als beim weniger erfolgreichen.

### c) Rückkoppelndes Beurteilen der Lösungsschritte

Beim erfolgreichen Vorgehen werden

- häufiger die verfolgten Lösungsvarianten auf ihre Güte beurteilt. Desweiteren erfolgt dieses Beurteilen
- nicht nur auf einem Abstraktionsniveau, sondern es werden sowohl die Angemessenheit des abstrakten Prinzips als auch der konkreten Detaillösungen wiederholt beurteilt /23/.

Insgesamt kennzeichnet das erfolgreiche Entwerfen also ein zielgerichtetes und streckenweise auch planendes (methodisches), aber dennoch flexibles Vorgehen. Experimentelle Befunde bekräftigen, daß eine Kombination von hartnäckigem Zielverfolgen und Planen bei flexibler Zielanpassung an neue Erfordernisse und Einsichten zu besseren Leistungen zu führen vermag /24/, /25/. Damit sind Rahmenforderungen an eine hilfreiche Konstruktionsmethodik skizziert: Sie muß führen, ohne zu gängeln, sie sollte also eine Heuristik, aber kein Algorithmus sein.

Zerlegen wir nun das Vorgehen in seine Grundlagen: Problemlösen kann unter zwei Aspekten näher beschrieben werden, nämlich dem lösungsbegünstigendem Aufbau von Problemrepräsentationen und dem effizienten Operieren (hier Entwerfen) an diesen Repräsentationen. Was unterscheidet dabei erfolgreiche von weniger erfolgreichen Bearbeitern?

### 3 Merkmale lösungsbegünstigender Problemrepräsentationen (mentaler Modelle)

Zum ersten erfordert Problemlösen den Aufbau zutreffender und hinreichend vollständiger Problemrepräsentationen als Material für das Probehandeln im Kopf. Diese Repräsentationen bilden den Suchraum für Lösungen. Keine Lösung kann besser sein als der Suchraum das erlaubt. Leistungsentscheidend ist nämlich, ob der Aufbau und das Festhalten eines Suchraums, also der vorstellungsmäßigen oder gedanklichen Repräsentation des Problems und aller Lösungsmöglichkeiten im Kopfe überhaupt gelingt, ob der Suchraum zutreffend und ob er lösungsgünstig ist.

Idealerweise sollte ein Konstrukteur alle Möglichkeiten einer Lösung aus der erschöpfend kombinierten Anzahl ihrer Merkmale im Kopfe erzeugen, um die optimale Merkmalskombination aus der Liste aller möglichen auszuwählen. Eben das ist aber wegen der Begrenztheit unserer Bewußtheitskapazität unmöglich. Der Entwerfende muß sich von vornherein beschränken auf das Bedenken eines Merkmalsausschnitts, und zwar nicht, weil ihm keine weiteren Varianten einfielen, sondern weil er sie ohnehin im Kopfe nicht alle erhalten kann. Diese ausgewählte Teilmenge sollte aber die günstigsten Lösungen umfassen. Er soll also die günstigste Teilmenge im Kopf haben, die er aber gerade nicht kennen kann, weil er dafür aus der Gesamtmenge auszuwählen hätte, über die er nicht verfügt.

Man erkennt: Das Nadelöhr kreativen Entwerfens ist nicht in erster Linie der Einfallsreichtum, sondern die Enge des Bewußtseins, das sogenannte Arbeitsgedächtnis. Je geringer seine Kapazität ist, desto mehr überflüssige Schritte, desto mehr Erwägungen ineffizienter Möglichkeiten und desto größer ist der Zeitbedarf beim Entwerfen (Sachse, 1996, unveröff.; die Arbeitsgedächtniskapazität wurde mittels der Rechenspanne in Analogie zur Lesespanne ermittelt. Vergleiche dazu /26/).

Eine weitere Unterstützungsmöglichkeit des Entwerfens bieten nach diesen Befunden Arbeitsgedächtnisentlastungen. Zu den geschilderten Merkmalen erfolgreichen Vorgehens gehört eine derartige Entlastungsmöglichkeit, nämlich das zeichnerische und schriftliche Fixieren der Erwägungen. Die beschriftete Skizze als externer Speicher ist also ein Ausweg aus dem geschilderten Dilemma.

#### 4 Lösungsbegünstigende Entwurfsprozeduren: Entwerfen als Wechselwirkung von „innerem“ und „äußerem“ Handeln

Gesetzt, der Konstrukteur habe einen lösungsdienlichen Suchraum im Kopfe, so muß er an ihm operieren. Er muß Merkmale von Varianten vergleichen, anders kombinieren, verändern, unberücksichtigte neu einführen und irrelevante verwerfen. Das läuft beim Menschen anders ab als bei Computern. Menschen entwerfen keineswegs stets vom Detail zur Gesamtlösung, sondern oftmals auch von einem unbestimmten Eindruck her zum zunehmend bestimmteren Detail. In diesem Falle beginnt der Konstrukteur „also nicht mit einzelnen Lösungselementen, sondern einer Lösungsganzheit ... Diese Ganzheit enthält im Keim bereits alle weiteren Einzelheiten, die nun im Vorgang des Entwerfens entfaltet werden. Das Entwerfen ist also ... ein fortschreitendes Klären der zu erfüllenden Teilfunktionen und ein Unterteilen sowie Präzisieren ..., ein ganzheitlich-analytisches Verfahren, wobei der Entwerfer in zwei Ebenen schöpferisch arbeitet. Einmal bedient er sich ... „vorbewußt“... abstrakter Gesamtstrukturen, und zum zweiten skizziert er „bewußt“ konkrete ... Elementkombinationen“ /27/, S. 4.

Dieser Entwurfsprozeß benötigt eine bewegungsmäßige und sinnliche (sensumotorische) Stütze, denn Menschen denken mit der Hand. Analog zu von Kleist's /28/ Aussage über die allmähliche Verfertigung des Gedankens beim Reden erfolgt häufig ein allmähliches Verfertigen des Lösungsgedanken beim Skizzieren. Das Gesamtprinzip oder Lösungsideen werden vorerst als abstrahierende Prinzipskizze zu Papier gebracht und im Rückkopplungsvorgang von Denken, Skizzieren und kritischem Skizzenbetrachten konkretisierend entwickelt. „Die Entwurfsskizze widerspiegelt nicht nur das Ergebnis des Denkens des Konstrukteurs, sondern dient ihm in erster Linie als Arbeitsmittel“ /15/, S. 240.

In einer Untersuchung zur Arbeitsweise von Konstrukteuren befragte Görner /29/ 74 Probanden, ob sie bei der Erarbeitung des Lösungsentwurfs einer konstruktiven Aufgabe „vorwiegend gedanklich“ oder „vorwiegend skizzierend“ vorgehen. Es antworteten

- 69,3 % mit „vorwiegend skizzierend“
- 3,8 % mit „vorwiegend gedanklich“
- 26,9 % der Probanden gaben ein ausgeglichenes Verhältnis von gedanklichem und skizzierendem Vorgehen an.

Bei der Frage, warum skizziert werde, waren drei Kategorien von Antworten vorgegeben und Mehrfachaussagen zulässig. Dabei ergab sich, daß

- 61,5 % die Skizze zur Verdeutlichung der Gedanken benötigen,
- 44,3 % sie als Merkhilfe ansehen (Arbeitsgedächtnisentlastung) und
- 30,8 % sie als Verständigungsmittel benutzen, wenn sie mit Kollegen über ihre Lösungsvorstellungen diskutieren.

Im Interesse der umfassenderen Bedingungskontrolle wurden in einer experimentellen Studie drei Konstruktionsaufgaben unterschiedlicher Komplexität von zwei vergleichbaren Probandengruppen am Computer bearbeitet und zwar bei einer Gruppe ohne, bei der anderen mit vorherigem Skizzieren. Bei der komplexesten Aufgabe - und nur bei dieser - führt die Skizze zu geringerer Schrittzahl, geringerer Anzahl verworfener Erwägungen, niedrigerer Einschätzung der Schwierigkeit und - trotz des Zeitmehraufwands für das Skizzieren - zu niedrigerer Gesamtbearbeitungszeit als ohne Skizze (Sachse, 1996, unveröff.).

Man erkennt: Das Skizzieren hat keineswegs nur die hilfreiche Rolle des Fixierens eines Denkergebnisses als Ausweg aus der erwähnten Überforderung des Arbeitsgedächtnisses. Vielmehr stellt es in erster Linie ein Denkmittel dar, mit dessen Hilfe der Konstrukteur sich seine Lösung erarbeitet. Durch den fortlaufenden Wechsel zwischen Denken und Zeichnen wird die Lösung konkretisiert und präzisiert sowie kontrolliert und korrigiert. Die Lösungserzeugung ist „Denken mit der Hand“ und „Zeichnen mit dem Kopf“.

Neben dem Skizzieren unterstützen noch weitergehende materialisierende Formen geistigen Handelns /10/ das Konstruieren. Die Formen dieser materiellen Modelle oder Prototypen sind vielfältig auch in der Epoche von CAD. So mußte beispielsweise der Konstrukteur beim Entwurf eines Roboters in Leichtbauweise „eine ganz neue Gelenk Konstruktion ...“ finden. „Beim Spiel mit Kugelschreiber und Gummi kam der rettende Einfall“ (Frankfurter Allgemeine Zeitung, 2. März 1996, S. 13). Neben Zeichnungen werden verbreitet auch Stifte, Stäbe, Papp-, Draht- oder Plasteline-Modelle sowie Baukästen neben den anspruchsvolleren Berechnungs-, CAD- oder FEM-Modellen als Materialisierungen geistigen Handelns genutzt.

Befragungen von Konstrukteuren ergaben folgende Hauptfunktionen solcher Prototypen-Nutzung /30/: Die Prototypen dienen als Analysehilfe, als Lösungshilfe insbesondere

Weiter folgt, daß eine Konstruktionsmethodik dann optimal unterstützt, wenn sie zwar Führung anbietet, aber die opportunistischen Anfangsschritte dabei nicht beengt.

## 6 Unterstützung des Entwerfens durch Arbeitsmittel: Werkzeuge oder Maschinen (CAD)?

Das Skizzieren, Schreiben oder Rechnen als materialisierendes Denken erfolgen mit Arbeitsmitteln. Hierbei sind zwei verschiedene Typen von Arbeitsmitteln auseinanderzuhalten: Werkzeuge, z. B. Stifte, und Maschinen, z. B. Computer. Worin bestehen die grundsätzlichen Unterschiede?

- Werkzeuge verlängern und verstärken menschliche Funktionen, Maschinen ersetzen sie.
- Werkzeuge okkupieren kaum Teile der geistigen Kapazität des Menschen lediglich für ihren Gebrauch, Maschinen hingegen binden Teile der geistigen Kapazität des Menschen nur für ihre Benutzung die der Bearbeitung der Aufgabe damit entzogen wird. Je nutzerunfreundlicher Hard- und Software ist, desto größer ist das Okkupieren geistiger Kapazität des Bearbeiters lediglich für das Bedienen der Maschine, des Computers.
- Werkzeuge verlangen keine Übersetzung von Information. Ein Strich ist so lang, wie ich ihn mit dem Stift ziehe. Bei Maschinenbenutzung ist hingegen eine Kodierung erforderlich: Die Strichlänge hängt von der zu berücksichtigenden Maus-Übersetzung ab; ein Wort ist umzusetzen in aufzusuchende Buchstabentasten. Jede Übersetzung bindet jedoch geistige Kapazität, die wiederum der eigentlichen Aufgabe entzogen wird.

Welche Arbeitsmittel sollten also beim materialisierenden Denken mit der Hand genutzt werden, unterstützende, selbstlose Werkzeuge oder den Menschen ersetzende, aber Zuwendung erfordernde Computer? Eine Antwort für das Konstruieren schlägt Viebahn vor /32/, S. 53: „Weil ein Zeichenprogramm mit unvollständig beschriebenen Objekten wenig anfangen kann, müssen ihre Abmessungen und geometrischen Eigenschaften im Prinzip ausdrücklich eingegeben werden. Das kostet Zeit und der Mensch macht dabei leicht Fehler, auch wenn er sich konzentriert. Viele Erfindungen versu-

chen daher, die Dateneingabe bequem und sicher zu machen: ... Digitalisiertabletts, Mäuse, Lichtgriffe, Touchscreens, Trackballs ... Doch nach 10 Jahren gilt immer noch: Um ein Bild oder einen Gedanken im Computer zu speichern, muß der Konstrukteur einen nicht geringen Teil seiner geistigen Kapazität dem Gerät widmen. So war das eigentlich nicht gedacht. Diejenigen, die auf ihre Kreativität angewiesen sind, wissen, daß sie während ihrer schöpferischen Momente nicht durch Kleinigkeiten abgelenkt werden wollen. Vernünftigerweise setzt sich ein Konstrukteur erst dann an den Computer, wenn sich seine Vorstellung von dem darzustellenden Objekt gefestigt hat. Dahin gelangt er mit Handskizzen, denn er weiß, daß ihm die Gedanken beim Skizzieren fast wie von selbst aus der Hand fließen - und zwar bequemer als beim Zeichnen mit der Maus.“

Die Alternative Werkzeug oder Computer hilft offenbar nicht weiter. Die gesuchte Unterstützungsempfehlung dürfte phasenabhängig sein: Beim Problemklären und Konzipieren helfen Werkzeuge besser, beim ausführenden Entwerfen hingegen Computer.

## 6 Zusammenfassende Schlußfolgerungen

Im Konstruktionsprozeß sind die frühen Phasen der Problemfindung und Problemanalyse und des Auswählens und Konzipierens eines Lösungsprinzips ergebnis- und kostenbestimmend.

Denkpsychologische Analysen legen nahe, daß das auch für diese schlecht formalisierbaren frühen Phasen des Konstruierens als schöpferisch-entwerfendes Problemlösen lehrbare Vorgehensweisen empfohlen werden können. Die Vorgehensweisen leistungsstarker Konstrukteure in diesen Phasen kennzeichnet ein zielgerichtet-planendes (methodisches), aber gleichzeitig flexibles Arbeiten mit einer breiten und eingehenden Problemanalyse, einem neue Prinziplösungen erzeugenden, aber den Suchraum überlegt eingrenzenden Entwerfen und einem ausdrücklichen Beurteilen von Lösungsschritten auf verschiedenen Abstraktionsebenen.

Das Nadelöhr des kreativen Entwerfens ist weniger der Einfallsreichtum, sondern die Enge des Bewußtseins, das Arbeitsgedächtnis. Erfolgreiches Vorgehen umgeht seine Grenzen unter anderem durch ein schriftlich-zeichnerisches Fixieren.

Skizzieren und Modellieren speziell in den frühen Phasen des Konstruktionsprozesses entlastet jedoch nicht allein die begrenzte Bewußtheitskapazität, sondern vor allem

fördern diese materialisierenden Formen des Denkhandelns das Erzeugen und Konzipieren und Korrigieren von Lösungen. Daher sollten sie gerade in den frühen Phasen des Entwerfens - nicht erst als Prototyping fertiger Entwurfslösungen - gezielt genutzt und ihre Nutzung unterstützt werden.

Entwerfen nutzt Vorwissen und reorganisiert es durch Denkschritte zu neuen Lösungen. Damit ist bis zur endgültigen Problemzerlegung in Teilaufgaben ein unsystematisch erscheinendes, opportunistisches Vorgehen unvermeidlich und nützlich. Eine hilfreiche Konstruktionsmethodik führt als Heuristik gerade auch diese Anfangsetappen ohne sie dabei zu beengen. Besondere Unterstützung verdient der - auch implizite - Erfahrungserwerb in den kosten- und ergebnisbestimmenden Phasen der Problemanalyse und des Konzipierens von Prinziplösungen.

## Literatur

- /1/ Steuer, K.: Theorie des Konstruierens in der Ingenieurausbildung. Leipzig: Fachbuchverlag 1968.
- /2/ Pahl, G. & Beitz, W.: Konstruktionslehre. Handbuch für Studium und Praxis. Berlin: Springer 1986, 1993<sup>a</sup>.
- /3/ Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. Methoden für Prozeßorganisation., Produkterstellung und Konstruktion. München: Hanser 1995.
- /4/ Carroll, J. M., Thomas, J. C. & Malhotra, A.: Presentation and representation in design problem solving. British Journal of Psychology, vol. 71, 143-153, 1980.
- /5/ Dörner, D.: Die Logik des Mißlingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen. Reinbek: Rowohlt 1989.
- /6/ VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.

- /7/ Hansen, F.: Konstruktionssystematik. Berlin: Verlag Technik 1965.
- /8/ Müller, J.: Konstruktionssystematik. Berlin: Verlag Technik 1990.
- /9/ Pahl, G. (Hrsg.): Psychologische und pädagogische Fragen beim Konstruieren. Köln: TÜV Rheinland 1994.
- /10/ Galperin, P. I.: Die geistige Handlung als Grundlage für die Bildung von Gedanken und Vorstellungen. In J. Lompscher (Hrsg.), Probleme der Lerntheorie (S. 33-49). Berlin: Volk und Wissen 1966.
- /11/ Dörner, D., Schaub, H., Stäudel, T. & Strohschneider, S.: Ein System zur Handlungsregulation. Oder: Die Integration von Emotion, Kognition und Motivation. Sprache & Kognition, 7, 217-232, 1988.
- /12/ Ehrlenspiel, K.: Denkfehler bei der Maschinenkonstruktion: Beispiele, Gründe und Hintergründe. In S. Strohschneider & R. von der Weth (Hrsg.), Ja, mach nur einen Plan (S. 196-207). Bern: Huber 1993.
- /13/ Ehrlenspiel, K. & Dylla, N.: Untersuchungen des individuellen Vorgehens beim Konstruieren. Konstruktion. München: Hanser 1991.
- /14/ Fricke, G.: Erfolgreiches individuelles Vorgehen beim Konstruieren. Konstruktion, 46, 183-187, 1994.
- /15/ Görner, R.: Zur psychologischen Analyse von Konstrukteur- und Entwurfstätigkeiten. In B. Bergmann & P. Richter (Hrsg.), Die Handlungsregulationstheorie. Von der Praxis einer Theorie (S. 233-241) 1994.
- /16/ Von der Weth, R.: Konstruktionstätigkeit und Problemlösen. In E. Frieling & H. Klein (Hrsg.), Rechnerunterstützte Konstruktion (32-39). Bedingungen und Auswirkungen von CAD. Bern: Huber 1988.

- /17/ Von der Weth, R.: Konstruieren: Heuristische Kompetenz, Erfahrung und individuelles Vorgehen: Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie, 38, 3, 102-111, 1994.
- /18/ Von der Weth, R. & Frankenberger, E.: Strategies, Competence and style-problem solving in engineering design. Learning and Instruction, vol. 5, 357-383, 1995.
- /19/ Dylla, N.: Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren. Konstruktionstechnik München, Bd. 5. München: Hanser 1991.
- /20/ Ehrlenspiel, K., Bernard, R. & Günther: Unterstützung des Konstruktionsprozesses durch Modelle. Bericht über das Werkstattgespräch „Bild und Begriff 3“ 1995 in Seußlitz. Dresden: TU-Eigenverlag 1995.
- /21/ Fricke, G.: Konstruieren als flexibler Problemlöseprozeß - Empirische Untersuchung über erfolgreiche Strategien und methodische Vorgehensweisen beim Konstruieren. VDI-Forschungsberichte, Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.
- /22/ Carroll, J. M., Miller, L. A., Thomas, J. C. & Friedman, H. P.: Aspects of solution structure in design problem solving. American Journal of Psychology, vol. 95, no. 2, 269-284, 1980.
- /23/ Hoover, S. P., Rinderle, J. R. & Finger, S.: Models and abstraction in design. Proceedings ICED 91: International Conference on Engineering Design (46-57). Zürich, August 27-29, 1991, 1991.
- /24/ Wiesner, B. & Hacker, W.: Mentale Handlungsvorbereitung: Studie zu Leistungseinfluß und personalen Bedingungen. Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie, XLI, no. 4, 649-677, 1994.
- /25/ Heisig, B.: Planen und Selbstregulation. Dissertationsschrift, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, TU Dresden 1995.

- /26/ Hacker, W., Veres, Th. & Wollenberger, E.: Verarbeitungskapazität für Text: Ergebnisse der Entwicklung eines deutschsprachigen Prüfverfahrens des Arbeitsgedächtnisses. *Zeitschrift für Psychologie*, 202, 295-320, 1994.
- /27/ Bach, K.: Denkvorgänge beim Konstruieren. *Konstruktion*, 25, no. 1, 2-5, 1973.
- /28/ Kleist, H. von: Die allmähliche Verfertigung der Gedanken beim Reden. *Sämtliche Werke*. Weimar: Volksverlag 1925.
- /29/ Görner, R.: Zur Entwicklung räumlicher Vorstellungen als Operieren an internen Repräsentationen. In W. Hacker (Hrsg.), *Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten* (S. 72-77). Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften 1976.
- /30/ Sachse, P. & Hacker, W.: Early low-cost prototyping: Zur Funktion von Modellen im konstruktiven Entwicklungsprozeß. *Forschungsberichte*, Bd. 19, Institut für Allgemeine Psychologie und Methoden der Psychologie. Dresden: Technische Universität (Eigenverlag) 1995.
- /31/ Guindon, R.: The process of knowledge discovery in system design. In G. Salvendy & M. J. Smith (Eds.), *Designing and Using Computer Interfaces and Knowledge Based Systems*, vol 2 (727-734). Amsterdam: Elsevier 1989.
- /32/ Viebahn, U.: Technisch zeichnen kann jeder. *DIE ZEIT*, 31. März 1995, S. 53, 1995.