

# **KOSTENGERECHTES KONSTRUIEREN = FERTIGUNGSGERECHTES KONSTRUIEREN? - PROBLEME EINER ANFORDERUNGSGERECHTEN KONSTRUKTIONSOPTIMIERUNG**

*H.-J. FRANKE*

## **1 Zusammenfassung**

Der Produktionsstandort Deutschland wird in der letzten Zeit mit Blick auf die Kosten zunehmend kritisch gesehen. Konstruktionsmethodisch hat sich vor allem Klaus Ehrlenspiel verdienstvoll mit der Kostenproblematik beschäftigt [1]. Der Autor hat hierzu ebenfalls gelegentlich Stellung genommen, z.B. in [2,3].

Ausgehend von einigen allgemeinen Fällen, in denen „kostenoptimale Konstruktionen“ und „fertigungsoptimale“ Konstruktionen“ zu differierenden Lösungen führen können, werden anhand praktischer Beispiele und mittels grundsätzlicher Überlegungen die Ursachen diskutiert. Hieraus werden praktisch zweckmäßige Vorgehensweisen abgeleitet und hierfür besonders geeignete Einzelmethoden vorgeschlagen.

## **2 Einige praktische Probleme beim Finden kostenoptimaler Lösungen**

Da jede Abweichung von fertigungsgerechtem Gestalten zu Mehrkosten in der Fertigung führt, wird man annehmen, daß die Gleichung, die in der Titelfrage gestellt wird i.a. aufgeht. Einige Beispiele sind trivial, z.B.:

- Ausschuß wegen fehlender „Gußgerechtheit“,
- höhere Nebenzeiten durch fehlende „Spanngerechtheit“,
- erhöhte Maschinenstundensätze und längere Hauptzeiten wegen übertriebener Forderungen an Maß- und Formtoleranzen

u.s.w.

Interessant sind natürlich gerade Fälle, wo die Korrelation zwischen Fertigungsgerechtigkeit und Kosten nicht mehr so trivial sind.

Im Grunde kann man ganz allgemein betrachtet zwei wesentliche Fälle unterscheiden:

### **2.1 Das Gesamtkostenoptimum wird bei anderen Merkmalen als das Fertigungskostenoptimum erzielt.**

Hier sind drei wichtige Unterfälle zu unterscheiden:

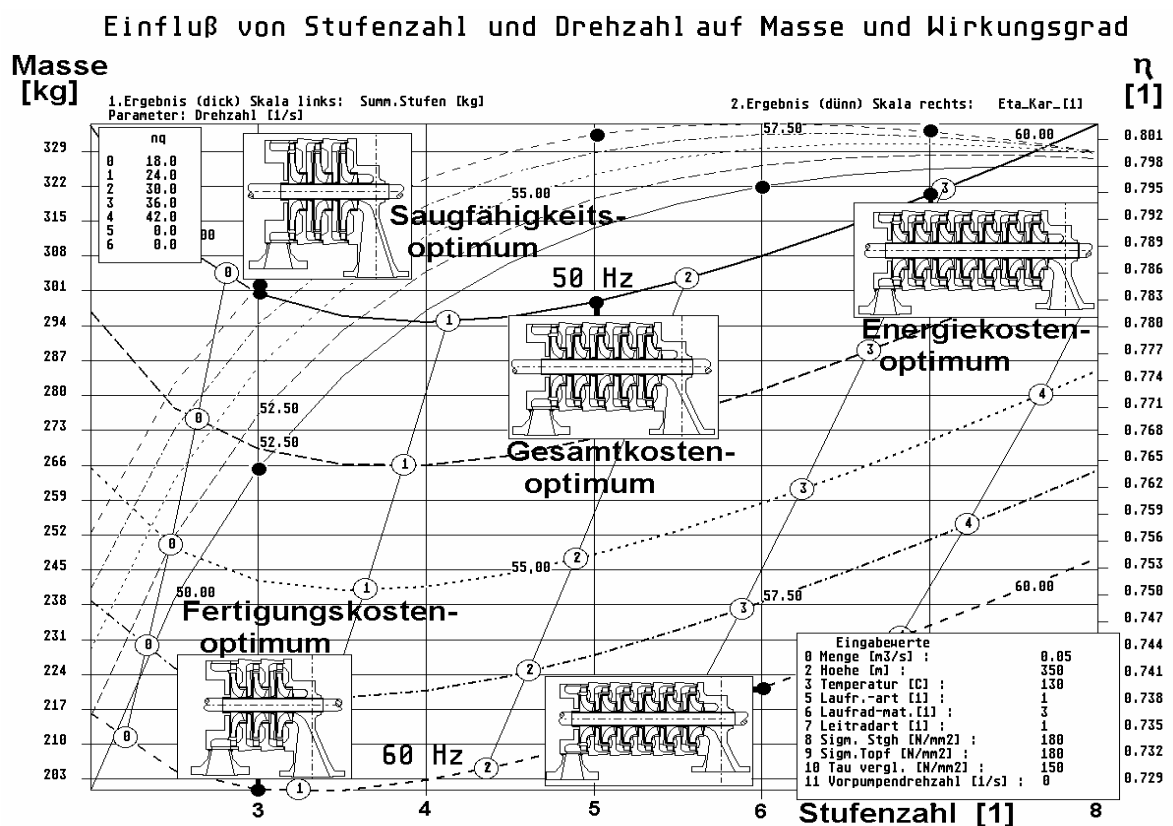
- Bereits die variablen Herstellkosten liegen bei anderen Parametern als die optimalen Fertigungskosten.
- Die Gesamtkostenbetrachtung [2] aus Sicht des Kunden führt zu anderen kostenoptimalen Lösungen als die spezifische Fertigungskostenoptimierung.

- Die übliche Zuschlagskalkulation, die im wesentlichen auf dem Mengengerüst von kg Material und Fertigungsminuten aufbaut, führt zu wirtschaftlichen Fehlentscheidungen.

## 2.2 Das Fertigungskostenoptimum ist nicht erreichbar, weil wesentliche andere Anforderungen als Kosten, z.B. Sicherheitsaspekte, für die betrachtete Konstruktionsaufgabe eine höhere Bedeutung haben.

Im ersten Falle wird das genau dann der Fall sein, wenn verschiedene Kostenarten sich zu bestimmten Merkmalen bzw. Parametern unterschiedlich verhalten.

Ein Beispiel für Fall 1.2 ist etwa gegeben, wenn höhere Wirkungsgrade - und damit niedrigere Energiekosten - nur mit höheren Genauigkeiten und/oder besseren Oberflächen - und damit höheren Fertigungskosten - zu erzielen sind. Ein Beispiel hierzu zeigt Bild 1.



**Bild 1: Beispiel für Zielkonflikte zwischen verschiedenen Kostenzielen und Funktionszielen**

Ein Beispiel für Fall 1.1 liegt z.B. vor, wenn eine materialkostensparende Maßnahme höhere Fertigungskosten verlangt, etwa die Verwendung höherfester Stähle, die zu niedrigeren Materialkosten aber zu längeren Bearbeitungskosten führen kann.

Ein besonders schwierig zu beurteilender Konflikt entsteht, wenn durch Maßnahmen, die zu erhöhten Fertigungskosten und sogar höheren variablen Herstellkosten, führen, Abwicklungs- und Durchlaufkomplexität vermindert werden kann und damit niedrigere „Fixkosten“ erreicht werden können. Ein Beispiel wäre etwa das Bohren und Schneiden zusätzlicher Anschlußbohrungen und -gewinde, um im Falle einer Baukastenkonstruktion mit gleichen Bauteilen verschiedene Kundenoptionen zu bedienen. Derartige Konsequenzen sind durch gegenwärtig übliche Kalkulationsmethoden kaum zu erfassen. Erst eine

detaillierte Prozeßkostenrechnung würde dies leisten können; diese wird jedoch wegen ihres Aufwandes selbst vorläufig kaum irgendwo als Standardkalkulation verwendet.

Wie deutlich die derzeitigen Kalkulationsmethoden an der wirklichen Kostenverursachung vorbeizielen, mögen drei Beispiele aus eigenen Erfahrungen zeigen:

1. Eine Kalkulation von 10 verschiedenen Gußgehäusen ergab eine einfache Rangreihe entsprechend den Fertiggewichten- bei Unterschieden von maximal 15% auf das schwerste Gehäuse bezogen, obwohl der Aufwand für Kernarbeit z.T. ein Mehrfaches bei den leichteren Gehäusen war.
2. Die Kalkulation ein und des exakt gleichen Teils ergab bei gleichen vorgegebenen Losgrößen den doppelten Wert für die Fertigungskosten für den „High Tech“- Kostenträger.
3. Der kalkulierte Preis für eine 10MW-Einzelmaschine im Preisbereich um ca. 500 TDM ergab bei Lieferung von 10 statt 1 Maschine lediglich einen rechnerischen Vorteil von 5%.

Diese Beispiele sprechen für sich und sind sicher in ihrer Aussage in vielen Firmen zu bestätigen.

Die oben als zweite genannte Kategorie von Fällen ist aus Bereichen hoher Sicherheitsanforderungen bekannt, etwa aus der Nuklear- oder Flug- bzw. Raumflugtechnik. In den beiden letztgenannten Branchen sind ebenso wie in der Fahrzeugtechnik oft Forderungen nach geringsten Massen wichtiger, als Forderungen nach geringsten Fertigungskosten. Diese können natürlich über Energieeinsparungen ggf. auch die Gesamtkostenbetrachtung positiv beeinflussen, sind jedoch häufig als kostenunabhängige Ziele zu betrachten, z.B. hinsichtlich des maximalen Beschleunigungsvermögens eines Sportfahrzeugs.

Aus den ausgeführten Überlegungen ist eine ganz klare Schlußfolgerung zu ziehen:

**Die Optimierung der Fertigung, insbesondere der Fertigungskosten ist i.a. kein unabhängiges Teilziel!**

Das bedeutet selbstverständlich keineswegs, daß der Konstrukteur auf dieses Teilziel verzichten darf, sondern lediglich, daß er es immer insoweit anstreben muß, als damit übergeordnete Ziele in Funktion und Kosten nicht verletzt werden. Konkret bedeutet das im Rahmen methodischer Vorgehensweisen, daß er

**nach den relativ besten fertigungstechnischen Lösungen suchen** muß.

Damit ergibt sich natürlich die Fragestellung, ob nicht einige der aus der Literatur bekannten - i.a. bisher kaum praktisch angewendete - Lösungen für eine detaillierte Fertigungskostenoptimierung während des Entwerfens [4,5] eigentlich am Ziel vorbeischießen. Dies gilt auch für die Methoden der Target Costs, wenn sie detailliert auf Teile heruntergebrochen werden!

Möglicherweise sind daher einige Methoden zur „Grobkalkulation“, bzw. zum Finden qualitativ richtiger Rangreihen von fertigungskostengünstigen Lösungen, nicht nur die einfacheren und praxisgeeigneteren, sondern sogar die methodisch richtigeren Vorgehensweisen.

Dabei sei ausdrücklich anerkannt, daß dann, wenn Entwürfe grundsätzlich festliegen, die zitierten Ansätze zum „Rauskitzeln“ letzter Kostenreserven durchaus geeignet sein können.

### 3 Vernetzung von Lösungsparametern und Zielen

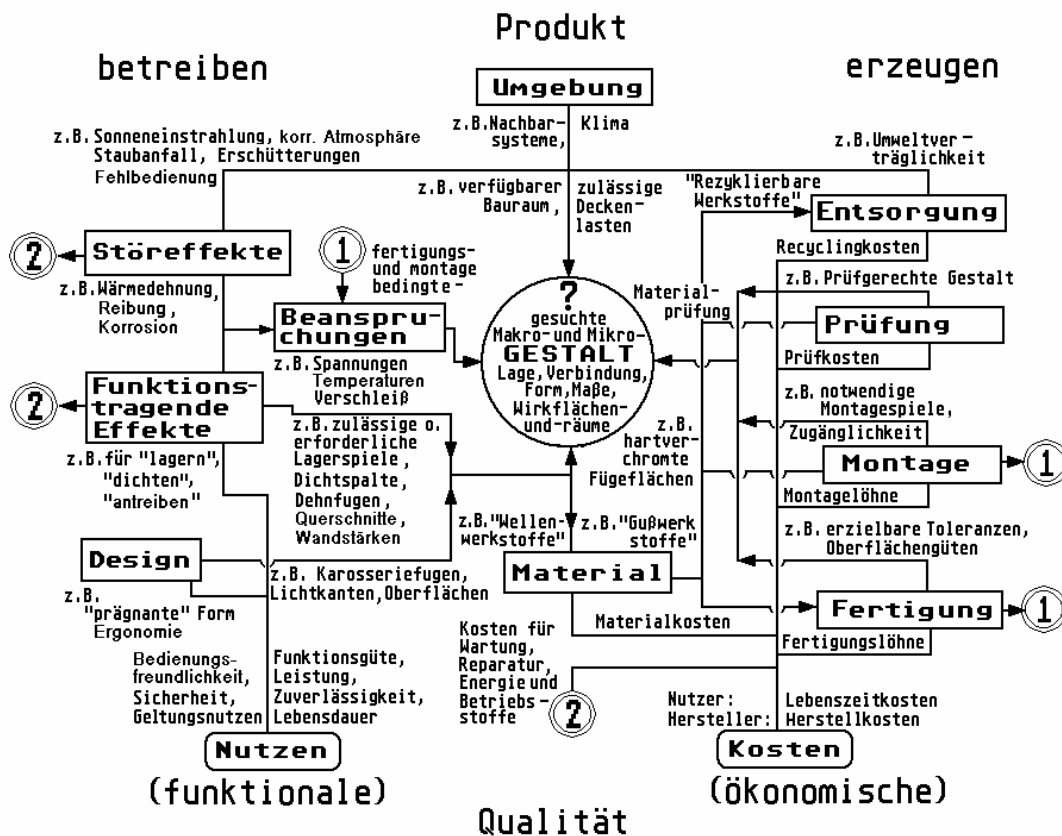
Bild 2 zeigt beispielhaft wichtige Beziehungen zwischen den maßgebenden Konstruktionsparametern. Das Bild veranschaulicht, daß der Entwurfsprozeß, der zentral insbesondere auf die Optimierung von Form, Werkstoff und Abmessungen abzielt, hochgradig vernetzt ist. Es greift in seiner Darstellung Ideen von Wögerbauer [8] auf.

Da sich andererseits das anzustrebende Kostenziel trivialerweise aus kommutativen Summanden zusammensetzt, gilt:

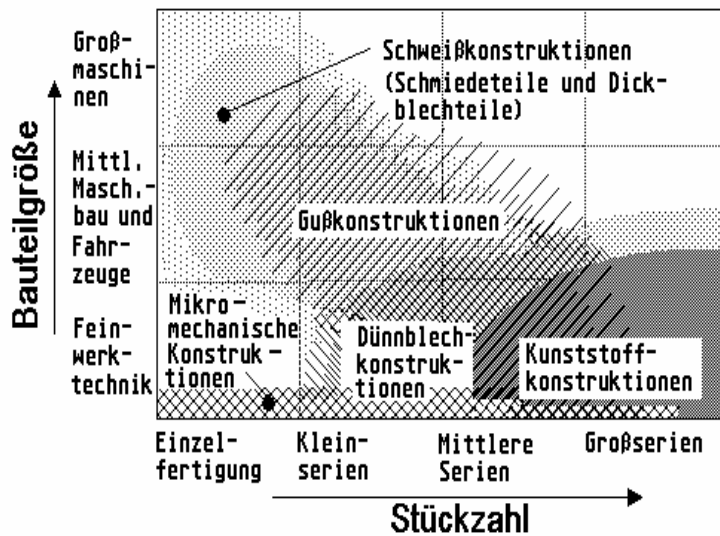
**Kostenbeeinflussende Entscheidungen sind in dem Maße voneinander abhängig, wie festzulegende konstruktive Parameter gleichermaßen auf mehrere Kostenelemente einwirken.**

Damit ist ein wichtiges Vorgehensprinzip des methodischen Konstruierens, nämlich die teilweise unabhängige Bearbeitung einzelner Teilaufgaben, das gilt parallel und sequentiell zwar nicht in Frage gestellt, aber doch erschwert.

Weitere Dimensionen, die durch Bild 2 noch nicht dargestellt werden, ergeben sich, wenn man berücksichtigt, daß die Wahl der Fertigungsverfahren teils ökonomisch, teils technologisch an Stückzahlen und absolute Bauteilgrößen gebunden sind. Dies zeigt schematisch Bild 3, das technologische Verfahren wie Schmieden, Gießen, Spritzguß, Blechbiegestanztechnik und mikromechanische Fertigungsverfahren den genannten Parametern zuordnet.



**Bild 2: Vielfältige Beziehungen zwischen funktionstragenden Effekten, Gestalt, Material, Fertigung und Montage sowie den Zielsetzungen in Kosten und Nutzen bedingen, daß kein Teilziel unabhängig verfolgt werden kann.**



© Franke 97

**Bild 3: Fertigungsverfahren lassen sich nicht unabhängig von Bauteilgröße und Stückzahlen wählen ( und Werkstoffen vergl. Bild 2 ).**

## 4 Diskussion geeigneter

### Methoden

#### 4.1 Einfache Methoden für das Finden anforderungsgerechter Teilaufgaben

Wenn die Aufgabe einerseits ganz wesentlich die Kostensenkung zum Ziel hat und andererseits eine Lösung auf der Basis bisheriger Lösungsprinzipie zu erwarten ist, ist es eine logische Konsequenz, aus der Analyse der bisherigen Lösung Schlußfolgerungen hinsichtlich der Problemschwerpunkte zu ziehen. Gut bekannt sind hier die Methoden der ABC-Analyse und die Funktionskostenmethode der Wertanalyse.

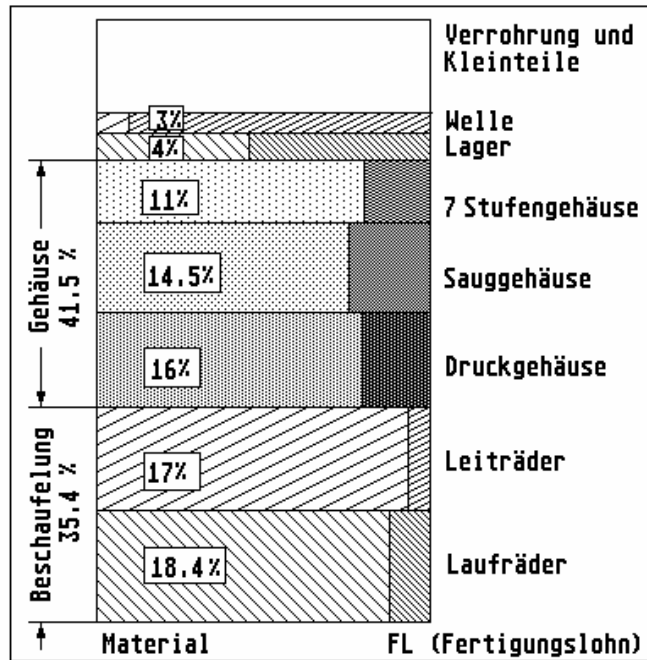
Erfahrungsgemäß können Kostenstrukturen als spezielle Form der ABC-Analyse besonders empfohlen werden. Sie geht - wie die ABC-Analyse - von der Beurteilung der Kostenschwerpunkte einer Lösung aus. Entgegen der seit Kesselring [9] bekannten Vorstellung, daß Kostenstrukturen relativ konstant bleiben, setzt man sich jedoch gerade das Ziel, diese Kostenstruktur möglichst zu verändern!

**Bild 4:**

**Kostenstruktur zum Auffinden der A-Aufgaben, beim kostengerechten Konstruieren: Herstellkosten von Teilen oder Baugruppen werden flächenmaßstäblich in Material- und Fertigungskosten aufgetragen und in der Reihe abnehmender Größen aufgeschichtet.**

Beispiel:

Während es bei der Welle, wenig lohnenswert ist, an den Materialkosten zu sparen, macht es auch keinen Sinn vorzugsweise bei den Leiträdern Fertigungskosten einzusparen.



Während es im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung selbstverständlich ist, sich nur um A-Probleme zu kümmern, wird es im Fall der Serienfertigung oft notwendig sein, sich auch intensiv um relativ kleinere Kosteneffekte zu kümmern. Hier stehen einmalige relativ niedrige Entwicklungskosten einer durch den Multiplikator der großen Stückzahl trotzdem großen Einsparung gegenüber:

Strategische Regel:

**Bei Kleinserienfertigung nur A-Kostenprobleme lösen, bei Großserienfertigung auch B- und C-Probleme angehen!**

Bei grundsätzlichen Neuentwicklungen, die für einen längerfristigen Zeitraum die Basis eines Produktprogramms bilden sollen, ist es zweckmäßig, eine strategische Betrachtung über mittel- und langfristige Trends in den Kostenanteilen nach Kostenarten oder Kosten von Komponenten anzustellen.

Beispielsweise können sich über neue Technologien und/oder neue Wertmaßstäbe die Relationen zwischen Material-, Energie- und Lohnkosten verändern. Derartige Veränderungen haben sich in der Vergangenheit durch das stetige Lohnwachstum in Mitteleuropa, die Ölkrise, die Revolution der Chipfertigung und der Informationstechnologien oder auch durch das Vordringen ökologischer Werte ergeben:

**Grundsatzentwicklungen strategisch an strukturellen Trends überprüfen!**

Das bedeutet, daß bei Kalkulationsvergleichen bei nur kleinen Differenzen mehr auf die zu erwartenden Kostenentwicklungen geachtet werden sollte, als die kurzfristig etwas günstigere Lösung zu wählen.

#### **4.2 Geeignete Methoden zur Kostenkontrolle beim Entwerfen**

Beim Entwerfen ist es besser, Beurteilungen grob gesamthaft vergleichend durchzuführen als detaillierte Einzelkalkulationen für die Auswahl bestimmter Lösungen zu verwenden. Dieses Vorgehen hat allerdings seine Grenze bei komplexen Produkten, wenn es nicht mehr möglich ist, eine Reihe von Varianten für das gesamte Produkt zu entwerfen.

Dann müssen die wichtigsten Entscheidungen bereits auf der Basis von Komponenten getroffen werden. Dabei sollte jedoch wenigstens eine sehr frühzeitige Verträglichkeitsanalyse der „optimalen“ Einzelkomponenten erfolgen, um einigermaßen sicherzustellen, daß keine kostensteigernden Anpaßmaßnahmen oder spätere Rückgriffe auf zunächst verworfene teurere Komponenten nötig werden.

In vielen Fällen können einfache zählbare bzw. meßbare Merkmale helfen, eine hinreichend sichere Rangreihenfolge für alternative Lösungen zu bekommen. Dies gilt um so mehr, als die „exakte“ Kalkulation sich i.a. auf ein sehr einfaches Basismengengerüst von kg Material und Fertigungsminuten stützt, die lediglich in komplexer Weise mit Zuschlägen aufaddiert werden. Oftmals läßt sich die tatsächliche Kalkulation der Herstellkosten, einmal feststehende Zuschläge vorausgesetzt, fast exakt als eine einzige Formel darstellen:

$$HK = g_1 \cdot \text{kg Material} + g_2 \cdot \text{min Fertigungslohn} + g_3 \cdot (\text{kgGuß} + \text{kgGesenschiedeteile})$$

wobei der letzte Term für Modellkosten und Werkzeugkosten steht und häufig vergleichsweise klein ist.

Wie bereits Kesselring [8] gezeigt hat, ändern sich Rangreihenfolgen bei mäßigen Änderungen der Gewichte  $g_i$  kaum. Daher kann man schnell relativ zuverlässige Aussagen über relative bessere oder schlechtere Lösungen gewinnen.

Natürlich gilt die oben getroffene Aussage über das Problem der nicht unabhängigen Teilaufgaben hier ebenfalls. Gerade, wenn man nur relative Aussagen machen kann, müssen notwendigerweise Produkte gesamthaft verglichen werden!

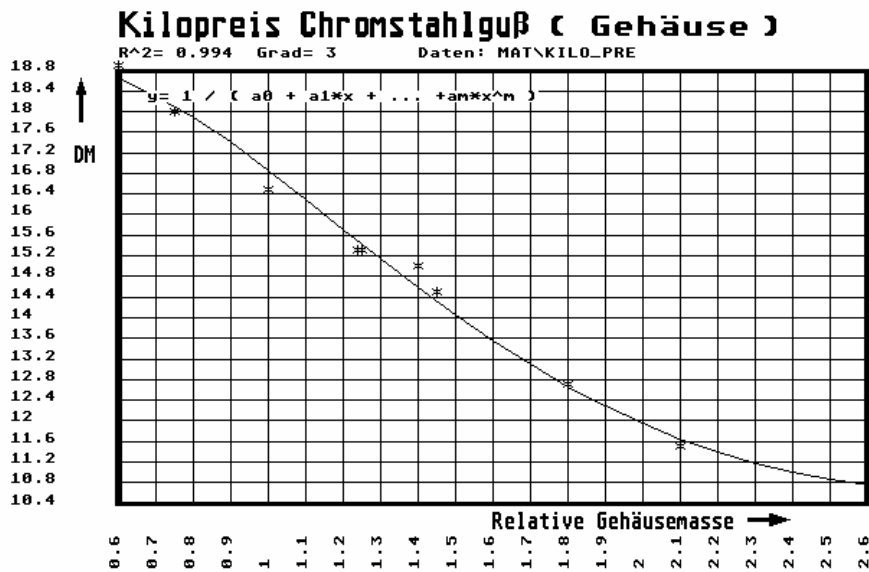
Für die Auswahl der optimaler Fertigungsverfahren kann man, wenn überhaupt verschiedene Fertigungsverfahren für betrachtete Teile möglich sind, vergleiche Bild 3, Grenzstückzahlen ermitteln.



**Bild 5: Grenzstückzahlen für verschiedene Fertigungsverfahren (schematisch).**

Derartige Kostenkurven kann man sich relativ zuverlässig verschaffen, wenn man die einmaligen Werkzeugkosten (Gesenke, Modelle u.s.w.) kennt und näherungsweise die Lernkurve für größere Stückzahlen abschätzen kann.

Wenn im Entwurfsstadium Kostendaten nur unvollständig verfügbar sind, kann man häufig auf Erfahrungen zurückgreifen, die durch Regressionsverfahren aufbereitet sogar manchmal zuverlässiger sind als ad-hoc-Anfragen. Ein Beispiel zeigt Bild 6. Derartige Abschätzungen sind besonders nützlich bei Kostengegenüberstellungen großer Teile, z.B. von schweren Gehäusen [7]



**Bild 6: Schnelles Abschätzen von Kosten mit Regressionskurven.**

## 5 Schlußfolgerungen für Lehre und Praxis des kostengerechten Konstruierens

Fertigungsgerechtes Konstruieren ist wichtig, ergibt aber keinesfalls eine sichere Orientierung für wirklichen Produkterfolg. Zum einen dürfen Fertigungserleichterungen nicht mit Verschlechterung von für den Kunden wichtigen Produkteigenschaften erkaufte werden und zum anderen ist zu berücksichtigen, wie sich andere Kosten durch die fertigungsbedingt getroffenen Entscheidungen verändern.

Kostenvergleiche sind vorzugsweise für gesamte Produkte durchzuführen.

Wenn das nicht möglich ist, müssen frühzeitig die ausgewählten Komponenten auf ihre Verträglichkeit hin überprüft werden.

Beim vergleichenden Beurteilen sollten direkt aus der Konstruktion ablesbare Merkmale, z.B. abzählbare (z.B. Einzelteile, Arbeitsgänge, Bearbeitungsstellen) oder berechenbare (bearbeitete Flächen, Volumina, Massen) herangezogen werden.

Im Zweifelsfall sind vergleichende Kostenbetrachtungen vollständiger Produkte mit z.T. geschätzten Kosten besser als Entscheidungen auf der Basis von Detailkonstruktionen .

Sinnvoll wäre es, wenn auch Kostenschätzmethoden direkte Bestandteile integrierter Konstruktionsarbeitsumgebungen [6,10,10] würden.



## 6 Schrifttum

- [1] Ehrlenspiel K.: Integrierte Produktentwicklung, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1995.
- [2] Franke H.-J.: Berücksichtigung der Produktgesamtkosten bei Konzeption und Gestaltung von Maschinen und Ger.,ten. VDI-Berichte Nr. 457 (1982), S.71-77
- [3] Franke, H.-J.: Kostensenken durch Einsparen von Teilen VDI-Ber.Nr. 683 (1988) S. 1-11.
- [4] Steiner M., Ehrlenspiel K. Schnitzlein W.: Erfahrungen mit der Einführung wissensbasierter Erweiterungen eines CAD-Systems zur konstruktionsbegleitenden Kalkulation. VDI-Berichte 1079, Düsseldorf:VDI-VERLAG 1993, S.33-54.
- [5] Schaal, S.: Integrierte Wissensverarbeitung mit CAD am Beispiel der konstruktionsbegleitenden Kalkulation, Carl Hanser-Verlag, München, 1992.
- [6] Meerkamm H., A. Weber :Konstruktionssystem mfk - Integration von Bauteilsynthese und -analyse. VDI-Berichte 903, S.231-248.
- [7] Hacker, G.: Untersuchungen zur systematischen Gestaltung von Maschinengehäusen. Diss. TU Braunschweig 1995.
- [8] Wögerbauer, H. Die Technik des Konstruierens, München, Oldenbourg, 1942.
- [9] Kesselring, F.: Technische Kompositionslehre. Berlin, Springer, 1954.
- [10] Franke, H.-J., Mohmeyer, G. u. K.D. Weigel: Integrierter Produktentwurf in einer rechnergestützten Konstruktionsumgebung, VDI-Berichte Nr. 861.2 ,1990.
- [11 ] Peters, M.: Kommunikationssystem rechnerunterstützter Konstruktionswerkzeuge.

Prof. Dr.-Ing. H.-J. Franke  
Institut für Konstruktionslehre  
TU Braunschweig  
Langer Kamp 8  
D-38106 Braunschweig  
Tel. (0531) 391 3342  
Fax. (0531) 391 4572  
e-mail: franke@ikmfbs.ing.tu-bs.de