

Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung

Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung

Herausgegeben von
Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,
Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FAPS

Carl Hanser Verlag München Wien

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	02. Dezember 1994
Tag der Promotion:	28. Februar 1995
Dekan:	Prof. Dr. Dr. h. c. F. Durst
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr.-Ing. K. Ehrlenspiel

Die Deutsche Bibliothek - CIP - Einheitsaufnahme

Schnepf, Peter:

Zielkostenorientierte Montageplanung / Peter Schnepf. -

München ; Wien : Hanser, 1995

(Fertigungstechnik - Erlangen ; 47)

Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1995

ISBN 3-446-18397-3

NE: GT

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Carl Hanser Verlag München, Wien 1995

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Dissertation ist das Ergebnis meiner Forschungsarbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, danke ich für die großzügige Förderung meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Ehrlenspiel, dem Leiter des Lehrstuhls für Konstruktion im Maschinenbau der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Koreferats. Die aus einer außergewöhnlich intensiven Durchsicht resultierenden Anregungen kamen besonders der Verständlichkeit der Arbeit sehr zugute.

Der Robert Bosch GmbH, insbesondere Herrn W. Fritzmann und Herrn E. Lemp danke ich für die vielfältige Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht entstanden wäre.

Ferner danke ich allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls, insbesondere Herrn M. Steber und Herrn Dr. B. Ehmann, für die gute und konstruktive Zusammenarbeit. Mein Dank gilt auch allen Studenten, die mich unterstützt haben.

München, im Mai 1995

Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung

– Inhaltsverzeichnis –

Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einführung	9
2 Voraussetzungen erfolgreicher Planung am Beispiel der Montage	15
2.1 Allgemeine marktwirtschaftliche Erfolgskriterien	15
2.1.1 Bedeutung der Wettbewerbsfaktoren Kosten, Qualität und Zeit	15
2.1.2 Gegenseitige Abhängigkeit der Wettbewerbsfaktoren	17
2.2 Innerbetriebliches Komplexitätsmanagement	19
2.2.1 Der Komplexitätsbegriff	19
2.2.2 Beherrschung und Reduzierung von Komplexität	21
2.2.3 Komplexitätsmanagement	24
2.3 Spezielle Randbedingungen für die Montageplanung	25
2.3.1 Ziele und Aufgaben der Montageplanung	25
2.3.2 Termingerechte Montageplanung	29
2.3.3 Qualitätsgerechte Montageplanung	30
2.3.4 Kostengerechte Montageplanung	32
3 Unterstützung des Planungsprozesses durch quantifizierende Metho- den	35
3.1 Bewertung von Alternativlösungen	35
3.2 Zielorientierte Planungs- und Bewertungsmethoden	39
3.2.1 Effektivität der zielorientierten Planung	39
3.2.2 Maßstabsproblem für die Zielgrößen	40
3.2.3 Ursachenanalyse nicht erfolgreicher Optimierung bei zwei zielorientierten Ansätzen aus der Praxis	41

3.2.4	Folgerungen für die Montageplanung	44
3.2.5	Untersuchung vorhandener Bewertungsmethoden für die Montageplanung bezüglich operativer Eigenschaften	46
3.2.6	Defizite der vorhandenen Methoden	51
4	Modell Zielkostenfunktion	52
4.1	Anforderungen an das Modell	52
4.2	Aufbau und Wirkungsweise der Zielkostenfunktion	53
4.3	Beispiel: Montage "Düsenhalter"	56
5	Abbildung der montagegerätespezifischen Eigenschaften	59
5.1	Gesamtkostenbewertung der Montageanlagenplanung	59
5.2	Untere Schranke Minimalmontage	61
5.3	Systematische Einordnung der Montagegeräte	64
5.4	Quantifizierung der Minimalmontage	65
5.5	Zwei Beispiele aus der Düsenhaltermontage	68
6	Abbildung der produktspezifischen Eigenschaften	74
6.1	Die Teilfunktionen der Montage	74
6.2	Die Einflußfaktoren auf die Montagegerechtheit von Produkten ..	71
6.3	Die charakteristischen Geometriegrößen	77
6.4	Handhabungskomplexität	79
6.4.1	Entwicklung der Handhabungskomplexität	79
6.4.2	Praktische Überprüfung der Zielkosten für die Handhabung	84
6.5	Prozeßkomplexität	87
6.5.1	Entwicklung der Prozeßkomplexität	87
6.5.2	Praktische Überprüfung der Zielkosten für den Prozeß ...	92
6.6	Justagekomplexität	98

7	Möglichkeiten und Grenzen des Zielkostenmodells	103
7.1	Vollständige Formulierung der Zielkostenfunktion	103
7.2	Vergleich des Zielkostenmodells mit den allgemeingültigen Erkenntnissen zur Montagegerechten Produktgestaltung	106
7.3	Einsatzmöglichkeiten in der manuellen Montage	111
7.4	Die Zielkostenfunktion als bereichsübergreifender Regelalgorithmus	117
7.5	Beitrag zum marktorientierten Zielkostenmanagement	121
7.6	Einsatzempfehlungen für manuelle und automatisierte Montage	126
7.7	Axiomatik des Modells	127
7.8	Genauigkeit des Modells	128
7.8.1	Allgemeine Randbedingungen für Kostenprognosen	128
7.8.2	Genauigkeit der Zielkostenfunktion	129
8	Zusammenfassung	132
9	Schrifttum	134

Abkürzungsverzeichnis

a	Montagekostenanteil (=Montagekosten/Herstellkosten)
AEM	Assemblability Evaluation Method
AS	Ausgleichsscheibe
b	Fügebreite [mm]
DB	Druckbolzen
DFA	Design for Assembly
DFMA	Design for Manual Assembly
DH	Düsenhalter
DSM	Düsenspannmutter
DÜ	Düse
elek	elektrischer Montagemodul (Funktion m)
f	Fügelänge [mm]
FE	Feder
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einfluß-Analyse
g	Teilegröße [mm]
G	Gesamtkostenfunktion für die Montageanlagenplanung
HK	Haltekörper
hydr	hydraulischer Montagemodul (Funktion m)
IDAP	Integrated Design and Assembly Planning
ISO	International Organisation for Standardization
k	Teilekomplexität (Oberbegriff für Handhabungs-, Prozeß- und Justagekomplexität)
K	Kostenfunktion

k_H	Handhabungskomplexität
k_{1H}	Faktor "Teileausrichten" der Handhabungskomplexität
k_{2H}	Faktor "Teilepositionieren" der Handhabungskomplexität
k_J	Justagekomplexität
k_P	Prozeßkomplexität
k_{1P}	Teilfaktor "Bewegungseinfluß" der Prozeßkomplexität
k_{2P}	Teilfaktor "Werkzeugeinfluß" der Prozeßkomplexität
k_{3P}	Teilfaktor "Systemeinfluß" der Prozeßkomplexität
lin	lineare Achse (Funktion m)
log	Logarithmus zur Basis 10
m	Funktion Minimalmontagekosten [DM]
M_i	Montagemodul Nr. i
mfk	Selbständige Abteilung für Maschinenelemente und fertigungsgerechtes Konstruieren (jetzt: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg)
min	minimal
MTM	System vorbestimmter Zeiten ("Methods Time Measurement")
n	begrenzte Zahl anzufahrender Punkte (Funktion m)
N	Newton
p	Positioniertoleranz [mm]
p_H	Positioniertoleranz für Handhabung [mm]
p_P	Positioniertoleranz für Prozeß [mm]
PDES	Product Data Exchange using STEP
PIMS	Profit Impact of Market Strategies
pneu	pneumatischer Montagemodul (Funktion m)

Q	Qualitätsfunktion
R	Systemgröße des Anwendungsbereichs [mm]
rot	rotatorische Achse (Funktion m)
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
t	Fügetoleranz [mm]
T	Zeitfunktion
t _j	Fügetoleranz des Funktionsmaßes, das justiert wird
TMU	Time Measure Unit
TOL1	Platzhalter für Form- oder Lagetoleranz
TOL2	Platzhalter für Form- oder Lagetoleranz
u	unendlich viele anfahrbare Punkte (Funktion m)
UAS	Universelles Analysiersystem
VDA	Verband der Automobilindustrie
vibr	vibratorischer Montagemodul (Funktion m)
WT	Werkstückträger
z	theoretische Maßtoleranz für justagefreie Konstruktion
Z	Zielkostenfunktion [DM]
ZS	Zwischenscheibe
1g	ein Punkt geführt anfahrbar (Funktion m)
1u	ein Punkt ungeführt anfahrbar (Funktion m)

1 Einführung

Marktwirtschaft ist ein Wechselspiel menschlicher Interessen. Diese sind in vielfältigen Gruppen strukturiert und stark zeitvariant. Zuverlässiges Bestimmen von Ursachen und Wirkungen jetziger und künftiger Interessen ist in vielen Bereichen nicht möglich.

Dennoch existieren Regeln und Randbedingungen, deren Beachtung notwendige Voraussetzungen darstellen, um der Interessengruppe "Unternehmen" Erfolg, d.h. langfristig günstige Kapitalströme zu ermöglichen.

Die unternehmensrelevanten Regeln des Marktes werden durch die potentiellen Kunden definiert und unter dem Begriff "Marktanforderungen" zusammengefaßt. Eine Obermenge dieser Marktanforderungen kann mit "gleichzeitige Erfüllung von Qualitäts-, Kosten- und Zeitvorgaben" umschrieben werden.

Ein Industrieunternehmen hat die Marktanforderungen in interne Abläufe umzusetzen. Dabei steht zunächst nicht mehr als ein unter Umständen sehr komplexes Ziel im Raum, z.B. Entwicklung und Bau eines Kraftfahrzeugs für ein zukünftiges Marktsegment.

• Problem: Lösungsaufwand für betriebliche Aufgaben

Untersuchungen in der Automobilindustrie ergaben, daß der Entwicklungsaufwand, gemessen in Ingenieurstunden, mit zunehmender Komplexität der Aufgabenstellung überproportional ansteigt [13] (Bild 1). Komplexität bezieht sich sowohl auf das Produkt, repräsentiert z.B. durch Modelle unterschiedlicher Preisklassen, als auch auf den Anteil neuer Eigenentwicklungsarbeiten innerhalb eines gegebenen Gesamtentwicklungsprojekts.

Gleiches gilt auch für viele andere Branchen. Insbesondere die Gemeinkostenbelastung nimmt in vielen Betrieben mit steigender Komplexität infolge wachsender Vielfalt rasant zu [86].

Deshalb sind Unternehmen bestrebt, die Komplexität von Projekten gering zu halten. Praktizierte Maßnahmen sind Kooperationen mit anderen Herstellern, Fremdvergabe von

Entwicklungs- und Fertigungskapazität, Baukastensysteme, Wiederholteilverwendung. Man versucht, das Gesamtziel in kleinere Teilziele zu zerlegen, um so den überproportionalen Aufwandsanteil klein zu halten bzw. ganz zu beseitigen (Bild 1).

Das gibt Anlaß zur Frage: Warum fördert der überwiegend praktizierte Konstruktions-, Planungs- und Entscheidungsprozeß das überproportionale Anwachsen des Lösungsaufwands mit wachsender Aufgabenkomplexität?

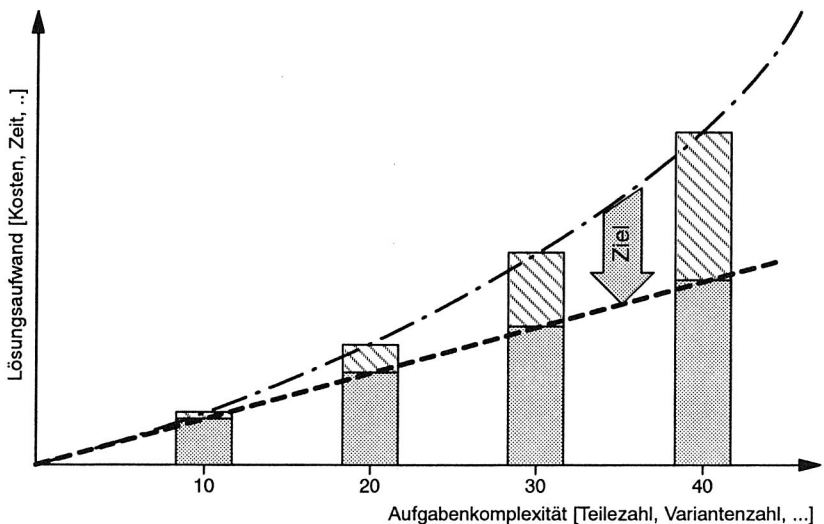


Bild 1 Überproportional ansteigender Lösungsaufwand mit wachsender Aufgabenkomplexität

- **Ursache des Problems: Vorhandene Quantifizierungs- und Entscheidungsmethoden**

Der eigentliche Grund liegt in der Tatsache, daß die klassischen betriebswirtschaftlichen Quantifizierungs- und damit Entscheidungskriterien auf der Beurteilung von

Kapitalströmen basieren. Die zugehörigen Methoden weisen keinen aktiv nutzbaren Charakter auf, d.h. es lassen sich *weder Ziele noch Wege* zur Optimierung der Wettbewerbsfaktoren Qualität, Kosten und Zeit ableiten. Dadurch werden die Regelschleifen zur Beurteilung und Entscheidungsfindung lange, kompliziert und fehleranfällig (Bild 2). Das Definieren von Zielen und Wegen bleibt allein der Erfahrung und den Interessen der Beteiligten überlassen.

Eine weitere Ursache besteht darin, daß betriebliche Handlungen zahlreiche Wechselwirkungen zwischen den funktionsorientierten Abteilungen nach sich ziehen. Die Folgen für die unternehmensweite Gesamtkostenentwicklung sind oft nicht bekannt. Somit lassen sich auch keine internen Regelmechanismen zur Aufwandsminimierung aufbauen.

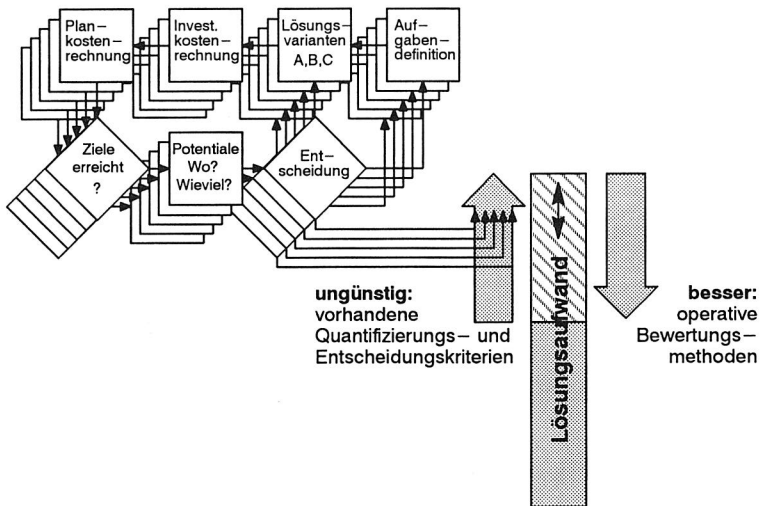


Bild 2 Aufwendige Regelschleifen zur Entscheidungsfindung auf Grundlage der Bewertung von Kapitalströmen

- **Grundsätzliche Problemlösung: Operative Bewertungsmethoden**

Die beiden beschriebenen Problemursachen lassen sich jedoch erst dann beheben, wenn zur betrieblichen Planung aktiv nutzbare Bewertungsmethoden herangezogen werden. Sie werden im folgenden "operative Bewertungsmethoden" genannt (Bild 2). Die Funktionsweise und der prinzipielle Nutzen von operativen Bewertungsmethoden sei an einem einfachen Beispiel erläutert:

Ein Lieferant sucht in einer bestimmten Straße das Haus des Kunden Meier. Er steht an einer beliebigen Stelle der Straße, blickt auf seinen Lieferschein und überlegt: Wie kann ich meinen momentanen Standpunkt beurteilen und wie finde ich zu Meier?

Er könnte auf das nächstgelegene Türschild sehen, den Namen ablesen und so seinen Standpunkt bestimmen. Er hätte die Bewertungsmethode "Namensschild" gewählt; diese wäre jedoch nicht operativ, weil er z. B. aus der Information "ich stehe vor dem Haus von Schmitt" nicht ableiten kann, wie er zu Meier kommt.

Er könnte jedoch auch auf die nächstgelegene Hausnummer sehen und seinen Standpunkt mit der Bewertungsmethode "Hausnummer" bestimmen. Allein mit Hilfe dieser Beurteilung ist es dem Lieferanten möglich, das Haus von Meier direkt und schnellstmöglich anzusteuern, da er die Zielhausnummer (z.B. 64) und die Ausgangshausnummer (z.B. 16) kennt und Hausnummernsysteme in eindeutiger Weise aufgebaut sind. Der Weg zu Meier ist: gehe in Richtung aufsteigender Hausnummern bis "64" erscheint. (Er könnte sogar noch weitere Informationen, z.B. die ungefähre Weglänge ableiten). Somit ist die Beurteilungsmethode "Hausnummer" für den Lieferanten operativ, weil sie zur Zielfindung aktiv nutzbar ist.

Bemerkung: Die *Nutzbarkeit* von operativen Bewertungsmethoden ist immer auch vom Erfahrungswissen des Anwenders abhängig ("Hausnummern sind geordnet"), nicht jedoch die Antwort auf die Frage, ob eine Bewertungsmethode operativ ist oder nicht. Entscheidend für letzteres ist allein die eindeutige und anwenderunabhängige Vorgehensweise zur Zielfindung, wenn das Erfahrungswissen vorausgesetzt wird.

Für die betriebliche Planung, insbesondere wenn Ingenieuraufgaben einbezogen werden sollen, muß eine operative Bewertungsmethode zwei wesentliche Eigenschaften aufweisen:

- Sie muß ein quantifizierendes Planungshilfsmittel darstellen, das die Lösungssuche zu einem vordefinierten Ziel hingrichtet aktiv unterstützt.

- Sie muß dazu beitragen, das Ziel möglichst effektiv anzusteuern, d. h. Gesamtkomplexität bzw. Gesamtkosten der Lösung abteilungsübergreifend möglichst niedrig zu halten.

Solche Werkzeuge existieren bisher nicht.

Besonders wichtig ist ein solches Werkzeug für die teamorientierte Montageplanung, da den Wechselwirkungen zwischen Produktentwicklung und Fertigungsvorbereitung eine besondere Bedeutung zukommt. In diesem Bereich wird der weitaus größte Teil der vermeidbaren Kosten festgelegt [28].

• Spezielle Lösung für die Montageplanung

Ziel dieser Arbeit ist, die Möglichkeiten und Randbedingungen zur Entwicklung von operativen Beurteilungsmethoden mit den genannten Eigenschaften zu untersuchen und ein konkretes Werkzeug für den Bereich der Montageplanung zu erarbeiten.

Zielgruppe für dieses Werkzeug ist das Simultaneous-Engineering-Team, insbesondere die Funktionen Konstruktion und Planung. Für den Produktkonstrukteur soll ein Hilfsmittel entwickelt werden, mit dem er schon während der Konstruktion die von ihm verursachten Montagekosten abschätzen und sofort Wege zur Angleichung an die Zielkosten ableiten kann. Für den Anlagenplaner gilt analog das gleiche. Beide zusammen benötigen ein Instrument, das bei Abweichung von den Zielkosten die jeweiligen Potentiale als Handlungsanstoß aufzeigt. Diese Zielkosten können vom Markt abgeleitet sein oder durch das Team mit Hilfe des zu entwickelnden Werkzeugs definiert werden.

Erarbeitet werden die Ziele mit folgender Struktur:

Zunächst werden die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Planung am Beispiel der Montage untersucht. Dazu werden in Kapitel 2 sowohl die vom Markt her kommenden Anforderungen, als auch die Notwendigkeit eines innerbetrieblichen Komplexitätsmanagements betrachtet. Kapitel 3 beleuchtet Möglichkeiten der Unterstützung des Planungsprozesses durch quantifizierende Methoden. Dazu werden marktorientierte Planungs- und Bewertungsmethoden vorgestellt; insbesondere wird ein für die Montageplanung besonders geeigneter Ansatz erarbeitet. Es zeigt sich, daß zur

erfolgreichen innerbetrieblichen Umsetzung der Marktanforderungen zielorientierte, operative Bewertungsmethoden notwendig sind.

Das Modell der "Zielkostenfunktion" wird in Kapitel 4 entwickelt. Sie stellt eine operative Bewertungsmethode dar. Ausgehend vom übergeordneten Ziel "Kosten" werden die Elemente der Montageplanung abgebildet. In Kapitel 5 und 6 werden die montagegeräte- bzw. produktspezifischen Eigenschaften der Zielkostenfunktion konkretisiert und nutzbar gemacht. Kapitel 7 zeigt die Möglichkeit des Modells als bereichsübergreifenden Regelalgorithmus. Die Möglichkeit der Integration des Modells in ein marktorientiertes Zielkostenmanagement wird dargestellt. Der Bezug zur manuellen Montage wird hergestellt. Die Grenzen und die Genauigkeit des Zielkostenmodells werden untersucht.

• Abgrenzung

Der montageplanungsspezifische Teil wurde mit Hilfe von theoretischen Überlegungen und praktischen Untersuchungen erarbeitet. Das betrachtete Produktspektrum ist überwiegend der Feinmechanik zuzuordnen. Überprüft wurden die Ergebnisse bei Produkten, deren Gesamtmasse kleiner als 5 kg ist.

Für die zu montierenden Produkte wird eine Serienmontage vorausgesetzt. Es wird angenommen, daß die entsprechende Montagelinie im Rahmen der Montageplanung neu konzipiert wird.

Einige Aussagen über den industriellen Wettbewerb wurden vor dem Hintergrund der Automobilindustrie getroffen; sie sind jedoch nie so speziell, daß sie ausschließlich auf diese Branche zutreffen.

An einigen Stellen werden Kostenwerte verwendet. Die absoluten Kostenwerte, auch die der Industriebeispiele, wurden mit Hilfe der entwickelten Funktionen erstellt. Rückschlüsse auf die Gesamtpreise realisierter Anlagen sind auch aus Gründen der nicht betrachteten Gemeinkosten weder beabsichtigt noch möglich. Alle absoluten Kostenangaben in den Funktionen beziehen sich auf das Preis- und Lohnniveau der Bundesrepublik 1994; für andere Randbedingungen können relativ leicht andere Basen eingesetzt werden. An den prinzipiellen Aussagen und der wissenschaftlichen Relevanz ändert sich dadurch nichts.

2 Voraussetzungen erfolgreicher Planung am Beispiel der Montage

2.1 Allgemeine marktwirtschaftliche Erfolgskriterien

2.1.1 Bedeutung der Wettbewerbsfaktoren Kosten, Qualität und Zeit

Die vergangenen Jahre waren durch eine Entwicklung geprägt, in der der Kunde in den Mittelpunkt des Marktgeschehens trat. Verkäufermärkte der Vergangenheit haben sich in Käufermärkte gewandelt – bei Waren wie bei Dienstleistungen. Dafür waren mehrere wichtige Gründe verantwortlich. Die Stagnation des Wachstums, die gleichzeitige technologische Weiterentwicklung insbesondere der Informationstechnik und die Internationalisierung der Märkte haben zu einer Intensivierung des Konkurrenzkampfes beigetragen. Diese Entwicklung wird sich fortsetzen.

Das erfolgreiche Bestehen von Unternehmen erfordert unter diesen Bedingungen eine konsequente Orientierung an den Kaufkriterien des Kunden. Welches sind die für Erfolg oder Mißerfolg von Waren oder Dienstleistungen entscheidenden Wettbewerbsfaktoren?

Langjährige Untersuchungen mit dem Ziel, die für Wachstum und Rentabilität verantwortlichen Erfolgsfaktoren herauszufinden, führten in den USA mit Hilfe der PIMS-Datenbank [11] zu folgendem Ergebnis: Unternehmen mit einem (im Vergleich zur Konkurrenz) hohen relativen Qualitätsstandard hatten einen hohen Return of Investment. Außerdem wurde ein mit der Produktqualität steigender Marktanteil festgestellt, wobei der Return of Investment generell mit dem Marktanteil steigt.

Neuere Untersuchungen von Stalk und Hout [86] zeigen, daß sich Vorteile im Zeitwettbewerb ebenfalls in den klassischen betriebswirtschaftlichen Kenngrößen niederschlagen. Sie gehen davon aus, daß die Zeit für den betrieblichen Erfolg eine herausragende Rolle spielt und daß sich vor allem in Zukunft entscheidende Wettbewerbsvorsprünge nur durch eine Kombination aus schneller Reaktionsfähigkeit und wachsender Vielfalt erzielen lassen.

Eine exemplarische Bestätigung beider Aussagen aus Kundensicht liefert die Marktanalyse eines Elektrounternehmens [100]. Sie weist als die wichtigsten Kaufkriterien Produktqualität, Kaufpreis, Liefertreue und Liefertermin (in dieser Reihenfolge bei geringen Abständen) aus.

Es wird deutlich, daß Kosten, Qualität und Zeit zusammen die entscheidenden Wettbewerbsfaktoren sind. Doch nicht in allen Märkten und Branchen gelten die gleichen Zusammenhänge, die den Ausschlag für wirtschaftlichen Erfolg geben.

- In stark innovationsgeprägten Märkten, wie z.B. der Computerindustrie, hat der Zeitpunkt der Marktpresenz den entscheidenden Einfluß für den wirtschaftlichen Erfolg. Im Rahmen eines Innovationsmanagements sind sowohl Zeitpunkt-, als auch Zeitdauerbetrachtungen wichtig [70].
- In Märkten mit langlebigen Produkten ist Innovation ebenfalls überlebensnotwendig, die Faktoren Qualität und Kosten treten aber relativ gesehen in den Vordergrund.

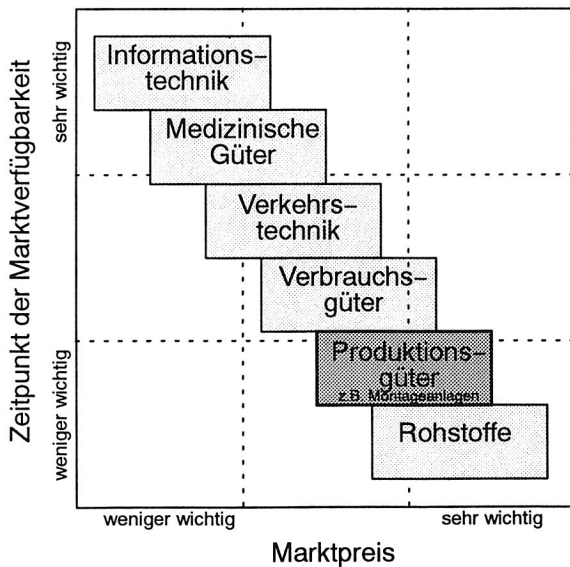


Bild 3 Unterschiedliche Einflüsse auf den Markterfolg von Produktgruppen

Bild 3 zeigt den Einfluß des Kriteriums "Zeitpunkt der Marktverfügbarkeit" eines neuen Produkts auf dessen Markterfolg. Es gilt allgemein, daß in innovationsarmen Branchen (z.B. Rohstoffe) der Marktpreis die dominierende Rolle spielt. Die schnelle Verfügbarkeit und nicht der Preis entscheidet über den Markterfolg in der Informationstechnik, wo neben den unmittelbaren Verkaufserlösen auch das Setzen von technischen Standards für zukünftige Entwicklungen entscheidend ist. Ähnliche Bedeutung hat die schnelle Marktverfügbarkeit z.B. auch in der Arzneimittelentwicklung.

Die Qualität spielt, unabhängig von den aufgezeigten Zusammenhängen, immer eine wichtige Rolle.

Produktionsgüter, wie beispielsweise Werkzeugmaschinen oder Montagegeräte, unterliegen einer relativ niedrigen Innovationsrate. Der Zeitfaktor "Marktverfügbarkeit" ist, relativ zu anderen Produktgruppen gesehen, nicht ausschlaggebend (Bild 3). Wichtiger sind die Faktoren Kosten und Qualität für die Geräte und die zugehörigen Dienstleistungen. Unter Dienstleistungsqualität ist hierbei auch die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Serviceleistungen zu verstehen.

2.1.2 Gegenseitige Abhängigkeit der Wettbewerbsfaktoren

Allgemeingültige Regeln über die Käuferorientierung innerhalb der drei Wettbewerbsfaktoren existieren nicht. Genausowenig existieren eindeutige interne Zwangsmechanismen, die sich auf dem Markt in bestimmter Weise auf die Wettbewerbsfaktoren auswirken. Sicher ist lediglich, daß der Käufer nicht bereit ist, Abstriche gegenüber Konkurrenzanbietern über längere Zeit zu akzeptieren.

Da grundsätzlich auf allen Märkten die Tendenz zu gleichzeitiger Kostensenkung, Terminverkürzung und Qualitätsverbesserung geht, müssen alle Unternehmen diesen Faktoren mit ihrer Marktpresenz nachkommen. Dies läßt sich nur durch individuelle interne Fähigkeiten erreichen, über die alle drei Wettbewerbsfaktoren verbunden sind. Sie sind damit in hohem Maße abhängig voneinander. Modelle, die Zeit/Kosten-Abhängigkeiten z.B. mittels wahrscheinlichkeitsorientierter Beziehungen [12] abbilden und optimieren, sind eher theoretischer Natur.

Der entscheidende Integrationsfaktor der gesamten Wertschöpfungskette ist der Mensch [69]; die Auswirkungen mehr oder weniger erfolgreicher Integration spiegeln sich am Markt in den produzierten Waren und Dienstleistungen wider.

Die gegenseitige Abhängigkeit der drei Wettbewerbsfaktoren soll am Beispiel der Planung vertieft werden. Unter Planung ist hier die Menge aller Aktivitäten zu verstehen, die zur Umsetzung einer Produktidee in ein Serienprodukt (Fertigungsanlauf) notwendig sind. Insbesondere sind die betrieblichen Funktionen Vertrieb, Entwicklung, Fertigungsplanung, Einkauf und Qualitätssicherung beteiligt. In der Literatur wird häufig der Begriff "Entwicklung" für die genannten gesamten Planungsaufgaben benutzt. Diese Begriffswahl wird in den beiden folgenden Literaturreferenzen beibehalten.

Planungs- bzw. Entwicklungszeiten komplexer Produkte und die zugehörigen Kosten (vor allem Personalkosten) wurden lange Zeit als sich generell widersprechende Aspekte angesehen, d.h. man glaubte, daß eine Verkürzung der Planungszeit notwendigerweise eine Erhöhung der notwendigen Entwicklungskosten bedeute. Scherer [77] empfiehlt das integrierte Vorgehen ("concurrent scheduling") nur für den Fall eines schnellen Kapitalrückflusses und plädiert ansonsten für eine serielle Entwicklungsstrategie im Sinne einer Ressourcenschonung.

Die Annahme solch starrer Zusammenhänge ist widerlegt worden. Eine genaue Analyse [13] der Entwicklungsfähigkeiten der internationalen Automobilhersteller zeigt, daß kurze Entwicklungszeiten *ausschließlich* durch ein hohes Maß an Integration aller betroffenen Bereiche und durch entsprechendes paralleles Arbeiten zu erreichen ist. Dies wird mit einem vergleichsweise niedrigen Ingenieuraufwand erreicht, wie Bild 4 zeigt.

Diese Erkenntnisse lassen sich unmittelbar auf die Montage anderer komplexer Serienprodukte übertragen, da die Automobilindustrie durch einen hohen Montagekostenanteil und durch hohen Wettbewerbsdruck gekennzeichnet ist. Dies wird durch Untersuchungen für andere Branchen bestätigt [76].

Hierbei ist zu beachten, daß selbstverständlich auch die Qualitätssicherung Bestandteil des integrierten Vorgehens ist. Bezüglich Bild 4 lassen sich keine signifikanten Aussagen über den zugehörigen Verlauf des Qualitätsniveaus treffen. Beim Versuch, einseitig Personal oder Termine außerhalb der integrierten Vorgehensweise zu kürzen, ist mit einer Qualitätsverschlechterung zu rechnen.

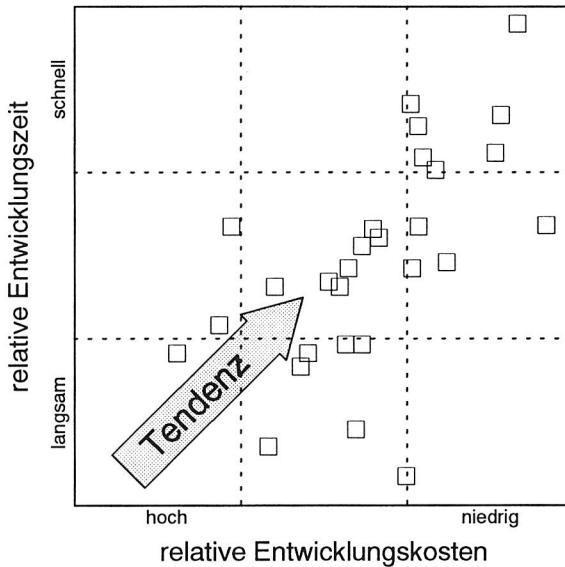


Bild 4 Korrelation zwischen Entwicklungszeit und Entwicklungskosten in der Automobilindustrie (nach [13]). Jeder Punkt entspricht einem Entwicklungsprojekt.

2.2 Innerbetriebliches Komplexitätsmanagement

2.2.1 Der Komplexitätsbegriff

Der allgemeine Komplexitätsbegriff lässt sich sinnvoll mit Hilfe der Systemtechnik einordnen. Die Komplexität erfasst die strukturellen Merkmale eines Systems. Nach Patzak [64] sind die beiden wesentlichen Strukturmerkmale die Konnektivität, die durch die Art und Zahl der Beziehungen bestimmt wird und die Varietät, die durch die Art und Zahl der Elemente bestimmt wird.

Diesen beschreibenden Charakter der Komplexität erweitert G. Warnecke [97] zu einem bewertenden Charakter. Er sieht "Komplexität als Bewertungskriterium systemtechnischer Betrachtungen", das bestimmt ist durch

- Systemgrenzen und -inhalt, das heißt Menge der Elemente, Eigenschaften und Funktionen sowie Relationen und Regeln,
- Detaillierungs- und Beschreibungsgrad,
- Vorhersagbarkeit des Systemverhaltens...".

Dabei ist stets zu berücksichtigen, daß "Wissen und Erkenntnisfähigkeit" den Komplexitätsgrad eines Systems mitbestimmen.

Häufig wird der Komplexitätsbegriff anwendungs- bzw. problemorientiert interpretiert. Ein Beispiel ist z.B. Komplexität als Kenngröße für den Fertigungsaufwand eines Kabelsatzes [53]. Sie wird abgeleitet aus Strukturmerkmalen und Zeitaufnahmen zugehöriger Einzelverrichtungen und beschreibt empirisch die Fertigungskosten (manuelle Fertigung) für die Varianten eines Produkttyps.

Unmittelbar auf die Variantenvielfalt eines Produkts bezieht sich "Produktkomplexität" bei Eversheim [30]. Der von Schmaus [78] benutzte Begriff "Handhabungskomplexität" repräsentiert die Anforderungen eines Montagevorgangs an die Anlagentechnik (z.B. Art der Steuerung, Positioniergenauigkeit, ..).

- Welchen Anforderungen müßte eine Definition genügen, um für die betriebliche Praxis geeignet zu sein? Wie könnte sie lauten?

Sie muß allgemein genug sein, um mindestens dem System "Betrieb" gerecht zu werden und muß speziell genug sein, um nutzbringend in aktive betriebliche Prozesse eingebunden werden zu können. Die wichtigsten aktiven betrieblichen Prozesse betreffen das Lösen von betrieblichen Problemen, die gerade durch die Komplexität als Merkmal der Systemstruktur mitverursacht werden. Komplexität als Maß ist als relative Größe zu sehen, die für ein definiertes Umfeld gilt.

Es ist folgende Definition sinnvoll:

Komplexität ist ein relatives Maß für den Zeitverbrauch oder die Kosten zur Lösung betrieblicher Problemstellungen. Bezugsgröße ist die Lösung eines Bezugsproblems.

Hinweis: Lösungen für unterschiedliche Probleme mit gleichem Zeitverbrauch oder gleichen Kosten müssen nach dieser Definition nicht gleich komplex sein.

2.2.2 Beherrschung und Reduzierung von Komplexität

Eine Möglichkeit der ständig wachsenden Komplexität in Zukunft zu begegnen, ist deren Verarbeitung mit Hilfe von rechnergestütztem Produktionswissen, was mit Hilfe von Systemen mit Künstlicher Intelligenz (Expertensystemen) möglich wäre [97]. Allgemein läßt sich durch Rechnerintegration die "offenbar werdende" Komplexität verringern [84]. Solche Ansätze sind jedoch kritisch zu betrachten, da durch Rechnersysteme zunächst nur die Menge der Routinetätigkeiten verringert wird. Die Komplexität für den Bediener kann durch das notwendige rechnerspezifische Wissen und die Überprüfung der Ergebnisse wieder deutlich ansteigen.

Eine andere Möglichkeit, auf komplexer werdende Strukturen zu reagieren, ist Dezentralisierung und Bildung autonomer Strukturen [52]. Damit wird zunächst nur der überproportionale Aufwandsanteil (siehe Kapitel 1) reduziert.

Der Vorteil autonomer Strukturen liegt in einem anderen Bereich: Wird Komplexität in einem "bottom-up"-Verfahren, z.B. im Rahmen von Gruppenarbeit oder Teamorientierter Produktion [90] aufgearbeitet, so läuft dieser Prozeß stabiler gegenüber Störeinflüssen unterschiedlichster Art ab, als in einer per "top-down"-Verfahren zentral gelenkten Betriebseinheit.

Noch effizienter ist es, Möglichkeiten zu besitzen oder zu entwickeln, die das Anwachsen der Komplexität verhindern oder diese gar verringern.

Wildemann [101] sieht den Komplexitätsabbau in erster Linie als Aufgabe an die Fabrikstruktur. Sie muß dahingehend verändert werden, daß die Ungewißheit auf ein Maß reduziert wird, das der menschlichen Problemlösungskapazität entspricht. Die Bewältigung der verbleibenden Komplexität muß durch ein Ablaufkonzept der Prozeßketten erfolgen.

In jedem Fall ist die Reduzierung von Komplexität eine vorrangige Managementaufgabe [84].

Wesentlich ist jedoch sicher auch die Verringerung der Komplexität, die unmittelbar durch das Produkt verursacht wird. Dies wurde in der Vergangenheit z.B. im Rahmen der Montagegerechten Produktgestaltung teils erfolgreich, teils weniger erfolgreich versucht. Wie die beiden folgenden Beispiele zeigen, ist es jedoch unbedingt notwendig, Komplexitätsreduzierung in einem weiteren Zusammenhang als Montagegerechte Produktgestaltung zu sehen.

Variante A weiterentwickelt zu Variante B

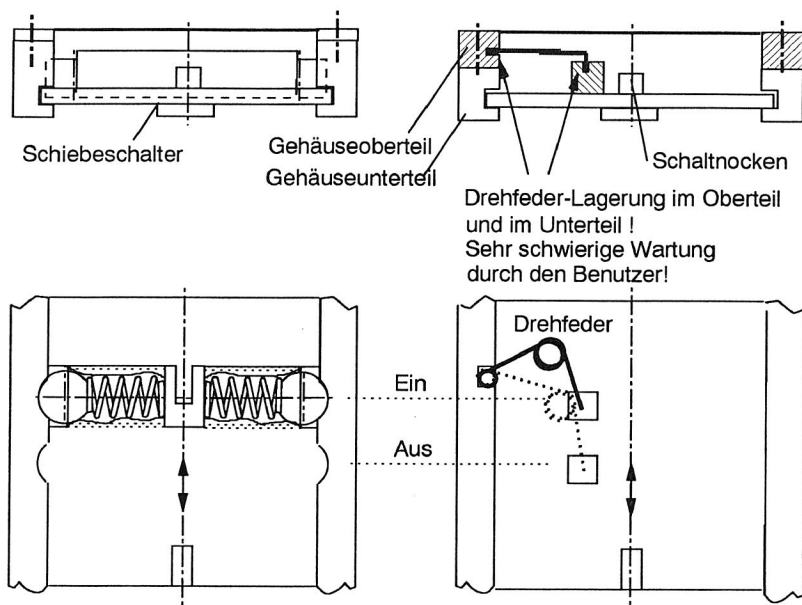


Bild 5 Erhöhte Gebrauchskomplexität bei Variante B (gegenüber A) durch kompliziertere Demontage. A wurde aus Kostengründen zu B weiterentwickelt.

In der Praxis besteht das Problem, daß Herstellkosten-Einsparungen durch montagegerechte Produktgestaltung zu einer aus Kundensicht verschlechterten Bedienoberfläche führen könnten. Dies betrifft sowohl den ständigen Gebrauch, als auch die Gebrauchseigenschaften bei Reinigung, Wartung oder Reparatur eines Geräts.

Die Veränderung der Gebrauchseigenschaften kann man mit dem Begriff "Gebrauchskomplexität" beschreiben. Im folgenden Beispiel ging mit der Herstellkostensenkung eine Erhöhung der Gebrauchskomplexität einher (ungünstig).

Bild 5 skizziert Teile eines technischen Haushaltsgeräts (Rasierapparat), bei dem der mechanische Ein/Aus-Schalter umkonstruiert wurde. Die ursprüngliche Variante A besteht aus Gehäuseoberteil und -unterteil, die miteinander verschraubt sind (Bild 5 links oben). Im Unterteil montiert ist ein Schiebeschalter, der in der Gehäusewand verschiebbar gelagert ist. Dieser rastet mit zwei über Federn angedrückte Rollen in den Positionen "Ein"

und "Aus" in Gehäuseaussparungen ein (Bild 5 links unten). Die Mechanik ist relativ aufwendig, aber robust und gut demontierbar. Eine gelegentliche Innenreinigung ist möglich.

Aus Kostengründen wurde Variante A zu Variante B umkonstruiert. Dabei wurde die Ein/Aus-Einrastmechanik durch eine Drehfeder ersetzt, die in den Stellungen "Ein" und "Aus" stabile Positionen des Schiebers gewährleistet (Bild 5 rechts unten). Ein Ende der Drehfeder ist im Oberteil, das andere im Unterteil gelagert (Bild 5 rechts oben), so daß bei einer Demontage die Feder aus der Lagerung springt. Eine Montage ist für den Laien nicht möglich (Unzugänglichkeit der Lagerstellen). Eine Reinigung des Geräts ist somit für den Benutzer unmöglich und führte zu Kundenunzufriedenheit.

Dieses Beispiel zeigt die Gefahr einer Erhöhung der Gebrauchskomplexität bei Verbesserung der Montagegerechtigkeit der Konstruktion. Ein unmittelbarer kausaler Zusammenhang besteht jedoch nicht.

Zahlreiche Praxisfälle zeigen, daß eine konstruktiv bedingte Senkung der Herstellkosten gleichzeitig auch zu einer Verbesserung der Gebrauchseigenschaften führen kann.

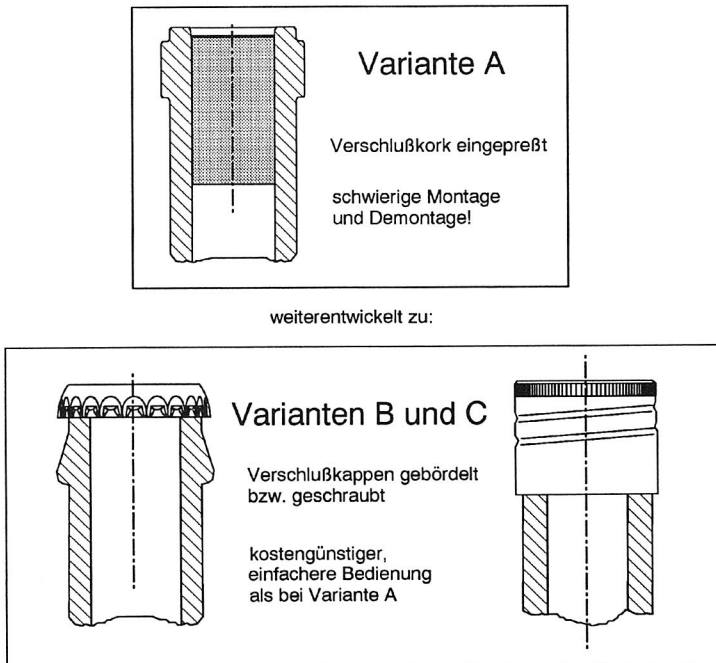


Bild 6 Senkung der Gebrauchskomplexität in Verbindung mit Kostensenkung.

Ein einfaches Beispiel stellt die Entwicklung des Massenartikels "Flaschenverschluß" dar. Die ursprüngliche Methode des Einpressens eines zylindrischen Korks (Bild 6, Variante A) wurde weitgehend ersetzt durch den Kronenkorken bzw. den Schraubverschluß (Bild 6, Varianten B und C). Die Varianten B und C sind einfacher zu bedienen (Demontage) als Variante A. C ist zudem wiederverschließbar. B und C weisen somit eine geringere Gebrauchskomplexität als A auf. Außerdem sind die Varianten B und C kostengünstiger herzustellen!

Als Fazit ist festzuhalten, daß zur Montagegerechten Produktgestaltung weitere komplexitätsorientierte Aspekte (z.B. Gebrauchskomplexität) zu beachten sind, um den gesamten Produktentstehungsprozeß zu optimieren. Erste wissenschaftliche Ansätze versuchen, "Design for Assembly" und "Design for Service" zu integrieren [6].

2.2.3 Komplexitätsmanagement

Die Reduzierung von Komplexität ist neben den strukturellen und organisatorischen Fragen auch eng an die zur Verfügung stehenden Hilfsmittel und Werkzeuge gebunden. Diese müssen möglichst marktorientiert sein, d.h. sie müssen sich darauf konzentrieren, direkt zwischen Marktanforderungen und betrieblichen Aufgaben zu vermitteln (Bild 7).

Um Teiloptimierungen zu vermeiden, ist ein ganzheitlicher Ansatz zur Komplexitätsreduzierung erforderlich; dieser wird zum "Komplexitätsmanagement" definiert.

Komplexitätsmanagement bedeutet Minimierung der Gesamtkomplexität aller betrieblichen Problemstellungen unter Einbeziehung aller Wechselwirkungen.

Im weiteren wird schwerpunktmäßig der Bereich der Montageplanung betrachtet, der in Bild 7 durch die betrieblichen Funktionen Produktkonstruktion und Montagegeräteplanung angenähert wird. Dabei wird darauf geachtet, daß das Komplexitätsmanagement für die Montageplanung weitgehend unabhängig von den anderen betrieblichen Aufgaben bleibt.

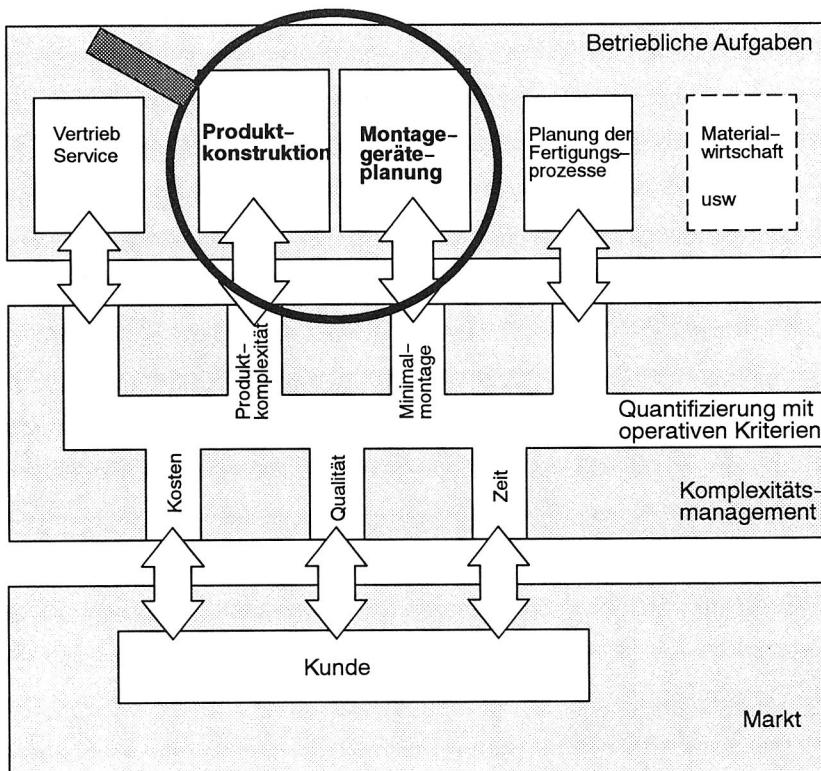


Bild 7 Komplexitätsmanagement zwischen Markt und betrieblichen Aufgaben

2.3 Spezielle Randbedingungen für die Montageplanung

2.3.1 Ziele und Aufgaben der Montageplanung

Die Ziele der Montageplanung müssen aus den Kundenwünschen abgeleitet und entsprechend den firmenspezifischen Möglichkeiten bearbeitet werden. Dabei müssen sowohl die Kundenwünsche als auch die eigenen Möglichkeiten als dynamischer Prozeß angesehen werden.

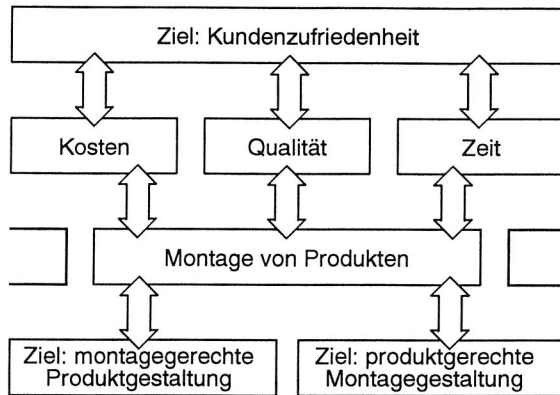


Bild 8 Die hierarchischen Ziele der Montageplanung

Am Anfang der Montageplanung steht die montagegerechte Produktgestaltung. Dabei ist zu beachten, daß "Montagegerechtigkeit" kein absoluter, sondern stets ein situations-, produkt- und unternehmensspezifischer Begriff ist, der durch Stückzahlen, Variantenvielfalt, verfügbare Anlagen, Firmen-Know-How u.a. beeinflusst wird [29].

Ein allgemein sinnvoller Weg ist die Minimierung der Anzahl der Einzelteile. Dazu ist es oft sinnvoll, scheinbare Mehrkosten für Funktionsintegration in Kauf zu nehmen. Eine genaue Wirtschaftlichkeitsrechnung dieser Frage ist sehr schwer durchzuführen, da z.B. die gesamten Logistik-Kosten durch Mehrteile selten exakt zu ermitteln sind. So kann die Rechnung zu Ungunsten der Teilereduzierung verfälscht werden. Ein großes Rationalisierungspotential durch Funktionsintegration birgt die Schnittstelle von Mechanik und Elektronik [32].

Nach der, besser parallel zur montagegerechten Produktgestaltung besteht die Notwendigkeit zur "produktgerechten Montagegestaltung", d.h. die an den Wettbewerbskriterien Kosten, Qualität und Zeit orientierte Planung der Montageanlagen. Die Gesamthierarchie der Ziele zeigt Bild 8.

Vor Beginn der Montageplanung werden offen oder stillschweigend allgemeine und spezielle Zielkriterien der Montageaufgabe definiert. Dabei ist zwischen "Mußkriterien"

und "Sollkriterien" zu unterscheiden (Bild 9). Mußkriterien sind ohne Einschränkung, Sollkriterien nach Möglichkeit durch die Montageplanung zu erfüllen.

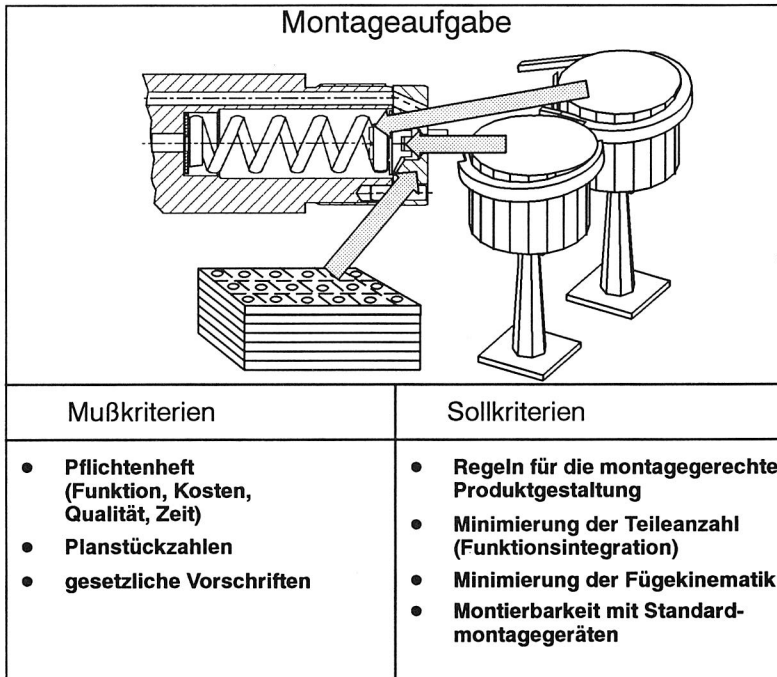


Bild 9 *Allgemeine Muß- und Sollkriterien zur Lösung der Montageaufgabe*

Diese allgemeinen Ziele und Kriterien müssen nun in einem firmenspezifischen Weg in konkrete Handlungsrahmen und Verantwortlichkeiten eingebunden werden (Bild 10). Eine allgemeingültige Definition oder Struktur existiert nicht. Unter Montageplanung werden im folgenden alle bis zum Serienanlauf planmäßig durchgeführten Dienstleistungen zusammengefaßt, deren Ergebnisse Einfluß auf die Montage haben.

Ablauf und Möglichkeiten der Montageplanung hängen auch von den verfügbaren Hilfsmitteln ab; insbesondere die Rechnerintegration eröffnet dem Planungsprozeß völlig neue Perspektiven [34].

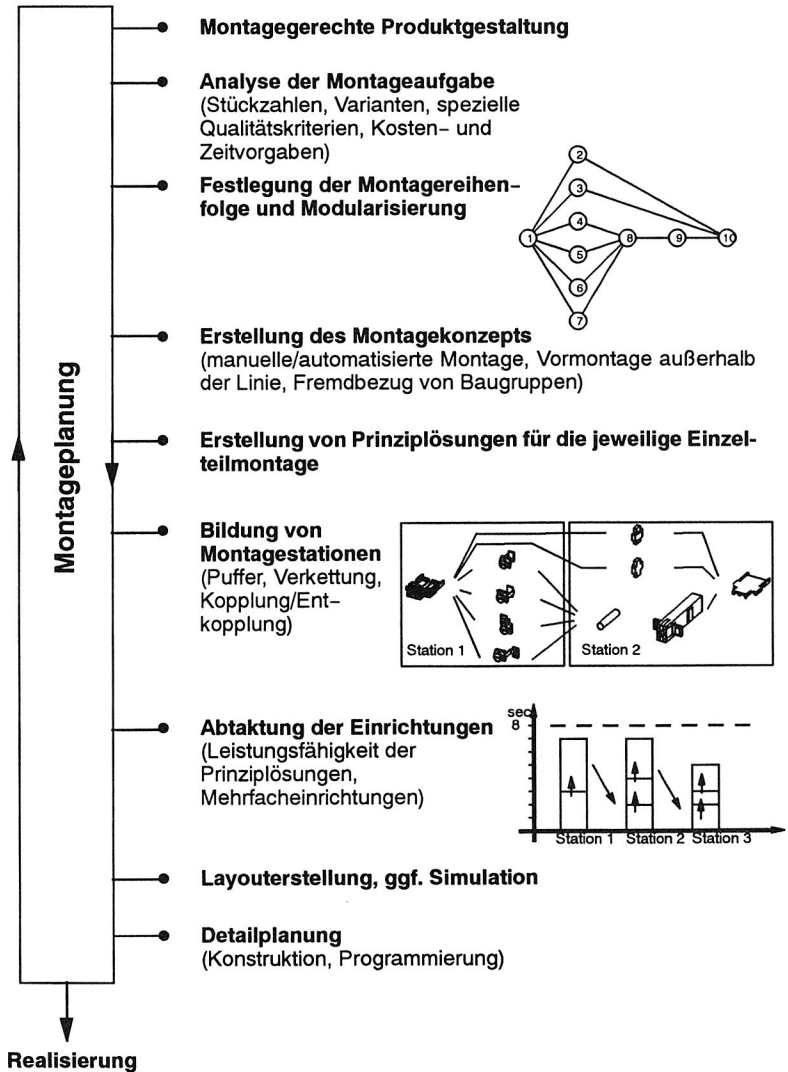


Bild 10 Aufgaben der Montageplanung (ergänzte Grafik nach Geyer [36])

2.3.2 Termingerechte Montageplanung

In der Regel bestehen bereits zu Beginn von Planungen sehr konkrete Vorstellungen, oft sogar verbindliche Verpflichtungen, über den Abschluß der Realisierungsphase einer Montageaufgabe. Abweichungen von diesen Planungen können bei externen Aufträgen zu empfindlichen Konventionalstrafen oder zu Forderungen über die Ausfallhaftung führen. Die Folgen interner Terminüberschreitungen können ebenfalls erheblich sein. Die Konsequenz muß eine entsprechend restriktive Montageplanung sein.

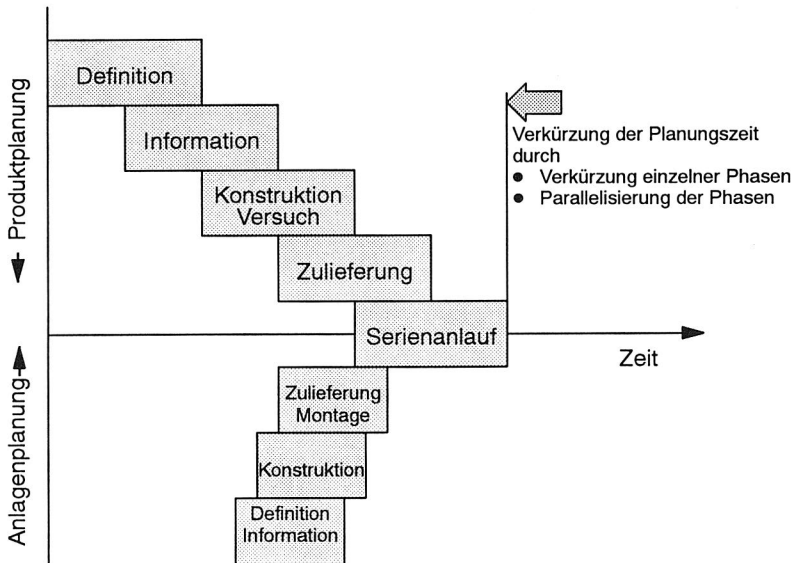


Bild 11 Entstehung und Beeinflussung der Planungsphasen für die Montage

Bild 11 zeigt schematisch einen Montageplanungsvorgang und die beiden Möglichkeiten der Verkürzung der Planungszeit. Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung der Zeitverkürzungsstrategien ist Erfahrung mit einem integrierten Kosten- und Qualitätsmanagement sowie ein straffes Projektmanagement.

2.3.3 Qualitätsgerechte Montageplanung

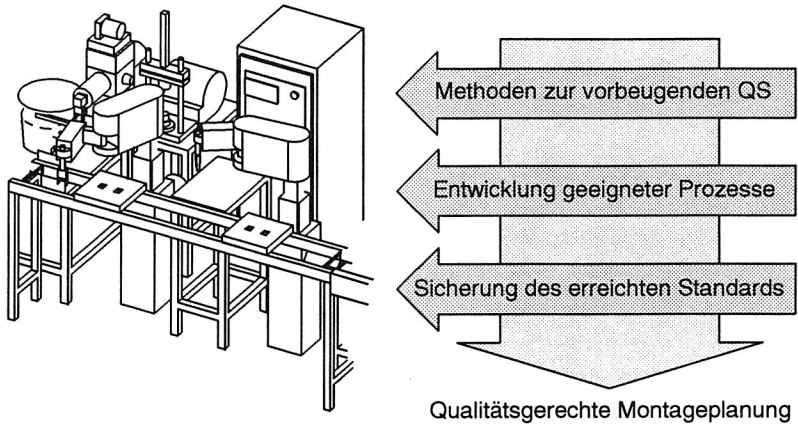


Bild 12 Aufgabengebiete der qualitätsgerechten Montageplanung

Wesentlicher Bestandteil einer integrierten Montageplanung ist die Qualitätsgerechte Montageplanung. Alle Phasen der Montageplanung müssen mit geeigneten Methoden und Hilfsmitteln der Qualitätssicherung unterstützt werden. Entsprechend der zeitlichen Struktur lassen sich drei Hauptphasen unterscheiden (Bild 12), die im einzelnen firmen- und/oder produktspezifische Anwendung erfahren.

Als *Methoden der vorbeugenden Qualitätssicherung* in der Planungsphase können bezeichnet werden:

- Erstellung des Pflichtenhefts
- Konstruktions- und Prozeß-FMEA
- Methoden zur Qualitätsfähigkeitsanalyse [93], z.B. Qualitätsbewertung
- Rückgriff auf Erfahrungen aus früheren Projekten

Die *Entwicklung geeigneter Montageprozesse* wird unterstützt durch den Einsatz von

- bewährten Komponenten
- Prozessen mit firmenspezifischen Erfahrungen
- Baukastensystemen
- Maschinenfähigkeitsuntersuchungen
- Meßgerätefähigkeitsuntersuchungen
- Maschinenabnahme durch Hersteller und Kunden

Zur Sicherung des erreichten Standards über die Planungsphase hinaus sind geeignet:

- Information und Schulung der Mitarbeiter
- Statistische Prozeßregelung
- Meßgeräteüberwachung
- Auswahlprüfung
- Interne und externe Audits

Dort, wo an der Schnittstelle Hersteller/Kunde der Nachweis der erfolgreichen Anwendung einer oder mehrerer der oben aufgeführten Punkte geführt werden muß, haben sich oftmals überbetriebliche Standards etabliert. Die Gründe liegen vor allen in der überbetrieblichen Vergleichbarkeit der Standards und in der Begrenzung des Aufwands für Kunden und Lieferanten. Solche überbetrieblichen Standards können z.B. durch ein Konformitätsbewertungsverfahren auch internationale Anerkennung erfahren.

Standardisierte Verfahren zur vorbeugenden Qualitätssicherung sind in der Automobilindustrie z.B. die FMEA und die Qualitätsbewertung [93]. Produktbezogene Standards sind Prüfzeichen, Gütezeichen [99] und Produktaudits, letztere z.B. nach DIN ISO 9003 [23]. Ein Produktaudit kann ergänzt werden durch ein Verfahrensaudit, z.B. nach DIN ISO 9002 [22].

Um die Vorgehensweise bei Audits zu standardisieren und so eine gegenseitige Anerkennung zu erreichen, wurde das Verfahren der Zertifizierung eingeführt. Wechselseitige Anerkennung und Verbreitung fand die Zertifizierung nach DIN ISO 9000 bis 9004 ([20]–[24]). Im Bereich der Automobil- und deren Zulieferindustrie gilt dies auch für das VDA-Audit [92].

2.3.4 Kostengerechte Montageplanung

Der Anteil der Montagekosten an den Gesamtherstellkosten eines Produkts wird häufig unterschätzt. Dies liegt daran, daß häufig Montagekosten und Endmontagekosten gleichgesetzt werden und Montagekosten von Baugruppen in der nächsthöheren Montagestufe dann in den "Teilekosten" aufgehen (Bild 13). In Wirklichkeit sind die Gesamtmontagekosten eines komplexen Produkts wesentlich höher, wie Bild 13 und die zugehörige Rekursionsformel zeigen.

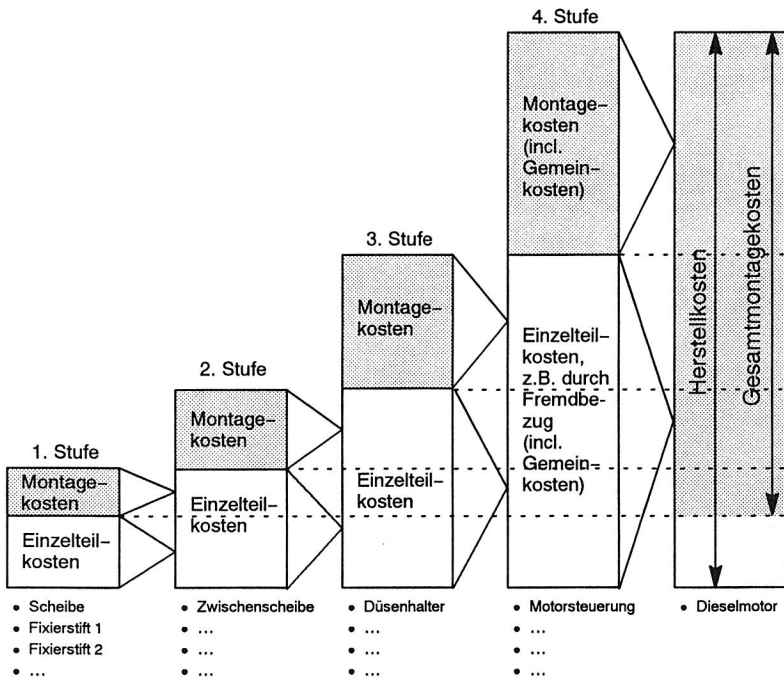


Bild 13 Mehrstufige Entstehung von Montagekosten am Beispiel der Montage eines Dieselmotors

Betrachtet man die Gesamtsumme g_i der Montagekosten der i -ten Stufe bei einem angenommenen Montagekostenanteil a je Stufe ($a = \text{Montagekosten} / \text{Herstellkosten}$), so gilt die Rekursion

$$g_1 = a$$

$$g_n = g_{n-1} + a \cdot (1 - g_{n-1})$$

Für $a=0,4$ ergibt sich bei einer vierstufigen Montage $g_4=0,87$, d.h. bei einem jeweiligen Montagekostenanteil von 40% betragen die Gesamtmontagekosten 87% der Gesamtkosten!

Welche Faktoren begünstigen in der Planungsphase eine kostengerechten Montageplanung?

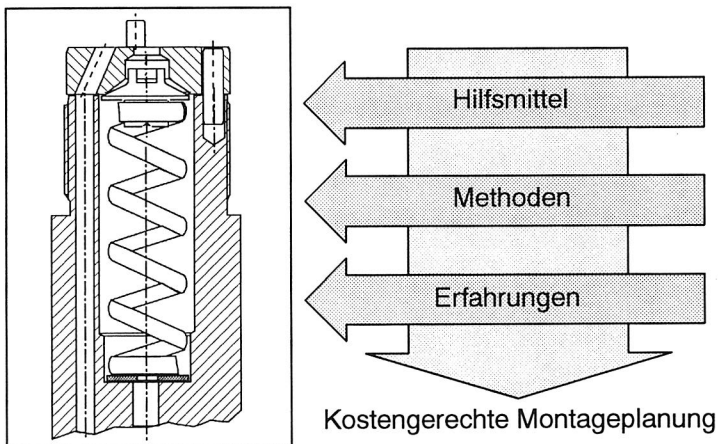


Bild 14 Aufgabenfelder der Kostengerechten Montageplanung

Eine grobe Einteilung der unterstützenden Faktoren in Hilfsmittel, Methoden und Erfahrungen zeigt Bild 14.

Unter *Hilfsmittel* fallen hierbei:

- Kaufteilkataloge
- Betriebliche und überbetriebliche Normen
- Relativkostentabellen
- Kostenauswertungen auf statistischer Basis
- Kalkulationsformeln
- parametrisierte Variantenkonstruktion

Als *Methoden* zur Unterstützung einer Kostengerechten Montageplanung sind in Gebrauch:

- Kostenkalkulation
- Wertanalyse, Wertgestaltung [91]
- Target Costing
- Bewertungsverfahren

Stets werden auch in irgendeiner Form *Erfahrungen* berücksichtigt. Dies kann in sehr unterschiedlicher Form geschehen:

- Datenbanken
- Bauteilbibliotheken
- Beispielsammlungen
- Konstruktionsregeln
- Beratung durch Spezialisten

Wesentliche Voraussetzung für eine wirkliche Kostengerechte Montageplanung ist die integrierte Projektarbeit, die die Aspekte Qualitätsgerechtigkeit und Termingerechtigkeit gleichwertig miteinbeziehen.

3 Unterstützung des Planungsprozesses durch quantifizierende Methoden

Um den Planungsprozeß zu unterstützen und die einzelnen Planungsphasen auf eine betrieblich breit anerkannte Basis zu stellen, wurden quantifizierende Methoden entwickelt. Deren Wirkungsweise und die damit verbundenen Probleme werden im folgenden untersucht. Mit diesen Erkenntnissen werden die speziell für die Montageplanung existierenden quantifizierenden Hilfsmittel untersucht und deren spezielle Defizite offengelegt.

3.1 Bewertung von Alternativlösungen

Eine häufig praktizierte Vorgehensweise zum Erreichen eines mehr oder weniger klar definierten Ziels ist das Sammeln von Lösungsvorschlägen, z.B. in Form einer Ideensammlung oder des Einholens von Angeboten. Der Entscheidungsträger hat anschließend das Problem, aus mehreren in Frage kommenden Alternativen die "beste" auszuwählen. Als beste Alternative muß diejenige gelten, die die innerbetriebliche Leistung am besten in die kundenspezifischen Anforderungen Kosten, Qualität und Zeit umsetzt. Die wichtigsten Beurteilungskriterien werden im folgenden betrachtet.

Die *Nutzwertanalyse* hat ihren Ursprung in der Systemtechnik [102]. Sie wird als Methode zur Alternativenbewertung in den Fällen eingesetzt, in denen Entscheidungsträger auch subjektive Kriterien berücksichtigen wollen oder müssen. Solche Kriterien können z.B. technologische, organisatorische oder mitarbeiterorientierte Ziele, nicht jedoch Kostenziele sein. Kosten müssen auf geeignete Art getrennt gegenübergestellt werden [73].

Sie wird exemplarisch als eine von mehreren Methoden [7] betrachtet, bei denen verschiedene mehr oder weniger unabhängige Zielgrößen durch Gewichtung gegeneinander aufgewogen werden. Der Erfüllungsgrad dieser Zielgrößen ist zu beurteilen.

Wichtig ist in jedem Fall eine klare Formulierung der Ziele. Wegen des großen zeitlichen und organisatorischen Aufwandes wird die Nutzwertanalyse vor allem in folgenden Fällen eingesetzt:

- bei Projekten mit sehr hoher Investitionssumme und eher langfristigen Auswirkungen
- bei komplexen, abteilungsübergreifenden Projekten
- bei Projekten mit vielen nicht finanziell bewertbaren Kriterien

Aufgrund der systembedingten Eigenschaften "Subjektivität" und "großer Aufwand" wird die Nutzwertanalyse weniger zu Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen als zur Bewertung konkurrierender technischer *Lösungskonzepte* eingesetzt. Dort hat sie sich als wertvoll erwiesen [85].

Die *Richtlinie VDI 2225* [94] bietet eine technisch-wirtschaftliche Bewertungsmethodik, die einfacher und mit weniger Arbeitsaufwand verbunden ist, vom Grundsatz her aber gleich der Nutzwertanalyse arbeitet. Sie ist ein spezielles Hilfsmittel für den Konstrukteur. Bewertet werden muß der Erfüllungsgrad der Merkmale einer Liste. Im allgemeinsten Fall sind dies: Funktion, Wirkprinzip, Gestaltung, Sicherheit, Ergonomie, Fertigung, Kontrolle, Montage, Transport, Gebrauch, Instandhaltung, Recycling, Aufwand. Da diese Merkmale normalerweise nicht gewichtet werden, ist die Methodik besonders geeignet für Bewertungen, bei denen verhältnismäßig wenige und gleichgewichtige Bewertungskriterien vorliegen [63]. In der Konzeptphase einer Konstruktion ist dies oft der Fall.

Die *Investitionsrechnung* ist das Standardverfahren zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Investition bzw. alternativer Projekte. Sie wird bei allen Gründen von Investitionen, insbesondere Rationalisierung, Erweiterung, Anlagenersatz, Qualitätsverbesserung und Umweltschutz eingesetzt.

Durch die Abschätzung der mit der Investition verbundenen Kapitalströme und deren Verdichtung zu Kennzahlen wie "Kapitalertragsrate" oder "Amortisationsdauer" werden Entscheidungen vorbereitet. Zur Verknüpfung der einzelnen Kapitalströme existieren verschiedene Verfahren, die in der Regel in

- Statische Verfahren:
Kostenvergleichsrechnung, Rentabilitätsrechnung, Amortisationsrechnung und
- Dynamische Verfahren:
Vermögenswertmethoden (Kapitalwertmethode, Vermögensendwertmethode) und Zinssatzmethoden (interne Zinssatzmethode, Sollzinssatzmethode)

gegliedert werden [3]. Dynamische Verfahren berücksichtigen und bewerten im Gegensatz zu den statischen Verfahren die zeitliche Folge der Kapitalströme. Sie sind genauer, mathematisch und vom benötigten Datenmaterial her aber anspruchsvoller. In kleineren

Betrieben gelten die dynamischen Verfahren als zeitaufwendig und kompliziert. Sie werden in der Praxis vornehmlich in Großbetrieben angewandt [46], [3]. Meist kommen dort mehrere Verfahren parallel zum Einsatz.

Viele nicht oder nur schwer quantifizierbaren Investitionsmotive, zu denen z.B. Qualitätsverbesserung üblicherweise gezählt wird, lassen sich je nach Firmenphilosophie nur über "Nutzwertanalysen" oder "Strategische Ziele" begründen. Daneben arbeiten über 10% der unselbständigen Betriebe und über 30% der eigentümergeführten Betriebe ganz ohne Investitionsrechnung. Mit steigender Betriebsgröße schwindet dieser Anteil; erst ab einer Betriebsgröße von 1000 Mitarbeitern wird stets irgendeine Art von Investitionsrechnung durchgeführt [46]. Außerdem bestehen erhebliche regionale Unterschiede im Verbreitungsgrad von Investitionsrechnungsverfahren [61].

Wichtig für die Unterstützung und Bewertung der Montageplanung ist die Erkenntnis, daß Integrationsansätze bei der Produkt- und Montageplanung derzeit noch nicht befriedigend betriebswirtschaftlich bewertet werden können. Anstatt punktueller Effekte wird in Zukunft die betriebswirtschaftliche Kosten/Nutzen-Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette gelten müssen [68]. Dann läßt sich der Gesamtnutzen z.B. an den sinkenden Änderungskosten aufzeigen.

Zusammenfassend lassen sich einige Erkenntnisse aus den verschiedenen Bewertungsmethoden gewinnen. Die weitverbreiteten Methoden der Bewertung von Kapitalströmen dienen zur Alternativenentscheidung zwischen Projekten, deren Planungsphase (vorerst) abgeschlossen sein muß, da bestenfalls dann die notwendigen Daten vorhanden sind. Die Ergebnisse von Kapitalstrombewertungen dienen der Einordnung des Projektnutzens in das unternehmensstrategische Umfeld (Bild 15). Eine konstruktive Nutzbarkeit der Ergebnisse ist nicht gegeben.

Die Methoden zur Beurteilung des Erfüllungsgrads von Zielkriterien (Nutzwertanalyse, VDI 2225) weisen, angewandt auf die Konstruktionsmethodik, eine bessere Nutzbarkeit bezüglich des aktiven Konstruktionsprozesses auf, da die Schwächen der jeweiligen Varianten offenbar werden und dort der Verbesserungsprozeß ansetzen kann. Für die Beurteilung von Großprojekten kann die Nutzwertanalyse auch von unternehmensstrategischer Bedeutung sein (Bild 15).

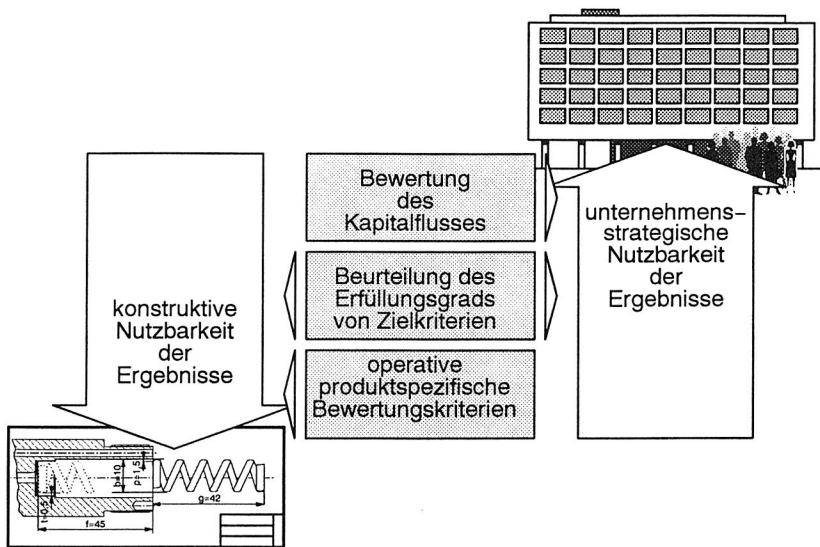


Bild 15 Die betriebliche Nutzbarkeit von Bewertungsergebnissen

Eine weitergehende Methodik, die den Konstrukteur in den operativen Arbeit beeinflussen kann, bietet die Alternativenbewertung vom Grundsatz her nicht, da sie erst nach Beendigung der Planung ansetzt.

Damit ergibt sich eine *grundsätzliche Problematik bei der Alternativenbewertung*: Wurde mit Hilfe einer hier beschriebenen oder verwandten Bewertungsmethode die Entscheidung für eine Alternative getroffen, so bleiben zumindest folgende Fragen unbeantwortet.

- Gibt es andere, nicht berücksichtigte Alternativen, die die Zielkriterien noch besser erfüllen?
- Wie läßt sich eine solche Alternative finden?
- Werden die Annahmen, die als Entscheidungsgrundlage dienen, zutreffend sein?

Diese Fragen offenbaren die Unsicherheit und Ineffizienz, die mit dem Vorgehen der Alternativensuche und -bewertung verknüpft sein kann. Dieses Problem ist durch zusätzliche Optimierungszyklen nicht zu lösen.

Im folgenden wird untersucht, welche anderen Vorgehensweisen möglich sind.

3.2 Zielorientierte Planungs- und Bewertungsmethoden

In diesem Abschnitt werden zielorientierte Planungs- und Bewertungsmethoden vorgestellt, die zur technischen Lösung der Planungsaufgaben beitragen. Das strategisch angelegte Marktorientierte Zielkostenmanagement wird in Kapitel 7.5 behandelt.

3.2.1 Effektivität der zielorientierten Planung

Aus den genannten grundsätzlichen Problemen heraus ist anzustreben, *eine* Lösung für ein Problem der Fertigungstechnik (z.B. Prozeß, Montageaufgabe) anzustreben und gleichzeitig ein Bewertungssystem zur Zielkontrolle zu besitzen (Bild 16).

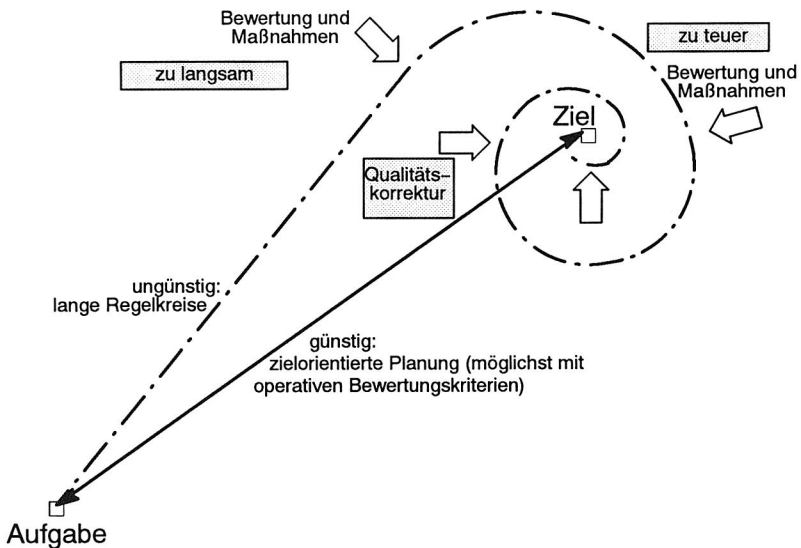


Bild 16 Effektivität zielorientierter Planung

Eine Möglichkeit zur gezielten Regelung betrieblicher Abläufe zeigt Gentner [35] mit der Entwicklung eines Kennzahlensystems auf, das die Effizienz und Effektivität bewertet und optimieren hilft. Es wurde speziell für die Entwicklungs- und Anlaufphase in der Automobilindustrie entwickelt und basiert zum Teil auf eigenen, umfassenden Analysen der Projektarbeit in der Automobilindustrie. Er entwickelte dazu Kennzahlen zur Messung des Projektfortschritts und zur Messung der phasenbezogenen Effizienz sowie gesamtprojektorientierte Kennzahlen. Er integriert dabei Kosten-, Zeit- und Leistungsaspekte.

3.2.2 Maßstabsproblem für die Zielgrößen

Das Hauptproblem der gleichzeitigen Optimierung von Kosten-, Qualitäts- und Zeitmerkmalen einer gegebenen Aufgabe ist der fehlende gemeinsame Wertmaßstab. Dieses Problem ist letztendlich unlösbar. Die eigentliche Lösung ist der *Weg*, Kosten-, Qualitäts- und Zeitmerkmale gemeinsam zu optimieren.

Beispielhaft werden zwei unterschiedliche Wege aus einer Vielzahl denkbarer Wege vorgestellt.

Eine Möglichkeit dieses Problem zu umgehen, liegt darin, den zu optimierenden betrieblichen Prozeß (z.B. Fertigungsprozeß) durch eine Kosten-, eine Qualitäts- und eine Zeitfunktion abzubilden und eine vierte, gesamtprozeßorientierte Optimierungsfunktion zu ermitteln [80]. Diese Optimierungsfunktion muß problemspezifisch und mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden derart ausgewählt werden, daß die Variation eines oder mehrerer Parameter der Optimierungsfunktion die Kosten-, die Qualitäts- und die Zeitfunktion derart gleichzeitig jeweils in ihre Minima regelt. Problematisch an dieser Vorgehensweise ist, daß es keine deterministische Vorgehensweise zum Auffinden einer problemangepaßten Optimierungsfunktion gibt und deshalb sehr genaue Prozeßkenntnisse vorhanden sein oder erst erarbeitet werden müssen. Bei Fertigungsprozessen kann dies z.B. über statistische Versuchsplanung erfolgen.

Ein Beispiel für eine streng deterministische Optimierung beschreibt Ehmann [31]. Ziel ist die Beurteilung und Ausrichtung einer auftragsbezogenen Fertigung bezüglich kundenorientierter Merkmale. Die Optimierung erfolgt in diesem Fall durch einen Algorithmus, der sich mit "Abbildung und Auswertung der kundenbezogenen

Leistungswerte *am Fertigungsauftrag* beschreiben läßt. Er liefert abhängig von der momentanen Situation in einer Fertigung Handlungsanstöße mit dem optimalen Gesamtnutzen. Wesentlich ist, daß die weitverbreitete Suboptimabildung (siehe auch 3.2.3) überwunden wird und die wirklichen marktrelevanten Kosten-, Qualitäts- und Zeitmerkmale direkt am einzelnen Auftrag über die gesamte Prozeßkette hinweg abgebildet und nicht mittels Hilfsgrößen zugeordnet werden.

3.2.3 Ursachenanalyse nicht erfolgreicher Optimierung bei zwei zielorientierten Ansätzen aus der Praxis

In der betrieblichen Praxis wird häufig versucht, durch Optimierung der nicht produktbezogenen betrieblichen Größen

- Umlaufbestände
- Anlagenauslastung
- Effizienz des Personaleinsatzes
- Rohmaterialbestände
- Fehlerkosten je Kostenstelle

kundenbezogene Merkmale von Produkten und Produktion zu verbessern. Ursache für deren Anwendung ist die Hoffnung, durch die Optimierung dieser bereichs- und periodizitätsbezogenen Hilfsgrößen gleichzeitig auch die marktrelevanten Eigenschaften Kosten, Qualität und Zeit des *Fertigungsloses* zu optimieren. Gerade für variantenreiche Fertigungen hat sich dies als Trugschluß erwiesen [25]. Bild 17 veranschaulicht, daß beispielsweise eine Verknüpfung der Aufgaben "Umlaufbestände senken" oder "Anlagenauslastung erhöhen" mit den produktspezifischen Zielen nicht möglich ist.

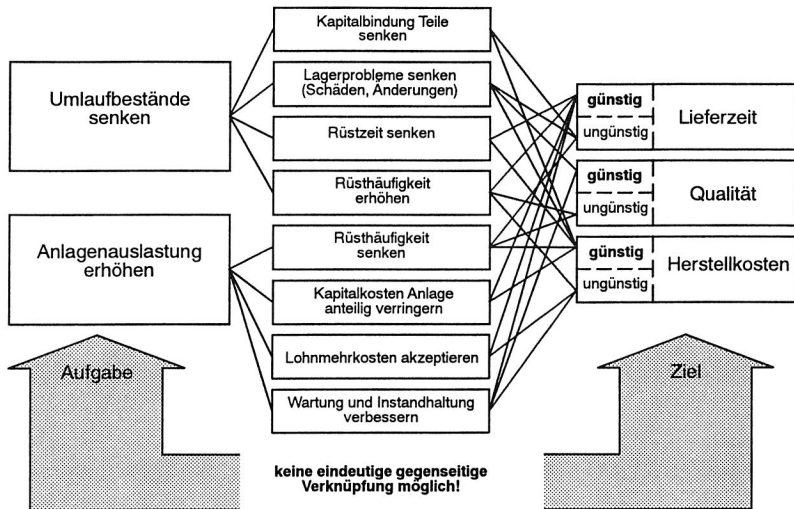


Bild 17 Verknüpfung bereichsbezogener und produktbezogener Merkmale

Während die obigen Teilfunktionen unter bestimmten Randbedingungen durchaus zu Verbesserungen hinsichtlich der marktrelevanten Produktmerkmale beitragen können, existieren in der Praxis aber auch Ansätze, die den Optimierungszweck vollkommen verfehlen. Ein bemerkenswertes Beispiel für einen solchen Irrtum sind die sogenannten "Qualitätskosten".

Die DIN ISO 9004 [24] versteht unter "Qualitätskosten":

- Kosten für die externe Darlegung der Qualitätssicherung und
 - Operative Qualitätskosten
- "Operative Qualitätskosten sind solche Kosten, die bei der Geschäftstätigkeit entstehen, um festgelegte Qualitätslagen zu erreichen und zu sichern" [24]. Eingeschlossen sind
- Fehlerverhütungs- und Prüfkosten, sowie
 - interne und externe Fehlerkosten.

Motivation für die "Qualitätskostenrechnung" ist die Notwendigkeit,

- "daß die Wirtschaftlichkeit des Qualitätssicherungssystems auf kaufmännische Art gemessen wird" und die entsprechenden Konsequenzen daraus gezogen werden".

Die obige Definition ist in derselben oder ähnlichen Form grundlegender Bestandteil zahlreicher Arbeiten zum Thema "Qualitätskosten" ([37], [16]). Als weitere Ziele werden genannt:

- Aufzeigen von Ratiopotential bei qualitätssichernden Aufgaben
- Erkennen von Schwachstellen (Produkt und Fertigung)
- Senkung der Qualitätskosten ohne Qualitätsverschlechterung und Anstieg anderer Kosten

Über Sinn oder Unsinn der "Qualitätskostenrechnung" wurde kontrovers diskutiert ([49], [43]). Ursache dafür ist ein unterschiedliches Verständnis von Ursache und Wirkung bei Kosten und Qualität. Auch wird darauf hingewiesen [42], daß die Qualitätskostendefinition nicht mit dem betriebswirtschaftlichen Kostenbegriff übereinstimmt.

Das moderne Qualitätsverständnis schließt die Erkenntnis mit ein, daß Qualität das Produkt aller Unternehmensleistungen ist und daß die Erzeugung von Produkt-Qualität untrennbarer Bestandteil der Fertigung und deren Dienstleistern ist. Prüf- und Fehlerkosten werden von Entwicklung, Arbeitsvorbereitung und Fertigung wie "normale" Fertigungskosten definiert und verantwortet. Prüfkosten sind deshalb ein Bestandteil der Fertigungskosten und haben isoliert gesehen keine Aussagekraft. Der Qualität an sich losgelöst von der Fertigung (oder einer Dienstleistung) Prüfkosten zuzuweisen, macht keinen Sinn [79]. Eine zusätzliche Addition von anderen Kosten, wie z.B. Fehlerverhütungskosten in Form von Schulungskosten, die einen gänzlich anderen Charakter aufweisen, läßt neben der Aussagekraft auch die Bezugsgröße verloren gehen.

Welcher praktische Nutzen läßt sich hinsichtlich des Erreichens marktrelevanter Ziele erreichen?

Eine Gesamtoptimierung ist ausgeschlossen, da eine Zuordnung von Aufgabe zu Lösung mit den Hilfsgrößen der Qualitätskostenrechnung nicht möglich ist (Bild 18). Die "Qualitätskostenrechnung" ist in der Regel nicht sinnvoll und wird von den meisten Betrieben abgelehnt (vgl. z.B.[75]). Sinnvoll ist dagegen eine Beseitigung von Ursachen für Fehlerkosten, dies wird jedoch durch die Qualitätskostenrechnung der DIN ISO 9004 nicht gefördert.

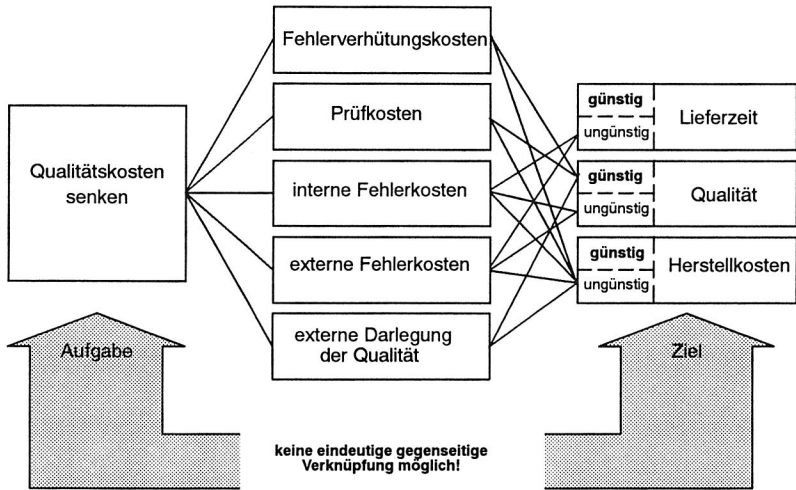


Bild 18 Verknüpfung von Qualitätskosten mit produktbezogenen Merkmalen

3.2.4 Folgerungen für die Montageplanung

Beide in 3.2.3 untersuchten Beispiele hatten das Problem, zur Lösung einer betrieblichen Aufgabe Hilfsgrößen eingesetzt zu haben, von deren Wirkung eine Optimierung der Zielgrößen aus den Bereichen Kosten, Qualität und Zeit erhofft wurde. Beide Ansätze waren nicht erfolgreich. Um ähnliche Fehler für die Montageplanung vermeiden zu können, muß der Weg von der Aufgabe zur Lösung genau betrachtet werden.

Um einen betrieblichen Zielzustand erreichen zu können, muß es möglich sein, auf einem ableitbaren Weg zu einem betrieblichen Zielzustand zu gelangen. Dazu ist die

- Zuordnung zwischen Aufgabe und Lösung

notwendig (Bild 19). Konkret bedeutet dies die Forderung nach

- einer quantifizierenden Methode zur Unterstützung des Produktkonstruktors (Montagegerechte Produktgestaltung) und
- einer quantifizierenden Methode zur Unterstützung des Anlagenplaners (Produktgerechte Montagegestaltung) und
- einer eindeutigen Verknüpfung der beiden Methoden.

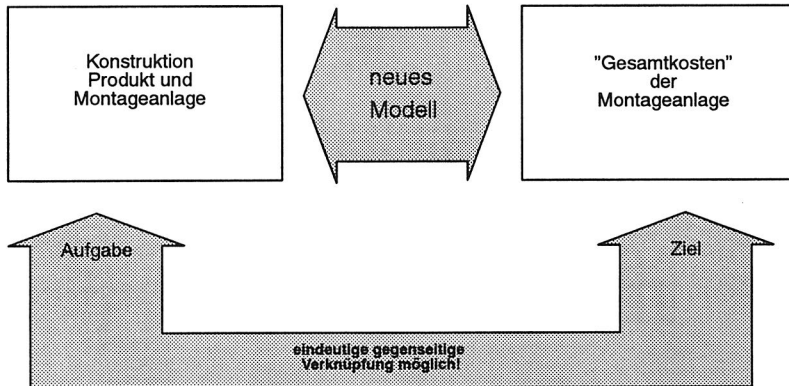


Bild 19 Verknüpfung von Konstruktion und Montageanlagenkosten

Eine solche Zuordnung muß in beiden Richtungen eindeutig sein. Für eventuell einzusetzende Hilfsgrößen gilt das gleiche. Bei den Hilfsgrößen "Umlaufbestände" und "Anlagenauslastung" in 3.2.3 war diese Zuordnungsmöglichkeit nicht gegeben.

Man erhält eine solche Zuordnungsmöglichkeit, indem

- operative Bewertungsmethoden

eingesetzt werden, die dem Konstrukteur bzw. dem Planer unmittelbar konstruktionsrelevante Informationen liefern. Es muß möglich sein, aus der Bewertung heraus Wege zur Verbesserung abzuleiten (Bild 15, Bild 19).

3.2.5 Untersuchung vorhandener Bewertungsmethoden für die Montageplanung bezüglich operativer Eigenschaften

Im folgenden wird untersucht, ob bereits operative Bewertungsmethoden existieren, die den Erkenntnissen aus 3.2.4 Rechnung tragen. Dazu müssen zahlreiche Ansätze in der Literatur betrachtet werden.

Die DFA-Analyse (Design for Assembly) nach Boothroyd [4], [5] zielt ab auf die iterative Optimierung der Produktkonstruktion hinsichtlich der Montagekosten. Erstes Ziel ist die Minimierung der Teileanzahl. Anschließend werden die Montagekosten geschätzt und ggf. Verbesserungsmöglichkeiten gesucht.

Die Montagekosten werden hauptsächlich aus einem die Teileeigenschaften charakterisierenden Code abgeschätzt. Unterschieden wird weiterhin nach der geplanten Montageart (manuell, starr automatisiert, Roboter montage) und getrennt nach Zuführ- und Fügekosten, die aus empirischen Relativkostentabellen und Kosten für Standardgeräte ermittelt werden.

Zur Beurteilung der Produktkonstruktion wird die "design efficiency" definiert, die das Verhältnis der theoretischen Kosten der minimalen Teileanzahl zu den tatsächlichen Kosten (nach DFA) der tatsächlich ausgewählten Teile darstellt.

Das Verfahren eignet sich zur Verbesserung der Produktkonstruktion, verlangt aber viele Detailkenntnisse über den Ablauf der geplanten Montage, da der Maßstab "design efficiency" über die Montagekosten definiert ist. Die Abschätzung der Montagekosten ist andererseits recht grob, da für die Gerätekosten bei n Einzelteilen n Zuführgeräte und n Fügegeräte addiert werden. Diese Annahmen gelten aber nur für sehr einfache Produkte. Die Gestaltung einer Montagelinie wird nicht aktiv unterstützt, somit läßt sich auch kein bereichsübergreifender Regelalgorithmus ableiten.

Rampersad [66] entwickelte eine dazu verwandte DFA-Methode, in der zum einen die Komponenten- und Fügeprozeßeigenschaften, zum andern die montagebezogenen Eigenschaften der Produkte bewertet werden. Die charakteristischen Größen für Komponenten und Montage werden abgebildet durch Teilerfüllungsgrade von Eigenschaften, die zueinander über die gewichteten Einflußgrößen zu zwei dimensionslosen Kennzahlen aufsummiert werden. Auf diese Weise werden Komponenten- und Montageeigenschaften berücksichtigt und es lassen sich Rückschlüsse auf Verbesserungsansätze ziehen.

Die Hitachi Assemblability Evaluation Method (AEM) [56] hat die Optimierung der Konstruktionsqualität zum Ziel. Zur Beurteilung wird die Montage vereinfacht durch ca. 20 Montageprozeßsymbole und je zwei zugeordnete Indices dargestellt. Über diese ergeben sich Kenngrößen für "quality of design" (Evaluation Score; 100% ist optimal) und Kosten.

Die AEM beurteilt weder die Gesamt-Konstruktion noch die Montagelinie, sondern das Montageverfahren als Bindeglied. Die AEM bietet somit einen Kompromiß aus den Elementen Produktkonstruktionsoptimierung und Montagegeräteoptimierung.

Eine Handlungsanleitung existiert insofern, als möglichst nur bestimmte Prozesse aus den 20 festgelegten Symbolen (betreffend einfache Handhabung und Verwendung einfacher Prozesse) zu verwenden sind. So gelangt man iterativ zu Konstruktionen mit günstigeren Kennwerten.

Ebenfalls die Verbesserung der Konstruktionsqualität zum Ziel hat das "Productivity Evaluation System" der Firma Fujitsu [57]. Neben der Montagegerechtheit wird auch die Fertigungsgerechtheit gezielt optimiert. Die Beurteilung und Quantifizierung erfolgt ähnlich wie bei der AEM durch Einordnung der Montagefälle (z.B. Montagerichtung, Verbindungstechnik) in ein festes Schema. Den hinterlegten Fällen sind Indices zugeordnet, aus denen sich Montagezeit und -kosten abschätzen lassen.

Der Verbesserungsprozeß wird aktiv unterstützt durch eine umfangreiche Beispielsammlung, die als Know-How-Speicher und Ideenquelle dient.

Forschungseinrichtungen und Industriefirmen führten gemeinsam das europäische Verbundprojekt "Integrated Design and Assembly Planning" (IDAP) durch. Die Hauptziele waren "Erarbeitung einer Spezifikation zur technisch/methodischen Integration der Produktentwicklung und Montage" sowie "Spezifikation der organisatorischen Integration" [72], [10].

Dazu wurde ein Programm-System geschaffen, bei dem verschiedene Module problemorientiert und anwendergeführt in einem "Methodennetz" kommunizieren und so das Simultaneous Engineering unterstützen.

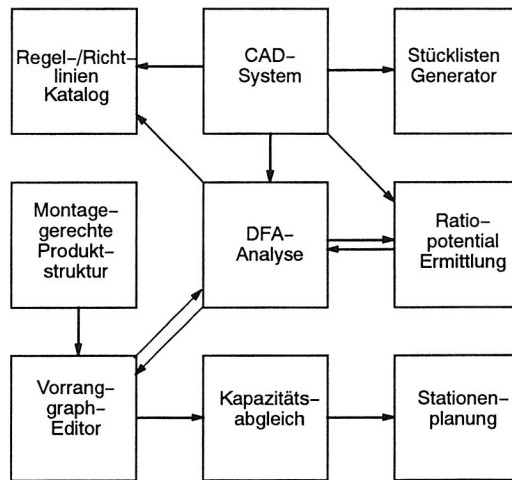


Bild 20 Methoden-Netz des IDAP-Projekts [72]

Die hierbei verwendete DFA-Analyse [54] wurde von der Fa. Lucas bereitgestellt und ist eng mit der oben beschriebenen von Boothroyd verwandt.

Die Ratiopotentialermittlung ist die Berechnung einer Montagekosten-Differenz vor und nach einem Zyklus zur Verbesserung der Produktgestaltung. Die Montagekosten werden hierbei als Summe von Handhabungs-, Bereitstellungs- und Fügekosten abgeschätzt [98],[78]. Die Stationenplanung berechnet die Montagekosten mittels einer Standardkalkulation und berücksichtigt Flexibilitätsanforderungen bei der Planung [10]. Die regelbasierte Montageablaufplanung erzeugt Vorranggraphen, Montage- und Prüfpläne [9], [89].

Das gesamte IDAP-Projekt schafft Grundlagen, um den Simultaneous-Engineering-Prozeß auf breiter Ebene sinnvoll zu unterstützen, die spezifischen Ziele dieser Arbeit werden jedoch nur am Rande berührt.

Die Verfahren von Boothroyd, Hitachi und Fujitsu werden in der Praxis eingesetzt [67], [55], [57], wobei Boothroyd auf über 300 Industrieapplikationen seiner entsprechenden Software verweist [6]. Die IDAP-Methodik wurde in Industrie-Pilotprojekten erprobt [71].

Auf wissenschaftlichem Gebiet gibt es noch weitere Methoden und Hilfsmittel, die oft grundlagenorientiert sind und für die praktische Anwendung individuell aufbereitet werden müssen.

Ein Schwerpunkt ist dabei zunächst das methodische Vorgehen zur Erarbeitung von problemorientierten, angepaßten Hilfsmitteln zum kostenarmen Konstruieren. Ehrlenspiel [27] beschreibt die Grundlagen und zahlreiche Anwendungen und Beispiele aus der Teilefertigung für Einzel- und Kleinserien; die Montage wird bei der Auswahl der Verbindungstechnik unterstützt. Eine solche problemorientierte Methodik läßt sich z.B. dazu verwenden, Zielgrößen durch statistisch abgesicherte Zusammenhänge von Einflußgrößen darzustellen [45].

Die Vorgehensweise nach Bäßler [1] begleitet den gesamten Konstruktionsprozeß von einem sehr frühen Stadium an mit Gestaltungsregeln und einer Bewertung der Montagegerechtigkeit des Produkts. Die Methodik ist mit der Wertanalyse verwandt und fordert einen erheblichen Aufwand an Teamarbeit für jede Konstruktion.

Schmaus [78] beschreibt ein Bewertungsinstrument, das ermöglicht, die Montagekosten(differenz) verschiedener Produktkonstruktionsvarianten zu quantifizieren. Betrachtet werden die drei wichtigsten Montageteilsysteme Teilebereitstellung, Handhabung und Verbindungstechnik. Die relevanten Teilkosten werden aus den *Anforderungen an die Montageteilsysteme* mit unterschiedlichen Methoden exemplarisch ermittelt. Die realisierten Module sind anwendungsnah aufbereitet.

Ein vielseitig einsetzbares Kostenmodell für die Montage wurde von Hartmann [38] entwickelt. Sein Ziel besteht darin, den Werteverzehr in den Ressourcen Personal, Betriebsmittel, Gebäude/Fläche, Material, Information und Finanzen den Montagefunktionen Fügen, Handhaben, Fördern, Kontrollieren und Lagern aufgabenspezifisch und verursachungsgerecht zuzuordnen. Die Kostenrelevanz der Einflußgrößen innerhalb der Teilfunktionen wurde durch eine Umfrage ermittelt. Die Kostenzuordnung erfolgt über entsprechende Nomogramme. Über Referenzwerte läßt sich der wirtschaftlichste Automatisierungsgrad der einzelnen Teilfunktionen ermitteln.

Realisiert wurde auch eine Systematik auf Basis einer datenbankgestützten Produktmodellierung, die außer geometrischen auch funktionale und technologische Informationen enthält [14]. Einzelne rechnergestützte Module zur Unterstützung der montagegerechten Produktgestaltung verarbeiten diese Informationen regel- und maßnahmenorientiert. Theoretisch ließe diese Vorgehensweise auch Raum zur Einbeziehung der Montagegerätegestaltung. Sie würde dann aber wohl zunehmend aufwendiger.

Ein rechnergestütztes Hilfsmittel zur systematischen Unterstützung der Verbindungsgestaltung wurde als Teilprojekt des Sonderforschungsbereichs "Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung" [15] realisiert. Dazu wurde zunächst ein systemtechnisch orientiertes Modell zur Beschreibung von Verbindungen entwickelt. Daraus wurden prinzipielle Gestaltungsstrategien für Neukonstruktionen und Anpassungskonstruktionen entwickelt. Die praktische Unterstützung des Konstrukteurs erfolgt durch ein rechnergestütztes Hilfsmittel, das aus einem Gestaltungsmodul und einem Informationsmodul besteht. Der Gestaltungsmodul ermöglicht das Arbeiten im CAD-System mit vordefinierten Geometrieelementen, die außer geometrischen Informationen auch "Verbindungsfeatures" aufweisen, die z.B. funktionsorientierte Informationen enthalten (z.B. Montagefläche einer Schnappverbindung). Der Informationsmodul ist einerseits ein "Nachschlagewerk" für Verbindungswissen, andererseits werden dem Konstrukteur über direkte datentechnische Anbindung an die Produktfeatures wichtige Konstruktionshinweise gegeben.

Weit über die Geometriemodellierung hinaus geht auch das Konstruktionssystem mfk [50]. Es unterstützt jede Phase des Konstruktionsprozesses durch wissensbasierte Analyse und Synthese der zu konstruierenden Objekte. Die zugrundeliegenden Wissensbasen bestehen aus Fakten, Methoden und Regeln und schließen u.a. auch Dimensionierungsberechnungen, Fragen der Fertigungsgerechtigkeit und Kostenfragen mit ein.

Liu und Fischer [47] entwickelten ein System, das über Gewichtung und Teilerfüllungsgrade von Produktgestaltungskriterien Relativkennzahlen zur Montagegerechtigkeit errechnet. Wesentlich ist, daß die Eingangsgrößen direkt aus dem PDES/STEP-Produktmodell abgeleitet werden und die Zusammenhänge transparent dargestellt werden.

Es existieren auch einige wissensbasierte Systeme speziell zur Unterstützung des montagegerechten Entwurfs [58]. Das entsprechende Wissen entstammt meist Quellen, die in den vorigen Abschnitten erwähnt wurden.

Darüber hinaus existieren noch eine Reihe weiterer rechnergestützter Verfahren, die den Produktentstehungsprozeß in verschiedenen Phasen unterstützen. Ziel der Rechnerunterstützung muß jedoch stets eine situationsangepaßte Informationsversorgung und Kommunikation sein [29] und nicht die Erwartung an eine automatisierte Ergebnisgenerierung.

3.2.6 Defizite der vorhandenen Methoden

Fast alle beschriebenen Hilfsmittel haben mindestens die montagegerechte Produktgestaltung zum Ziel und bieten einen relativen Maßstab als Basis für die Produktverbesserung an.

Warum haben sich die vorhandenen Bewertungsverfahren zur Unterstützung der montagegerechten Gestaltung bisher nur in Ausnahmefällen durchgesetzt?

In einem frühen Stadium der Konstruktion muß eine Kostenbewertung durch den Konstrukteur möglich sein. Diese muß einfach und schnell zu erhalten sein; eine extreme Genauigkeit ist nicht erforderlich. Deshalb erscheint es sinnvoll, *ausschließlich* Daten heranzuziehen, über die der Konstrukteur sehr früh verfügen kann. Dies trifft mit Sicherheit auf Geometriedaten zu. Dieser bisher nicht beschrittene Weg wird im weiteren verfolgt.

Weiterhin ist notwendig, daß das Hilfsmittel transparent und nachvollziehbar für den Konstrukteur ist. Die Anforderungen an eine überbetriebliche Gültigkeit [26] sollten erfüllt sein. Absolutkostenangaben müssen mit geringem Pflegeaufwand aktualisierbar sein.

Über die montagegerechte Produktgestaltung hinaus existieren bisher keine dazu korrelierenden quantifizierenden Hilfsmittel zur *produktgerechten Montagegestaltung*. Hilfsmittel, die die gesamte Montageplanung von einem Ziel her rückwärts mit operativen Bewertungsmethoden unterstützen, existieren ebenfalls nicht. Zur Gesamtkostenoptimierung muß weiterhin ein bereichsübergreifender Regelkreis existieren, der die in allen Planungsphasen momentan vorhandenen Potentiale den Bereichen Konstruktion und Arbeitsvorbereitung getrennt ausweist. Auch dies wird bisher nicht unterstützt.

- Somit flossen nur ein Teil der Erkenntnisse aus 3.2.4 in die vorhandenen Methoden ein. Im folgenden wird ein Modell entwickelt, das alle Erkenntnisse verarbeitet und eine operative Bewertungsmethode liefert.

4 Modell Zielkostenfunktion

4.1 Anforderungen an das Modell

In Übereinstimmung mit den Zielen der Arbeit ergeben sich folgende Anforderungen an das Modell:

- Quantifizierung von Produkt- und Anlagenkonstruktion
- Vorgabe von Zielen für die Montageplanung, insbesondere Kostenzielen
- Aufzeigen von Wegen zur Realisierung der Ziele ("operative Bewertungsmethoden")
- Ausweisen von Potentialen bzw. der Wechselwirkungen zwischen Produkt- und Anlagenkonstruktion während der Planungsphase

Physikalisch-technische Modelle haben die Aufgabe, ein System dahingehend zu vereinfachen, daß interessierende Effekte berechnet oder auf andere Weise dargestellt werden können, ohne daß wesentliche Einflüsse vernachlässigt werden.

Vorzugsweise geht der Ingenieur dabei nach naturwissenschaftlichen Prinzipien vor: Vorhandenes Wissen in Form von Stoffbeziehungen, Kinematik- und Kinetikgleichungen und anderen Bilanzen wird dem Problem entsprechend neu strukturiert und formuliert, bis die interessierenden Effekte darstellbar sind. Gleichzeitig werden Randbedingungen und Annahmen für die Gültigkeit des Modells festgelegt. Anschließend wird der Ingenieur versuchen, die so erhaltenen Ergebnisse – zumindest teilweise – experimentell zu überprüfen.

Nicht immer ist dieses Vorgehen möglich. Häufig werden die Ergebnisse von Experimenten und Beobachtungen in Form von empirischen Kennwerten selbst Bestandteil des Modells. Solche Modelle sind z.B. bei der Auslegung von Maschinenelementen üblich; ein anderer Anwendungsfall, nämlich Kostenmodelle auf Basis statistischer Auswertungen, wurde bereits beschrieben. In solchen Fällen kann durch die Beobachtung und Experimente nicht das Modell an sich, sondern nur der Gültigkeitsbereich überprüft werden.

Für das zu erarbeitende Zielkostenmodell ergibt sich eine zusätzliche Schwierigkeit. Sie steckt in der Forderung "Vorgabe von Zielen ..., insbesondere Kostenzielen". Das Ziel als

Gegenstand der Modellierung ist ein, zumindest vorläufig, theoretischer Zustand, der sich einer objektiven Beobachtung entzieht. Die Überprüfung eines derartigen Modells wird stets subjektive und undefinierte Elemente aufweisen. Um dieses Beobachtungsproblem aus dem eigentlichen Modell herauszuhalten, ist es sinnvoll, zur Modellierung möglichst wenig empirische Daten einfließen zu lassen, sondern soweit als möglich nach der "naturwissenschaftlichen Methode" vorzugehen. Damit kann eine Überprüfung auf unabhängiger Basis erfolgen, sofern man sich über die Grenzen der Aussagekraft im klaren ist.

Eine solche Vorgehensweise wird im Kernbereich des Modells, dem produktspezifischen Teil, gewählt.

4.2 Aufbau und Wirkungsweise der Zielkostenfunktion

Montagekosten werden hauptsächlich durch die Produktionsmittel verursacht; Produktionsmittel werden durch das Produkt verursacht.

Beides soll die Funktion "Montagezielkosten" berücksichtigen. Sie besteht gedanklich und mathematisch aus zwei Faktoren:

Montagezielkosten = Teilekomplexität * Minimalmontagekosten

$$Z = k \cdot m$$

mit

Z: Die Zielkosten für die Montageanlagenplanung (keine Betriebskosten). Die Dimension ist [DM].

m: Die Funktion m beschreibt die Gerätekosten für die bewegungsärmste theoretische Realisierung der Montagekinematik ("Minimalmontage") mit Hilfe von käuflichen Standardmontagegeräten. Sie soll "Minimalmontagekosten" heißen und ist ein Maß für die Grundanforderungen an die "Produktgerechte Montagegestaltung". Die Dimension ist [DM].

In Kapitel 5 wird die Funktion Minimalmontagekosten m grundlegend aufbereitet und für die praktische Nutzung zugänglich gemacht. Ziel ist es dort, mit Hilfe einer geeigneten Parametrisierung der Funktion m eine in beiden Richtungen eindeutige Zuordnung von Montageaufgabe und Lösung (Montagegeräte bzw. -gerätekosten) zu erhalten.

Kapitel 7.3 betrachtet zusätzliche Aspekte der manuellen Montage.

- k: Die Teilekomplexität bezüglich der betrachteten Montageteilaufgabe. Die Teilekomplexität bildet die über die Minimalmontage hinausgehenden, teilespezifischen Anforderungen ab. Die Funktion k ist dimensionslos. Sie ist ein Maß für die durch die Produktkonstruktion definierten Gerätekosten und damit für die "Montagegerechte Produktgestaltung". k wird nur aus geometrischen Parametern konzipiert, da diese in der Konstruktionsphase sehr früh verfügbar sind.

In Kapitel 6 wird der allgemeine Faktor Teilekomplexität k konkretisiert zu drei Einzelfaktoren, die die Handhabungs-, die Fügeprozeß- und die Justagekomplexität eines zu montierenden Einzelteils quantifizieren. Die Größen werden durch theoretische Überlegungen ermittelt und mit Hilfe praktischer Untersuchungen überprüft.

Somit unterstützt das Zielkostenmodell den gesamten Produktentstehungsprozeß einschließlich der Produktionsmittelp lanung. Zielgruppe des vorgestellten Werkzeugs ist folgerichtig das Simultaneous-Engineering-Team.

Bild 21 zeigt das Zusammenwirken der drei Größen Z , k und m am Beispiel eines Schraubprozesses. Grundanforderung an die Kinematik des eigentlichen Schraubprozesses ist die Einleitung einer Rotation in die Schraube (die Handhabung der Schraube ist im Bild nicht dargestellt). Nebenbedingung ist, daß ein Rotationsmodul das erforderliche Drehmoment prinzipiell aufbringen kann. Die Gesamtkosten (exakte Aufgliederung siehe 5.1) dieses Moduls sind in diesem Fall die Minimalmontagekosten m . Es ist jedoch nicht erforderlich, daß dieser Modul in der Lage ist, alle produktkonstruktionsspezifischen Erfordernisse, wie z.B. die Einhaltung der *Drehmomenttoleranz*, zu ermöglichen. Die durch die Produktkonstruktion verursachten Gerätemehrkosten gegenüber der Minimalmontage werden mit dem Faktor Teilekomplexität k beschrieben. Im Schraubbeispiel entspricht dies dann dem Mehrkostenfaktor für einen Elektroschrauber (dessen Notwendigkeit sei vorausgesetzt) gegenüber den Kosten eines pneumatischen

Rotationsmoduls. Die Zielkosten stellen dann die Kosten für die Lösung der der realen Montageaufgabe dar. In 6.4.2 wird ein ähnliches Schraubbeispiel detailliert ausgeführt.

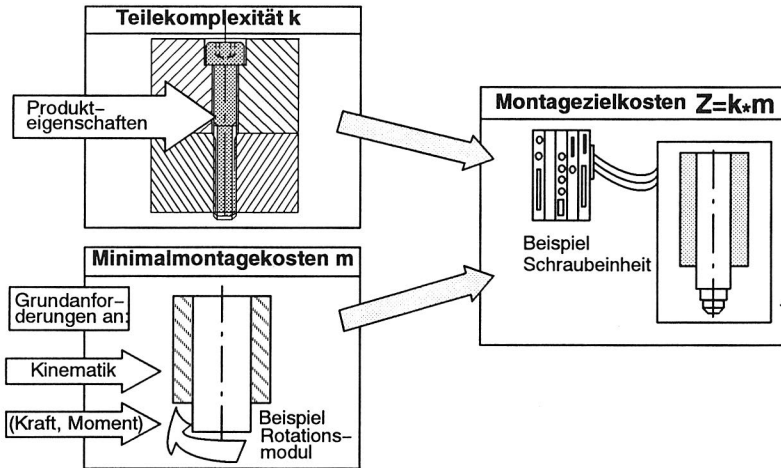


Bild 21 Die Bausteine des Zielkostenmodells

Welche Struktur weist das gewählte Modell auf?

Pickel [65] strukturiert die prinzipiell möglichen Arten von Kostenmodellen. Die Einteilung findet nach der Art der Informationsgewinnung statt:

- Lösungsspeicher
- Algorithmus
- Analogieverfahren
- Simulation
- entsprechende Mischverfahren.

Die Funktion k wird durch ein algorithmisches Verfahren ermittelt. Die Werte von m entstammen einem Lösungsspeicher, der alle Standardmontagegeräte enthält. Zum eindeutigen und schnellen Zugriff wird dieser geeignet parametrisiert.

Ist das Modell prinzipiell geeignet, die gestellten Anforderungen zu erfüllen?

Die gewählte Quantifizierung betrifft sowohl die Aufgabe (Produkt), als auch das Ziel (Kosten). Darüber hinaus lassen sich mit Hilfe von m auch (Zwischen-)Lösungen von Montageaufgaben quantifizieren, indem die tatsächlich verwendeten Geräte in m

eingesetzt werden. Die geforderte operative Bewertung ist in der Zielkostenfunktion enthalten, da alle Kostenfunktionen Funktionen der Produktparameter sind. So erhält man eine Bewertungsmethode mit operativem Charakter, weil Aufgabe und Lösung mit dem gleichen Hilfsmittel quantifiziert werden.

4.3 Beispiel: Montage "Düsenhalter"

Zur Bestätigung des Modells und der darin enthaltenen Thesen wurden mehrere Untersuchungen in der Industrie durchgeführt. Stellvertretend wird ein Beispiel herausgegriffen und durchgängig behandelt. Es dient sowohl zur Erläuterung der theoretischen Entwicklung, als auch zur Verifizierung von Thesen.

An dieser Stelle wird der allgemeine Hintergrund des Beispiels vorgestellt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden verschiedene spezielle Aspekte behandelt.

Das zu montierende Produkt ist der "Düsenhalter". Er ist ein Hochdruckventil des Dieselmotors mit folgenden Aufgaben [74]:

- Beitrag zur Kraftstoffdosierung
- Kraftstoffaufbereitung
- Formung des Einspritzverlaufs
- Abdichten gegen den Brennraum.

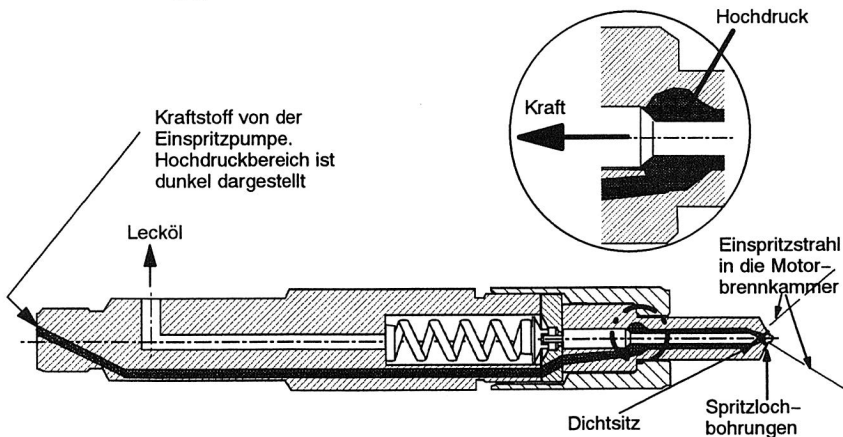


Bild 22 Funktion des Düsenhalters

Der Düsenhalter wird von der Einspritzpumpe mit definiertem Druck angesteuert, hat am Druckniveau "Öffnungsdruck" zu öffnen und ein nach Menge und Geometrie definiertes Strahlbild zu liefern. Die hier betrachtete Konstruktion ist eine Standardbauform für Nutzkraftwagen.

Übersteigt der hydraulische Dieselöl-Druck, den die Einspritzpumpe liefert, das Druckniveau "Öffnungsdruck", so werden die in axialer Richtung wirkenden Druckkräfte auf die Schräge der Düsenadel (siehe Ausschnitt in Bild 22) so groß, daß die Federkraft auf die Düsenadel überwunden wird (vorgespannte Feder). Die Düsenadel bewegt sich aus dem Dichtsitz und öffnet dem Kraftstoff den Weg über die Spritzlochbohrungen in den Brennraum (Bild 22).

Sinkt der Kraftstoffdruck auf der Pumpenseite unter das Niveau "Schließdruck" (niedriger als "Öffnungsdruck"), so schließt das Ventil über die jetzt dominierende Federkraft über den metallischen Dichtsitz.

Über den Federraum des Düsenhalters kann Lecköl abfließen, das im oberen Bereich des Düsenhalters ausgeleitet wird.

Der Düsenhalter wird aus folgenden Einzelteilen montiert:

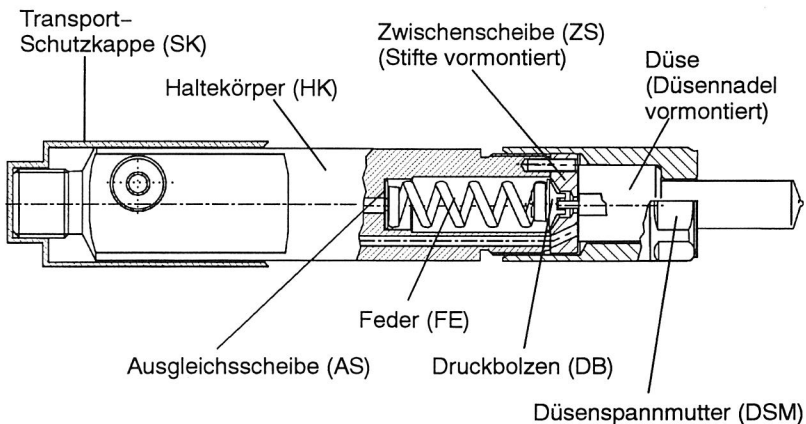


Bild 23 Einzelteile des Düsenhalters

Die wesentliche Montageproblematik liegt darin, die Längentoleranzkette HK-FE-DB-ZS-Düse mittels AS derart auszugleichen, daß die Öffnungsdrucktoleranz eingehalten

wird (siehe auch 6.5). Zusätzliche Schwierigkeiten treten dadurch auf, daß die Ausgleichsscheibe *vor* den entsprechenden Teilen der Toleranzkette gefügt werden muß.

Die Konstruktion muß insgesamt als langjährig optimiert angesehen werden. So konnte das Beispiel nicht unmittelbar auf einen Produktentstehungsprozeß angewandt werden. Statt dessen war es möglich, von einer ausgereiften Konstruktion ausgehend, die Zusammenhänge der einzelnen Teile des Modells, insbesondere hinsichtlich der Kostenauswirkungen, detailliert zu untersuchen.

Versuche zur Produktverbesserung werden aufgrund dieser Randbedingungen nur beispielhaft unternommen (Feder, Druckbolzen: siehe 6.3.1 und 7.1); Möglichkeiten zur Verbesserung der Montageanlagen werden aus unterschiedlichen Blickwinkeln kurz angedeutet (siehe 6.4.2 und 7.4).

5 Abbildung der montagegerätespezifischen Eigenschaften

In diesem Kapitel wird der gerätespezifische Faktor m der Montagezielkosten entwickelt. Dieser berührt in erster Linie die Belange des Anlagenplaners innerhalb eines Simultaneous-Engineering-Teams, während k (Kapitel 6) schwerpunktmäßig den Produktkonstrukteur unterstützt.

5.1 Gesamtkostenbewertung der Montageanlagenplanung

In Montageanlagen werden möglichst viele käufliche Module (z.B. Greifer, Bandstrecken, NC-Achsen, ...) und standardisierte Elemente eingesetzt. Für diese Montagemodule M_i existieren überbetriebliche Erfahrungen in Hinblick auf Kosten-, Qualitäts- und Zeitmerkmale. Die Gesamteigenschaften der Montageanlage ergeben sich aus der Summe der Eigenschaften der einzelnen Montagemodule.

Für die Montageanlagenplanung läßt sich der technische und betriebswirtschaftliche Idealzustand definieren:

- K_{\min} : Kosten nur für Betriebsmittel wertsteigernder Arbeitsgänge
- Q_{\min} : Null Fehler durch Produktionsmittel
- T_{\min} : maximale Anlagenverfügbarkeit ab Inbetriebnahme

Der Grad der Annäherung einer Montageanlage bzw. eines Montagemoduls M_i an diesen Idealzustand läßt sich für Q und T aufgrund vorhandener Erfahrungswerte näherungsweise ebenfalls monetär quantifizieren. Sinnvoll ist es, dazu folgende Funktionen zu betrachten:

- Funktion $Q(M_i)$: Eingriffskosten während der ersten n Betriebsstunden durch das Montagemodul M_i .
- Funktion $T(M_i)$: finanzieller Planungs-, Programmier- und Inbetriebnahmeaufwand durch das Montagemodul M_i
- Funktion $K(M_i)$: Investitionskosten für die Betriebsmittel durch das Montagemodul M_i

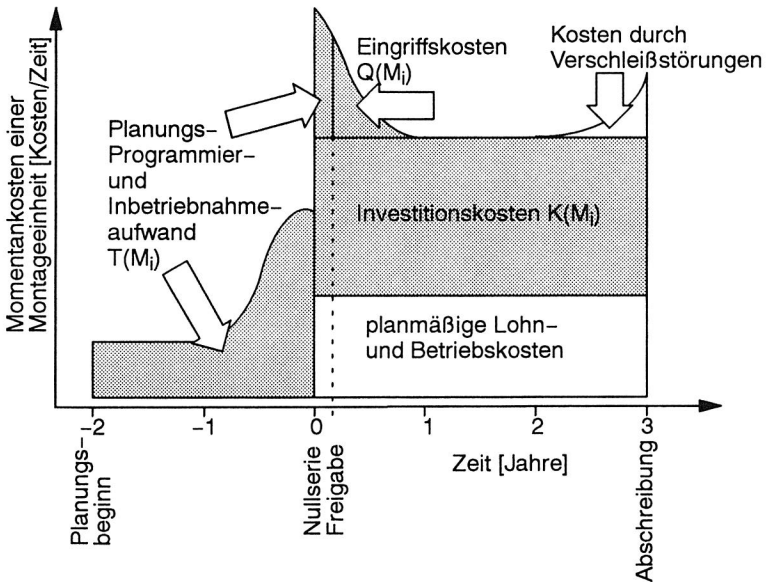


Bild 24 Beispielhafte Kostenentstehung durch die Montageanlagenplanung

Damit werden die wesentlichen Kostenblöcke, die durch die Montageanlagenplanung verursacht werden, abgebildet. Dynamische Kosten, z.B. Kosten durch Verschleißstörungen, lassen sich aufgrund der nicht verallgemeinerbaren Ursachen und Einflüsse nur bedingt berücksichtigen. Bild 24 zeigt die im weiteren Verlauf der Arbeit berücksichtigten Kostenblöcke (dunkel hinterlegt) und die unberücksichtigten Kostenblöcke (weiß).

Die "Gesamtkostenfunktion" G für die Montageanlagenplanung ist

- $G(M_i, M_{i+1}, \dots) = Q(M_i, M_{i+1}, \dots) + K(M_i, M_{i+1}, \dots) + T(M_i, M_{i+1}, \dots)$

Die prozentualen Kostenanteile bei verschiedenen betrachteten Montagemodulen schwanken erheblich: Vergleicht man wie in Bild 25 z.B. die Module "Greifer" und "Bandstrecke", so ist der Planungsaufwand relativ zu den Investitionskosten beim Greifer wesentlich höher. Die Planungssicherheit ist beim Modul "Bandstrecke" höher.

Die durch die "Gesamtkostenfunktion" G abgebildeten Kosten sind eng verwandt, jedoch nicht identisch mit den "Produkt-Gesamtkosten" bzw. "life-cycle-costs", wie sie in VDI

2235 ([95]) beschrieben werden. Unter "Produkt" wäre hierbei die Anlage zu verstehen. Eine exakte Abbildung der Produkt-Gesamtkosten ist unmöglich, da einige Betriebskosten nicht prognostizierbar sind.

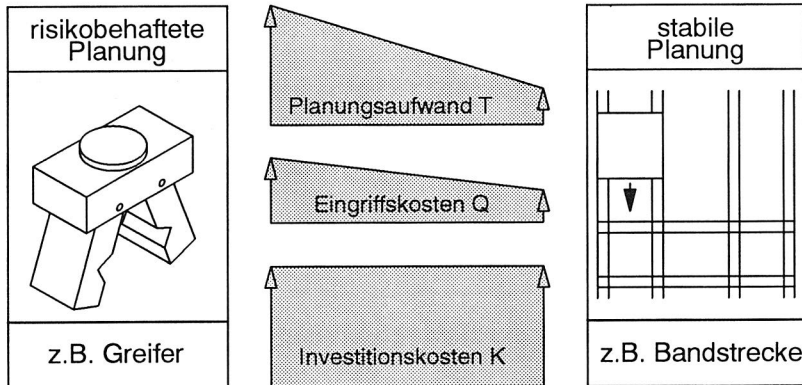


Bild 25 Näherungsweise Abbildung von Erfahrungswerten für käufliche Montage-module

5.2 Untere Schranke Minimalmontage

Montage besteht aus Relativbewegungen von Teilen mit dem Ziel, die Freiheitsgrade in definierter Weise zu verringern. Die Montagebewegung eines zu montierenden Teils läßt sich als fortgesetzte Transformation in 6 Freiheitsgraden darstellen. Zur Realisierung der entsprechenden Kinematik müssen geeignete Geräte und Werkzeuge eingesetzt werden. Die bewegungsärmste theoretische Möglichkeit der Realisierung der Montagekinematik mit Hilfe von käuflichen Standardmontagegeräten heißt *Minimalmontage*.

Bei der Auswahl der Geräte für die Minimalmontage werden übergeordnete Produktparameter, die nicht in der Teilekomplexität hinterlegt sind, berücksichtigt (Bild 26). So haben z.B. Planstückzahlen und das Variantenspektrum Einfluß auf das Gerätespektrum der Minimalmontage. Es können im einen Fall starre Automaten, im andern Fall frei programmierbare Achsen Elemente der Minimalmontage sein.

Für die Taktzeitanalyse und -prognose stehen unabhängige Hilfsmittel zur Verfügung [2].

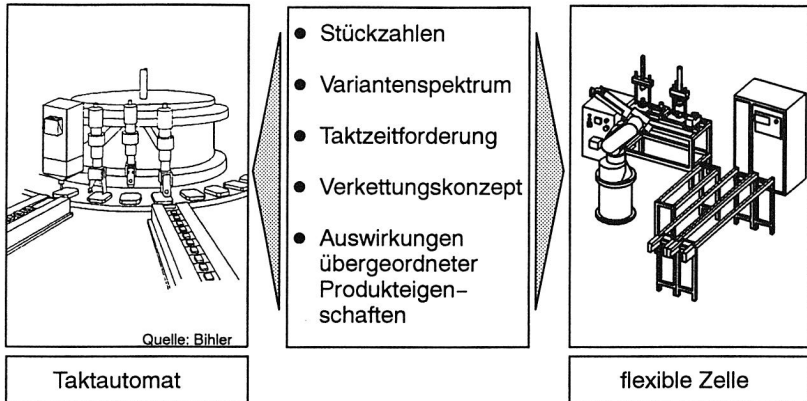


Bild 26 Einflußparameter auf die Minimalmontage

Bei der Wahl des Verkettungskonzepts [48] muß der Planer grundsätzlich entscheiden, inwieweit Transferkonzepte bzw. Funktionsvereinigungen oder Funktionstrennung in Montagestationen anzustreben sind.

Er muß dazu zunächst die Zellenstruktur festlegen. Zwei grundsätzliche Anordnungsmöglichkeiten für Montagestationen stellen die "serielle Zellenstruktur" und die "parallele Zellenstruktur" dar (Bild 27), die beide aus der optimal flexiblen (meist theoretischen) Zelle hervorgehen. Die Wahl der im Einzelfall günstigsten hängt neben der erforderlichen Variantenflexibilität auch von der je Variante zu fertigenden Stückzahlen ab und vom Fließkonzept in den vor- und nachgelagerten Fertigungsbereichen ab. Häufig sind Mischformen der beiden prinzipiellen Zellenstrukturen anzutreffen.

So kann es möglich und sinnvoll sein, mit einem Freiheitsgrad bzw. einer Achsbewegung mehrere Montageteilbewegungen auszuführen. Beispiel hierfür sind Längs- und Rundtaktprinzip, wo das Prinzip der "seriellen Zellen" ideal verwirklicht ist.

Die Entscheidung, welches Verkettungskonzept bzw. welche Zellenstruktur in der Minimalmontage Berücksichtigung findet, muß individuell entschieden werden. Einsatzflexibilität, Anpaßflexibilität, Kopplung/Entkopplung von Prozessen und Prüfungen, Wartungs- und Servicefreundlichkeit, Puffermöglichkeiten, Platzbedarf sind die wichtigsten Einflußparameter.

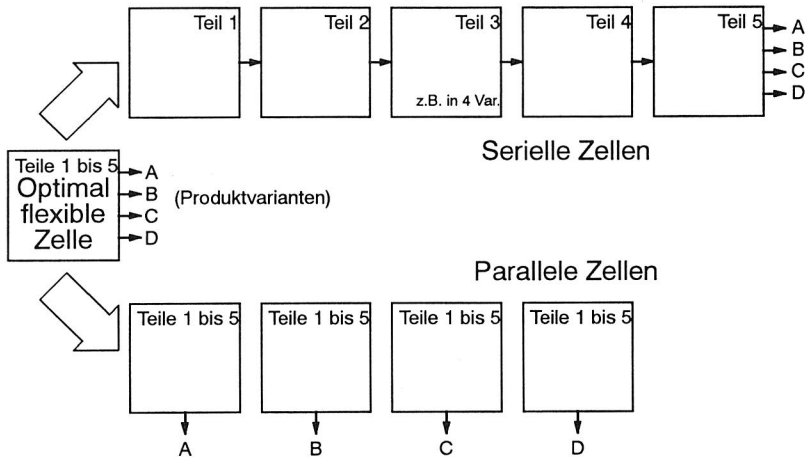


Bild 27 Zellenstruktur für Montagezellen

Ein aufgrund von Werkstoffeigenschaften empfindliches Einzelteil fordert eine andere Zuführkinematik (z.B. Entnahme aus Paletten), als ein gänzlich unempfindliches Einzelteil (z.B. Vibrationswendelförderer). Solche Auswirkungen übergeordneter Produkteigenschaften beeinflussen ebenfalls die Elemente der Minimalmontage.

Grundsätzlich müssen zur Klärung der in Bild 26 zusammengefaßten Einflußparameter firmenspezifische oder allgemeine ingenieurwissenschaftliche Methoden angewandt werden. Das Zielkostenmodell unterstützt das Auffinden der Einflußparameter für die Minimalmontage nicht gezielt.

Die *Minimalmontagekosten* $m(M_i, M_{i+1}, \dots)$ sind die Gesamtkosten der Montageanlagenplanung (gemäß Kap 5.1)

- $m(M_i, M_{i+1}, \dots) = G(M_i, M_{i+1}, \dots)$
- $m(M_i, M_{i+1}, \dots) = Q(M_i, M_{i+1}, \dots) + K(M_i, M_{i+1}, \dots) + T(M_i, M_{i+1}, \dots)$ bzw.
- $m(M_i, M_{i+1}, \dots) = m(M_i) + m(M_{i+1}) + \dots$

der für die *Minimalmontage* benötigten Montagegeräte M_i, M_{i+1}, \dots . Dadurch daß die bewegungsärmste, meist theoretische Möglichkeit zur Montage betrachtet wird, sind die Minimalmontagekosten immer eine untere Schranke für die entstehenden Kosten.

5.3 Systematische Einordnung der Montagegeräte

Um die Montagegeräte (und deren Kosten) eindeutig aus der Montageaufgabe ableiten zu können, müssen charakterisierende Merkmale für die Geräte festgelegt werden. Dies sind die kinematischen Eigenschaften der Geräte. Für Geräte mit gleichen kinematischen Eigenschaften ist es sinnvoll, einen weiteren Differenzierungsparameter zu benutzen.

Mit folgenden 5 Merkmalen lassen sich nicht nur Anforderungen aus der Montageaufgabe und damit an die Montagegeräte charakterisieren, sondern auch die marktgängigen Geräte eindeutig klassifizieren. So wird eine in beiden Richtungen eindeutige Zuordnung von Aufgabe zu Lösung möglich.

"Achse":	rotatorische oder lineare Achse
"Prinzip":	physikalisches Bewegungsprinzip des Montagemoduls (p neumatisch, h ydraulisch, e lektrisch, v ibratorisch, [mechanisch]).
"Punkte":	Anzahl der anfahrbaren Punkte: 1 Punkt ungeführt = 1u (z.B. Pneumatikzylinder, Bandstrecken), 1 Punkt geführt = 1g (z.B. pneum. Linearschlitten, Greifer), n Punkte (für Zuführ-, Palettieraufgaben u.ä.; z.B. Linearmodul mit Schrittmotorantrieb, Rundschaltische), unendlich viele anfahrbare Punkte (bei integrierten Entscheidungen, z.B. NC-Achsen)
"Hub":	erreichbare Weglänge in cm (bzw. Grad)
"Parameter"	zusätzlicher Parameter zur Unterscheidung von Geräten, bei denen alle bisherigen Parameter gleich sind, meist: Belastbarkeit in N.

"Punkte" "Prinzip"	1 Punkt (ungeführt)	1 Punkt (geführt)	n Punkte (z.B. zuführen, palettieren)	u Punkte (integrierte Ent- scheidungen)	kombinato- rische Lösungen
pneumatisch	Pneumatik- zylinder, Rotations- module	Pneumatik- schlitten, Grei- fer, Rotations- module	Servopneum. Linearschlitten, Rund- schaltische)	Servopneu- matische NC- Achsen (rot. und linear)	Magazinier- und Palettier- geräte
hydraulisch	Hydraulik- zylinder, -Motoren	Hydraulische Schlitten und Rotationsmo- dule	Hydraulische Positionier- systeme (rot. und linear)	Hydr. NC- Positionier- systeme (rot. und linear)	●
elektrisch	Band- Strecke, E-Motoren	Linear- und Drehmodule mit Schrittmotorantrieb	Linear- und Drehmodule mit Schrittmotorantrieb	NC-Achsen mit EC-Antrieb (rot. und linear)	z.B. Scara-, 6-Achsen- Knickarmro- boter
vibratorisch	Vibrations- wendelför- derer, Li- nearförderer	○	○	○	○
mechanisch (kurvengesteuert)	●	●	○	○	●

○	Keine entsprechenden Geräte auf dem Markt
●	Komponenten, aber keine Standardgeräte auf dem Markt. Lösungen müssen individuell integriert werden

Bild 28 Zuordnung der Standardmontagemodule zu den Merkmalen "Prinzip" und "Punkte"

5.4 Quantifizierung der Minimalmontage

Durch diese in beiden Richtungen eindeutige Zuordnung von Montageanforderungen zu Montagegeräten ist es aufgrund der Kenntnis der Gerätekosten möglich, den Montageanforderungen verursachungsgerecht Kosten zuzuweisen.

Diese können in einer Datenbasis (Tabellen, Datenbank, etc.) für die käuflichen Geräte hinterlegt werden und mit der Funktion

- $m = m(\text{achse, prinzip, punkte, hub, parameter})$

abgefragt werden. Ausgabewert m sind die Minimalmontagekosten des zugeordneten Geräts, die bei einem einzelnen Gerät immer identisch mit den Gesamtkosten für die Montageanlagenplanung des Geräts sind. Falls ein Parameter nicht aus der Montageaufgabe abgeleitet werden kann, ist aus allen offenen Möglichkeiten die kostengünstigste zu wählen. In der Praxis wird dies lediglich bei "prinzip" häufiger vorkommen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde aufgrund der überschaubaren Größe des Datenmaterials und aus Gründen der Transparenz mit Tabellen und Grafiken gearbeitet.

Bild 29, Bild 30 und Bild 31 zeigen einige wichtige Teilfunktionen. Die Werte m wurden auf die in 5.1 beschriebenen Weise gewonnen. Entsprechende Graphen lassen sich für alle in Bild 28 erwähnten Standardmontagemodule bilden.

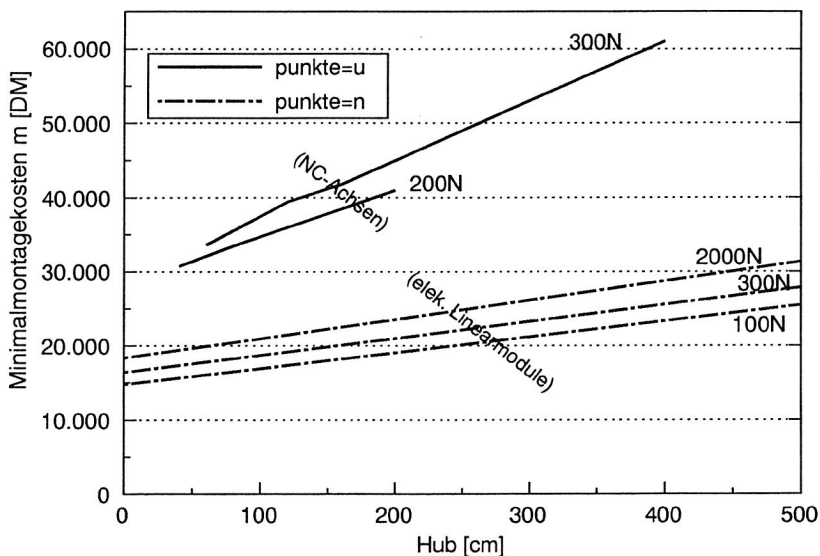


Bild 29 Graphen der Teilfunktionen $m(\text{lin}, \text{elek}, n, \dots, \dots)$ und $m(\text{lin}, \text{elek}, u, \dots, \dots)$

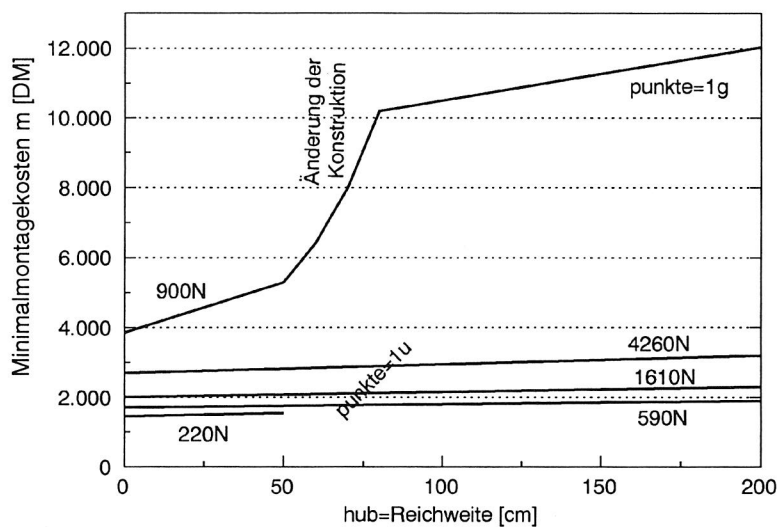


Bild 30 Graphen der Teilfunktionen $m(lin, pneu, 1u, \dots, \dots)$ und $m(lin, pneu, 1g, \dots, \dots)$

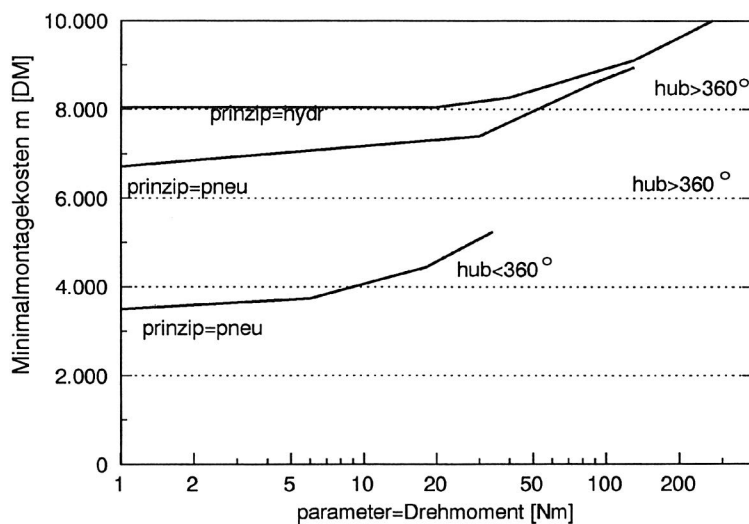


Bild 31 Graphen der Teilfunktion $m(rot, \dots, 1u, \dots, \dots)$

Berücksichtigt sind die käuflichen Grundelemente; diese Menge ist jedoch beliebig erweiterbar durch Modul- und Spezialgeräte. Modulgeräte sind z.B. Knickarm- und Scara-Roboter, die sich voll additiv aus den Eigenschaften der einzelnen Achsen zusammensetzen lassen.

5.5 Zwei Beispiele aus der Düsenhaltermontage

Zunächst soll für die *Handhabung der Feder* des Düsenhalters die Minimalmontage bzw. die Minimalmontagekosten m_H analysiert werden. Folgende Randbedingungen (siehe auch Bild 26) beeinflussen (neben dem Minimalprinzip) die Gestaltung der Minimalmontage:

- (a) Es müssen zwei unterschiedliche Federtypen (Typ 1 und 2) flexibel montiert werden können (Ergebnis der Variantenanalyse).
- (b) Die Federn neigen nicht zum Verhaken und es besteht keine Beschädigungsgefahr.
- (c) Als Verkettungsprinzip wird für die Linie ein Bandsystem gewählt, das Werkstückträger in einzelne Montagestationen fährt.
- (d) Aufgrund der Ergebnisse der Taktzeitanalyse wird ein Vierfach-Werkstückträger eingesetzt.
- (e) Gemäß dem Minimalprinzip wird nach dem Fügen der Feder anschließend sofort der Druckbolzen in die Feder gefügt, ohne daß der Werkstückträger weitertransportiert wird, falls dies von den räumlichen Gegebenheiten her möglich ist. Dies ist hier der Fall. Die Handhabung des Druckbolzens wird zwar hier nicht untersucht, der Platzbedarf auf einer Seite des Bandes muß jedoch berücksichtigt werden (Bild 32). Ebenso verringert (in etwa halbiert) der Zeitbedarf für das Druckbolzenfügen die für die Federmontage zur Verfügung stehende Zeit durch die fest vorgegebene Taktzeit des Werkstückträgers.

Die Überlegungen zur Festlegung der Minimalmontage bzw. der Minimalmontagekosten könnten so aussehen:

Aufgrund der Randbedingung (b) ist zum Ordnen und zum Transport der Feder das kostengünstigste Gerät auszuwählen, das eine Bewegung mit dem Aufgabenprofil: (annähernd) lineare, ungeführte Bewegung auf Anschlag über 50 cm (geschätzte notwendige Mindestentfernung bei Berücksichtigung des Platzbedarfs der Einrichtungen) für die Feder gewährleistet. Anforderungen im Hinblick auf Kräfte sind nicht vorhanden.

Die Aufgabe wird somit durch die Funktion $m(\text{lin}, \text{min} = \dots, 1\text{u}, 50, \dots)$ beschrieben (Zeile 2 in Bild 34). Sie wird durch einen Vibrationswendelförderer erfüllt. Dieser soll einen Durchmesser von 50cm haben, die Federn werden zum Endpunkt "1u" z.B. pneumatisch durch einen Schlauch befördert. Da der Schlauch selbst keine Bewegung ausführt, gilt er als Bestandteil des Vibrationswendelförderers. Die entsprechenden Minimalmontagekosten für die Lösung der Aufgabe sind $m(\text{lin}, \text{min} = \text{vibr}, 1\text{u}, 50, \dots) = 10600 \text{ DM}$ (Zeile 2 in Bild 34, der Graph der Minimalkostenfunktion m des Vibrationswendelförderers ist nicht in Bild 29 bis Bild 31 enthalten).

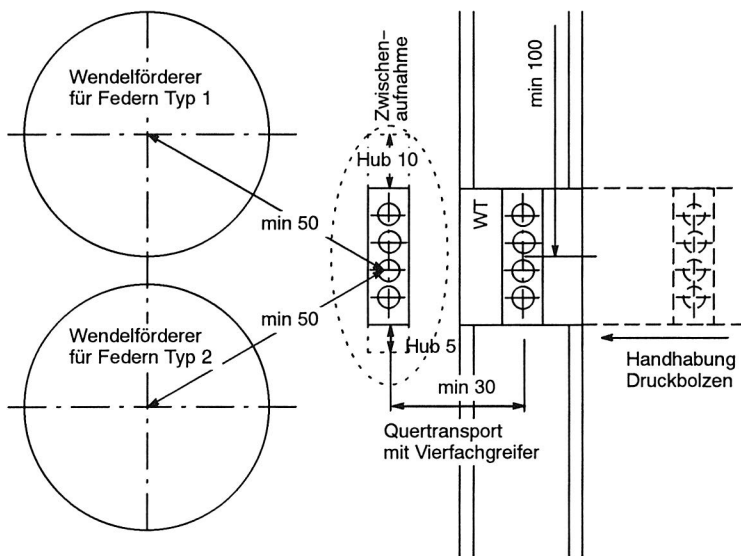


Bild 32 Geräteanordnung zur Ermittlung der Minimalmontage der Feder-Handhabung (Entfernungsangaben in [cm])

Aufgrund der Randbedingung (a) sind zwei Vibrationswendelförderer anzuordnen (Bild 32). Wegen der Zeitrandbedingung (e) wäre es zu langsam, direkt vom Vibrationswendelförderer in den Werkstückträger zu fördern. Deshalb ist es notwendig, zuerst in eine Zwischenaufnahme zu arbeiten, die dann ein Vierfachgreifer mit einer Bewegung entleert und alle vier Federn gleichzeitig in den Werkstückträger einsetzt. Der zeitliche Vorteil liegt darin, daß in die Zwischenaufnahme (siehe Bild 32) auch gearbeitet werden kann, während Druckbolzen in den Werkstückträger eingesetzt werden und

während der Verfahrzeit des Werkstückträgers. Die Minimalanforderungen an den Quertransport von der Zwischenaufnahme zum Werkstückträger zeigt Bild 32 (Mindestentfernung ist ca. 30 cm), die zugehörige Funktion m zeigt Bild 34. Die anschließende Vertikalbewegung wäre "Fügen der Feder" und wird in diesem Handhabungsbeispiel nicht berücksichtigt. Zur Minimalmontage gehören noch der erwähnte Vierfachgreifer (bzw. vier Greifer) und das Verfahren des Werkstückträgers (Weg ca. 100cm).

Der Werkstückträger wird bereitgestellt. Federn des Typs 1 oder 2 (Ergebnis der Variantenanalyse) werden in eine Zwischenaufnahme eingesetzt. Diese ist wie die Werkstückträger als Vierfach-Einrichtung ausgebildet (Ergebnis der Taktzeitanalyse). Die Minimalkinematik für das Bestücken der Aufnahme zeigt Bild 33: Die Federn werden an einen fixen Bestückpunkt befördert (z.B. pneumatisch durch einen Schlauch), die Aufnahme wird durch zwei Pneumatik-Zylinder bewegt.

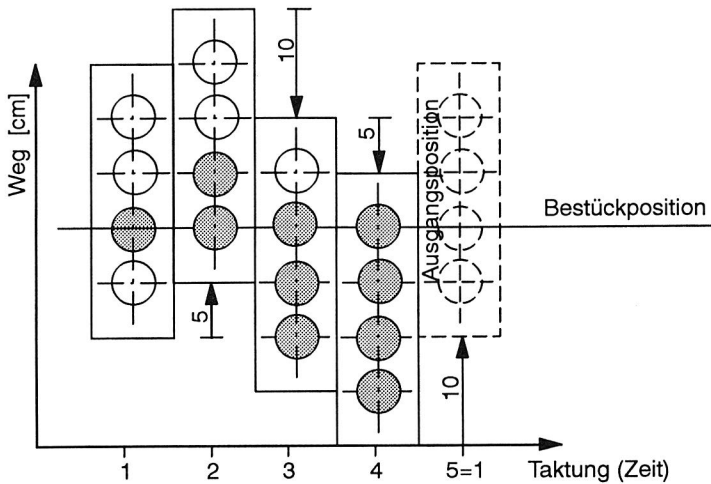
Die Zwischenaufnahme ist notwendig, da der Druckbolzen auf die Feder gefügt wird, bevor die Baugruppe in den Haltekörper (Werkstückträger) eingesetzt wird. Dieser Vorgang weist folgende Minimalkinematik auf:

Aufnahme der Druckbolzen in einen Vierfach-Greifer (z.B. ansaugen), verfahren über die Zwischenaufnahme, fügen der Druckbolzen (alle drei Vorgänge sind beim Druckbolzen zu analysieren!), vierfaches Greifen der Federn (einschließlich der vormontierten Druckbolzen), Quertransport des Verbandes über den Werkstückträger (Bild 34).

Zuletzt wird noch die einfachstmögliche Realisierung des Bewegungsablaufs der Vierfachaufnahme über einer festen Bestückposition, die z.B. das Ende des am Vibrationswendelförderer angebauten Schlauchs darstellt, untersucht. Kinematisch identisch wäre eine bewegliche Bestückposition über einer ortsfesten Vierfachaufnahme.

Aufgabe: Kinematisch möglichst einfach soll eine Vierfachaufnahme so bewegt werden, daß innerhalb von vier Takten jeweils eine andere (noch leere) Aufnahme bestückt werden kann.

Die Lösung zeigt Bild 33. Mit lediglich zwei Pneumatikeinheiten mit dem Hub 5cm bzw. 10 cm läßt sich die Aufgabe lösen. Das Bild zeigt die einzelnen Takte und die zugehörigen Bewegungen der Pneumatikeinheiten. Am Ende (Takt 5=1) ist wieder die Ausgangsposition erreicht und die Aufnahme ist komplett befüllt. Die entsprechenden Minimalmontagekosten sind $m = m(\text{lin}, \text{min} = \text{pneu}, 1\text{u}, 5, \dots) + m(\text{lin}, \text{min} = \text{pneu}, 1\text{u}, 10, \dots) = 2800 \text{ DM}$ (Wert aus Bild 30). Damit sind die gesamten Minimalmontagekosten zur Handhabung der Feder $m_{\text{ges}} = 48900 \text{ DM}$ (Bild 34).



*Bild 33 Bestücken einer Vierfach-Aufnahme (Rastermaß 5cm) mit zwei Pneumatik-
einheiten (Hub 5cm bzw. 10cm)*

Beschreibung	Minimalmontage	Kostenwert [DM]
Werkstückträger-Transport	m(lin,elek,1u,100,Band-ver)	4400
Federn Typ 1 zuführen	m(lin,min=vibr,1u,50,...)	10600
Federn Typ 2 zuführen	m(lin,min=vibr,1u,50,...)	10600
Verfahren der Zwischenaufnahme (vierfach*)	m(lin,min=pneu,1u,5,...)	1400
	m(lin,min=pneu,1u,10,...)	1400
4 Greifer	4*m(lin,pneu,1g,2,50N)	15400
Quertransport	m(lin,min=pneu,1g,30,900N)	5100
		<hr/> Σ=48900

* gemäß Stückzahl- und Taktzeitauslegung wird mit Vierfach-Aufnahmen gearbeitet

Bild 34 *Minimalmontagekosten der Handhabung der Feder bei den gegebenen Randbedingungen*

Als Beispiel für die Minimalmontage eines (Füge-)Prozesses dient das *Verschrauben der Düsenspannmutter*.

Die Randbedingung ist:

- (a) Es muß mit einer Doppelvorrichtung gearbeitet werden (Ergebnis der Taktzeitanalyse)

Die Düsenspannmutter muß vertikal über die Düse auf die Düsenspannmutter aufgesetzt werden (die vorherige Handhabung wird hier nicht betrachtet). Gelöst wird diese Aufgabe durch eine lineare, geführte Bewegung auf einen Endpunkt ("1g") hin über ca. 20cm mit einem möglichst kostengünstigen Prinzip. Dies bedeutet $m(\text{lin}, \text{min}=\dots, 1\text{g}, 20, \dots) = m(\text{lin}, \text{min}=\text{pneu}, 1\text{g}, 20, <900\text{N})$ gemäß Bild 30. Dort ist auch ersichtlich, daß unterhalb 900N die Kraftanforderungen keinen nennenswerten Einfluß auf die Minimalmontagekosten hat. Anschließend müssen mit den gleichen Bewegungsanforderungen 2 Schraubköpfe auf 2 Düsenspannmuttern gefügt werden (Bild 35). Dann muß eine Rotation zum Verschrauben eingeleitet werden (Bild 35). Der Rotationsmodul muß dabei ein Drehmoment von mindestens 90 Nm aufbringen können. Aufgabe und Lösung: $m_p = m(\text{rot}, \text{min}=\text{pneu}, 1\text{u}, >360^\circ, 90\text{Nm}) = 8600 \text{ DM}$ (Bild 31 bzw. Bild 35).

Beschreibung	Minimalmontage	Kostenwert [DM]
2 Düsenspannmuttern* vertikal aufsetzen	$m(\text{lin}, \text{pneu}, 1\text{g}, 20, 900\text{N})$	4970
2 Schraubköpfe auf 2 Düsenspannmuttern aufsetzen	$m(\text{lin}, \text{pneu}, 1\text{g}, 20, 900\text{N})$	4970
	$m(\text{lin}, \text{pneu}, 1\text{g}, 20, 900\text{N})$	4970
2 Düsenspannmuttern festdrehen	$m(\text{rot}, \text{min}=\text{pneu}, 1\text{u}, >360^\circ, 90\text{Nm})$	8600
	$m(\text{rot}, \text{min}=\text{pneu}, 1\text{u}, >360^\circ, 90\text{Nm})$	8600
		$\Sigma=32110$
* gemäß Stückzahl- und Taktzeitauslegung müssen 2 Düsenspannmuttern gleichzeitig verschraubt werden		

Bild 35 Minimalmontage des Schraub-Prozesses der Düsenspannmutter bei gegebenen Randbedingungen

Am Beispiel des Werts $m(\text{rot}, \text{min}=\text{pneu}, 1\text{u}, >360^\circ, 90\text{Nm}) = 8600 \text{ DM}$ (aus Bild 31) sei noch einmal darauf hingewiesen, daß dieser nur die Gesamtkosten für eine pneumatische

Rotationseinheit umfaßt, die grundsätzlich in der Lage ist, das geforderte Drehmoment aufzubringen.

m berücksichtigt nicht die spezifischen Anforderungen, die das Produkt stellt (z.B. Toleranzen). Dies geschieht erst durch den produktspezifischen Faktor k (siehe auch Schraubbeispiel in 6.4.2).

Damit ist ein Beispiel für die Minimalmontage eines Fügeprozesses erklärt.

6 Abbildung der produktspezifischen Eigenschaften

6.1 Die Teilfunktionen der Montage

Eine sinnvolle Definition für das Montieren findet sich bei G. Spur [83]:

"Montieren ist die Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen. Dabei kann zusätzlich formloser Stoff zur Anwendung kommen."

Er gliedert das Montieren in die Teilfunktionen

- Handhaben
 - Kontrollieren
 - Fügen
 - Justieren
 - Sonderoperationen.
-
- *Handhaben* ist neben Fördern und Lagern (Speichern) eine der drei Teilfunktionen des Materialflusses. Eine Definition liefert VDI-Richtlinie 2860 [96]:

"Handhaben ist das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskoordinatensystem.

Es können weitere Bedingungen – wie z.B. Zeit, Menge und Bewegungsbahn – vorgegeben sein."

Die Teilfunktionen und die zugeordneten Elementarfunktionen des Handhabens sind:

- Speichern
- Mengen verändern (Teilen, Vereinigen)
- Bewegen (Drehen, Verschieben)
- Sichern (Halten, Lösen)
- Kontrollieren (Prüfen)

Sie beschreiben zugleich die Inhalte des Handhabens.

- *Fügen* ist gemäß DIN 8593 ([18]) ein Fertigungsverfahren. Es ist stets produktunabhängig, während Montieren stets produktorientiert ist [82].

„Fügen ist das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im ganzen vermehrt.“ [18]

Handhabungs- und Hilfsvorgänge, einschließlich Messen und Prüfen, werden ausdrücklich ausgenommen. Die Norm selbst weist darauf hin, daß in einigen Fällen keine klare Trennung zwischen Handhabung und Fügen möglich ist. Beispielsweise kann Fügen durch Zusammensetzen auch zur Handhabung in einem übergeordneten Fügevorgang dienen, z.B. Ansetzen einer Schraube oder beim Einschieben eines Niets (siehe auch [19]).

Da für diese Arbeit die Zuordnung der Bewegungen und der damit verbundenen Kosten in Handhabung und Fügeprozeß jedoch eindeutig geregelt sein muß, soll folgendes Kriterium gelten: Der Fügeprozeß beginnt mit derjenigen Bewegung, die den ersten Kontakt zwischen den Fügepartnern herstellt.

- *Justieren* definiert Spur [83]:

Justieren ist „die Gesamtheit aller während oder nach dem Zusammenbau von Erzeugnissen planmäßig notwendigen Tätigkeiten zum Ausgleich fertigungstechnisch unvermeidbarer Abweichungen mit dem Ziel, geforderte Funktionen, Funktionsgenauigkeiten oder Eigenschaften von Erzeugnissen innerhalb vorgegebener Grenzen zu erreichen.“

- *Sonderoperationen* sind Arbeiten wie z.B. Markieren, Erwärmen oder Reinigen [83].

Wie läßt sich diese Einteilung zur Definition von Komplexitätsfaktoren, die die produktspezifischen Eigenschaften wiedergeben, heranziehen?

In Kapitel 2.2.1 wurde Komplexität als "relatives Maß für ... die Kosten zur Lösung betrieblicher Problemstellungen" definiert. "Bezugsgröße ist die Lösung eines Bezugsproblems".

Bezugsproblem ist im Zielkostenmodell die Ermittlung der Minimalmontage. Komplexität muß nach dieser Definition ein relatives Maß für die die Minimalmontagekosten überschreitenden Kosten darstellen. Dieser Mehrkostenfaktor wird durch die Produktkonstruktion definiert und soll als Überbegriff *Teilekomplexität* heißen.

Der Funktionen der Montage, insbesondere auch die Minimalmontage, wurden untersucht und in Bild 36 zusammengefaßt. Für die Beschreibung der Teilekomplexität ergeben sich daraus drei wesentliche Größen, die die Teilekomplexität konkret beschreiben: *Handhabungskomplexität*, *Prozeßkomplexität* und *Justagekomplexität*. Sie beziehen sich auf die jeweils zugeordneten Bereiche Handhabung, Fügeprozeß und Justage eines zu montierenden *Einzelteils* (siehe Bild 36). Der Bezug zum Gesamtprodukt wird in 7.1 deutlich.

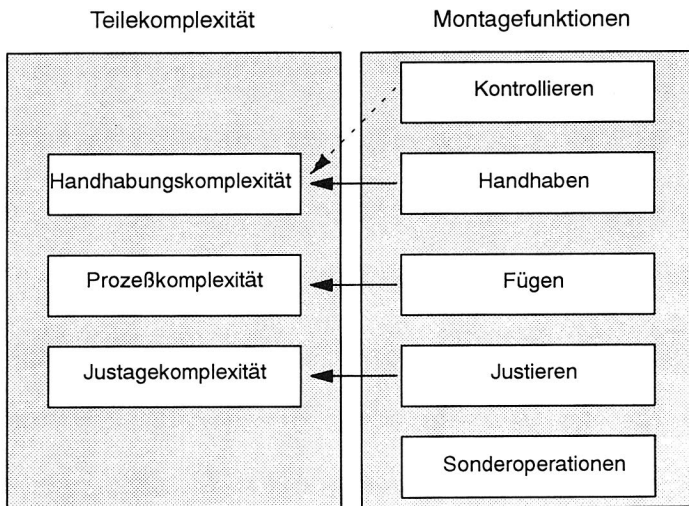


Bild 36 Gliederung der Teilekomplexität nach den Montagefunktionen

Kontrollieren wird in diesem Zusammenhang als Teilfunktion des Handhabens betrachtet (siehe auch Kapitel 6.3.1), Sonderfunktionen werden nicht separat abgebildet.

6.2 Die charakteristischen Geometrie Größen

Mit den folgenden geometrischen Größen lassen sich die wesentlichen Effekte bezüglich der wertschöpfenden Montagegearbeitgänge beschreiben:

- **Teilegröße g:**

Charakteristische Teilegröße, meist größtes Längen- oder Diagonalmaß.

- **Fügebreite b:**

Projektionsquerschnittsmaß der Relativbewegung zwischen den Fügepartnern

- **Fügelänge f:**

Länge der eigentlichen Fügebewegung (z.B. Einschraubtiefe, Schweißnahtlänge, ...).

- **Fügetoleranz t:**

Maximal zulässige Abweichung der Fügepartner im gefügten Zustand. Bei Fügen auf Anschlag: Toleranz der zugehörigen Fügwerkzeugbewegung.

- **Positioniertoleranz p:**

Zulässige Abweichung beim Fügen aufgrund konstruktiver Merkmale am Produkt. Für Handhabung und Prozeß sind je nach Anwendungsfall möglicherweise unterschiedliche Größen zu verwenden, wenn sich die entsprechenden Bewegungen deutlich unterscheiden, z.B. beim Aufsetzen und Eindrehen einer Schraube.

- p_H (für Handhabung): Zulässiger Positionierversatz während der Handhabung. Fügeschrägen an den Fügepartnern beachten!
Beispiele: Fügen in Aufnahme beim Umformen, Aufsetzen einer Schraube, Positionieren von Schweißpartnern.
- p_p (für Prozeß): Alle nicht unter p_H fallenden Fälle: p_p ist die zulässige geometrische Abweichung beim Fügen durch konstruktive Merkmale und Toleranzen. Je nach Verbindungstechnik muß individuell interpretiert werden.
Beispiele: Festschrauben einer Schraube ($p_p=t$ =Toleranz der Schraubenlängung aufgrund der Vorspannkrafttoleranz).

$p_p > t$ gilt z.B. für die folgenden Fälle: Fügen durch Zusammensetzen ($p_p=t$ +Fügeschrägen), Fügen durch Löten ($p_p=t$ +Selbstzentriereffekt).

Der Selbstzentriereffekt überbrückt beim Löten von Bauelementen auf Leiterplatten einen Versatz von bis zu 2 mm, abhängig von Lotparametern und Bauteilgeometrie [33].

- **Systemgröße R:**

R ist ein Richtwert für die Systemgröße des Anwendungsbereichs. Anwendungsbereiche sind z.B. Mikrosystemtechnik, Feinmechanik, allgemeiner Maschinenbau. (Näheres siehe 6.4.1).

Die beiden folgenden Größen t_j und z spielen dann eine Rolle, wenn ein (oder mehrere) Funktionsmaß(e) anschließend an den Montageprozeß *durch Justieren* eingestellt werden.

- **Fügetoleranz t_j**

Toleranz des Funktionsmaßes, das später justiert wird.

- **Theoretisches Maß z**

theoretisch notwendige Einzelteiltoleranz zur Funktionserfüllung ohne Justage

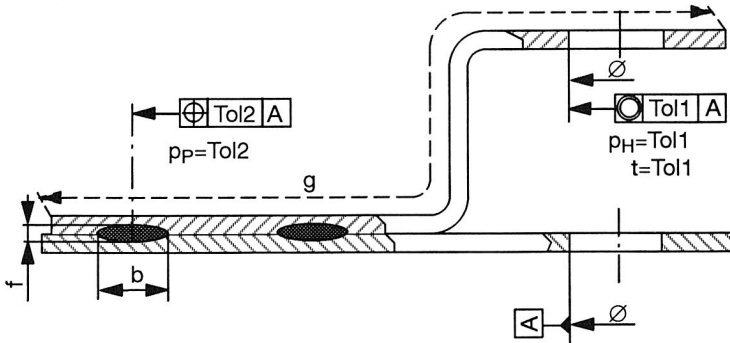


Bild 37 Die charakteristischen Geometrie Größen für eine Punktschweißverbindung

In Bild 37 sind die beschriebenen Größen beispielhaft für eine Punktschweißverbindung zweier Bleche dargestellt. Alle geometrischen Größen zur Beschreibung der

produktspezifischen Eigenschaften werden in diesem und allen folgenden Beispielen in mm angegeben.

6.3 Handhabungskomplexität

6.3.1 Entwicklung der Handhabungskomplexität

Neu definiert wird die Handhabungskomplexität:

Die Handhabungskomplexität k_H ist eine dimensionslose Produktkennzahl für ein zu montierendes Einzelteil. Sie ist ein Maß für die durch die Produktkonstruktion definierten Gerätekosten für die Teilehandhabung.

Hinweis: Neben den durch die Produktkonstruktion definierten Kosten legt die Montageplanung (Stückzahl, Varianten, Taktzeit, ...) die Minimalmontagekosten (siehe Kap. 5) fest. Diese bilden die Bezugsgröße für die Prozeßkomplexität.

Diese Definition ist konsistent mit der allgemeinen Definition von Komplexität (im betrieblichen Umfeld) von Kapitel 2.2.1 und den Überlegungen zur Darstellung der allgemeinen *Teilekomplexität* durch die Größen Handhabungskomplexität, Prozeßkomplexität und Justagekomplexität in Kapitel 6.1.

Der Faktor k_H ist ≥ 1 , da definitionsgemäß mindestens die Minimalkinematik der Handhabung realisiert werden muß.

Zwei wesentliche Einflußfaktoren k_{1H} und k_{2H} prägen die Gesamtkennzahl:

- Ausrichten der Teile
- Positionieren der Teile.

Unter "Ausrichten" der Teile sind die Bewegungen des Schaffens und Aufrechterhaltens einer vorgegebenen räumlichen Anordnung im Sinne der Definition von Handhabung in 6.1 zu verstehen.

- $k_{1H} = \log(g/b)$

Das Teileausrichten wird stark geprägt durch das Verhältnis von Teilegröße g zu Fügebreite b . Die definierte räumliche Anordnung scheiben- und plattenförmiger Bauteile mit niedrigem g/b ist einfach. Sie steigt mit zunehmendem Schlankheitsgrad der Bauteile an, da die definierte Kontrolle der einzelnen Freiheitsgrade schwieriger wird. Nadelförmige Bauteile sind schwer auszurichten und vor allem schwer in einem definierten Zustand zu halten. Der Kontrollaufwand steigt jedoch nicht linear mit g/b ; er wird mit $\log(g/b)$ angenähert (Bild 38).

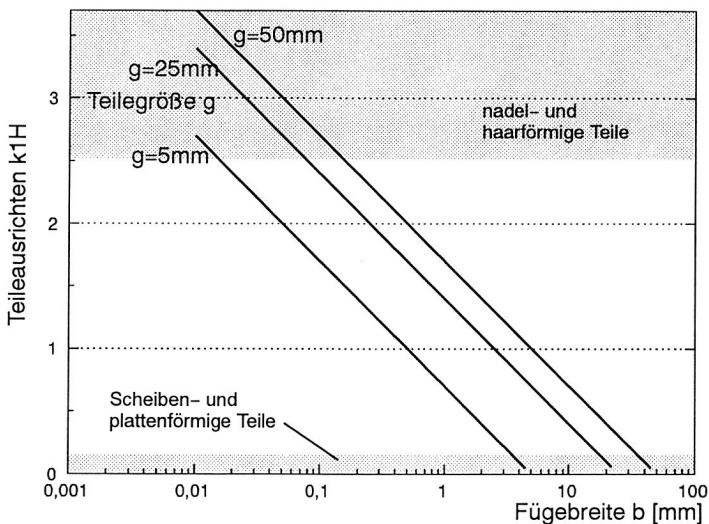


Bild 38 Der Aufwand des Teileausrichtens als Teilproblem des Handhabens

Ebenfalls Einfluß auf die Handhabungskomplexität hat das "Positionieren" der Teile. Positionieren ist das definierte Verändern einer vorgegebenen räumlichen Anordnung (im Sinne der Handhabungsdefinition in 6.1) mit dem Ziel der Kontaktierung der Fügepartner.

Der Einfluß des Positionierens wird stark geprägt durch das Verhältnis von Fügebreite b zu Positioniertoleranz p_H .

- $k_{2H} = \log(b/p_H)$

Je geringer der zulässige Positioniersatz p_H bei gegebener Fügebreite b ist, um so aufwendiger gestaltet sich die Lösung der Positionieraufgabe. Bei großem p_H , z.B. Aufsetzen einer Schraube mit großen Fügenschrägen, gestaltet sich die Lösung einfacher. Dieser Effekt ist nichtlinear; er wird mit zunehmendem Quotienten b/p_H schwächer. Wie beim "Ausrichten" erweist sich ein logarithmischer Ansatz als sinnvoll (siehe auch Bild 39).

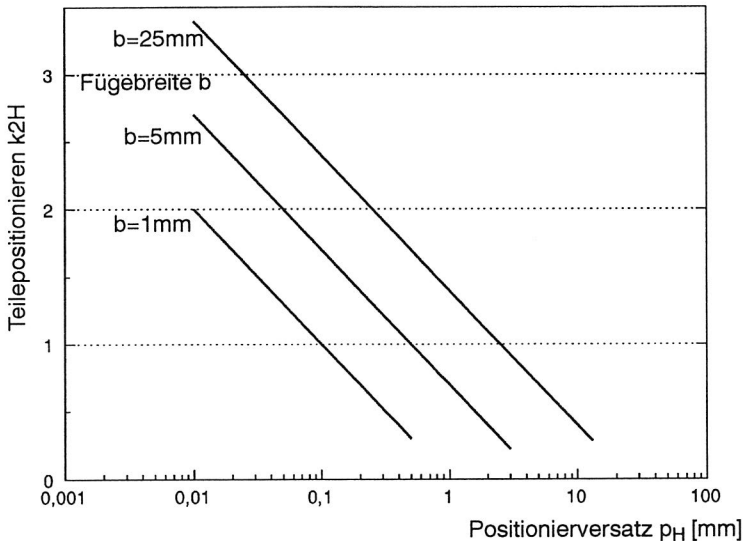


Bild 39 Der Positionieraufwand als Teilproblem des Handhabens

Als "Handhabungskomplexität" wird unter Berücksichtigung der Wertebereiche von k_H , k_{1H} und k_{2H} definiert:

$$k_H = 1 + k_{1H} \cdot k_{2H}$$

$$k_H = 1 + \log(g/b) \cdot \log(b/p_H)$$

Beispiel (Bild 40): Handhabung der Feder: $k_H = 1 + \log(42/10) \cdot \log(10/1,5) = 1,51$

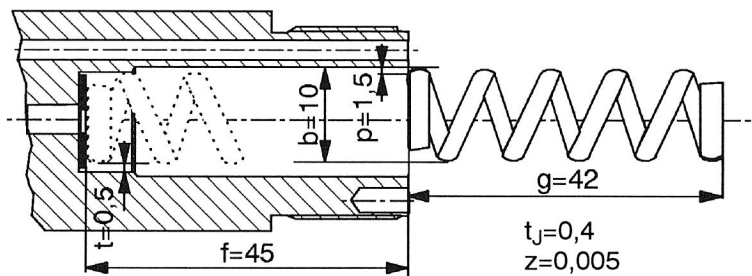


Bild 40 Charakteristische Geometriemerkmale der Feder (Düsenhaltermontage)

Damit sind die Zielkosten Z für die Handhabung der Feder:

$$Z = k_H \cdot m = 1,51 \cdot 48900 \text{ DM} = 73800 \text{ DM}$$

wobei m die in 5.5 berechneten Minimalmontagekosten sind.

Eine Übersicht zur Handhabungskomplexität aller Einzelteile gibt Bild 41.

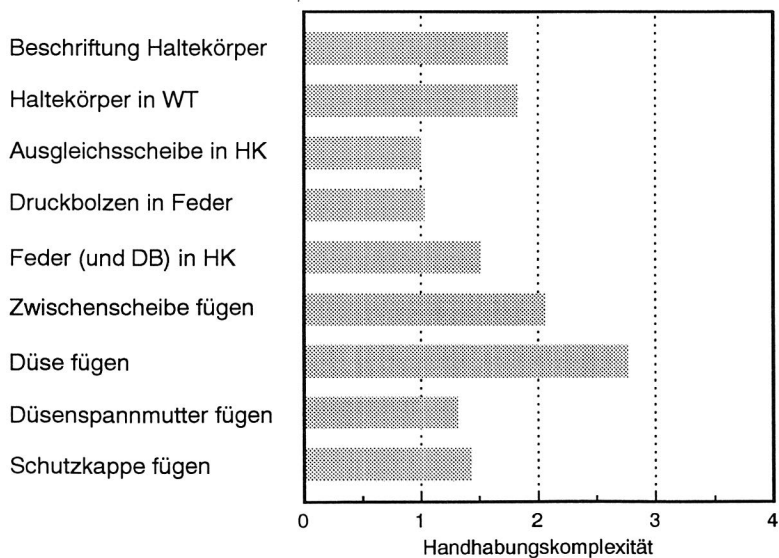


Bild 41 Handhabungskomplexität aller Einzelteile des Düsenhalters

Die Handhabungskomplexität der Feder wurde im obigen Berechnungsbeispiel zu $k_H=1,51$ bestimmt. Es interessiert die Frage:

- Wie müßte die Feder prinzipiell aussehen, damit k_H gegen 1 geht?

Einerseits müßte dazu das Teilepositionieren $k_{2H, \text{jetzt}} = 0,82$ durch ein Vergrößern von p_H abgesenkt werden. Diese Möglichkeiten sind beschränkt: $p_H=2$ würde $k_{2H} = 0,70$ bedeuten. Andererseits müßte die Ausrichtbarkeit der Feder verbessert werden: $k_{1H, \text{jetzt}} = 0,62$ könnte durch deutliche Verkürzung der Feder abgesenkt werden. Der theoretische Zielwert $k_{1H}=0$ könnte nur durch eine ideal scheibenförmige Feder (siehe auch Bild 38) erreicht werden; eine gute Näherung wäre eine Tellerfeder (siehe Bild 42).

Auch die Prozeßkomplexität einer Tellerfedermontage wäre aufgrund der deutlich geringeren Fügelänge niedriger (Theorie hierzu siehe 6.4.1). Die Einbaulage der Tellerfeder und die Veränderung der Handhabungs- und der Prozeßkomplexität zeigt Bild 43.

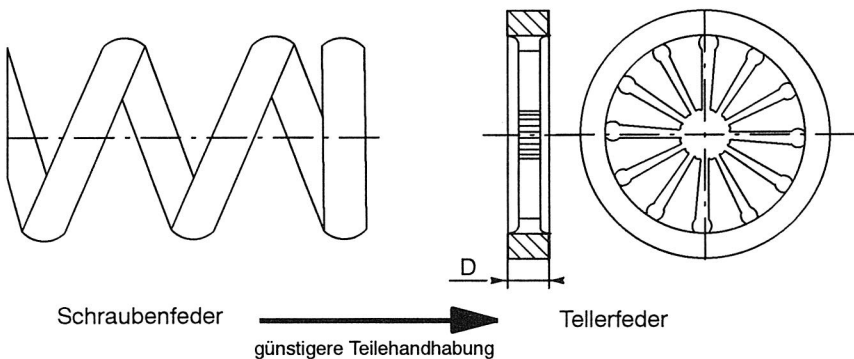


Bild 42 Verbesserung der Federkonstruktion hinsichtlich der Teilehandhabung

Weitere Vorteile einer Tellerfeder der skizzierten Art ist eine denkbare Funktionsintegration von benachbarten Bauteilen. Das sehr genau herstellbare Maß Dicke D der Feder gibt Anlaß zur Überlegung, ob die Feder zugleich die Rolle der Ausgleichsscheibe übernehmen kann. Die Dicke D müßte z.B. durch Flachsleifen und sortieren (wie die Ausgleichsscheibe) hergestellt werden. Die Symmetrie müßte beim Schleifen erhalten

bleiben oder gezielt hergestellt werden. Dies erscheint aufwendig, so daß die Variante mit Ausgleichsscheibe realistischer erscheint (Bild 43).

Doch läßt sich der Gedanke der Federgestaltung hin zur Funktionsintegration noch weiterentwickeln. Dies erfolgt in Kap. 7.1, wo genaues Zahlenmaterial über die Zielkostenstruktur des Düsenhalters zur Verfügung steht.

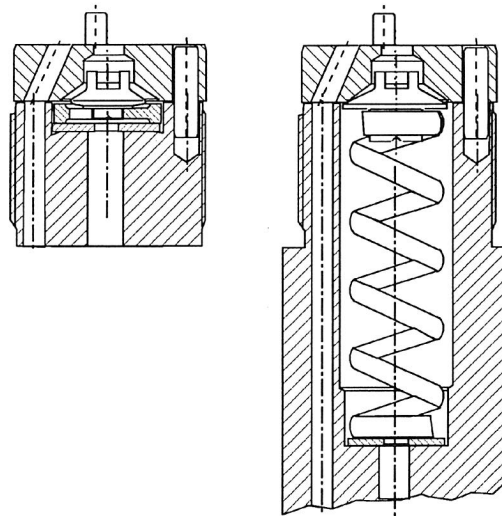


Bild 43 Düsenhalterkonstruktion mit Schrauben- und mit Tellerfeder

6.3.2 Praktische Überprüfung der Zielkosten für die Handhabung

Um Aussagen über die Qualität des Zielkostenmodells insbesondere bezüglich der Handhabungskosten zu erhalten, bietet sich ein Vergleich von tatsächlichen Handhabungskosten realisierter Anlagen und errechneten Zielkosten an. Dabei ist allerdings zu beachten, daß Abweichungen theoretisch unterschiedliche Ursachen aufweisen können:

- (a) kostengünstige praktische Realisierung
- (b) Streuung des Gesamtmodells

Gegenübergestellt werden zunächst in einer Grafik die errechnete Handhabungskomplexität der Einzelteile des Düsenhalters und der tatsächliche Mehrkostenfaktor der zugehörigen realisierten Anlagenteile gegenüber den errechneten Minimalkosten. Diese müßten im theoretischen Idealfall gleich sein; dies entspricht der Winkelhalbierenden in Bild 44. Die Mehrkosten wurden dabei überwiegend auf Basis der Tabellen für m errechnet und nicht über die tatsächlich bezahlten Preise. Damit wird eine einheitliche Kostenermittlung durchgeführt und das Problem der Detailkostenermittlung aus Stationspreisen umgangen.

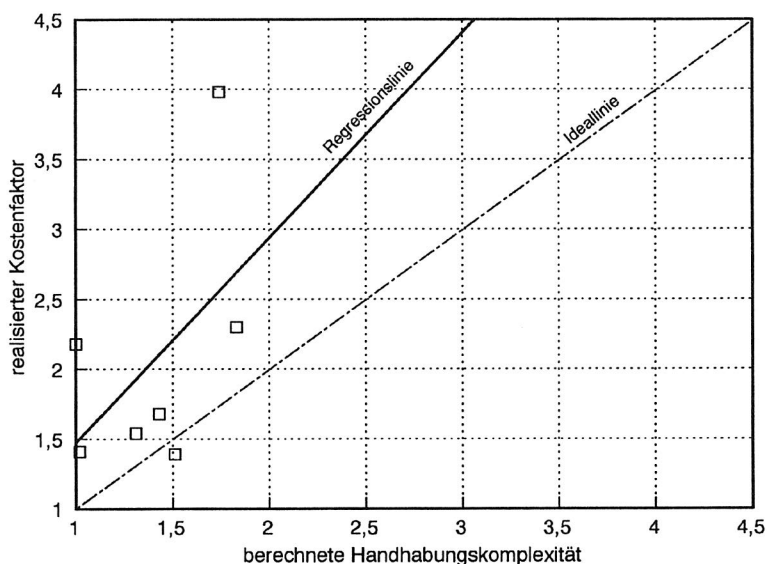


Bild 44 *Handhabungs-Relativkostenvergleich für die (teil-)automatisierten Arbeitsgänge der Düsenhalter-Montagelinie. Jeder Punkt entspricht einer Einzelteilmontage.*

Jeder Punkt in Bild 44 entspricht einem Einzelteil des Düsenhalters. Es wurden alle Teile mit (teil-)automatisierter Handhabung berücksichtigt (rein manuelle Montage siehe 7.3). Das Bild zeigt, daß die tatsächlichen Mehrkostenfaktoren (gegenüber der Minimalmontage) teilweise erheblich von der Ideallinie abweichen. Um trotzdem eine einigermaßen

geschlossene Aussage treffen zu können, wurde die Linie der minimalen mittleren quadratischen Gesamtabweichung aller Punkte, die *Regressionslinie*, berechnet und in Bild 44 dargestellt.

Es zeigt sich, daß die Regressionslinie oberhalb der Ideallinie liegt, wobei ein Punkt extreme Abweichung zeigt: Beim Punkt (1,74;3,98) konnte eindeutig Ursache (a) für die Abweichung ermittelt werden. Generell ist zu vermuten, daß diese Ursache (a) bei vielen realisierten Lösungen eine Rolle spielt. Die Unsicherheit der Ursachenzuweisung ist ein grundsätzliches Problem, auf das man bei Betrachtung realisierter Lösungen immer stößt. Vor jedoch ein Rückschluß auf die Brauchbarkeit des Modells gezogen wird, soll ein weiteres Beispiel untersucht werden.

Zur zusätzlichen Überprüfung der Ergebnisse aus der Düsenhaltermontage wurde ein Beispielkatalog mit theoretischen Aufgabenstellungen und möglichen Lösungen aus verschiedenen Bereichen der Fügetechnik erarbeitet (Bild 45). Man halte sich auch hier vor Augen, daß aus solchen Beispielen keine absoluten Aussagen abgeleitet werden können.

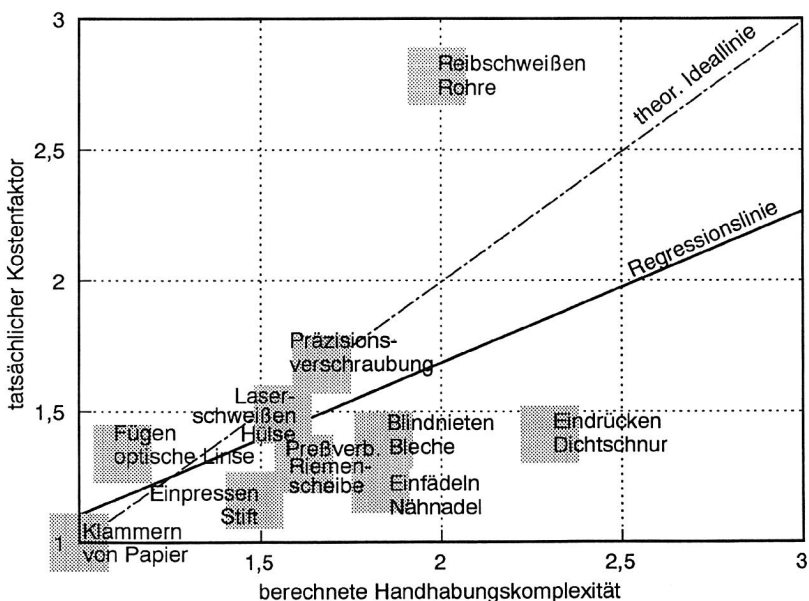


Bild 45 Beispiele aus verschiedenen Bereichen der Fügetechnik zur Überprüfung der Handhabungskomplexitäts-Bestimmung

Jedem Fügefall in Bild 45 liegen jeweils Annahmen über die technische Ausführung des jeweiligen Beispiels zugrunde. Die Annahmen wurden möglichst praxisnah getroffen, sie sind jedoch von so vielen Einflußfaktoren abhängig, daß "der" Prozeßkomplexitätswert für "das" Laserschweißen einer Hülse nicht allgemeingültig zu ermitteln ist. Die ermittelten Werte wurde unter der folgenden Annahme in Bild 45 (Handhabungskomplexität) und Bild 54 (Prozeßkomplexität) in Diagrammen zusammengeführt: Der Streuungseffekt der Zahlenwerte, der sich aus den zufällig festgelegten Randbedingungen der Fügefälle ergibt, gleicht sich über die Vielzahl der Beispiele aus. Die Auswirkungen auf die Regressionslinie, d.h. die Linie der minimalen mittleren quadratischen Gesamtabweichung, müßte also gering sein. Angesichts der Zufälligkeit der angenommenen Randbedingungen sind die "Punkte" in Bild 45 als grauer Bereich dargestellt.

Es zeigt sich in Bild 45 gegenüber Bild 44 ein anderer Effekt: Die Handhabungskosten der Lösungen liegen im Durchschnitt geringfügig unter den Zielkosten. Angesichts der im Vergleich zu realen Beispielen idealisierten Randbedingungen der Aufgabenstellungen muß mit vergleichsweise unvollständigen Lösungen gerechnet werden. Bild 44 und Bild 45 zusammen interpretiert bestätigen das Kostenmodell für die Handhabungskomplexität.

Zwei detailliert ausgeführte Beispiele zur Ermittlung der Zahlenwerte in Bild 45 und Bild 54 wird für die Beispiele "Präzisionsverschraubung" und "Laserschweißen Hülse" für die Prozeßkomplexitätsuntersuchung in 6.4.2 bei Bild 54 ausgeführt. Genauigkeitsaussagen werden in Kapitel 7.8 getroffen.

6.4 Prozeßkomplexität

6.4.1 Entwicklung der Prozeßkomplexität

Neu definiert wird die Prozeßkomplexität:

Die Prozeßkomplexität k_p ist eine dimensionslose Kennzahl für ein zu montierendes Einzelteil. Sie ist ein Maß für die durch die Produktkonstruktion definierten Gerätekosten des Fügeprozesses.

Hinweis: Neben den durch die Produktkonstruktion definierten Kosten legt die Montageplanung (Stückzahl, Varianten, Taktzeit, ...) die Minimalmontagekosten (siehe Kap. 5) fest. Diese bilden die Bezugsgröße für die Prozeßkomplexität.

Diese Definition steht in Einklang mit der allgemeinen Definition von Komplexität (im betrieblichen Umfeld) von Kapitel 2.2.1 und den Überlegungen zur Darstellung der allgemeinen *Teilekomplexität* durch die Größen Handhabungskomplexität, Prozeßkomplexität und Justagekomplexität in Kapitel 6.1.

Unter "Fügeprozeß" bzw. "Prozeß" ist hier und im folgenden der eigentliche Fügevorgang in Sinne der DIN 8593 ([18]) zu verstehen.

Der Faktor k_p ist ≥ 1 , da die Minimalmontage bzw. die Minimalmontagekosten definitionsgemäß nicht zu unterschreiten sind (Prinzip $Z=k \cdot m$).

Drei wesentliche Einflußfaktoren k_{1p} bis k_{3p} prägen die Gesamtkennzahl:

- Bewegung
- Werkzeug
- Systemgröße.

Der Faktor "Bewegung" berücksichtigt die Schwierigkeit, die sich aus der Fügelänge f ergibt. Die Schwierigkeit drückt sich im Aufwand zum Aufbau und zur Aufrechterhaltung der Fügebewegung aus.

- $k_{1p} = 1 + f/(10 \cdot b)$

Die Formel entsteht aufgrund folgender Überlegungen: Die erste Phase des Fügevorgangs besteht aus einem Vorfügen, das dazu dient, die Teile und/oder das Fügewerkzeug so zu bewegen, daß eine geometrisch eindeutige Fügebewegung ausgeführt werden kann. Ein Kontakt der Fügepartner besteht in dieser Phase bereits. Ein solches Vorfügen ist z.B. das Suchen des ersten Gewindengangs beim Schrauben.

Anschließend folgt der eigentliche Fügevorgang. Der Aufwand zur Aufrechterhaltung der durch das Vorfügen hergestellten Geometrie steigt näherungsweise linear mit der Fügelänge f (bezogen auf die Fügebreite b). Ab einer Fügelänge $f=10 \cdot b$ ist eine weitere Komplexitätszunahme bei Starrkörpern vernachlässigbar, da spätestens ab dieser Länge eine geführte Bewegung vorliegt; somit gilt: $f_{\max}=10 \cdot b$. Für flexible Teile gilt diese Begrenzung nicht.

Bild 46 zeigt den Graphen der Gleichung $k_{1p} = 1 + f/(10 \cdot b)$ und den Anwendungsbe-
reich.

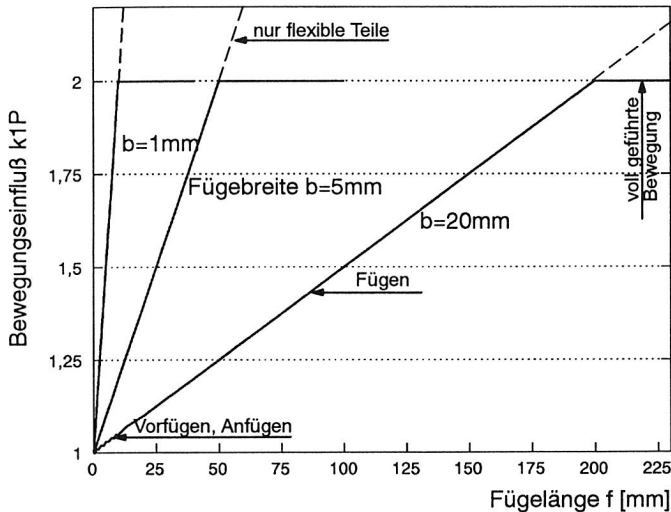


Bild 46 Der Einflußfaktor "Bewegung" auf die Komplexität des Fügeprozesses

Eine Aussage über die mögliche Verringerung der Fügenschwierigkeit und somit verminderter Werkzeuganforderungen aufgrund produktkonstruktiver Merkmale (z.B. Fügenschrägen) liefert der Zusammenhang (Faktor "Werkzeug")

- $k_{2P} = (b - p_p) / (b - t)$

Für $p_p = t \Rightarrow k_{2P} = 1$ ist keine Erleichterung des Fügevorgangs zu verzeichnen. Mit $p_p > t$ wird der Faktor k_{2P} kleiner 1. Dies entspricht den realen Gegebenheiten. Bild 47 zeigt den Graphen der Gleichung $k_{2P} = (b - p_p) / (b - t)$.

In den allermeisten Fällen gilt $p_p \geq t$ (siehe auch 6.2). Es sind Ausnahmefälle denkbar wo $p_p < t$ ist. Dann muß die Fugebewegung enger toleriert sein, als das Teil im gefügten Zustand zu liegen kommt. Entsprechend ist $k_{2P} > 1$ (in Bild 47 nicht berücksichtigt) und eine relative Erschwerung des Fügevorgangs zu verzeichnen. Ein solcher Fall könnte vom Prinzip her z.B. beim Fügen eines Kunststoffkäfigs eines Kugellagers auf die Kugeln vorliegen. Die Kugeln brauchen Spiel im Käfig, dieser muß aber nach dem Schnapp-Prinzip eng gefügt werden.

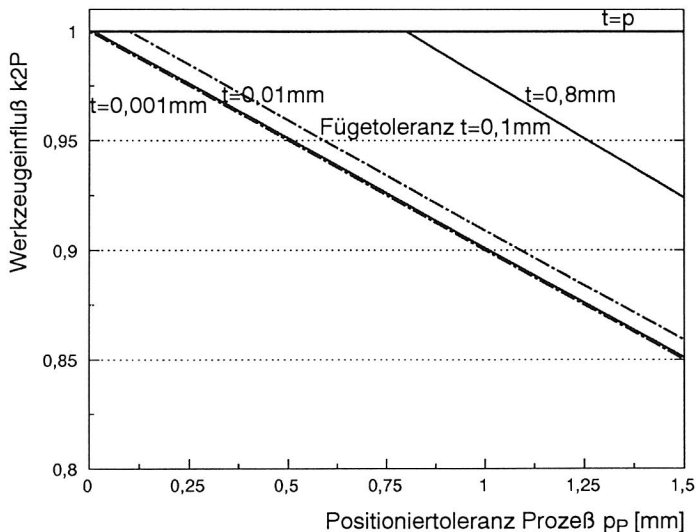


Bild 47 Der Einflußfaktor "Werkzeug" auf die Komplexität des Fügeprozesses (Beispiel: Fügebreite $b=10\text{mm}$)

Darüber hinaus muß in die Prozeßkomplexität auch die Tatsache eingehen, daß bei kleinen Toleranzen die Anforderungen an den Prozeß mit sinkendem t steigen. (Faktor "Systemeinfluß"). Der wesentliche Einflußparameter ist die Systemgröße: So sind z.B. in Mikrosystemen enge Toleranzen mit weniger Aufwand zu realisieren als in der konventionellen Montage. Dies wird durch den Faktor k_{3P} berücksichtigt.

- $k_{3P} = \log(R/t)$

R ist die Systemgröße des Anwendungsbereichs. In der Feinmechanik, die in dieser Arbeit in erster Linie betrachtet wird, ist $R=20\text{mm}$ sinnvoll. Für die Anwendungsgebiete Mikrosystemtechnik oder allgemeiner Maschinenbau wären andere R -Werte zu verwenden. Als Richtwert empfiehlt sich $R=10p$. In der Feinmechanik ist $p>2\text{mm}$ nicht sinnvoll, da z.B. durch noch größere Fügenschrägen kein zusätzlicher Nutzen erzielt wird.

Bild 48 zeigt den Graph der Gleichung $k_{3P} = \log(R/t)$. Enthalten ist auch die Erfahrung, daß der Montageaufwand bei Annäherung an die "Fügetoleranz 0" asymptotisch ansteigt.

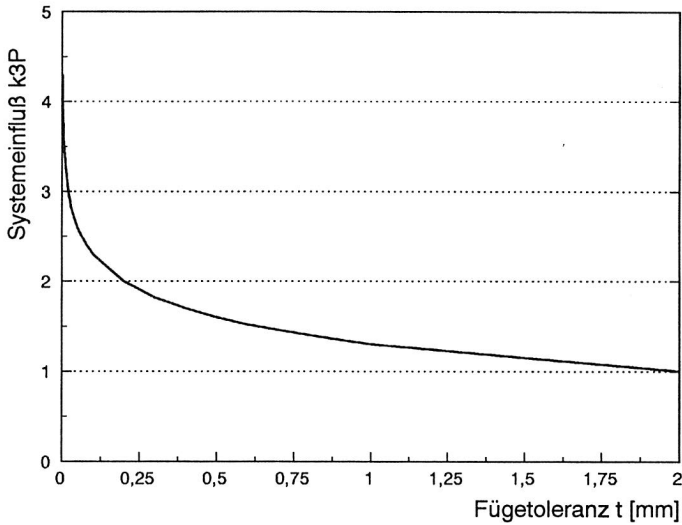


Bild 48 Der Einflußfaktor "Systemeinfluß" auf die Komplexität des Fügeprozesses (Beispiel: Feinmechanik, $R=20$ mm)

Somit lautet die Gesamtfunktion

- $k_P = k_{1P} \cdot k_{2P} \cdot k_{3P} = [1 + f/(10 \cdot b)] \cdot (b - p_P)/(b - t) \cdot \log(R/t)$

Beispiel (Bild 49): Verschrauben der Düsenspannmutter: $k_P = 1,03 \cdot 1,2,57 = 2,65$

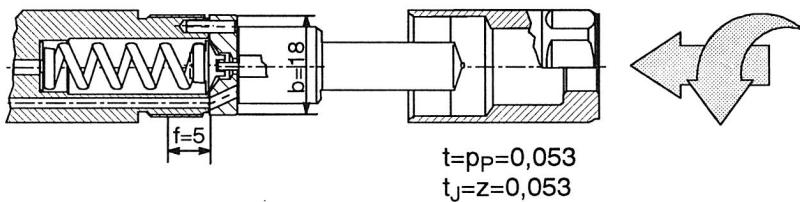


Bild 49 Die charakteristischen Geometriemerkmale für das Verschrauben der Düsenspannmutter

Die Zielkosten Z für den Schraubprozeß sind somit

$$Z = k_p \cdot m = 2,65 \cdot 32110 \text{ DM} = 85100 \text{ DM}$$

wobei m die in 5.5 berechneten Minimalmontagekosten sind.

Eine Übersicht zur Prozeßkomplexität aller Einzelteile gibt Bild 50.

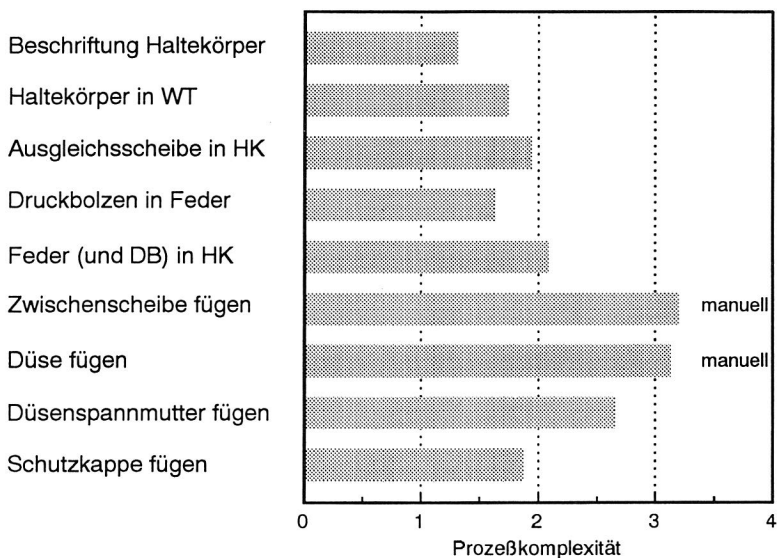


Bild 50 Prozeßkomplexität aller Einzelteile des Düsenhalters

6.4.2 Praktische Überprüfung der Zielkosten für den Prozeß

Die Vorgehensweise ist prinzipiell analog 6.3.2. Die Düsenhaltermontage ist in Bild 51 dargestellt:

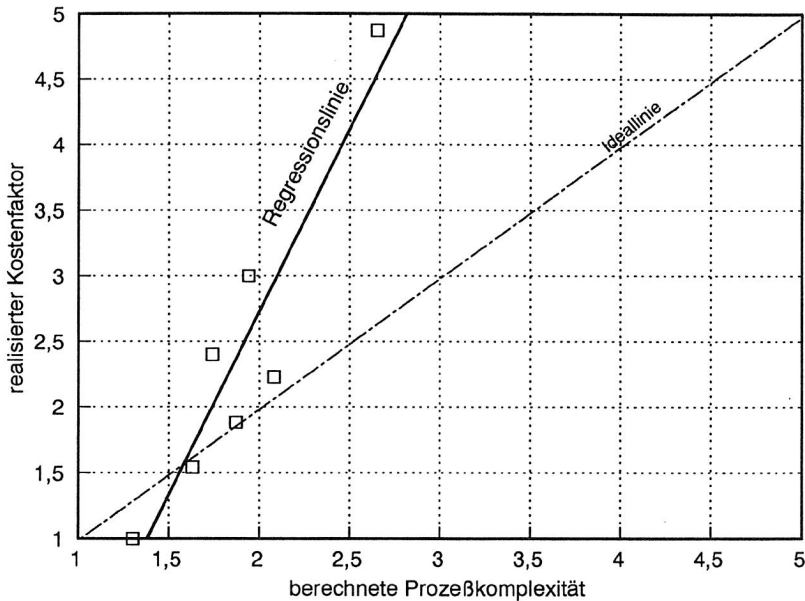


Bild 51 Prozeß-Relativkostenvergleich für die (teil-)automatisierten Arbeitsgänge der Düsenhalter-Montagelinie. Jeder Punkt entspricht einer Einzelteilmontage.

Der "Ausreißer" (2,65;4,87) entsprechend der Verschraubung der Düsenspannmutter wird näher untersucht. Der eigentliche Schraubprozeß wurde gemäß Bild 52 realisiert. Der Prozeß läuft teilautomatisiert ab: die Düsenspannmutter werden von Hand aufgesetzt und einige Gewindegänge eingedreht. Anschließend werden die Teile in eine Automatikstation verfahren und gespannt (Handhabung!). Danach verfahren zwei Schraubköpfe auf die Düsenspannmutter und drehen diese fest (Kosten siehe Bild 52).

Beschreibung	m _{realisiert}	Kostenwert [DM]
2 Düsenspannmutter* aufsetzen 2 Düsenspannmutter eindrehen	von Hand	85000**
2 Schraubköpfe auf 2 Düsen- spannmutter aufsetzen	m(lin,pneu,1g,20,900N) m(lin,pneu,1g,20,900N)	4970 4970
eindrehen mit 2 Spindeln	m(rot,elek,u,>360°,90Nm) m(rot,elek,u,>360°,90Nm)	30600 30600
		$\Sigma=156140$
* gemäß Stückzahl- und Taktzeitauslegung müssen 2 Düsenspannmutter gleichzeitig verschraubt werden		
** geschätzte anteilige Lohnkosten (zweischichtig über Abschreibungszeitraum der Anlage (siehe auch Kapitel 7.3)		

*Bild 52 Kostenanalyse der realisierten Düsenspannmutter-Montage (Schraubpro-
zeß)*

Dabei wäre es nicht unrealistisch, das Aufsetzen der Düsenspannmutter mit einem Vertikalschlitten (und Zentrierhilfe) durchzuführen und das Vordrehen der Schraubspindel zu überlassen. Eine solche Lösung würde einen Mehrkostenfaktor von 2,37 statt 4,87 gegenüber den in Kapitel 5.5 ermittelten Minimalmontagekosten bedeuten und liegt somit sehr nahe an dem berechneten Faktor 2,65. Das sich mit diesem Wert ergebende Korrelationsdiagramm zeigt Bild 53.

Es verdeutlicht eine sehr gute Übereinstimmung der Regressionslinie mit der Ideallinie. Dies wird als Bestätigung für die Herleitung der Prozeßkomplexität gewertet. Die Berechnung der Zielkosten für die Fügeprozesse der Düsenhaltermontage ist somit sinnvoll und realistisch.

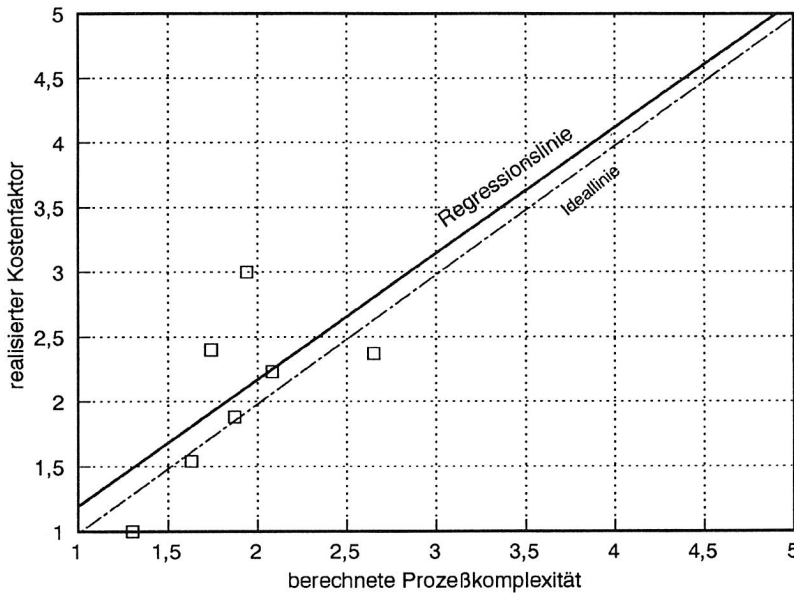


Bild 53 Prozeß-Relativkostenvergleich für die (teil-)automatisierten Arbeitsgänge der Düsenhalter-Montagelinie mit korrigiertem Wert für die Düsenspannmutter-Verschraubung.

Zur weiteren Überprüfung, insbesondere bezüglich noch nicht betrachteter Verbindungstechniken, wird der in 6.3.2 bereits vorgestellte Beispielkatalog untersucht. Das Ergebnis ist ebenfalls gut.

Die allgemeinen Bemerkungen zu Bild 45 bezüglich der Entstehung der Punkte gelten zu Bild 54 analog. Zusätzlich wird hier mittels zweier Beispiele die Entstehung der Zahlenwerte erläutert.

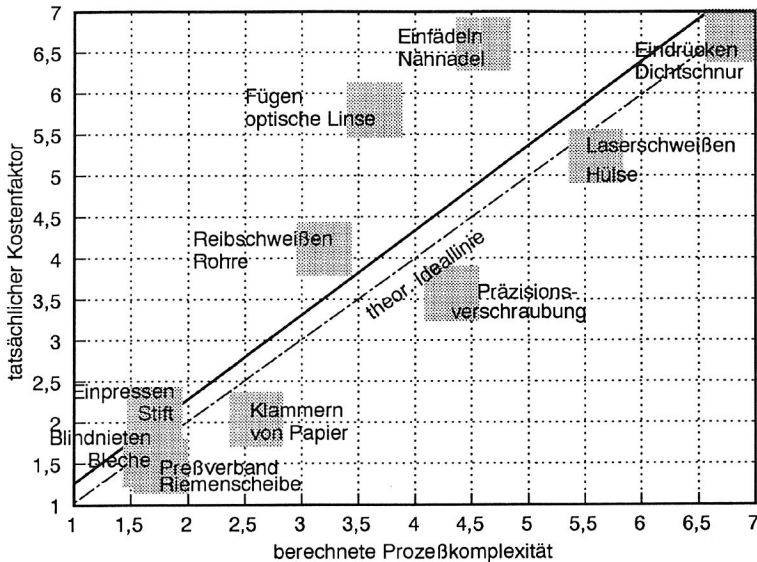


Bild 54 Beispiele aus verschiedenen Bereichen der Fügetechnik zur Überprüfung der Prozeßkomplexitäts-Bestimmung

Der Punkt "Präzisionsverschraubung" (4,32; 3,57) in Bild 54 entstand unter folgenden Annahmen für Aufgabe und Lösung:

Aufgabe und getroffene Annahmen: Herzustellen die Verschraubung einer Sechskant-schraube M8*40 DIN 931–12.9 in eine dicke Stahlplatte mit dem Drehmoment $35 \text{ Nm} \pm 3\%$ in Serienfertigung mit automatischem Schrauber. Der Reibwert sei $\mu=0,14$.

Berechnung der Prozeßkomplexität k_p : Zur Berechnung der Fügetoleranz t muß gemäß Kapitel 6.2 die Toleranz der Schraubenlänge aufgrund der Vorspannkrafttoleranz abgeschätzt werden. Den Drehmomentangaben entspricht eine Vorspannkraft von $F_v=23,2 \text{ kN} \pm 0,7 \text{ kN}$ ableiten ([60] Tafel 10/8). Die Steifigkeit c_s der Schraube berechnet sich nach [60] zu $c_s=1,9 \cdot 10^5 \text{ N/mm}$. Dann ist die Toleranz der Schraubenlänge $\Delta\delta=\Delta F_v/c_s=(2 \cdot 700 \text{ N})/(1,9 \cdot 10^5 \text{ N/mm})=0,007 \text{ mm}$. Somit ist die Fügetoleranz $t=0,007 \text{ mm}$. Für Schraubprozesse gilt außerdem stets $p_p=t$. Ferner gilt (nach 6.2): Teilegröße $g=45 \text{ mm}$ (Gesamtschraubenlänge), Fügebreite

$b=8\text{mm}$ (Schraubendurchmesser), Fügelänge $f=20\text{mm}$ (verschraubte Gewindelänge), Systemgröße $R=20\text{mm}$ (siehe Erläuterungen zu k_{3P} in 6.3.2). Damit ist die Prozeßkomplexität $k_P = [1+f/(10 \cdot b)] \cdot (b-p_P)/(b-t) \cdot \log(R/t) = 4,32$.

Berechnung des tatsächlichen Kostenfaktors: Es ist

$$\begin{aligned} \text{tatsächlicher Kostenfaktor} &= \frac{\text{reale Montagekosten}}{\text{Minimalmontagekosten}} = \\ &= \frac{\text{Gesamtkosten eines Elektroschraubers (el. rot. Achse)}}{\text{kostengünstigste Rotationsachse im verlangten Drehmomentbereich}} = \\ &= \frac{m(\text{rot,elek,u,>360}^\circ, 35\text{Nm})}{m(\text{rot,min=pneu,Iu,>360}^\circ, 35\text{Nm}) \text{ [siehe Bild 31]}} = \frac{26800 \text{ DM}}{7500 \text{ DM}} = 3,57 \end{aligned}$$

Wichtig: Bild 54 berücksichtigt nur Geräte, die den eigentlichen Fügeprozeß ausführen. Im obigen Beispiel ist dies nur die Drehachse. Damit ist der Punkt "Präzisionsverschraubung" in Bild 54 erläutert.

Als zweites Beispiel soll der Punkt "Laserschweißen einer Hülse" dienen.

Aufgabe und getroffene Annahmen: In einer vollautomatischen Montagelinie soll eine geschlitzte Hülse in ein rohrförmiges Bauteil mit einem Festkörperlaser geschweißt werden. Die Nahtbreite beträgt 0,4mm. Die Nahtlänge beträgt 4mm (unterbrochene Naht). Das Spiel zwischen den Bauteilen beträgt 0,03mm. Die maximale Exzentrizität der Naht beträgt ebenfalls 0,03mm.

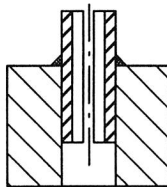


Bild 55 Prinzipskizze zur Aufgabe "Laserschweißen einer Hülse"

Berechnung der Prozeßkomplexität k_P : Fügebreite $b=0,4\text{mm}$ (Nahtbreite), Fügetoleranz $t=0,03\text{mm}$ (Spiel), Positioniertoleranz $p_P=0,03\text{mm}$ (Exzentrizität), R wie im letzten Beispiel, Fügelänge $f=4\text{mm}$ (Nahtlänge).

Damit ist die Prozeßkomplexität $k_P = [1+f/(10 \cdot b)] \cdot (b-p_P)/(b-t) \cdot \log(R/t) = 5,6$

Berechnung des tatsächlichen Kostenfaktors: Es ist

$$\begin{aligned}
 \text{tatsächlicher Kostenfaktor} &= \frac{\text{reale Montagekosten}}{\text{Minimalmontagekosten}} = \\
 &= \frac{\text{Gesamtkosten Schweißeinheit}}{\text{beliebig steuerbare Drehachse}} = \frac{\text{Gesamtkosten Schweißeinheit}}{m(\text{rot,elek,u,>360°,<5Nm})} = \\
 &= \frac{135000 \text{ DM [Expertenaussage]}}{25800 \text{ DM}} = 5,23
 \end{aligned}$$

Damit ist der Punkt "Laserschweißen Hülse" (5,6;5,23) in Bild 54 erläutert.

6.5 Justagekomplexität

Handhabung und Fügeprozeß können geplant oder ungeplant unvollkommen sein, d. h. zum Erreichen oder Sicherstellen der Produktspezifikation sind weitere Maßnahmen notwendig. Beispiele für solche Maßnahmen sind Justieren, Nacharbeit, Einlaufvorgänge und Prüfungen.

Diese Arbeitsgänge sind in der Regel nicht wertsteigernd. Lediglich das Justieren kann durch eine entsprechende Konstruktion wertsteigernd geplant werden, wenn sich dadurch die Gesamtfertigungskosten einschließlich der Einzelteilmontagekosten minimieren lassen.

Zur Ermittlung von Zielkosten dürfen nur wertsteigernde Arbeitsgänge berücksichtigt werden. Folglich wird zur Bildung der Zielkostenfunktion nur das Justieren berücksichtigt.

Neu definiert wird damit der Begriff Justagekomplexität:

Die Justagekomplexität k_j ist ein Maß für die Unvollkommenheit der Montage, die durch Justieren beseitigt wird.

Hinweis: Neben den durch die Produktkonstruktion definierten Kosten legt die Montageplanung (Stückzahl, Varianten, Taktzeit, ...) die Minimalmontagekosten (siehe Kap. 5) fest. Diese bilden die Bezugsgröße für die Justagekomplexität.

Diese Definition ist konsistent mit der allgemeinen Definition von Komplexität (im betrieblichen Umfeld) von Kapitel 2.2.1 und den Überlegungen zur Darstellung der

allgemeinen *Teilekomplexität* durch die Größen Handhabungskomplexität, Prozeßkomplexität und Justagekomplexität in Kapitel 6.1. Nicht unmittelbar klar ist jedoch, wie die Minimalmontagekosten als Bezugsgröße für die Justagekomplexität wirken, da im Gegensatz zur Handhabung und zum Fügen die Minimalmontage niemals Justage enthält, da Nicht-Justieren immer weniger Bewegungsaufwand als Justieren darstellt!

Folgende Arten der Justage sind prinzipiell möglich [83] :

- Justieren durch Einformen
- Justieren durch Umformen
- Justieren durch Trennen
- Justieren durch Fügen von Ausgleichsteilen
- Justieren durch Einstellen
- Justieren durch Nachbehandeln

Um sich währen der Konstruktion für bzw. gegen einen Justageprozeß entscheiden zu können, müssen die jeweiligen Folgekosten abgeschätzt werden. Das prinzipielle Vorgehen zeigt Bild 56.

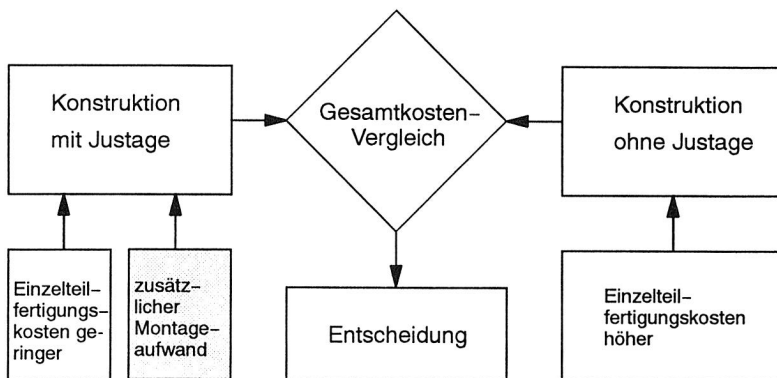


Bild 56 Vorgehensweise zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit von Justagefunktionen

Zur Abschätzung der erhöhten *Montagekosten* dient folgende Überlegung:

Wesentlichen Einfluß auf die Ermittlung der Montagekosten-Differenz "mit/ohne Justieren" haben die Größen "Theoretisch notwendige Toleranz ohne Justieren" (z) und

”Toleranz des relevanten Maßes mit Justieren” (t_J) des jeweils betrachteten konstruktiven Merkmals.

Zur Justagekomplexität wird das Verhältnis

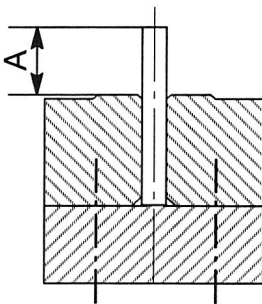
- $k_J = \log(t_J/z)$

definiert. Kleinstmöglicher Wert ist $k_J=0$, also keine zusätzlichen Montagekosten durch Justieren. Je größer das Verhältnis, desto schwieriger ist z.B. der Einstellvorgang. Damit ist das Verhältnis ein Maß für die steigenden Kosten.

Beispiel: Bild 57 zeigt zwei konstruktive Varianten einer Tiefenlehre

Funktionsmaß A der Tiefenlehre z.B. $A=12\pm 0,005\text{mm}$

Variante 1:
Stiftlänge gefertigt auf Maß.
 $t_J=0,01\text{mm}$
 $z=0,01\text{mm}$
 \Rightarrow Justagekomplexität $k_J=0$



Variante 2:
Stiftlängentoleranz $\pm 0,5\text{mm}$.
 $t_J=1\text{mm}$
 $z=0,01\text{mm}$
 \Rightarrow Justagekomplexität $k_J=2$

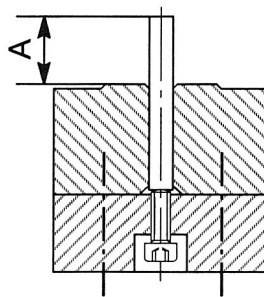


Bild 57 Varianten einer einfachen Tiefenlehre mit unterschiedlichen Justageeigenschaften

Welches ist die Kostenbasis m für die durch die Justagekomplexität verursachten Kosten?

Eine unabhängige Minimalkinematik m_D als Basis für die Justagekomplexität existiert in der Minimalanalyse nicht. Vielmehr sind Handhabungs- und Prozeßkinematik Grundlage der Justagekomplexität.

- $m_D = m_H + m_P$

Hierbei wird vorausgesetzt, daß die Handhabungs- und Prozeßkosten m_H und m_P nicht von den Justagekosten m_D , die Justagekosten aber von den Handhabungs- und Prozeßkosten abhängig sind. Dies ist in der Regel gegeben, da z.B. mit einer Erhöhung der Justagekomplexität eine Senkung der Einzelteilerfertigungskosten, nicht aber der Montagekosten einhergeht (Bild 57).

Somit gilt: $m_D = k_J(m_H + m_P)$

Der vergleichsweise einfache Kennwert k_J liefert in der Praxis brauchbare Ergebnisse. Im Beispiel des Düsenhalters wurde im System Design entschieden, die Längentoleranzkette Haltekörper, Zwischenscheibe, Düse, Druckbolzen und Feder mittels der Ausgleichsscheibe zu justieren (Bild 58).

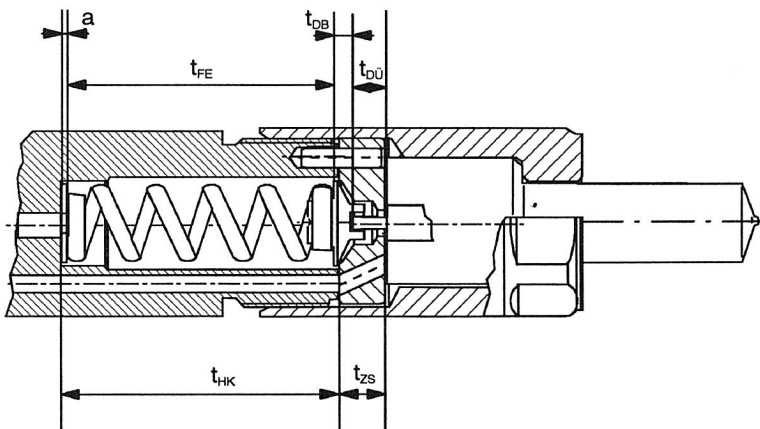


Bild 58 Längentoleranzkette für die Düsenhaltermontage

a wird so gewählt, daß

$$|t_{HK} + t_{ZS} + t_{DÜ} + t_{DB} + t_{FE} + a - w| \leq \varepsilon$$

erfüllt ist, wobei gilt:

w: theoretischer Sollwert der Maßkette

ε : max. zulässige geometrische Gesamttoleranz zur Funktionserfüllung

t_i : tatsächliche Längenmaße der Einzelteile i

a: Absolutmaß der Ausgleichsscheibe

Die durch diesen Justagevorgang erhöhten Relativkosten der jeweiligen (realisierten) Montage-Arbeitsgänge wurden mit der Justagekomplexität verglichen. Die Ergebnisse zeigen, daß das Verfahren für eine Kostenabschätzung geeignet ist.

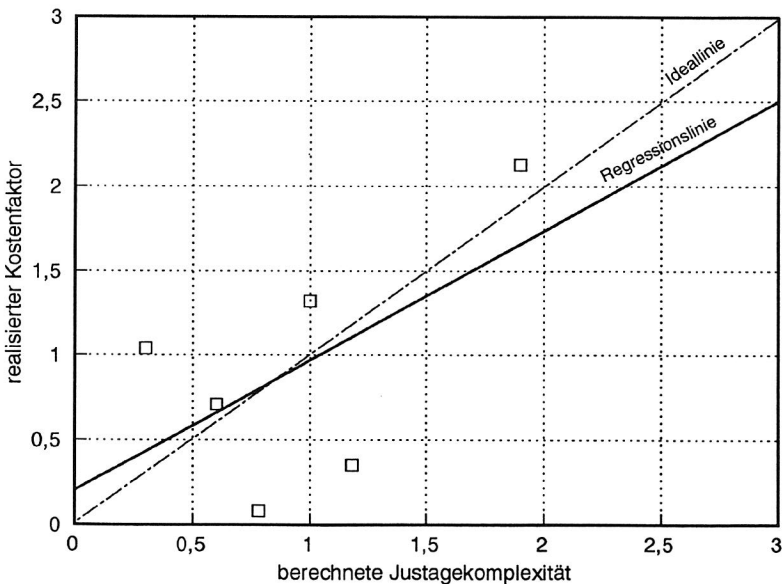


Bild 59 Justage-Relativkostenvergleich für die (teil-)automatisierten Arbeitsgänge der Düsenhalter-Montagelinie. Jeder Punkt entspricht einer Einzelteilmontage.

7 Möglichkeiten und Grenzen des Zielkostenmodells

7.1 Vollständige Formulierung der Zielkostenfunktion

Der Begriff "Teilekomplexität" wurde in den Kapiteln 4 und 6 als Überbegriff zur Quantifizierung von Komplexitätsmerkmalen von *Einzelteilen* eingeführt. Zur Beschreibung von Komplexitätseigenschaften ganzer Produkte liefert allein die Zielkostenfunktion charakteristische Summenwerte. Eine Summation z.B. verschiedener Prozeßkomplexitätswerte wäre ohne den in der Zielkostenfunktion erfolgenden Bezug auf die Minimalmontagekosten wenig aussagekräftig.

Die Zielkostenfunktion lautet zusammenfassend:

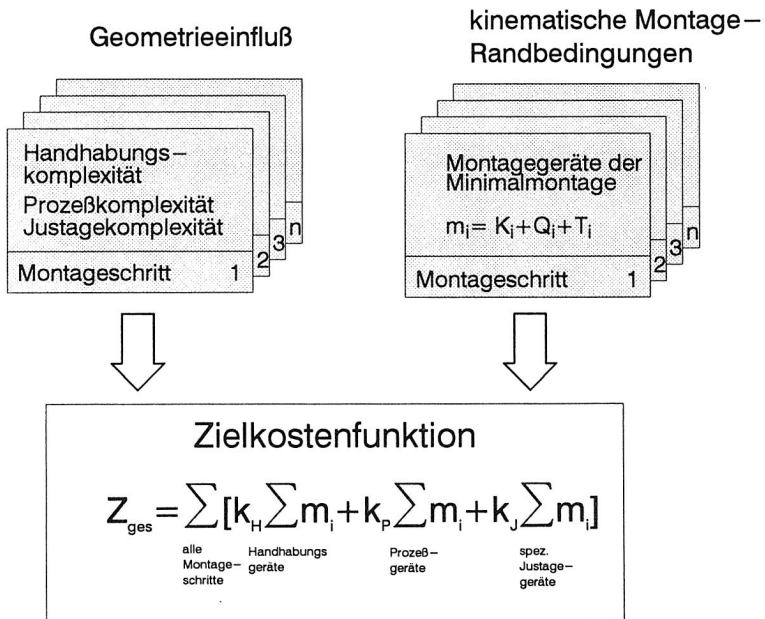


Bild 60 Vollständige Zielkostenfunktion

Für das Beispiel "Düsenhaltermontage" sind die für die Gesamtmontage errechneten Zielkosten in Bild 61 zusammengefaßt. Die Minimalmontagekosten wurden dabei analog den Beispielen "Handhabung der Feder" und "Verschrauben der Düsenspannmutter" (siehe 5.5) für alle Einzelteile bestimmt. Die zugehörigen Komplexitätswerte zeigen Bild 41 und Bild 50. Die Zielkosten errechnen sich dann mit der Formel in Bild 60 zu den in Bild 61 angegebenen Werten.

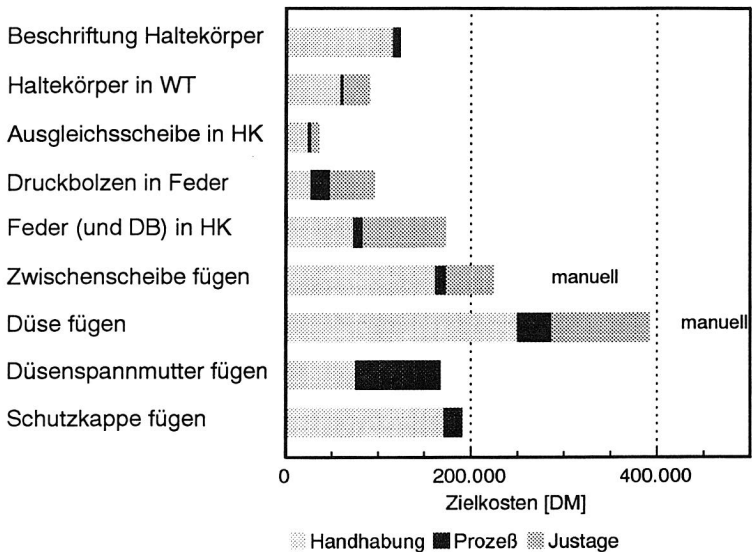


Bild 61 Balkendiagramm der Zielkostenblöcke aller Düsenhalter-Einzelteile

Mit diesen Informationen läßt sich die Frage nach weiterem Entwicklungspotential der Tellerfederkonstruktion aus Kap. 6.3.1 wieder aufgreifen. Bild 61 zeigt, daß eine Funktionsintegration der Ausgleichsscheibe in die Feder, wie sie in 6.3.1 diskutiert wurde, auf die Montagezielkosten bezogen wenig interessant ist.

Kostenwirksamer (siehe Bild 61) wäre eine Funktionsintegration des Druckbolzens in die Feder. In jedem Fall sinken durch die Tellerfederkonstruktion wegen der niedrigeren Handhabungs- und Prozeßkomplexitätswerte die Zielkosten der Feder (mit oder ohne integriertem Druckbolzen) deutlich ab.

Wie könnte eine Konstruktion mit integriertem Druckbolzen aussehen?

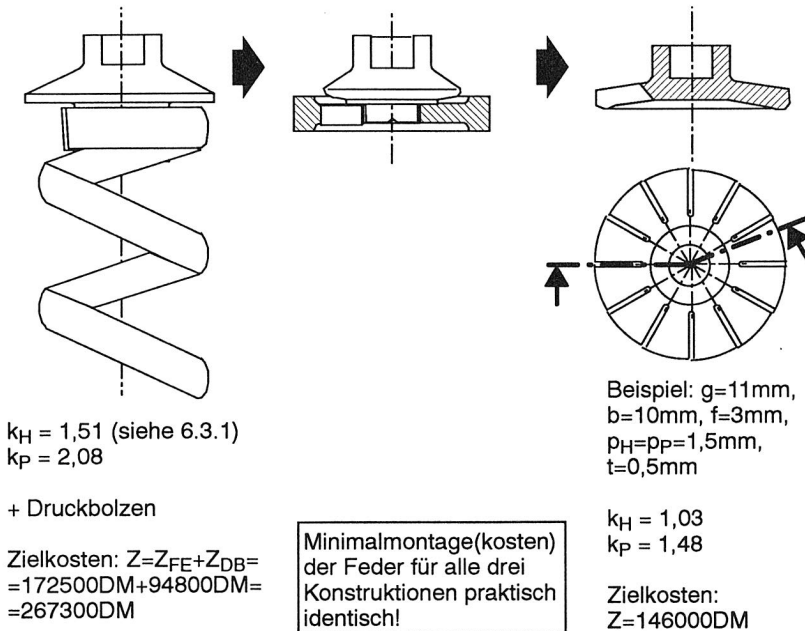


Bild 62 Montagezielkosten-Reduzierung durch Funktionsintegration. Beispiel: Tellerfeder mit integriertem Druckbolzen.

Um den Zapfen der Düsennadel aufnehmen zu können, muß das Funktionsprinzip der Tellerfeder umgedreht werden (Bild 62 rechts). Als Auflagefläche dient die Ausgleichsscheibe. Bild 63 rechts zeigt den möglichen Einbau der Feder. Dieses Konstruktionsprinzip vereinigt die prinzipiellen Vorteile der Tellerfederkonstruktion (vor allem geringere Handhabungs- und Prozeßkomplexität, kleinerer Einbauraum) und der Funktionsintegration (Montage Druckbolzen entfällt).

Die Zielkosten für die Federmontage fallen von 172500 DM (Serienkonstruktion) auf 146000 DM (Bild 62), die Zielkosten für die Druckbolzenmontage (94800 DM) entfallen ganz.

Bemerkung: Ob die Konstruktion in Bild 62 bzw. Bild 63 alle Funktionsanforderungen der Düsenshalterentwicklung erfüllt oder nicht, ist hier uninteressant. Entscheidend war, die Möglichkeiten und Arbeitsweise des Zielkostenmodells ausschnittsweise aufzuzeigen.

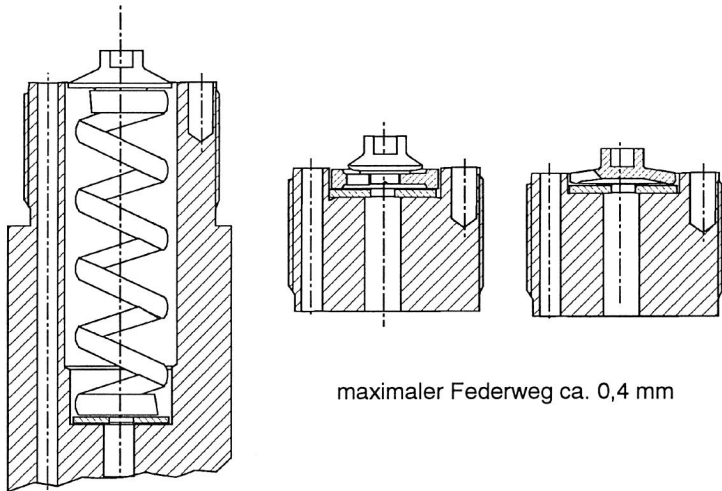


Bild 63 Alternative Druckbolzen/Federkombinationen und deren Einbau

7.2 Vergleich des Zielkostenmodells mit den allgemeingültigen Erkenntnissen zur Montagegerechten Produktgestaltung

Das folgende Kapitel soll einen Quervergleich zwischen allgemeingültigen Erkenntnissen und Regeln zur Montagegerechten Produktgestaltung und deren Bezug zum Zielkostenmodell bieten.

Die wichtigste allgemeingültige Regel zur Konstruktion eines montagegerechten Produkts, die sich auf das gesamte Erzeugnis bezieht, ist die

- Minimierung der Gesamtzahl der Einzelteile.

Diese Erkenntnis wird durch das Zielkostenmodell voll unterstützt, da Z mit Hilfe der Formel in Bild 60 über alle Einzelteile aufsummiert wird. Dabei ist zu beachten, daß sich der Begriff "Zielkosten" sowohl auf das Gesamtprodukt, als auch auf das Einzelteil

beziehen läßt, die Teilekomplexität k sich in Form von k_H , k_P und k_J dagegen stets auf Einzelteile bezieht.

Aspekte der Montagerechten Produktgestaltung, die über die Gestaltung des aktuell betrachteten Produkts hinausgehen und daher von außen an den Konstrukteur bzw. den Anlagenplaner herangetragen werden müssen, unterstützt das entwickelte Modell nicht gezielt. Ein Beispiel hierfür ist die mögliche Forderung nach einer

- Baugruppenstruktur,

wo dies von der jetzigen oder zukünftigen Varianten-Situation empfehlenswert erscheint (z.B. Vertriebsinformation notwendig). Zusätzliche Informationen sind auch notwendig, um Fragen der

- Schnittstellenstandardisierung und Gleichteilverwendung

berücksichtigen zu können. Entsprechende Zusatzinformationen muß das Simultaneous Engineering Team modellunabhängig verarbeiten, z.B. mit Unterstützung der Methodik von Bäßler [1].

Alle weiteren allgemeingültigen Erkenntnisse beziehen sich auf Einzelteileigenschaften bzw. auf das Fügen der Einzelteile. Die Unterstützung durch das Zielkostenmodell ist stets gegeben, aber sehr unterschiedlich realisiert und wird im folgenden erläutert.

Als wichtig erachtet wird gemeinhin die Auswahl der

- Art der Verbindungstechnik

Im Zielkostenmodell ist dies kein unmittelbarer Einflußparameter, sondern er wird auf zweierlei Weise indirekt voll berücksichtigt:

Zum einen werden durch die Wahl der Verbindungstechnik die Minimalmontagekosten entscheidend beeinflusst. So kann die Minimalkinematik einer Schnappverbindung aus einer einzigen Linearbewegung bestehen (sehr kostengünstig), während für eine Schweißbewegung wesentlich mehr Bewegungsaufwand (Teile positionieren, Elektroden- bzw. Brennerführung) notwendig ist. Technologiespezifische Anlagenkosten (Schweißausrüstung) gehen nicht in die Minimalmontagekosten ein.

Zum andern wurde in Kapitel 6.4.2 gezeigt, daß die Prozeßkomplexität k_P , unabhängig von

der Art der Verbindungstechnik, die mit ihr verbundene Kostenentstehung, relativ zu den Minimalmontagekosten, korrekt wiedergibt.

Durch weitere Untersuchungen [81] wurde bestätigt, daß bei gleichen Anforderungen die Wahl des Verbindungsprozesses keinen signifikanten Einfluß auf die Gesamt-Montagekosten hat. So verursachen z.B. Schraubprozesse bei gleichen geometrischen Anforderungen vergleichbare Kosten wie andere Fügeprozesse. Schraubprozesse weisen i.A. sehr hohe Anforderungen an die zu realisierende Geometrie auf (hohe Prozeßkomplexität!); deshalb sind in der Praxis die verursachten Kosten meist höher als bei anderen Fügeprozessen.

Die Wahl der

- Fügerichtung

wird unmittelbar in den Minimalmontagekosten m abgebildet. Je weniger Bewegungen notwendig sind, um so geringer sind die Minimalmontagekosten (m_{ges} wird über alle Geräte aufsummiert). Je weniger Ansprüche an die mit der Fügebewegung anzufahrenden Punkte gestellt werden, um so geringer werden die Minimalmontagekosten (siehe z.B. Bild 30). Der Einfluß der anderen Parameter auf die Minimalmontagekosten einer linearen, pneumatisch erzeugten Bewegung läßt sich in diesem Bild ebenfalls ablesen. Im Idealfall ist nur eine Fügebewegung notwendig, die sich mit folgenden Parametern realisieren läßt: lineare Bewegung mit pneumatischem Antrieb, einen Punkt ungeführt anfahren, erforderlicher Hub < 50 cm, zu überwindende Kraft < 220 N. Bild 30 weist dazu Minimalmontagekosten von $m_p = m(\text{lin, pneu, } 1u, 50\text{cm, } 220\text{N}) \approx 1700\text{DM}$ aus. Dahinter steht als Gerät ein einfacher Pneumatikzylinder, mit dem sich z.B. einfache Schnappverbindungen realisieren lassen. Achtung: In $m_p = 1700\text{DM}$ sind keine Handhabungskosten wie Greifer u.a. enthalten, außerdem fehlt zu tatsächlichen Zielkosten noch der Faktor Prozeßkomplexität k_p . Fügerichtung und Prozeßkomplexität beeinflussen sich jedoch nicht gegenseitig. Der

- Fügewiderstand

ist im fünften Parameter der Funktion Minimalmontagekosten (z.B. Belastbarkeit/Belastung in N oder Nm) berücksichtigt. Bei entsprechend hohem Fügewiderstand ist mehr Fügkraft bzw. -moment aufzubringen.

- Fügeschrägen

werden in der Handhabungskomplexität k_H bzw. der Prozeßkomplexität k_p durch die Positioniertoleranz p_H bzw. p_p abgebildet (siehe auch 6.2). Keinen Einfluß haben jedoch

Fügeschrägen auf die Geräteauswahl für die Minimalmontage, da die Kinematik gleich bleibt. Genauigkeitsanforderungen, die aus Produkteigenschaften (hier: Vorhandensein von Fügeschrägen) abgeleitet sind, werden nur in den Komplexitätswerten k_H und k_P abgebildet. Die Zielkosten eines Fügeprozesses sinken beim Vorhandensein von Fügeschrägen dadurch, daß k_H bzw. k_P abnimmt.

- Mehrstellenkontakt

bedeutet im Modell kleine Werte für die zulässige Positioniertoleranz und damit höhere Prozeßkomplexität. Denkbar ist auch, daß bei Mehrstellenkontakt mit zusätzlichen Bewegungen gefügt werden muß, dies würde dann auch die Minimalmontagekosten erhöhen. Genauere Aussagen lassen sich nur einzelfallspezifisch treffen. Die

- Zugänglichkeit

beeinflußt die erforderliche Kinematik und damit die Minimalmontagekosten. Schlechte Zugänglichkeit erfordert zusätzliche Bewegungen und verursacht somit zusätzliche Gerätekosten.

- Äußere Maße

gehen über die k_H - bzw. k_P -Werte in die Zielkosten ein. Aber auch die Minimalkinematik wird z.B. über den notwendigen Greiferhub beeinflusst. Ähnliches gilt für die

- Form.

Sie bietet auch ein Beispiel dafür, wie sich Konstruktionsrichtlinien aus den Komplexitätsformeln ableiten lassen. Bild 38 zeigt, daß nadel- und haarförmige Teile zu vermeiden sind, da sich diese (neben anderen Nachteilen) schlecht ausrichten lassen. Die

- Masse

beeinflußt den fünften Parameter der Minimalmontagekosten (Kraft/Moment). Mit zunehmender Masse müssen entsprechend höhere Kräfte aufgebracht werden. Die äußeren Maße (Geometriewerte) korrelieren über die Werkstoffdichte ebenfalls mit der Masse. Die

- Steifigkeit

eines Teils wirkt sich einerseits auf die Teilekomplexität aus: Bild 46 und der zugehörige Text zeigen z.B. Regeln für die Analyse der Fügelänge f für starre und flexible Teile. Andererseits haben biegeschlaffe Teile starken Einfluß auf die Minimalkinematik. Diese ist in der Regel wesentlich umfangreicher, da z.B. beim Einsetzen eines langen PkW-Dichtgummis eine Andrückrolle entlang der gesamten Gummilänge in einer mehrdimensionalen Kurve geführt werden muß. Die Kosten für eine entsprechend mehrachsige, NC-gesteuerte Bewegung sind entsprechend hoch. Ähnliche Zusammenhänge gelten auch für die

- Greifbarkeit eines Teils.

Neben dem Ansteigen der Teilekomplexität mit ungünstigen Formen wird auch oft die Greifbarkeit schlechter (Beispiel nadelförmige Teile). Zusätzlich muß schlechte Greifbarkeit je nach Einzelfall mit einer aufwendigeren Minimalkinematik überwunden werden.

- Neigung zum Verhaken und Verkleben

hat ebenfalls Auswirkungen auf die Minimalkinematik. Entweder müssen spezielle Entwirrgeräte eingesetzt werden oder die Teile müssen geordnet und nicht als Schüttgut bereitgestellt werden. Bei geordneter Teilebereitstellung sind selbst ohne Berücksichtigung der Ordnungskosten die Minimalmontagekosten für die Teileentnahme größer als bei ungeordneter Teilebereitstellung. Ähnliches gilt für die

- Empfindlichkeit der Teile.

Empfindliche Teile müssen geordnet bereitgestellt werden. Vibratorisches Bunkern/Ordnen/Bewegen scheidet aus. In der Literatur bisher kaum berücksichtigt wurden

- Justageeigenschaften eines Teils

zur Beurteilung der Folgekosten einer Konstruktion mit bzw. ohne Justage. Prinzipiell ist davon auszugehen, daß Justieren die Montagegerechtheit verschlechtert, da es zusätzlichen Aufwand bedeutet. Allerdings können sich Fertigungsgerechtheit bzw. die Fertigungskosten derart verschlechtern, daß die Ziele "kostengünstige Montage" und "kostengünstige Einzelteilmontage" massiv kollidieren. Umso wichtiger ist es, mit der Justagekomplexität einen –wenn auch groben– Anhaltswert dafür zu haben, in welchem Maß das Teil justiert

werden muß (siehe auch 6.5) und welche Folgekosten für die Montageanlagen zu erwarten sind. Dieser Ansatz ist neu.

7.3 Einsatzmöglichkeiten in der manuellen Montage

Es stellt sich die Frage, ob das Prinzip $Z=k \cdot m$ nicht nur für die automatisierte, sondern auch für die manuelle Montage gilt.

Bisher wurde angenommen, daß der Faktor k invariant gegenüber der Art der Montage ist, da k rein produktbezogen definiert wurde.

Bei identischen Minimalmontagekosten führen Geometrievariationen einer Einzelteilkonstruktion zu Variationen bei k_H und k_P , die dann als Relativkostenveränderungen gedeutet werden können. Dies wurde für die automatisierte Montage gezeigt und muß auch für die manuelle Montage gelten, wenn k tatsächlich invariant gegenüber der Art der Montage ist.

Diese Annahme soll zunächst anhand zweier einfacher Beispiele verifiziert werden.

Konstruktive Variationen eines Einzelteils lassen sich in der manuellen Montage durch das MTM-Grundverfahren [17] hinsichtlich des Zeitbedarfs und damit der Relativkosten analysieren. Im folgenden soll für ein einfaches Handhabungs- und ein einfaches Fügeprozeßbeispiel die Relativkostenentwicklung beim MTM-Grundverfahren der jeweiligen Komplexitätszunahme gegenübergestellt werden.

Beispiel 1: Ein Metallstab der Länge g (wird variiert) und des Durchmessers $b=20\text{mm}$ wird vereinzelt bereitgestellt. Er soll von Hand gegriffen werden und gegen den Anschlag einer Vorrichtung gebracht werden. Die Fasen am Stab betragen $p_H=2 \cdot 5\text{mm}$. Der Handarbeitsplatz soll die Voraussetzungen zur Anwendung des MTM-Verfahrens (voll beeinflussbare Tätigkeit, Übung des Mitarbeiters) erfüllen.

Bild 64 zeigt die k_H -Kurve, die bei Anwendung der Gleichung $k_H = 1 + \log(g/b) \cdot \log(b/p_H)$ für die Variable g entsteht. Gegenübergestellt wird dem die MTM-Analyse (Zeitverbrauch in TMU) für "Greifen" und "Bringen": Bis $g=120\text{mm}$ wird G1A-M30A (14,7 TMU) analysiert, für $120\text{mm} < g < 410\text{mm}$ wird G1A-M30B (erhöhter Kontrollaufwand, 15,3 TMU) analysiert und für $410\text{mm} \leq g \leq 450\text{mm}$ wird G1A-SC2-M30B2 (Masse $> 1\text{kg}$, 17,4 TMU) analysiert.

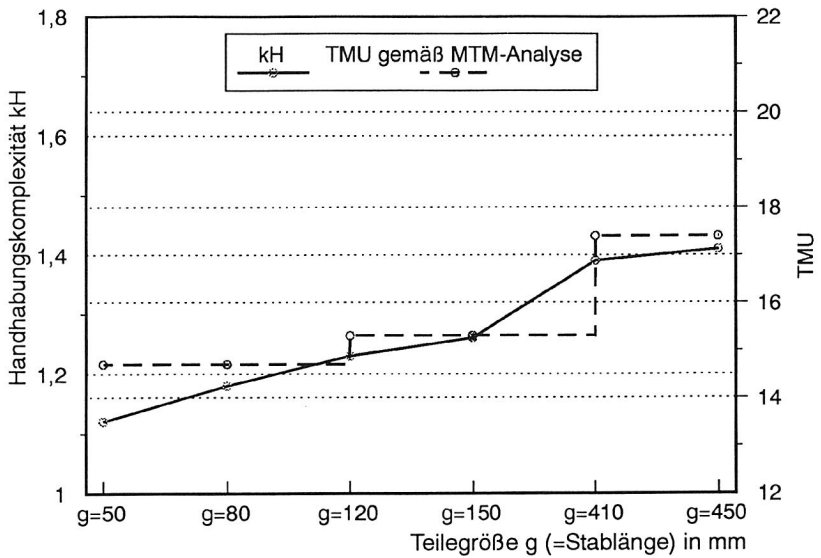


Bild 64 Relativkostenvergleich für manuelle Arbeitsgänge am Beispiel "Handhabung eines Stabes" ($\varnothing 20\text{mm}$).

Die Übereinstimmung der beiden Kurven ist gut, d.h. die Handhabungskomplexität liefert im obigen Fall vergleichbare Relativkosten für die Handhabung mit das MTM-Verfahren.

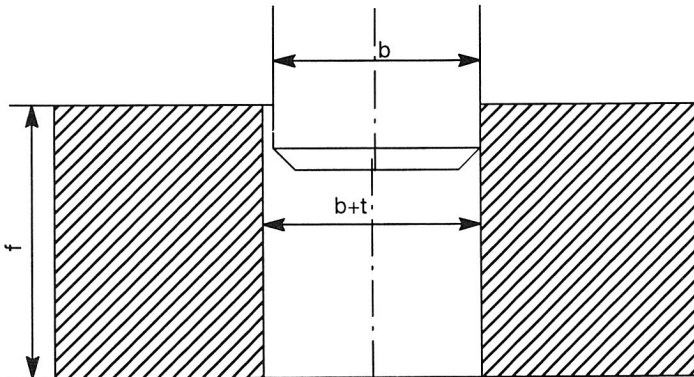


Bild 65 Bolzen/Loch-Problem zur Relativkosten-Untersuchung in Beispiel 2

Beispiel 2: Ein Bolzen mit dem Durchmesser $b=21$ (Fügebreite) soll über $f=25\text{mm}$ (Fügelänge) von Hand in eine Bohrung gefügt werden (siehe Bild 65). Die Fase sei $1 \cdot 45^\circ$, also $p_p=2\text{mm}$. Gemäß 6.4.1 gilt auch hier $R=20\text{mm}$. t sei das Spiel des Fügeprozesses und wird von $t=0,05\text{mm}$ bis $t=1\text{mm}$ variiert. Dabei wird angenommen, daß aufgrund der Form- und Oberflächentoleranzen für $t \leq 0,1\text{mm}$ leichter Druck beim Fügen notwendig ist. Betrachtet wird der eigentliche Fügevorgang, dessen Relativkostenentwicklung sowohl mit k_p als auch mit der MTM-Analyse dargestellt wird (Bild 66).

Die Kurve für k_p entsteht gemäß 6.4.1 aus der Gleichung $k_p = [1 + f/(10 \cdot b)] \cdot (b - p_p)/(b - t) \cdot \log(R/t)$. Die entsprechende MTM-Analyse ist M12C-P1SE-RL1 (16,4TMU) bzw. M12C-P2SE-RL1 (27 TMU) für $t \leq 0,1\text{mm}$ (siehe oben).

Es zeigt sich, daß die Prozeßkomplexität die Relativkosten für den Fügeprozeß vergleichbar mit dem MTM-Verfahren beschreibt. Im obigen Beispiel werden Veränderungen des Fügespiels mit der k_p -Gleichung sogar wesentlich kontinuierlicher als mit den diskreten Stufen des MTM-Verfahrens beschrieben.

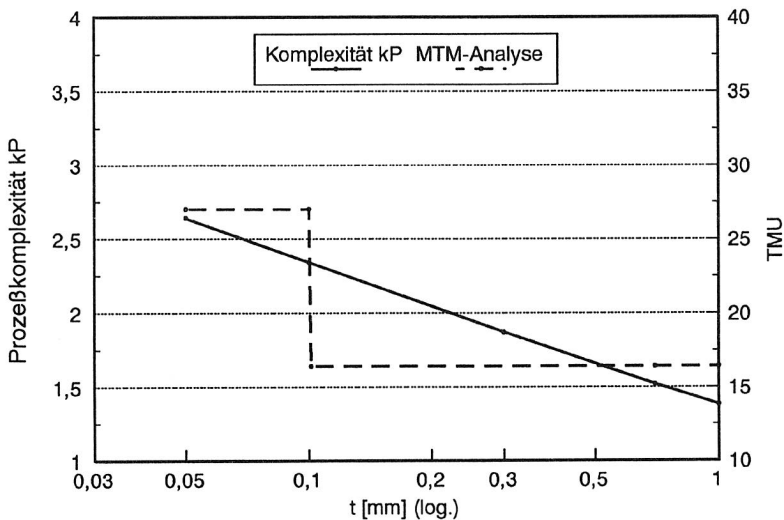


Bild 66 Prozeß-Relativkostenvergleich für manuelle Arbeitsgänge am Beispiel eines Bolzen/Loch-Problems

Zur Beurteilung der Gültigkeit des Prinzips $Z=k \cdot m$ für die manuelle Montage ist nach der Betrachtung von k die Minimalmontage für manuelle Arbeiten zu definieren und die Gültigkeit der Gesamtgleichung zu überprüfen.

Was kann den Geräten der automatisierten Minimalmontage an Vergleichbarem in der manuellen Montage gegenübergestellt werden?

Üblicherweise wird in der manuellen Montage mit Zeitwerten statt mit unmittelbaren Kostenwerten gearbeitet. Anstelle der Minimalmontagekosten, die durch die Montagegeräte verursacht werden, kann z.B. eine "Minimalanalyse" des MTM-Verfahrens treten. In der Analyse wird jeweils die einfachste Grundbewegung (R-A, M-A, ...) analysiert und anschließend mit der Teilekomplexität multipliziert. Um die Qualität der so zu erhaltenden Ergebnisse beurteilen zu können, wurden Vergleichsuntersuchungen dieser Vorgehensweise mit dem MTM-Grundverfahren [17] und der Methode "Design for Manual Assembly (DFMA)" nach Boothroyd [4] durchgeführt¹. Hier werden zwei Beispiele exemplarisch betrachtet.

Das Analyseverfahren, das auf dem Zielkostenmodell aufbaut, wird "Komplexitätsanalyse" genannt. Es wird zunächst anhand verschiedener Varianten eines einfachen Bolzen-Loch-Problems mit dem MTM-Grundverfahren und der DFMA-Methode verglichen.

Vier verschiedene Varianten werden betrachtet (Bild 67):

- (a) Bolzen wird in feststehende Bohrung eingefügt. Es sind keine Fügeschrägen vorhanden.
- (b) Bolzen wird in feststehende Bohrung eingefügt. Am Bolzen befindet sich eine Fügeschräge.
- (c) Bolzen wird in feststehende Bohrung eingefügt. Es sind Fügeschrägen an beiden Bauteilen vorhanden.
- (d) Bolzen und Bohrung werden beide bewegt (z.B. Aufstecken einer Unterlegscheibe auf eine Schraube). Es sind Fügeschrägen an beiden Bauteilen vorhanden.

Die Ergebnisse des Zeitwertevergleichs für die jeweils analysierte Aufgabe zeigt Bild 67. Der Zeitwert, der sich jeweils aus dem MTM-Grundverfahren ergibt, wurde willkürlich auf 100% gesetzt. Die jeweiligen Annahmen über die Randbedingungen der Aufgabe, die

1. Unveröffentlichte Arbeit, die 1994 unter Mitarbeit von G. Weniger am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik entstand.

bei den drei Verfahren unterschiedlich berücksichtigt werden, wurden möglichst vergleichbar gewählt. Dennoch ergeben sich Probleme z.B. dadurch, daß MTM eine konsequente Beidhandarbeit fordert und methodisch unterstützt, während dies beim DFMA-Verfahren nur sehr pauschal Berücksichtigung findet [5].

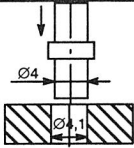
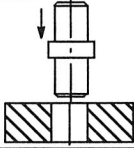
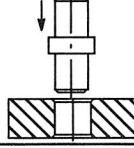
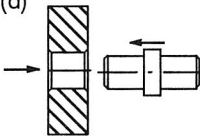
Varianten des Bolzen-Loch-Problems	relativer Zeitwert	MTM	DFMA	Komplexitätsanalyse
(a) 	Handhabung	100%	108%	110%
	Fügeprozeß	100%	305%	139%
	Summe	100%	183%	121%
(b) 	Handhabung	100%	108%	96%
	Fügeprozeß	100%	341%	245%
	Summe	100%	166%	133%
(c) 	Handhabung	wie Fall (b)	wie Fall (b)	89%
	Fügeprozeß			232%
	Summe			126%
(d) 	Handhabung	100%	114%	78%
	Fügeprozeß	100%	238%	224%
	Summe	100%	156%	127%

Bild 67 Relativer Zeitbedarf zur Bolzen-Loch-Montage

Es fällt auf, daß die drei Verfahren deutlich unterschiedliche Zeitwerte liefern. Das MTM-Grundverfahren liefert meist den geringsten Zeitwert (was nicht auf Beidhandarbeit zurückzuführen ist!), das DFMA-Verfahren fast immer den höchsten Zeitwert. Dazwischen liegen die Ergebnisse der Komplexitätsanalyse. Dies wird als Bestätigung für die Korrektheit des Ansatzes $Z=k \cdot m$ für das Bolzen-Loch-Problem interpretiert.

Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, daß eines der Vergleichsverfahren (oder beide) unzutreffende Werte liefert. Die hohen Streuungen der Werte deuten in diese

Richtung. Andererseits liegen sowohl der DFMA-Methodik, als auch dem MTM-Verfahren ausführliche Untersuchungen zugrunde, so daß sowohl eine weitere Bestätigung als auch eine (Teil-)Widerlegung außerordentlich schwierig wäre. Es steht nämlich kein Prüf- oder unabhängiges Referenzverfahren zur Verfügung. Für die Überprüfung der Komplexitätsanalyse bietet der Vergleich mit *beiden* Verfahren (DFMA und MTM) jedoch die größtmögliche Aussagekraft.

Als zweites Beispiel für eine manuelle Montageaufgabe wird die Reparatur einer Leiterplatte analysiert.

Folgende Annahmen werden getroffen:

Auf einer Leiterplatte der Größe 300x200mm befindet sich ein defektes Bauteil, das zu ersetzen ist:

Am Reparaturplatz kommen die Leiterplatten vereinzelt an (Transportsystem). Entnahme, Einlegen in Fixierung auf dem Tisch, Entlöten des Bauteils mit einem Heißluftlötssystem. Entnahme des Bauteils mit Pinzette und Sehhilfe, Sichtprüfung des Ersatzbauteils, Orientierung des Bauteils und Verlöten per Heißluftlötssystem. Zuletzt wird die Leiterplatte abgeführt.

Die entsprechenden Analysen brachten die in Bild 68 zusammengefaßten Ergebnisse.

Auch bei diesem Beispiel zeigt sich, daß die Zeitwerte der Komplexitätsanalyse zwischen denen des MTM-Grundverfahrens und denen der DFMA-Analyse liegen. Aufgrund dieser Ergebnisse, die durch weitere Untersuchungen bestätigt wurden, muß der Ansatz $Z=k \cdot m$ auch für die manuelle Montage als korrekt angesehen werden.

Die praktische Anwendung des Verfahrens auf manuelle Arbeitsplätze bringt insgesamt jedoch kaum Vorteile, da eine herkömmliche MTM-Planungsanalyse nach dem MTM-Grundverfahren oder nach MTM-UAS [8] nur einen geringen Mehraufwand bei größerer Genauigkeit bedeutet. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt daher auf der automatisierten Montage.

Bei der teilautomatisierten Montage müssen aus Gründen der Vergleichbarkeit an die Stelle der Zeitwerte Kostenwerte treten. Die Kosten für die manuellen Arbeiten sind über den Abschreibungszeitraum der Anlage nach den betriebsüblichen Bedingungen hochzurechnen. So läßt sich in der teilautomatisierten Montage die Komplexitätsanalyse der manuellen Arbeiten mit der Zielkostenfunktion der automatisierten Montage verbinden.

Arbeitsgang	relativer Zeitwert	MTM	DFMA	Komplexi- täts- analyse
Leiterplatte zu- und abführen	Handhabung	100%	72%	97%
	Fügeprozeß	100%	234%	91%
	Summe	100%	104%	96%
defektes Bau- teil entlöten	Handhabung	100%		119%
	Fügeprozeß	100%	155%	107%
	Summe	100%	115%	110%
defektes Bauteil abnehmen	Handhabung	100%	471%	118%
	Fügeprozeß	100%	129%	66%
	Summe	100%	302%	92%
Ersatzbauteil aufsetzen	Handhabung	100%	389%	135%
	Fügeprozeß	100%	232%	179%
	Summe	100%	292%	162%
Verlöten	Handhabung	100%		115%
	Fügeprozeß	100%	155%	107%
	Summe	100%	122%	109%

Bild 68 Relativer Zeitbedarf für Leiterplattenreparatur

7.4 Die Zielkostenfunktion als bereichsübergreifender Regelalgorithmus

Den wichtigsten Einfluß auf die Vermeidung unnötiger Kosten haben Entwicklung und Arbeitsvorbereitung [28].

Sehr viele Entscheidungen der Konstruktion beeinflussen die Fertigungs- und Montageplanung; damit beeinflussen sie direkt Kosten, Qualität und Zeitverbrauch des

Produktionsprozesses. Es bestehen somit starke Abhängigkeiten zwischen Produkt- und Montagesystemgestaltung.

Deshalb ist man bemüht, durch systematisches Vorgehen die beiden Gestaltungsprobleme möglichst parallel zu lösen [39]. Diese Integration von Konstruktion und Planung wird umso wichtiger, je komplexer die Aufgabenstellung wird, da die "Totzeit" zwischen Planungszeitpunkt und Umsetzungszeitpunkt bei einem sequentiellen Produktentstehungsprozeß besonders lange und folgenreich sein kann [51].

Diese integrierte Vorgehensweise dient drei Zielen:

- Verbesserung der Planungsqualität
- Minimierung des Zeitverbrauchs
- Minimierung der Kosten, z.B. der Änderungskosten [68]

In der Praxis besteht häufig Unklarheit und dadurch Uneinigkeit darüber, wo die größten Kostensenkungspotentiale liegen. Doch gerade bei einem integrierten Vorgehen ist es wichtig, jederzeit Angaben zu den momentanen Kostensenkungspotentialen getrennt für Konstruktion und Planung machen zu können. Dafür existieren derzeit keine schnell zu handhabenden Hilfsmittel.

Wie können die Potentiale für Entwicklung und Arbeitsvorbereitung schnell und möglichst wechselwirkungsfrei quantifiziert werden?

Durch die *Konstruktion* werden über geometrische Einflußgrößen die Faktoren Handhabungs-, Prozeß- und Justagekomplexität festgelegt. Diese sind im Idealfall: $k_H=1$, $k_P=1$, $k_J=0$. Die Verantwortung für höhere Komplexitätskennzahlen trägt die Konstruktion.

Daneben legt die Konstruktion auch einige der in die Minimalmontage eingehenden Parameter wie Teilezahl oder Fügerichtungen fest. Andere Parameter der Minimalmontage, wie z.B. Variantenzahl, werden durch den Vertrieb festgelegt.

Die *Fertigungsvorbereitung* trifft die Auswahl der Montagegeräte und ist somit für die über $k \cdot m$ hinausgehenden, gerätebedingten Abweichungen von den Zielkosten Z verantwortlich. Dies gilt für alle Montageschritte bezüglich der Teilbereiche Handhabung, Prozeß und Justage.

Dabei ist zu beachten, daß der "Justagekosten"-Anteil bei einer *Istkosten-Analyse* in der

Regel auch nicht-wertsteigernde Kostenanteile enthält. Bei einer konsequenten Interpretation der Definition (siehe 6.5) der Justagekomplexität ("... ist ein Maß für die Unvollkommenheit der Montage ...") müssen bei einer Ist-Analyse alle Geräte, die die Unvollkommenheit der Montage beseitigen helfen, also z. B. Prüfmittel und Nacharbeitsgeräte, berücksichtigt werden. Im Justagekosten-Anteil der Zielkosten dagegen sind diese als nicht-wertsteigernde Kostenanteile nicht enthalten. Dies kann in der Praxis zu ganz erheblichen Potentialen führen, wie am Beispiel "Zwischenscheibe fügen" (Bild 69 oben) zu sehen ist. Eine Analyse zeigte, daß in diesem Beispiel das Justagekosten-Potential allein auf die Prüfkosten zurückzuführen ist. Die Potentiale bei Handhabung und Prozeß sind dagegen im wesentlichen auf die Montagegeräteauswahl zurückzuführen (Handhabung durch Industrieroboter, Fügen von Hand).

Bild 69 zeigt die Potentiale zweier Beispiele zu einem definierten Zeitpunkt (Planungsende). Dabei ist als "Potential für Konstruktion" das Potential, das in der Teilekomplexität steckt, ausgewiesen. Das ausgewiesene "Potential für Fertigungsvorbereitung" sind die über die Zielkosten hinausgehenden Montagegerätekosten.

Daneben existieren noch weitere, in Bild 69 nicht dargestellte Potentiale. Die Konstruktion kann die Voraussetzungen, für die die Minimalmontage bestimmt wurde, beeinflussen. So lassen sich z.B. für die Minimalmontage fest vorgegebene Fügerichtungen durch konstruktive Maßnahmen noch weiter vereinfachen. Auch die Fertigungsvorbereitung kann die Voraussetzungen für die Minimalmontage, z.B. über die Wahl des Verkettungskonzepts beeinflussen. Die in Bild 69 nicht dargestellten Potentiale lassen sich jedoch schwer quantifizieren, da in der Regel keine Idealzustände definierbar sind. Die in Bild 69 nicht dargestellten Potentiale sind für die Einzelteile Feder und Zwischenscheibe von Bild 69 klein, da die gesamten Minimalmontagekosten jeweils kleiner als die ausgewiesenen Potentiale sind. Diese Aussage läßt sich jedoch nicht pauschalisieren.

Zu beachten ist, daß nicht alle Potentiale (Bild 69) gezielt ausschöpfbar sind. Insbesondere bei der Konstruktion wird es aus Funktionsgründen nicht immer gelingen, die Teilekomplexität sehr stark abzusenken. Dennoch ist es wichtig, die Größe der Potentiale zu kennen.

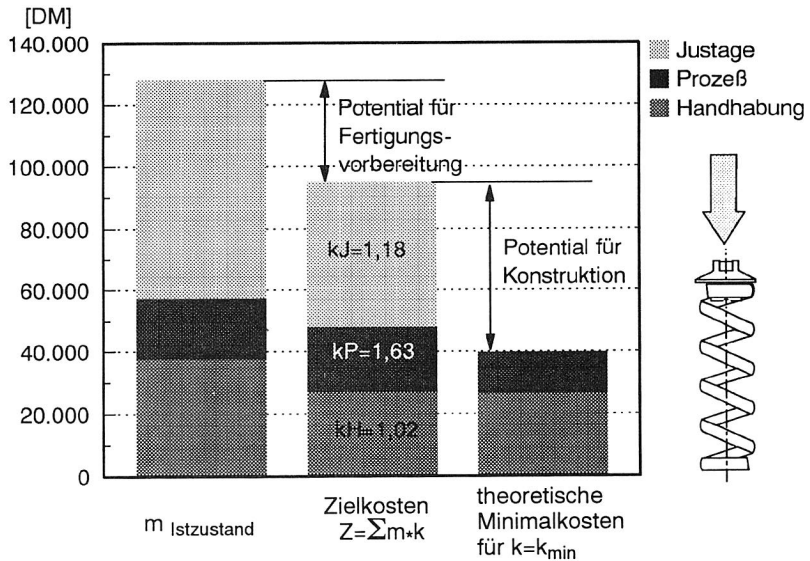
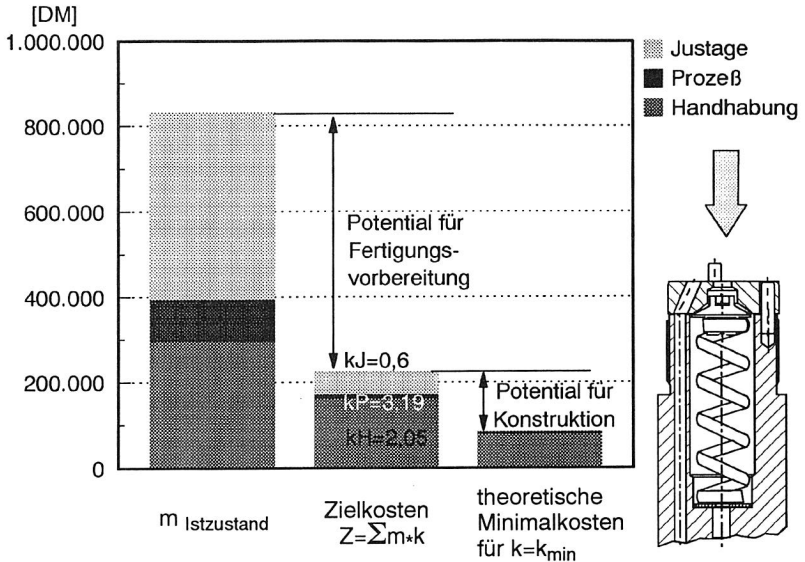


Bild 69 Kostenpotentiale für Entwicklung und Fertigungsvorbereitung zu einem beliebigen Planungszeitpunkt (Beispiele: Zwischenscheibe fügen (oben), Druckbolzen fügen (unten))

Mit dieser Kostenaufgliederung ist es nicht nur möglich, den Grad der Abweichung von einer Minimalmontage festzustellen, sondern zugleich auch der Konstruktion und der Arbeitsvorbereitung gesondert Verbesserungspotentiale zuzuweisen. Es ist so ein bereichsübergreifender Regelalgorithmus entstanden (Bild 70).

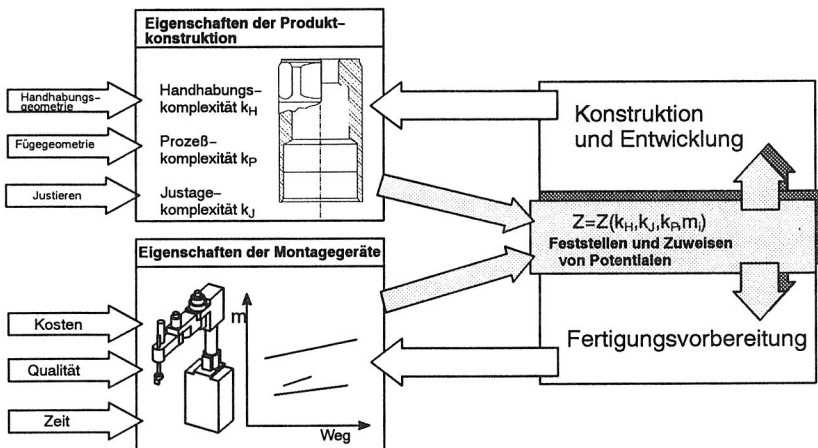


Bild 70 Bereichsübergreifender Regelalgorithmus zur Ausschöpfung von Kostenpotentialen in der Produktentstehungsphase

7.5 Beitrag zum marktorientierten Zielkostenmanagement

Das marktorientierte Zielkostenmanagement ("Target Costing") ist ein umfassendes Kostenplanungs-, Kostensteuerungs- und Kontrollinstrument, das den gesamten Prozeß der Produktentstehung von einer frühen Phase der Entwicklung an begleitet [59]. Es hat sich in der Praxis bewährt [88].

Ausgangspunkt der Betrachtung ist der Kunde bzw. der Markt. Er legt die Bedingungen bezüglich Preis, Qualität und Zeit und damit auch die intern maximal zulässigen Kosten fest. Dieses Kostenziel wiederum ist die Ausgangsbasis für die zielgerichtete Gestaltung der kostenverursachenden Abläufe und Entscheidungen ("Market into Company").

Horvath [40] weist darauf hin, daß viele deutsche Unternehmen zu unrecht annehmen, sie betrieben Target Costing. Entscheidende Parameter sind der möglichst frühe Zeitpunkt der verbindlichen Selbstkostenfestlegung und die Art und Weise der Berücksichtigung von Kundenwünschen.

Eine Schwierigkeit des Zielkostenmanagements liegt in der Zielkostenspaltung, d.h. der Aufteilung der Gesamtzielkosten in Teilzielkosten entsprechend einer Gliederung nach Komponenten. Dies kann über eine Aufteilung der Kosten entsprechend der Wichtigkeit der mit der Komponente verbundenen Funktionen erfolgen. Auf dieser Basis wird folgender Ablauf empfohlen ([87], [41]):

- (a) Bestimmung der Funktionsstruktur des Produktes
- (b) Gewichtung der Produktfunktionen nach kundenrelevanten Merkmalsausprägungen
- (c) Entwicklung eines Grobentwurfs für das neue Produkt
- (d) Kostenschätzung der Produktkomponenten
- (e) Bestimmung der Zielkostenindices aller Komponenten, d.h. Überprüfung der Übereinstimmung von Funktionsanteil und Kostenanteil der betrachteten Einheit durch Quotientenbildung. Im Idealfall ist der Kostenindex 1. Abweichungen und Toleranzen lassen sich mit einem Zielkostenkontrolldiagramm visualisieren.
- (f) Optimierungszyklen

Tanaka [87] nimmt noch weitere wichtige Differenzierungen vor:

Er betrachtet die drei Konstruktionsphasen

- concept design
- basic design und
- detailed design

und empfiehlt, am Ende jeder der drei Phasen Kostenschätzungen durchzuführen und mit der Konkretisierung nur fortzufahren, wenn die Zielkosten entsprechend der jeweils möglichen Genauigkeit der Schätzung erfüllt werden können. Zusätzlich zur zeitintensiven Kostenschätzung über Detailzeichnungen und Fertigungsvorbereitung sind in den verschiedenen Konstruktionsphasen alternative Kostenschätzungsmethoden notwendig. Ungefähr 25% der von Tanaka untersuchten großen Firmen benutzten in den Phasen concept design und basic design nicht die Produktkomponenten, sondern die Produktfunktionen als Basis der Kostenschätzungen. Zweck und Erarbeitung von Funktionskosten werden z.B. in VDI 2235 [95] beschrieben.

- Welche Rolle kann das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Montagezielkostenmodell innerhalb eines marktorientierten Zielkostenmanagements spielen?

Eine Unsicherheit bei der Bildung des Kostenindex stellt die Kostenschätzung der Produktkomponenten dar. Diese muß in der Frühphase der Konstruktion begrenzten Genauigkeitsanforderungen genügen. Sie sollte jedoch, wie oben ausgeführt, problemphasenangepaßt sein. Wesentlich ist, daß die Kostenschätzung und damit das ganze Zielkostenmanagement nicht dadurch verfälscht wird, daß Kostenpotentiale (z.B. der Fertigung und Montage) in der Schätzung nicht vollständig ausgeschöpft werden.

In der Frühphase der Konstruktion wäre es sinnvoll, nicht mit subjektiven Schätzkosten, sondern mit technisch ableitbaren Zielkosten (Basis: Grobkonstruktion) zu arbeiten. Solche technisch ableitbaren Zielkosten liefert das vorgestellte Zielkostenmodell für den Bereich der Montageplanung (Bild 71). Sie werden im folgenden kurz "technische Zielkosten" genannt.

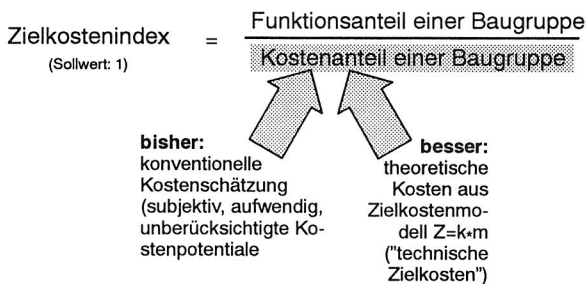


Bild 71 Alternative Bestimmungsmöglichkeiten des Kostenanteils im Zielkostenindex

Auf diese Weise kann ein gegenüber der heutigen Praxis verbesserter Zielkostenindex definiert werden, der frei von Einflüssen nicht genutzter Potentiale als technische Bezugsgröße letztlich die Produktkonstruktion (und Marktparameter) und nicht geschätzte Fertigungskosten zum Kern hat.

Das hier nur für den Bereich der Montage ausgearbeitete technische Zielkostenmodell liefert, übertragen auf den gesamten Produktionsprozeß, ein Zielkostenkontrolldiagramm

[siehe (e)], das den funktionalen Anteil dem technisch-konstruktiven Anteil direkt gegenüberstellt. Bild 72 zeigt ein beispielhaftes "doppeltes Zielkostenkontrolldiagramm" (in Anlehnung an [87]).

Die Anwendung und der mögliche Nutzen sollen im folgenden an einem einfachen Beispiel erläutert werden:

Ein Produkt soll aus drei zugekauften Einzelteilen automatisch montiert werden (keine Justage). Es sollen pro Jahr 120000 Fertigprodukte montiert werden. Die Montageanlage wird über drei Jahre abgeschrieben.

Die *Montageanlagenkosten* werden folgendermaßen bestimmt (Zahlenwerte sind hypothetisch):

Einzelteil 1:	$Z_1 = k_{H1} \cdot m_{H1} + k_{P1} \cdot m_{P1} =$	19000 DM \Rightarrow	0,053 DM je Teil
Einzelteil 2:	$Z_2 = k_{H2} \cdot m_{H2} + k_{P2} \cdot m_{P2} =$	93000 DM \Rightarrow	0,258 DM je Teil
Einzelteil 3:	$Z_3 = k_{H3} \cdot m_{H3} + k_{P3} \cdot m_{P3} =$	190000 DM \Rightarrow	0,528 DM je Teil
Gesamt:	$Z_{\text{ges}} = Z_1 + Z_2 + Z_3 =$	302000 DM	

Die *Einkaufskosten* der Einzelteile seien:

Einzelteil 1:	0,137 DM je Teil
Einzelteil 2:	0,222 DM je Teil
Einzelteil 3:	0,612 DM je Teil

Betriebskosten und *Gemeinkosten* sind auf die folgende Relativkostenbetrachtung ohne nennenswerten Einfluß.

Die *Kosten bzw. die technischen Zielkostenanteile* am Gesamtprodukt sind damit:

Einzelteil 1:	0,19 DM je Teil \Rightarrow technischer Zielkostenanteil	10,5%
Einzelteil 2:	0,48 DM je Teil \Rightarrow technischer Zielkostenanteil	26,5%
Einzelteil 3:	1,14 DM je Teil \Rightarrow technischer Zielkostenanteil	63,0%
Gesamtkosten	1,81 DM je Teil \Rightarrow technischer Zielkostenanteil	100%

Die Bestimmung der *Funktionsanteile* der Baugruppen (hier: Einzelteile) wurde kurz in (a) und (b) skizziert (näheres siehe [87], [41]). Das Ergebnis soll im Beispiel sein:

Einzelteil 1:	Funktionsanteil	10,0%
Einzelteil 2:	Funktionsanteil	13,0%
Einzelteil 3:	Funktionsanteil	77,0%

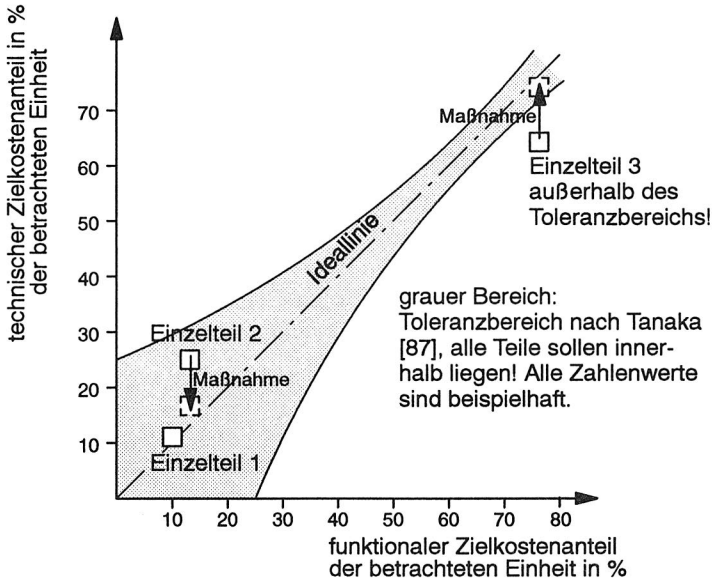


Bild 72 Doppeltes Zielkostenkontrolldiagramm

Bild 72 zeigt den Eintrag der erhaltenen Wertepaare je Einzelteil in ein Zielkostenkontrolldiagramm: Der Grad der Übereinstimmung von technischem Zielkostenanteil und funktionalem Zielkostenanteil zeigt sich in der Nähe der Punkte zur Winkelhalbierenden. Daneben hat Tanaka ein Toleranzfeld für die Lage der Punkte definiert (grauer Bereich in Bild 72), außerhalb dessen Maßnahmen zur Angleichung von Kosten- und Funktionsanteil eines Teils einzuleiten sind. Dies ist im Beispiel für Einzelteil 3 notwendig. Die einzuleitende konstruktive Maßnahme muß dahin zielen, die Kosten für Einzelteil 2 zu senken und mehr Augenmerk auf Einzelteil 3 zu legen. Letztendlich muß mehr Wertschöpfung in Einzelteil 3 verlagert werden.

Diese für die weitere Produktentwicklung sehr wichtige Erkenntnis soll das Beispiel beenden. Weitere Arbeitszyklen des Target Costing müßten folgen.

Somit wurde gezeigt, wie sich das für die Montage entwickelte Zielkostenmodell nutzbringend in das Target Costing integrieren läßt.

7.6 Einsatzempfehlungen für manuelle und automatisierte Montage

Um Montagearbeitsgänge wirtschaftlich automatisieren zu können und dauerhaft wirtschaftlich zu arbeiten, ist es notwendig, die Teilehandhabung und die Fügeprozesse statistisch sicher zu beherrschen. Mit zunehmender Komplexität der Produkteigenschaften wird der gerätetechnische Aufwand und damit die Fehleranfälligkeit größer. Von einem gewissen Schwierigkeitsgrad an wird zu manueller Montage übergegangen um dauerhaft wirtschaftlich arbeiten zu können.

Wie die Firmenrealität zeigt, werden an den meisten (teil-)automatisierten Montagelinien die schwierigsten Arbeitsgänge manuell ausgeführt. Dies trifft auch auf die Düsenhaltermontage zu. Auch ist zu beobachten, daß innerhalb einer Montagetechnologie (z.B. Schweißen) stets die am wenigsten komplexen Variante(n) (z.B. Punktschweißen) zuerst automatisiert werden. Dies gilt sowohl für die Anbieter als auch für die Anwender entsprechender Automatisierungstechnik.

Die Grenzen des Übergangs zwischen automatisierter und manueller Montage (bzw. umgekehrt) hängen von vielen Einflußgrößen ab. Neben den Parametern der klassischen Wirtschaftlichkeitsrechnung (Lohnkosten, Gerätekosten, ...) spielen auch Qualität und Flexibilität eine wichtige Rolle.

Es stellt sich aber angesichts der vielen manuellen Montagearbeitsplätze (mehr als 500000 in der Bundesrepublik [62]) in Industrienationen mit hohem Lohnniveau die Frage, ob es eine Grenze der Teilekomplexität gibt, von der ab auch bei günstigen Rahmenbedingungen (z.B. hohen Stückzahlen) eine Automatisierung aus technologischen Gründen nicht empfehlenswert ist.

Eine solche Grenze, die in der Praxis zu einem Bereich schwimmt, existiert in der Tat. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Handhabungs- und Prozeßkomplexität ergaben, daß sich für k_H und k_P Empfehlungen für die

(technologischen) Einsatzbereiche von manueller und automatisierter Montage aussprechen lassen. Diese sind in Bild 73 zusammengefaßt.

Ausnahmen gelten für einige wenige hochentwickelte Spezialgeräte wie z.B. elektrische Schraubeinheiten, die durch lange Entwicklung und ständige Optimierung Prozeßkomplexitäten bis $k_P = 4 \dots 5$ zuverlässig beherrschen können und so bestimmte Qualitätsanforderungen erst ermöglicht haben.

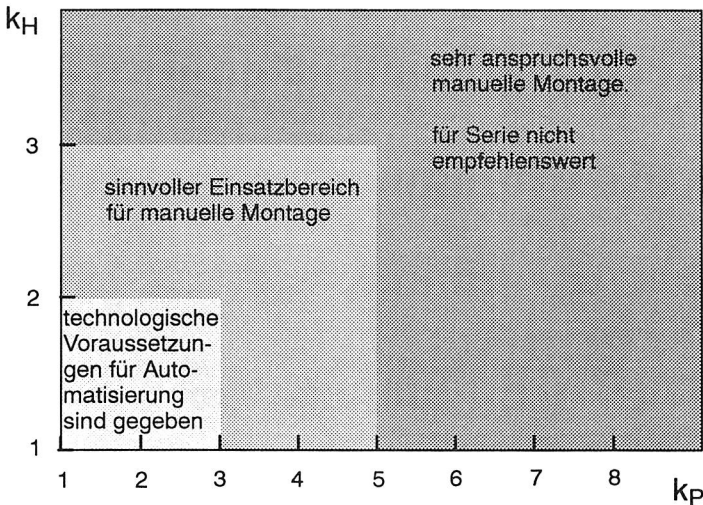


Bild 73 Technologisch motivierte Einsatzempfehlungen für manuelle und automatisierte Montage

7.7 Axiomatik des Modells

Dem Zielkostenmodell liegen einige grundsätzliche Annahmen über das Verhältnis verwendeter Größen zueinander zugrunde, die nicht oder nur indirekt Gegenstand der praktischen Untersuchungen waren.

1. Die Eigenschaften eines Produkts bezüglich Kosten, Qualität und Zeit sind das Ergebnis der Produktionsfaktoren Mensch und Maschine.

2. *Die Eigenschaften einer Montageanlage ergeben sich aus der Summe der Eigenschaften der einzelnen Montagegeräte.*
3. *Handhabungs-, Prozeß- und Justagekomplexität sind voneinander unabhängig.*

Folge: Die Komplexität der Montagefunktionen "Handhabung" und "Prozeß" ist unabhängig von Justagefragen der Konstruktion..

Bemerkung: Mit der Erhöhung der Justagekomplexität geht lediglich eine Erniedrigung der Einzelteilmontagekosten einher.

4. *Die Komplexität der benötigten Montagegrundgeräte ist eine Funktion der Komplexität der Montageaufgabe.*
5. *Die aus der Justagekomplexität entstehenden zusätzlichen Gerätekosten sind eine Funktion der Handhabungs- und Prozeßkosten.*

Bemerkung: Dahinter steht die Annahme, daß die gerätetechnische Realisierung der Erhöhung der Justagekomplexität über eine Ergänzung der Geräte für Handhabung und Prozeß erfolgt.

7.8 Genauigkeit des Modells

Die grundsätzliche Problematik des Vergleichs der Ergebnisse praktischer Untersuchungen mit den Zielkosten des Modells wurde in Kapitel 6 beschrieben. Trotzdem soll versucht werden, Aussagen über die Abweichungen des theoretischen Modells von den praktischen Ergebnissen zu erhalten. Zuvor werden die allgemeinen Randbedingungen von Kostenprognosen in der Konstruktion beleuchtet.

7.8.1 Allgemeine Randbedingungen für Kostenprognosen

Eine wichtige Differenzierung stellt die Frage nach der betrieblich begrenzten oder überbetrieblichen Nutzbarkeit dar. Genügt das entwickelte Zielkostenmodell überbetrieblichen Ansprüchen?

Ehrlenspiel [26] gibt an, welche Arbeitsergebnisse und Hilfsmittel zum kostengünstigen Konstruieren überbetrieblich nutzbar sein können. Die folgenden Kriterien werden dabei vom vorliegenden Modell erfüllt:

- "Relativkosten für überbetrieblich am Markt angebotene Kaufteile ..." (Funktion m)
- "Ähnlichkeitsgesetzmäßigkeiten für Kosten und darauf aufbauende Kostenrechnungen" gilt näherungsweise für die Funktion k.

Damit sind die strukturellen Voraussetzungen für eine überbetriebliche Nutzbarkeit gegeben. Eine Aktualisierung der Relativkosten von m ist währungs- oder teuerungsratenabhängig z. B. über ausgesuchte Referenz-Montagemodule möglich.

Interne Kostenkalkulationen sind mit einer Unsicherheit von $\pm 20\%$ bis $\pm 30\%$ behaftet [26]. Dies ist ein weiteres Argument dafür, daß eine absolute Vergleichsbasis, die Zielkostenwerte überprüft, nicht existiert.

Werden Einzelteilkosten mit Kurzkalkulationsschätzungen ermittelt, so verringert sich der relative Fehler für die Gesamtanlage mit wachsender Anzahl von Summanden. Darauf weist Kiewert [44] ebenso hin wie darauf, daß es genügt für A-Teile im Sinne einer kostenbezogenen ABC-Analyse eine hinreichende Genauigkeit der Schätzung zu haben.

7.8.2 Genauigkeit der Zielkostenfunktion

Die Erfahrung mit der Anwendung der Komplexitätsanalyse zeigt, daß die Ergebnisse etwas weiter als das genannte $\pm 20\%$ – 30% -Toleranzband streuen, bezogen auf eine sehr gute Lösung des jeweiligen Problems. Das Toleranzband der Komplexitätsanalyse ist nicht symmetrisch, da die (theoretische) Minimalmontage selten von realen Ausführungen unterboten wird. Dies könnte nur dann der Fall sein, wenn $m_{\text{real}} \approx m_{\text{min}}$ und $Z_{\text{real}}/m \leq k_{\text{berechnet}}$ (durch zufälligen Fehler).

Somit ergeben sich folgendermaßen strukturierte Toleranzfelder:

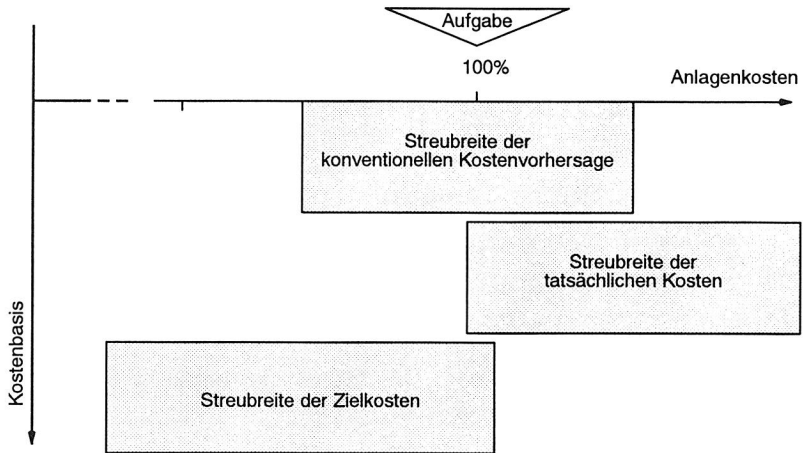


Bild 74 Verschiebung des Toleranzbereichs bei den Zielkosten

Statistische Betrachtungen der in den Diagrammen von Kapitel 6 gezeigten Kostenwerte sind aus zwei Gründen nicht ergiebig:

1. Ursachenvermischung bei den Abweichungen, d. h. eine Zufälligkeit ist nicht immer gegeben,
2. Genauigkeitsaussagen sollen sich möglichst auf einzelne Kostenwerte, nicht nur auf die Gesamtheit beziehen.

Deshalb wird ohne Statistik überprüft, inwieweit sich eine $\pm X\%$ -Grenze, analog den obenstehenden Ausführungen, für die Genauigkeit angeben läßt. Durch Markierung der entsprechenden Bereiche zeigt sich in Bild 75, daß sich praktisch alle Kostenwerte in einem $\pm 40\%$ Bereich befinden. Die Genauigkeitsangabe von $\pm 40\%$ für den einzelnen Kostenwert gilt in aller Regel für das gesamte Zielkostenmodell. Im Bereich Justagekomplexität sind die Aussagen weniger abgesichert als in dem der Handhabungs- und Prozeßkomplexität.

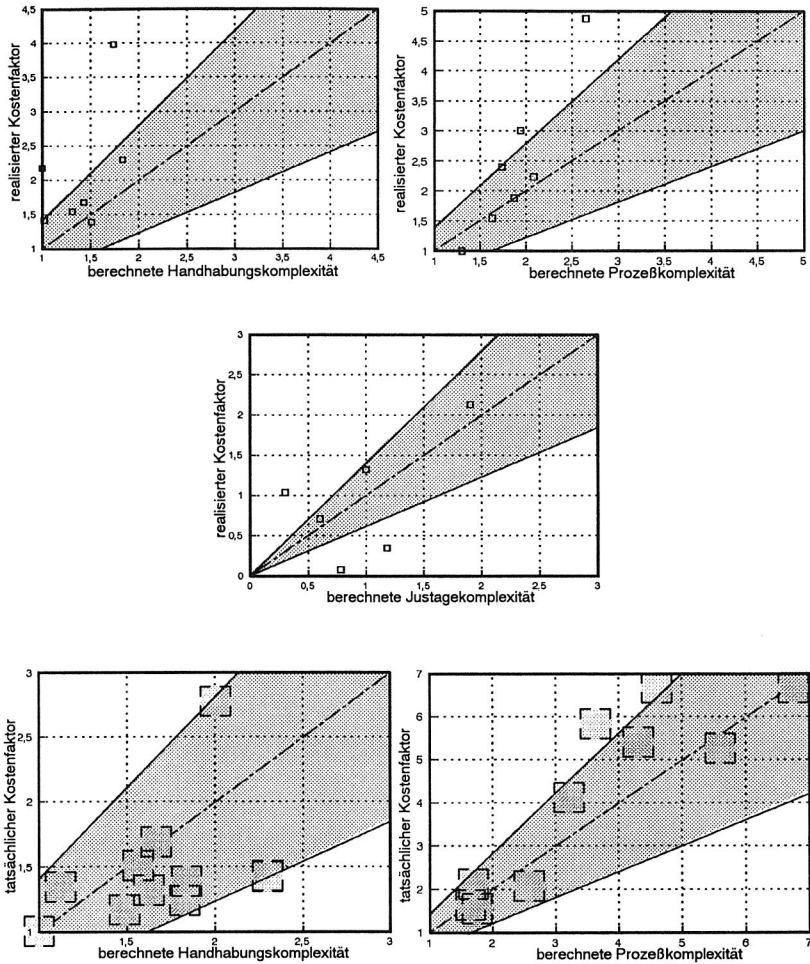


Bild 75 Toleranzuntersuchung zur Genauigkeit des Zielkostenmodells

8 Zusammenfassung

Um den betrieblichen Anforderungen bezüglich der zukünftigen Dynamik der Wettbewerbsfaktoren Kosten, Qualität und Zeit gerecht zu werden, sind bewertende und operativ einsetzbare Werkzeuge notwendig. Diese ermöglichen eine zielorientierte Lösungsfindung und eine abteilungsübergreifende Regelung der Gesamtkosten. Die Komplexität der Aufgaben und der damit verbundene Lösungsaufwand sinkt dadurch.

Heutige Planungs- und Bewertungsverfahren erfüllen diese Anforderungen nicht.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieses allgemeine Problem für den Bereich der Montageplanung durch die Entwicklung eines neuen, spezifischen Werkzeugs für das Simultaneous-Engineering-Team gelöst. Es wurde das Modell einer Zielkostenfunktion erarbeitet, das die Komplexität des Produkts analysiert und algorithmisch quantifiziert. Parallel dazu wird die prinzipielle Montageaufgabe hinsichtlich der kinematischen Mindestanforderungen an die Montagegeräte analysiert, parametrisiert und quantifiziert ("Minimalmontagekosten"). Teilekomplexität und Minimalmontagekosten werden zu einem Zielkostenwert kombiniert.

Diese Zielkostenfunktion hat operativen Charakter, da Aufgabe und Lösung selbst quantifiziert werden und nicht nur der aus einer Lösung vermutlich folgende Kapitalfluß. Diese operativen Eigenschaften lassen sich bevorzugt dazu nutzen, in der frühen Produktentstehungsphase kostenverursachende Parameter des Produkts und/oder des zugehörigen Produktionsmittels günstig zu beeinflussen. Die Zielkostenfunktion läßt sich außerdem sinnvoll als Kern eines bereichsübergreifenden Regelalgorithmus einsetzen, der geeignet ist, in jeder beliebigen Phase der Planung die jeweiligen maximalen Kostenpotentiale für Konstruktion und Fertigungsvorbereitung auszuweisen.

Die Praxisnähe des Modells wurde durch ein durchgängiges Industriebeispiel und andere Beispiele aus der Fügetechnik untermauert.

9 Schrifttum

- [1] Bäßler, R.:
Integration der montagegerechten Produktgestaltung in den Konstruktionsprozeß.
Berlin u.a. 1988
- [2] Bernhart, W., Fimpel, W.:
Taktzeitanalyse und -prognose in der flexibel automatisierten Serienmontage. AV
29 (1992) 5 S.194–197
- [3] Blohm, H., Lüder, K.:
Investition. München 1991
- [4] Boothroyd, G.:
Assembly Automation and Product Design. New York 1992.
- [5] Boothroyd, G., Dewhurst, P.:
Design for Assembly. Amherst, Massachusetts 1983.
- [6] Boothroyd, G., Dewhurst, P.:
New Software Developments in Design for Assembly, Disassembly and Service.
In: International Conference on Design for Manufacture and Assembly.
Conference Proceedings. Wakefield, Rhode Island 1992
- [7] Breiing, A.:
Neue Gesichtspunkte zur Gewichtung von Bewertungskriterien. Konstruktion 45
(1993) 5 S.171–175
- [8] Bullinger, H.-J.:
Systematische Montageplanung. München u.a. 1986
- [9] Bullinger, H.-J.; Thaler, K.:
Wirtschaftliche Montage- und Prüfplanerstellung für die Serienfertigung. VDI-Z
134 (1992) 11 S.62–65

-
- [10] Bullinger, H.-J., Richter M.:
Integrated Design and Assembly Planning. Computer-Integrated Manufacturing Systems 4 (1991) S. 239-247
- [11] Buzzell, R. D., Bradley, T. G.:
Das PIMS-Programm. Wiesbaden 1989
- [12] Chishaki, T., Tatish, M.:
A New Model for Projekt Planning by Time-Cost Trade-Off Procedure Using Fuzzy Durations for Project Activities. Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University (Fukuoka Japan) Vol. 52 (1992) No. 4, pp 339-359
- [13] Clark, K. B., Fujimoto T.:
Automobilentwicklung mit System. Frankfurt/New York 1992.
- [14] Dahl, B.:
Entwicklung eines Konstruktionssystems zur Unterstützung der montagegerechten Produktgestaltung. Diss. RWTH Aachen 1990.
- [15] Danner, S., Schlüter, A., Ehrlenspiel, K.:
Rechnergestützte, Montagegerechte Verbindungsgestaltung. In: International Conference on Engineering Design (ICED '93), The Hague, August 17-19, 1993
- [16] Deutsche Gesellschaft für Qualität:
Qualitätskosten. DGQ-Schrift Nr. 14-17. Frankfurt/M. 1985
- [17] Deutsche MTM-Vereinigung e.V.:
MTM-Handbuch I. Grundlehrgangsunterlage. 6. Auflage, 1987
- [18] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.):
DIN 8593 Teil 0. Fertigungsverfahren Fügen. Beuth Verlag, Berlin 1985
- [19] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.):
DIN 8593 Teil 1. Fertigungsverfahren Fügen. Beuth Verlag, Berlin 1985
- [20] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.):
DIN ISO 9000. Qualitätsmanagement- und Qualitätssicherungsnormen. Leitfaden zur Auswahl und Anwendung. Beuth Verlag, Berlin 1990

-
- [21] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.):
DIN ISO 9001. Qualitätssicherungs-Nachweisstufe für Entwicklung und Konstruktion, Produktion, Montage und Kundendienst. Beuth Verlag, Berlin 1987
- [22] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.):
DIN ISO 9002. Qualitätssicherungssysteme – Modell zur Darlegung der Qualitätssicherung in Produktion und Montage. Beuth Verlag, Berlin 1990
- [23] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.):
DIN ISO 9003. Qualitätssicherungssysteme – Modell zur Darlegung der Qualitätssicherung bei der Endprüfung. Beuth Verlag, Berlin 1990
- [24] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.):
DIN ISO 9004. Qualitätsmanagement und Elemente eines Qualitätssicherungssystems – Leitfaden. Beuth Verlag, Berlin 1990
- [25] Ehmann, B.:
Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung. München, Wien 1993
- [26] Ehrlenspiel, K.:
Genauigkeit, Gültigkeitsgrenzen, Aktualisierung der Erkenntnisse und Hilfsmittel zum kostengünstigen Konstruieren. Konstruktion 32 (1980) 12, S.487–492
- [27] Ehrlenspiel, K.:
Kostengünstig Konstruieren. Berlin u.a. 1985
- [28] Ehrlenspiel, K.:
Möglichkeiten zum Senken der Produktkosten – Erkenntnisse aus einer Auswertung von Wertanalysen. Konstruktion 32 (1980) 5, S. 173–178
- [29] Ehrlenspiel, K., Ambrosy, S., Wach, J.:
Integration der Entwicklung von Produkt und Montageanlage. In: VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb: Datenverarbeitung in der Konstruktion '92. (VDI-Berichte 993.1). Düsseldorf 1992
- [30] Eversheim, W.:
Verringerung und Beherrschung der Komplexität stärkt die Wettbewerbsfähigkeit.

- In: Milberg, J., Reinhart, G. (Hrsg.): Unsere Stärken stärken. Der Weg zu Wettbewerbsfähigkeit und Standortsicherung. Münchener Kolloquium 1994. Landsberg/Lech 1994
- [31] Feldmann, K., Ehmann, B.:
Optimierte Prozeßketten in der Elektronikfertigung. pa Produktionsautomatisierung 2 (1993) 6 S. 22–25
- [32] Feldmann, K., Franke, J.: Neue Rationalisierungspotentiale durch Funktionsintegration. pa Produktionsautomatisierung 1 (1992) 3 S. 18–21
- [33] Feldmann, K., Gerhard, M., Götz, K., Scheller, H., Sturm, J.:
Integrierte Qualitätssicherung in der Elektronikfertigung am Beispiel des Infrarot-Lötens.
in: Reichl, H., Eder, A. (Hrsg.): Tagungsband SMT ASIC Hybrid. Internationale Fachmesse und Kongreß für SMT/ASIC/Hybrid 17.–19. Mai 1994. vde-Verlag Berlin, Offenbach 1994
- [34] Feldmann, K., Krebs, Th.:
Planning Programmable Assembly Systems. Proceedings of the 11th International Conference on Assembly Automation. November 11–14, Dearborn, Michigan 1990
- [35] Gentner, A.:
Entwurf eines Kennzahlensystems zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung von Entwicklungsprojekten. München 1994
- [36] Geyer, G.:
Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage. München, Wien 1991
- [37] Harrington, H. J.:
Poor-Quality Cost. ASQS Quality Press, New York 1987
- [38] Hartmann, M.:
Entwicklung eines Kostenmodells für die Montage. – Ein Hilfsmittel zur Montageanlagenplanung –. Aachen: Shaker 1993

-
- [39] Helwig, H.-J.:
Simultane Gestaltung für die robotergeführte Kleinteilmontage. (Reihe Produktionstechnik – Berlin ; 113), München 1993
- [40] Horvath, P., Seidenschwarz, W., Sommerfeldt, H.:
Kostenmanagement – Warum die Schildkröte gewinnt. Harvard Business Manager 1993 Nr.3, S. 73–81
- [41] Horvath, P., Seidenschwarz, W.:
Zielkostenmanagement. Controlling 1992, Nr.3, S. 142–150
- [42] Horvath, P., Urban, G. (Hrsg.):
Qualitätscontrolling. Stuttgart 1991
- [43] Kamiske, G.F.:
Das untaugliche Mittel der "Qualitätskostenrechnung". Qualität und Zuverlässigkeit 37 (1992) 3
- [44] Kiewert, A.:
Kurzkalkulationen und die Beurteilung ihrer Genauigkeit. VDI-Z 124 (1982) Nr. 12 S. 443–446
- [45] Kiewert, A.:
Systematische Erarbeitung von Hilfsmitteln zum kostenarmen Konstruieren. Diss. TU München 1979
- [46] Krist, H.:
Der Investitionsentscheidungsprozeß in Industriebetrieben. Berlin 1983
- [47] Liu, T.-H., Fischer, G. W.:
Assembly evaluation method for PDES/STEP-based mechanical systems. Journal of Design and Manufacturing (1994) 4, pp. 1–19
- [48] Lotter, B.:
Wirtschaftliche Montage. Düsseldorf, 1986
- [49] Masing, W.:
Fehlleistungsaufwand. Qualität und Zuverlässigkeit 33 (1988) 1

-
- [50] Meerkamm, H., Krause, D.:
Integration von Berechnungen in das Konstruktionssystem mfk. In: VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb: Datenverarbeitung in der Konstruktion '92. (VDI-Berichte 993.1). Düsseldorf 1992
- [51] Milberg, J.:
Integration von Konstruktion und Planung. Vortrag am 30.09.1993 TU München.
Abdruck ohne Verfasserangabe in: Sonderforschungsbereich 336: Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung. TU München, 1993
- [52] Milberg, J.:
Wettbewerbsfaktor Zeit in Produktionsunternehmen. In: Milberg, J. (Hrsg.):
Wettbewerbsfaktor Zeit in Produktionsunternehmen. Münchener Kolloquium '91.
Springer-Verlag Berlin u.a. 1991
- [53] Milberg, J.; Glaas, W.; Meier, K.-J.:
Plädoyer für die Teilauslastung. Roboter 9 (1991) 4 S.48–52
- [54] Miles, B. L.:
Design for assembly – a key element within design for manufacture. Proc Instn
Mech Engrs Vol 203, IMechE 1989
- [55] Miyakawa, S.; Ohashi, T.; Inoshita, S.; Shigemura, T.:
The Hitachi Assemblability Evaluation Method (AEM) and Its Applications.
Journées De Microtechnique 1988, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne
(1988), p.p 99–114
- [56] Miyakawa, S.; Ohashi, T.; Iwata, M.:
The Hitachi New Assemblability Evaluation Method (AEM). Transactions of
North American Manufacturing Research Institute of SME (NAMRI/SME), 1990
- [57] Miyazawa, A.:
Productivity evaluation system used by Fujitsu.
In: International Conference on Design for Manufacture and Assembly.
Conference Proceedings. Wakefield, Rhode Island 1992
- [58] Moritzen, K.:
Montagegerechtes Entwerfen mit wissensbasierten Systemen. Zwf 85 (1990) 5 S.
248–251

- [59] Niemand, St.:
Target Costing. FB/IE 41 (1992) 3 S. 118–123
- [60] Niemann, G.:
Maschinenelemente. Band 1. Berlin u.a. 1981
- [61] N. N.:
Deutsche Disziplin oder französische Flexibilität?. Süddeutsche Zeitung v. 14.02.1994, S. 20
- [62] N. N.:
Einsatzmöglichkeiten von flexibel automatisierten Montagesystemen in der industriellen Produktion. Schriftenreihe Humanisierung des Arbeitslebens, Band 61. Düsseldorf 1984
- [63] Pahl, G., Beitz, W.:
Konstruktionslehre. Berlin u. a. 1993
- [64] Patzak, G.:
Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme. Berlin u. a. 1982
- [65] Pickel, H.:
Kostenmodelle als Hilfsmittel zum Kostengünstigen Konstruieren. München 1989
- [66] Rampersad, H. K.:
The DFA House. Assembly Automation 13 (1993) No. 4, pp 29–36
- [67] Read, P. L.:
Introducing the "Design for Assembly" method to Ford in Europe. In: International Conference on product design for assembly. Newport, Rhode Island, April 1986
- [68] Reichwald, R.:
Betriebswirtschaftliche Bewertung integrierter Produkt- und Montageplanung. Vortrag am 30.09.1993 TU München. Abdruck ohne Verfasserangabe in: Sonderforschungsbereich 336: Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung. TU München, 1993

-
- [69] Reichwald, R.:
Die Wiederentdeckung der menschlichen Arbeit als primärer Produktionsfaktor für eine marktnahe Produktion. In: Reichwald, R. (Hrsg.): Marktnahe Produktion. Wiesbaden 1992
- [70] Reichwald, R., Schmelzer, H. J.:
Durchlaufzeiten in der Entwicklung. Praxis des industriellen F&E-Managements. München, Wien 1990
- [71] Richter, M. et al.:
Integrated design and assembly planning. 10th International Conference on Assembly Automation. IFS Pub. Springer Verlag 1989.
- [72] Richter, M.:
Integrierte Produktentwicklung und Montageplanung. REFA-Nachrichten 1992 Nr. 2, S. 10–21
- [73] Rinza, P.; Schmitz, H.:
Nutzwert-Kosten-Analyse. Düsseldorf 1977
- [74] Robert Bosch GmbH (Hrsg.):
Dieseleinspritztechnik im Überblick. Bosch Technische Unterrichtung Nr. 1987722038. Stuttgart 1989
- [75] Robert Bosch GmbH (Hrsg.):
Qualitätssicherungs-Handbuch Bosch-Gruppe. Stuttgart 1993
- [76] Rosenthal, S. R., Tatikonda, M. V.:
Time Management in New Product Development: Case Study Findings. Journal of Manufacturing Systems 11 (1992) 5 pp. 359–368
- [77] Scherer, F. M.:
Innovation and Growth. Cambridge, Massachusetts 1984
- [78] Schmaus, T.:
Rationalisierungspotential der montagegerechten Produktgestaltung bei der Montage mit Industrierobotern. Berlin u.a. 1993

- [79] Schnepf, P.:
Qualitätsverständnis und Kostendenken. Tagungsunterlagen zum CIM-TT-Seminar "Methoden und Werkzeuge zur prozeßbegleitenden Qualitätssicherung" am 19.11.1992 im CIM-Technologietransferzentrum Erlangen.
- [80] Schnepf, P., Klippel, G.:
Ein Wegweiser zum Null-Fehler-Ziel. *wt - Produktion und Management* 84 (1994) 5, S. 209-211
- [81] Schnepf, P., Vogler, Th., Kern, H.:
Fügeprozeß und Montage. Der Einfluß des Fügeprozesses auf die Anlagenkosten. *wt - Produktion und Management* 85 (1995) 5 S.224-228
- [82] Spur, G.:
Fügen. *ZwF-Lehrblatt Fertigungstechnik* Nr. 36. *ZwF* 79 (1984) 12, S. 627-628
- [83] Spur, G. (Hrsg.):
Handbuch der Fertigungstechnik. Band 5. Fügen, Handhaben und Montieren. München, Wien 1986
- [84] Spur, G.:
Rationalisierung zeitbestimmender Arbeitsprozesse. In: Milberg, J. (Hrsg.): *Wettbewerbsfaktor Zeit in Produktionsunternehmen*. Münchener Kolloquium '91. Springer-Verlag Berlin u.a. 1991
- [85] Spur, G., Feldmann, K.:
Möglichkeiten und Grenzen der Nutzwertanalyse beim Konzipieren technischer Systeme. *Konstruktion* 27 (1975) 7 S. 257-264
- [86] Stalk, G., Hout, T. M.:
Zeitwettbewerb. Schnelligkeit entscheidet auf den Märkten der Zukunft. Frankfurt, New York 1992
- [87] Tanaka, M.:
Cost Planning and Control Systems in the Design Phase of a New Product. In: Moden, Y., Sakurai, M. (Hrsg.): *Japanese Management Accounting. A World Class Approach to Profit Management*. Cambridge, Massachusetts 1989

-
- [88] Tanaka, T.:
Target Costing at Toyota. *Journal of Cost Management* 7 (1993) 1 S. 4–11
- [89] Thaler, K.:
Regelbasiertes Verfahren für die Montageablaufplanung in der Serienfertigung.
Berlin u.a. 1993
- [90] Vasilash, G. S.:
Teaming: A Tradition in the Making at Bosch? *Production* 1994, No. 3
- [91] VDI-Zentrum Wertanalyse (Hrsg.):
Wertanalyse, Wertgestaltung, Value Management. Düsseldorf 1990
- [92] Verband der Automobilindustrie (Hrsg.):
Qualitätssicherungs-Systemaudit. VDA Schriftenreihe Qualitätskontrolle in der
Automobilindustrie, Band 6. Frankfurt/Main 1991
- [93] Verband der Automobilindustrie (Hrsg.):
Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz. VDA Schriftenreihe Qualitätskontrolle
in der Automobilindustrie, Band 4. Frankfurt/Main 1986
- [94] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.):
VDI 2225. Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. (VDI-Richtlinie). Düsseldorf, 1977
- [95] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.):
VDI 2235. Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren. Methoden und
Hilfen. (VDI-Richtlinie). Düsseldorf, Oktober 1987
- [96] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.):
VDI 2860. Montage- und Handhabungstechnik. Handhabungsfunktionen,
Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. (VDI-Richtlinie).
Düsseldorf, Mai 1990
- [97] Warnecke, G.:
Produktionsfaktor Wissen. VDI-Z 130 (1988) 11 S.12–16

- [98] Warnecke, H.-J.; Schraft, R.-D.; Schweizer, M; Schmaus, T.:
Method for the Quantification of the Rationalization Potential of Design for
Assembly. In: Proceedings of the 10th International Conference on Assembly
Automation. IFS Publications, U.K. 1989
- [99] Weckenmann, A.:
Qualitätssicherung II. Unterlagen zur gleichnamigen Vorlesung. Universität
Erlangen-Nürnberg, 1993
- [100] Wiendahl, H.-P.; Penz, T.; Lüssenhop, Th.; Tracht, Th.:
Qualitätsmanagement in der Produktionslogistik. Ein praxisorientierter Hand-
lungsrahmen. In: Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Neue Wege der PPS. IFA-Kolloquium
1993. gmft – Gesellschaft für Management und Technologie. München 1993
- [101] Wildemann, H.:
Modulare Fabrikstrukturen und schlanke Geschäftsprozesse als Voraussetzungen
zur Steigerung der Anlagenproduktivität. In: Männel, W. (Hrsg.): Kongreß
Anlagenwirtschaft '93. Lauf an der Pegnitz 1993
- [102] Zangemeister, Ch.:
Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. München 1970

Lebenslauf

Peter Schnepf
geb. am 1. April 1961 in Augsburg

1967 - 1971	Grundschule in Augsburg
1971 - 1980	Holbein-Gymnasium in Augsburg
1981 - 1982	Zivildienst
1982 - 1988	Studium "Allgemeiner Maschinenbau" an der Technischen Universität München
seit 1988	Mitarbeiter der Robert Bosch GmbH
1988-1992	Mitarbeiter im Werk Bamberg
1992-1994	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg
seit 1995	Mitarbeiter im Produktbereich Elektrokraftstoffpumpen und Tankeinbaueinheiten der Robert Bosch GmbH in München

Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartonierte.

Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montage-
systeme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartonierte.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektierung von Montagesystemen

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartonierte.

Band 4

Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartonierte.

Band 5

Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartonierte.

Band 6

Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem

Laserstrahlschneiden

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartonierte.

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter
Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartonierte.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-
Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartonierte.

Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der
Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartonierte.

Band 10
Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 11
Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 12
Gerhard Kleineidam
CAD/CAP : Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 13
Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereuterkolden verschleißfesten Stahls
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 14
Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂- Hochleistungslasern
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 15
Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 16
Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 17
Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 18
Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 19
Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 20
Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 21

Egon Sommer

**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**

188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 22

Georg Geyer

**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**

192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 23

Rainer Flohr

**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)**

186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 24

Alfons Rief

**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und –schweißen in der Rohkarosseriefertigung**

VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 25

Christoph Thim

**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen
in der Elektronikmontage durch Simulation**

188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 26

Roland Müller

CO₂ – Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen

141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 27

Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung

195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 28

Martin Hoffmann

**Entwicklung einer CAD/CAM –Prozeßkette für die Herstellung
von Blechbiegeteilen**

149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 29

Peter Hoffmann

**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D –Laserstrahlbearbeitung von Blech-
formteilen**

186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 30

Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen

180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 31

Hubert Reinisch

**Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten
Geräteprogrammierung in Roboterzellen**

XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 32

Brigitte Bärnreuther

**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 33

Joachim Hutfless

**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung
einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34

Uwe Günzel

**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**
XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 35

Bertram Ehmann

**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener
Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV + 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 36

Harald Kolléra

**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993. Kartoniert.

Band 37

Stephanie Abels

**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 38

Robert Schmidt-Hebbel

**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender
Durchgangslöcher**
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 39

Norbert Lutz

**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994. Kartoniert.

Band 40

Konrad Grampp

**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an
Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 41

Martin Koch

**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 42

Armin Gropp

**Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem
gepulsten Nd:YAG-Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 43
Werner Heckel
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung
mit dem Lichtschnittverfahren**
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 44
Armin Rothhaupt
**Modulares Planungssystem zur Optimierung
der Elektronikfertigung**
180 Seiten, 101 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 45
Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 46
Bodo Vormann
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung
komplexer Blechblegeteile**
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 47
Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
144 Seiten, 75 Bilder. 1995. Kartoniert.