

DK 62.001/.002

Grundgesetze technisch-wirtschaftlichen Konstruierens

Von Fritz Kesselring, Zürich¹⁾

Der Weg zur technisch-wirtschaftlich ausgereiften Konstruktion vollständiger technischer Gebilde führt von der Idee über Funktionskizzen zum — vorerst im wesentlichen technisch orientierten — maßstäblichen Entwurf. Die nun einsetzende methodische Lenkung der Konstruktionsarbeit beruht auf einer technischen und einer wirtschaftlichen Bewertung, durch die die Schwachstellen des Entwurfes aufgedeckt werden; ihre systematische Ausmerzung führt zur „starken“ Lösung. Für die Optimierung wichtiger Einzelteile und einfacher technischer Gebilde werden zunächst Beanspruchungs- und Kostengleichungen aufgestellt und diese zur Bemessungsgleichung zusammengefaßt, aus der der Konstrukteur die zu treffende Maßnahmen entnehmen kann und die zugleich das Wachstumsgesetz des betreffenden technischen Gebildes darstellt. Abschließend wird anhand der Grundgleichungen der Massenfertigung insbesondere auf die überragende wirtschaftliche Bedeutung großer Stückzahlen hingewiesen und daraus der Zwang zum Zusammenschluß gleichartiger Industriebetriebe abgeleitet.

Betrachtet man den technischen Fortschritt vom Standpunkt des Konstrukteurs aus, so ergeben sich zwei große Bereiche seines Schaffens:

1. Entwicklung neuer oder wesentlich verbesserter technischer Gebilde
2. Automatisierungsgerechte Durchbildung voll ausgereifter Konstruktionen und in Zusammenhang damit Entwicklung der zugehörigen Förder-, Positionierungs-, Bearbeitungs-, Meß- und Prüfeinrichtungen.

Der technische Schöpfungsakt

Am Anfang jeder Entwicklung steht die Aufgabe. Ihre sorgfältige Klärung gehört mit zu den wichtigsten Arbeiten des Konstrukteurs. Nun ist aber die Aufgabe selbst oftmals nicht etwas von vornherein Gegebenes, vielmehr kann das Auffinden einer Aufgabe das Entscheidende sein, während alles Nachfolgende nur noch mehr oder weniger Handwerk ist. Ein typisches Beispiel hierfür stellt der Staubsauger dar. Mit der „Entdeckung“ der Aufgabe war bereits alles Wesentliche geleistet, wenn auch die Entwicklung einer geeigneten Bauform noch viel Fleiß und konstruktives Können erforderten.

Die Verhältnisse können aber auch so liegen, daß zwar eine Anzahl von Aufgaben vorliegt, nun aber zu entscheiden ist, welche von ihnen zuerst und mit der größten Aussicht auf wirtschaftlichen Erfolg in Angriff genommen werden soll. Insbesondere im Bereich der Landtechnik dürften das Auffinden und auch die Auswahl neuer Aufgaben von besonderer Bedeutung sein [1].

¹⁾ Vorgetragen auf der VDI-Tagung Landtechnik in Stuttgart am 25. Oktober 1966.

Dr. sc. techn. Dr.-Ing. E. h. Fritz Kesselring ist Vorsitzender der VDI-Fachgruppe Konstruktion (ADKI).

Ist die Vorklärung der Aufgabe — soweit dies zu Beginn einer Entwicklung überhaupt möglich ist — durchgeführt, so beginnt das Suchen nach brauchbaren Lösungen.

Unter einer Idee ist die in seltenen Stunden spontan, meist aber erst nach langem mühevollen Grübeln und Suchen blitzartig auftauchende Erleuchtung zu verstehen.

Die Erfindung hingegen läßt sich definieren als die Gesamtheit von Gedanken in Form einer Anleitung zur Verwirklichung einer zunächst als neu erscheinenden und technisch verwertbaren Idee.

Es ist vielfach versucht worden, den Entwicklungsgang von den ersten Ideen bis zu brauchbar erscheinenden Funktionskizzen methodisch zu leiten und damit abzukürzen. In diesem Zusammenhang sei auf das Buch von Hansen [2] über die Konstruktionssystematik verwiesen. Um die ungeheure Mannigfaltigkeit technischer Lösungen darzulegen, wird nachstehend ein ganz einfaches Beispiel mit Hilfe der morphologischen Methode von Zwicky [3] behandelt.

Die Aufgabe besteht darin, einen ohmschen Widerstand zwecks Strombegrenzung möglichst schnell (z. B. in 1 ms) in einen Stromkreis einzuschalten. Bild 1 zeigt die übliche Ausführung eines Schiebewiderstandes, der lediglich durch die Feder f und die Auslöseklippen g_1 und g_2 ergänzt wurde; die Kühlung

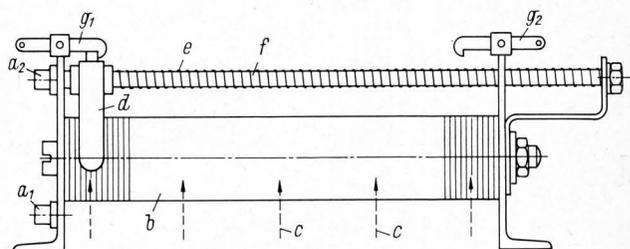


Bild 1. Schematische Darstellung eines Schiebewiderstandes.

- a_1, a_2 Anschlüsse
- b aufgewickelter Widerstandsdraht
- c Luftkühlung
- d Gleitkontakt
- e gespannte Schraubenfeder
- f Geradföhrung für den Gleitkontakt
- g_1, g_2 Auslöseklippen

erfolgt durch die vorbeiströmende Luft c. Nach der Anweisung von Zwicky sind nun möglichst viele bereits bekannte Widerstandsanordnungen aufzuskizzieren, wie dies in Bild 2 bis 6 geschehen ist. Die Wirkungsweise der einzelnen Anordnungen geht aus den Bildunterschriften hervor. Nach dieser Vorarbeit wird eine Tabelle nach Tafel 1 ausgearbeitet. In der ersten Spalte sind die Funktionen, daneben die verschiedenen Elemente zur Verwirklichung der betreffenden Funktionen eingetragen. Der Widerstand nach Bild 1 ist durch den gestrichelten Linienzug gekennzeichnet. Jeder Verbindung der

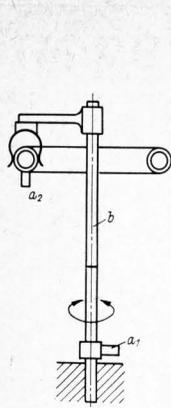


Bild 2. Schematische Darstellung eines Widerstandes mit durch Rotation bewegtem Gleitkontakt.

a₁, a₂ Anschlüsse
b Torsionsfed r

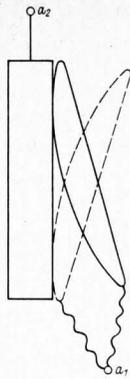


Bild 3. Schematische Darstellung eines Kohlewiderstandes mit Wälzsegment als Kontaktgeber.

a₁, a₂ Anschlüsse

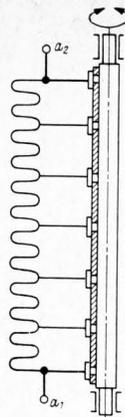


Bild 4. Schematische Darstellung eines Widerstandes mit in Reihe geschalteten Gleitkontakten.

a₁, a₂ Anschlüsse

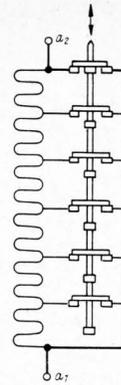


Bild 5. Schematische Darstellung eines Widerstandes mit parallel geschalteten und in stufenweiser Folge sich öffnenden Abhebekontakten.

a₁, a₂ Anschlüsse

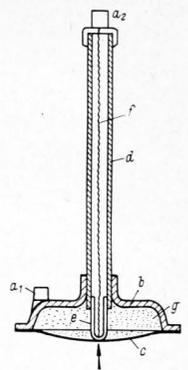


Bild 6. Flüssigkeitswiderstand.

a₁, a₂ Anschlüsse
b Metallgefäß
c Membran
d Isolierrohr
e kolbenförmiger Kontakt
f flexible Leitung zum Anschluß a₂
g Elektrolyt

W Gesamtenergie
m totale Masse
m₀ Ruhmasse
c Vakuumlichtgeschwindigkeit
v Geschwindigkeit

Tafel 1. Widerstandsformen geordnet nach Funktionen und Elementen

Funktionen	Elemente
A Anschlüsse	Flach-Anschluß Rund-Anschluß Schraub-Anschluß Steck-Anschluß Klemm-Anschluß
B Widerstands-Körperformen	Draht Band Widerstands-körper Elektrolyt plastische Masse
C Kühlung	ruhende Luft bewegte Luft Flüssigkeit Strahlung Wärmeableitung
D Kontaktsystem	Druck-Kontakt Wälz-Kontakt Gleit-Kontakt Roll-Kontakt Elektroden
E Energiespeicher	Schraubenfedern Torsionsfedern elektr. Energie Druckgas chem. Energie
F Kinematik	Translation Rotation Translation-Rotation Wälzbewegung Schraubbewegung
G (Auslösesystem)	magnetisch elektrodynamisch thermisch mechanisch chemisch

Elemente entspricht eine theoretisch mögliche technische Lösung des gestellten Problems. Insgesamt enthält die vorstehende Tabelle 78 125 Verbindungslinien und dementsprechend die gleiche Zahl technischer Lösungen. Aus diesem Beispiel dürfte klar hervorgehen, daß es weiterer einschränkender Bedingungen bedarf, um nicht nur eine technisch brauchbare, sondern auch wirtschaftlich optimale Lösung zu finden. Dies aber heißt, daß der Ingenieur lernen muß, zweidimensional, d. h. technisch-wirtschaftlich, zu denken.

Die physikalischen Grundlagen des technischen Schaffens

Liegt nun eine intuitiv oder methodisch gefundene, brauchbar erscheinende Lösung in Form von Funktionsskizzen vor, so beginnt das Entwerfen, d. h. das Niederlegen des Geschauten in Form maßstäblicher Entwürfe; sie sind jeweils das Ergebnis aus zahlreichen Eingebungen, Überlegungen, Rechnungen, oft auch Versuchen. Wirtschaftliche Gesichtspunkte können meist noch nicht in ausreichendem Maß Berücksichtigung finden. Der Konstrukteur vertraut vielmehr seinem konstruktiven Gefühl, bedient sich dessen, was er an der Schule gelernt und inzwischen in der Praxis an Erfahrungen gesammelt hat. Er wird zunächst sein Hauptaugenmerk darauf richten, daß seine Lösung den nachstehenden physikalischen Grundgesetzen genügt:

Impulssatz: $\vec{\Sigma} I = \text{konst}$
 Energiesatz: $\Sigma W = \text{konst}$
 Entropiesatz: $\Sigma S > 0$

gültig für ein abgeschlossenes System
 I Impuls, W Energie, S Entropie

Maxwellsche Gln.: $\text{rot } \vec{H} = \vec{S} + \vec{S}_V$
 $\text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$

H magnetische Feldstärke
 E elektrische Feldstärke
 S Leitungsstromdichte
 S_V Verschiebungsstromdichte
 B magnetische Induktion

Relativitätsprinzip: $W = m c^2$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Diese mathematisch so überaus einfachen Gesetze umschließen die gesamte klassische Physik einschließlich der speziellen Relativitätstheorie.

Daneben benötigt der Ingenieur aber auch Formeln nicht so allgemeiner Art, die sogenannten empirischen Gesetze. Einige der wichtigsten sind nachstehend aufgeführt:

- Hookesches Gesetz: $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$
- Ohmsches Gesetz: $U = RI$
- Fouriersches Gesetz: $q = -\lambda \frac{d\theta}{dx}$ (Wärmeleitung)
- Newtonsches Gesetz: $q = a(\theta_1 - \theta_0)$ (Konvektion)
- Stefan-Boltzmannsches Gesetz: $q = C_{12}(T_1^4 - T_0^4)$ (Strahlung)
- ϵ Dehnung
 E Elastizitätsmodul
 σ Normalspannung
 U elektrische Spannung
 R elektrischer Widerstand
 I elektrische Stromstärke
 q Wärmestromdichte
 λ Wärmeleitfähigkeit
 $-d\theta/dx$ örtliches Temperaturgefälle
 a Wärmeübergangszahl
 $(\theta_1 - \theta_0)$ Temperaturdifferenz zwischen einem Körper und einer Flüssigkeit bzw. einem Gas
 T₁, T₀ absolute Temperatur der heißeren bzw. kühleren Fläche
 C₁₂ Strahlungsaustauschzahl

Die wirtschaftlichen Grundgesetze des technischen Schaffens

Der maßstäbliche, zunächst vorwiegend technisch orientierte Entwurf bildet die Grundlage und den Ausgangspunkt für die methodische Lenkung der weiteren Konstruktionsarbeit. Er gestattet bereits, die Funktionsweise eines technischen Gebildes in allen Einzelheiten zu übersehen, Berechnungen hinsichtlich Gewicht, Beanspruchung, Erwärmung, Wirkungsgrad, erzielbarer Genauigkeit und dergleichen durchzuführen und zudem erste Überlegungen bezüglich der Fertigung der Einzelteile und deren Montage anzustellen. Darüber hinaus kann nun aber der Konstrukteur anhand des maßstäblichen Entwurfes schon in einem sehr frühen Stadium der konstruktiven Entwicklung erste wirtschaftliche Berechnungen und Vergleiche durchführen. Die hierfür notwendigen Unterlagen sind in der VDI-Richtlinie 2225 [4] enthalten. Das umfangreiche Tabellenwerk gemäß Blatt 2 ermöglicht es dem Konstrukteur, aus den Volumina der Einzel-

teile die Materialkosten und, wie später noch gezeigt wird, auch die Herstellkosten zu ermitteln.

In diesem Zusammenhang ist es bedeutsam, den Unterschied zwischen einem Funktionsmuster, das lediglich technisch-physikalische Bedingungen zu erfüllen hat, und einem technisch, wirtschaftlich und formal ausgereiften Erzeugnis klar hervorzuheben. Er besteht darin, daß letzteres der harten Kritik aller daran interessierten Käufer standhalten muß, wobei neben technisch einwandfreier Funktion ein angemessener Preis und eine ästhetisch ansprechende Form oft von ebenso großer, manchmal sogar von ausschlaggebender Bedeutung sein können. Hieraus folgt, daß

eine Konstruktionsmethode ganz allgemein gesehen nichts anderes sein kann und darf, als eine vorausgenommene sachgemäße, möglichst objektive technische und wirtschaftliche Kritik des in Entwicklung befindlichen Gebildes, mit dem Ziel, durch vertiefte Einsicht Anregungen zur weiteren technisch-wirtschaftlichen Vervollkommnung auszulösen.

Diese Schlußfolgerung erscheint einleuchtend, ja zwingend, und doch treten, wie die Erfahrung lehrt, gerade hierbei ernsthafte Schwierigkeiten auf. Sie äußern sich einmal in der mehr ethisch-psychologisch bedingten Abneigung vieler Konstrukteure, sich überhaupt mit wirtschaftlichen Fragen zu befassen, zum anderen in einer weit verbreiteten Unkenntnis selbst einfachster wirtschaftlicher Zusammenhänge. Daß sich jedoch bereits mit einem Minimum von Kenntnissen wirtschaftlicher Art bedeutsame Aussagen für das konstruktive Schaffen machen lassen, soll anhand der nachfolgenden Beziehungen dargelegt werden

$$H = M + L + G \quad (1)$$

Die Herstellkosten H setzen sich gemäß Gl. (1) aus den Materialkosten M , den Lohnkosten L und den Fertigungsgemeinkosten G zusammen. Faßt man die Konstruktions- und Patentkosten, die kalkulatorischen Wagnisse sowie die Kosten für Verwaltung und Vertrieb in den Gemeinkosten G_v zusammen, so ergeben sich die Selbstkosten S zu:

$$S = H + G_v = aH \quad (2)$$

Bedeutung für drei durch die Indizes 1, 2 und 3 gekennzeichnete technische Erzeugnisse P_1, P_2, P_3 die auf dem Markt erzielbaren Preise, aH_1, \dots die zugehörigen Selbstkosten und N_1, \dots die beispielsweise pro Monat herzustellende Stückzahl, so erhält man für den Gewinn Δ , der in einem gesunden Unternehmen > 0 sein muß, die Beziehung

$$\Delta = (P_1 - aH_1) N_1 + (P_2 - aH_2) N_2 + (P_3 - aH_3) N_3 > 0$$

oder für n Fabrikatetypen

$$\Delta = \sum_{i=1}^n (P_i - aH_i) N_i > 0 \quad (3)$$

Die wichtige Gl. (3) wird als „Erhaltungssatz der Wirtschaft“ bezeichnet. Nur wenn summiert über alle Fabrikate $\Delta > 0$ ist, kann das Unternehmen weiter bestehen. Zwischen den Größen P, H, N bestehen mannigfaltige Beziehungen. Der Preis P ist weitgehend durch die Marktlage bedingt; die Herstellkosten H hängen in hohem Maße von der Stückzahl N ab, die ihrerseits wieder durch den Preis mitbestimmt wird. Gl. (3) wird jedoch weitgehend unabhängig von Konjunktur, Mode und dgl. erfüllt sein, wenn es gelingt, die Herstellkosten H zu einem Minimum zu machen.

Entwurf vollständiger technischer Gebilde

Für die Schätzung der Herstellkosten aufgrund der Materialkosten ist die sogenannte Kostenstruktur eines Erzeugnisses von ausschlaggebender Bedeutung. In **Bild 7** ist die Kostenstruktur eines Güterwaggon und die des Werkes einer Präzisionsarmbanduhr aufgezeichnet. Im einen Fall betragen die prozentualen Materialkosten $M' = 67\%$, im andern Fall immerhin noch 25% . Umfangreiche statistische Erhebungen haben nun, wie z. B. aus **Bild 8** ersichtlich ist, ergeben, daß für drei Entwicklungsstufen I, II und III eines Kleinselbstschalters die prozentuale Kostenaufteilung annähernd konstant bleibt, während sich die Gewichte (gestrichelte Säulen) ganz anders

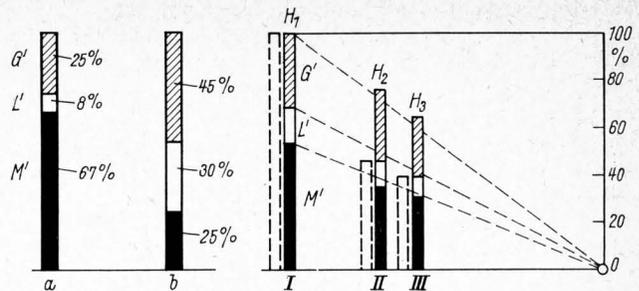


Bild 7 (links). Prozentuale Kostenaufteilung für Güterwaggon (a) und Werk von Präzisionsarmbanduhren (b).

Bild 8 (rechts). Prozentuale Kostenaufteilung für drei Entwicklungsstufen (I, II, III) eines Kleinselbstschalters.

Gestrichelte Säulen = Gewichte

verhalten. Dies führt zu dem statistisch erhärteten Gesetz von der „Konstanz der prozentualen Kostenaufteilung“ innerhalb einer Erzeugnisgruppe.

Sind nun die prozentualen Materialkosten M'_0 einer Erzeugnisgruppe näherungsweise bekannt und die Materialkosten M_1 einer Neukonstruktion innerhalb dieser Erzeugnisgruppe aus dem maßstäblichen Entwurf ermittelt, so ergeben sich die Herstellkosten H näherungsweise mit Hilfe der Beziehung

$$H_1 = \frac{M_1}{M'_0} 100\% \quad (4)$$

Bild 9 enthält eine Auswahl aus der umfangreichen Zusammenstellung von M'_0 -Werten in Blatt 2 der VDI-Richtlinie 2225 [4]. Man erkennt, daß innerhalb des Maschinenbaus und der Starkstromtechnik M'_0 von etwa 70% auf 40% abfällt, während die Werte für Hochfrequenz- und Feinwerktechnik im Bereich von 40 bis 20% liegen. Die M'_0 -Werte sind also charakteristisch für die Art der technischen Gebilde.

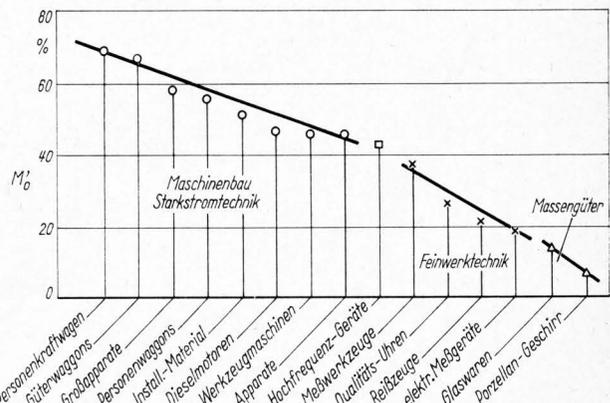


Bild 9. Prozentualer Materialkostenanteil.

Der Einfluß der Stückzahl bei entsprechender Anpassung der Fertigungsverfahren ist aus **Bild 10** ersichtlich, das die Material-, Lohn- und Gemeinkosten für ein Duraluminium-Drehteil in Abhängigkeit von der Stückzahl wiedergibt. Die Tatsache, daß

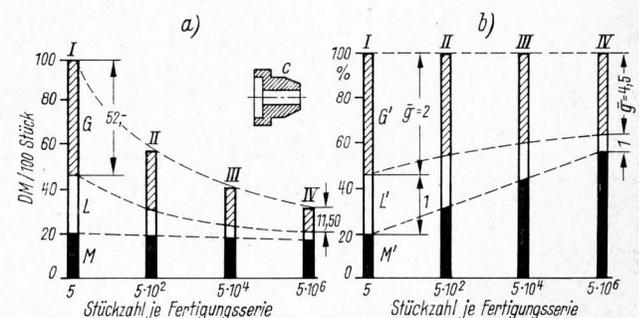


Bild 10. Absolute (a) und prozentuale (b) Kostenaufteilung für ein Drehteil (c) aus Duraluminium in Abhängigkeit von der Stückzahl je Fertigungsserie.

mit fortschreitender Rationalisierung der Fertigung die prozentualen Materialkosten M'_0 (s. Säulendarstellung rechts) stark ansteigen, ist für die nachfolgenden Überlegungen von besonderer Bedeutung. So beträgt z. B. M'_0 für Kraftfahrzeuge schon heute bis 75% der Herstellkosten. Die Forderung im Bereich des sogenannten Sparbaus die Konstruktion so zu steuern, daß die absoluten Materialkosten ein Minimum werden, ist daher nach Möglichkeit zu erfüllen.

wassergekühlter Motor, 50 DIN-PS, Drehmoment 8,5 kpm bei 3000 U/min, synchronisiertes Vierganggetriebe mit festgelegten Übersetzungen, Heizung, Lüftung und Defroster. Als zusätzliche den Käufer besonders interessierende technische Eigenschaften wären u. a. zu nennen: Geringer Brennstoffverbrauch, gute Straßenlage, großer Kofferraum, bequeme Einstiegsmöglichkeit, gutes Kaltstartvermögen, einfache Wartung und nicht zuletzt elegante Form.

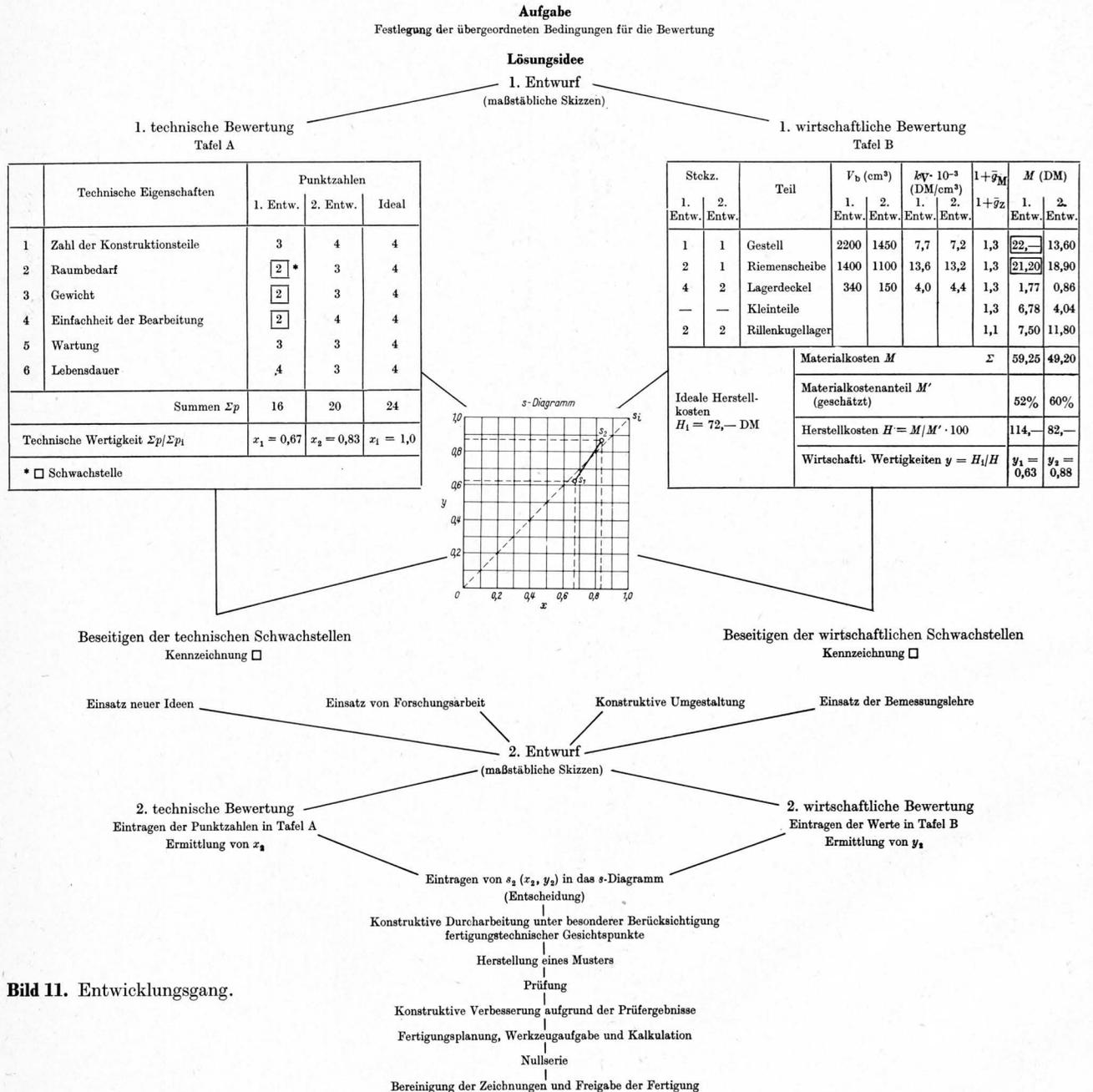


Bild 11. Entwicklungsgang.

Die methodische Weiterentwicklung von den ersten maßstäblichen Entwürfen eines vollständigen technischen Erzeugnisses bis zur ausgereiften Zusammenstellungszeichnung beruht auf einer vergleichenden technischen und wirtschaftlichen Bewertung der Entwürfe. Hierbei ist zu beachten, daß alle Entwürfe den durch die Aufgabe gestellten Bedingungen (Pflichtenheft) genügen müssen; sie sind somit in dieser Hinsicht gleichwertig. Nun gibt es aber noch weitere für die Funktion und Benützung wichtige technische Eigenschaften. Eine der Ideallösung nahe kommende Konstruktion liegt nur dann vor, wenn auch diese zusätzlichen Eigenschaften denkbar gut verwirklicht sind.

Für einen Personenkraftwagen können z. B. folgende Aufgabenbedingungen vorgeschrieben sein: Fünfsitzige Limousine,

In vielen Fällen läßt sich der Grad der Verwirklichung einer technischen Eigenschaft rechnerisch oder meßtechnisch ermitteln und durch Angabe einer meistens benannten Zahl festlegen: z. B. Brennstoffverbrauch in g/PSh, Geräusch in phon, Wirkungsgrad in % usw. Da die Maßeinheiten verschieden sind, kann die Gesamtbeurteilung nicht einfach durch Addition dieser Zahlen, sondern nur über eine Punktbewertung erfolgen, derart, daß eine gute Verwirklichung einer Eigenschaft eine hohe Punktzahl (gute Note), eine weniger gute eine entsprechend niedrigere Punktzahl (schlechtere Note) erhalten.

Für die technische Bewertung wird als Bezugsgröße ein Erzeugnis angenommen, bei dem alle zusätzlichen Eigenschaften ideal verwirklicht sind (technische Ideallösung). Die zur Beurteilung vorliegenden Entwürfe werden mit der Ideallösung ver-

glichen und der jeweilige Grad der Annäherung an die ideale Verwirklichung der betreffenden Eigenschaft durch eine Punktzahl (Note) festgelegt. Die Ideallösung selbst stellt zwar keinen absoluten Bezugspunkt dar, denn sie ist an den jeweiligen Stand der Technik gebunden. Da es sich jedoch um einen relativen und nicht um einen absoluten Vergleich handelt, ist dies ohne Belang. Zur Punktbewertung hat sich unter den vielen Möglichkeiten folgende Skala als zweckmäßig erwiesen [5]:

Tafel 2. Annäherung an die ideale Verwirklichung.

sehr gut (ideal)	4 Punkte
gut	3 Punkte
ausreichend	2 Punkte
gerade noch tragbar	1 Punkt
unbefriedigend	0 Punkte

Der wesentliche Vorteil einer sorgfältigen Punktbewertung besteht darin, daß sie klar zum Ausdruck bringt, welche Eigenschaften gut und welche schlecht verwirklicht sind. Dadurch wird der Konstrukteur unmittelbar angeregt, die sogenannten Schwachstellen — und auch die Zustärkstellen — auszumerken. Man wird selbstverständlich eine technische Bewertung nur dann durchführen, wenn sich der Aufwand lohnt.

Als technische Wertigkeit x wird definiert:

$$x = \frac{p_1 + p_2 + \dots + p_n}{n\hat{p}} = \frac{\bar{p}}{\hat{p}} \quad (5);$$

p_1, p_2, \dots sind die jeweiligen Punktzahlen (Noten) und $\hat{p} = 4$ die der idealen Verwirklichung zukommende Punktzahl. Analog läßt sich auch eine wirtschaftliche Wertigkeit y angeben:

$$y = \frac{H_i}{H} \quad (6),$$

worin H_i die idealen Herstellkosten bedeuten; sie sind erfahrungsgemäß etwa gleich dem 0,8fachen Wert des preiswertesten und gleichwertigen Konkurrenzfabrikates anzusetzen. H sind die z. B. mit Gl. (4) anhand des betreffenden Entwurfes geschätzten Herstellkosten. Trägt man x als Abszisse, y als Ordinate auf, so entspricht jedem Punkt $P(x, y)$ eine „Stärke“ s der betreffenden Lösung.

Aufgrund der dargelegten Zusammenhänge ergibt sich nun beinahe zwangsläufig ein Entwicklungsgang, wie ihn **Bild 11** zeigt. Ausgehend von übergeordneten Gesichtspunkten für die Bewertung (Minimum der Herstellkosten, des Gewichtes [Leichtbau], des Raumbedarfs, der Verluste, der günstigsten Handhabung und dgl.) wird ein 1. maßstäblicher Entwurf ausgearbeitet, der die Grundlage für eine 1. technische und wirtschaftliche Bewertung bildet (Ermittlung von x_1 und y_1 und damit von s_1). Sofern dieser Lösungsvorschlag noch nicht genügt, muß nach einer neuen tragfähigeren Idee gesucht werden. Sind hingegen die Aussichten bereits als einigermaßen günstig zu betrachten, so werden nun anhand der ersten technischen und wirtschaftlichen Bewertung die Schwachstellen ermittelt und versucht, diese durch Einsatz neuer Ideen, zielgerichteter Forschungsarbeiten und konstruktiver Maßnahmen auszumerken. Danach ist unter Zugrundelegung der überholten Zeichnungen (2. Entwurf) eine

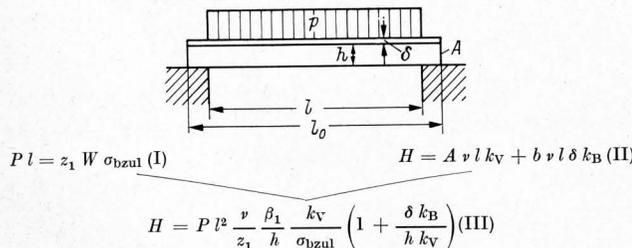


Bild 12. Beidseitig abgestützter Balken mit gleichmäßig verteilter Last $P = pl$, wobei eine Fläche zu bearbeiten ist.

- | | |
|-------------------------------------|--|
| h Balkenhöhe | l_0 Gesamtlänge |
| b Balkenbreite | $v = l_0/l$ |
| $A = h b$ Balkenquerschnitt | k_v spez. Materialkosten je Volumeneinheit |
| δ abzutragende Materialdicke | k_B spez. Bearbeitungskosten je Volumeneinheit |
| l belastete Länge | |

nochmalige technisch-wirtschaftliche Bewertung vorzunehmen, die zu der Stärke s_2 mit den Komponenten x_2, y_2 führt. Ist das Ergebnis nun befriedigend, d. h. liegt s_2 in der Nähe der idealen Entwicklungslinie und genügend nahe an s_1 , so kann mit der eigentlichen konstruktiven Durcharbeitung begonnen werden. Nach Anfertigung und Prüfung von Versuchsmustern ergeben sich meist noch weitere Verbesserungen. Die sich an die grundsätzliche Entwurfsarbeit anschließende Planung und Kalkulation sind als Durcharbeitung anzusehen, wobei es Sinn und Zweck aller vorausgegangener Bemühungen ist, diese letzte Überarbeitung nun an einem hinsichtlich Prinzip, grundsätzlichem Aufbau und Herstellkosten bereits voll ausgereiften Gebilde vorzunehmen. Es folgt schließlich die endgültige Fertigstellung aller Zeichnungen, Bauvorschriften und dgl. und anschließend die Freigabe zur Fertigung.

Bemessung von Einzelteilen und einfacheren technischen Gebilden

Das zweidimensionale, d. h. technisch-wirtschaftliche Denken beherrscht auch die Bemessungslehre. Sie gestattet, optimale Lösungen mit Hilfe eines rechnerischen Verfahrens zu ermitteln. Das Prinzip der Bemessungslehre besteht darin, daß zunächst Beanspruchungs- und Kostengleichungen aufgestellt und diese dann mathematisch zu Bemessungsgleichungen vereinigt werden, die den funktionalen technisch-wirtschaftlichen Zusammenhang aller der Aufgabenstellung genügenden Lösungen umfassen. Bei Einzelteilen kann allerdings von den statistischen Gesetzmäßigkeiten zwischen M und B nicht mehr Gebrauch gemacht werden.

Anhand des einfachen Beispiels gemäß **Bild 12** wird die Ableitung der Bemessungsgleichung erläutert. Die Beanspruchungsgleichung (I) ergibt sich unmittelbar aus der Festigkeitslehre, wobei z_1 die Einspannziffer und W das Widerstandsmoment des Querschnittes A bedeuten. Die Kostengleichung (II) erhält man aus dem Gesamtvolumen des Balkens multipliziert mit den spezifischen Kosten je Volumeneinheit k_v und dem zu zerspanenden Volumen multipliziert mit den spezifischen Bearbeitungskosten k_B . Wird W in Gl. (I) mit Hilfe der dimensionslosen Beziehung $\beta_1 = A h/W$ eliminiert und dann A aus Gl. (I) in (II) eingesetzt, so erhält man die Bemessungsgleichung (III). Die Materialkosten setzen sich zusammen aus dem Werkstofffaktor $F l_0^3$, dem Einspannfaktor v/z , dem Formfaktor β_1/h und dem Werkstofffaktor k_v/σ . Durch Multiplikation mit dem zweiten Glied in der Klammer von Gl. (III) erhält man die Bearbeitungskosten.

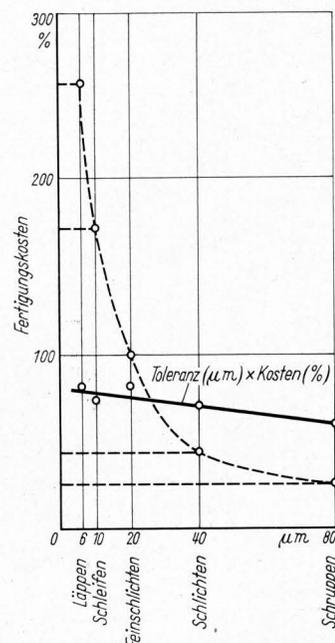


Bild 13. Einfluß der geforderten Toleranzbreite auf die Fertigungskosten nach Bronner [7].

Die Bemessungsgleichung ermöglicht es dem Konstrukteur — immer unter Einhaltung der geforderten technischen Bedingungen —, alle überhaupt möglichen Maßnahmen zur Erzielung minimaler Material- oder Herstellkosten zu treffen. Von besonderer Bedeutung sind dabei Größen, die in einer höheren Potenz vorkommen, denn eine nur geringfügige Änderung dieser sogenannten empfindlichen Größen kann bereits erhebliche Auswirkungen zur Folge haben.

Anfänglich bestand die Auffassung, daß die Bemessungslehre nur auf einfache Fälle anwendbar sei. Im Laufe der Jahre hat sich aber gezeigt, daß auch verhältnismäßig komplizierte Aufgaben mit ihrer Hilfe gelöst werden können. Zudem schafft sie die Voraussetzung für den Einsatz von Computern im Konstruktionsbereich.

Neben den durch die Bemessungslehre wiedergegebenen Zusammenhängen spielen aber auch noch weitere Gesetzmäßigkeiten eine oft ausschlaggebende Rolle. So geht z. B. aus **Bild 13** hervor, daß das Produkt aus Toleranz in μm und Fertigungskosten in % annähernd konstant ist. Hohe Genauigkeitsforderungen wirken sich somit außerordentlich stark auf die Kosten aus.

Einen weiteren wichtigen Zusammenhang veranschaulicht **Bild 14**. Nach den Untersuchungen von *Heesch* und *Kienzle* [6] gibt es 28 Typen von je unendlich vielen flächenschlüssigen Formen der regelmäßigen Zerlegung. Die Verbindungslinien

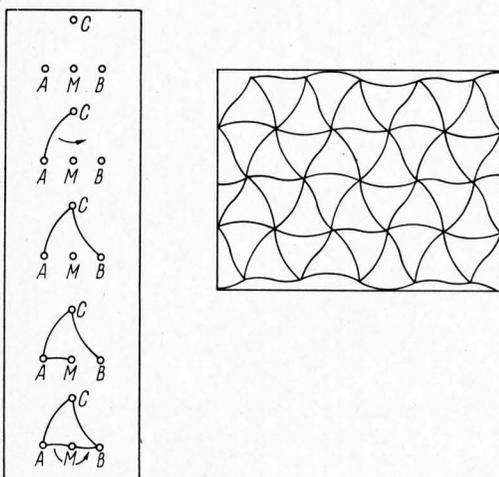


Bild 14. Flächenschlüssige Zerlegung nach *Heesch* und *Kienzle* [6]. Es gibt 28 Typen von je unendlich vielen flächenschlüssigen Formen der regelmäßigen Zerlegung.

A—C und A—M können ganz beliebig verlaufen, während die Verbindungen B—C und B—M durch Drehung entsprechend den eingezeichneten Pfeilen um 60° bzw. 180° entstehen. **Bild 14** rechts zeigt die zugehörige flächenschlüssige Zerlegung. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen lassen sich durch Anwendung der *Heesch'schen* Gesetze im Mittel etwa 50% des Nettovolumens flächenhaft gestalteter Teile einsparen.

Wachstumsgesetze

Jede Bemessungsgleichung stellt zugleich das Wachstumsgesetz für das betreffende technische Erzeugnis dar. Welch außerordentliche Auswirkungen solche Wachstumsgesetze insbesondere im Zusammenhang mit Typenreihen beinhalten, geht aus **Bild 15** hervor, das die Wachstumsgesetze für elektrische Maschinen, Luftdrosselspulen und Kondensatoren zeigt. Bedeutend P_0 die relative Leistung bzw. Blindleistung und M_0 die zugehörigen relativen Materialkosten, so erkennt man, daß bei 10facher Leistung die Kosten für elektrische Maschinen nur etwa das 6fache, für Luftdrosselspulen das 3,5fache, für Kondensatoren jedoch das 10fache betragen. Der Exponent $x = 3/4$ ist, obwohl er nicht allzusehr von 1 abweicht, doch entscheidend für den Übergang zu großen und größten Einheiten. Bei 1000facher Blindleistung kostet z. B. ein Blindleistungsgenerator nur etwa das 175fache, während die Kondensatorenbatterie das 1000fache kosten würde.

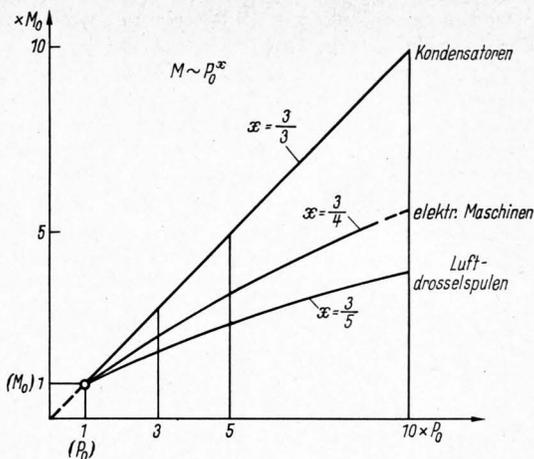


Bild 15. Wachstumsgesetze für elektrotechnische Erzeugnisse.

Die technisch-wirtschaftlichen Grundgesetze der Massenfertigung

Automatisierung (oder Automation) — im Sinne der von *C. M. Dolezalek* unter Mitwirkung namhafter Experten erarbeiteten Definition — heißt, einen materialbelasteten oder materialfreien Vorgang mit technischen Mitteln so einzurichten, daß der Mensch weder ständig noch in einem erzwungenen Rhythmus für den Ablauf des Vorganges tätig zu werden braucht.

Neben diesem mehr menschlichen Aspekt gibt es aber noch einen wirtschaftlichen, und dieser ist wie immer die dominierende Triebkraft für den Übergang zur automatisierten Fertigung. Die vollkommenste Automatisierung liegt in der Energie- und Verfahrenstechnik vor. Die Kraftwerke, Raffinerien, Walzwerke und auch die chemischen Grobelektrolysen sind beinahe menschenleer. Das wesentliche Merkmal derart vollautomatisierter Betriebe besteht darin, daß das herzustellende Erzeugnis über längere Zeit gleich bleibt. Bei der Massenfertigung technischer Gebilde liegen die Verhältnisse komplizierter, doch die Forderung nach weitgehender Konstanz des zu fertigenden Erzeugnisses herrscht auch hier vor. So hat z. B. *H. Ford* zwölf Jahre an dem berühmten Modell T entwickelt und mit der Fertigung erst begonnen, als eine in jeder Hinsicht ausgereifte Konstruktion vorlag. Dann aber produzierte er von 1908 bis 1927 annähernd 16 Millionen Wagen dieses Typs, ohne daß eine wesentliche Änderung notwendig wurde.

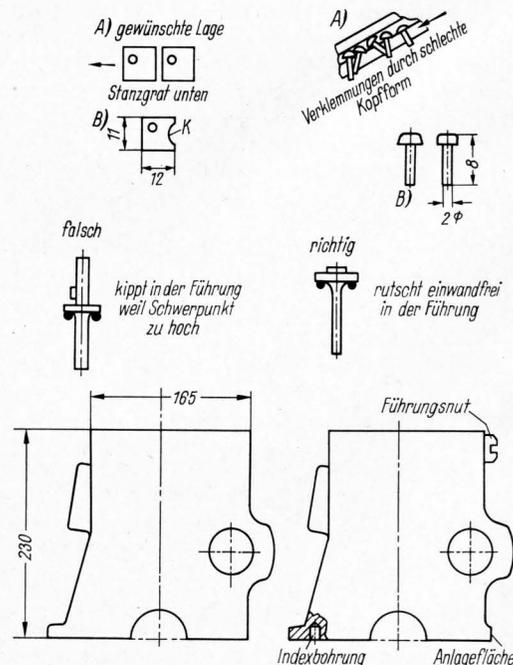


Bild 16. Beispiele für die automatisierungsgerechte Gestaltung von Einzelteilen (s. VDI-Richtlinie 3227).

Es erhebt sich nun die Frage, ob sich jede ausgereifte Konstruktion, sofern ein genügend großer Absatz gesichert ist, bereits für die automatische Fertigung ihrer Einzelteile eignet. Aus der Erfahrung, daß dies im allgemeinen nicht der Fall ist, wurde vor zwei Jahren der Gemeinschaftsausschuß ADKI/ADB „Automatisierungsgerechte Erzeugnisgestaltung“ gebildet. Die bereits im Druck befindliche VDI-Richtlinie 3237 „Fertigungsgerechte Werkstückgestaltung im Hinblick auf automatisches Zubringen, Fertigen und Montieren“ enthält zahlreiche Beispiele für die automatisierungsgerechte Ausbildung von Bauteilen. Bild 16 zeigt vier Beispiele, die zusammen mit der Beschriftung unmittelbar verständlich sein dürften.

Wie bereits erwähnt, sind neben den menschlichen die wirtschaftlichen Gesichtspunkte für den Übergang zur Automatisierung von besonderer Bedeutung. Die Materialkosten lassen sich bei großer Stückzahl meist etwas, jedoch nicht entscheidend verringern, sofern die Konstruktion nicht grundlegend abgewandelt wird. Eine Kostensenkung ist somit lediglich bei den Lohn- und Fertigungsgemeinkosten möglich.

Bild 17 zeigt eine Gegenüberstellung der Kostenstrukturen für ein bestimmtes Erzeugnis, das einmal in Serienfertigung, zum anderen in automatisierter Fertigung hergestellt wird. H_1 und H_2 bedeuten die absoluten Herstellkosten, M' , L' , G' die prozentualen Material-, Lohn- und Gemeinkostenanteile. Die prozentualen Lohnkosten sind von 10% auf 1,8% gesunken, die prozentualen Materialkosten hingegen von 50% auf 71,2% angestiegen. Das Verhältnis $G'_1:L'_1 = 4$ ist auf $G'_2:L'_2 = 15$ angewachsen. Eine Bezugnahme der Gemeinkosten auf den sogenannten produktiven Lohn ist daher bei automatisierter Fertigung nicht mehr sinnvoll.

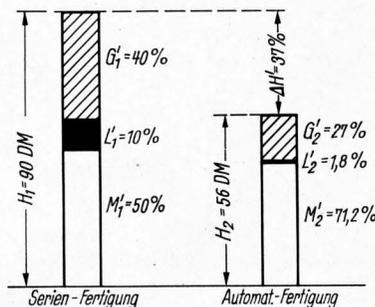


Bild 17. Kostenstruktur eines Erzeugnisses bei Serien- und automatisierter Fertigung.

Mit der VDI-Richtlinie 2225 stehen dem Konstrukteur Unterlagen zur Verfügung, um bei Herstellung in Einzel- oder Serienfertigung kostengünstige Lösungen zu finden. Sofern es im Zusammenhang mit der automatisierten Fertigung zunächst darum geht, möglichst niedrige Materialkosten M zu erzielen, können die Methoden dieser Richtlinie ebenfalls angewendet werden. Zur weiteren Durcharbeitung der Einzelteile im Hinblick auf ihre automatisierungsgerechte Gestaltung gibt die VDI-Richtlinie 3237 zahlreiche wertvolle Hinweise.

Das Kostendenken von seiten der Fertigungsplanung und der Konstruktion beim Entwerfen der Fertigungseinrichtungen basiert jedoch auf grundsätzlich anderen Überlegungen. Einige der wichtigsten Zusammenhänge aus einem Aufsatz von Bronner [7] sind nachstehend zusammengestellt:

$$\text{Materialkosten } M_1 \approx M_0 \lambda^3; (\lambda = l_1/l_0) \quad (7)$$

$$\text{Bearbeitungskosten } B_1 \approx B_0 \lambda^a; (a = 2,2 \dots 1,8) \quad (8)$$

$$\text{Kapitaldienst } K \approx \frac{z'}{1 - \frac{1}{(1+z')^n}} \cdot A \quad (9)$$

$$\text{Anschaffungswert } A_1 \approx A_0 \left(\frac{m_1}{m_0}\right)^{2/3} \quad (10)$$

$$\text{Fertigungskosten } F_1 \approx F_0 \left(\frac{m_0}{m_1}\right)^{1/3} \quad (11)$$

Daß die Materialkosten M gemäß Gl. (7) mit der 3. Potenz der linearen Vergrößerung $\lambda = l_1/l_0$ zunehmen, ist ohne weiteres

verständlich. Interessant ist jedoch Gl. (8). Für Zerspanungsarbeiten gilt etwa: $a = 2,2$ bei Einzel-, $a = 2,0$ bei Serien- und $a = 1,8$ bei Massenfertigung. Von besonderer Bedeutung ist Gl. (9) für den Kapitaldienst K , wobei A die Anschaffungskosten, n die Nutzungsdauer in Jahren und $z' = z\%/100\%$ den relativen Zinssatz bedeuten. Nur wenn der Kapitaldienst K kleiner ist als die aufgrund der Investitionen erzielbaren Ersparnisse oder Mehrgewinne, ist der Übergang zur automatisierten Fertigung wirtschaftlich gerechtfertigt. Bedeuten m_0 die Menge, die bisher von einem bestimmten Erzeugnis gefertigt wurde, und m_1 eine gegenüber m_0 größere Menge, so ist aufgrund statistischer Erhebungen der Anschaffungswert A_1 für die zusätzlichen Fertigungseinrichtungen nicht etwa proportional m_1/m_0 , sondern wächst nur etwa mit der 2/3ten Potenz an, da erfahrungsgemäß immer eine ganze Reihe von Fertigungseinrichtungen noch nicht voll ausgelastet war. Noch interessanter ist Gl. (11), wonach mit zunehmender Stückzahl m_1 die Fertigungskosten F_1 mit der 3. Wurzel aus (m_0/m_1) abnehmen. Wenn auch diese Zusammenhänge nur im Mittel gelten, so sind sie doch für die grundsätzlichen Überlegungen von außerordentlicher Bedeutung.

Wie sehr Gl. (11) zu Recht besteht, geht aus einem Vergleich der Gewinne der vier großen amerikanischen Automobilkonzerne in Abhängigkeit der 1963 gelieferten Stückzahlen hervor:

Tafel 3	Stückzahl (Millionen)	Gewinn in %
General Motors	4,66	9,7
Ford	2,39	5,6
Chrysler	1,16	4,6
American Motors	0,48	3,3

Betrachtungen solcher Art sind somit von wirtschaftspolitischer, um nicht zu sagen schicksalhafter Bedeutung, denn sie führen aus rein kostenmäßigen Überlegungen mehr und mehr zum Zusammenschluß gleichartiger Industriebetriebe, eine Erscheinung, die sich auch in Europa zunehmend bemerkbar macht. Nur wer in Zukunft technisch Außerordentliches leistet und dabei zugleich die wirtschaftlichen Gesetze streng beachtet, hat eine Chance zu überleben. Dies aber führt zu der unabdingbaren Forderung, die jungen Ingenieure bereits während des Studiums in die wirtschaftlichen Zusammenhänge einzuführen, wobei jedoch der Mahnung von W. Röpke zu gedenken ist, daß auch die nüchterne Welt des reinen Geschäftslebens aus jenen verborgenen sittlichen Reserven schöpfen muß, mit denen sie steht und fällt. Die vornehmste Aufgabe der Industrie, insbesondere der Landtechnik, ist es, der ständig wachsenden Menschheit Arbeit und Brot zu verschaffen und darüber hinaus den zwei Milliarden darbender Menschen ihr Los zu erleichtern. Unser Auftrag lautet daher:

Besseres zu schaffen und
zugleich Gutes zu tun.

Schrifttum

- [1] Segler, G.: Motive für die Fortentwicklung von Schleppern und Arbeitsmaschinen in Vergangenheit und Zukunft. VDI-Ber. Nr. 91. Düsseldorf: VDI-Verlag 1965. S. 9/17.
- [2] Hansen, F.: Konstruktionssystematik. Grundlagen für eine allgemeine Konstruktionslehre. Berlin: VEB Verlag Technik 1965.
- [3] s. z. B. Kesselring, F.: Morphologisch-analytische Konstruktionsmethode. VDI-Z. 97 (1955) Nr. 11/12, S. 327/31.
- [4] VDI-Richtlinie 2225 „Technisch-wirtschaftliches Konstruieren“ Bl. 1 u. 2. Berlin u. Köln: Beuth-Vertrieb GmbH, Mai 1964.
- [5] Kesselring, F.: Technische Kompositionslehre. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1954.
- [6] Heesch, H., und O. Kienzle: Flächenschluß. System der Formen lückenlos aneinanderschließender Flachteile. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1963.
- [7] Bronner, A.: Zukunft und Entwicklung der Betriebe im Zwang der Kostengesetze. Werkstattstechn. 56 (1966) H. 2, S. 80/89.