

Schriften der Sudetendeutschen Akademie
der Wissenschaften und Künste

Band 34

Forschungsbeiträge
der Naturwissenschaftlichen Klasse

Seiten 41 - 63

VOLKER OPPITZ

*„Tiefe und Trübe. –
Das Publikum verwechselt leicht Den,
welcher im Trüben fischt,
mit Dem, welcher aus der Tiefe schöpft.“¹*

Eugen-Sänger-Impuls Ein Beitrag zur mathematischen Serienplanung

Zusammenfassung

So, wie die Industrialisierung der Fertigung die Produktivität der Arbeit mächtig verstärkte, bediente sich die Organisation der Arbeit wissenschaftlicher Methoden. Mathematik und Kybernetik hielten Einzug, an die Stelle der Erfahrungsgestaltung der Fertigung trat seine mathematische Serienplanung. Der Beitrag stellt einen kleinen Ausschnitt dieses Prozesses dar. Fast exemplarisch, weil ein exzellenter Techniker, Eugen Sänger, den betriebswirtschaftlichen Impuls gegeben hat.

Summary

The Eugen-Sänger-Impulse
A Contribution to Mathematical Series Planning

The industrialisation of production led to a dramatic increase in productivity and the improved organisation of work employed scientific methods. Mathematics and cybernetics came into play, and the role of human experience in production processes was replaced by mathematical planning of mass production. This article presents a small part of this development. An outstanding technical expert, Eugen Sänger, provided the stimulus for this scientific economic and technical progress.

Anlass

Die Technische Hochschule Dresden [THD] übernahm 1954 die Fakultät für Luftfahrttechnik [FfL] der Universität Rostock, gewissermaßen als Forschungskapazität der 1955 gegründeten Flugzeugwerke Dresden [FWD]: etwa 8000 Arbeiter, Führungskräfte, Ingenieure und Meister, darunter fünfundzwanzig

¹ Im Blick auf Eugen Sänger und den „Boston-Effekt“. Zitat: Nietzsche, S. 137. [5]

Prozent von Arado, Heinkel (Warnemünde), Junkers (Dessau) und Siebel (Halle). Bedeutende Forscher der deutschen Luftfahrtindustrie, die in Russland arbeiten mussten, wie z.B. W. Albring², B. Baade [BB], A. Pawlowitsch, lehrten nach ihrer Rückkehr an der THD. Eugen Sänger, der bis 1945 in Bayern tätig war, entging der Zwangsentsendung in die UdSSR und forschte in der Flugzeugindustrie Frankreichs.

Das Interesse an Luft- und Raumfahrt war groß. Obwohl ich als Absolvent der Ingenieurschule für Maschinenbau und Elektrotechnik Dresden an der Fakultät Ingenieurökonomie studierte, habe ich die Flugzeugentwicklung verfolgt³ und bin dabei auf eine bedeutsame Publikation Eugen Sängers⁴ gestoßen. So eröffneten sich Erkenntnisquellen für das Betriebswirtschaftsstudium und die Praxis als Betriebswirt. Besonders anregend wirkte 1954 zunächst die Auswertung eines Fachartikels: Sänger, „Fertigungskosten von Luftfahrtgerät“⁵. In der 1956 aufgenommenen Tätigkeit in den FWD, zunächst als Operativ-, später als Planungstechnologe, stammten fast alle Kollegen aus den genannten Firmen, ausgestattet mit bestem Fachwissen. Rasch erlangte ich Klarheit, dass die deutsche Flugzeugindustrie nicht nur einen hohen ingenieurwissenschaftlichen Vorhaltungswinkel besaß, sondern auch ihre Fertigungsorganisation eine internationale Spitzenstellung eingenommen hat. Bereits im Studium erschien mir die Darstellung der Fertigungszeiten industrieller Erzeugnisse⁶ theoretisch bedeutsam, in der Praxis erkannte ich ihren betriebsökonomischen Rang. Sänger bezieht den Aufwand auf ein Kilogramm einer Erzeugnisgruppe, von Handelsschiffen bis zu Taschenchronometern. Diese Maßeinheit erlaubt den Vergleich zwischen Erzeugnisarten und Ländern (Abb. 1).

Die Aufwandskurven über der Seriengröße verlaufen linear, weil Sänger doppelt logarithmisches Papier für das seit 1930 in der deutschen Flugzeugindustrie benutzte Modell der degressiven Abnahme des Aufwandes anwendet, lange bevor die Boston Group den Vorgang entdeckt hat:

„Der Boston-Effekt beschreibt ein Phänomen der Erfahrungskurve. Der Name des Boston-Effekts basiert auf der Boston Consulting Group, welche die zugrundeliegenden Forschungsergebnisse erarbeitet hat und welche durch die Veröffentlichungen über die Erfahrungskurve bekannt geworden ist. Danach kommt es aufgrund der gemachten Erfahrungen bei einer Erhöhung der Produktionsmenge zu einer Verringerung der Stückkosten eines Produktes. Als Folge der gemachten Erfahrungen, die sich in einer erhöhten Geschicklichkeit oder einem größeren Wissen niederschlagen, kommt es zu einem Rückgang der Stückkosten des Produktes, ein Ende der 60er Jahre von der international tätigen Unternehmensberatungsfirma Boston Consulting Group entdeckter Zusammenhang, dass die Stückkosten eines Erzeugnisses mit zunehmender Erfahrung des Herstellers sinken. Der sog. Boston-Effekt hat als Erfahrungskurve

² Werner Albring, 26.09.1914. 1946 – 1952: Rußland, 1952 – 1979: THD-Lehrstuhl.

³ Vgl. Oppitz 1956. [6]

⁴ 1905 – 1964, geb. in Preßnitz, Kreis Komotau. Dass erfuhr ich erst durch unsere Akademie.

⁵ Vgl. Sänger, S. 55 ff. [14]

⁶ Vgl. Oppitz 1977. [10]

seit der Veröffentlichung von B.D. Henderson (1974) einen festen Platz im analytischen Instrumentarium der strategischen Planung und wird gerne als eines der ehernen Gesetze der Wirtschaft bezeichnet.“⁷

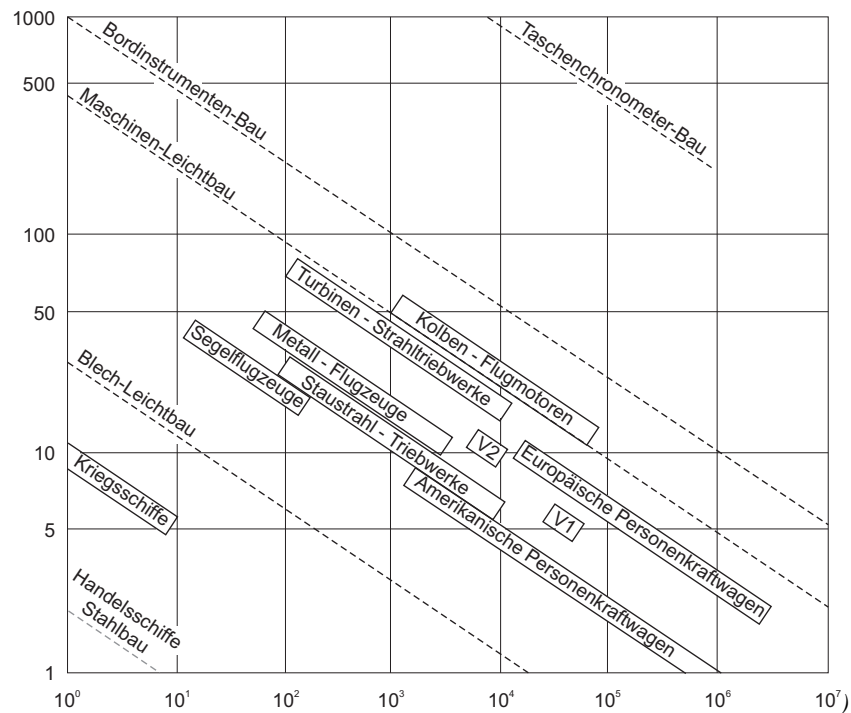


Abbildung 1: Abnahme des Fertigungsaufwandes (Ordinate [h/kg]) über der Seriengröße (Abszisse[St.]

Als Leiter der FWD-Baumusterplanung der Iljuschin [IL] 14 und BB 152⁸/153 verfügte ich über Junkers-Unterlagen⁹ für die stückzahlabhängige Aufwandssenkung nach Gewicht (Abb. 2) und die gewichtsabhängige Aufwandszunahme über der Stückzahl (Abb. 3). Sie führten zu mathematischen Grundlagen der Planung und zur Riemannschen ζ -Funktion. Ausgehend von diesem Erkenntnisstand ging es um die weitere Fundierung der Planung, wie z.B. um den Einfluss der Rationalisierung auf die Aufwandssenkung, die Linearisierung der ζ -Funktion durch logarithmische

⁷ <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/boston-effekt/boston-effekt.htm>. Entnommen 31.01.2013.

⁸ 1958: Fertigstellung des strahlgetriebenen Verkehrsflugzeuges BB 152 im FWD, Reichweite 2000 Kilometern, Geschwindigkeit 800 km/h, sechzig Fluggäste. Die Unterlagen zur BB 152/153 haben russische Berater mitgenommen.

⁹ Richtlinien der Arbeits-, Auftrags-, Termin-, Kapazitäts- und Lohnkostenplanung. Vgl. Oppitz 1960, Blatt 2. Bezüge auf private Unterlagen der Baumusterplanung IL 14 werden unter Angabe der Blatt-Nr. zitiert. [7]

Umwandlung natürlicher Zahlen, die Summenbildung der Aufwände, die Einwirkungen der Aufwandssenkung auf Durchlaufzeiten usw.¹⁰

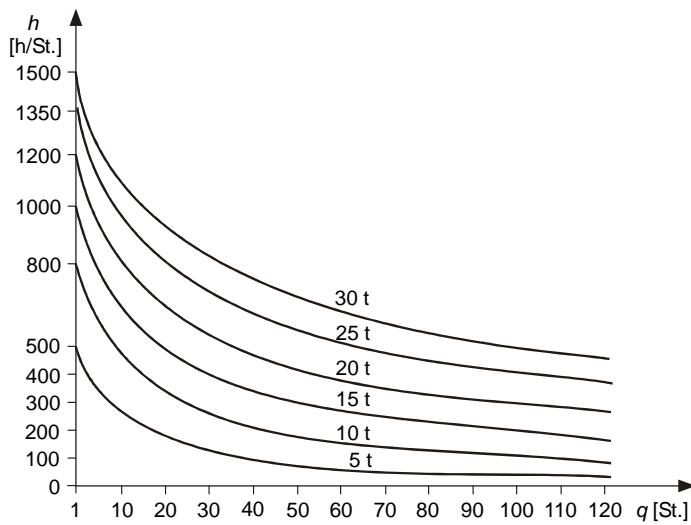


Abbildung 2: Aufwandskurve $h(q)$ nach Junkers in tausend Stunden über der Stückzahl, bezogen auf das Fluggewicht

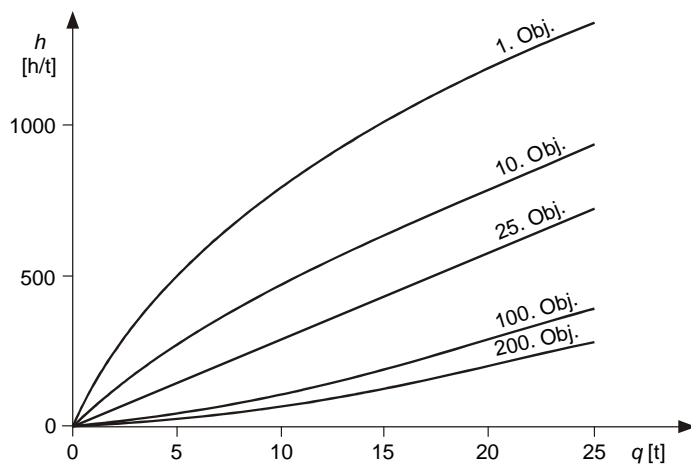


Abbildung 3: Aufwandskurven $h(q)$ nach Junkers in tausend Stunden über dem Flugzeuggewicht, bezogen auf die Stückzahl

Für die IL 14-Serie erfolgte 1957 eine Planüberarbeitung, bei der die Veränderung der Materialverbrauchsnormen [MVN] in Zusammenarbeit mit den Abteilungen Serienkonstruktion und -technologie festgelegt worden ist. Während Kurve I die Ist-Entwicklung der Materialkosten abbildet, enthält die Kurve II die planmäßige

¹⁰ Vgl. Oppitz 1967, S. 12 ff, 2011/1, S. 288/291, S. 401/406, 2011/2, S. 300/304. [8]

Veränderung der MVN auf den Arbeitsplänen wie folgt: C ... 1. Stufe, B ... 2. Stufe und A ... 3. Stufe der Überarbeitung der MVN¹¹ (Abb. 4).

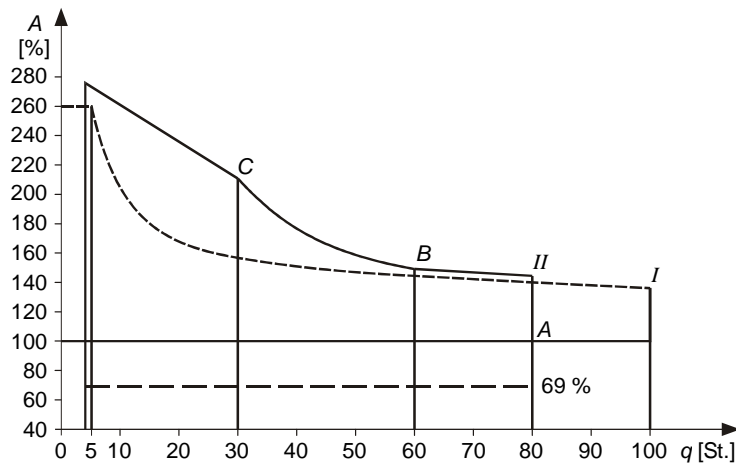


Abbildung 4: Stückzahlabhängige Materialverbrauchsnormen mit Einsatzgewicht [100 %] und Fertiggewicht [69 %]

Zwei volkswirtschaftliche Überlagerungen erschwerten die DDR-Flugzeugfertigung:

- Die fehlende Infrastruktur für die Maschinen- und Materialbeschaffung sowie die Marktbegrenzung auf den Ostblock ohne nennenswerten Zugang zum Weltmarkt; gerade bei der Materialverbrauchsplanung war zu berücksichtigen, dass im Wesentlichen die eigene Wirtschaft eine Zulieferindustrie des Flugzeugbaus erst entwickeln musste.
- Ein zehnjähriger Rückstand im flugzeugbautechnischen Arbeitsvermögen, das nicht mehr den technologischen Anforderungen entsprach. Innerhalb kürzester Zeit holten die etwa zweitausend Fachleute der früheren Flugzeugfirmen den Rückstand auf und arbeiteten sich die anderen sechstausend Neulinge in die Flugzeugfertigung ein. Nach etwa drei der BB 152.

Die Auflösung der DDR-Flugzeugindustrie (1961) hatte kaum etwas mit verunglückten Testmaschinen zu tun. Nach meinem Kenntnisstand gibt es eine Hauptursache: Die Absatzmärkte für moderne strahlgetriebene Passagiermaschinen verlangten eine Bordgeräte- und Steuerungstechnik, die auf dem RGW¹²-Markt nicht verfügbar war. Allein der NSW-Import dieser Baugruppe 700, besonders der miniaturisierten Funktechnik für den Landeanflug auf großen Flugplätzen, hätte nicht viel weniger als ein komplettes Flugzeug gekostet.

¹¹ Vgl. Oppitz 1960, Blatt 5. [7]

¹² RGW ... Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe. NSW ... Nichtsozialistisches Wirtschaftsgebiet.

ζ-Funktion

Die vom Parameter κ abhängige ζ -Funktion (Abb. 5) beruht auf der Dirichlet-Reihe:

$$\zeta(\kappa) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^{\kappa}} = 1 + \frac{1}{2^{\kappa}} + \frac{1}{3^{\kappa}} + \frac{1}{4^{\kappa}} + \frac{1}{5^{\kappa}} + \dots$$

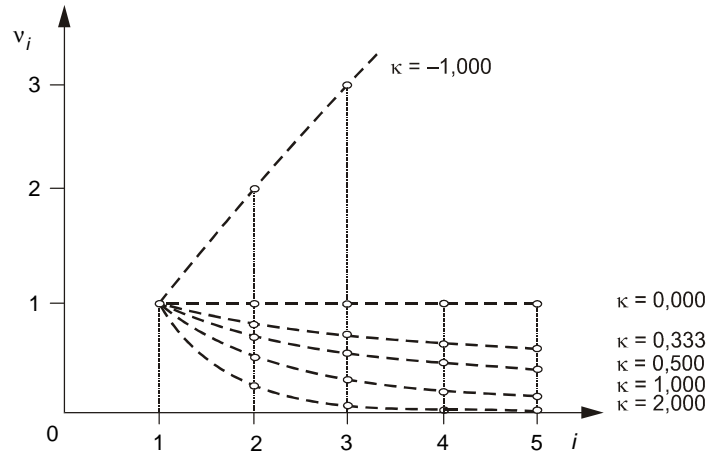


Abbildung 5: Hyperbolische Verteilung

Ihr Definitionsbereich erstreckt sich gemäß der Dirichlet-Reihe eindimensional auf die rechte Seite der komplexen Zahlenebene ab eins und besitzt keinen endlichen Grenzwert;¹³ wie z.B. einfach dann, wenn der Parameter der ζ -Funktion einen Minuswert annimmt, wie z.B. $\kappa = -1$:

$$\zeta(-1) = 1 + \frac{1}{2^{-1}} + \frac{1}{3^{-1}} + \frac{1}{4^{-1}} + \dots = 1 + 2 + 3 + 4 + \dots$$

Die ζ -Funktion ordnet der laufenden Variablen i mit dem reellwertigen ζ -Exponenten κ der Reihe nach die Anteile v_i zu. Mit dem ersten Funktionswert R_1 folgen daraus die hyperbolischen Funktionswerte R_i (Tab. 1):

$$R_i = R_1 \cdot v_i \Rightarrow v_i = \frac{1}{i^{\kappa}} \Rightarrow v_1 = \frac{1}{1^{\kappa}}, v_2 = \frac{1}{2^{\kappa}}, v_3 = \frac{1}{3^{\kappa}}, \dots, v_h = \frac{1}{h^{\kappa}}.$$

¹³ Vgl. Luderer, S. 80. [3]

i	-1,000	0,000	0,333	0,500	1,000	2,000
1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	2,000	1,000	0,794	0,707	0,500	0,250
3	3,000	1,000	0,693	0,577	0,333	0,111
4	4,000	1,000	0,630	0,500	0,250	0,062
5	5,000	1,000	0,585	0,447	0,200	0,040

Tabelle 1: Anteile v_i , $i = 1, 2, 3, 4, 5$ für einige Werte des ζ -Exponenten κ

Eine Induktion verallgemeinert den Ausdruck: Auf die verdoppelte Zählnummer i entfällt stets ein und dasselbe Vielfache des absoluten Anteils v , der Funktionswert ändert sich auf die Anteilskonstante s . Zu jedem v gehört eine positive reelle Zahl s , sodass für alle Argumente i und die Bestimmung des ζ -Exponenten κ gilt:

$$v_{2i} = s \cdot v_i = \frac{1}{(2 \cdot i)^\kappa} = \frac{1}{2^\kappa} \cdot \frac{1}{i^\kappa} = s \cdot v \Rightarrow s = 2^{-\kappa} \Rightarrow \kappa = -\frac{\ln 2}{\ln s}.$$

Die Abbildung der ζ -Aufwandfunktion mit den Logarithmen der Beziehung:

$$v_i = \frac{1}{i^\kappa} \Rightarrow \lg v_i = -\kappa \cdot \lg i,$$

gestattet aufgrund der Linearität zwischen den Größen, die als Leiter¹⁴ dienen sollen:

$$\eta = \lg v_i \quad \text{und} \quad \xi = \lg i,$$

eine einfache, für Auswertungen sehr zweckmäßige Darstellung auf doppelt logarithmischem Papier in einem kartesischen ξ - η -Koordinatensystem, die den linearen Verlauf ihrer Werte abbildet (Abb. 6). Die Achsen erhalten die Leitern und die Funktion geht in eine durch den Nullpunkt laufende Gerade mit dem Anstieg

$$-\kappa \text{ über: } \eta = -\kappa \cdot \xi.$$

Die ζ -Verteilung einer Menge M auf eine Anzahl m , $i = 1, 2, \dots, m$, besitzt den Ausdruck:

$$M = \frac{1}{1^\kappa} + \frac{1}{2^\kappa} + \frac{1}{3^\kappa} + \dots + \frac{1}{m^\kappa} = \sum_{i=1}^m v_i = \sum_{i=1}^m \frac{1}{i^\kappa}.$$

¹⁴ Die Funktionsleiter $\xi = \lg i$ entsteht auf den normalen ξ - η -Koordinatenachsen, indem Teilstriche mit den Ziffern $i = 1, 2, 3, \dots$ an die entsprechenden Stellen $\xi = \lg i$, $\eta = \lg v_i$ angebracht werden; Punkt $\xi = \eta = 0$ gehört zu den Werten $v = i = 1$.

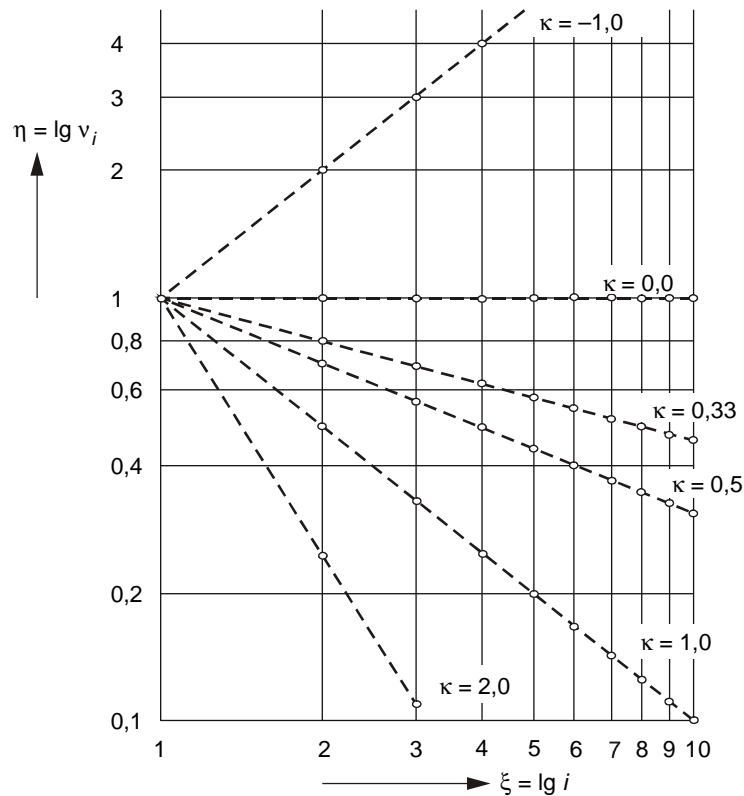


Abbildung 6: Hyperbolische Verteilungen auf doppelt logarithmischem Papier

Da für die Summe M kein geschlossener analytischer Ausdruck besteht, ist sie durch Integrale zu nähern. Für alle Werte des ζ -Exponenten $\kappa > 0$ streben die absoluten Anteile gegen $v \rightarrow 0$; sie verkleinern sich umgekehrt proportional zum Wert des Exponenten κ . Ihre Glieder werden durch Rechtecke mit der Basis 1 und Höhe v_i dargestellt, eingeschlossen durch die Kurven:

$$y = (x+1)^{-\kappa} \quad \text{und} \quad \bar{y} = x^{-\kappa} \quad \text{mit} \quad x = 1, 2, \dots \quad \text{für} \quad \bar{y}.$$

Es ergibt sich für die Summe folgender Algorithmus (Abb. 7):

$$\int_0^m \frac{dx}{(x+1)^\kappa} < \sum_{i=1}^m \frac{1}{i^\kappa} < 1 + \int_1^m \frac{dx}{x^\kappa}. \quad \text{Für } \kappa \neq 1 \text{ gilt } \rightarrow$$

$$\int_0^m (x+1)^{-\kappa} \cdot dx = \left[\frac{1}{1-\kappa} \cdot (x+1)^{1-\kappa} \right]_0^m = \frac{1}{1-\kappa} \cdot ((m+1)^{1-\kappa} - 1).$$

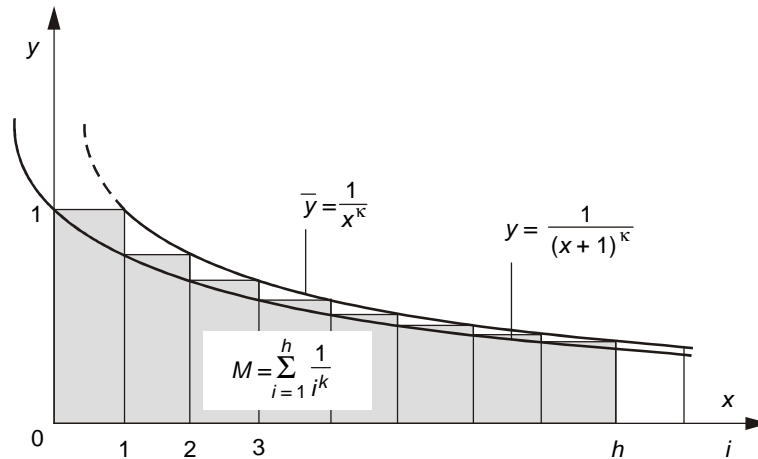


Abbildung 7: Grafik zur Näherung eines Summenwertes aus Integralflächen

Für die obere Schranke folgt dadurch:

$$1 + \int_1^m x^{-\kappa} \cdot dx = \frac{1-\kappa}{1-\kappa} + \frac{1}{1-\kappa} \cdot (m^{1-\kappa} - 1) = \frac{1}{1-\kappa} \cdot (m^{1-\kappa} - \kappa). \quad \text{Mit der Bedingung: } \kappa > 0,$$

gilt für die durch eine ζ -Verteilung verteilte Quantität M die Einschließung:

$$\frac{1}{1-\kappa} \cdot ((m+1)^{1-\kappa} - 1) < M < \frac{1}{1-\kappa} \cdot (m^{1-\kappa} - \kappa).$$

Als Näherung wird das arithmetische Mittel beider Schranken benutzt:

$$M = \frac{1}{2 \cdot (1-\kappa)} \cdot ((m+1)^{1-\kappa} + m^{1-\kappa} - 1 - \kappa).$$

Die obere Schranke liefert für die Summe M einen etwas genaueren Wert als die untere. Der Fehler Δ ist sicher negativ und kleiner als der halbe Wert der Abweichung der Schranken:

$$|\Delta| < \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1-\kappa} \cdot (m^{1-\kappa} - (m+1)^{1-\kappa} + 1 - \kappa) = \frac{1}{2} - \frac{(m+1)^{1-\kappa} - m^{1-\kappa}}{2 \cdot (1-\kappa)}.$$

Die hier nicht erörterte Reihenentwicklung des letzten Ausdrucks nach Potenzen von m^{-1} ermöglicht die Fehlerabschätzung:

$$|\Delta| < \frac{1}{2} - \frac{1}{2 \cdot m^\kappa}.$$

In den Unterlagen der deutschen Flugzeugindustrie der Jahre 1930 – 1956 fehlt der Bezug auf die ζ -Funktion, jedenfalls wurde auf sie nicht verwiesen.

Logarithmische Regressionsanalyse

Die Ausgleichsrechnung mit Daten der Flugzeugproduktion im Jahre 1958 war durch die logarithmische Umwandlung¹⁵ und der darauf beruhenden linearen Vorgehensweise wegen einfach. Dabei treten systematische Verzerrungen auf, die einer Glättung bedürfen: Bei kartesischer Approximation werden die absoluten Abstände zwischen (positiven) Regressions- und Funktionswerten minimiert, bei logarithmischer die relativen Abstände: Sie werden umso stärker bewertet, je kleiner die Funktionswerte sind. Das wirkt sich oft stark aus, wenn die Funktionswerte z.B. mit Mengen zu multiplizieren sind. Ist ein hoher Abstand der Fertigungszeit Δx_1 über einem kleinen Los t_1 eher zu vernachlässigen als ein geringer Abstand Δx_2 über einem großen t_2 ? Es geht um die Abwägung: $\Delta x_1 \cdot t_1 \approx \Delta x_2 \cdot t_2$, (Abb. 8).

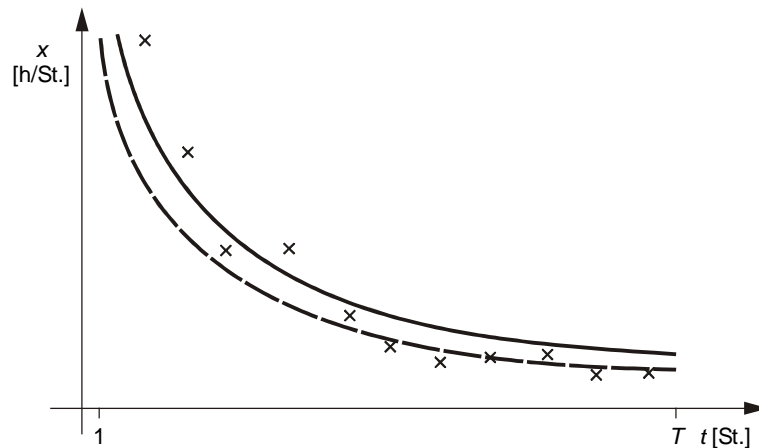


Abbildung 8: Unterschiede zwischen kartesischer (glatte Kurve) und logarithmischer (gestrichelte Kurve) Ausgleichsrechnung

Wie ist nun die Regressionsanalyse mit relativen Abständen zwischen Regressions- und Funktionswerten zu handhaben? Im Allgemeinen sei die Datenfolge $t_1, x_1, t_2, x_2, \dots, t_n, x_n$ und die Ausgleichsfunktion aus der einparametrischen Kurvenschar gegeben:

$$h_q = x, \quad q = t, \quad \kappa = \alpha \rightarrow x = f(t, \alpha).$$

Dann lautet die relative Abweichung des i -ten Regressionswertes vom Funktionswert, den eine Kurve der Schar liefert (Abb. 9):

$$\frac{x_i - f(t_i, \alpha)}{f(t_i, \alpha)} = \frac{x_i}{f(t_i, \alpha)} - 1.$$

¹⁵ Vgl. Oppitz 1974, S. 38 – 44. [9]

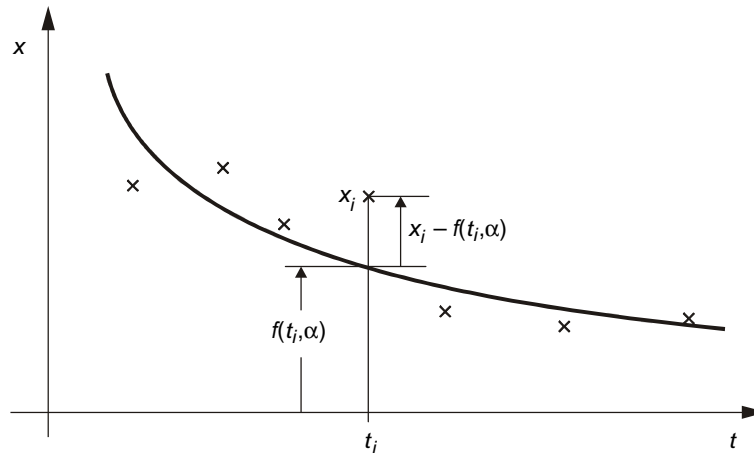


Abbildung 9: Relative und absolute Abweichung zwischen Regressions- und Funktionswerten

Unter der Annahme, dass die folgende Näherung gilt: $\frac{x_i}{f(t_i, \alpha)} \approx 1$, kann der Term:

$u - 1 \approx \ln u$, bekannter unter: $\ln(1 + h) \approx h$, für sehr kleine h ,

umso besser verwendet werden, je kleiner der Betrag von h ist. Für die obige Anwendung ist: $h = u - a$, zu setzen. Die relative Abweichung erhält dadurch den Term:

$$\ln\left(\frac{x_i}{f(t_i, \alpha)}\right) = \ln x_i - \ln f(t_i, \alpha).$$

Er ist positiv, wenn der Regressionswert x_i über dem Sollwert $f(t_i, \alpha)$ liegt, sonst negativ. Um das Vorzeichen auszuschalten, wird quadriert. Als Streuungsmaß des Punkteschwarms gegenüber der Funktionskurve wird die Summe $S(\alpha)$ der Quadrate der relativen Abstände zwischen Regressions- und Funktionswert betrachtet:

$$S(\alpha) = \sum_{i=1}^N (\ln x_i - \ln f(t_i, \alpha))^2.$$

Durch die passende Wahl des Parameters α ist der Ausdruck $S(\alpha)$ minimal zu gestalten:

$$S(\alpha) = \sum_{i=1}^N (\ln x_i - \ln f(t_i, \alpha))^2 \rightarrow \text{Min.} \quad (1)$$

Der Vergleich mit der bei gewöhnlicher Regressionsanalyse zu erfüllenden Bedingung

$$\sum_{i=1}^N (\ln x_i - \ln f(t_i, \alpha))^2 \rightarrow \text{Min.}$$

offenbart die Anwendung natürlicher Logarithmen auf die Regressions- und der Funktionswerte. Bei dieser *logarithmischen Regressionsanalyse* wird – wie gewöhnlich – die Lösung der Bedingung (1) als Nullstelle der ersten Ableitung der Funktion $S(\alpha)$ gefunden. Auf Grund der systematischen Abweichungen ist allerdings die Kettenregel zu berücksichtigen:

$$\frac{dS}{d\alpha} = -2 \sum_{i=1}^N \frac{\ln x_i - \ln f(t_i, \alpha)}{f(t_i, \alpha)} \cdot f_{\alpha}(t_i, \alpha).$$

Die Normalgleichung, gültig für den optimalen Wert α_0 des Parameters α , heißt dann

$$(2) \quad \sum_{i=1}^N \frac{\ln x_i - \ln f(t_i, \alpha_0)}{f(t_i, \alpha_0)} \cdot f_{\alpha}(t_i, \alpha_0) = 0.$$

Diese Forderung ist nicht an die Benutzung natürlicher Logarithmen gebunden, weil die Logarithmen verschiedener Systeme einander proportional sind. Zwischen dekadischen und natürlichen Logarithmen gilt die Beziehung:

$$\ln x = \frac{1}{M} \lg x \quad (M = 0,4343).$$

Der Faktor $1/M$ kommt in jedem Glied der Summe vor, die in Formel (2) die linke Seite darstellt. Durch Multiplikation mit M entsteht also die äquivalente Forderung:

$$(3) \quad \sum_{i=1}^N \frac{\lg x_i - \lg f(t_i, \alpha_0)}{f(t_i, \alpha_0)} \cdot f_{\alpha}(t_i, \alpha_0) = 0.$$

Wenn die Ausgleichsfunktion aus einer mehrparametrischen Schar ausgesucht wird, so liefern die gleichen Überlegungen ein System aus mehreren zu (3) analogen Normalgleichungen bei einer zweiparametrischen Schar $x = f(t, \alpha, \beta)$ etwa das System:

$$(4) \quad \begin{aligned} \sum_{i=1}^N \frac{\lg x_i - \lg f(t_i, \alpha_0, \beta_0)}{f(t_i, \alpha_0, \beta_0)} \cdot f_{\alpha}(t_i, \alpha_0, \beta_0) &= 0, \\ \sum_{i=1}^N \frac{\lg x_i - \lg f(t_i, \alpha_0, \beta_0)}{f(t_i, \alpha_0, \beta_0)} \cdot f_{\beta}(t_i, \alpha_0, \beta_0) &= 0. \end{aligned}$$

Die Normalgleichungen (4) werden am besten mit natürlichen Logarithmen besetzt.

ζ -Aufwandsfunktion

Die ζ -Aufwandsfunktion beschreibt die Abnahme des Aufwandes je Erzeugnis q im Anlaufzustand bis zur Sättigung, dem Übergang in den Serienzustand. Die Senkung der Fertigungszeit h_q verhält sich umgekehrt proportional zum Leistungszuwachs, beginnend mit der Schulung und dem Training der Mitarbeiter beim Musterbau, der Einarbeitung des Personals (Arbeiter, Konstrukteure, Materialwirtschaftler, Technologen usw.) bis zur laufenden Verbesserung der Arbeitsvorgänge durch technische Neuerungen im Serienzustand (Abb. 10).

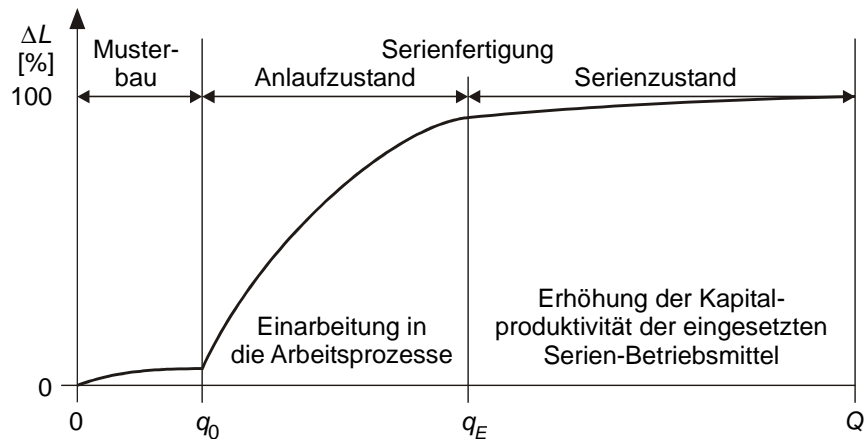


Abbildung 10: Leistungszuwachs ΔL beim Bau der Funktions- und Fertigungsmuster q_0 und der Fertigung der Serie Q unter besonderer Berücksichtigung der Anlaufserie q_E

Es erfolgen die Zuweisungen der Erzeugnisnummer q zur Zählnummer i : $q = i$, der Anlaufserie q_E zur Gliederanzahl m : $q_E = m$, der Aufwandsgröße h_q zum Glied v_i : $h_q = v_i$, und die Einführung der Teilsumme M der Dirichlet-Reihe. Aus ihr wird die Aufwandsabnahme A_A errechnet. Der Aufwandsfaktor h_1 wird projektiv oder regressiv bestimmt. Die ζ -Aufwandsfunktion, die Aufwandsabnahme A_A im Anlaufzustand und die Senkungsrate s lauten:

$$h_q = \frac{h_1}{q^\kappa} \rightarrow A_A = \sum_{q=1}^{q_E} h_q = h_1 \cdot \sum_{q=1}^{q_E} \frac{1}{q^\kappa} \rightarrow M = \sum_{q=1}^{q_E} \frac{1}{q^\kappa} \rightarrow h_1 = \frac{A_A}{M}, \quad s = 2^{-\kappa}.$$

Je stärker die Fertigung technisiert ist, umso höher sind die Kapitalkosten und desto niedriger die Werte des ζ -Exponenten κ , des Aufwandsfaktor h_1 und die Senkungsrate s (Tab. 2).

Technisierung	h_1	κ	s [%]
Automatisiert	1	0,00 ... 0,07	0,00 ... 95,26
Mechanisiert	10	0,07 ... 0,32	95,26 ... 80,11
Handwerklich	100	0,32 ... 0,74	80,11 ... 59,87

Tabelle 2: Maßstabsgrößen für den Aufwandsfaktor h_1 , ζ -Exponenten und Anteilfaktor s

Während der Anlaufdauer vermindert sich mit dem Abbau personeller (Tab. 3), ausrüstungstechnischer (Tab. 4) und werkstofflicher Anlaufursachen (Tab. 5) der überhöhte Stückaufwand ebenso wie die Fehlerhäufigkeit¹⁶.

Störungsquellen	Ausschaltungsfaktoren
Verzögerte Einarbeitung in Arbeitsgänge, fehlerhafte Werkstückbearbeitung, unsachgemäßer Umgang mit Betriebsmitteln, falsche Interpretation der technischen Dokumentation, organisatorische und informationstechnologische Mängel	Fertigungsreife Konstruktion, optimale Informationstechnologie [IT] und Fertigungsorganisation, Verbesserung der Fertigkeiten und Disponibilität des Personals durch Training des Könnens und der Fähigkeiten

Tabelle 3: Personelle Anlauf- und Ausschaltungsfaktoren

Störungsquellen	Ausschaltungsfaktoren
Erprobung neuer und Benutzung anderer als technologisch vorgesehener Betriebsmittel, Hand- statt Maschinenfertigung, fehlende oder mangelhafte Betriebsmittel und dadurch verursachte Ausweichlösungen, ungenügende oder mangelhafte Hard- und Software besonders in dispositiven Ebenen	Erprobung neuer oder Benutzung anderer Betriebsmittel ¹⁷ , Vorrichtungen, Werkzeuge, Lehren und Software, Modernisierung alter Betriebsmittel, Mehrstellenbedienung und Einsatz CNC-gesteuerter Betriebsmittel, Anwendung ausgereifter IT-Lösungen

Tabelle 4: Anlauf- und Ausschaltungsfaktoren bei Technischen Ausrüstungen (Betriebsmitteln)

¹⁶„CARDIOVASC: In mehreren Studien war die Mortalität nach Bypass Operationen umso niedriger, je mehr solcher Eingriffe in einer Klinik bzw. von einem Arzt vorgenommen werden. Einer neuen Untersuchung zufolge gilt dieser Zusammenhang sogar für Patienten mit niedrigem Risiko. ... Wäre es besser, Bypass Operationen nur noch in großen Kliniken und von erfahrenen Kardiologen vorzunehmen?“ „Tillmanns: Generell halte ich eine gewisse Mindestmenge an Bypass Operationen pro Jahr für sinnvoll. Es ist sicherlich essenziell, dass der Operateur in Übung bleibt, dass er wichtige Handgriffe unbewusst durchführen kann und den Kopf frei hat für den Verlauf der Operation.“ Tillmanns, S. 784 ff. [15]

Störungsquellen	Ausschaltungsfaktoren
Nicht qualitäts- bzw. seriengerechte Werkstoffe, wie z.B. Maß-, Struktur-, Farbfehler, Lagerschäden, Sandstellen, Lunker, Härte, oder anderer physikalischer, chemischer u.a. Eigenschaften als technologisch festgelegt, Angleichung von Maßabständen durch Sortimentsbeschränkung, Ausschuss, Nacharbeit und Garantieleistung	Mehr Wiederhol- und standardisierte Bauteile, Einsatz seriengerechten Materials, gründlichere Wareneingangsprüfung, technologisch begründete Material-Verbrauchs-Normen, sachgemäße Lagerung, Vermeidung von Transportschäden, Ausgliederung der Herstellung materialintensiver Einzelteile und Baugruppen

Tabelle 5: Anlauf- und Ausschaltungsfaktoren bei Werkstoffen

In der *Baumusterplanung* werden für die Seriengröße Q mit den projektiv bestimmten Aufwandsfaktor h_1 und ζ -Exponenten κ (Tab. 6) die *Fertigungszeiten*, mit dem Zeitbudget Z und der Anlaufzeitssumme A wird die *Anlaufdauer* T_A berechnet¹⁸ [SDA] (Abb. 11)¹⁹:

$$h_q = \frac{h_1}{q^\kappa}, \quad 1 \leq q \leq Q, \quad [h_1, \kappa] \equiv \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_1}{q_i^\kappa} - h_{q_i}^* \right)^2 \rightarrow \text{Min!} \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_1}{q_i^\kappa} - h_{q_i}^* \right)^2},$$

$$A = h_1 \cdot \sum_{q=1}^Q \frac{1}{q^\kappa}, \quad D_A = 12 \cdot \frac{A}{Z}, \quad A_A = \sum_{q=1}^Q \frac{h_1}{q^\kappa} - Q \cdot t_N, \quad A_N = Q \cdot t_N.$$

Zielgröße	Formel	Variable
Anlaufserie q_E	$[q_E] \equiv \left[h_1 \cdot \frac{(q_E + 1)^{1-\kappa} + q_E^{1-\kappa} - 1 - \kappa}{2 \cdot (1 - \kappa)} = Z \right]$	Anlaufserie q_E , Anteilsfaktor s , Aufwandsfaktor
Aufwandsfaktor h_1	$h_1 = t_N \cdot q_E^\kappa$	h_1 , Normalzeit t_N ,
ζ -Exponent κ	$\kappa = -\frac{\ln s}{\ln 2}$ oder $\kappa = \frac{\ln h_1 - \ln t_N}{\ln q_E}$	Zeitbudget Z , ζ -Exponent κ

Tabelle 6: Einige Formeln der Aufwandsfunktion

¹⁷*Montage*: Vorbereitung der Inbetriebsetzung durch Einzelfunktionsproben. *Inbetriebsetzung*: Komplexe Funktionsproben mit und ohne Last bzw. Medium; Probetrieb inkl. Leistungsnachweis, der sich je nach Vereinbarung auch auf die Dauerbetriebsleistung beziehen kann. *Dauerbetrieb*: Anlauf der Anlage bis zum Erreichen der projektierten Leistung.

¹⁸Die computergestützte OR_MAT-Lösungssuche beruht auf dem Term „ $[h_1, \kappa]$ “. Er wird in analoger Form generell angewendet, taucht also mit anderen Lösungsvariablen in OR_MAT-Ausdrücken auf.

¹⁹ Vgl. Oppitz 1995, S. 22 ff. [11]

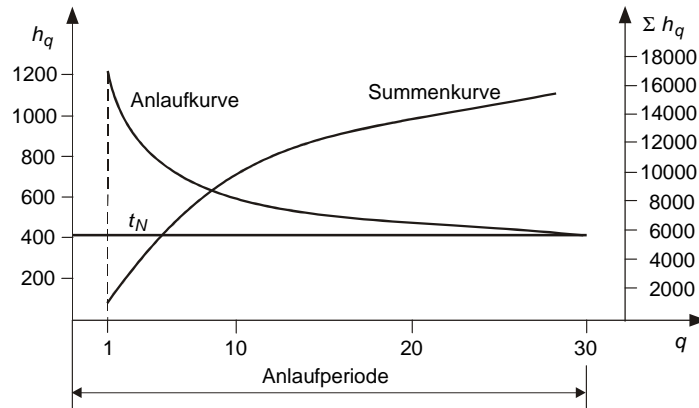


Abbildung 11: Kurve und Summenkurve der ζ -Aufwandsfunktion über den Zählnummern

Zur Plankontrolle des Fertigungsprozesses werden mit abgerechneten Fertigungszeiten²⁰ (Tab. 7, Sp. 4 und 8) abgeschätzt: Aufwandsfaktor h_1 , ζ -Exponent κ , Anlaufserie q_E , Summendifferenz A_A , Fertigungs- h_q und Normalzeit t_N . Die ζ -Kurven (Abb. 12) und projektiven (hochgestelltes p) Fertigungszeiten (Tab. 7, Sp. 3 und 7) werden ausgegeben.

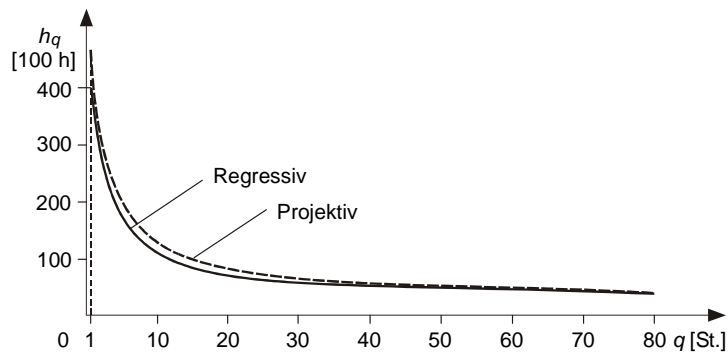


Abbildung 12: Kurven der ζ -Aufwandsfunktion, geplant und abgerechnet

i	q	h_q^p	h_q^*	h_q	i	q	h_q^p	h_q^*	h_q
1	5	200267	161500	161514	6	35	68409	66200	60180
2	9	144776	126400	119867	7	45	59548	56700	52975
3	12	123518	96000	103588	8	55	53304	49100	47847
4	17	101914	81300	86809	9	65	48608	39800	43959
5	25	82371	73000	71382	10	75	44916	39200	40881

Tabelle 7: Stückzeiten der Serie h_q [h/St.]

²⁰ IL 14-Daten, vgl. Oppitz 1960, Blatt 3. [7]

Aufwandsfaktor, projektiv	h_1	=	486900	h/St.
ζ -Exponent, projektiv	κ	=	0,55200	
Serie	Q	=	80	St.
Zeitbudget	Z	=	2024869	h/a

Fertigungszeit, projektiv	A	=	6939614	h
Anlaufaufwand	A_A	=	2700055	h
Normalaufwand	A_N	=	3991200	h
Anlaufdauer	D_A	=	41	Mon.
Aufwandsfaktor	h_1	=	365456	h/St.
ζ -Exponent	κ	=	0,50735	
Anzahl der Nachkalkulationswerte	n	=	10	
Standardabweichung	σ	=	5063	h/St.

ζ -Aufwandsexponentialfunktion

Operativtechnologien entscheiden über die durch fehlendes Werkzeug, überdimensioniertes Material usw. verursachten Zeitzuschläge auf die Normalzeit in den Arbeitsplänen. Dabei stellte sich häufig heraus, dass manche Fertigungsprozesse veraltet waren. Das führte zur Verbesserung der Serientechnologie. Bei der Baumusterplanung war also zu berücksichtigen, dass „Sparen durch Rationalisierung“: $q \in [1, Q]$, zum „Lernen durch Praxis“: $q \in [1, q_E]$, gehört und auch im Serienzustand den Aufwand durch produktivere Ausrüstungen, verbessertes Material, wirkungsvollere Organisation und verfeinerte Technologien verringert. Die Interaktionen zwischen der produzierten Menge und der Verausgabung an Fertigungszeit: sind ziemlich einfach durch Differentialgleichungen [DGL] auszudrücken:

- Rationalisierungswirkung proportional ε zur Menge:

$$-\frac{dh}{h} = \varepsilon \cdot dq, \quad q \in [1, Q],$$

- Lernwirkung proportional κ zur anteiligen Menge:

$$-\frac{dh}{h} = \kappa \cdot \frac{dq_M}{q_M}, \quad q_M \in [1, q_E].$$

Das Aufwandsverhalten bei der Wiederholung gleicher Tätigkeiten beschreibt in der Einheit der ζ - und exponentiellen Aufwandsfunktion die ζ -Aufwandsexponentialfunktion:

$$-\frac{dh_q}{h_q} = \varepsilon \cdot dq + \kappa \cdot \frac{dq_M}{q_M} \begin{cases} q \in [1, Q] \\ q_M = \text{Min}_q \{q, q_E\} \end{cases} \rightarrow h_q = h_1 \cdot \frac{e^{\varepsilon \cdot (1-q)}}{q_M^\kappa}.$$

Zur Beurteilung der Wettbewerbsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit interessieren das Erzeugnis q_w , bei dem die (vermutete) Fertigungszeit h_w des Weltmarktführers erreicht wird (Abb. 13), und das Erzeugnis q_0 für die Fertigungszeitsumme $H_0 = q_0 \cdot h_w$. Bis dahin: $q \in [1, q_0]$, tritt Verlust, danach proportional mit der Stückzahl steigender Gewinn ein [SDD]:

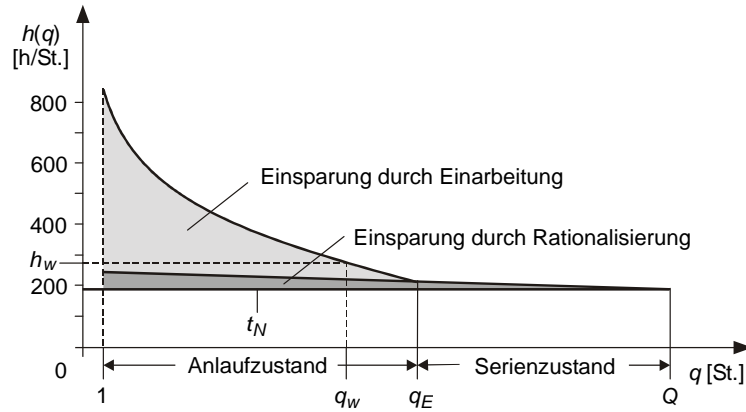


Abbildung 13: Abnahme des Aufwands durch Lernen und Rationalisieren

$$h_q = h_1 \cdot \frac{e^{\varepsilon(1-q)}}{q_M^\kappa}, \quad [h_1, \varepsilon, \kappa] \equiv \sum_{i=1}^n (h_{q_i} - h_i^*)^2 \rightarrow \text{Min!} \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-3} \cdot \sum_{i=1}^n (h_{q_i} - h_i^*)^2},$$

$$[q_w] \equiv h_q(q_w) = h_w, \quad [q_0] \equiv H_0 = q_0 \cdot h_w = \sum_{q=1}^{q_0} h_q, \quad t_N = hq(q_E).$$

Die Ausgleichsrechnung beruht auf einer Stichprobe des Aufwands h_q (Tab. 8) und dem Aufwandsfaktor h_1 . Rationalisierungsexponent ε , ζ -Exponent κ und Anlaufserie q_E werden approximiert, aus der Weltmarkt-Vergleichszeit sind die Vergleichsmenge q_w , die Nullmenge q_0 zu bestimmen; eine Werteliste der Fertigungszeiten ist auszugeben (Tab. 9).

i	q	h_q^* [h/St.]	i	q	h_q^* [h/St.]
1	5	161500	6	35	66200
2	9	126400	7	45	56700
3	12	96000	8	55	49100
4	17	81300	9	65	39800
5	25	73000	10	75	39200

Tabelle 8: Stückzeiten der Serie

Seriengröße	Q	=	80	St.
Stückzeit des Weltmarktes	h_W	=	98990,00	h/St.
Anlaufserie	q_E	=	16	St.
Fertigungszeitsumme	H_0	=	1583840,00	h/St.
Rationalisierungsexponent	ε	=	0,01377	
Aufwandsfaktor	h_1	=	352935,33	h/St.
ζ -Exponent	κ	=	0,44417	
Stichprobenumfang	n	=	10	
Wettbewerbliche Serienstückzahl	q_W	=	43	St./Serie
Technologische Nullstückzahl	q_0	=	13.	St.
Standardabweichung	σ	=	3703,69	h/St.
Normalzeit	t_N	=	83784,49	h/St.

Die Standardabweichung der ζ -Aufwandsexponentialfunktion h_q : $\sigma = 3703$ h/St., zeigt eine bessere Anpassung an die Ist-Zeiten h_q^* als die ζ -Aufwandsfunktion h_q^e : $\sigma = 5063$ h/St.

i	q	h_q^e	h_q^*	h_q	i	q	h_q^e	h_q^*	h_q
1	5	164807	161500	161514	6	35	64257	66200	60180
2	9	119086	126400	119867	7	45	56184	56700	52975
3	12	100165	96000	103588	8	55	49125	49100	47847
4	17	81823	81300	86809	9	65	42953	39800	43959
5	25	73490	73000	71382	10	75	37557	39200	40881

Tabelle 9: Übersicht der berechneten und Ist- Fertigungszeiten h_q [h/St.]

ζ -Durationsfunktion

Durchlaufzeit, Entwicklungsdauer, Projektdauer, Prozesszeit²¹, Zeitstruktur der Fertigung²² usw., bezeichnen Fristen bestimmter Vorgänge mit einem Start- und Abschlusszeitpunkt als Randwerte. Ihre Zeitelemente sind Träger wichtiger, die Prozesseigenschaften bestimmende Ereignisse. Wie schon bei den Fertigungszeiten wurde in der deutschen Flugzeugindustrie die hyperbolische Senkung der Durchlaufzeiten bei der Produktionseinführung neuer Serien angewendet. Es stellt sich eine gewisse Proportionalität zwischen Anlaufaufwand und längeren Durchlaufzeiten heraus, wie u.a. die Plan- und Ist-Durchlaufzeiten zeigen²³ (Abb. 14).

Die ζ -Durationsfunktion beschreibt die Abnahme der Durchlaufzeit mit den Parametern: Durchlaufzeit D_q , Durationskonstante t_0 , Zählnummer q und

²¹ Prozessdauer bezeichnet im Allgemeinen die Zeitspanne eines Gerichtsverfahrens.

²² Vgl. Oppitz 1995, S. 607 ff. [11]

²³ IL 14 nach Junkers-Vorlagen. Vgl. Oppitz 1960, Blatt 9 (Teilefertigung), Blatt 10 (Helling-Liegezeit). [7]

Durationsexponent λ . Die Durationskonstante t_0 bestimmt das Ausgangsniveau der Durchlaufzeit, der Durationsexponent λ den Anteilfaktor der Abnahme der Durchlaufzeit.

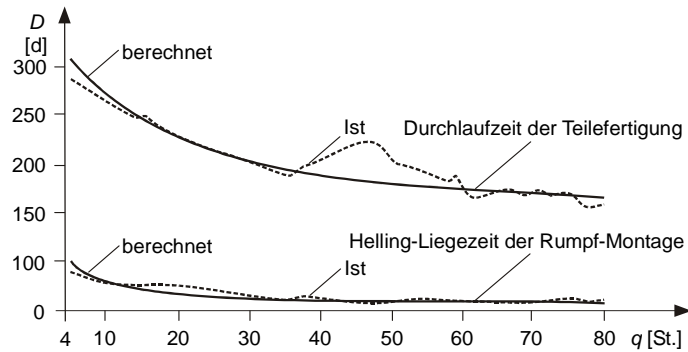


Abbildung 14: Durchlaufzeiten einiger Baugruppen der IL 14

Die Schätzung ihrer Werte erfolgt durch eine Regressionsanalyse mit Angabe der Standardabweichung σ [SDC]:

$$D(q_i) = \frac{t_0}{q^\lambda}, \quad [\lambda, t_0] \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^n (D(q_i) - D_i^*)^2} \rightarrow \text{Min!}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^n (D(q_i) - D_i^*)^2}$$

Für die IL 14-Fertigung liegen Plan- und Ist-Durchlaufzeiten ab der Einsteuerung der Einzelteile bis zur Auslieferung aus der Endmontage an die Flugerprobung vor²⁴ (Tab. 10). Die ζ -Durationsfunktion wird aus den Ist-Daten regressionsanalytisch ermittelt.

Q	Technologie	Funktion	Ist
	D_P [d]	D_F [d]	D_I [d]
8	480	470	480
10	437	434	442
15	357	375	378
20	312	337	338
30	325	292	288
50	248	242	236
56	225	233	225

Tabelle 10: Technologische, geplante (Funktion) und abgerechnete (Ist) Durchlaufzeiten

²⁴ Vgl. Oppitz 1960, Bl. 9. [7]

Normalduration	D	=	225	d
Seriengröße	Q	=	80	St.

Durationsexponent	λ	=	0,36130	
Nachkalkulationsdaten	n	=	7	
Standardabweichung	σ	=	21,35	d
Durationskonstante	t_0	=	996,67	d

Erkenntnislage

„Lernen durch Praxis“, ein häufig auftretender Einarbeitungsvorgang, vermindert bis zum Rationalisierungspunkt q_E , t_N den Lernaufwand. Danach ist die seriengerechte Bereitstellung der Betriebsmittel, des Materials usw. gewährleistet, die Lernwirkung zu vernachlässigen und die Einarbeitung des Personals in Konstruktion, Technologie, Fertigung und Qualitätsprüfung weitgehend abgeschlossen. Zu Fertigungsbeginn liegt eine Serientechnologie mit sogenannten Normalzeiten als Vorgabe für die Bemessung der Arbeitsleistungen vor. Die zusätzlich der Einarbeitung wegen vergebenen Zeitzuschläge fordert der betreffende Facharbeiter bei seinem zuständigen Operativtechnologe an, dieser legt die Zeitzuschläge fest und vermerkt dazu auf den technologischen Unterlagen die Ursache (z.B. Materialmängel), den Urheber (z.B. Konstruktion, Fehler in der Materialliste), die betreffende Kostenstelle (z.B. Zuschneiderei) und den anfordernden Mitarbeiter (z.B. M. Müller). Diese Zuschlagsdaten werden gründlich bis hin zur Werksleitung ausgewertet und bei künftigen Baumusterplanungen berücksichtigt.

„Sparen durch Rationalisierung“ beschreibt die allgemeine Aufwandssenkung i.d.R. durch Erhöhung der Kapitalproduktivität, bei der die Normalzeit proportional zur absolut wachsenden Stückzahl relativ verringert wird. In diesen Fällen wird der jeweilige Arbeitsplan verändert, die vorgegebene Normalzeit vermindert und die Einsparung in der Datenbank der Normalzeiten abgespeichert.

Die systematische Erfassung und Vorhersage der Wirkungen des „Lernens“ und „Rationalisierens“ gewinnt zunehmend an Bedeutung in der Unternehmensführung. Die wachsenden informationstechnologischen Grundlagen der Unternehmensführung erzwingen geradezu sowohl die Algorithmisierung der Prozessinteraktionen und die statistische Aufbereitung der Prozessdaten als auch die darauf beruhende Entscheidungsfindung.²⁵ Aufbauend auf der hohen Organisations- und Plansystematik industrieller Fertigung war deren mathematischer Grundlegung höchste Aufmerksamkeit zu widmen. Bezogen auf die Senkungen der Fertigungszeiten war es geboten, die ζ -Aufwandsexponentialfunktion, ζ -Aufwandfunktion und ζ -Durationsfunktion zu entwickeln. Sie erfassen auf der

²⁵ „Die Betriebswirte müssen mehr Höhere Mathematik lernen, wenn sie nicht einen wesentlichen Teil ihres Gebietes an die Techniker oder Mathematiker abtreten wollen.“ Bronner, S. 80. [1]

geistigen Grundlage der sog. „Lernkurve“ die Produktivitätswirkungen bei der Einarbeitung des Personals in neue Leistungsvorgänge und die Kapitalisierungseffekte.

Zur Qualität künftiger Planungen und Vorgaben gehören u.a. „Kenntnisse über Erfahrungen, die bei der Entwicklung, Realisierung und Nutzung ähnlicher Objekte gesammelt wurden u.v.a.m.“²⁶ Das geschieht einerseits mit der Entwicklung der mathematischen Modelle in einer deduktiven Form aufgrund erkannter Gesetzmäßigkeiten und andererseits durch sorgsame Aufbereitung numerischer Daten über die Anlaufzeiten durch Auswertung der Zeitzuschläge und die in sinkenden Normalzeiten sichtbar werdenden Zeiteinsparungen durch höhere Kapitalproduktivität auf induktive Art und Weise, um Prozessenerfahrungen systematisch für neue Vorhaben planwirksam anzuwenden.

Sängers Verdienst besteht im nachträglichen Anstoß durch seine Veröffentlichung in der Weltluftfahrt 1954, dass bei Serienproduktionen eine von der aufgelegten Stückzahl abhängige Senkung der Fertigungskosten, vor allem der Fertigungszeiten zu verzeichnen ist. Implizit, um den schönen mathematischen Ausdruck zu gebrauchen, hat er verdeutlicht, dass diese Erkenntnisse aus dem Organisationsstand der deutschen Industrie stammen, wenn er in seinem Diagramm die „V1“ einzeichnet. In Abwandlung der Aussage zum „sog. Boston-Effekt“ hat Sängers veröffentlichtes Diagramm (1954) „einen festen Platz im analytischen Instrumentarium der strategischen Planung und (sollte) gerne als eines der ehernen Gesetze der Wirtschaft bezeichnet (werden).“²⁷ Der „Eugen-Sänger-Impuls“ ist eine vom Inhalt sehr wichtige, wenn auch vom Umfang her ziemlich knappe Erweiterung seiner schöpferischen Leistungen, die durch die Besetzung des ersten deutschen Lehrstuhles für Raumfahrttechnik 1963 an der TU Berlin, durch Ehrenmitgliedschaften in neun astronautischen Gesellschaften verschiedener Länder und zahlreiche Auszeichnungen Sängers gewürdigt worden sind.²⁸

Danksagung

Beim Lektorat des Beitrages hat mich Herr Kollege Nollau, emeritierter Mathematik-Professor der TU Dresden, mit wertvollen Hinweisen besonders zu den mathematischen Abbildungen der behandelten Interaktionen unterstützt. Dafür bedanke ich mich sehr herzlich.

²⁶ Habiger, S. 85. [2]

²⁷ <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/boston-effekt/boston-effekt.htm>. Entnommen 31.01.2013.

²⁸ Vgl. Münzberg, S. 141/142. [4]

Literatur

- [1] Bronner A.: Werkstatttechnik, Heft 2/1966
- [2] Habiger E.: *Der Entwurf von Systemen*. In: Schriften der Sudetendeutschen Akademie der Wissenschaften und Künste, Band 25, München: 2004
- [3] Luderer B., Nollau V., Veters K.: *Mathematische Formeln für Wirtschaftswissenschaftler*. Leipzig: 1998
- [4] Münzberg H.G.: *Physikalische Grundlagen und Konzepte von Flugtriebssystemen*. In: Schriften der Sudetendeutschen Akademie der Wissenschaften und Künste, Band 5, München: 1984
- [5] Nietzsche F.: *Vermischte Meinungen und Sprüche*. In: Menschliches, Allzumenschliches II, Werke 4. Band, 1877/79. Leipzig: 1919
- [6] Oppitz V.: *Warum fliegen Flugzeuge*. In: Zeit im Bild, Serie „Wissenschaft und Technik“, 1956/Heft 4.
- [7] Oppitz V.: *IL 14p, Technische Daten. VEB Flugzeugwerke Dresden, Technologische Typenleitung*. In: Kennzifferausarbeitung aus der Produktion des Baumusters IL 14p. 18.03.1960 (Privatbesitz Oppitz).
- [8] Oppitz V.: *Betrachtungen zum Aufbau von mathematisch begründeten Prognosemodellen*. 64 Seiten. Herausgeber: Institut für Rationalisierung und Organisation, Dresden. Broschüre Nr. 7/1967
- [9] Oppitz V.: *Optimierter Programmablauf bei logarithmischer Regressionsanalyse durch Ausgleichsfunktionen mit Exponentialteil und additivem Glied*. In: Rechentechnik/Datenverarbeitung. 11. Jahrgang, Juni 1974, Heft 6
- [10] Oppitz V.: *Grundlagen und ausgewählte betriebswirtschaftlich-mathematische Aspekte der Erzeugnisplanung in metallverarbeitenden Betrieben mit Serienfertigung*. Fakultät für Gesellschaftswissenschaften des Wissenschaftsrates der Technischen Universität Dresden. Dissertation – Promotionsordnung B – Tag der Einreichung: 15. März 1977.
- [11] Oppitz V. 1995: *Gabler Lexikon Wirtschaftlichkeitsrechnung*. Wiesbaden: 1995
- [12] Oppitz V. 2011/1: *Betriebsökonomisches Lexikon: Unternehmensstatistik*. Berlin: 2012
- [13] Oppitz V. 2011/2: *Betriebsökonomisches Lexikon: Wirtschaftsmathematik*. Berlin: 2012
- [14] Sänger E.: *Fertigungskosten von Lufifahrtgerät*. In: Weltluftfahrt 1954
- [15] Tillmanns H.: Gespräch mit CARDIOVASC. *Circulation* 2004;110