

EIN BEITRAG ZUR QUANTIFIZIERUNG DER EINÜBUNG



# Ein Beitrag zur Quantifizierung der Einübung

VON DER EIDGENÖSSISCHEN  
TECHNISCHEN HOCHSCHULE IN ZÜRICH

zur Erlangung der Würde eines  
Doktors der technischen Wissenschaften genehmigte

PROMOTIONSARBEIT

vorgelegt von  
THEODOR FÄSSLER  
Dipl. Maschineningenieur ETH  
von Unteriberg (Sz)

Referent: Herr Prof. W. F. Daenzer  
Korreferent: Herr Prof. Dr. A. Linder

## INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung . . . . .	1
2	Bisherige Arbeiten und Erkenntnisse . . . . .	2
2.1	Elementarbewegungen . . . . .	2
2.2	Arbeitsgang . . . . .	2
2.3	Fertigprodukt . . . . .	3
2.4	Zusammenfassung . . . . .	4
3	Problemstellung . . . . .	4
4	Messung . . . . .	4
4.1	Wahl der Betriebe . . . . .	4
4.2	Arbeiter- und Arbeitscharakteristiken . . . . .	5
4.3	Gegenüberstellung der gemessenen Arbeiten . . . . .	7
4.4	Meßmethoden . . . . .	7
5	Grundsätzliches zur Auswertung . . . . .	11
5.1	Rechenprinzip . . . . .	11
5.2	Rechenprogramm . . . . .	12
5.3	Gliederung der Analyse . . . . .	12
6	Aufwandsverlauf während des Arbeitstages . . . . .	13
6.1	Voruntersuchung . . . . .	13
6.2	Aufwandsverlauf während der Arbeitszeit . . . . .	14
6.3	Einfluß von Arbeitsunterbrüchen . . . . .	21
7	Aufwandsverlauf innerhalb eines Auftrages . . . . .	22
7.1	Voruntersuchung . . . . .	22
7.2	Linearität der doppelten log-Regression . . . . .	23
7.3	Zusammenhänge bei Wiederholungen . . . . .	24
7.4	Abhängigkeit der Einübung von Person und Arbeitsart . . . . .	25
8	Aufwandsverlauf über identische Aufträge . . . . .	29
8.1	Die Einflußkomponenten . . . . .	29
8.2	Schätzung des Ablauftrends . . . . .	30
9	Zusammenfassung . . . . .	32

## 1 EINLEITUNG

Jedermann weiß aus persönlicher Erfahrung, daß sich das Verhältnis Aufwand : Arbeitseinheit bei sich wiederholender Arbeitsverrichtung verändert. Aufwand kann sich in diesem Zusammenhang auf menschliche Arbeitsenergie, Konzentration, Geschicklichkeit, Dauer usw., oder auch auf verschiedene solcher Elemente zusammen beziehen. Unter Arbeitseinheit ist grundsätzlich die menschliche Arbeitsleistung zu verstehen.

Der Momentanwert oder der Änderungsverlauf dieses Verhältnisses resultiert aus dem Zusammenwirken mehrerer Einflußfelder mit unterschiedlicher Wirkstärke und -richtung.

Während physiologische und psychologische Umwelteinflüsse mehr oder weniger konstante Einwirkung haben, verursachen zunehmende Einarbeitung, Übung und Gewöhnung eine Abnahme, demgegenüber Abspannung, Ermüdung und Monotonie eine Zunahme des spezifischen Aufwandes. Wird der Verlauf über eine größere Anzahl von Arbeitsgangwiederholungen beobachtet, zeigt sich erfahrungsgemäß eine Abnahme des Aufwandes. Da sich diese Erscheinung nur durch ein Übergewicht der Übungseinflüsse erklären läßt, wird die resultierende Aufwandreduktion gemeinhin als Übungscharakteristik bezeichnet.

Die Betriebswissenschaft befaßt sich vornehmlich mit der quantitativen Erfassung und Erforschung der Gesetzmäßigkeiten der Betriebsdynamik. In dieser Sicht ist die Kenntnis der erwähnten Zusammenhänge von großer Bedeutung und hat in Fachkreisen schon früh auch entsprechend Beachtung gefunden.

Interessieren sich Psychologie und Physiologie an diesen Problemen vor allem für den Verlauf der erwähnten Teilelemente, ist in der Betriebswissenschaft das resultierende Verhalten des Aufwandes je Arbeitseinheit von Belang.

Der Erfolg einer Betriebsführung hängt weitgehend vom genauen Funktionieren der Vorkalkulation, des Zeitvorgabewesens und der Produktionsplanung ab, das heißt daß die vorausgesagten Sollwerte möglichst genau mit den Istwerten übereinstimmen müssen. Die zwangsläufig auftretenden Differenzen sind die Folge zufälliger und systematischer Nebeneinflüsse, die bei der Bestimmung der Sollwerte nicht berücksichtigt wurden. Um diese Differenzen zu minimalisieren, trachtet nun die Betriebspraxis, die systematischen Nebeneinflüsse in der Vorhersage zu erfassen. In diesem Bestreben ist die quantitative Kenntnis des Einübungsverlaufes auch für sie von großer Bedeutung.

Der Aufwand an Arbeitsenergie, Konzentration, Geschicklichkeit usw. kann mit besonderen Hilfseinrichtungen gemessen werden. Da der Mensch aber je Zeiteinheit nur

eine beschränkte Menge dieser Aufwände leisten kann, muß sich deren Summe im Zeitaufwand pro Arbeitseinheit zeigen. Diese Relation erlaubt somit eine eindeutige und in der Praxis durchführbare Messung.

Da die menschliche Arbeit nicht einwandfrei erfaßbar ist, andererseits aber eine enge Verbindung zur Sachleistung besteht, ist es verantwortbar und zweckmäßig, die Aufwanddauer auf das Produkt der menschlichen Arbeit (Menge, Stückzahl usw.) zu beziehen.

In Anbetracht dieser Umstände und Gegebenheiten sowie im Hinblick auf die Interessen der Praxis wird unter Einübung folgender Zusammenhang verstanden: Verlauf des Zeitaufwandes je produzierte Mengeneinheit in Abhängigkeit der Wiederholung.

Betrieblich ist es zweckmäßig, die Einübung nach der Größenordnung der Bezugseinheiten und Stadien zu gliedern.

Unter der Dimension der Bezugseinheit ist zu verstehen:

1. Elementarbewegung
2. Arbeitsgang
3. Fertigprodukt

1 und 2 lassen sich in folgende Stadien trennen:

1. Lernen der prinzipiellen Arbeitstechnik (Lehr- und Anlernzeit)
2. Einarbeiten nach Situationsveränderungen bei grundsätzlich gleichen Arbeitsverfahren (verschiedene Arbeitsobjekte und Aufträge)
3. Verlauf innerhalb periodischer Zeitabschnitte bei gleichbleibender Arbeitssituation (zum Beispiel Tages- und Wochenverlauf).

In der Praxis treten die aufgezählten Elemente nicht einzeln, sondern miteinander verknüpft und zum Teil überlagert auf. Je nach Aufgabenbereich interessieren sich die verschiedenen Betriebsinstanzen für ein oder mehrere Elemente obiger Zusammenstellung (Tabelle 1)

Funktionsstelle	Dimension	Stadium
Zeitstudie .....	1, 2	1, 2, 3
Arbeitsstudie .....		
Zeitvorgabe .....		
Kalkulation .....	2, 3	
Produktionsplanung .....	3	1, 2
Arbeitsverteilung (Meister) .	2	1, 2, 3
Ausbildung .....	1, 2	1

*Tabelle 1*

Der resultierende Einübungsverlauf wird in den drei Bezugseinheitsgruppen unterschiedlich zum Ausdruck kommen: Das Fertigprodukt entsteht aus einer Vielzahl von Arbeitsgängen und diese wiederum aus einer Menge von Elementarbewegungen.

Resultiert nun die Einübung der Elementarbewegung aus einer festen Zahl von Einflußfeldern, so wird sich nebst dem Hinzukommen neuer Komponenten, allein durch die

Kombination der Elementarbewegungen bei der Entstehung der Arbeitsgänge, die Zahl der Einflußfelder vergrößern und damit auch die Resultierende verändern. Dieselbe Überlegung gilt im Zusammenhang Arbeitsgang-Fertigprodukt.

Bei allen Untersuchungen zur Quantifizierung der Einübung wird diese Aufteilung streng zu beachten sein.

## 2 BISHERIGE ARBEITEN UND ERKENNTNISSE

Das Literaturverzeichnis zeigt, daß das Problem der Einübung bereits auf breiter Basis diskutiert und bearbeitet wurde.

Die bisherigen Arbeiten, die sich mit der Quantifizierung der Einübung befassen, seien nicht historisch, sondern nach der Problemgliederung des vorangehenden Abschnittes behandelt.

### 2.1 Elementarbewegungen

Umfangreiche Arbeiten wurden vom Franzosen CLAUDE CATELAS und einem Forschungsteam der *University of Birmingham* unter Leitung von Prof. N. A. DUDLEY durchgeführt

CATELAS zeigt, daß verschiedene Elementarbewegungsgruppen unterschiedliche Verlaufscharakteristiken aufweisen, die bei der Anwendung des MTM-Verfahrens durch Einführen einfacher Faktoren zu berücksichtigen sind.

Die Studie der Briten kommt zu ähnlichem Schluß und ist wissenschaftlich vor allem deswegen interessant, da sie mit Informationstheorie arbeitet. Die Messungen wurden ausschließlich an speziell konstruierten Arbeiten im Laboratorium durchgeführt, wobei hauptsächlich aus den Größen und Geschwindigkeiten der Korrekturen der Versuchspersonen während der Arbeitsausführung quantifizierbare Elemente für die Rechnung gewonnen wurden. Der psychologische Einübungsprozeß wurde dabei ähnlich einem Regelkreis angenommen.

### 2.2 Arbeitsgang

Mit dem Einübungsverlauf von Stückzeiten und Zeiten je Arbeitsgang befaßt sich maßgebend J. R. DE JONG in verschiedenen Aufsätzen und der Refa-Schrift «Fertigkeit, Stückzahl und benötigte Zeit».

Angeregt durch Beobachtung verschiedener Arbeiten zeigt er, daß die Zeitverläufe in doppelt logarithmischem

Netz Geraden ergeben. Dieser Erkenntnis muß die Tatsache zu Grunde liegen, daß die Einübung dem Verlauf einer Exponentialfunktion gehorcht.

$$y = C \cdot x^b$$

worin

- y Zeit je Stück (Arbeitsgang)
- x Nummer der Wiederholung
- C Konstante
- b Ablaufexponent

Logarithmiert stellt dieser Ausdruck eine Gerade dar

$$\log y = \log C + b \log x$$

Da die Einübung mit zunehmender Stückzahl eine Zeitabnahme zur Folge hat, muß der Exponent b einen negativen Wert aufweisen, womit der Zeitverlauf in der Darstellung Abb. 1 und 2 zum Ausdruck kommt:

Für den Spezialfall  $b = 1$  stellt die Funktion eine Hyperbel mit den Koordinatenachsen als Asymptoten dar.

Die Grundfunktion

$$y = \frac{C}{x^b}$$

modifiziert nun DE JONG nach folgender Überlegung:

Jede Arbeit hat einen charakteristischen Zeitaufwand je Arbeitsgang, der bei vollendeter Einübung erreicht und nicht mehr unterschritten werden kann. Dieser Wert fixiert somit die Asymptote des Verlaufes. Durch Einführen des Verhältnisses des Zeitaufwandes für die erste Arbeitsausführung zum Asymptotenwert (das heißt Zeitaufwand der unendlichsten Wiederholung), zeigt DE JONG das Exponentialgesetz in der Form

$$T_s = T_1 \left( M + \frac{1 - M}{s^m} \right)$$

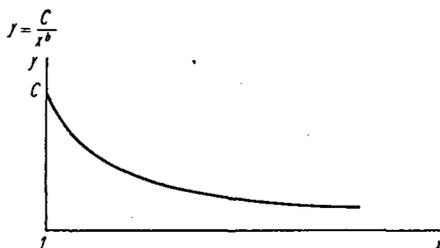


Abb. 1 Einübungsverlauf

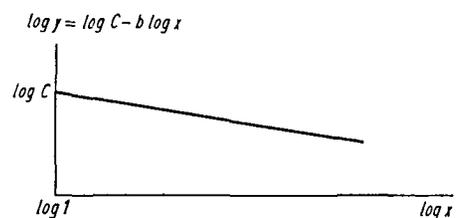


Abb. 2 Transformierter Einübungsverlauf

- s laufende Nummer des Arbeitszyklus in der auszuführenden Serie
- $T_1$  Zeitaufwand für den ersten Zyklus
- $T_s$  Zeitaufwand für den s-ten Zyklus
- $M = \frac{T_\infty}{T_1}$  Unreduzierbarkeit ( $0 \leq M \leq 1$ )
- m Ablaufexponent

Die Umformung

$$T_s = T_1 M + \frac{T_1 - T_1 M}{s^m}$$

wobei

$$T_1 M = \frac{T_1 T_\infty}{T_1} = T_\infty$$

liefert die maßgebenden Elemente für die graphische Darstellung Abb. 3.

Strebt im Extremfall  $T_\infty$  gegen 0, geht diese Darstellung in die Form der oben gezeigten Exponentialfunktion über

$$T_s = \frac{T_1}{s^m}$$

DE JONG behauptet nun, daß bei der Annahme von  $m = 0,322$

als eine für alle Arbeiten konstante Größe, mit Anpassung der Unreduzierbarkeit  $M$  an die in Betracht gezogene Arbeit, der Verlauf des Zeitaufwandes je Zyklus beschrieben werden kann.

Hat DE JONG seine Folgerungen dem Experiment entnommen, hat E. R. F. W. CROSSMAN im Rahmen der bereits erwähnten Arbeit an der *University of Birmingham* auf Grund struktureller Überlegungen ein mathematisches Modell des Einübungsprozesses entwickelt.

Zur Ausführung einer bestimmten Tätigkeit (Arbeit, Teilarbeit) kennt jeder Mensch eine Anzahl (i) Methoden ( $M_i$ ), die zum Ziel führen. Hat die Person noch keine Erfahrung in der Durchführung der Arbeit, trifft sie die Wahl einer Methode aus ihrem Repertoire mehr oder weniger zufällig, also mit der Wahrscheinlichkeit  $p_i$ , wobei

$$\sum_{i=1}^r p_i = 1$$

ist.

Jeder Ausführungsmethode ist ein bestimmter Zeitaufwand (t) eigen. Für den Aufwand (T) einer Arbeit bei der n-ten Wiederholung ergibt sich somit:

$$T(n) = \sum_{i=1}^r t_i p_i(n)$$

Dieses T(n) vermittelt dem Arbeiter eine bestimmte Empfehlung, nach der er die neuen Methoden beurteilt. Wird

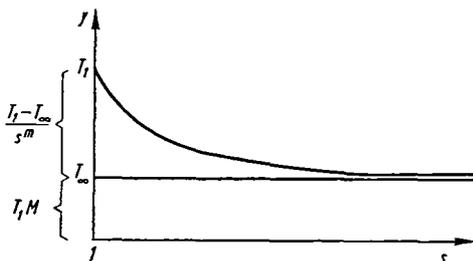


Abb. 3 De Jong'sche Darstellung der Einübung

nun angenommen, daß er «schnellere» Methoden «langsameren» vorzieht, folgt, daß sich nach dem Zeitaufwandsvergleich die Anwendungswahrscheinlichkeit  $p_i$  der Methode  $M_i$  verändert.

Ist  $k$  eine kleine positive Konstante, ergibt sich der Änderungsbetrag zu

$$dp_i = -k (t_i - T(n))$$

Kommt  $M_i$  im Mittel  $p_i(n)$  Mal in der n-ten Wiederholung vor, ist die mittlere Wahrscheinlichkeitsveränderung im n-ten Zyklus.

$$p_i(n) \cdot dp_i = -k \cdot p_i(n) \cdot (t_i - T(n))$$

aus der sich eine Rekursionsformel entwickeln läßt.

$$p_i(n+1) = p_i(n) \cdot (1 + dp_i) = p_i(n) \cdot (1 - k(t_i - T(n)))$$

Woraus nun die mittlere Zykluszeit für die (n+1)-te Wiederholung formuliert werden kann

$$T(n+1) = \sum_{i=1}^r p_i(n+1)$$

CROSSMAN demonstriert diese Ergebnisse numerisch an einem Beispiel mit 10 Methoden gleicher Ausgangswahrscheinlichkeit.

Mit zunehmendem n verändert sich die Verteilung der  $t_i$  von der ursprünglich rechteckigen sukzessive in eine linksschiefe. Der Verlauf der daraus errechneten  $T(n)$  zeigt eine Charakteristik, die einer Exponentialfunktion sehr nahe kommt.

Der praktischen Anwendung dieses Gesetzes stehen in dieser Formulierung noch einige Schwierigkeiten im Wege. Vor allem fehlt die Kenntnis (oder Meßmethode) der Anzahl (r) zur Verfügung stehenden Arbeitsmethoden, wie die zugehörige Ausgangsverteilung der Wahrscheinlichkeiten ( $p_i$ ).

Obschon diese Theorie aus den eben erwähnten Gründen in dieser Untersuchung nicht angewandt werden konnte, deutet sie doch eine aussichtsreiche Entwicklungsrichtung an. Läßt sich der Beweis, daß die Einübung den Charakter einer Exponentialfunktion hat, noch statistisch erbringen, besteht kein Grund zur Verwerfung der von CROSSMAN angenommenen Ursache der Einübung, was wissenschaftlich von beachtlichem Interesse ist.

M. D. KILBRIDGE zeigt in seinem Aufsatz «*Predetermined Learning Curves*», daß die Einübungsverläufe einfacher Verwaltungs-Routinearbeiten Exponentialfunktionen folgen. Die Arbeiten gleicher Ablaufexponenten werden analysiert und mit Hilfe eines Punktbewertungssystems charakterisiert. In modifizierter Form erlaubt nun dieses Bewertungsverfahren eine Voraussage der Anlernzeit.

### 2.3 Fertigprodukt

Eine weitere Reihe von Publikationen befaßt sich mit der Abhängigkeit von Aufwand und Stückzahl bei Fertigprodukten.

Bei dieser Betrachtung wird die Einübungsergebnis resultierende noch von zusätzlichen Komponenten beeinflusst. Vor allem kommt dem Einspielen der Produktionsplanung (Vorrichtungen, Arbeitsvereinfachungen), Produktionssteuerung

sowie der Betriebsorganisation als Gesamtheit erhebliche Bedeutung zu.

Da der Gesamtaufwand je Fertigprodukteinheit in vielen Betrieben zwangsläufig erfaßt wird, erfolgten auf dieser Stufe wesentliche Impulse zur Quantifizierung der Einübung.

So wurde während des Zweiten Weltkrieges in der amerikanischen Flugzeugindustrie bei Verdoppelung der Stückzahl eine Aufwandreduktion je Einheit von 20% festgestellt.

H. L. HILBERT zeigt in seinem Aufsatz «Die Berechnung von Einlaufkurven», daß die Stückkosten je Aufbauteil in Funktion der Stückzahl einem Exponentialgesetz gehorchen. Für den Exponenten gibt er Werte von 0,3 bis 0,9 an.

G. SCHIEFERER befaßt sich in seiner Dissertation «Die Vorplanung des Anlaufes einer Serienfertigung» ebenfalls mit diesen Problemen:

Um in einer Serienfabrikation eine vorgegebene Stückzahl je Zeiteinheit herzustellen, muß anfänglich eine größere Arbeitskapazität je Stück in den Fertigungsprozeß investiert werden. Diese Anpassung der Arbeitskapazität bestimmt er ebenfalls nach einer Exponentialfunktion.

Der Amerikaner E. B. COCHRAN stellt fest, daß der Kostenverlauf in Abhängigkeit der Stückzahl oft in gewissen Bereichen von der Exponentialfunktion abweicht. Zur Korrektur schlägt er vor, graphisch der ursprünglichen Geraden (*Characteristic Curve*) im  $\log - \log$ -Netz eine S-Kurve zu überlagern.

Die Stückkostenverläufe sind im allgemeinen mit Vorsicht zu interpretieren. Meistens stammen die Grundlagen

aus der Nachkalkulation. Leider findet man in den Veröffentlichungen keine Hinweise über die Kostenstruktur der betrachteten Werte. Je nachdem, ob die Entwicklungs- und Vorarbeitsaufwände in den Stückkosten enthalten sind, wirkt sich die Stückzahlabhängigkeit sehr unterschiedlich auf den Verlauf aus und kann den eingangs definierten Übungseinfluß stark übertönen.

#### 2.4 Zusammenfassung

Die eigentlichen Quantifizierstudien basieren hauptsächlich auf Laboruntersuchungen von Elementarbewegungen und auf Nachkalkulationswerten der Fertigprodukte, während nur vereinzelt auf Messungen von Arbeitsgängen Bezug genommen wird.

Die Impulse zur Klärung der vorliegenden Probleme stammen vor allem aus der Großserienfertigung, wodurch die gegenwärtigen Erkenntnisse und bisherigen Untersuchungen auf diesen Verhältnissen beruhen.

Diese Entwicklung hat ihre Ursache wohl darin, daß die Konsequenzen der Einübung in der Massenfertigung klar hervortreten und im Labor wie aus der Nachkalkulation am ehesten zuverlässiges Unterlagenmaterial beschafft werden konnte.

Daß diese Ansatzstellen zur Erforschung des ganzen Problemkreises richtig getroffen wurden, zeigt sich im vorliegenden Ergebnis: Die Gesetzmäßigkeit des Einübungsvorganges ist allgemein und widerspruchlos anerkannt und wird mit Hilfe von Exponentialfunktionen dargestellt.

### 3 PROBLEMSTELLUNG

Ein wesentliches Merkmal industrieller Arbeitsweise liegt in der Aufteilung des Gesamtarbeitsganges in Teilarbeitsgänge, die sich im Ausmaß der Seriengröße wiederholen. Wie in der Einleitung gezeigt wurde, interessiert sich der Betrieb für deren Einübungsverlauf.

In den weitaus häufigsten Fällen folgen sich in der Praxis Mittel- und Kleinserien mit geringfügigen Arbeitsmodifikationen und wiederholen sich in unterschiedlichen, meist ungleichen Zeitabständen. Die dadurch beschränkte Zahl identischer Arbeitsgangwiederholungen, Arbeitsumstellungen von Serie zu Serie und anderer Tätigkeit zwischen identischen Aufträgen werden die Übungsentwicklung des Arbeiters beeinträchtigen.

Wie weiter oben schon erläutert wurde, dürfen die unter anderen Gegebenheiten gewonnenen Erkenntnisse nicht ohne weiteres auch als Antwort auf diese Fragen übernommen werden.

Es soll damit in dieser Studie der Versuch unternommen werden, die Quantifizierbarkeit des Zeitaufwandverlaufes von Arbeitsgängen unter den dargestellten Betriebsgegebenheiten abzuklären.

Mit Ausnahme der Arbeiten an der *University of Birmingham* befassen sich die vorliegenden Publikationen mit der funktionellen Darstellung des Einübungsverlaufes. Da dieser aber eine Erscheinung aus der menschlichen Tätigkeit ist, muß er für eine allgemein gültige Formulierung als stochastischer Prozeß betrachtet werden.

Es ist anzunehmen, daß auch unter den geschilderten Betriebsgegebenheiten ein Einübungsvorgang stattfindet, der sich aber nicht mehr analog einem Modell mit sehr vielen Wiederholungen darstellen läßt. Methodisch werden zur Lösung die Tendenzen innerhalb und zwischen den verschiedenen Serien und Arbeiter zu überlagern und daraus die Grundgesetzmäßigkeit abzuschätzen sein, was nur mit Hilfe der mathematischen Statistik erfolgen kann.

### 4 MESSUNG

#### 4.1 Wahl der Betriebe

Um die Untersuchung auf eine möglichst allgemeingültige Basis zu stellen, wurden die Zeitmessungen in drei

Unternehmungen verschiedener Branchen und geographischer Lage durchgeführt. Innerhalb der Firmen wurden nach Möglichkeit verschiedene Abteilungen unterschied-

licher Fertigung erfaßt. Bei der Wahl der Abteilungen mußte bereits auch auf die Meßbarkeit der Stückzeit Rücksicht genommen werden.

Branche	Abteilung	Nr.
Elektroindustrie	Motorenwicklerei.....	1
	Schwachstromapparate-Montage .....	2
Waffenindustrie	Punktschweißmontage ..	3
Uhrenindustrie	Stanzerei .....	4
	Fräserei .....	5
	Bohrerei .....	6
	Rundschleiferei .....	7

Tabelle 2

Die in den einzelnen Abteilungen ausgeführten Arbeiten lassen sich nach verschiedenen Merkmalen charakterisieren.

#### 4.2 Arbeiter- und Arbeitscharakteristiken

##### Motorenwicklerei (1)

Für Elektromotoren (0,1–10 PS) werden die auf Wickelmaschinen erstellten Spulen in die Statornuten eingelegt.

##### Operationsfolge:

- Stator einspannen, Einlegesritte anzeichnen
- Nutisolation einschieben und richten
- Spulengruppen vereinigen
- Spuleneinde isolieren
- Spulen einlegen und binden
- Phasentrennung anbringen
- Nuten verkeilen

Stückzeit: 20–120 Minuten

Losgröße: 1– 20 Stück

##### Arbeitsunterschiede zwischen den Losen:

- Statorabmessungen, Durchmesser, Eisenbreite
- Polzahl (Einlegesritte), Bogenlänge
- Zahl der Spulenelemente je Gruppe
- Drahtbeschaffenheit
- Nutenfüllgrad

Auf die Arbeitstechnik haben die Variationen dieser Elemente wenig Einfluß. Die Arbeitsausführung verlangt Fingerfertigkeit und Konzentration.

Zum Teil wiederholen sich identische Lose in unterschiedlichen Zeitabständen.

##### Hilfsmittel:

Die Arbeitsplätze sind arbeitswissenschaftlich gestaltet und mit modernen, zweckmäßigen Hilfseinrichtungen versehen.

##### Versuchspersonen:

Ursprünglich wurden 5 Arbeiterinnen in die Untersuchung einbezogen. In der Auswertung ließen sich aber nur noch die Daten von 3 erfassen.

Nr.	Geschlecht	Alter	Berufsqualifikation	Dienstalter
11	Frau	25 Jahre	angelernt	1,5 Jahre
12	Frau	31 Jahre	angelernt	2 Jahre
13	Frau	28 Jahre	angelernt	0 Jahre

Tabelle 3

Lohnsystem: Zeitakkord

Untersuchungsdauer: April 1959–Januar 1960 (etwa 9 Monate)

##### Schwachstromapparate-Montage (2)

Zur Zeit der Untersuchung wurden hauptsächlich Teilkomponenten von Schaltapparaten montiert und Schlußmontagen durchgeführt.

##### Operationsfolge:

Läßt sich nicht allgemein angeben, da sie von Los zu Los vollständig ändert.

Stückzeit: 0,2–4 Minuten

Losgröße: 200–3000 Stück

##### Arbeitsunterschiede zwischen den Losen:

Die Unterschiede sind funktionstechnisch bedingt, in den Arbeitselementen wohl ähnlich, im Vorkommen und in der Reihenfolge aber sehr verschieden.

##### Hilfsmittel:

Die Arbeitsplätze sind nicht besonders gestaltet. Die Anordnung der Bestandteilebehälter trifft die Arbeiterin meistens selbst. Im allgemeinen werden Halte- und Positioniervorrichtungen verwendet.

##### Versuchspersonen:

Aus meßtechnischen Gründen konnten nur zwei Personen untersucht werden.

Nr.	Geschlecht	Alter	Berufsqualifikation	Dienstalter in Abteilung
21	Frau	28 Jahre	ungelernt	1 Jahr
22	Frau	25 Jahre	ungelernt	3 Jahre

Tabelle 4

Lohnsystem: Zeitakkord

Untersuchungsdauer: November 1959–März 1960 (etwa 5 Monate)

##### Punktschweißmontage (3)

Die Firma fabriziert in Massenfertigung Sturmgewehre. Die Verschlußgehäuse werden aus einzelnen Stanz- und Biegeteilen auf Punktschweißmaschinen zusammenschweißt.

##### Operationsfolge:

Die Gesamtmontage ist in 7 Arbeitsgänge aufgeteilt, die sich grundsätzlich in folgende Teiloperationen gliedern:

- Einzelteile auf Vorrichtung (Kupferdorn) spannen
- Schweißung (evtl. zwischen mehreren Schweißungen Vorrichtung wenden)

- Ausspannen und Sichtkontrolle

Stückzeit: 0,4–3 Minuten

Losgröße: 550 Stück

Arbeitsunterschiede zwischen den Losen:

Der Massenfabrikation entsprechend, sind die Lose identisch. Es unterscheiden sich lediglich die 7 Arbeitsgänge nach

- Anzahl der genannten Teiloperationen
- Schwierigkeit des Ein- und Ausspannens

Da sich die Lose ununterbrochen folgen, wiederholen sich die Arbeitsgänge in kurzen Abständen.

Hilfsmittel:

Vorrichtungen

Versuchspersonen:

Alle Arbeiter der drei Schichten dieser Meisterei wurden in der Aufnahme erfaßt.

Nr.	Geschlecht	Alter	Berufsqualifikation	Dienstalter in Abteilung
31	Mann	46 Jahre	ungelernt	1 Jahr
32	Mann	56 Jahre	ungelernt	2 Jahre
33	Mann	19 Jahre	gelernt	5 Monate
34	Mann	34 Jahre	ungelernt	3 Monate
35	Mann	38 Jahre	gelernt	0 Monate
36	Mann	23 Jahre	gelernt	0 Monate
37	Mann	21 Jahre	ungelernt	0 Monate

Tabelle 5

Lohnsystem: Zeitakkord

Arbeitszeit: 3 Arbeitsschichten

Untersuchungsdauer: August 1959–Dezember 1959 (etwa 4 Monate)

Stanzerei (4)

Die Firma fabriziert Uhrenbestandteile, das heißt Rohwerke. In der Stanzerei werden in die Grundplatten und Brücken (können als Werkträger betrachtet werden) Löcher gestanzt. Das Werkstück wird in der richtigen Lage in eine Fixiervorrichtung am Boden der Repassierpresse gelegt, worauf durch Betätigung eines Hebels die Löcher gestanzt werden und das Werkstück aus der Vorrichtung ausgestoßen und weggeblasen wird.

Die Arbeitsgeschwindigkeit hängt nur von der Arbeitsweise des Arbeiters ab. Die Schwierigkeit der Arbeit liegt im schnellen und richtigen Positionieren des Werkstückes.

Operationsfolge:

- Werkstück aus Transportbehälter ergreifen
- Durch Sehen und Tasten in richtige Lage bringen
- In Haltevorrichtung einlegen
- Stanzen

Stückzeit: etwa 1 Stunde für 1000 Stück (3,6 Sekunden je Stück)

Losgröße: 2000–100000 Stück

Arbeitsunterschiede zwischen den Losen:

- Elemente am Werkstück, nach denen sich die Lage richten läßt.

- Identische Lose wiederholen sich selten und in unterschiedlichen, relativ großen Abständen.

Hilfsmittel:

Keine besonderen.

Versuchspersonen:

Nr.	Geschlecht	Alter	Berufsqualifikation	Dienstalter	
				Firma	Abteilung
41	Mann	50 Jahre	angelern	28 Jahre	12 Jahre
42	Mann	43 Jahre	angelern	15 Jahre	15 Jahre
43	Mann	53 Jahre	angelern	32 Jahre	32 Jahre
44	Mann	50 Jahre	angelern	22 Jahre	22 Jahre
45	Mann	49 Jahre	angelern	14 Jahre	14 Jahre
46	Mann	31 Jahre	angelern	13 Jahre	13 Jahre
47	Mann	34 Jahre	angelern	3 Jahre	3 Jahre
48	Mann	62 Jahre	angelern	26 Jahre	26 Jahre

Tabelle 6

Lohnsystem: Zeitakkord

Untersuchungsdauer: September 1959–Februar 1960 (etwa 5,5 Monate)

Fräseerei (5), Bohreerei (6)

Die Unterschiede der Verfahrenstechnik (Bohren, Fräsen) haben auf die vom Arbeiter auszuführende Arbeit keinen Einfluß. Da beide Abteilungen mit den gleichen vertikalen Mehrspindelautomaten ausgerüstet sind und grundsätzlich die selben Elemente bearbeitet werden, können die allgemeinen Gegebenheiten der beiden Abteilungen zusammen beschrieben werden.

In der Fräseerei und Bohreerei werden in die Grundplatten und Brücken Löcher gebohrt und die verschiedensten Vertiefungen gefräst. Die auszuführenden Arbeiten bestehen im Aufsetzen der Werkstücke auf die Stückträgerplatte der Maschine. Das maximale Arbeitstempo richtet sich nach der eingestellten Taktzeit der Maschine. Die Schwierigkeit der Arbeit liegt im schnellen und richtigen Positionieren des Stückes und auswechseln defekter Werkzeuge (Bohrer).

Operationsfolge:

- Werkstück aus Transportbehälter ergreifen
- In richtige Lage bringen (sehen, tasten)
- In Haltevorrichtung auf Stückträgerplatte einlegen

Stückzeit: etwa 1 Stunde für 1000 Stück (3,6 Sekunden je Stück)

Losgröße: 2000–100000 Stück

Arbeitsunterschiede zwischen den Losen:

- Elemente, nach denen das Werkstück gerichtet werden muß
- Beim Bohren treten die häufigsten Werkzeugwechsel je nach Werkstück an bestimmten Spindeln auf, die der Arbeiter selber auswechselt.
- Beim Fräsen treten Werkzeugdefekte selten auf und müssen vom Einrichter behoben werden.
- Identische Lose wiederholen sich in unterschiedlichen, relativ großen Abständen.

Hilfsmittel:

Keine besonderen.

Versuchspersonen:

Fräserei

Nr.	Geschlecht	Alter	Berufsqualifikation	Dienstalter	
				Firma	Abteilung
51	Mann	43 Jahre	angelernt	6 Jahre	6 Monate
52	Mann	34 Jahre	angelernt	3 Jahre	4 Monate
53	Mann	36 Jahre	angelernt	9 Jahre	4 Jahre
54	Mann	29 Jahre	angelernt	3 Jahre	3 Jahre
55	Mann	39 Jahre	angelernt	8 Jahre	7 Monate
56	Mann	37 Jahre	angelernt	9 Jahre	8 Monate

Tabelle 7

Bohrerei

Nr.	Geschlecht	Alter	Berufsqualifikation	Dienstalter	
				Firma	Abteilung
61	Mann	43 Jahre	angelernt	6 Jahre	6 Jahre
62	Frau	27 Jahre	angelernt	12 Jahre	12 Jahre
63	Mann	39 Jahre	angelernt	4 Jahre	4 Jahre
64	Frau	18 Jahre	angelernt	4 Jahre	9 Monate
65	Frau	26 Jahre	angelernt	8 Jahre	5 Jahre

Tabelle 8

Lohnsystem: Zeitakkord

Untersuchungsdauer: Mai 1959–Februar 1960 (etwa 9 Monate)

Rundschleiferei (7)

An Achsen, auf denen asymmetrisch ein Zahnrad liegt, werden in der Schleiferei die äußeren Lagerzapfen nach dem Centerlessverfahren auf den Soll Durchmesser geschliffen. Die Werkstücke sind so klein, daß sie mit einer Pinzette gehandhabt werden müssen, zum Teil sind sie für den Ungeübten von Aug kaum richtig zu erkennen. Für den eigentlichen Schleifvorgang sind sie nach den asymmetrischen Wellenenden gerichtet in einen Schwenkarm einzulegen, der sie darauf an die Schleifscheiben preßt. Die Schleifdauer (Hauptzeit) kann von der Arbeiterin nicht beeinflußt werden. Nach dem Arbeitsgang werden die Werkstücke automatisch ausgestoßen.

Der Arbeitsrhythmus kann von der Arbeiterin frei gewählt werden. Die Schwierigkeit der Arbeit liegt in der geschickten Handhabung der Werkstücke beim Ausrichten und Aufsetzen auf die Maschine.

Operationsfolge:

- Ergreifen des Werkstückes mit der Pinzette aus dem Transportbehälter
- Ausrichten nach den asymmetrischen Wellenenden
- Aufsetzen in die Halteöffnung des Schwenkarmes
- Auslösen des Schleifvorganges
- Von Zeit zu Zeit Durchmesserkontrolle mit einer Meßlehre

Stückzeit: etwa 1,5 Stunden für 1000 Stück (5,4 Sekunden je Stück)

Losgröße: 2000–150000 Stück

Arbeitsunterschiede zwischen den Losen:

- Abmessungen der Werkstücke
- Identische Lose wiederholen sich in unterschiedlichen, relativ großen Abständen.

Hilfsmittel:

Pinzette.

Versuchspersonen:

Von den ursprünglich 5 in die Untersuchung einbezogenen Personen hatten nur 2 für die Auswertung genügend große Lose und Wiederholungen identischer Aufträge.

Nr.	Geschlecht	Alter	Berufsqualifikation	Dienstalter	
				Firma	Abteilung
71	Frau	25 Jahre	angelernt	10 Jahre	10 Jahre
72	Frau	20 Jahre	angelernt	3 Jahre	1 Jahr

Tabelle 9

Lohnsystem: Zeitakkord

Untersuchungsdauer: Juli 1959–Februar 1960 (etwa 7 Monate)

#### 4.3 Gegenüberstellung der gemessenen Arbeiten (Tabelle 10)

#### 4.4 Meßmethoden

Das Messen des spezifischen Arbeitsaufwandes je Arbeitsgang stellt in einer solchen Untersuchung eine der Hauptschwierigkeiten dar.

Auf Grund der Problemstellung sollten vor allem die Stückzeiten von wiederkehrenden identischen Aufträgen oder Serien erfaßt werden. Da in der Praxis diese Wiederholungen im allgemeinen sehr unregelmäßig, zum Teil in größeren Zeitabständen vorkommen und nur in den wenigsten Fällen vorausgesagt werden können, mußte während einer möglichst langen Untersuchungsdauer eine Vollaufnahme durchgeführt werden. Darunter ist die Zeiterfassung jeder Arbeitseinheit während der ganzen Untersuchungsdauer zu verstehen.

Zeitaufnahmen mittels Stoppuhr waren beim notwendigen Untersuchungsumfang aus ökonomischen und technischen Gründen zum vornherein ausgeschlossen. Somit mußte die Zeiterfassung mit Hilfe automatischer Registriergeräte oder durch die Versuchspersonen selbst vorgenommen werden.

Vorgängig der Wahl der Aufnahmeverfahren ist die Zusammensetzung der zu messenden Zeiten noch festzulegen. Die hier in Frage kommenden Zeiten gliedern sich zweckmäßig in

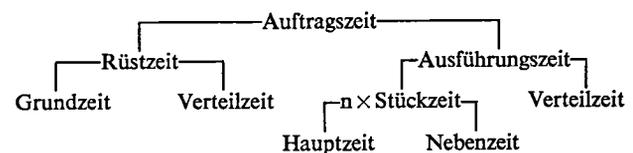


Abb. 4 Zeitgliederung

	Abteilungen						
	1	2	3	4	5	6	7
Kraftaufwand .....	gering			sehr gering			
Konzentration .....	mittel			gering			
Geschicklichkeit .....	mittel						
Stückzeit .....	Min. 20-120	Min. 0,2-4	Min. 0,4-3	Sek. 3,6		Sek. 5,4	
Auftragsgröße (Stück) .....	1-20	200-3000	550	2000-100000		2000-150000	
Unterschiede zwischen Aufträgen .	mittel	groß	mittel	gering		sehr gering	
Arbeitsart .....	Hand			Maschine			
Arbeitstakt .....	frei			gebunden		frei	

Tabelle 10

Diese Studie interessiert der Verlauf der Stückzeit innerhalb der Auftragszeit. Die Rüstzeit fällt durch die Existenz von Einrichtern in allen untersuchten Abteilungen außer Betracht. Um ein genaues Bild der Verhältnisse zu erhalten, müßten die Verteilzeiten (persönlich- und arbeitsbedingte) noch eliminiert werden.

Die korrekte Ausgliederung dieser Verteilzeiten stellt bei Verzicht auf Messung durch Zeitnehmer ein schwer zu lösendes Problem dar. Wie noch gezeigt wird, ließen sich doch die größern Beträge separieren. Im übrigen scheint es durchaus angebracht, die kleineren mitzuerfassen, da mit wachsender Einübung auch dieser Zeitanteil von der Reduktion erfaßt wird.

Auf die Separierung von Haupt- und Nebenzeiten konnte grundsätzlich in allen untersuchten Fällen verzichtet werden, da sie bei reiner Handarbeit in gleichem Maße der Einübung unterworfen sind. Bei den Arbeiten in den Abteilungen 3, 4 und 7 stellt die unbeeinflussbare Hauptzeit nur einen verschwindend kleinen Teil der Nebenzeit dar. Da sie zudem bei jedem Arbeitsgang praktisch den gleichen Betrag hat, beeinflußt sie den Zeitverlauf nicht und muß nicht abgezogen werden.

Gestützt auf diese Begründung, wurde prinzipiell nur die Stückzeit (das heißt die Zeitdauer der Arbeitsausführung an einem Stück) gemessen. Außer in Abteilung 1 waren die Stückzeiten zu kurz, um einzeln erfaßt zu werden. In diesen Fällen wurden die Aufträge in gleichgroße Teillose aufgeteilt, die einzeln erfaßt werden konnten.

Das Problem der Erfassungsgenauigkeit wird abteilungsweise besprochen.

Im einzelnen wurden folgende Aufnahmeverfahren angewandt:

#### Motorenwicklerei (1)

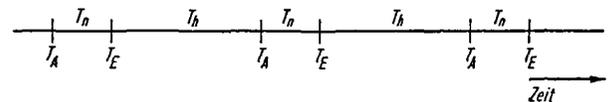
Infolge der großen Stückzeiten von 20-120 Minuten und der kleinen Auftragsgrößen von 1-20 Stück mußten hier die Einzelzeiten erfaßt werden.

Das Ein- und Ausspannen der Statoren in die Haltevorrichtung mit Hilfe eines Schraubenschlüssels konnte für

ein automatisch registrierendes Aufnahmeverfahren als eindeutig definierte Meßpunkte verwendet werden.

Durch den wesentlichen Unterschied zwischen Hauptzeit (Zeit zwischen Ein- und Ausspannung) und Nebenzeit (Zeit zwischen Aus- und Einspannung) lassen sich diese eindeutig separieren, wobei die Auswertung lediglich die Hauptzeiten erfassen wird.

Das ganze Aufnahmeproblem lag prinzipiell darin, die Zeit der Ein- und Ausspannmomente festzuhalten.



- $T_E$  = Einspannen
- $T_A$  = Ausspannen
- $T_E - T_A = T_n$  Nebenzeit
- $T_A - T_E = T_h$  Hauptzeit

Abb. 5 Zeitenfolge (Meßpunkte)

Die üblichen Bandschreibgeräte kamen nicht in Betracht. Die großen Stückzeiten und ihre Unterschiede zwischen den Aufträgen ergaben bei den erhältlichen Bandvorwürfen und erforderlichen Auswertgenauigkeit unpraktisch große Meßdistanzen auf den Streifen und zudem einen unwirtschaftlichen Papierverschleiß.

Diese Unzulänglichkeiten unter den gegebenen Umständen führten zur Anwendung eines Filmmessverfahrens. Werden die Zeiten der Meßpunkte (Ein- und Ausspannung) je auf einer Filmaufnahme festgehalten, so ist der Registriermaterialverbrauch unabhängig von der Größe der Stückzeit. Ebenso hat diese keinen Einfluß auf die Auswertung, da lediglich die Differenz der beiden registrierten Zeiten ermittelt werden muß. Zum Festhalten der Zeiten ist während des Arbeitsablaufes in den Meßpunkten lediglich die Aufnahme einer Uhr zu machen.

Praktisch wurde dieses Prinzip folgendermaßen verwirklicht:



Abb. 7 Kontaktvorrichtung

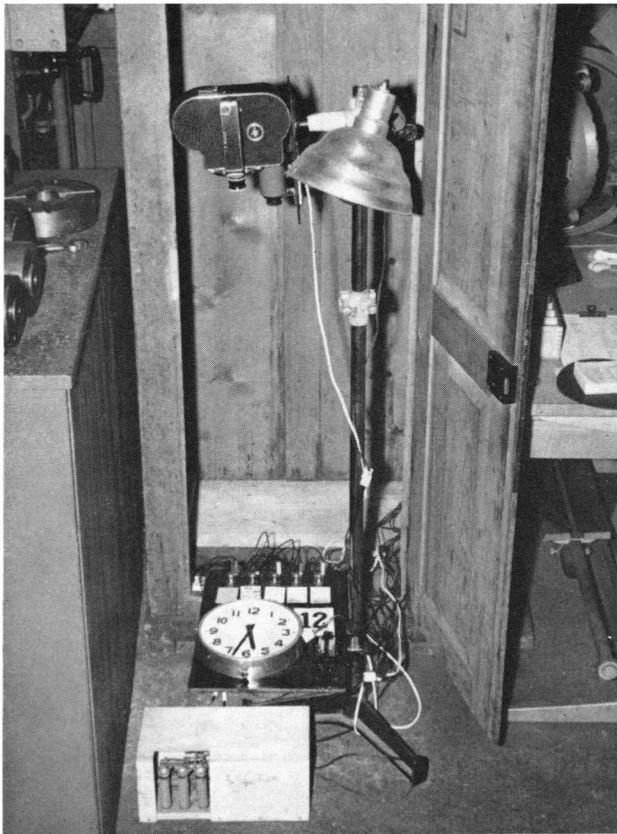


Abb. 8 Aufnahme Einrichtung

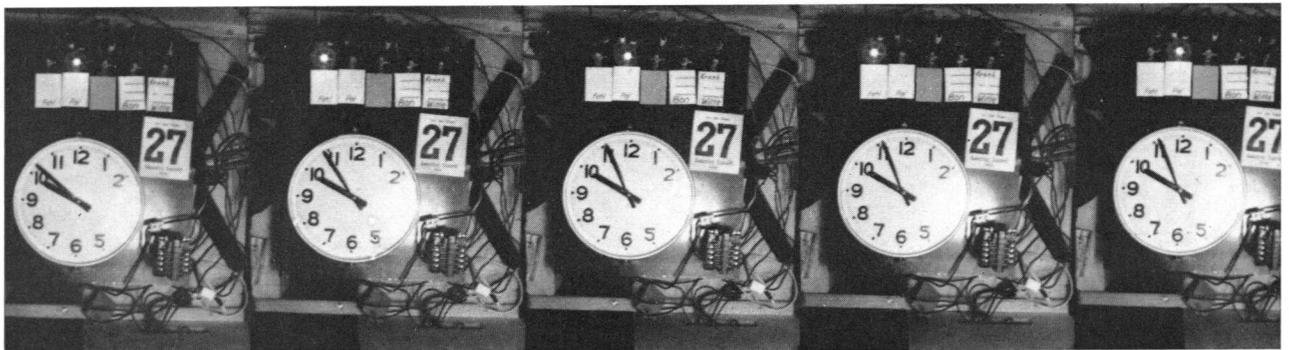


Abb. 9 Aufnahmen

Der Schraubenschlüssel wurde mit einer Schnur an einem elektrischen Druckknopfschalter so befestigt, daß bei seiner Verwendung ein Kontakt ausgelöst wurde. Dieser schloß einen Schwachstromkreis mit einem Relais in Serienschaltung, das seinerseits einen Lichtstromkreis schloß. In diesen wurde in Serie ein Schaltrelais für die Bedienung der Einzelbildschaltung einer Kamera und eine Photolampe geschaltet. Das Objektiv der verwendeten 16-mm-Paillard-Kamera wurde gegen eine Uhr gerichtet. Somit wurde beim Ein- und Ausspannen des Stators je ein Bild von der Uhrzeit aufgenommen.

Um mit der Anlage gleichzeitig die Arbeiten an verschiedenen Arbeitsplätzen erfassen zu können, wurden mehrere Schwachstromkreise parallel zusammengeschaltet. In jeden dieser parallelen Kreise wurde in Serie zum Druckknopfschalter am Arbeitsplatz ein Lämpchen bei der Uhr eingebaut, dessen Aufleuchten die Aufnahme einem Arbeitsplatz zuordnete (Abb. 6).

Den Lämpchen wurden Täfelchen mit der Auftragsbezeichnung beigelegt und der Uhr ein Tageskalender beigegeben. Damit enthielt jede Aufnahme Datum, Wochentag und Arbeitsplatz als Zuordnungsinformation des Meßpunktes.

Das gesamte Aufnahmeaggregat wurde um ein Stativ gruppiert in einem Kasten eingeschlossen, damit die Arbeiterinnen durch den Lärm der Relais und den Schein der Photolampe nicht gestört wurden. Die ganze Anlage wurde vom Vorarbeiter des Arbeitsbezirkes gewartet: täglich Uhr und Kamera aufziehen, Kalender à jour halten und bei Auftragswechsel die Bezeichnungen ändern.

Nach Überwindung einiger psychologischer Anlaufschwierigkeiten hat sich das Aufnahmeverfahren während der neunmonatigen Untersuchungsdauer sehr gut bewährt. Für die Messungen wurden 10 Filme zu 30 Meter benötigt, was etwa 30000 Aufnahmen entspricht.

Die Auswertung der Filme erfolgte mit Betrachtelementen von Filmmontagevorrichtungen. Die einzelnen Bilder wurden darin auf gute Lesbarkeit vergrößert.

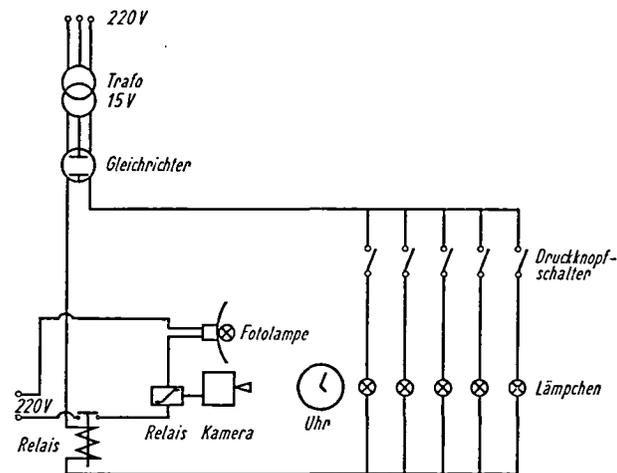


Abb. 6 Schaltschema

Der Gebrauch des Schraubenschlüssels löste meist mehrere Kontakte und damit mehrere Aufnahmen aus. Dieses «Flunkern» erfolgte in sehr kurzen Zeitintervallen und zeigte sich in mehreren Bildern hintereinander ohne erkennbare Zeitunterschiede. Für die Auswertung wurde prinzipiell die erste Aufnahme einer solchen Folge betrachtet.

Die gemessenen Zeiten wurden mit Datum in chronologischer Reihenfolge je Arbeiterin und Auftrag in ein Formular übertragen. Nach Umrechnung der Minuten in Hundertstelstunden ließen sich durch Subtraktion der Ausspannzeit von der Einspannzeit (= größeres Intervall) die Stückhauptzeiten für jeden Auftrag in der richtigen Reihenfolge ermitteln und darstellen.

Die so ermittelten Zeiten sind mit zwei Fehlern behaftet. Die Ablesung der gefilmten Uhr erfolgte mit einer Ungenauigkeit von einer Minute, was im Extremfall einen relativen Fehler von 5% verursacht. Die Verteilzeiten sind in den Haupt- und Nebenzeiten enthalten. Große Verteilzeitbeträge erscheinen in der Form von stark nach oben abweichenden Einzelzeiten. Solche Extremwerte wurden für die weitere Auswertung gestrichen. Beträge, die die allgemeine Streuung der Einzelwerte nicht übersteigen, konnten nicht eliminiert werden. Auf Grund der einleitend gemachten Begründung ist das Einbeziehen solcher Verteilzeiten gerechtfertigt. Da die Ablesegenauigkeit weit innerhalb der zu erwartenden Streuung der Einzelwerte liegt, hat sie keinen merklichen Einfluß auf die Ergebnisse.

Nachdem die Zeitverläufe je Arbeiterin und Auftrag vorlagen, galt es, die arbeitstechnisch identischen Aufträge zusammenzufassen.

Mit Hilfe der aufgenommenen Auftragsnummern ließen sich die Spezifikationen

- Typ
- Statorbohrung
- Statornutenzahl
- Wicklungsart
- Isolationsart

zusammenstellen. Die Aufträge mit identischen Spezifikationen wurden gruppiert. Damit eine Gruppe in der weiteren Analyse verwendet wurde, mußten darin mindestens 2 Versuchspersonen mit je 2 oder mehreren Aufträgen vorkommen.

#### Schwachstromapparate-Montage (2)

Die Aufträge unterschieden sich durch sehr große Arbeitsmodifikationen. Die Auftragsdauer schwankte zwischen einigen Stunden und mehreren Tagen. Die Arbeiten der verschiedenen Aufträge enthielten keine einheitlichen, eindeutig definierbaren Meßpunkte. Meßinstallationen zur automatischen Registrierung ließen sich nicht allgemein brauchbar einrichten. Eine Anpassung an jeden Auftrag war technisch nicht durchführbar und wirtschaftlich nicht zu verantworten. Automatische Aufnahmeverfahren kamen hier somit nicht in Betracht.

Die relativ großen Stückzahlen je Auftrag (200-3000

Stück) und kleinen Stückzeiten (0,2–4 Minuten) erlaubten die Zusammenfassung mehrerer Stücke zu gleich großen Meßeinheiten von etwa 15 Minuten Arbeitszeit. Dieser Umstand erlaubte eine Zeiterfassung mit einer Zeitstempeluhr.

Der Einrichter des Meisterbezirkes trug in eine übliche Akkordkarte die technischen und organisatorischen Spezifikationen des Auftrages ein. Den Auftrag unterteilte er in Meßeinheiten gleicher Stückzahl. An den Arbeitsplatz der Versuchsperson wurde eine Stempeluhr gestellt, auf der der Arbeitsbeginn jeder Meßeinheit auf der Akkordkarte gestempelt wurde.

Nach eingehender Orientierung über Sinn und Zweck der Untersuchung haben sich die Versuchspersonen bereit erklärt, sämtliche Verteilzeiten über 3 Minuten auf der Karte an- und abzustempeln und zu bezeichnen.

Durch Subtraktion der gestempelten Zeiten wurde der Zeitaufwand je Meßeinheit errechnet und mit Datum in chronologischer Reihenfolge wiederum je Auftrag und Versuchsperson in ein Formular übertragen.

Die so ermittelten Werte haben für die Auswertung drei Unzulänglichkeiten. Das Stempelwerk der Uhr schaltet nur ganze Minuten, was im Grenzfall einen relativen Fehler von etwa 7% verursachte. Da dieser innerhalb der Streuung der Meßeinheiten liegt, ist er für das Weitere belanglos. Aus bereits erwähnten Gründen haben die nicht separierten Verteilzeiten keine negative Auswirkung auf das Ergebnis. Die Zusammenfassung der Einzelzeiten zu Meßeinheiten wird die Schwankungen im Aufwandsverlauf etwas ausgleichen, den Regressionskoeffizienten der Kurve aber kaum wesentlich beeinflussen.

Mit Hilfe der eingetragenen Auftragsdaten auf den Stempelkarten ließen sich die identischen Lose direkt gruppieren.

#### *Punktschweißmontage (3)*

Die Auftragsgröße für Verschlußgehäuse war während der ganzen Untersuchungsdauer immer gleich, 550 Stück. Die Aufträge gliederten sich in 11 Teillose zu 50 Stück. Ein solches Teillose bildete eine Transporteinheit: ein Brett mit 50 Holzzapfen, über die die einzelnen Verschlußgehäuse gesteckt wurden. Technisch wäre die Installation einer automatischen Registrieranlage möglich gewesen, hätte aber unter den baulichen Gegebenheiten zu hohe Aufwendungen ergeben. So wurden die Zeiten auch hier mit einer Stempeluhr erfaßt. Jeder Transporteinheit mit 50 Verschlußgehäusen (= Meßeinheit) wurde eine eigens hierfür entworfene Stempelkarte mit der Auftragsnummer beigegeben. Arbeitsbeginn und -ende mußte vom ausführenden Arbeiter auf dieser Begleitkarte gestempelt und gleichzeitig Arbeiter- und Operations-Nummer eingetragen werden. Hatte eine Meßeinheit die Punktschweißerei durchlaufen, enthielt die Begleitkarte Beginn und Ende jeder der sieben durchgeführten Operationen. Durch den Schichtwechsel wurden öfters bei den längeren Operationen eine Meßeinheit von zwei verschiedenen Arbeitern bearbeitet. Diese mußten den erwähnten Angaben noch die bearbeitete

Stückzahl beifügen, damit der theoretische Aufwand je Meßeinheit errechnet werden konnte.

Die Arbeiter wurden anlässlich der einführenden Orientierung angewiesen, Verteilzeiten von über 3 Minuten Dauer mit entsprechender Angabe zu stempeln. Da nur äußerst selten solche vorgefunden wurden, mußte bei der Auswertung angenommen werden, daß sie in stark nach oben abweichenden Werten enthalten seien, die somit nicht berücksichtigt werden konnten.

Zur Ermittlung der Unterlagen wurden die Zeitaufwände der Operationen gerechnet und in die Karten eingetragen. Um die Zeiten je Arbeiter chronologisch zusammenfassen zu können, wurden die Karten nach Operationen zerschnitten. Da ein Arbeiter meistens die gleiche Operation während eines Auftrages ausführte, ergab die Zusammenstellung zugleich eine Auftragsgruppierung. Die Zeitfolge wurde je Arbeiter und Auftrag in ein Formularblatt übertragen. Mit diesen Blättern ließen sich für jede Versuchsperson die ausgeführten Operationen während der ganzen Untersuchungsdauer in der richtigen Folge darstellen.

Die Meßgenauigkeit läßt sich mit den Bemerkungen im vorausgehenden Abschnitt kritisieren.

#### *Uhrenindustrie (4, 5, 6, 7)*

Die Aufnahmebedingungen waren in allen untersuchten Abteilungen gleich und können deshalb gemeinsam besprochen werden.

Die automatische Aufzeichnung der Stückzeiten wäre technisch nur in den Abteilungen 4 und 7 durchführbar gewesen. Das durch die sehr kurzen Einzelzeiten anfallende Unterlagematerial hätte aber einen unüberwindbaren Arbeitsaufwand zur Ermittlung der Grunddaten ergeben.

Die Aufträge durchgingen alle untersuchten Abteilungen in Teillosen von 2000 Stück, deren Arbeitsaufwand wiederum durch Zeitstempeln erfaßt wurde.

Für jedes Teillose wurde auf eine spezielle Stempelkarte Abteilung, Arbeiter und die technischen Arbeitsspezifikationen eingetragen und mit dem Material an der Arbeitsverteilstelle bereitgestellt. Empfang und Rückgabe des Teilloses mußte auf der zugehörigen Karte an der bereitstehenden Uhr gestempelt werden.

Die aus diesen Karten ermittelten Zeiten enthalten nebst den Verteilzeiten die durch die Einübung nicht beeinflussbaren Nebenzeiten des zurückgelegten Weges Arbeitsplatz-Arbeitsverteilstelle. Während die großen Verteilzeitbeträge durch Streichen übermäßig großer Einzelwerte eliminiert wurden, beeinflussten die Nebenzeiten durch ihren praktisch konstanten Betrag den Aufwandverlauf nicht. Die Stempelungenauigkeit der Uhr war bei einer Zeitdauer von etwa einer Stunde je Meßeinheit belanglos.

Die auf den Karten errechneten Zeiten wurden auftragsweise auf Formulare übertragen und diese chronologisch und nach Versuchspersonen zusammengefaßt.

Für die weitere Auswertung wurden nur solche Aufträge berücksichtigt, die sich in gewissen Zeitabständen folgten oder eine große Zahl von Einzelwerten enthielten.

5.1 Rechenprinzip

Wie schon in Abschnitt 2 festgestellt wurde, kamen alle bisherigen Studien zum Ergebnis, daß sich die Einübung mit Exponentialfunktionen darstellen läßt. Es ist somit die Annahme zu verantworten, daß auch die Zeitverläufe unter den vorliegenden Aufnahmebedingungen dem Exponentialgesetz

$$T_s = \frac{T_1}{s^b}$$

gehörten, worin

s laufende Nummer des Arbeitszyklus

T<sub>s</sub> Zeitaufwand für den s-ten Zyklus

T<sub>1</sub> Zeitaufwand für den ersten Zyklus

b Ablaufexponent

sind.

Der Einübungsprozeß ist in Wirklichkeit ein stochastischer Prozeß: werden die Meßwerte verschiedener Einübungsverläufe gemeinsam in ein T-s-Koordinatennetz eingezeichnet, so werden die T<sub>km</sub> nicht zusammenfallen, sondern um ein mittleres T<sub>k</sub> verteilt sein.

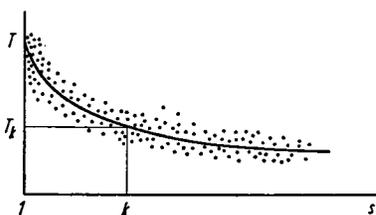


Abb. 10 Stochastische Abhängigkeit

Jede Versuchsperson führte Aufträge aus, deren Arbeitstechnik und spezifischen Zeitaufwände voneinander verschieden waren. Dieser Umstand verhindert aber ein Zusammenfassen der einzelnen Aufträge zu der eben gezeigten Darstellung. Jeder Auftrag wird somit einzeln zu betrachten sein. Graphisch präsentieren die Einzelzeiten (bzw. Zeitaufwand einer Meßeinheit) ein ähnliches Bild mit dem Unterschied, daß jedem k nur ein T<sub>k</sub> zugeordnet wird, das in der Regel vom zugehörigen Wert des Grundgesetzes abweichen wird.

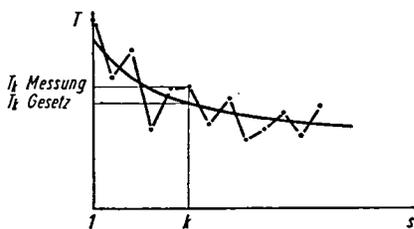


Abb. 11 Meßverlauf

Die Aufgabe besteht darin, aus diesen Zickzackverläufen der Meßwerte den Verlauf der Grundtendenz in Form einer Exponentialkurve herauszufinden.

Eine Exponentialfunktion wird numerisch durch die Parameter

$$T_1, b$$

bestimmt, wobei T<sub>1</sub> auch durch einen andern Wert, zum Beispiel den Mittelwert T der Folge ersetzt werden kann.

T<sub>1</sub> fixiert den Kurvenverlauf gegenüber der T-Achse, währenddem die Form der Kurve durch den Exponenten b bestimmt wird.

Die Ermittlung des Parameters T<sub>1</sub> als Zeitaufwand für den ersten Zyklus fällt definitionsgemäß außerhalb des Aufgabenkreises einer Studie über die Einübung. Zu seiner Bestimmung kennt die Praxis verschiedene Methoden (Zeitstudie, MTM usw.).

Die Quantifizierung der Einübung liegt in der numerischen Ermittlung des Ablaufexponenten b, da damit bei Kenntnis von T<sub>1</sub> der Kurvenverlauf bestimmt ist. Die Summe aller Aufträge bilden eine Grundgesamtheit. Jeder gemessene Einzelauftrag kann als Stichprobe dieses Kollektivs betrachtet werden. Die aus jedem einzelnen Auftrag bestimmbaren b<sub>n</sub> werden von einem mittleren Wert β der Grundgesamtheit zufällig abweichen, solange keine systematischen Störeinflüsse vorliegen (zum Beispiel persönlichkeitsbedingte Verschiedenheit der Versuchspersonen, unterschiedliche Arbeitscharakteristik). Mit diesem β wird das Grundgesetz der Einübung unter den gegebenen Aufnahmebedingungen quantitativ zu formulieren sein. Die Streuung der zu erwartenden b<sub>n</sub>, wie die Größe des Vertrauensbereiches einer Schätzung von β werden zeigen, wie weit die Einübung in der Betriebspraxis zu berücksichtigen sein wird.

Vorerst ist demnach die Aufgabe zu lösen, rechnerisch den Betrag der b<sub>n</sub> für die einzelnen Aufträge zu bestimmen. Dies geschieht mit der heute allgemein bekannten Regressions- und Korrelationsrechnung (LINDER, Abschnitt 611).

Wie einleitend bereits gezeigt wurde, geht eine Exponentialfunktion durch Logarithmieren in eine Gerade über. Diese Umformung hat den Vorteil, daß bei einer Geraden als Regressionsmodell der Rechengang besonders einfach wird.

Das Verfahren beruht auf folgenden Überlegungen:

$$T_s = \frac{T_1}{s^b}$$

$$\log T_s = \log T_1 - b \log s$$

Substitution der Logarithmen ergibt

$$Y = a - b x$$

Diese Gerade ist in die je Auftrag gemessene Zickzacklinie im doppelt logarithmischen Koordinatennetz durch entsprechende Wahl von a und b so zu legen, daß die Summe der Quadrate der Abstände der Meßwerte vom zugehörigen Punkt auf der Geraden minimal wird.

$y_1$  Meßwert mit Abszisse  $i$

$Y_1$  Punkt auf der Geraden mit Abszisse  $i$

$$\sum_{i=1}^n (y_i - Y_1)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (a - bx_i))^2 = \min$$

Diese Beziehung wird nach den Parametern  $a$  und  $b$  partiell differenziert und gleich Null gesetzt.

$$\begin{aligned} -2 \sum (y_i - a - bx_i) &= 0 \\ 2 \sum (x_i y_i - ax_i + bx_i^2) &= 0 \end{aligned}$$

Durch Einführen der in der mathematischen Statistik üblichen Schreibweise für die Ausdrücke

$$\begin{aligned} S_{yy} &= \sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{N} \\ S_{xx} &= \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{N} \\ S_{xy} &= \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum x_i y_i - \frac{(\sum x_i y_i)^2}{N} \end{aligned}$$

liefert die Auflösung obiger Gleichungen

den Regressionskoeffizienten (= Ablaufexponent)

$$b = -\frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

den Korrelationskoeffizienten  $r$  oder das Bestimmtheitsmaß  $B$  der Abhängigkeit zwischen  $x$  und  $y$

$$r^2 = B = \frac{S_{xy} S_{xy}}{S_{xx} S_{yy}} = \frac{(S_{xy})^2}{S_{xx} S_{yy}}$$

und die Reststreuung als Maß für die Abweichung der Einzelwerte um die Regressionsgerade

$$s = \sqrt{\frac{S_{yy} - b S_{xy}}{N - 2}}$$

Mit diesen drei statistischen Parametern  $b$ ,  $B$ ,  $s^2$  wird sich die Einübung jeder Auftragsausführung quantitativ eindeutig ermitteln lassen.

In der Diskussion der bisherigen Arbeiten wurde gezeigt, daß DE JONG die Einübung in einer im Hinblick auf die praktische Anwendung geeigneten Darstellung vorschlägt:

$$T_s = T_1 \left( M + \frac{1 - M}{s^m} \right)$$

$$M = \frac{T_\infty}{T_1} \quad \text{Unreduzierbarkeit}$$

$$m = 0,322 \quad \text{Ablaufexponent}$$

Die Darstellung ist aber aus rechentechnischen Gründen als Regressionsmodell ungeeignet. Da die für die Tendenzapproximation gewählte Exponentialfunktion wie diese Beziehung denselben Sachverhalt formulieren, lassen sich die aus dieser Arbeit resultierenden allgemeinen Erkenntnisse sinngemäß auf alle Modelle zur Formulierung des Einübungsverlaufes übertragen.

### 5.2 Rechenprogramm

Die Berechnung der Regressionslinien wurde auf der elektronischen Rechenmaschine *Burrough E 101* des Be-

triebswissenschaftlichen Institutes der ETH durchgeführt. Vorgängig der Berechnung wurden die in die Auswertung einbezogenen Meßwerte logarithmiert:

$$y_i = \log_{10} T_i$$

Da sich die

$$x_i = \log_{10} s_i$$

in jeder Rechnung in derselben Reihenfolge wiederholten, wurde ein Lochstreifen für die Werte  $\log 1$  bis  $\log 1000$  erstellt und die Werte  $\log 1$  bis  $\log 60$  in der Maschine gespeichert, während die  $y_1$ -Werte über die Tastatur eingetippt wurden. Das Rechenprogramm läßt sich in drei Teile gliedern:

- Die langsamste Operation im Rechenablauf war die Eingabe der  $y_1$ -Werte. Die für die Rechnung benötigten Summanden

$$\sum x_i, \sum y_i, \sum x_i y_i, \sum x_i^2, \sum y_i^2$$

und das Zählen der Meßpunkte ( $N$ ) wurden durch Aufsummieren jedes eingegebenen  $y_1$  sofort gerechnet, wodurch sich Rechen- und Eingabezeit überlagern ließen, was beim Umfang des verarbeiteten Unterlagematerials einen erheblichen Zeitgewinn bewirkte. Zu jedem eingegebenen  $y_1$  wurde automatisch vom Lochstreifen oder aus dem Speicher das entsprechende  $x_1$  in das Rechenwerk eingelesen.

- Nach Eingabe aller Werte errechnete der zweite Programmteil die Größen

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}, \bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}, S_{xx}, S_{yy}, S_{xy}$$

- um daraus im dritten Teil die gesuchten Werte

$$b, B, s^2$$

zu bestimmen.

Um für die spätere Durchführung von Tests gleich die nötigen Größen zur Verfügung zu haben, wurden für jedes gerechnete Problem nebst seiner Kennzahl folgende Resultate und Zwischenergebnisse herausgedruckt:

$$\begin{aligned} &b S_{xy}, S_{yy} - b S_{xy}, \\ &S_{xx}, S_{yy}, S_{xy}, N, \\ &\bar{x}, \bar{y}, b, B, s^2 \end{aligned}$$

### 5.3 Gliederung der Analyse

Nachdem sich die Studie mit dem Einübungsverlauf von Arbeitsgängen befaßt, ist nach den Feststellungen in der Einleitung, die Analyse nach Einübungsstadien getrennt durchzuführen.

Bei den vorliegenden Gegebenheiten läßt sich der Einübungsprozeß in folgende Elemente gliedern:

- Aufwandverlauf während des Arbeitstages
- Aufwandverlauf innerhalb eines Auftrages
- Aufwandverlauf identischer Aufträge in unregelmäßiger Folge.

Grundsätzlich sollten sämtliche Aufnahmen nach diesen drei Gesichtspunkten untersucht werden, damit auch die gegenseitige Abhängigkeit geklärt werden könnte. Je nach

Beschaffenheit des Unterlagenmaterials werden sich die Verläufe während des Arbeitstages und über identische Aufträge aber nur für einzelne Abteilungen durchführen lassen.

## 6 AUFWANDVERLAUF WÄHREND DES ARBEITSTAGES

Die Produktionsplanung und -steuerung kann aus verschiedenen Gründen nur in äußerst seltenen Fällen die Ausführungszeit einer Arbeit auf Termineinheiten kleiner einem Tag vorausbestimmen. Dadurch läßt sich der Einfluß der Tageszeit auf den Aufwandverlauf von dieser Seite auch nicht berücksichtigen. Die Quantifizierung wird in diesem Fall eher von wissenschaftlichem Interesse sein.

Um das Problem erschöpfend zu bearbeiten, sind die Verläufe während Vor- und Nachmittags und die Auswirkung von Arbeitsunterbrüchen während des Mittags und der Nacht zu untersuchen.

Damit die Meßwerte zu diesem Zweck verwendet werden können, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- die einzelnen Aufträge müssen sich über mehrere Tage erstrecken
- es muß je Halbtag eine genügende Anzahl Einzelwerte vorliegen
- die Meßeinheiten dürfen sich nicht über den Mittag- oder Nachtunterbruch erstrecken.

Diese Einschränkungen lassen somit lediglich die Aufnahmen der Schwachstromapparate-Montage-Abteilung (2) zur Analyse dieses Verlaufes verwenden.

### 6.1 Voruntersuchung

Vorerst sollen folgende Fragen abgeklärt werden:

- Nimmt der Zeitaufwand je Meßeinheit während des Vor- und Nachmittags ab, das heißt ist in diesen Zeitabschnitten eine Einübung feststellbar?
- Bewirken Mittags- und Nachtunterbruch einen Übungsverlust, das heißt ist der spezifische Zeitaufwand nach dem Unterbruch größer als vor dem Unterbruch?

Zu diesem Zweck werden die Zeitaufwände der ersten und letzten drei Meßeinheiten addiert und miteinander verglichen. Durch das Zusammenfassen dreier Einheiten sollen die zufälligen Streuungen der Einzelwerte etwas geglättet werden.

Die Summe dreier Einzelwerte erhalten die Bezeichnungen

$$T_{11}, T_{21}, t_{11}, t_{21},$$

mit folgender Bedeutung

T Vormittag

t Nachmittag

1 die ersten drei Werte des Halbtages

2 die letzten drei Werte des Halbtages

i fortlaufende Nummer des Untersuchungstages

Ist nun

$$T_{11} \leq T_{21}, t_{11} \leq t_{21}$$

so ist der Aufwandverlauf über den entsprechenden Halbtag fallend bzw. steigend.

Analoge Vergleiche zeigen, ob der Mittag- oder Nachtunterbruch eine Aufwandzunahme oder -abnahme bewirken

$$\text{Mittag: } T_{21} \leq t_{11}$$

$$\text{Nacht: } t_{21} \leq T_{11+1}$$

Bei der Durchführung ist zu achten, daß nur Werte von gleichen Aufträgen miteinander verglichen werden.

Diese Vergleiche werden für sämtliche untersuchten Tage durchgeführt und die Häufigkeit für «fallend» bzw. «steigend» nach Versuchspersonen getrennt aufgenommen.

Ob nun beispielsweise der Vormittagsverlauf eine fallende oder steigende Charakteristik hat, hängt davon ab, welche Häufigkeit überwiegt. Sind beide Häufigkeiten gleich groß, ist der Verlauf horizontal oder der Unterbruch hat keinen Einfluß auf den Aufwand. Es erübrigt sich somit auch das getrennte Erfassen der seltenen Fälle, daß die beiden verglichenen Werte gleich groß sind.

Da diese Untersuchung als Stichprobe einer unbekanntem Grundgesamtheit zu betrachten ist, muß geprüft werden, ob die Häufigkeiten für «fallend» und «steigend» in jeder Betrachtung nur zufällig oder gesichert voneinander verschieden sind. Die Prüfung erfolgt mit Hilfe des in der mathematischen Statistik allgemein bekannten Chi-Quadrat-Tests (LINDER, Abschnitt 31).

Hat die Häufigkeit für «fallend» (f) den Betrag a und für «steigend» (s) den Betrag b und verhalten sich die entsprechenden Werte der theoretischen Häufigkeiten

$$\varphi_f : \varphi_s = 1 : \lambda$$

so errechnet sich das Chi-Quadrat  $\chi^2$  nach der Formel:

$$\chi^2 = \frac{(\lambda a - b)^2}{\lambda(a + b)}$$

Da im Vorliegenden lediglich geprüft werden soll, ob die beiden Häufigkeiten gleich groß seien, wird

$$\varphi_f : \varphi_s = 1 : 1$$

also

$$\lambda = 1$$

und somit

$$\chi^2 = \frac{(a - b)^2}{a + b}$$

Liegen nur wenige Werte vor (Versuchsperson 22) muß die Korrektur von YATES angebracht werden und das Chi-Quadrat nach der Formel

$$\chi^2 = \frac{(|a - b| - 1)^2}{a + b}$$

berechnet werden.

Da in dieser Untersuchung nur  $M = 2$  Häufigkeiten verglichen werden, ergibt sich der Freiheitsgrad

$$n = M - 1 = 1$$

Der entsprechende tabellierte Wert für Chi-Quadrat ist somit bei einem Fehlschlußrisiko von  $P = 0,05$

$$\chi^2_{n=1, 0,05} = 3,841$$

Ist das gerechnete Chi-Quadrat größer als das tabellierte, heißt dies, daß die beiden Häufigkeiten voneinander gesichert verschieden sind und eine Änderungstendenz vorliegt.

Die Ergebnisse dieser Voruntersuchung sind in Tabelle 11 zusammengefaßt.

Verlauf	Person	Häufigkeit		Chi-Quadrat	Trend
		steigend	fallend		
Vormittag	21	17	71	33,10	fallend
	22	4	10	1,79	
	Total	21	81	35,30	
Nachmittag	21	36	41	0,32	horizontal
	22	7	4	0,36	
	Total	43	45	0,05	
Mittag	21	45	23	7,10	steigend
	22	6	6	0,83	
	Total	51	29	6,05	
Nacht	21	39	22	4,75	steigend
	22	5	3	0,13	
	Total	44	25	5,22	

Tabelle 11 Chi-Quadrat-Test «Voruntersuchung»

#### Diskussion:

Da bei der Versuchsperson 22 keine Tendenzen festgestellt werden können, liegt die Vermutung nahe, daß sich trotz der Korrektur nach YATES die Betrachtungen auf zu wenig Meßwerte stützen müssen. Werden die entsprechenden Häufigkeiten der beiden Versuchspersonen zusammengefaßt und daraus die Chi-Quadrate gerechnet, ergeben sich Werte, die in jedem Fall deutlich vom Testwert verschieden sind und damit der Trend der Verläufe verantwortbar dargestellt werden kann:

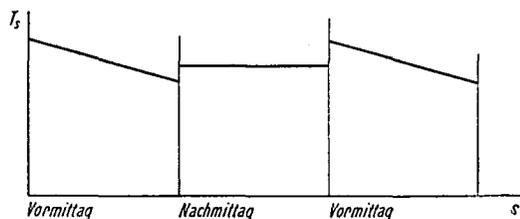


Abb. 12 Prinzipieller Aufwandverlauf

Gestützt auf das positive Ergebnis der Voruntersuchung sind in einem weiteren Schritt diese qualitativen Feststellungen zu quantifizieren.

#### 6.2 Aufwandsverlauf während der Arbeitszeit

Eine umfassende Betrachtung dieses Problemkreises wirft folgende Fragen auf:

- Werden die Halbtagsverläufe besser durch eine Gerade oder Exponentialkurve dargestellt?
- Sind die Ablaufexponenten  $b$  der Vor- und Nachmittagsverläufe voneinander verschieden und ungleich Null?
- Verändern sich die täglichen Verläufe über mehrere Arbeitstage?
- Welche Größenordnung hat der mittlere Ablaufexponent der Grundgesamtheit?

Zur Bearbeitung dieser Probleme werden aus den Aufnahmen jeder Versuchsperson je zwei Aufträge herausgegriffen, die sich über möglichst viele Arbeitstage erstrecken.

#### Versuchsperson 21

##### 1 Auftragsnummer 21-2

Objekt Vormontage Auslösemagnet  
 Operation Spule einführen und vernieten an Handpresse  
 Stückzahl etwa 7500 Stück  
 Meßeinheit 50 Stück  
 Stückzeit etwa 0,3 Minuten  
 Auftragsdauer 5 Tage

##### 2 Auftragsnummer 21-5 (a, b)

Objekt Motorschutzschalter, Endmontage  
 Operation Deckel fertigstellen  
 Stückzahl 1000 Stück (a), 1000 Stück (b)  
 Meßeinheit 5 Stück  
 Stückzeit etwa 3 Minuten  
 Auftragsdauer 13 Tage (a), 10 Tage (b)

#### Versuchsperson 22

##### 1 Auftragsnummer 22-1

Objekt Bimetallpaket, Vormontage  
 Operation Montage nach Fabrikationsplan  
 Stückzahl 1750 Stück  
 Meßeinheit 10 Stück  
 Stückzeit etwa 1,4 Minuten  
 Auftragsdauer 6 Tage

##### 2 Auftragsnummer 22-2

Objekt Bimetallpaket, Endmontage  
 Operation pressen und nieten  
 Stückzahl 3100 Stück  
 Meßeinheit 10 Stück  
 Stückzeit etwa 1,3 Minuten  
 Auftragsdauer 8 Tage

Abschnitt 5.1 hat gezeigt, daß der Aufwandsverlauf durch die statistischen Größen

- $b$  Regressionskoeffizient
- $B$  Bestimmtheitsmaß
- $s$  Reststreuung um die Regressionslinie

numerisch formuliert werden kann. Da aber in dieser Betrachtung zudem die Veränderungen der täglichen Verläufe über mehrere Arbeitstage zu untersuchen sind, ist die Lage jeder Linie im Koordinatennetz noch durch den mittleren spezifischen Arbeitsaufwand festzuhalten.

Da sowohl linearer wie exponentieller Verlauf durch doppelte log-Transformation des letztern als lineare Regression gerechnet werden, ist in beiden Fällen zur Beantwortung der ersten Frage die Linearität der Regression zu untersuchen. Wie weiter unten gezeigt wird, existiert dafür ein spezielles Verfahren. Dieses verlangt die Aufteilung der Meßpunkte in Klassen. Da aber die Aufwandverläufe je Halbtag durch etwa 15–20 Werte dargestellt werden, lassen sich für das erwähnte Verfahren zu wenig Klassen bilden. Diese Schwierigkeit wird folgendermaßen umgangen:

Sämtliche Halbtagsverläufe werden sowohl linear als auch exponential gerechnet und die Bestimmtheitsmaße B miteinander verglichen. Das Regressionsmodell mit dem größeren B wird somit den Verlauf besser approximieren.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Regressionsanalyse zusammengestellt. Jede Zeile repräsentiert den Verlauf eines Halbtages. N ist die Zahl der Meßwerte und Nr. die fortlaufende Nummer des Arbeitstages.

$$T = \frac{\sum T_s}{N} \quad y = \frac{\sum \log_{10} T_s}{N} = \frac{\sum y_s}{N}$$

### ERGEBNISSE DER REGRESSIONSANALYSE

#### 21-2 Vormittag

linear

Nr.	N	T	b	s <sup>2</sup>	B
2	22	12,09	-0,090	2,43	0,129
3	25	10,36	-0,053	0,96	0,142
4	20	9,60	+0,063	2,23	0,062
5	24	9,25	+0,014	0,83	0,012

Tabelle 12

exponential

Nr.	N	y	b	s <sup>2</sup> (10 <sup>-2</sup> )	B
2	22	1,078	-0,060	0,34	0,125
3	25	1,013	-0,058	0,13	0,261
4	20	0,977	+0,009	0,44	0,002
5	24	0,964	-0,004	0,18	0,002

Tabelle 13

#### 21-2 Nachmittag

linear

Nr.	N	T	b	s <sup>2</sup>	B
1	9	13,55	-0,217	1,35	0,230
2	15	12,60	+0,046	1,62	0,028
3	19	10,26	+0,025	2,08	0,010

Tabelle 14

exponential

Nr.	N	y	b	s <sup>2</sup> (10 <sup>-2</sup> )	B
1	9	1,131	-0,066	0,13	0,275
2	15	1,098	+0,050	0,16	0,163
3	19	1,008	+0,011	0,34	0,005

Tabelle 15

#### 21-5a Vormittag

linear

Nr.	N	T	b	s <sup>2</sup>	B
1	10	14,60	-0,206	1,86	0,190
2	18	14,22	-0,180	3,09	0,240
3	19	12,84	-0,005	1,21	0,001
4	14	12,43	-0,026	0,94	0,014
5	22	11,77	-0,006	0,49	0,003
6	22	11,81	-0,027	1,13	0,028
7	24	10,25	-0,102	1,48	0,267
8	27	10,51	+0,003	0,46	0,097
9	23	10,96	-0,092	0,69	0,372
10	24	11,00	-0,095	0,62	0,430
11	24	10,83	-0,039	0,62	0,115
12	23	11,30	+0,022	0,97	0,023
13	26	10,23	-0,023	1,16	0,028

Tabelle 16

exponential

Nr.	N	y	b	s <sup>2</sup> (10 <sup>-2</sup> )	B
1	10	1,163	-0,069	0,14	0,271
2	18	1,149	-0,088	0,28	0,262
3	19	1,107	-0,018	0,12	0,033
4	14	1,093	-0,024	0,10	0,065
5	22	1,070	-0,013	0,06	0,037
6	22	1,069	-0,008	0,16	0,005
7	24	1,006	-0,084	0,29	0,245
8	27	1,021	+0,019	0,08	0,023
9	23	1,038	-0,077	0,07	0,507
10	24	1,040	-0,070	0,10	0,400
11	24	1,034	-0,032	0,10	0,126
12	23	1,052	+0,006	0,14	0,004
13	26	1,007	-0,046	0,19	0,137

Tabelle 17

21-5a Nachmittag

linear

Nr.	N	T	b	s <sup>2</sup>	B
1	13	14,92	-0,055	1,31	0,037
3	16	12,31	-0,122	0,88	0,290
5	17	11,82	-0,056	0,48	0,153
6	20	10,60	-0,140	1,99	0,267
7	18	10,83	-0,018	1,90	0,005
8	16	11,12	+0,062	1,18	0,073
9	18	11,00	+0,025	1,48	0,012
10	18	11,17	+0,048	1,96	0,035
11	18	10,94	-0,044	1,37	0,042
12	19	11,26	-0,077	0,25	0,442
13	14	10,64	-0,090	0,61	0,200

Tabelle 18

exponential

Nr.	N	y	b	s <sup>2</sup> (10 <sup>-2</sup> )	B
1	13	1,173	-0,018	0,11	0,034
3	16	1,089	-0,068	0,09	0,393
5	17	1,072	-0,028	0,07	0,129
6	20	1,021	-0,103	0,28	0,329
7	18	1,032	-0,026	0,29	0,029
8	16	1,044	+0,012	0,19	0,010
9	18	1,039	+0,004	0,24	0,001
10	18	1,045	+0,048	0,25	0,106
11	18	1,037	-0,026	0,19	0,046
12	19	1,051	-0,045	0,03	0,418
13	14	1,026	-0,054	0,09	0,277

Tabelle 19

21-5b Vormittag

linear

Nr.	N	T	b	s <sup>2</sup>	B
2	19	11,68	-0,065	1,04	0,119
3	23	11,70	-0,036	0,84	0,068
4	22	11,68	-0,141	1,16	0,429
5	25	10,64	+0,006	0,86	0,002
6	22	11,04	-0,028	0,51	0,061
7	25	11,00	-0,053	2,54	0,059
8	21	10,38	-0,030	0,75	0,046
9	23	10,39	-0,039	0,76	0,086
10	25	10,52	+0,005	0,70	0,002
11	6	10,17	-0,143	1,12	0,074

Tabelle 20

exponential

Nr.	N	y	b	s <sup>2</sup> (10 <sup>-2</sup> )	B
2	19	1,066	-0,047	0,13	0,181
3	23	1,067	-0,031	0,11	0,107
4	22	1,065	-0,085	0,16	0,369
5	25	1,025	-0,017	0,13	0,032
6	22	1,042	-0,032	0,07	0,162
7	25	1,038	-0,026	0,33	0,028
8	21	1,015	-0,032	0,12	0,101
9	23	1,015	-0,045	0,12	0,186
10	25	1,021	-0,004	0,11	0,002
11	6	1,005	-0,056	0,19	0,146

Tabelle 21

21-5b Nachmittag

linear

Nr.	N	T	b	s <sup>2</sup>	B
1	7	12,43	-0,286	2,29	0,167
3	15	11,93	+0,061	0,76	0,094
4	16	11,75	-0,165	1,13	0,369
5	19	11,00	+0,111	1,00	0,290
6	18	10,67	-0,050	0,55	0,119
7	18	10,89	-0,014	1,22	0,005
9	21	10,14	+0,042	0,91	0,072
10	19	10,53	+0,009	0,86	0,003

Tabelle 22

exponential

Nr.	N	y	b	s <sup>2</sup> (10 <sup>-2</sup> )	B
1	7	1,092	-0,072	0,26	0,174
3	15	1,076	+0,004	0,11	0,002
4	16	1,068	-0,096	0,10	0,530
5	19	1,039	+0,060	0,16	0,223
6	18	1,027	-0,038	0,08	0,177
7	18	1,035	+0,012	0,19	0,011
9	21	1,004	+0,034	0,15	0,089
10	19	1,021	-0,003	0,14	0,001

Tabelle 23

22-1 Vormittag

linear

Nr.	N	T	b	s <sup>2</sup>	B
1	15	14,80	-0,221	1,28	0,456
2	18	13,89	-0,165	3,04	0,214
3	18	14,22	+0,023	1,18	0,013
4	18	14,06	-0,044	1,00	0,056
5	21	12,90	-0,026	2,91	0,009
6	17	14,53	-0,098	2,55	0,093

Tabelle 24

exponential

Nr.	N	y	b	s <sup>2</sup> (10 <sup>-2</sup> )	B
1	15	1,168	-0,086	0,10	0,457
2	18	1,114	-0,081	0,22	0,274
3	18	1,152	+0,023	0,10	0,063
4	18	1,147	-0,034	0,08	0,160
5	21	1,107	-0,018	0,38	0,012
6	17	1,160	-0,054	0,19	0,161

Tabelle 25

22-1 Nachmittag

linear

Nr.	N	T	b	s <sup>2</sup>	B
1	14	14,21	+0,068	0,94	0,085
2	14	13,79	-0,023	0,53	0,000
3	14	13,29	-0,070	1,48	0,060
4	13	13,62	+0,049	2,06	0,019
5	6	15,17	+0,543	2,42	0,348
6	5	14,00	-0,200	0,53	0,200

Tabelle 26

exponential

Nr.	N	y	b	s <sup>2</sup> (10 <sup>-2</sup> )	B
1	14	1,152	+0,014	0,09	0,026
2	14	1,139	-0,000	0,05	0,000
3	14	1,122	-0,031	0,14	0,075
4	13	1,113	+0,031	0,18	0,062
5	6	1,118	+0,080	0,22	0,226
6	5	1,146	-0,023	0,05	0,090

Tabelle 27

22-2 Vormittag

linear

Nr.	N	T	b	s <sup>2</sup>	B
2	19	13,68	-0,016	1,64	0,005
3	18	13,28	-0,092	1,22	0,173
4	20	12,90	-0,077	2,22	0,090
5	18	13,44	-0,087	2,30	0,090
6	21	12,43	-0,123	1,55	0,285
7	18	13,94	-0,061	4,69	0,023
8	17	12,76	+0,039	5,10	0,008

Tabelle 28

exponential

Nr.	N	y	b	s <sup>2</sup> (10 <sup>-2</sup> )	B
2	19	1,134	-0,008	0,17	0,005
3	18	1,121	-0,059	0,11	0,277
4	20	1,108	-0,034	0,23	0,061
5	18	1,113	-0,032	0,24	0,054
6	21	1,092	-0,066	0,19	0,235
7	18	1,140	-0,029	0,40	0,027
8	17	1,101	+0,020	0,50	0,010

Tabelle 29

22-2 Nachmittag

linear

Nr.	N	T	b	s <sup>2</sup>	B
1	5	12,00	-0,400	2,13	0,200
2	13	14,46	-0,192	1,50	0,290
3	14	12,57	+0,167	2,26	0,190
4	12	13,17	+0,287	2,19	0,349
5	13	12,69	+0,137	0,85	0,269
7	13	13,46	+0,055	2,24	0,022
8	7	12,57	-0,143	1,83	0,059

Tabelle 30

exponential

Nr.	N	y	b	s <sup>2</sup> (10 <sup>-2</sup> )	B
1	5	1,077	-0,107	0,24	0,327
2	13	1,158	-0,062	0,14	0,242
3	14	1,096	+0,062	0,23	0,165
4	12	1,112	+0,076	0,22	0,230
5	13	1,102	+0,034	0,11	0,111
7	13	1,127	+0,040	0,21	0,085
8	7	1,097	-0,040	0,22	0,072

Tabelle 31

Die kleinen Beträge für die einzelnen Bestimmtheitsmaße lassen sich am besten am Extremfall  $B = 0$  veranschaulichen.

Ist  $B = 0$   
 muß  $S_{xy}^2 = 0$   
 sein, und somit wird  $b_{xy} = b_{yx} = 0$

das heißt die Regressionsgerade  $y = f(x)$  läuft parallel zur x-Achse. Da die Einübung erwartungsgemäß sehr flach

verlaufen muß, errechnen sich sehr kleine b-Werte, wobei sich eben auch sehr kleine B-Werte ergeben. Dies muß dahin ausgelegt werden, daß der spezifische Aufwand nur in sehr geringem Maße von der Größe der Wiederholung abhängig ist.

Die  $B_i$  jedes Halbtagsverlaufes werden in der folgenden Zusammenstellung für jedes Regressionsmodell je Auftrag summiert.

		$\Sigma B_i$	
Auftrags-Nr.	Halbtag	linear	exponential
21-2	Vormittag	0,345	0,390
	Nachmittag	0,268	0,443
21-5a	Vormittag	1,808	2,115
	Nachmittag	1,556	1,772
21-5b	Vormittag	0,946	1,314
	Nachmittag	1,119	1,201
Total (21)		6,042	7,241
22-1	Vormittag	0,841	1,127
	Nachmittag	0,712	0,479
22-2	Vormittag	0,674	0,669
	Nachmittag	1,379	1,232
Total (22)		3,606	3,507

Tabelle 32

Die relativen Differenzen der beiden Totale ergeben für

Person 21 16,5%

Person 22 -2,8%

wobei jeweils die größere Summe zu 100% angenommen wird. Demnach kommt bei 21 die doppelte log-Regression, bei 22 eher die lineare Regression dem Verlauf der Meßwerte näher. Auf Grund der Feststellungen, daß

- die Analyse bei 21 auf wesentlich mehr Meßunterlagen beruht,
  - bei 21 der Unterschied deutlicher zum Ausdruck kommt,
  - andere untersuchte Elemente der beiden Versuchspersonen nicht wesentlich voneinander verschieden sind,
- wird für das Weitere die doppelte log-Regression als geeignetere Approximation betrachtet. Eine allgemein gültige Beantwortung dieser Frage wird aber erst auf Grund analoger Untersuchungen mit mehreren Personen zu verantwortet sein.

Um die weitem eingangs aufgeworfenen Fragen beantworten zu können, muß abgeklärt werden, in welcher Form sich die  $b_i$  repräsentieren lassen.

So muß untersucht werden, ob sich die  $b_i$  mit zunehmender Nummer des Arbeitstages verändern. Da anzu-

Vormittag

Auftrags-Nr.	n	$\bar{b}$	k	$s^2(10^{-2})$
21-2	4	-0,0284	+0,115	0,061
21-5a	13	-0,0391	+0,030	0,132
21-5b	10	-0,0380	+0,017	0,053
22-1	6	-0,0422	+0,073	0,158
22-2	7	-0,0300	+0,009	0,102

Tabelle 33

Nachmittag

Auftrags-Nr.	n	$\bar{b}$	k	$s^2(10^{-2})$
21-2	3	-0,0017	+0,187	0,302
21-5a	11	-0,0279	+0,025	0,181
21-5b	8	-0,0123	+0,089	0,244
22-1	6	+0,0118	+0,019	0,205
22-2	7	+0,0005	+0,144	0,368

Tabelle 34



Abb. 13  $b = f(i)$

nehmen ist, daß die Halbtagsverläufe Abschnitte aus einer Einübungskurve über den ganzen Auftrag sind, werden erstere flacher, die  $b_i$  also gegen 0 streben. (Abb. 13)

Es ist somit angebracht, die Abhängigkeit des Ablaufexponenten  $b$  von der Nummer des Arbeitstages  $i$  ebenfalls mit doppelter log-Regression zu bestimmen. Die obigen Tabellen enthalten aber auch vereinzelte positive  $b_i$ . Dieser Umstand verursacht bei log-Transformation starke Verzerrungen mit entsprechender Verfälschung der Resultate. Aus diesem Grunde kann diese Untersuchung nur in einem einfachen  $b - \log i$  Koordinatensystem gerechnet werden.

In den Tabellen 33 und 34 sind die Ergebnisse dieser Analyse zusammengestellt. Es bedeuten

- n Anzahl Halbtage des Verlaufes
- $\bar{b} = \frac{\Sigma b_i}{N}$
- k Regressionskoeffizient
- $s^2$  Quadrat der Reststreuung der  $b_i$  um die Regression

Die Kurvenexponenten des  $b - \log i$  Verlaufes haben durchweg positive Vorzeichen, womit die Vermutung bestätigt wird, daß die  $b_i$  der Halbtagsverläufe mit zunehmender Anzahl Tage gegen Null streben, das heißt die Kurven werden flacher. Da die  $k$  kleine Beträge darstellen, ist eine Prüfung angebracht, ob sie statistisch gesichert von Null verschieden sind.

Diese Prüfung wird zweckmäßig mit Hilfe eines t-Tests durchgeführt (LINDER, Abschnitt 611.4). Um festzustellen, ob die ermittelten  $k$  einer Grundgesamtheit mit dem Durchschnitt  $\mu$  entstammen, wird das  $t$  nach folgender Formel bestimmt:

$$t = \frac{k - \mu}{s} \sqrt{N s_{xx}}$$

wobei im vorliegenden Fall

$$S_{xx} = \sum (\log i)^2 - \frac{(\sum \log i)^2}{N}$$

ist. Da untersucht wird, ob k von Null verschieden ist, wird

$$\mu = 0$$

und somit

$$t = k \sqrt{\frac{S_{xx}}{s^2}}$$

wobei die Zahl der Freiheitsgrade

$$n = N - 2$$

Ist nun das gerechnete t kleiner als der entsprechende Tabellenwert  $t_{0,05}$ , so bedeutet dies, daß k nicht statistisch gesichert von Null abweicht. Nachstehende Tabelle zeigt das Testergebnis.

Auftrags-Nr.	Vormittag		Nachmittag	
	t	$t_{0,05}$	t	$t_{0,05}$
21-2	2,10	4,303	1,13	12,706
21-5a	0,95	2,201	0,60	2,262
21-5b	0,71	2,306	1,45	2,447
22-1	1,18	2,776	0,28	2,776
22-2	0,21	2,571	1,72	2,571

Tabelle 35

Die k sind demnach nicht wesentlich von Null verschieden. Da aber alle k positiv sind, ist das Testergebnis dahin zu interpretieren, daß bei den kleinen k-Beträgen und den vorliegenden Streuungen der Stichprobenumfang nicht genügt, den Trend statistisch gesichert festzustellen.

Obschon vermutlich eine Abhängigkeit zwischen den  $b_1$  und der Nummer des Arbeitstages vorliegt, ist es zu verantworten, diese ihres geringen Betrages wegen in der anschließenden Betrachtung nicht zu berücksichtigen.

Die Abklärung der Unterschiede der  $b_1$  zwischen den verschiedenen Gruppen (Aufträge, Personen, Halbtage) erfolgt anhand einer hierarchischen Streuungserlegung.

Die Theorie wie die Rechentechnik der Streuungserlegung wird in der Literatur eingehend behandelt (LINDER, Abschnitt 5). In der vorliegenden Arbeit wird sie hauptsächlich zur Schätzung der Anteile bestimmter Ursachen und Ursachengruppen an der gesamten Streuung der gerechneten Ablaufexponenten benutzt.

Die hierarchische Streuungserlegung erlaubt, durch schrittweises Zusammenfassen von Aufnahmen-Gruppen, die Zunahme der Streuung der  $b_1$  festzustellen und damit Rückschlüsse auf die Gruppenunterschiede zu ziehen.

Das Prinzip der Streuungserlegung sei im folgenden kurz an einem Beispiel demonstriert:

Es liegen zwei Gruppen ( $N_1, N_2$ ) von Meßwerten ( $x_1', x_1''$ ) vor. Werden beide Gruppen zusammengefaßt, so kann die Gesamtstreuung gegliedert werden in eine

Streuung innerhalb und eine zwischen den Gruppen. Zur rechnerischen Darstellung werden die in der mathematischen Statistik üblichen Ausdrücke eingeführt:

Summe der Quadrate (SQ)

$$SQ_{\text{insgesamt}} = \sum x_1'^2 + \sum x_1''^2 - \frac{(\sum x_1' + \sum x_1'')^2}{N_1 + N_2}$$

$$SQ_{\text{zwischen Gruppen}} = \frac{(\sum x_1')^2}{N_1} + \frac{(\sum x_1'')^2}{N_2} - \frac{(\sum x_1' + \sum x_1'')^2}{N_1 + N_2}$$

Die Minuenden und Subtrahenden lassen sich entsprechend der Anzahl Gruppen beliebig vergrößern.

Zwischen den SQ gilt die Beziehung

$$SQ_{\text{insgesamt}} = SQ_{\text{zwischen den Gruppen}} + SQ_{\text{innerhalb der Gruppen}}$$

woraus sich SQ innerhalb der Gruppen ermitteln läßt.

Freiheitsgrade (FG)

$$FG_{\text{insgesamt}} = N_1 + N_2 - 1$$

$$FG_{\text{zwischen den Gruppen}} = M - 1$$

wobei M = Anzahl Gruppen

Aus der Gleichung

$$FG_{\text{insgesamt}} = FG_{\text{zwischen den Gruppen}} + FG_{\text{innerhalb der Gruppen}}$$

läßt sich «FG innerhalb» ebenfalls bestimmen.

Durchschnittsquadrate (DQ)

Die drei DQ errechnen sich durch Division der entsprechenden Elemente

$$DQ = \frac{SQ}{FG}$$

Das DQ entspricht der Streuung oder dem Quadrat der Standardabweichung  $s^2$  der entsprechenden Gruppe.

Werden zwei solche Streuungserlegungssysteme zusammengefaßt (hierarchische), so können die analogen SQ addiert werden, wobei lediglich das SQ insgesamt neu über alle Werte zu rechnen ist. Als neue Unbekannte kommt das Element «zwischen den Systemen» dazu, mit

$$FG_s = \text{Anzahl Systeme} - 1$$

Das  $SQ_s$  rechnet sich aus der Beziehung

$$SQ_s = SQ_{\text{insgesamt}} - SQ_{\text{übrige}}$$

Um festzustellen, ob eine Streuung größer als die andere sei, wird der F-Test durchgeführt:

$$F = \frac{s_a^2}{s_b^2} = \frac{DQ_a}{DQ_b}$$

Der zugehörige Tabellenwert wird mit den Freiheitsgraden

$$n_1 = FG_a$$

$$n_2 = FG_b$$

gefunden. Der Unterschied ist wiederum statistisch gesichert, wenn

$$F_{\text{gerechnet}} > F_{\text{Tabelle}}$$

Die Streuungserlegung der  $b_1$  je Versuchsperson und Halbtag zeigen nachstehende Tabellen.

Arbeiterin 21

Vormittag

Streuung	FG	SQ	DQ
zwischen Aufträgen	2	0,000364	0,000182
innerhalb Aufträgen	24	0,024102	0,001004
insgesamt	26	0,024466	0,000941

Tabelle 36

Nachmittag

Streuung	FG	SQ	DQ
zwischen Aufträgen	2	0,001618	0,000809
innerhalb Aufträgen	19	0,044015	0,002317
insgesamt	21	0,045633	0,002173

Tabelle 37

Arbeiterin 22

Vormittag

Streuung	FG	SQ	DQ
zwischen Aufträgen	1	0,000477	0,000477
innerhalb Aufträgen	11	0,013720	0,001247
insgesamt	12	0,014197	0,001183

Tabelle 38

Nachmittag

Streuung	FG	SQ	DQ
zwischen Aufträgen	1	0,000408	0,000408
innerhalb Aufträgen	11	0,037836	0,003440
insgesamt	12	0,038244	0,003187

Tabelle 39

Die Streuung der  $b_i$  zwischen den Aufträgen sind durchwegs kleiner als diejenigen innerhalb. Die Ursache liegt darin, daß die Durchschnitte  $\bar{b}$  der einzelnen Aufträge nur wenig voneinander abweichen, die Streuungen inner-

halb der Aufträge aber relativ groß sind, so daß sie sich bei der Zusammennahme zu einem großen Teil überdecken. Der F-Test erübrigt sich somit.

In der folgenden Zusammenstellung werden je Halbtage die Versuchspersonen zusammengefaßt.

Arbeiterinnen 21 + 22

Vormittag

Streuung	FG	SQ	DQ	F	$F_{0,05}$
zwischen Personen	1	0,009841	0,009841	9,00	4,17
zwischen Aufträgen	3	0,000841	0,000280		
innerhalb Aufträgen	35	0,037822	0,001081		
insgesamt	39	0,048524	0,001244		

Tabelle 40

Nachmittag

Streuung	FG	SQ	DQ	F	$F_{0,05}$
zwischen Personen	1	0,003923	0,003923	1,38	4,17
zwischen Aufträgen	3	0,002026	0,000675		
innerhalb Aufträgen	30	0,081051	0,002702		
insgesamt	34	0,087000	0,002559		

Tabelle 41

Die Streuung innerhalb der Aufträge wird als Basisstreuung betrachtet, da sie sich auf die kleinste mögliche Betrachtungsgruppe bezieht. Die in dieser Betrachtung neu hinzukommende Streuung zwischen den Personen ist nun mit der Basisstreuung zu vergleichen. Der F-Test zeigt, daß die  $b_i$  der Vormittagsverläufe bei den beiden Arbeiterinnen verschieden sein müssen, währenddem die Nachmittagsverläufe zum gleichen Kollektiv gehören.

Auch hier weist der F-Test auf Unterschiede der  $b_i$  zwischen den Personen und Halbtagen, die aber in diesem Fall nur schwach gesichert sind. Es wäre durchaus möglich, daß eine erweiterte Untersuchung diese Unterschiede noch ausgleichen würde.

Der Durchschnitt aus sämtlichen  $b_i$  der Untersuchung beträgt

$$\bar{b} = -0,0242$$

Die Standardabweichung der Einzelwerte von  $\bar{b}$  ist

$$s_b = \pm \sqrt{DQ_{\text{insgesamt}}} = \pm \sqrt{0,001940} = \pm 0,0441$$

während die Standardabweichung des Durchschnittes den Betrag hat

$$s_{\bar{b}} = \pm \sqrt{\frac{DQ_{\text{insgesamt}}}{N}} = \pm \sqrt{\frac{0,001940}{75}} = \pm 0,0048$$

Der Vertrauensbereich des Durchschnittes bei einem Fehlschlußrisiko von 5% liegt in den Grenzen

$$\pm t_{0,05} \cdot s_{\bar{b}} = \pm 1,99 \cdot 0,0048 = 0,0096$$

Im nächsten Schritt werden noch die Halbtage zusammengefaßt.

Vormittag und Nachmittag

Streuung	FG	SQ	DQ	F	$F_{0,05}$
zwischen Halbtagen	1	0,008072	0,008072	4,76	4,00
zwischen Personen	2	0,013764	0,006882	3,76	3,15
zwischen Aufträgen	6	0,002867	0,000478		
innerhalb Aufträgen	65	0,118873	0,001829		
insgesamt	74	0,143576	0,001940		

Tabelle 42

Der Wert  $t_{0,05}$  wird an Stelle des üblichen  $u_{0,05}$  genommen, da die Stichprobe noch relativ klein ist.  $t_{0,05}$  bei  $n = 74$  ist aber bereits nahe dem  $u_{0,05}$ .

Der mittlere Ablaufexponent des Halbtagsverlaufes der Grundgesamtheit liegt somit im Bereich

$$\beta = -0,0242 \pm 0,0096$$

Die Aussage ließe sich auf Grund der Streuungszерlegung präzisieren, wenn für die Halbtage und jede Arbeiterin getrennt die  $\bar{b}$  berechnet würden. Darauf wird verzichtet, da eine Aufteilung für die Praxis belanglos ist, die Unterschiede eventuell nur im vorliegenden Untersuchungsumfang gesichert sind und das Ziel dieser speziellen Betrachtung lediglich in einer Abschätzung der Größenordnung der  $b_1$  liegt.

### 6.3 Einfluß von Arbeitsunterbrüchen

Die Differenz der Summen der drei Meßwerte vor und derjenigen der drei Meßwerte nach dem Arbeitsunterbruch wird als Maß des Unterbrucheinflusses betrachtet. Um die verschiedenen Aufträge miteinander vergleichen zu können, wird die Differenz in Prozenten der Summe vor dem Unterbruch ausgedrückt. Mit den Bezeichnungen aus Abschnitt 6.1 gilt

$$\text{Mittag} \quad D_M = \frac{T_{21} - t_{11}}{T_{21}} \cdot 100 [\%]$$

$$\text{Nacht} \quad D_N = \frac{t_{21} - T_{11+1}}{t_{21}} \cdot 100 [\%]$$

Da je Auftrag nicht genügend Werte zu einer statistischen Interpretation vorliegen, werden sie je Arbeiterin zusammengefaßt und als Häufigkeitsverteilung dargestellt.

D <sub>j</sub> (%)	Häufigkeit f <sub>j</sub>					
	Mittag			Nacht		
	21	22	Total	21	22	Total
+ (27-29,9)	.	.	.	1	.	1
+ (24-26,9)	1	.	1	1	1	2
+ (21-23,9)	2	.	2	2	1	3
+ (18-20,9)	2	.	2	.	1	1
+ (15-17,9)	1	.	1	4	1	5
+ (12-14,9)	3	.	3	5	.	5
+ ( 9-11,9)	4	1	5	3	.	3
+ ( 6- 8,9)	9	3	12	12	2	14
+ ( 3- 5,9)	10	1	11	7	2	9
+ ( 0- 2,9)	13	4	17	13	1	14
- ( 3- 0,1)	6	.	6	5	.	5
- ( 6- 3,1)	5	1	6	7	2	9
- ( 9- 6,1)	.	.	.	.	2	2
- (12- 9,1)	3	2	5	3	1	4
- (15-12,1)	2	1	3	.	.	.
- (18-15,1)	3	.	3	2	.	2
- (21-18,1)	.	.	.	1	.	1
- (24-21,1)	1	.	1	.	.	.
- (27-24,1)	1	.	1	2	.	2
- (30-27,1)	.	.	.	1	.	1
Total n	66	13	79	69	14	83

Tabelle 43

Zum Vergleich der Untersuchungsergebnisse sind die beiden Unterbruchsarten für jede Arbeiterin durch den arithmetischen Mittelwert  $\bar{D}$  und die Standardabweichung  $s$  zu repräsentieren.

$x_j$  = Klassenmitte von D<sub>j</sub>

$$\bar{D} = \frac{\sum f_j x_j}{n}$$

$$s^2 = \frac{\sum f_j (x_j - \bar{D})^2}{n-1} = \frac{1}{n-1} \left( \sum f_j (x_j)^2 - \frac{(\sum f_j x_j)^2}{n} \right) = \frac{S_{xx}}{n-1}$$

Um zu prüfen, ob die Häufigkeitsverteilungen der beiden Personen voneinander verschieden sind, wird nach folgender Formel das  $t$  bestimmt (LINDER, Abschnitt 512):

$$t = \frac{\bar{D}_{21} - \bar{D}_{22}}{s_d} \sqrt{\frac{n_{21} \cdot n_{22}}{n_{21} + n_{22}}}$$

wobei

$$s_d^2 = \frac{S_{xx21} + S_{xx22}}{n_1 + n_2 - 2}$$

ist.

Mit den Daten aus obiger Zusammenstellung ergibt sich somit (Tabelle 44).

Unterbruch	Person	$\bar{D}$ (%)	$s$ (%)	$t$	$t_{0,05}$
Mittag	21	+2,29	9,92	0,65	1,99
	22	+0,39	7,43		
Nacht	21	+2,89	10,75	0,31	1,99
	22	+3,73	17,22		

Tabelle 44

Da Unterschiede zwischen den Versuchspersonen nur zufällig sind, können die entsprechenden Häufigkeiten zusammengefaßt werden. Im weitem ist abzuklären, ob die ermittelten Durchschnitte wirklich von Null verschieden sind. Auch diese Prüfung wird mit Hilfe des t-Tests durchgeführt (LINDER, Abschnitt 421).

$$t = \frac{\bar{D} - \mu}{s} \sqrt{n}$$

$$\mu = 0$$

$$t = \bar{D} \sqrt{\frac{n}{s^2}}$$

Die zusammengefaßten Häufigkeiten geben folgendes Bild (Tabelle 45).

Unterbruch	$\bar{D}$ (%)	$s$ (%)	$t$	$t_{0,05}$
Mittag .....	+1,97	9,66	1,72	1,99
Nacht .....	+3,28	10,30	2,90	1,99

Tabelle 45

Die Arbeitsunterbrüche während des Mittags und der Nacht bewirken eine Zunahme des spezifischen Arbeitsaufwandes, somit also einen Übungsverlust. Die Beträge sind relativ klein, so daß nur der Einfluß der Nacht statistisch gesichert festgestellt werden kann. Das Ergebnis erlaubt den Schluß, daß die Größe des Übungsverlustes von der Unterbruchdauer abhängig ist.

Im bisherigen wurden die Arbeitsunterschiede zwischen den Aufträgen nicht berücksichtigt. Würden je Auftrag genügend Meßwerte vorliegen, ließen sich die Zusammenhänge zweckmäßig anhand einer Streuungserlegung feststellen. Wie schon erwähnt wurde, ist diese Bedingung aber nicht erfüllt. Dieser Mangel wird durch folgende Überlegung umgangen:

Die verschiedenen Aufträge sind nicht gleich groß und haben demnach unterschiedliche Häufigkeitsanteile. Beeinflußt die Arbeitsart die Aufwandzunahme, so ist die Gesamtheit der Einzelwerte nicht normalverteilt. Ist nun die vorliegende Gesamtverteilung normalverteilt, kann umgekehrt wohl daraus geschlossen werden, daß die Aufwandsänderung unabhängig von der Arbeitsart ist.

Zur Prüfung, ob eine gegebene Verteilung mit einer theoretischen übereinstimmt, wird untersucht, ob die Abweichungen der beiden nur zufällig sind. Als Testgröße wird das Chi-Quadrat berechnet (LINDER, Abschnitt 31).

$$\chi^2 = \sum_j \frac{(f_j \text{ gegeben} - f_j \text{ theoretisch})^2}{f_j \text{ theoretisch}}$$

Die Klassenhäufigkeit der standardisierten Normalverteilung

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}}$$

worin

e Basis der natürlichen Logarithmen  
 $\mu$  Durchschnitt  
 $\sigma$  Standardabweichung

$$u = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

## 7 AUFWANDSVERLAUF INNERHALB EINES AUFTRAGES

Wie bereits in der Einleitung gezeigt wurde, interessiert sich die Betriebspraxis von verschiedenen Seiten für die Aufwandsverläufe während der Bearbeitung von Aufträgen und die damit zusammenhängenden Probleme.

Die umfassende Bearbeitung dieses Problemkreises verlangt die Beantwortung der Fragen

- Ist doppelte log-Regression zweckmäßig?
- Welche Einflüsse haben die Wiederholungen der Serien und andere Tätigkeit zwischen identischen Serien auf die Einübung?
- In welchem Maß sind die Aufwandverläufe von der Person und der Arbeitsart abhängig?

Da jedes dieser Probleme zur Lösung andere Anforderungen an das Unterlagenmaterial stellt, müssen sich die Betrachtungen zum Teil auf einzelne der untersuchten Abteilungen beschränken.

### 7.1 Voruntersuchung

Wie Abschnitt 4.2 zeigt, werden in der Punktschweißmontage sieben Grundoperationen durchgeführt, die sich in kurzen Abständen wiederholen. Da eine Aufwandveränderung innerhalb der Aufträge bei Durchsicht des

ist tabelliert (GRAF, HENNING, Beispiel 11). Die gegebenen beiden Häufigkeitsverteilungen der Mittag- und Nachtunterbrüche sind somit vorerst zu standardisieren.

$$u_j = \frac{x_j - \bar{D}}{s}$$

das heißt die Verteilung der  $u_j$  hat den Durchschnitt 0 und die Standardabweichung 1. Darauf kann den Tabellen das  $f_j$  der  $u_j$  entnommen und das Chi-Quadrat berechnet werden. Es hat den Freiheitsgrad

$$N = M - 3$$

$$M = \text{Anzahl Klassen}$$

Unterbruch	Chi-Quadrat	Chi-Quadrat <sub>0,05</sub>
Mittag .....	19,16	27,59
Nacht .....	23,92	27,59

Tabelle 46

Die Aufwandsänderungen der Mittags- und Nachtunterbrüche sind normalverteilt und werden somit von der Arbeitsart nicht beeinflusst.

Die Übereinstimmung einer ermittelten Verteilung mit der Normalverteilung ließe sich auch durch Auftragen der Summenhäufigkeit in Wahrscheinlichkeitspapier graphisch überprüfen. Dieses Verfahren ist wohl weniger zeitraubend, aber nicht so eindeutig, wie der Vergleich zweier Testzahlen ( $\chi^2$ ). Aus diesem Grunde wurde im vorliegenden Fall der rechnerischen Methode der Vorzug gegeben.

Zahlenmaterials nicht feststellbar ist, scheint eine Voruntersuchung analog dem Vorgehen in Abschnitt 6.1 angezeigt.

Die Zeitaufwände der ersten und letzten drei Meßeinheiten jedes Auftrages werden je summiert miteinander verglichen. Ist die erste Summe größer als die zweite, so wird der Verlauf als «fallend» und umgekehrt als «steigend» angenommen. Je Operation und Arbeiter werden so die Häufigkeiten für fallend und steigend aufgezeichnet und mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests die Unterschiede der Häufigkeiten geprüft.

Die Tabellen 47 und 48 zeigen die Ergebnisse dieser Untersuchung. Sämtliche Chi-Quadrate werden ohne Korrektur nach YATES gerechnet, womit die Häufigkeiten mit wenig Aufnahmen eher zu große Werte haben.

Der Tabellenwert ist auch hier wiederum

$$\chi_{n=1}^2 = 3,841$$

Der Test zeigt eindeutig, daß innerhalb der Aufträge in dieser Abteilung keine Einübung feststellbar ist. Somit ist anzunehmen, daß sich bei der vorliegenden Arbeitscharakteristik und den kurzen Unterbrüchen zwischen identischen

Aufwandsveränderung nach Arbeiter gruppiert

Arbeiter	Häufigkeit		Chi-Quadrat
	fallend	steigend	
31	40	39	0,00
32	12	15	0,33
33	34	50	3,05
34	4	3	0,14
35	20	16	0,44
36	11	14	0,36
37	31	20	2,36

Tabelle 47

Aufwandsveränderung nach Operation gruppiert

Operation	Häufigkeit		Chi-Quadrat
	fallend	steigend	
1	15	19	0,47
2	19	12	1,58
3	25	29	0,30
4	33	35	0,06
5	21	18	0,23
6	16	19	0,26
7	23	25	0,08

Tabelle 48

Aufträgen die Übung soweit gefestigt hat, daß im Aufwandsverlauf kein Trend mehr feststellbar ist.

7.2 Linearität der doppelten log-Regression

Das Prüfverfahren wird in der Literatur eingehend behandelt (LINDER, Abschnitt 611.3). Da es aber in der Betriebswissenschaft selten angewandt wird, sollen kurz die theoretischen Grundlagen skizziert werden:

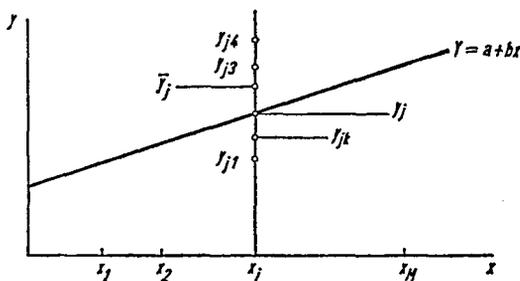


Abb. 14 Regressionsgerade

Die x-Achse wird in M Klassen aufgeteilt, die je  $N_j$  Einzelwerte enthalten.

Klassendurchschnitt  $\bar{y}_j = \frac{\sum_k y_{jk}}{N_j}$

Gesamtdurchschnitt  $\bar{y} = \frac{\sum_j \sum_k y_{jk}}{N}$   
 $N = \sum_j N_j$

Regressionswert  $Y_j$

Die Regression ist linear, wenn

- die  $y_{jk}$  nur zufällig von  $\bar{y}_j$  abweichen
- die  $\bar{y}_j$  nur zufällig von  $Y_j$  abweichen.

In anderer Formulierung lauten diese beiden Bedingungen: Die Streuung der Einzelwerte um das arithmetische Klassenmittel darf nicht größer als die Streuung der arithmetischen Klassenmittel um die Regressionswerte sein.

Somit stellt das Verhältnis dieser beiden Streuungen ein F dar, das mit dem entsprechenden Tabellenwert zu vergleichen ist.

Die beiden erwähnten Streuungen werden mittels einer Streuungszerlegung bestimmt. Es gilt die Beziehung

$$\sum_j \sum_k (y_{jk} - \bar{y})^2 = \sum_j N_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2 + \sum_j \sum_k (y_{jk} - \bar{y}_j)^2$$

(1) (2)

(1) läßt sich aufteilen in

$$\sum_j N_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2 = \sum_j N_j (\bar{y}_j - Y_j)^2 + \sum_j N_j (Y_j - \bar{y})^2$$

(3) (4)

Diese Summen der Quadrate sind

- (1) SQ zwischen den Klassen
- (2) SQ innerhalb der Klassen
- (3) SQ um die Regression
- (4) SQ der Regressionswerte um den Gesamtdurchschnitt

In der üblichen Darstellung der Streuungszerlegung läßt sich dies zusammenfassen

	Streuung	FG	SQ
(4)	auf der Regression	1	$\sum_j N_j (Y_j - \bar{y})^2 = b S_{xy}$
(3)	Durchschnitte um die Regression	M-2	$\sum_j N_j (\bar{y}_j - Y_j)^2$
(1)	zwischen Klassen	M-1	$\sum_j N_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2$
(2)	innerhalb Klassen	N-M	$\sum_j \sum_k (y_{jk} - \bar{y}_j)^2 = \sum_j S_{yy \text{ Klasse}}$
(5)	insgesamt	N-1	$\sum_j \sum_k (y_{jk} - \bar{y})^2 = S_{yy \text{ total}}$

Tabelle 49

Daraus läßt sich das F ermitteln:

$$F = \frac{DQ(3)}{DQ(2)} = \frac{SQ(3)}{SQ(2)} \cdot \frac{N-M}{M-2}$$

und mit dem Tabellenwert  $F_{0,05}$  mit

$$n_1 = M - 2$$

$$n_2 = N - M$$

vergleichen.

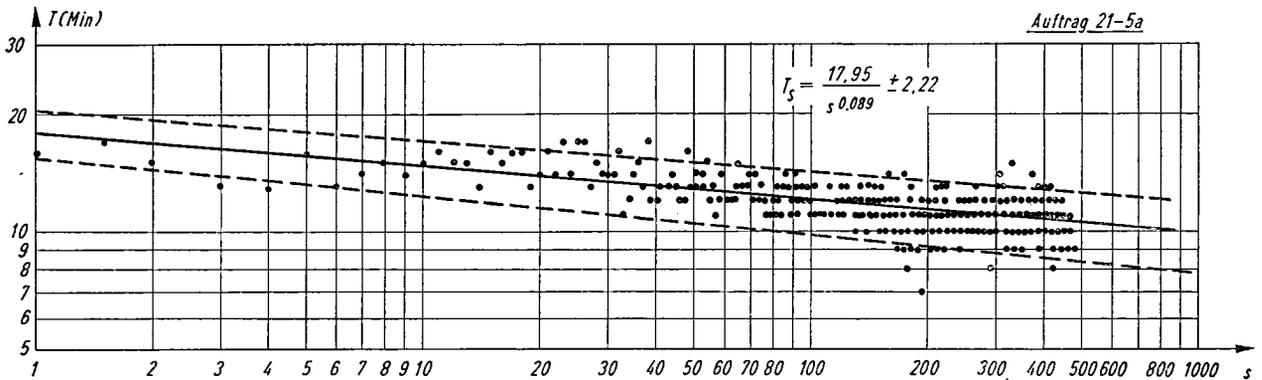


Abb. 15 Verlauf des Auftrages 21-5a

Die numerische Bestimmung von F kann gestützt auf die Zusammenhänge der Streuungszzerlegung folgendermaßen erfolgen:

$$\begin{aligned}
 \text{SQ (3)} &= \text{SQ (1)} - \text{SQ (4)} \\
 &= \text{SQ (5)} - \text{SQ (2)} - \text{SQ (4)} \\
 F &= \frac{\text{SQ (3)}}{\text{SQ (2)}} \cdot \frac{N - M}{M - 2} \\
 F &= \frac{\text{SQ (5)} - \text{SQ (2)} - \text{SQ (4)}}{\text{SQ (2)}} \cdot \frac{N - M}{M - 2} \\
 F &= \frac{S_{yy \text{ total}} - \sum_j S_{yy \text{ Klasse}} - b S_{xy}}{\sum_j S_{yy \text{ Klasse}}} \cdot \frac{N - M}{M - 2}
 \end{aligned}$$

Die praktische Anwendung dieses Prüfverfahrens setzt Regressionslinien voraus, die auf soviel Einzelwerten beruhen, daß sich die x-Achse in Klassen aufteilen läßt.

Im Abschnitt 6.2 wurden mit den Aufnahmen aus der Apparate-Montage-Abteilung für je zwei große Aufträge die Halbtagsverläufe gerechnet, deren  $S_{yy}$  als Klassenwerte des Aufwandverlaufes über den Auftrag verwendet werden können. Es scheint somit angezeigt, die Zweckmäßigkeit der doppelten log-Regression an diesen Beispielen zu überprüfen.

Auftrags-Nr.	21-2	21-5a	21-5b	22-1	22-2
$S_{yy}$ Auftrag	0,706	1,609	1,592	0,425	0,561
$\sum_j S_{yy}$ Halbttag	0,337	0,713	0,533	0,292	0,481
$b S_{xy}$ Auftrag	0,324	0,655	0,130	0,073	0,005
N	130	468	347	174	209
M	7	24	18	12	14
F	3,30	6,82	35,80	3,32	2,52
$F_{0,05}$	2,21	1,52	1,75	1,92	1,75

Tabelle 50

Sämtliche fünf Regressionslinien erfüllen demnach die Prüfungsbedingungen nicht. Zur Beurteilung der Konsequenz dieses Ergebnisses werden die Meßpunkte des Auftrages 21-5a und die gerechnete Gerade mit den Grenzen

der doppelten Standardabweichung in das doppelte log-Netz eingetragen (Abb. 15). Die Werte  $T_1 - T_{10}$  liegen unterhalb der Regressionslinie, während sich die übrigen Meßpunkte mehr oder weniger symmetrisch um die Gerade gruppieren. Es liegt somit die Vermutung nahe, daß diese Abweichungen das negative Testergebnis herbeiführen. Mit folgender Begründung wird trotzdem am doppelten log-Verlauf festgehalten.

- Ein späterer Vergleich von errechneten und gemessenen Werten zeigt keine außerordentlichen Abweichungen.
- Es wurde in der Einleitung festgehalten, daß die so gemessenen Verläufe eine Resultierende aus verschiedenen Komponenten darstellen. Da die Einflußfelder zum Teil aperiodischen Schwankungen ausgesetzt sind, wird die Resultierende nicht genau dem Grundgesetz folgen, sondern darum herumpendeln. Unter den gegebenen Meßbedingungen werden praktisch kaum genügend Werte erfassbar sein, um die Ermittlung des Grundtrends mit der Strenge dieses Prüfverfahrens gesichert durchführen zu können.

### 7.3 Zusammenhänge bei Wiederholungen

Wie bereits in der Problemstellung umschrieben wurde, folgen sich in der Praxis meistens Mittel- und Kleinserien mit geringfügigen Arbeitsmodifikationen und wiederholen sich in ungleichen Zeitabständen. Damit stellt sich die Frage, wie sich die Übung unter diesen Umständen zwischen identischen Aufträgen überträgt.

Abschnitt 6.3 hat gezeigt, daß Arbeitsunterbrüche einen Übungsverlust bewirken. Da in diesem Fall aber während der Unterbrüche ebenfalls ähnliche Arbeiten ausgeführt werden, ist zu vermuten, daß der Verlust hier noch geringer in Erscheinung treten dürfte. Somit müßten sich diese Untersuchungen auf umfangreicheres Unterlagenmaterial abstellen können, um statistisch gesicherte Ergebnisse zu liefern. Andererseits müssen die Verläufe je Auftrag so viele Meßwerte enthalten, daß die Parameter repräsentative Größen darstellen.

Die letzte Bedingung erfüllen nur die Kurven aus Abteilung 2 und zum Teil in Abteilungen 4-7, wobei in allen aber nur eine sehr beschränkte Zahl Wiederholungen erfaßt werden konnten. Da sich in Abteilung 3 innerhalb

der Aufträge keine Verlaufstendenzen feststellen ließen, kann die relativ große Zahl von Wiederholungen nicht in diese Betrachtung einbezogen werden. Somit kann sie sich lediglich auf die Unterlagen der Abteilung 2, Schwachstromapparate-Montage beschränken. Eine statistische Analyse ist beim vorliegenden Unterlagenumfang nicht durchführbar.

Um die Gegebenheiten zu veranschaulichen, werden aus den gerechneten Kurvenparametern der Zeitaufwand für die erste und letzte Meßeinheit gerechnet.

Der Regressionsrechnung können die Elemente

$$\bar{y} = \frac{\sum \log_{10} T_s}{N} = \frac{\sum y_i}{N}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum \log_{10} s_i}{N} = \frac{\sum x_i}{N}$$

$N$  = Anzahl Meßwerte

$b$  = Ablaufexponent

entnommen werden, mit denen sich die Kurvengleichung aufstellen läßt

$$Y - \bar{y} = b(x - \bar{x})$$

Der erste Wert des Ablaufs hat den Abszissenwert

$$s_1 = 1$$

und damit

$$x_1 = \log 1 = 0$$

Der theoretische Aufwand der ersten Meßeinheit  $T_1$  ist somit der Numerus von

$$Y_1 = \bar{y} - b\bar{x}$$

während der theoretische Aufwand der letzten Meßeinheit des Auftrages  $T_N$  ( $i = N$ ) der Numerus von

$$Y_N = \bar{y} + b(x_N - \bar{x})$$

ist.

In Tabelle 51 sind die Kenngrößen der von den Versuchspersonen 21 und 22 ausgeführten Aufträge zusammengestellt.

Den aus der Kurvengleichung errechneten Werten  $T_1$  und  $T_N$  werden die analogen gemessenen gegenübergestellt. Um die Streuung der Einzelwerte etwas zu glätten, stellt der «gemessene» jeweils den arithmetischen Mittelwert aus den drei ersten oder letzten Werte des Auftrages dar. Die Differenzen entsprechender Größen liegen im allgemeinen im Rahmen der Erwartung. Diese Feststellung hilft den Entschluß rechtfertigen, trotz den unerfüllten Testbedingungen im vorausgehenden Abschnitt mit doppelter log-Regression zu rechnen.

Der Vergleich der Werte  $T_1$  und  $T_s$  zeigt deutlich die Auswirkung der relativ kleinen  $b$ -Beträge auf den Aufwandverlauf.

Die Wiederholungen zeigen prinzipiell folgende Verläufe

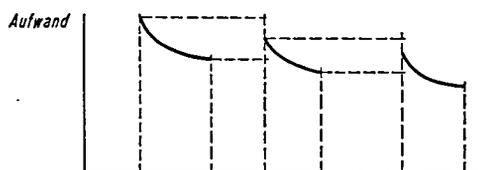


Abb. 16 Wiederkehrende Aufträge (Aufwand-Datum)

Zu einer statistischen Quantifizierung der skizzierten Zusammenhänge genügt der vorhandene Aufnahmenumfang nicht.

#### 7.4 Abhängigkeit der Einübung von Person und Arbeitsart

Die Frage, in welchem Maße die Einübung von der ausführenden Person (Alter, Dienstalter, persönliche Gegebenheiten usw.) und der Arbeitscharakteristik (Handarbeit, Maschinenarbeit, Unreduzierbarkeit usw.) abhängt, ist von kapitaler Bedeutung.

In der Produktionssteuerung erfolgt die Arbeitszuteilung auf Personen durch den Meister. Da in diesem Zeitpunkt die technische Vorplanung bereits abgeschlossen ist, kann sie die Einübung nur berücksichtigen, wenn die Gesetzmäßigkeiten unabhängig von personenbedingten Einflüssen sind.

Im Gegensatz dazu ist die Arbeitscharakteristik während der Durchführung der Planung bekannt und ließe sich prinzipiell berücksichtigen. Wie weit sich eine differenzierte Abstimmung rechtfertigt, ist Aufgabe dieser Untersuchung.

Die Beantwortung dieser Fragen stützt sich zweckmäßig auf eine eingehende Analyse der Streuungen zwischen den Versuchspersonen und Arbeitscharakteristiken.

In der Motorenwicklerei, Abteilung 1, werden größere Aufträge auf verschiedene Arbeiterinnen verteilt. Dadurch werden von den drei Versuchspersonen zum Teil analoge Aufträge ausgeführt, was eine statistische Untersuchung der Einflüsse Arbeiter-Arbeit erlaubt.

Das Rechenverfahren für eine mehrfache Streuungszersetzung ist bei gleicher Häufigkeit der Elemente je Betrachtungsgruppe bedeutend einfacher als bei ungleicher Häufigkeit. Als Betrachtungsgruppe werden im vorliegenden Fall die Ablaufexponenten  $b_{ij}$  der Versuchsperson  $j$  und der Arbeit  $i$ , die sich in identischen Aufträgen wiederholt, bezeichnet. Um vom Vorteil der einfachen Rechnung zu profitieren, wird angestrebt, in einem System  $ij$  eine möglichst große Zahl der gerechneten  $b$  zu erfassen, so daß alle drei Versuchspersonen  $j$  möglichst viele verschiedene Arbeiten  $i$  und in jedem Feld gleich viel Werte erfaßt werden. Das aussagefähigste System ergibt sich beim vorliegenden Unterlagenumfang bei je zwei  $b_{ij}$ . Hat nun eine Arbeiterin mehr als zwei verschiedene Aufträge einer Arbeit ausgeführt, werden zufällig zwei  $b_{ij}$  für die Rechnung ausgewählt. Tabelle 52 zeigt die Zusammenstellung der Ablaufexponenten.

Die mehrfache Streuungszersetzung erlaubt, nun die gesamte Streuung innerhalb des Systems in folgende Elemente zu gliedern (LINDER, Abschnitt 515.1):

- Innerhalb Gruppen.  
Die Streuung innerhalb einer Gruppe zeigt, in welchem Maß die Ablaufexponenten einer Versuchsperson bei Wiederholung einer identischen Arbeit streut. Dieses Element erfaßt das kleinste Betrachtungsfeld.
- Zwischen Gruppen.  
Sie zeigt die Streuung der Gruppen im gesamten System.
- Zwischen Arbeiten.

Auftrags-Nr.	Datum	N (Meß-E)	$\bar{y}$	b	B	s (Min)	T <sub>1</sub> (Min)		T <sub>N</sub> (Min)	
							gerechnet	gemessen	gerechnet	gemessen
21-1	5.11.-11.11.	75	1,363	-0,111	0,594	1,09	33,31	31,67	20,75	20,00
21-2	11.11.-16.11.	130	1,028	-0,122	0,459	1,13	17,22	14,33	9,46	9,33
21-3	16.11.-17.11.	49	1,066	-0,115	0,490	1,11	16,37	14,00	10,45	11,00
21-4	18.11.-25.11.	198	1,203	-0,252	0,712	1,17	47,32	48,30	12,45	12,31
21-5a	25.11.-10.12.	468	1,056	-0,088	0,407	1,11	17,95	16,00	10,42	10,03
21-5b	30.12.-13. 1.	347	1,036	-0,046	0,081	1,16	13,59	13,00	10,37	10,00
21-5c	13. 1.- 1. 2.	476	0,951	-0,060	0,098	1,20	12,47	14,15	8,40	8,87
21-5d	2. 2.	27	0,923	-0,013	0,005	1,18	8,66	8,01	8,27	7,76
21-5e	26. 2.-29. 2.	35	0,963	-0,018	0,047	1,08	9,66	9,56	9,03	8,76
21-6a	11.12.-30.12.	242	1,196	-0,031	0,077	1,11	18,13	20,66	15,23	15,33
21-6b	17. 2.	22	1,356	-0,184	0,330	1,25	34,01	30,66	19,27	20,00
21-7a	1. 2.	36	1,080	-0,155	0,228	1,29	18,21	15,66	10,42	7,66
21-7b	3. 2.-16. 2.	535	0,899	-0,109	0,181	1,27	14,15	13,33	7,10	6,33
21-8a	20. 2.-22. 2.	36	1,110	-0,069	0,097	1,22	15,47	17,00	12,08	11,66
21-8b	24. 2.-25. 2.	61	1,056	-0,049	0,059	1,20	13,32	12,40	10,58	10,25
21-8c	15. 3.-17. 3.	74	1,009	-0,067	0,157	1,15	12,77	12,00	9,57	9,75
21-9a	22. 2.-24. 2.	64	1,097	-0,048	0,111	1,13	14,62	13,88	13,09	11,67
21-9b	29. 2.	18	1,018	+0,025	0,027	1,13	9,68	10,00	10,67	11,00
22-1	18.11.-27.11.	174	1,131	-0,049	0,170	1,11	16,63	16,33	12,88	14,00
22-2	25. 3.- 5. 4.	209	1,115	-0,011	0,008	1,13	13,75	13,00	12,90	12,33
22-3a	6. 4.	15	1,140	-0,021	0,009	1,20	14,37	15,33	13,54	16,00
22-3b	12. 4.-13. 4.	42	1,102	-0,106	0,373	1,13	17,03	15,66	11,43	11,66
22-3c	22. 4.-25. 4.	31	0,992	-0,027	0,015	1,21	10,52	10,00	9,57	8,33
22-4	14. 4.	40	0,943	-0,153	0,373	1,17	13,59	12,66	7,72	9,33

Tabelle 51

Arbeiten i	Versuchsperson j			Totale i
	11	12	13	
101	-0,1040	-0,1429	-0,1696	-1,1633
	-0,2781	-0,1998	-0,2689	
103	-0,3116	-0,0718	-0,8184	-1,6349
	-0,2508	+0,0458	-0,2281	
104	-0,0888	-0,0997	-0,0664	-0,5460
	-0,1103	-0,0678	-0,1130	
105	-0,1647	-0,1958	-0,2250	-1,0959
	-0,1155	-0,0900	-0,3049	
106	-0,0177	-0,0806	-0,0455	-0,5201
	-0,0723	-0,1965	-0,1075	
107	-0,0190	+0,0476	-0,1695	-0,3495
	-0,0291	-0,1170	-0,0625	
108	-0,1929	-0,0256	-0,1298	-0,8635
	-0,3453	-0,1541	-0,0158	
109	-0,1741	-0,2183	+0,0469	-0,8680
	-0,2735	-0,0769	-0,1721	
110	-0,0525	-0,0384	-0,0934	-0,2615
	-0,1035	+0,0502	-0,0239	
112	-0,1483	-0,1252	+0,0487	-0,5637
	-0,2974	+0,1576	-0,1991	
Totale j	-3,1495	-1,5992	-3,1178	

Tabelle 52 Zusammenstellung der  $b_{ij}$  (Abteilung I)

- Zwischen Versuchspersonen.
- Wechselwirkung.

Zur Erläuterung seien die Beträge  $b_{ij}$  maßgebend für die Rangfolge der Versuchspersonen bei der Arbeit i. Die Wechselwirkung ist nun ein Maß für die Veränderung dieser Personenrangfolge über die verschiedenen Arbeiten.

Die Summen der Quadrate (SQ) der einzelnen Elemente werden folgendermaßen gerechnet:

$$N_i = 3 \cdot 2 = 6$$

$$N_j = 10 \cdot 2 = 20$$

$$N = 10 \cdot 6 = 3 \cdot 20 = 60$$

$$SQ_{\text{insgesamt}} = \sum_{ij} b_{ij}^2 - \frac{(\sum b_{ij})^2}{N}$$

$$SQ_{\text{zwischen Personen}} = \frac{\sum_j (\sum_i b_{ij})^2}{N_j} - \frac{(\sum_{ij} b_{ij})^2}{N}$$

$$SQ_{\text{zwischen Arbeiten}} = \frac{\sum_i (\sum_j b_{ij})^2}{N_i} - \frac{(\sum_{ij} b_{ij})^2}{N}$$

$$SQ_{\text{zwischen Gruppen}} = \frac{\sum_{ij} (b_{i1l} + b_{ij2})^2}{2} - \frac{(\sum_{ij} b_{ij})^2}{N}$$

$$SQ_{\text{innerhalb Gruppen}} = SQ_{\text{insgesamt}} - SQ_{\text{zwischen Gruppen}}$$

$$\begin{aligned}
 \text{SQ Wechselwirkung} &= \text{SQ zwischen Gruppen} \\
 &\quad - (\text{SQ zwischen Personen} \\
 &\quad + \text{SQ zwischen Arbeiten})
 \end{aligned}$$

In der üblichen Darstellung der Streuungserlegung zeigen sich folgende Zusammenhänge:

Streuung	FG	SQ	DQ	F	F <sub>0,05</sub>
Zwischen Personen	2	0,07849	0,03925	2,83	3,32
Zwischen Arbeiten	9	0,26938	0,02993	2,16	2,27
Wechselwirkung	18	0,34758	0,01931	1,39	1,89
Zwischen Gruppen	29	0,69545	0,02318		
Innerhalb Gruppen	30	0,41633	0,01388		
Insgesamt	59	1,11178	0,01884		

Tabelle 53

Das Durchschnittsquadrat innerhalb Gruppen zeigt, wie die  $b_{ij}$  innerhalb einer Person und Arbeit streuen. Mittels eines F-Tests ist zu untersuchen, ob die übrigen Streuungskomponenten größer als diese Basisstreuung sind.

Der Test zeigt, daß keine der interessierenden Streuungen statistisch gesichert von der Basisstreuung abweichen. Somit sind die  $b_{ij}$  weder nach Person noch Arbeit wesentlich voneinander verschieden. Das F der Wechselwirkung ist kleiner als die entsprechende Testgröße. Dies weist darauf hin, daß die «Rangfolge» der Arbeiterinnen, die nach den eben gemachten Feststellungen nicht existiert, über die Arbeiten ausgeglichen ist. Damit wird die Unabhängigkeit der  $b_{ij}$  von der Person noch erhärtet.

Um die in dieser Betrachtung gewonnenen Erkenntnisse noch auf breiterer Grundlage zu überprüfen, sollen mittels einer hierarchischen Streuungserlegung innerhalb und zwischen den Abteilungen die Verhältnisse untersucht werden.

Da zwischen den Abteilungen nach Abschnitt 4.2 und 4.3 grundsätzlich verschiedene Arbeiten ausgeführt werden, wird sich zeigen, in welchem Rahmen die Einübung in dieser Richtung zu differenzieren ist.

Die Streuung der aus der Regressionsanalyse gewonnenen Ablaufexponenten lassen sich je Abteilung zerlegen in Anteile zwischen Personen und zwischen Arbeiten. Tabellen 54 und 55 zeigen die Gegebenheiten.

In diesem Fall wird mit dem F-Test geprüft, ob die Streuung der Exponenten zwischen den Personen wesent-

Abt.-Nr.	Anzahlen		b
	Personen	Arbeiten	
1	3	182	-0,1150
2	2	29	-0,0816
1, 2	5	211	-0,1106
4	8	38	-0,0597
5	6	34	-0,0615
6	5	51	-0,0887
7	2	30	-0,0359
4-7	21	153	-0,0651

Tabelle 54 Abteilungsdurchschnitte der Ablaufexponenten

Abt.-Nr.	Streuung	FG	SQ	DQ	F	F <sub>0,05</sub>
1	zwischen Personen	2	0,02249	0,01124	0,55	....
	zwischen Arbeiten	179	3,66377	0,02047		
	insgesamt	181	3,68626	0,02037		
2	zwischen Personen	1	0,00241	0,00241	0,61	....
	zwischen Arbeiten	27	0,10620	0,00393		
	insgesamt	28	0,10861	0,00388		
4	zwischen Personen	7	0,03869	0,00553	0,76	....
	zwischen Arbeiten	30	0,21888	0,00730		
	insgesamt	37	0,25757	0,00696		
5	zwischen Personen	5	0,00983	0,00196	0,32	....
	zwischen Arbeiten	28	0,17197	0,00614		
	insgesamt	33	0,18180	0,00521		
6	zwischen Personen	4	0,12612	0,03153	2,92	2,61
	zwischen Arbeiten	46	0,49559	0,01077		
	insgesamt	50	0,62171	0,01243		
7	zwischen Personen	1	0,01773	0,01773	1,78	4,20
	zwischen Arbeiten	28	0,25682	0,00917		
	insgesamt	29	0,27455	0,00947		

Tabelle 55 Streuungserlegung innerhalb Abteilungen

lich größer sei als zwischen den Arbeiten. Den Tabellen ist zu entnehmen, daß dies lediglich in Abteilung 6 zutrifft, wobei zu bemerken ist, daß der Unterschied der Testwerte relativ klein ist.

Die Abteilungen 1 und 2 gehören zum Unternehmen der Elektroindustrie, 4-7 zur Firma aus der Uhrenindustrie. Es scheint somit angebracht, in Tabelle 56 die Abteilungen je Firma zusammenzufassen. Als neue Streuungskomponente erscheint das Element «zwischen Abteilungen».

Abt.-Nr.	Streuung	FG	SQ	DQ	F	F <sub>0,05</sub>
1, 2	zwischen Abteil'gen	1	0,02809	0,02809	1,54	3,84
	zwischen Personen	3	0,02490	0,00830		
	zwischen Arbeiten	206	3,76997	0,01830		
	insgesamt	210	3,82296	0,01820		
4, 5 6, 7	zwischen Abteil'gen	3	0,02930	0,00977	1,13	2,61
	zwischen Personen	17	0,19237	0,01132		
	zwischen Arbeiten	132	1,14326	0,00866		
	insgesamt	152	1,36493	0,00910		

Tabelle 56 Streuungserlegung innerhalb Firmen

Das Zusammenfassen der Abteilungen bewirkt keine wesentliche Streuungszunahme. Somit sind auch die  $b$  der verschiedenen Abteilungen nicht statistisch gesichert voneinander verschieden. Dieses Ergebnis überrascht, da in den einzelnen Abteilungen innerhalb der untersuchten Firmen sehr unterschiedliche Arbeiten ausgeführt werden.

In Tabelle 57 werden noch die beiden Firmen in ein System zusammengefaßt. Auf dieser Stufe treten nun wesentliche Differenzen zwischen den Verteilungen der Ablaufexponenten auf.

Streuung	FG	SQ	DQ	F	F <sub>0,05</sub>
zwischen Firmen ....	1	0,17307	0,17307	11,89	3,84
zwischen Abteilungen	4	0,05739	0,01435	0,99	2,37
zwischen Personen ..	20	0,21727	0,01086		
zwischen Arbeiten ...	338	4,91323	0,01454		
insgesamt .....	363	5,36094	0,01477		

Tabelle 57 Streuungszерlegung der gesamten Untersuchung

Dieses Ergebnis veranlaßt, die Ablaufexponenten  $b$  der beiden Firmen als getrennte Kollektive zu betrachten. Somit kann der Einübungsverlauf in den untersuchten Abteilungen je Firma durch einen Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung dargestellt werden. Die obige Streuungszерlegung zeigt, daß sich die Streuungen durch eine weitere Aufteilung der Grundgesamtheit nicht wesentlich verringern lassen. Aus einem Vergleich der arbeitstechnischen Gegebenheiten (Abschnitt 4.3) ist wohl der Schluß zu ziehen, daß sich nur sehr markante Unterschiede auf den Einübungsverlauf auswirken:

- Handarbeit – Maschinenarbeit
- freier Arbeitsakt – maschinengebundener Arbeitsakt
- Klein- und Mittelserie – Großserie

Die einzelnen Größen ergeben

Arithmetischer Mittelwert

$$\bar{b} = \frac{\sum b}{N}$$

$$\bar{b}_{(1,2)} = \frac{-23,3369}{211} = -0,1106$$

$$\bar{b}_{(4-7)} = \frac{-9,9636}{153} = -0,0651$$

Standardabweichung der Einzelwerte

$$s_b = \pm \sqrt{DQ_{\text{insgesamt}}}$$

$$s_{b(1,2)} = \pm \sqrt{0,01820} = \pm 0,1350$$

$$s_{b(4-7)} = \pm \sqrt{0,00910} = \pm 0,0955$$

Vertrauensgrenze der Einzelwerte bei einem Fehlschlußrisiko von 0,05

$$\pm 1,96 \cdot s_b$$

$$(1,2) : \pm 1,96 \cdot 0,1350 = \pm 0,2641$$

$$(4-7) : \pm 1,96 \cdot 0,0955 = \pm 0,1871$$

Standardabweichung der arithmetischen Mittelwerte

$$s_{\bar{b}} = \pm \frac{s_b}{\sqrt{N}}$$

$$s_{\bar{b}(1,2)} = \pm \frac{0,1350}{\sqrt{211}} = \pm 0,0093$$

$$s_{\bar{b}(4-7)} = \pm \frac{0,0955}{\sqrt{153}} = \pm 0,0077$$

Vertrauensgrenze der arithmetischen Mittelwerte bei einem Fehlschlußrisiko von 0,05

$$\pm 1,96 \cdot s_{\bar{b}}$$

$$(1,2) : \pm 1,96 \cdot 0,0093 = \pm 0,0182$$

$$(4-7) : \pm 1,96 \cdot 0,0077 = \pm 0,0151$$

Die einzelnen Ablaufexponenten  $b$  und der Durchschnitt der Grundgesamtheit  $\beta$  sind für die beiden Firmen in folgenden Grenzen zu erwarten

Abteilungen	$b$	$\beta$
1, 2	$-0,1106 \pm 0,2641$	$-0,1106 \pm 0,0182$
4-7	$-0,0651 \pm 0,1871$	$-0,0651 \pm 0,0152$

Tabelle 58

An diesem Ergebnis muß hervorgehoben werden, daß trotz dem eindeutig negativen Exponenten der Grundtendenz einzelne positive  $b$ -Werte auftreten, deren Anteil sich folgendermaßen ermitteln läßt:

Sind  $\bar{x} \pm x_1$  die interessierenden Grenzwerte in einer Normalverteilung, so ist die relative Häufigkeit  $P$  der Werte außerhalb dieser Grenzen über

$$u = \frac{\bar{x} - x_1}{s}$$

tabelliert.

Im vorliegenden Fall wird die Häufigkeit  $P/2$  der Werte  $b_i > 0$  gesucht, wodurch

$$u = \frac{\bar{b}}{s_b}$$

wird.

Es werden demnach folgende Anteile von Einzelfällen mit zunehmendem Aufwandverlauf zu erwarten sein:

Abteilung	$u$	$P/2$ (%)
1, 2	0,818	21
4-7	0,683	24

Tabelle 59

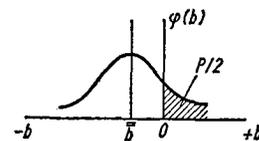


Abb. 17 Verteilung der Ablaufexponenten

Zusammenfassend führt die Analyse der Einübung bei der Ausführung einzelner Aufträge zu folgenden Erkenntnissen:

- Die maßgebende Streuungskomponente der Ablaufexponenten ist persönlich bedingt, wobei zwischen Personen aber keine wesentlichen Unterschiede feststellbar sind. Damit erübrigt sich die Erfassung personenbedingter Gegebenheiten.
- Die Einflüsse der Arbeitscharakteristik sind gering. Die daraus resultierenden Unterschiede werden weitgehend durch die eben erwähnte Streuung verwischt. Somit ist es sinnvoll und gerechtfertigt, bei der Quantifizierung der

Einübung nur sehr markante Arbeitsunterschiede zu berücksichtigen (Branchenunterschiede).

- Da die relativen Fehler der Schätzung der  $b$  und  $\beta$  für die beiden Firmen in der gleichen Größenordnung liegen, darf angenommen werden, daß mit den hier verwendeten Meßmethoden der Ablaufexponent  $\beta$  des Grundgesetzes mit einer Genauigkeit von etwa 20% bestimmt werden kann.
- Während die errechneten Mittelwerte nicht verallgemeinert werden dürfen, da sie eben auf die branchenbedingten Arbeitsgegebenheiten abgestimmt werden müssen, sind die relativen Beträge der Standardabweichungen allgemein gültig.

- Die Konsequenz der Einübung und die Genauigkeit der Schätzung des Grundgesetzes zeigen in folgender Zusammenstellung die unteren und oberen Grenzwerte eines Verlaufes am Beispiel der Elektroapparate.

Laufende Zyklusnummer (s)	Zeitaufwand für den s-ten Zyklus ( $T_s$ )		
	$\beta - 0,0182$	$\beta$	$\beta + 0,0182$
1	10,00	10,00	10,00
10	7,45	7,75	8,10
100	5,45	6,00	6,54
1 000	4,10	4,66	5,29
10 000	3,06	3,61	4,28

Tabelle 60

## 8 AUFWANDSVERLAUF ÜBER IDENTISCHE AUFTRÄGE

Wird der Arbeitsaufwand eines Auftrages durch den Durchschnitt der spezifischen Aufwände repräsentiert, stellt sich die Frage nach dem Verlauf dieser Werte über identische Aufträge.

Der Betrag eines solchen Kurvenpunktes wird durch Faktoren der Auftragsabwicklung (Größe, Unterbrüche usw.) beeinflusst. Da diese Faktoren ebenfalls als Komponenten den resultierenden Aufwandverlauf beeinflussen, ist zu erwarten, daß der Kurventrend schwächer als in den vorangehenden Betrachtungen in Erscheinung tritt. Es soll daher am Beispiel der Abteilung 3 versucht werden, die bestimmbareren Einflüsse in die Erfassung des Kurvenverlaufes einzubeziehen.

### 8.1 Die Einflußkomponenten

Die Unterlagen der Punktschweißmontage-Arbeiten enthalten eine relativ große Zahl von Wiederholungen identischer Aufträge.

Das rechnerische Hilfsmittel zum Untersuchen der Abhängigkeit einer Größe von ihren Einflußfaktoren ist die mehrfache Regression (LINDER, Abschnitt 613.3). Sie setzt voraus, daß die abhängige Variable  $y$  (spezifischer Zeitaufwand je Auftrag) wie die unabhängigen Variablen  $x_1$  (Einflußfaktoren) gemessen oder sonstwie bewertet werden können.

Da in diesem Vorversuch lediglich die Existenz der einzelnen Einflüsse festzustellen ist, wird die Rechnung linear durchgeführt.

Die abhängige Variable und die einzelnen Einflüsse werden folgendermaßen definiert:

$y_n$  Arithmetischer Mittelwert der Zeitaufwände je Meßeinheit der  $n$ -ten Auftragswiederholung einer Arbeit.

$x_1$  Betrag von  $y_{n-1}$ . Aus der Abhängigkeit zwischen  $y_n$  und  $y_{n-1}$  kann auf die Übungsfestigkeit geschlossen werden.

$x_2$  Anzahl Meßeinheiten der  $n$ -ten Serie. Findet je Auftrag eine Einübung statt, so wird der arithmetische Mittelwert von der Stückzahl des Auftrages beeinflusst.

$x_3$  Fortlaufende Nummer der ausgeführten Serie, wobei sich  $x_3 = 1$  auf den vom Arbeiter erstmals ausgeführten Auftrag dieser Arbeit bezieht. Dieser stimmt nur bei Arbeitern, die während der Untersuchung in die Punkt-

schweißmontage-Abteilung eingetreten sind, mit dem ersten Meßwert überein. Für die meisten Arbeiter muß  $x_3$  des Meßbeginns extrapoliert werden. Aus der Annahme

$$\frac{\text{Anzahl Tage bei Meßbeginn}}{\text{Anzahl Tage während der Messung}} = \frac{\text{Anzahl Serien bei Messung (n)}}{\text{Anzahl Serien der Messung}}$$

läßt sich die unbekannte Nummer  $x_3$  bei Meßbeginn abschätzen.  $x_3$  erfaßt die Übung ohne Berücksichtigung der Arbeitsausführung zwischen den betrachteten Aufträgen.

$x_4$  Da Arbeitsunterbrüche einen Einfluß auf den Aufwand haben, sind sie zu berücksichtigen. Sie werden im Verhältnis ihrer Länge bewertet

Mittag	1,5 Stunden	3 Punkte
Nacht	12 Stunden	25 Punkte
Sonntag	43 Stunden	85 Punkte
Samstag-Sonntag	60 Stunden	120 Punkte

$x_5$  Anzahl Tage zwischen der  $n$ -ten und  $(n-1)$ -ten Wiederholung. Damit wird der Übungsverlust erfaßt.

$x_6$  Qualitative Gliederung von  $x_5$ : Es ist zu vermuten, daß Arbeitsumstellungen einen Übungsverlust bewirken. Jeder andere ausgeführte Auftrag wird mit 1 Punkt, jeder arbeitsfreie Tag mit 10 Punkten bewertet.

$x_7$  Fortlaufende Nummer des Arbeitstages (1 = erster Arbeitstag in der Abteilung). Im Gegensatz zu  $x_3$  soll hier die Übungsübertragung von anderen Arbeitsausführungen mitberücksichtigt werden.

Die Regressionsgleichung wird in folgender Form dargestellt

$$Y = \bar{y} + b_1(x_1 - \bar{x}_1) + b_2(x_2 - \bar{x}_2) + \dots + b_7(x_7 - \bar{x}_7) \\ = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_7x_7$$

wobei  $a = \bar{y} + b_1\bar{x}_1 + b_2\bar{x}_2 + \dots + b_7\bar{x}_7$

Die Rechnung liefert die  $b_i$  und  $a$ , so daß sich mit dieser Gleichung der arithmetische Mittelwert der Aufwände je Meßeinheit eines Auftrages vorausbestimmen läßt. Verschiedene  $x_1$  sind aber nicht zum voraus bekannt, womit die Gleichung für die Praxis in dieser Form keine besondere Bedeutung hat.

Die Analyse errechnet nebst dem Koeffizienten  $b_1$  den zugehörigen t-Wert. Damit läßt sich feststellen, welche unabhängigen Variablen einen statistisch gesicherten Einfluß auf den Betrag von Y haben.

Bei Operation 7 sind für 4 Arbeiter genügend Meßwerte zur Durchführung dieser Regressionsanalyse vorhanden.

Das Rechenverfahren ist in der Betriebswissenschaft soweit bekannt, daß auf eine Erläuterung verzichtet werden kann. Die Firma ZUSE K.G. in Bad Hersfeld hatte die Freundlichkeit, auf ihrer Rechenanlage die Analyse durchzuführen. Die Rechenergebnisse sind in Tabelle 61 zusammengestellt.

Unter «Totales System» stehen die Resultate der Rechnung, die sich über die Zusammenfassung sämtlicher Werte der vier Personen erstreckt.

Der t-Test zeigt, daß nur die x

31 - 6

37 - 1

33 - 1

totales System - 1

totales System - 5

einen wesentlichen Einfluß auf den Zeitaufwand ausüben. Eine eindeutige Abhängigkeit über alle Personen ist aber bei keiner Einflußgröße vorhanden. Am ehesten fällt  $x_1$  eine gewisse Bedeutung zu. Die Variablen  $x_5$  und  $x_3$ , in denen die Einübung zum Ausdruck kommen sollte, haben in keinem Fall wesentlichen Einfluß.

In der Punktschweißmontage ist demnach die Einübung auch über mehrere Auftragswiederholungen nicht feststellbar. Da sich an diesem Beispiel keine der erfaßten Einflußkomponenten als signifikant erweist, wird auf weitere Untersuchungen in dieser Richtung verzichtet.

## 8.2 Schätzung des Ablauftrends

Die Regressionsrechnung der Aufwandsverläufe innerhalb der Aufträge ermittelte unter anderem

$$\bar{y} = \frac{\sum \log_{10} T_s}{N}$$

jeder Kurve. Analog dem Vorgehen im vorangehenden Abschnitt wird in dieser Betrachtung der Verlauf dieser  $\bar{y}$  über die Folge analoger Aufträge gerechnet, wobei die fortlaufende Nummer der Auftragswiederholung ebenfalls als Logarithmus erfaßt wird.

Nach der Berechnung dieser Verläufe werden die  $b_j$  je Versuchsperson zusammengefaßt. Mit dem t-Test wird geprüft, ob die arithmetischen Mittelwerte der  $b_j$  jeder Person wesentlich von Null verschieden sind.

$$t = \bar{b} \sqrt{\frac{N}{s^2}}$$

Das Ergebnis zeigt nachstehende Zusammenstellung

Person	$\bar{b}$	$s^2$	N	t
11	+0,136	1,239	13	0,438
12	-0,002	0,262	12	0,016
13	-0,193	0,749	11	0,739
21	-0,054	1,121	5	0,111
47	-0,005	0,003	2	0,126
51	-0,074	0,253	5	0,329
53	-0,053	0,101	3	0,288
61	-0,217	0,613	7	0,734
63	+0,018	0,024	4	0,230
64	+0,019	0,078	3	0,126
71	+0,026	0,070	2	0,139
72	-0,001	0,016	2	0,004

Tabelle 62

Arbeiter-Nr.	N	$\bar{y}$	B	s	a
36	10	82,60	0,732	2,647	86,695
31	12	83,60	0,715	4,402	66,036
37	14	89,60	0,870	4,894	132,899
33	14	90,04	0,723	7,276	133,805
Totales System	55	87,70	0,354	8,360	97,445

Arbeiter-Nr.	$b_1$						
	1	2	3	4	5	6	7
36	-0,075	0,257	-0,576	-0,009	1,674	-0,297	-0,249
31	0,005	1,123	-6,393	-0,146	3,607	-0,735	2,158
37	-0,311	-0,370	1,373	-0,024	0,897	-0,084	-0,670
33	-0,217	-1,188	-1,172	0,145	-0,373	0,113	0,079
Totales System	-0,137	-0,103	-0,166	-0,004	0,957	-0,065	0,038

Arbeiter-Nr.	$t_1$							$t_{0,05}$
	1	2	3	4	5	6	7	
37	-1,821	0,799	0,304	-0,206	0,669	-0,662	-0,308	2,228
31	0,061	1,734	-0,593	-1,631	1,571	-2,215	0,614	2,179
37	-4,547	-0,604	0,358	-0,499	0,545	-0,534	-0,454	2,125
33	-2,318	-1,249	-0,347	1,329	-0,413	0,365	0,128	2,125
Totales System	-3,272	-0,289	-1,051	-0,099	2,593	-1,141	0,711	2,004

Tabelle 61 Mehrfache Regressionsanalyse

Da  $t_{0,05} = 1,900 > t$  ist, hat keine Person ein  $\bar{b}$  das statistisch gesichert ungleich Null ist. Dieses Ergebnis rührt von der großen Streuung der  $b_j$  her.

Immerhin muß für  $\bar{b}$  festgehalten werden, daß 8 negative und nur 4 positive Vorzeichen haben. Wie der Chi-Quadrat-Test

$$\chi^2 = \frac{(a - b)^2}{a + b} = \frac{(8 - 4)^2}{8 + 4} = \frac{16}{12} = 1,33 < 3,841$$

zeigt, ist der Gruppenunterschied nicht gesichert, wobei aber die Vermutung trotzdem naheliegt, daß bei größerem Unterlagenumfang der fallende Kurventrend überwiegen würde.

Um aber wenigstens einen qualitativen Hinweis zu erhalten, ob Dienstaltersunterschiede in der Einübung feststellbar sind, wird folgende Betrachtung durchgeführt:

Jeder gerechnete Ablaufexponent  $b$  wird auf seine Verschiedenheit von Null geprüft

$$t = b \sqrt{\frac{S_{xx}}{s^2}}$$

Auftrags-Nr.	b	S <sub>xx</sub>	s <sup>2</sup>	N	t	t <sub>0,05</sub>	β
1-01	+0,399	0,116	0,005	3	1,845	12,706	0
02	+0,001	4,119	0,002	31	0,023	2,045	0
03	+0,025	0,304	0,005	5	0,188	3,182	0
04	-0,268	0,204	0,004	4	1,875	4,303	0
05	+0,142	0,204	0,001	4	0,282	4,303	0
06	+0,009	0,204	0,007	4	0,046	4,303	0
07	-0,219	0,045	.	2	.	.	.
08	+0,624	0,045	.	2	.	.	.
09	-0,192	0,045	.	2	.	.	.
10	-0,070	0,116	0,014	3	0,198	12,706	0
11	+0,372	0,045	.	2	.	.	.
12	+0,156	0,045	.	2	.	.	.
13	+0,784	0,045	.	2	.	.	.
12-01	+0,011	0,414	0,001	6	0,286	2,776	0
02	-0,052	4,943	0,002	36	0,740	2,030	0
03	-0,075	0,204	0,001	4	0,855	4,303	0
04	-0,174	0,304	0,004	5	1,125	3,182	0
05	+0,026	0,045	.	2	.	.	.
06	-0,157	0,116	0,001	3	2,410	12,706	0
07	+0,362	0,045	.	2	.	.	.
08	+0,052	0,204	0,017	4	0,088	4,303	0
09	+0,033	0,045	.	2	.	.	.
10	+0,137	0,116	0,008	3	0,509	12,704	0
12	-0,255	0,045	.	2	.	.	.
13	+0,067	0,116	0,001	3	0,428	12,704	0
13-01	-0,239	0,204	0,001	4	5,400	4,303	-
03	-0,608	0,045	.	2	.	.	.
04	-0,262	0,116	0,001	3	6,400	12,706	0
05	+0,028	0,116	0,001	3	0,848	12,706	0
06	-0,112	0,530	0,001	7	3,100	2,571	-
07	-0,171	0,304	0,001	5	1,969	3,182	0
08	-0,068	0,116	0,001	3	0,192	12,706	0
09	-0,023	0,045	.	2	.	.	.
10	-0,067	0,204	0,002	4	0,688	4,303	0
11	-0,477	0,204	0,001	4	5,240	4,303	-
12	-0,118	0,204	0,001	4	1,372	4,303	0

Tabelle 63 t-Test der einzelnen Ablaufexponenten

Auf Grund dieses Tests werden die  $b_j$  jeder Person in zwei Gruppen getrennt.

$$b_j = 0 \text{ (a) } b_j < 0 \text{ (b)}$$

(es wurden keine  $b_j > 0$  festgestellt).

Sind a und b die Häufigkeiten der Gruppen, kann analog dem vorangehenden mit der Berechnung von  $\chi^2$  festgestellt werden, welche von beiden die Gegebenheit repräsentiert.

Das Testergebnis zeigt Tabelle 63. Da eine Gerade durch zwei Punkte eindeutig bestimmt ist, wird bei  $N = 2$ ,  $s^2 = 0$  und  $t = \infty$ . Eine Gerade durch zwei Punkte ist aber statistisch weniger aussagefähig als eine Approximation durch mehrere Werte. Aus dieser Überlegung scheint es gerechtfertigt, die b einer Geraden mit  $N = 2$  nicht in die Prüfung einzubeziehen.

Die Versuchspersonen 11 und 12 weisen gestützt auf diese Untersuchung eindeutig einen horizontalen Verlauf, also keine Einübung mehr auf.

Versuchsperson 13 hingegen hat neben 6 b-Werten, die nicht wesentlich von Null verschieden sind, 3 negative b

$$\chi^2 = \frac{(6 - 3)^2}{6 + 3} = 1 < 3,841$$

Die beiden Gruppen bestehen somit statistisch aus gleich großen Anteilen. Da die Nullen nicht überwiegen, darf geschlossen werden, daß sich 13 von 11 und 12 unterscheidet und sich im Einübungsstadium befindet.

Mit dem gleichen Ziel läßt sich eine etwas weniger strenge Betrachtung durchführen, indem die b hier nur nach dem Vorzeichen gruppiert werden.

Person	Häufigkeit		Chi-Quadrat
	positiv	negativ	
11	9	4	1,92
12	7	5	0,33
13	1	10	7,30

Tabelle 64

Der Testwert ist

$$\chi^2_{0,05} = 3,841$$

Somit stimmt dieses Ergebnis mit dem vorangehenden überein, das heißt 11 und 12 haben statistisch gleich viele positive wie negative Exponenten, während bei 13 eindeutig die negativen überwiegen.

Das Ergebnis überrascht insofern nicht, als Arbeiterin 13 während der Messung die Arbeit in dieser Abteilung aufgenommen hat und sich somit noch in der Anlernperiode befindet, während Arbeiterin 11 während 1,5 und 12 während 2 Jahren diese Arbeit ausführen.

Da alle übrigen Versuchspersonen bereits seit einiger Zeit in ihren Abteilungen tätig sind und die eigentliche Anlernzeit hinter sich haben, können sie für eine Gesamtbetrachtung zusammengefaßt werden.

Mit Ausnahme der b von Arbeiterin 13 werden sämtliche b nach den Vorzeichen gruppiert:

positive b: 28  
negative b: 37

$$\chi^2 = \frac{81}{65} = 1,25 < 3,84$$

Demnach läßt sich gesamthaft nach dieser Erfassungs- und Betrachtungsweise kein fallender Kurventrend statistisch gesichert feststellen. Immerhin ist auch hier zu bemerken, daß sich aus der Regressionsrechnung deutlich mehr negative als positive Ablaufexponenten ergeben.

## 9 ZUSAMMENFASSUNG

Die Arbeit befaßt sich mit der Methodik der Erfassung und der Grenzen der Quantifizierbarkeit der Einübung unter industriellen Arbeitsbedingungen. An Mittel- und Kleinserien, die sich mit geringen Arbeitsmodifikationen folgen und sich in ungleichen Zeitabständen wiederholen, werden die Zeitaufwände von Arbeitsgängen erfaßt. Die Untersuchung erstreckt sich über sehr unterschiedliche Arbeitsarten.

Nach logarithmischer Transformation der gemessenen Zeiten und den zugehörigen Nummern der Wiederholungszyklen, werden die Regressionsgeraden der Zeitverläufe bestimmt: Bei einigen Montagearbeiten über die Halbtage, im allgemeinen über die Aufträge. Bei wiederkehrenden Aufträgen werden die Regressionslinien der Auftragsdurchschnitte in Funktion der Wiederholung bestimmt.

Die Kurvenverläufe dieser drei Betrachtungsintervalle werden eingehend analysiert:

### *Arbeitstag*

Sowohl während des Vormittags als auch während des Nachmittags läßt sich bei Montagearbeiten an Schwachstromapparaten der Einübungsverlauf eindeutig ermitteln. Die Ablaufexponenten sind verschieden zwischen den Personen und zwischen Vor- und Nachmittag. Der Exponent  $\beta$  der Grundgesamtheit liegt bei einem Fehlschlußrisiko von 0,05 in den Grenzen

$$\beta = -0,0242 \pm 0,0096$$

Die Arbeitsunterbrüche während des Mittags und der Nacht bewirken einen Übungsverlust und damit eine mittlere Aufwandszunahme von 2% nach der Mittagspause und 3% nach dem Nachtunterbruch. Beide Werte sind mit großen Streuungen behaftet. Die Häufigkeitsverteilungen der Aufwandsveränderungen sind unabhängig von den Personen und den durchgeführten Arbeiten.

Rückblickend auf diese Ergebnisse ist folgendes festzuhalten:

Durch die Darstellung der Aufträge durch ihren Durchschnitt werden zusätzliche Komponenten in die Betrachtung einbezogen. Damit wird der resultierende Verlauf so flach, daß er beim vorhandenen Unterlagenumfang und der Größe der Untersuchungsdauer kaum mehr feststellbar ist.

### *Auftrag*

Mit Ausnahme der Punktschweißmontage lassen sich die Einübungsverläufe an allen untersuchten Arbeiten eindeutig ermitteln. Der Hauptanteil der Gesamtstreuung ist intra-individuell bedingt. Diese naturbedingte Basisstreuung ist so groß, daß Unterschiede zwischen Personen nicht mehr und arbeitsabhängige Einflüsse nur noch bei markanten Differenzen in Erscheinung treten. Die in die Untersuchung einbezogenen Arbeiten lassen sich nach Branchen getrennt durch zwei Einübungsverläufe erfassen. Die Exponenten dieser Grundgesetze liegen in den Grenzen

$$\text{Elektroapparate} \quad \beta = -0,1106 \pm 0,0182$$

$$\text{Uhren} \quad \beta = -0,0651 \pm 0,0152$$

Ein Vergleich mit den Halbtagsverläufen zeigt, daß die Einübung über Aufträge deutlicher zum Ausdruck kommt. Die größere Genauigkeit der Schätzung bei der Auftragsbetrachtung rührt einerseits von den umfangreicheren Unterlagen und andererseits von der ausgleichenden Wirkung längerer Kurvenverläufe her.

### *Identische Aufträge*

Der Versuch, die zusätzlichen Komponenten des Übungsverlaufes über identische Aufträge mit Hilfe einer mehrfachen Regressionsrechnung zu erfassen, führt zu keinem brauchbaren Ergebnis. Die vorhandenen Unterlagen erlauben nicht, mit den angewandten Methoden das Vorhandensein einer Aufwandabnahme statistisch gesichert festzustellen. Immerhin weisen die Zusammenstellungen deutlich auf die Existenz einer Einübung hin.

Auf eine Diskussion der praktischen Verwendung der Erkenntnisse aus dieser Studie in der Planungstechnik wird verzichtet, da in der Literatur viele brauchbare Vorschläge zu finden sind (CATELAS, COCHRAN, DE JONG, SCHIEFERER). Das hier Erreichte soll aber erlauben, die mehr auf funktionellen Zusammenhängen beruhenden Methoden zu quantifizieren und ihre Konsequenzen für die Praxis abzuschätzen.

Zürich, im Februar 1961

*Th. Fäßler*

## LITERATUR

### *Arbeitswissenschaft*

- CATELAS, C., Application M.T.M. Mesure de l'Accoutumance Opérateur. Paris 1960.
- COCHRAN, E. B., New Concepts of Learning Curve. The Journal of Industrial Engineering. 11 (1960) 4, p. 317-327.
- CROSSMANN, E.R.F.W., A Theory of the Acquisition of Speed-Skill. Ergonomics. 2 (1958/59) 2, p. 153-166.
- DAUBERT, H., Einarbeitung, Leistung und Entlohnung. Refa-Nachrichten 10 (1957) 3, S. 95-100.
- ELLINGER, TH., Ablaufplanung. Stuttgart 1959.
- ENGEL, R., Einfluß der Übung auf die Arbeitsgeschwindigkeit. Industrielle Psychotechnik 8 (1931) 1, S. 14-18.
- EPSTEIN, B., Immediate and Retention Effects of Interpolated Rest Periods on Learning Performance. New York 1949.
- FORNALLAZ, P., Die Wahrscheinlichkeitsrechnung im Dienste der Arbeitsanalyse. Industrielle Organisation 11 (1940) 3, S. 64-71; 4, S. 89-98.
- HENDERSON, J.G., The Estimation of the Transfer Function of a Human Operator by a Correlation Method of Analysis. Ergonomics, 2 (1958/59) 3, p. 274-286.
- HILBERT, H.L., Die Berechnung von Einlaufkurven. Zbl.Arb. Wiss. 5 (1951) 9, S. 133-136.
- DE JONG, J.R., Leistungsminderung mit vorrückendem Alter. Zbl.Arb.Wiss. 13 (1959) 8/9, S. 136-140.
- DE JONG, J.R., Fertigkeit, Stückzahl und benötigte Zeit. Berlin 1956.
- KERN, B., Wirkungsformen der Übung. Münster 1930.
- KILBRIDGE, M.D., Predetermined Learning Curves for Clerical Operations. The Journal of Industrial Engineering, 10 (1959) 3, p. 203-209.
- KNOWLES, A.R., BELL, L.F., Learning Curves will tell you who's worth training and who's isn't. Factory Management and Maintenance, 108 (1950) 6, p. 114-115.
- KOEAN, F.T., Dynamische Auswertung. Fortschrittliche Betriebsführung, 9 (1960) 3, S. 57-62.
- MEYER, A., Einfluß der Übung auf die Arbeitsgeschwindigkeit. Industrielle Psychotechnik 7 (1930) 2, S. 53-55.
- POPPELREUTER, W., Über die Gesetzmäßigkeit der praktischen körperlichen Arbeitskurven. Praktische Psychologie 4 (1923) 12, S. 363-383.
- SCHIEFERER, G., Die Vorplanung des Anlaufes einer Serienfertigung. Diss. Techn.Hochschule Stuttgart 1957.
- SCHMIDT, A., Die Gesetzmäßigkeit der Produktivitätssteigerung. Rationalisierung 3 (1952) 3, S. 73-76.
- SCHMIDT, O., Der Personenwagenbau bei der Deutschen Bundesbahn. Glasers Annalen 19 (1955) 1, S. 1-13.
- SCHULTE, B., Leistungsverhalten des Menschen bei feinmotorischen Handlungen. Refa-Nachrichten 13 (1960) 4, S. 109-118.
- ULRICH, E., Zur Frage der Übung einer einfachen Geschicklichkeitsarbeit. Zbl.Arb.Wiss. 12 (1958) 11, S. 161-162.
- University of Birmingham, The Nature and Acquisition of Industrial Skill. Final Report, 1954-1956.
- VETTER, K., MÜLLER, E.A., Die Verbesserung der Geschicklichkeit durch Übung. Arbeitsphysiologie 15 (1954) 4, S. 264-272.
- WELFORD, A.T., The Measurement of Sensorymotor Performance. Ergonomics 3 (1960) 3, p. 189-230.
- WRIGHT, T.P., Factors Affecting the Cost of Airplanes. Journal of the aeronautical Sciences 3 (1936).

### *Mathematische Statistik*

- GRAF, U., HENNING, H., Formeln und Tabellen der mathematischen Statistik. Berlin 1953.
- LINDER, A., Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure. 3. Aufl., Basel 1960.

Die Problemstellung der vorliegenden Arbeit ergab sich aus der arbeitswissenschaftlichen Forschungstätigkeit des Betriebswissenschaftlichen Institutes an der Eidgenössischen Technischen Hochschule. Die Durchführung erfolgte unter Leitung der Herren Prof. Dipl. Ing. W. F. DAENZER und Prof. Dr. A. LINDER. Beiden Herren bin ich zu großem Dank verpflichtet.

Die wesentliche Voraussetzung dieser Studie war die Durchführung sehr umfangreicher Messungen in der Industrie.

Die gebotenen Möglichkeiten verdanke ich den Firmen Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich  
Schweizerische Industrie-Gesellschaft, Neuhausen  
Adolf Schild S.A., Grenchen

insbesondere den Herren Dir. HOFER, BAUMANN und KAUFFUNGEN. Mein Dank gilt ebenfalls allen Firmenangehörigen, die mich in der Durchführung der Aufnahmen und der Auswertung der Filme und Stempelkarten tatkräftig unterstützten.

TH. FÄSSLER

## LEBENS LAUF

Am 21. November 1931 wurde ich in Zürich geboren. Die Primarschule besuchte ich in Zürich und Solothurn. An der Kantonsschule Solothurn bestand ich 1951 die Matura Typus C. Im gleichen Jahr begann ich das Studium des Maschineningenieurwesens an der Eidgenössischen Technischen Hochschule. Nach Praxisaufenthalten in Belgien, Jugoslawien und den USA und nebenamtlicher Assistententätigkeit am Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre erhielt

ich im Frühjahr 1957 das Diplom der Spezialstudienrichtung «Betriebswissenschaften und Fertigungstechnik». Anschließend übernahm ich eine Assistentenstelle am Betriebswissenschaftlichen Institut. Im Jahre 1959 erteilte mir Herr Prof. DAENZER die Aufgabenstellung der vorliegenden Studie, die ich in meiner Freizeit bearbeitete.

TH. FÄSSLER