**Zeitschrift:** IABSE journal = Journal AIPC = IVBH Journal

**Band:** 3 (1979)

**Heft:** J-9: The learning effect on construction site

**Artikel:** Der Lerneffekt auf der Baustelle

**Autor:** Bräm, E.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-24231

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 04.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

# Der Lerneffekt auf der Baustelle

## The Learning Effect on Construction Site

## L'effet de la répétition au chantier

**E. BRÄM**

Dipl. Ing. ETH
Bauunternehmung AG Conrad Zschokke, Genf
Amden SG, Schweiz

**ZUSAMMENFASSUNG**

Wird eine Arbeit mehrmals wiederholt, so tritt ein Lerneffekt ein, der Aufwand wird zusehends geringer. Die vorliegende Schrift zeigt, wie dieser Effekt quantitativ erfasst und in die Planung einbezogen werden kann. Eine Reihe von Beispielen illustriert die Auswirkungen und vermittelt Anregungen für die praktische Anwendung in der Bauindustrie.

**SUMMARY**

If a work is repeated several times a learning effect occurs, the expenditure will be visibly lower. This report describes how this effect can be taken into account quantitatively and be utilized for planning. A number of examples shows the effects and gives stimulations for practical application in the construction industry.

**RÉSUMÉ**

Lorsqu'une même activité est réalisée plusieurs fois, il se produit un effet de répétition qui entraîne une réduction des coûts. Cet article montre comment quantifier cet effet de répétition, et comment le prendre en considération lors de la planification. Plusieurs exemples illustrent ces effets et suggèrent quelques possibilités d'application pratiques dans l'industrie de la construction.

## 1. EINFUEHRUNG

Wird eine Arbeit, z.B. die Herstellung eines bestimmten Bauteiles, mit denselben Arbeitern mehrmals nacheinander wiederholt, so stellt man fest, dass der Arbeitsaufwand pro Element mit fortschreitender Anzahl erstellter Elemente zunehmend geringer gehalten werden kann. Diese Wirkung kommt hauptsächlich durch folgende Einflüsse zustande:

- Zunehmende Erfahrung und Routine der einzelnen beteiligten Arbeiter
- Besseres Zusammenwirken der ganzen Arbeitsequipe
- Laufende Verbesserung der Planung und Organisation
- Sukzessive Ausmerzung von Behinderungen und Verlustzeiten
- Laufende Verbesserung der Arbeitsmethoden
- Laufende Verbesserung der verwendeten Geräte und Hilfsmittel

Die Auswirkungen all dieser Einflüsse sind nachfolgend unter dem Begriff Wiederholungs- oder Lerneffekt zusammengefasst.

Je nach der Art der eingeführten Verbesserungen tritt deren Auswirkung sprunghaft oder allmählich in Erscheinung. In der Planungsphase können sprunghafte Verbesserungen nicht vorausgesehen werden, es muss deshalb der in der Praxis auch weitaus häufigere Fall einer systematischen Verbesserung angenommen werden. Dabei ist es charakteristisch, dass die Verbesserung, d.h. die Verminderung des Arbeitsaufwandes von Element zu Element, in der Anfangsphase am stärksten in Erscheinung tritt und später, wenn nur noch geringe Verbesserungsmöglichkeiten bestehen, weniger stark ausgeprägt ist.

## 2. LERNKURVEN UND LERNRATEN

Wird der Arbeitsaufwand $E_n$ für jedes einzelne von n gleichen und nacheinander mit denselben Arbeitern produzierten Arbeitselementen in Prozenten des Aufwandes für das erste Element ausgedrückt und aufgezeichnet, so erhält man die Lernkurve der Einzelwerte $E_n$ (siehe Fig. 1).

Entsprechend der bereits erwähnten Charakteristik fällt die Kurve in der Regel vom ersten zum zweiten Element am stärksten, danach fällt sie von Element zu Element immer weniger stark, weil die Verbesserungsmöglichkeiten immer geringer werden und schliesslich wird die Kurve fast horizontal, weil weitere Verbesserungen kaum mehr möglich sind.

Wird der durchschnittliche Arbeitsaufwand $D_n$ als arithmetisches Mittel aus den Einzelwerten $E_n$ der Elemente 1 bis n ermittelt und für jede Zahl n aufgezeichnet, so erhält man die Lernkurve der Durchschnittswerte $D_n$ (siehe Fig. 1), die in ihrer Charakteristik ähnlich gestaltet ist wie die Kurve der Einzelwerte, nur mit dem Unterschied, dass sie anfänglich weniger stark und später etwas stärker fällt als jene.

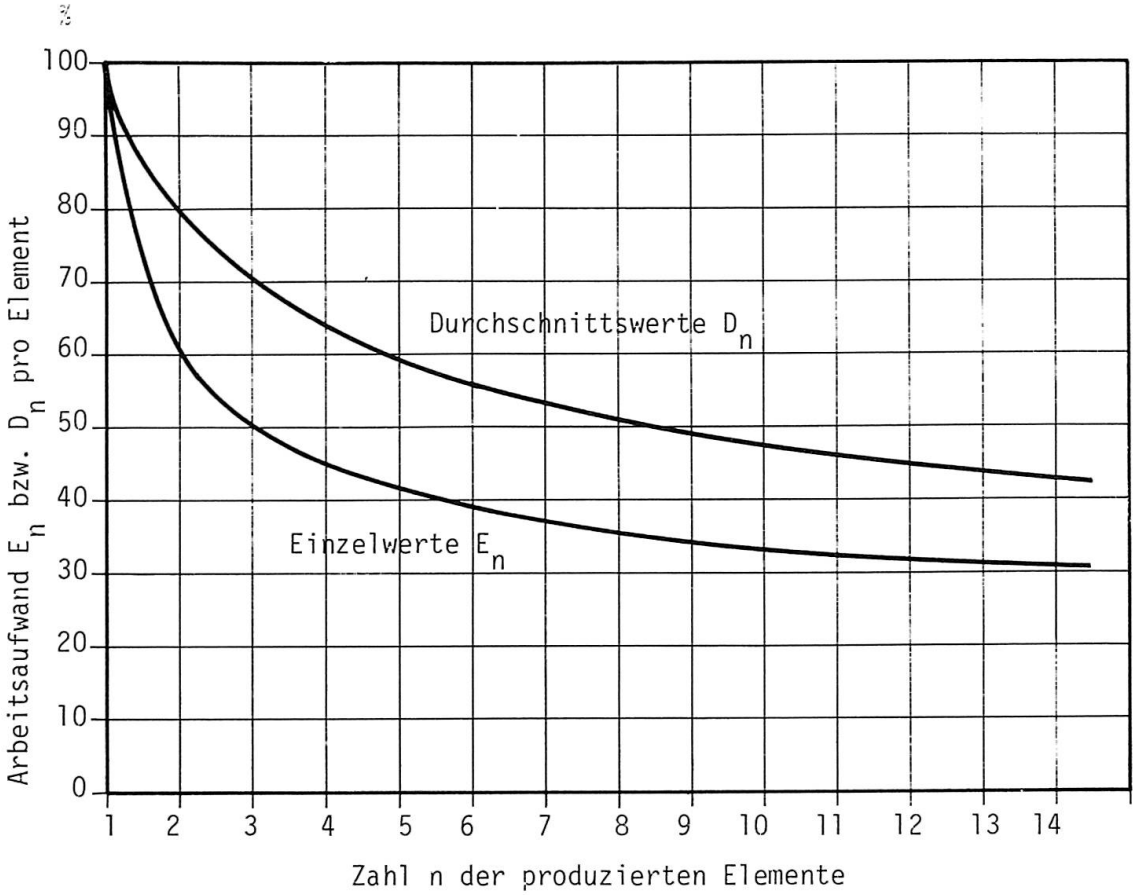


Fig. 1 Lernkurven (natürlicher Massstab)

Die Erfahrung zeigt nun, dass in der Praxis der Verlauf der Lernkurve der Durchschnittswerte $D_n$ genügend genau dadurch umschrieben werden kann, dass die Werte $D_n$ bei jeder Verdoppelung der Zahl n um den konstanten Faktor $\varphi < 1$ kleiner sind.

Der konstante Faktor $\varphi$ wird Lernrate genannt. Sie ist abhängig von der "Lernfähigkeit" der eingesetzten Arbeiter, die ihrerseits wieder von verschiedenen Umständen, z.B. von der Art der auszuführenden Arbeit und der angewandten Methode abhängt.

In besonderen Fällen und wenn es die Erfahrung erheischt, kann anstelle einer Verdoppelung der Elemente auch eine Vervielfachung um einen anderen Faktor in Betracht gezogen werden, ohne dass sich deswegen an den nachfolgend beschriebenen Verfahren grundsätzlich etwas ändert. Die weiteren Ausführungen beziehen sich aber ausschliesslich auf eine Verdoppelung.

Eine Lernrate $\varphi = 0.80$ bedeutet somit, dass der durchschnittliche Aufwand bei Ausführung von zwei gleichen Elementen 80 % des Aufwandes beträgt, der bei der Ausführung des ersten Elementes entsteht, ferner dass der durchschnittliche Aufwand bei Ausführung von vier Elementen 80 % des durchschnittlichen Aufwandes bei Ausführung von nur zwei Elementen beträgt oder dass z.B. der durchschnittliche Aufwand bei 20 Elementen 80 % desjenigen bei nur 10 Elementen beträgt usf.

Die Darstellung in Fig. 1 entspricht z.B. einer Lernrate von 80 %.

Es muss hier erwähnt werden, dass dem Prinzip einer stets weitergehenden Verminderung des Aufwandes in der Praxis von Fall zu Fall Schranken gesetzt sind, indem es sich z.B. als technisch undurchführbar erweisen kann, eine Arbeit über ein gewisses Mass hinaus noch weiter zu rationalisieren. So kann z.B. die Forderung nach Einhaltung einer minimalen Erhärtungszeit des Betons vor dem Ausschalen eine weitergehende Verminderung des Zeitbedarfes verhindern. Oder es kann z.B. eine Arbeitsequipe nicht mehr weiter reduziert werden, weil sie bereits nur noch aus der für gewisse Arbeitsgänge erforderlichen minimalen Anzahl Arbeitern besteht usw.

Trotz dieser Einschränkung ist das Prinzip für in der Praxis normalerweise vorkommende Wiederholungszahlen überaus wirklichkeitsnah und es erweist sich als äusserst praktisch und einfach in der Anwendung.

## 3. ERFAHRUNGSWERTE AUS DER PRAXIS

Grosse Verbesserungen, d.h. eine starke Verminderung des Arbeitsaufwandes von Element zu Element ergeben einen niedrigen Wert für die Lernrate $\varphi$ von etwa 65 % bis 80 %. Solche Werte können eintreten, wenn die Arbeit schlecht geplant ist, viel Handarbeit erfordert oder sehr komplex und ungewohnt ist oder wenn die Arbeiter wenig Ausbildung und Routine haben und gleichzeitig die Führung durch fortwährenden Druck oder andere geeignete Massnahmen (z.B. durch ein wirksames Akkordsystem) Verbesserungen in der Leistung bewirkt.

Nur geringe Verbesserungen führen zu einem hohen Wert für die Lernrate $\varphi$ von etwa 80 % - 95 %. Solche Werte werden erreicht, wenn die Arbeit gut geplant oder stark mechanisiert ist und die Arbeiter über die notwendige Erfahrung und Routine verfügen. Hier ist zu beachten, dass trotz geringer Leistungssteigerung von Element zu Element gute Resultate möglich sind, weil bereits die anfänglichen Leistungswerte entsprechend hoch sind.

In der nachstehenden Tabelle sind einige Beispiele für in der Praxis erreichte Lernraten angegeben.

| Lernrate in % | Beispiele: |
|---|---|
| 95 | - Stark mechanisierte Routinearbeit, gute Vorausplanung, erfahrene Arbeiter. |
| | - Langweilige Arbeit, von Einzelperson ausgeführt, kein besonderer Anreiz. |
| 85 | - Traditionelle Handwerksarbeit, im Team von Facharbeitern und Hilfsarbeitern ausgeführt, durchschnittliche Aufsicht. |
| 75 | - Technisch anspruchsvolle Arbeit mit neuartigen Problemen, Zusammenwirken mehrerer Equipen, gute Aufsicht und ständiger Druck zu Leistungsverbesserungen. |
| 65 | - Technisch komplexe und ungewohnte Arbeit, unerfahrenes Team, laufende Methodenverbesserung, ständiger Druck zu Leistungsverbesserungen. |

## 4. MATHEMATISCHE DARSTELLUNG DER LERNKURVEN

Obwohl im nächsten Abschnitt gezeigt wird, dass das Lernprinzip mit einfachen graphischen Mitteln angewandt werden kann, soll das Problem zunächst mathematisch dargestellt werden.

Die Lernkurve der Durchschnittswerte $D_n$ entspricht der mathematischen Funktion

$$D_n = n^{\alpha}$$

Der Exponent $\alpha$ ergibt sich aus der Forderung, dass bei Verdoppelung von n der Wert $D_n$ mit der Lernrate $\varphi$ zu multiplizieren ist:

$$D_{2n} = \varphi D_n \qquad \text{bzw.} \quad (2n)^{\alpha} = \varphi\, n^{\alpha} \qquad \text{oder} \quad 2^{\alpha} = \varphi$$

und logarithmiert

$$\alpha \log 2 = \log \varphi \quad \text{oder} \quad \alpha = \frac{\log \varphi}{\log 2}$$

Somit wird:

$$D_n = n^{\frac{\log \varphi}{\log 2}} \qquad (1)$$

$D_n$ = durchschnittlicher Aufwand der Elemente 1 - n, gemessen am Aufwand des ersten Elementes

$n$ = Zahl der Elemente

$\varphi$ = Lernrate

Werden die Lernkurven $D_n$ für verschiedene Lernraten $\varphi$ aufgezeichnet, so spricht man von Lernkarten. Sie bestehen aus einer Schar unterschiedlich geneigter, aber in ihrer Charakteristik ähnlicher Kurven, die alle durch den Punkt $n = 1 / D_1 = 1$ (= 100 %) gehen.

Durch logarithmieren der Funktion (1) erhalten wir:

$$\log D_n = \frac{\log \varphi}{\log 2} \log n$$

Bei gegebener Lernrate wird somit $\log D_n$ eine lineare Funktion von log n. Die Beziehung zwischen $D_n$ und n kann deshalb auf doppelt logarithmischem Papier als eine Gerade dargestellt werden. Sie geht durch die Punkte $n = 1 / D_1 = 1$ und $n = 2 / D_2 = \varphi$

Wir nennen diese Gerade Linie der Durchschnittswerte $D_n$, sie wird auch als Lernratenlinie bezeichnet und stellt auf doppelt logarithmischem Papier die Lernkurve der Durchschnittswerte $D_n$ entsprechend Gleichung (1) dar.

Werden auf doppelt logarithmischem Papier die Lernkurven für verschiedene Lernraten $\varphi$ dargestellt, so entstehen lauter Geraden (Lernratenlinien), die alle durch den Punkt $n = 1/D_1 = 1$ gehen und deren Neigung durch einen zweiten Punkt $n = 2/D_2 = \varphi$ (mit dem jeweiligen Wert für $\varphi$) bestimmt wird.

Um schliesslich auch die Einzelwerte $E_n$ berechnen zu können, gehen wir wie folgt vor: Wir verzichten auf die direkte Berechnung und bilden statt dessen die Kumulativwerte $K_n$ als Summe aller Einzelwerte $E_n$ der Elemente 1 bis n.

Es ist

$$K_n = n \cdot D_n = n \cdot n^{\frac{\log \varphi}{\log 2}} \quad \text{oder}$$

$$K_n = n^{\left(\frac{\log \varphi}{\log 2} + 1\right)} \qquad (2)$$

$K_n$ = kumulierter Aufwand der Elemente 1 bis n, gemessen am Aufwand des ersten Elementes

Die Einzelwerte $E_n$ erhalten wir hierauf als Differenz der entsprechenden Kumulativwerte wie folgt: $E_n = K_n - K_{n-1}$

Durch logarithmieren der Funktion (2) erhalten wir:

$$\log K_n = \left(\frac{\log \varphi}{\log 2} + 1\right) \log n$$

und somit eine Beziehung zwischen $K_n$ und n, die auf doppelt logarithmischem Papier wiederum als Gerade dargestellt werden kann. Sie geht durch den Punkt $n = 1/K_1 = 1$ und ihre Neigung kann durch einen zweiten Punkt bestimmt werden, der dadurch gefunden wird, dass auf der Ordinate einer beliebigen Zahl n das entsprechende Mass für log n ausgehend von der Lernratenlinie nach oben abgetragen wird (siehe Fig. 2). Wir nennen diese Gerade Linie der Kumulativwerte $K_n$.

In der Praxis stellt sich nun das Problem zumeist so, dass die Gesamtzahl u der von ein und derselben Equipe nacheinander auszuführenden Arbeitselemente im voraus bekannt ist.

Anstatt die Durchschnittswerte $D_n$, Kumulativwerte $K_n$ und Einzelwerte $E_n$ am Aufwand für das erste Element zu messen, ist es für die Lösung einiger Probleme zweckmässiger, diese Werte auf den Durchschnittswert $D_u$, der sich bei Ausführung aller u Elemente ergibt, zu beziehen. Sämtliche zuvor erhaltenen Werte sind, um dies zu erreichen, durch den Wert

$$D_u = u^{\frac{\log \varphi}{\log 2}} \quad \text{zu dividieren und wir erhalten}$$

$$D'_n = \frac{n^{\frac{\log \varphi}{\log 2}}}{u^{\frac{\log \varphi}{\log 2}}} \qquad (3)$$

$D'_n$ = durchschnittlicher Aufwand der Elemente 1 bis n, gemessen am durchschnittlichen Aufwand aller u Elemente

und $\left(\frac{\log \varphi}{\log 2} + 1\right)$

$$K'_n = \frac{n}{u^{\frac{\log \varphi}{\log 2}}} \qquad (4)$$

$K'_n$ = kumulierter Aufwand der Elemente 1 bis n, gemessen am durchschnittlichen Aufwand aller u Elemente

Die Division durch den konstanten Quotienten $D_u$ bedeutet in der Darstellung auf doppelt logarithmischem Papier lediglich eine Parallelverschiebung der zuvor gefundenen beiden Geraden und zwar in der Weise, dass die Lernkurve der Durchschnittswerte $D_n$ (Lernratenlinie) parallel durch den Punkt $n = u/D_u = 1$ zu legen ist und die Linie der Kumulativwerte $K_n$ parallel so zu verschieben ist, dass sie durch den Punkt geht, wo die soeben gefundene Linie die Ordinate n = 1 schneidet. Ausserdem muss diese Linie zur Kontrolle durch den Punkt $K_u = u$ gehen (siehe Lerndiagramm, Fig. 2).

## 5. LERNDIAGRAMM

Werden auf doppelt logarithmischem Papier auf der Abszissenaxe die Zahlen der Arbeitselemente n = 1,2,3 usf. und auf der Ordinatenaxe die Werte 1,2,3 usf. für $D_n$ bzw. $K_n$ angeschrieben, so entsteht das Lerndiagramm (siehe Fig. 2).

Zuerst wird die Lernratenlinie eingezeichnet. Sie geht durch die beiden Punkte $n = 1/D_1 = 1$ und $n = 2/D_2 = \varphi$ (in unserem Beispiel $D_2 = 0{,}8$, da als Lernrate 80 % gewählt wurden).

Sie stellt gleichzeitig die Linie der Durchschnittswerte $D_n$, gemessen am Wert für das erste Element, dar. Wir können also z.B. ablesen, dass der durchschnittliche Aufwand für die ersten 6 Elemente (bei der gewählten Lernrate von 80 %) 0,56 oder 56 % des Aufwandes für das erste Element beträgt.

Danach zeichnen wir die Linie der Kumulativwerte $K_n$ ein. Sie geht durch den Punkt $n = 1/K_1 = 1$. Einen weiteren Punkt erhalten wir, wenn wir bei einem beliebigen n (in unserem Beispiel n = 3) das Mass log n auf der entsprechenden Ordinate und ausgehend von der Lernratenlinie nach oben abtragen. Mit Hilfe dieser Linie können wir sämtliche Kumulativwerte $K_n$, gemessen am Aufwand für das erste Element, ablesen, also z.B. $K_3 = E_1 + E_2 + E_3 = 2.11$ bzw. 211 % oder $K_2 = E_1 + E_2 = 1.60$ bzw. 160 %.

Die Einzelwerte $E_n$, gemessen am Aufwand für das erste Element, ergeben sich danach als Differenz der entsprechenden Kumulativwerte, z.B. ist $E_3 = K_3 - K_2 =$ 51 % des Aufwandes für das erste Element.

Ist die Gesamtzahl u (in unserem Beispiel ist u = 18 gewählt) aller nacheinander von derselben Equipe auszuführenden, gleichen Arbeitselemente bestimmt und möchten wir die vorerwähten Werte, anstatt auf das erste Element, auf den Durchschnittswert für alle u Elemente beziehen, so gehen wir wie folgt vor:

Durch den Punkt $n = u / D_u = 1$ ziehen wir eine Parallele zur Lernratenlinie und erhalten damit die Linie der Durchschnittswerte $D'_n$. Mit ihrer Hilfe können wir z.B. ablesen, dass der durchschnittliche Aufwand für die ersten 3 Elemente das 1.78-fache oder 178 % des durchschnittlichen Aufwandes aller u Elemente beträgt.

Ziehen wir schliesslich durch den Punkt, wo die Linie der Durchschnittswerte $D'_n$ die Ordinate n = 1 schneidet, eine Parallele zur vorher gefundenen Linie der Kumulativwerte $K_n$, so erhalten wir die Linie der Kumulativwerte $K'_n$. Diese Linie muss durch den Punkt $n = u$ / $K'_u = u$ (in unserem Beispiel $u = 18$/$K'_{18} = 18$) gehen. Mit ihrer Hilfe können wir wiederum alle Kumulativwerte ablesen, diesmal jedoch bezogen auf den durchschnittlichen Aufwand für u Elemente. So wird z.B. $K'_3 = 5.35$ oder 535 % und $K'_2 = 4.06$ oder 406 %.

Die Einzelwerte $E'_n$ ergeben sich wieder als Differenz. So wird z.B. $E'_3 = 1.29$ bzw. 129 % des durchschnittlichen Aufwandes für u Elemente.

Es ist zu beachten, dass alle Werte "ohne Strich" auf den Aufwand des ersten Elementes und alle Werte "mit Strich" auf den durchschnittlichen Aufwand bei Ausführung aller u Elemente bezogen sind.

Das Lerndiagramm kann, wie wir gesehen haben, ohne Inanspruchnahme mathematischer Kenntnisse, auf einfachste Art und Weise mittels weniger Linien aufgezeichnet werden. Es gibt sogleich Auskunft über die Durchschnittswerte, Kumulativwerte und Einzelwerte des Aufwandes in Abhängigkeit von der Zahl der Elemente und der Lernrate und stellt damit ein geeignetes Instrument zur Lösung aller Fragen im Zusammenhang mit dem Lerneffekt dar.

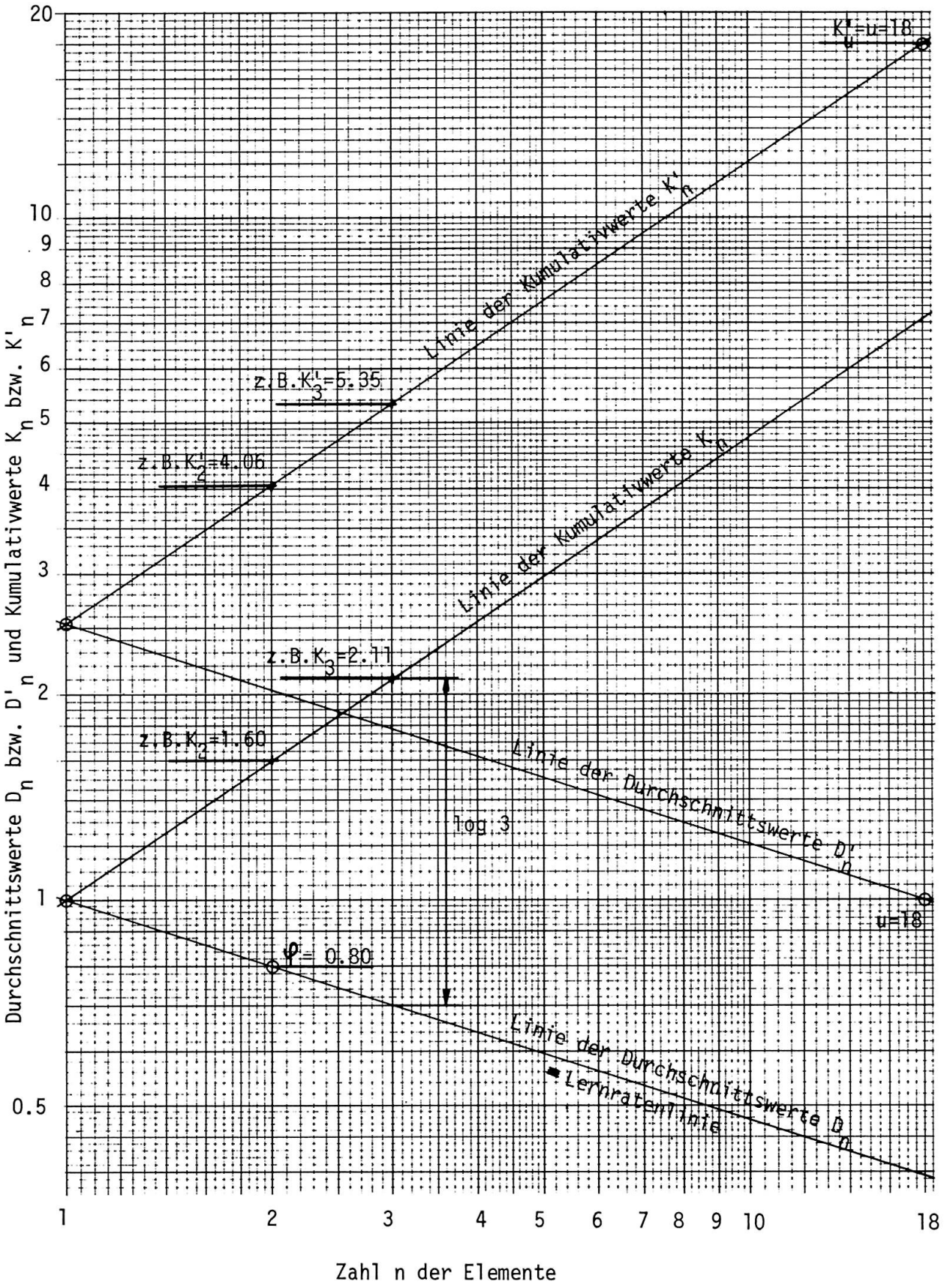


Fig. 2 Lerndiagramm, Beispiel für $\varphi = 0.80$ und u = 18

## 6. ANWENDUNGEN DER LERNTHEORIE

### 6.1 Bei der Kostenkalkulation

Bisher wurde stets lediglich von Aufwand gesprochen. In der Praxis wird vom Lerneffekt jedoch nur ein bestimmter, allerdings sehr wichtiger Anteil des gesamten Aufwandes betroffen, nämlich in der Regel der Lohnstunden- und/oder Gerätestundenaufwand und damit der Aufwand an Lohn- und/oder Gerätekosten, während z.B. der Aufwand an Baumaterial nicht berührt wird.

Für die Kostenkalkulation ist zunächst immer der zu erwartende durchschnittliche Aufwand an Lohn- bzw. Gerätestunden zu ermitteln. Setzen sich die Arbeit oder Teile davon aus mehreren gleichen Elementen zusammen, so ist vorerst zu bestimmen, wieviele Elemente von ein und derselben Arbeitsequipe nacheinander erstellt werden können.

Der durchschnittliche Aufwand $D_u$ für die soeben ermittelte Gesamtzahl u der von einer Equipe auszuführenden Elemente kann danach unter Annahme einer für die Art der Arbeit und die vorgesehene Belegschaft zutreffenden Lernrate zuverlässig abgeschätzt werden, indem z.B. Erfahrungswerte von ähnlichen Arbeiten unter Berücksichtigung einer allenfalls anderen Zahl von Elementen und/oder anderen Lernrate und gegebenenfalls anderen Ausgangsleistung entsprechend umgerechnet werden.

Beispiel 1:

Eine routinierte Schalequipe (mit durchschnittlichen Lohnkosten von z.B. Fr. 20.--/h) hat für das Schalen von 10 gleichen Betonstützen, die nacheinander erstellt wurden, im Durchschnitt 15 h/Stütze (oder Fr. 300.--/Stütze Lohnkosten) aufgewendet.

Frage 1: Wie gross ist der voraussichtliche Aufwand für 40 gleiche Stützen, die von einer gleichwertigen Equipe mit derselben Methode nacheinander zu erstellen sind?

Lösung: Wir schätzen, dass die Lernrate für diese Equipe und in Anbetracht der Arbeit 90 % beträgt.

Im Lerndiagramm lesen wir mit Hilfe der Lernratenlinie $\varphi$ = 90 % für n = 10 den Wert $D_{10}$ = 70 % ab. Der Aufwand für die erste Stütze betrug demnach 15 h x $\frac{100\%}{70\%}$ = 21.4 h.

Ebenso lesen wir im Lerndiagramm für n = 40 den Wert $D_{40}$ = 57 % ab.

Der durchschnittliche Aufwand für 40 Stützen ist 0.57 x 21.4 h = 12.2 h (oder Fr. 244.--).

Frage 2: Wie gross wäre der voraussichtliche Aufwand für 10 gleiche Stützen, wenn sie anstatt von einer routinierten Equipe von einer unerfahrenen, aber unter guter Führung stehenden Equipe (mit durchschnittlichen Lohnkosten von z.B. Fr. 17.--/h) ausgeführt würden?

Lösung: Da die Equipe eine gute Lernfähigkeit aufweist, schätzen wir die Lernrate auf 80 %. Gleichzeitig nehmen wir jedoch an, dass die anfängliche Leistung, verglichen mit derjenigen der routinierten Equipe, nur 50 % beträgt.

Der Aufwand für die erste Stütze dürfte demnach $\frac{21.4\ h}{50\%}$ = ca. 43 h betragen.

Im Lerndiagramm lesen wir mit Hilfe der Lernratenlinie $\varphi$ = 80 % für n = 10 den Wert $D_{10}$ = 48 % ab.

Der durchschnittliche Aufwand der unerfahrenen Equipe wäre 0.48 x 43 h = 20.6 h (oder Fr. 350.--).

Frage 3: Wie gross wird der voraussichtliche Aufwand, wenn die 40 gleichen Stützen von der unerfahrenen Equipe auszuführen sind?

Lösung: Im Lerndiagramm lesen wir für $\varphi$ = 80 % und n = 40 den Wert $D_{40}$ = 31 % ab.

Der durchschnittliche Aufwand wird 0.31 x 43 h = 13.3 h (oder Fr. 226.--).

Vergleicht man die Werte, so stellt man fest, dass bei 10 Stützen die unerfahrene Equipe im Durchschnitt pro Stütze 5.6 h = 37 % (oder Fr. 50.-- = 17 %) mehr aufwendet.

Bei 40 Stützen beträgt der Mehraufwand pro Stütze 1.1 h = 9 % (oder - Fr. 18.-- = - 7 %). Es zeigt sich hier sogar, dass die Kosten bei Einsatz der unerfahrenen Equipe geringer werden, obwohl in diesem Beispiel die durchschnittlichen Lohnkosten/h für die unerfahrene Equipe (bei 50 % geringerer Anfangsleistung!) nur 15 % tiefer angenommen wurden als für die routinierte Equipe.

Das Beispiel illustriert, dass infolge des Lerneffektes bei grosser Wiederholungszahl auch anfänglich schwache Equipen, sofern ein genügender Druck zu Leistungssteigerungen ausgeübt wird, gute Resultate erzielen können, während bei kleiner Wiederholungszahl routinierte Equipen überlegen sind.

Beispiel 2:

Eine Arbeitsequipe hat eine Stützmauer, bestehend aus 20 gleichen Teilstücken, die nacheinander ausgeführt werden, zu erstellen. Zurzeit sind bereits 8 Elemente ausgeführt und der bisherige Aufwand an Arbeitsstunden beträgt 3200 h.

Aus den Arbeitsrapporten konnte ermittelt werden, dass für die zuletzt ausgeführten 3 Elemente 1000 h aufgewendet wurden.

Fragen: Wie gross ist der voraussichtliche Gesamtaufwand für alle 20 Teilstücke?

Wie gross ist die Lernrate?

Lösung: Der durchschnittliche Aufwand für die ersten 8 Elemente beträgt $D_8^* = \frac{3200\ h}{8} = 400\ h$

Der durchschnittliche Aufwand für die ersten 5 Elemente beträgt $D_5^* = \frac{3200\ h - 1000\ h}{5} = 440\ h$

Die beiden Werte stellen zwei Punkte der Linie der Durchschnittswerte dar. Allerdings sind sie weder am ersten noch am letzten Element gemessen, sondern noch mit einem entsprechenden Faktor behaftet und deshalb mit * bezeichnet.

Eine Multiplikation mit einem konstanten Faktor bedeutet aber im Lerndiagramm, da wir doppelt logarithmisches Papier verwenden, eine blosse Parallelverschiebung.

Die Gerade, die wir durch die beiden Punkte ziehen, ist somit eine Parallele zur Lernratenlinie.

Wir wählen im Lerndiagramm einen passenden Massstab und schreiben die Ordinatenaxe mit 100,200,300,400,500 ... h an.

Hierauf tragen wir die beiden Werte für n = 8 bzw. n = 5 ein und ziehen durch sie eine Gerade.

Darauf können wir sogleich den Durchschnittsaufwand für 20 Elemente mit $D_{20}^{*}$ = 330 h ablesen.

Der voraussichtliche Gesamtaufwand beträgt somit 20 x 330 h = 6600 h.

Ziehen wir durch den Punkt $n = 1/D_1 = 1$ schliesslich noch eine Parallele zu dieser Geraden, so erhalten wir die Lernratenlinie und können auf der Ordinate n = 2 die Lernrate mit $\varphi$ = 0.86 oder 86 % ablesen.

## 6.2 Für die Baubetriebsplanung

Der Arbeitsaufwand ist stets das Produkt aus der Menge der eingesetzten Mittel (Anzahl Arbeiter, Geräte) und der Zeitdauer des Einsatzes.

Um den gemäss Lerntheorie unterschiedlichen Aufwand für die Herstellung der einzelnen gleichen Elemente aufzufangen, sind deshalb zwei grundsätzlich verschiedene Massnahmen möglich.

### 6.2.1 Anpassung der eingesetzten Mittel

In gewissen Fällen ist es zweckmässig, für sämtliche Elemente stets die gleiche Bauzeit, also einen bestimmten Takt, einzuhalten, um beispielsweise mit anderen, parallel laufenden Arbeiten Schritt zu halten. In diesem Fall müssen für das erste Element entsprechend vermehrte Mittel (also z.B. eine grössere Anzahl Arbeiter) eingesetzt werden, die dann, von Element zu Element, entsprechend abgebaut werden können.

Die Frage lautet dementsprechend, welche Mittel für jedes einzelne Element benötigt werden.

Beispiel 3:

Eine Arbeit besteht aus 9 gleichen Elementen, die nacheinander auszuführen sind. Die Lernrate $\varphi$ wird für die vorgesehene Arbeiterequipe auf 85 % geschätzt.

Der durchschnittliche Lohnstundenaufwand für 1 Element wurde, unter Berücksichtigung des Lerneffektes, mit 1300 h kalkuliert.

Die Arbeit soll in einem strengen zeitlichen Taktverfahren ausgeführt werden.

Frage 1: Wieviel beträgt der voraussichtliche Lohnstundenaufwand für jedes einzelne Element?

Lösung: Im Lerndiagramm (siehe Fig. 3) tragen wir zunächst die Lernratenlinie für $\varphi = 0.85$ ein.

Wir könnten nun für die Gesamtzahl der Elemente u = 9 die Linie der Durchschnittswerte $D'_n$ als Parallele zur Lernratenlinie durch den Punkt $u = 9 / D'_u = 1$ ziehen. Um die Sache aber noch weiter zu vereinfachen, steuern wir direkt auf die gesuchten Werte im Verhältnis zum Durchschnittswert $D_u^* = 1300$ h zu, d.h. alle Werte sollen sogleich mit diesem konstanten Faktor multipliziert sein.

Auf dem doppelt logarithmischen Papier erhalten wir somit wieder eine Parallele zur Lernratenlinie, die wir durch den Punkt $u = 9 / D_u^* = 1300$ h ziehen, nachdem wir die Ordinatenaxe mit den Werten 1000, 2000, 3000, ...h angeschrieben haben.

In ihrem Schnittpunkt mit der Ordinate n = 1 setzen wir die Linie der Kumulativwerte $K_n^*$ an, deren Neigung wir durch den weiteren Punkt $u = 9 / K_u^* = 9 \times 1300$ h = 11700 h bestimmen (dieser Punkt liegt um die Strecke log 9 über dem Punkt $D_u^* = 1300$ h).

Hierauf können wir alle Kumulativwerte direkt ablesen und die gesuchten Einzelwerte ergeben sich durch Differenzbildung wie folgt:

| Kumulativwerte (h) | Einzelwerte (h) |
|---|---|
| $K_1^* = 2180$ | $E_1^* = 2180$ |
| $K_2^* = 3700$ | $E_2^* = 1520$ |
| $K_3^* = 5050$ | $E_3^* = 1350$ |
| $K_4^* = 6290$ | $E_4^* = 1240$ |
| usf. | usf. |

Frage 2: Welche Anzahl Arbeiter ist für die einzelnen Elemente vorzusehen unter der Annahme, dass die Taktzeit (für 1 Element) 2 Wochen à 6 Tage à 9 Arbeitsstunden, d.h. 108 Arbeitsstunden beträgt?

Lösung: Selbstverständlich kann die notwendige Anzahl der Arbeiter aus dem vorhin ermittelten Lohnstundenaufwand berechnet werden, indem diese Werte durch 108 h dividiert werden.

Die Frage kann aber auch direkt, ohne Umweg über den Lohnstundenaufwand, beantwortet werden. Wir gehen aus von der durchschnittlich benötigten Anzahl Arbeiter von $\frac{1300 \text{ h}}{108 \text{ h}} = 12.0$ Mann und ziehen im Lerndiagramm (Fig. 3) eine neue (gestrichelt dargestellte) Parallele zur Lernratenlinie durch den Punkt $u = 9$ $D_u^{**} = 12$ Mann, nachdem wir die Ordinatenaxe für diese Fragestellung mit 1,2,3.. Mann angeschrieben haben.

In deren Schnittpunkt mit der Ordinate n = 1 ziehen wir die (ebenfalls gestrichelt dargestellte) Parallele $K_n^{**}$ zur vorher gefundenen Linie $K_n^*$ (bzw., wenn wir auf diese verzichtet hätten, wäre ein zweiter Punkt mit $u = 9/K_u^{**} = 9 \times 12$ Mann = 108 Mann bestimmt) und können sofort die Kumulativwerte ablesen bzw. die gesuchten Einzelwerte wie folgt bilden:

| Kumulativwerte (Mann) | Einzelwerte (Mann) |
|---|---|
| $K_1^{**} = 20$ | $E_1^{**} = 20$ |
| $K_2^{**} = 34$ | $E_2^{**} = 14$ |
| $K_3^{**} = 46$ | $E_3^{**} = 12$ |
| $K_4^{**} = 57$ | $E_4^{**} = 11$ |
| usf. | usf. |

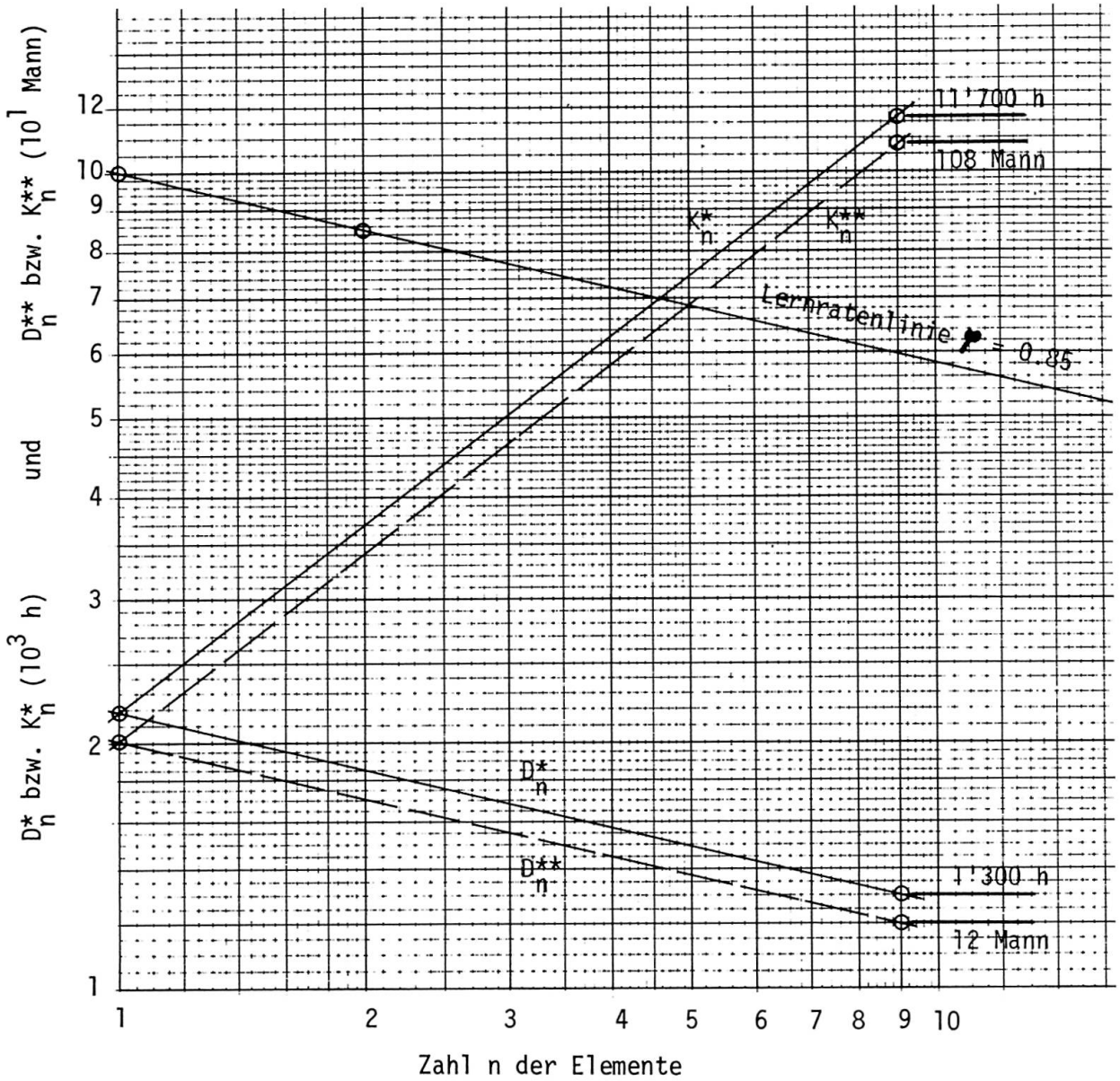


Fig. 3 zu Beispiel 3

6.2.2 Anpassung der Bauzeit

In vielen Fällen ist es aber zweckmässiger, anstelle einer festen Taktzeit und veränderlichen Mitteln, eine veränderliche Bauzeit und eine gleichbleibende Belegschaft vorzusehen. Die Zahl der Arbeiter und Geräte kann so gewählt werden, dass sie der auszuführenden Arbeit optimal entspricht. Dies ist auch besonders dann vorteilhaft, wenn die Arbeiter zuerst angelernt werden müssen und eine vermehrte Zahl von Arbeitern in der Anfangsphase nur noch grössere Konfusionen schaffen würde.

Bei dieser Methode ist es besonders wichtig, dass das Gesamtbauprogramm, das zur Ueberwachung des termingerechten Baufortschrittes dient, die zeitlichen Unterschiede, wie sie der Lerntheorie entsprechen, auch tatsächlich wiedergibt. Würde man nämlich einfach die mittlere Bauzeit pro Element aneinanderreihen, so entstünde während der ganzen Bauzeit der Eindruck eines vermeintlichen Verzuges, der erst ganz am Schluss verschwindet.

Beim Entwerfen des auf der Kalkulation beruhenden, durchschnittlichen Bauprogrammes für ein Element ist ferner darauf zu achten, dass eine Verlängerung (für die ersten Elemente) und eine Verkürzung (für die letzten Elemente) im vorgesehenen Ausmass überhaupt möglich ist und nicht z.B. durch technische Erfordernisse (z.B. Ausschalfristen etc.) vereitelt wird.

Beispiel 4:

Die im Beispiel 3 unter Punkt 6.2.1 erwähnte Arbeit soll, anstatt im zeitlichen Taktverfahren, so ausgeführt werden, dass die Belegschaft während der ganzen Bauzeit konstant auf 12 Mann gehalten werden kann und die Gesamtbauzeit unverändert 18 Wochen beträgt ($u = 9$, durchschnittliche Bauzeit pro Element $D_u^* = 2$ Wochen, $\varphi = 85$ %).

Frage: Wie müssen die Bauzeiten der einzelnen Elemente angesetzt werden?

Lösung: Im Lerndiagramm (siehe Fig. 4) tragen wir wieder als erstes die Lernratenlinie für $\varphi = 0{,}85$ ein.

Dann schreiben wir die Ordinatenaxe mit 1,2,3... Wochen an, und ziehen durch den Punkt $u = 9 / D_u^* = 2.00$ Wochen eine Parallele. In deren Schnittpunkt mit $n = 1$ ziehen wir die Linie $K_n^*$ so, dass sie durch den Punkt $u = 9 / K_u^* = 9 \times 2.00$ Wochen $= 18.00$ Wochen geht.

Daraufhin können wir sofort die Kumulativwerte $K_n^*$ ablesen, die gleichsam graphisch, allerdings im logarithmischen Massstab, das Gesamtbauprogramm mit Unterteilung in die einzelnen Elemente darstellen.

Die Bauzeiten der einzelnen Elemente können durch Differenzbildung aus den Kumulativwerten wie folgt beziffert werden:

| Kumulativwerte (Wochen) | Einzelwerte (Wochen) |
|---|---|
| $K_1^* = 3.35$ | $E_1^* = 3.35$ |
| $K_2^* = 5.69$ | $E_2^* = 2.34$ |
| $K_3^* = 7.76$ | $E_3^* = 2.07$ |
| $K_4^* = 9.68$ | $E_4^* = 1.92$ |
| usf. | usf. |

Die gleiche Aufgabe kann auch auf eine zweite Art gelöst werden, die in vielen Fällen zweckmässiger ist und deshalb ebenfalls gezeigt werden soll. Anstatt die eigentlichen Arbeitselemente (im vorliegenden Beispiel insgesamt 9) als Elemente zu betrachten, können auch die Zeitrastereinheiten, also in unserem Beispiel die Wochen (insgesamt 18) als Elemente bezeichnet werden. Wir denken uns gleichzeitig das durchschnittliche Bauprogramm eines Elementes (von 2 Wochen Dauer) 9 mal aneinandergereiht und bezeichnen dieses Bauprogramm als "Durchschnittsbauprogramm".

Wir ziehen (in Fig. 4) durch den Punkt $u = 18 / \bar{D}_u = 1$ eine Parallele zur Lernratenlinie und durch deren Schnittpunkt mit der Ordinate $n = 1$ sowie den Punkt $u = 18 / \bar{K}_u = 18$ die Linie der Kumulativwerte $\bar{K}_n$.

Hierauf können wiederum die Kumulativwerte abgelesen und durch Differenzbildung die Einzelwerte wie folgt ermittelt werden:

| Kumulativwerte (Wochen) | | Einzelwerte (Wochen) | |
|---|---|---|---|
| $\bar{K}_1 = 1.97$ | 1. Arbeitselement | $\bar{E}_1 = 1.97$ | 1. Arbeitselement |
| $\bar{K}_2 = 3.35$ | | $\bar{E}_2 = 1.38$ | |
| $\bar{K}_3 = 4.57$ | 2. Arbeitselement | $\bar{E}_3 = 1.22$ | 2. Arbeitselement |
| $\bar{K}_4 = 5.69$ | | $\bar{E}_4 = 1.12$ | |
| $\bar{K}_5 = 6.75$ | 3. Arbeitselement | $\bar{E}_5 = 1.06$ | 3. Arbeitselement |
| $\bar{K}_6 = 7.76$ | | $\bar{E}_6 = 1.01$ | |
| usf. | | usf. | |

Die erste Woche des Durchschnittsbauprogrammes wird im "Bauprogramm mit Lerneffekt" zu 1.97 Wochen, die zweite zu 1.38 Wochen, die dritte zu 1.22 Wochen usf.

Die Fertigstellung der einzelnen Arbeitselemente, gemäss Durchschnittsbauprogramm nach Ablauf von 2,4,6 usf. Wochen, erfolgt gemäss "Bauprogramm mit Lerneffekt" im Zeitpunkt $\bar{K}_2 = 3.35$ Wochen, $\bar{K}_4 = 5.69$ Wochen, $\bar{K}_6 = 7.76$ Wochen usf. Wir erhalten somit die gleichen Werte, wie bei der ersten Art der Lösung.

Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass jedem beliebigen Zeitpunkt des Durchschnittsprogrammes ein bestimmter Zeitpunkt im "Bauprogramm mit Lerneffekt" direkt zugeordnet ist. So entspricht z.B. der Zeitpunkt 5.2 Wochen im Durchschnittsbauprogramm dem Zeitpunkt 6.96 Wochen im "Bauprogramm mit Lerneffekt".

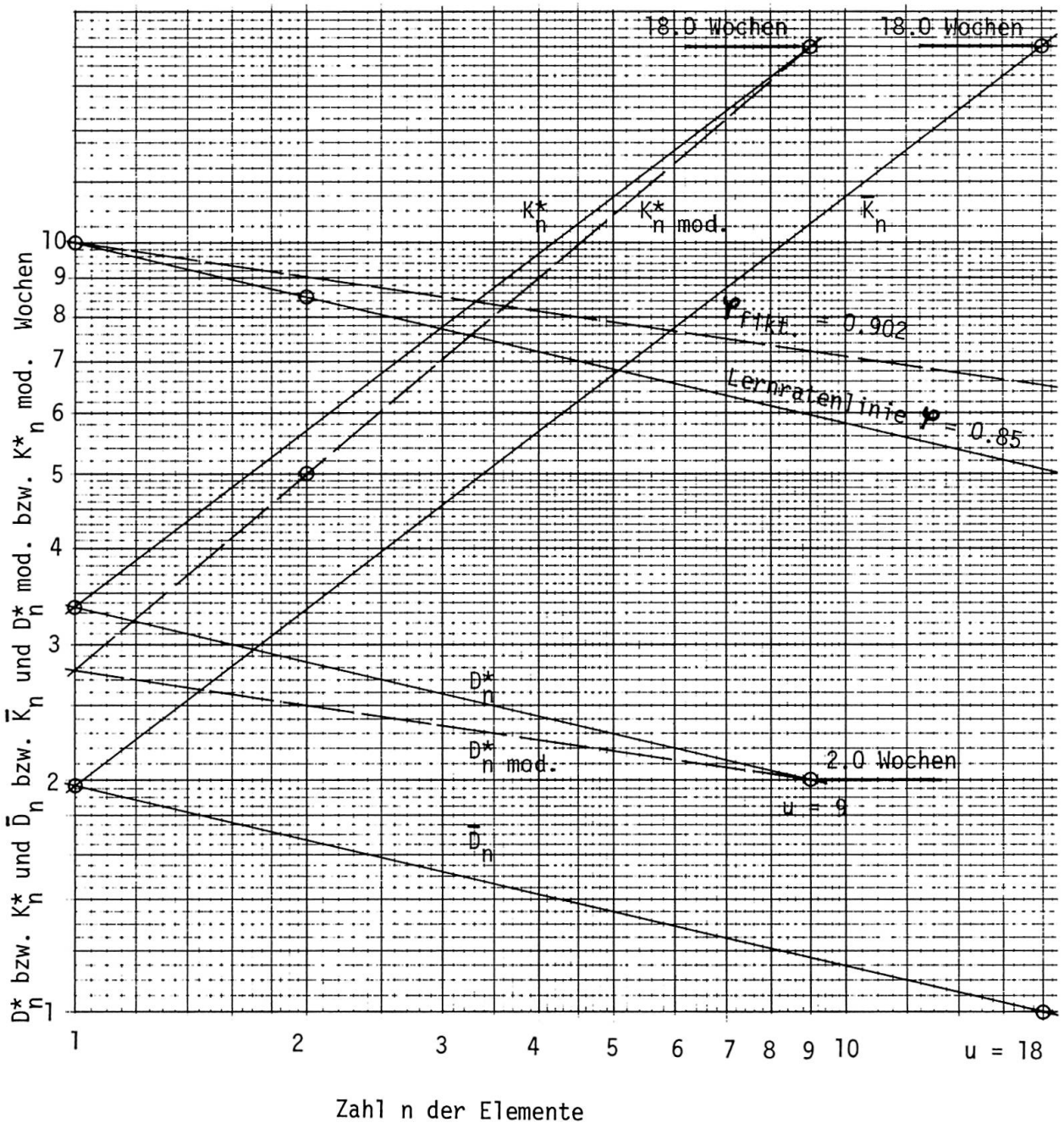


Fig. 4 Beispiele 4 und 5

### 6.2.3 Kombinierte Massnahmen

Die unter 6.2.1 und 6.2.2 dargestellten Massnahmen stellen Extremlösungen dar, die von Fall zu Fall angemessen sind. In anderen Fällen aber kann es zweckmässiger sein, die beiden Massnahmen miteinander zu kombinieren, d.h. in der Anfangsphase sowohl eine gewisse Erhöhung der eingesetzten Mittel als auch eine gewisse Bauzeitverlängerung bzw. in der Schlussphase eine entsprechende Verminderung der Mittel und Bauzeitverkürzung vorzusehen. Die gewünschte Lösung ergibt sich dadurch, dass man vorerst mit Hilfe des Lerndiagrammes den der Lernrate entsprechenden Arbeitsaufwand für jedes einzelne Element ermittelt (wie im Beispiel 3, Frage 1 dargestellt). Hierauf können z.B. die Bauzeiten der einzelnen Elemente gewählt und die entsprechend benötigten Mittel (z.B. Anzahl Arbeiter) für jedes Element wie folgt berechnet werden:

$$\text{Benötigte Mittel für das Element } n = \frac{\text{Arbeitsaufwand für das Element } n}{\text{gewählte Bauzeit für das Element } n}$$

Beispiel 5:

Die in den Beispielen 3 und 4 behandelte Aufgabe soll so gelöst werden, dass, bei gleicher Gesamtbauzeit von 18 Wochen, die ersten zwei Elemente bereits nach 5.00 Wochen (anstatt erst nach 5.69 Wochen gemäss Beispiel 4) fertiggestellt sind. Die Bauzeiten der einzelnen Elemente sollen der Lerntheorie entsprechend abgestuft sein.

Frage: Welche Bauzeiten und Belegschaften sind für die einzelnen Elemente vorzusehen?

Lösung: Im Lerndiagramm (Fig. 4) ziehen wir, ausgehend vom Punkt $u = 9 / K_u^* =$ 18 Wochen, eine modifizierte (gestrichelt dargestellte) Linie der Kumulativwerte $K_n^*$ mod. so, dass sie für $n = 2$ durch den Wert $K_2^*$ mod. = 5.00 Wochen geht, lesen die entsprechenden Kumulativwerte heraus und bilden die Einzelwerte wie folgt:

| Kumulativwerte (Wochen) | Einzelwerte (Wochen) | Belegschaft (Mann) |
|---|---|---|
| $K_1^*$ mod. = 2.77 | $E_1^*$ mod. = 2.77 | 14.5 |
| $K_2^*$ mod. = 5.00 | $E_2^*$ mod. = 2.23 | 12.6 |
| $K_3^*$ mod. = 7.06 | $E_3^*$ mod. = 2.06 | 12.1 |
| $K_4^*$ mod. = 9.02 | $E_4^*$ mod. = 1.96 | 11.8 |
| usf. | usf. | |

Da wir die Einzelwerte der Bauzeiten für konstante Belegschaft von 12 Mann aus dem vorherigen Beispiel 4 bereits kennen, erhalten wir jetzt die benötigten Belegschaften sofort aus der Umrechnung:

$$\text{Belegschaft für das Element } n = \frac{12.0 \text{ Mann} \times E_n^*}{E_n^* \text{ mod.}}$$

wie oben angegeben.

Die von uns gewählte modifizierte Linie der Kumulativwerte $K_n$* mod. entspricht einer fiktiven Lernrate von 90.2 % (anstelle von 85 %), was wir sofort feststellen können, wenn wir die zugehörige Linie der Durchschnittswerte $D_n$* mod. durch den Punkt n = 1, $D_1$ = 1 parallel verschieben. Die Bauzeiten sind somit tatsächlich gemäss Lerntheorie abgestuft, allerdings entsprechend einer geringeren Lernrate. Der verbleibende Unterschied wird durch die veränderliche Belegschaft kompensiert.

Im folgenden sei noch ein etwas komplexeres Beispiel angeführt, das geeignet ist, interessante Zusammenhänge und typische Gedankengänge aufzuzeigen und verschiedene Lösungsmöglichkeiten miteinander zu vergleichen.

Beispiel 6:

Innerhalb von 8 Monaten sind 6 gleiche Einfamilienhäuser zu erstellen. Der Rohbau besteht (zwecks Vereinfachung des Beispiels) lediglich aus einem Boden, den Wänden im Erdgeschoss und dem Dach.

Variante A

Eine erste grobe Abschätzung des Arbeitsaufwandes ergibt, dass eine Equipe von 9 Mann innert ca. 2½ Monaten den Rohbau eines Hauses erstellen kann. Innert 8 Monaten kann diese Equipe somit 3 Häuser nacheinander erstellen. Um in derselben Zeit 6 Häuser fertigzustellen, sind zwei Equipen unabhängig voneinander einzusetzen.

Die Gesamtzahl gleicher Elemente beträgt sowohl für die Böden wie die Wände und Dächer und für jede der beiden Equipen u = 3. Die Lernrate haben wir, da die vorgesehenen Equipen neu und aus unerfahrenen Arbeitern zusammengesetzt werden müssen, auf 75 % veranschlagt.

Im Lerndiagramm lesen wir für $\varphi$ = 75 % und u = 3 den Wert für den Durchschnittsaufwand mit $D_3$ = 0.63 oder 63 % ab.

In Würdigung dieses Wertes sowie der zu erwartenden bescheidenen Anfangsleistung der Equipe und unter Berücksichtigung der Art und Menge der einzelnen Arbeitsgattungen haben wir den durchschnittlichen Arbeitsaufwand wie folgt kalkuliert:

| | für 1 Haus | für 6 Häuser |
|---|---|---|
| Boden | 1200 h | 7200 h |
| Wände | 1430 h | 8580 h |
| Dach | 1680 h | 10080 h |
| Total | 4310 h | 25860 h |

Unter Annahme einer Equipengrösse von 9 Mann und einer wöchentlichen Arbeitsstundenzahl von 45 h wird der durchschnittliche Zeitaufwand für die Erstellung eines Hauses

| | | |
|---|---|---|
| Boden | 1200 h : 405 h = | 3.0 Wochen |
| Wände | 1430 h : 405 h = | 3.5 Wochen |
| Dach | 1680 h : 405 h = | 4.1 Wochen |
| Total | | 10.6 Wochen |

Aus dem Lerndiagramm entnehmen wir für u = 3 nach dem unter Punkt 6.2.2 beschriebenen Verfahren die Einzelwerte des Zeitbedarfes wie folgt:

| | Böden | Wände | Dächer | Total |
|---|---|---|---|---|
| 1. Haus | 4.8 | 5.5 | 6.5 | 16.8 Wochen |
| 2. Haus | 2.3 | 2.8 | 3.2 | 8.3 Wochen |
| 3. Haus | 1.9 | 2.2 | 2.6 | 6.7 Wochen |
| Durchschnitt | 3.0 | 3.5 | 4.1 | 10.6 Wochen |

Jede der beiden Equipen wird das erste Haus in 16.8 Wochen, das zweite in weiteren 8.3 Wochen und das dritte in weiteren 6.7 Wochen erstellt haben, die ganze Bauzeit beträgt 31.8 Wochen. Das Bauprogramm ist damit festgelegt (siehe Fig. 5a).

Da zwei Equipen gleichzeitig im Einsatz sind, brauchen wir zwei Baukrane und zwei vollständige Ausrüstungen, unter anderem zwei komplette Schalungsausrüstungen für Böden, Wände und Dächer.

Es stört uns dabei, dass z.B. die Wand- und Deckenschalung ungenutzt herumliegen, während die Equipen jeweils mit der Herstellung des Bodens beschäftigt sind.

Wir untersuchen deshalb noch eine andere Möglichkeit.

Variante B

Anstatt zwei Equipen unabhängig voneinander einzusetzen, wobei jede drei ganze Häuser erstellt, sollen drei Equipen so zum Einsatz kommen, dass die erste Equipe sämtliche Böden erstellt, die zweite sämtliche Wände und die dritte alle Dächer.

Dadurch wird die Gesamtzahl der Elemente für jede Equipe auf u = 6 erhöht. Aus dem Lerndiagramm entnehmen wir für $\varphi$ = 75 % und u = 6 den Wert $D_6$ = 47 %.

Der vorher (für u = 3) kalkulierte durchschnittliche Stundenaufwand ist deshalb auf diesen neuen Wert umzurechnen, und wir erhalten:

| | | für 1 Haus | für 6 Häuser |
|---|---|---|---|
| Boden | $1200\ h \times \frac{47\ \%}{63\ \%} =$ | 895 h | 5370 h |
| Wände | $1430\ h \times \frac{47\ \%}{63\ \%} =$ | 1067 h | 6402 h |
| Dach | $1680\ h \times \frac{47\ \%}{63\ \%} =$ | 1253 h | 7518 h |
| Total | | 3215 h | 19290 h |

Hier zeigt sich die enorme Auswirkung des Lerneffektes, werden doch gegenüber der vorher betrachteten Variante gesamthaft 6570 h oder 25 % der Lohnkosten eingespart.

Nun muss die Grösse jeder Equipe so festgelegt werden, dass die Arbeiten im Gleichschritt erfolgen. Wir wählen als Taktzeit 4 Wochen pro Haus.

Die durchschnittliche Grösse der drei Equipen erhalten wir durch Division der neuen Werte des Stundenaufwandes pro Haus durch die in den 4 Wochen Taktzeit enthaltene Arbeitszeit von 4 Wo x 45 h = 180 h/Mann wie folgt:

Bodenequipe: 895 h : 180 h/Mann = 4.97 resp. 5 Mann

Wandequipe : 1067 h : 180 h/Mann = 5.93 resp. 6 Mann

Dachequipe : 1253 h : 180 h/Mann = 6.96 resp. 7 Mann

Nun kann ja die Wandequipe ihre Arbeit erst beginnen, wenn wenigstens ein Teil des Bodens des ersten Hauses fertiggestellt ist. Wir nehmen in unserem Beispiel an, dieser Zeitpunkt sei gegeben, wenn 50 % des ersten Bodens erstellt sind, d.h. 2.0 Wochen nach Beginn der Arbeiten der Bodenequipe. Das gleiche gilt für die Dachequipe, die ihrerseits erst dann beginnen kann, wenn genügend Wände erstellt sind, dies sei der Fall, wenn 60 % der Wände des ersten Hauses gemacht sind, d.h. 2.4 Wochen nach Beginn der Arbeiten der Wandequipe.

1. Lösung:

Als eine der möglichen Lösungen wählen wir als Bauprogramm das reine Taktprogramm (Durchschnittsprogramm), indem wir die Taktzeit von 4.0 Wochen entsprechend der Anzahl Elemente 6 mal aneinanderreihen und dabei für die nachfolgenden Equipen die Phasenverschiebung von 2.0 Wochen für die Wandequipe, resp. (2.0 +) 2.4 Wochen für die Dachequipe berücksichtigen (siehe Fig. 5b).

Die Stärke der Equipen ist nun entsprechend der Lernrate für die einzelnen Elemente zu variieren gemäss Beispiel 3 (Frage 2). Hierbei muss für die Boden- und die Wandequipe das Element 1 in zwei Teile a und b zerlegt und die zutreffende Equipenstärke vor und nach dem Zeitpunkt des Einsatzes der nachfolgenden Equipe ermittelt werden. Wir erweitern zu diesem Zweck die logarithmische Skala des Lerndiagrammes über n = 1 hinaus nach links und lesen für die Bodenequipe auch den Kumulativwert für n = 0.5 (oder 2 Wochen) mit 7.0 bzw. für die Wandequipe für n = 0.6 (oder 2.4 Wochen) mit 9.4 ab. Um die Belegschaften für die Teilelemente 1a zu erhalten, dividieren wir diese Werte durch den entsprechenden Teil des Elementes, also 0.5 bzw. 0.6. Die Belegschaften für die Teilelemente 1b erhalten wir durch Division des Differenzwertes von $K_n^*$ durch den restlichen Teil des Elementes, also 0.5 bzw. 0.4.

Wir erhalten folgende Werte für die Belegschaft der drei Equipen (auf ganze Mann gerundet):

| | Bodenequipe (Mann) | | Wandequipe (Mann) | | Dachequipe (Mann) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Element | $K_n^*$ | $E_n^*$ | $K_n^*$ | $E_n^*$ | $K_n^*$ | $E_n^*$ |
| 1a (n=0.5) | 7.0:0.5= 14 | | (n = 0.6) 9.4:0.6=16 | | | |
| 1b | 3.5:0.5= 7 | | 3.2:0.4= 8 | | | |
| 1 | (10.5) | (11) | (12.6) | (13) | 15 | 15 |
| 2 | 16 | 5 | 19 | 6 | 22 | 7 |
| 3 | 20 | 4 | 24 | 5 | 28 | 6 |
| 4 | 24 | 4 | 28 | 4 | 33 | 5 |

| | Bodenequipe (Mann) | | Wandequipe (Mann) | | Dachequipe (Mann) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $K_n$* | $E_n$* | $K_n$* | $E_n$* | $K_n$* | $E_n$* |
| Element | | | | | | |
| 5 | 27 | 3 | 32 | 4 | 38 | 5 |
| 6 | 30 | 3 | 36 | 4 | 42 | 4 |
| Durchschnittswerte | | 5 | | 6 | | 7 |

Wir sehen sofort, dass die Equipenstärken unvernünftig stark variiert werden müssen. So müsste z.B. die Bodenequipe mit 14 Mann beginnen, nach 2 Wochen, wenn 50 % des ersten Bodens erstellt sind, könnte sie auf 7 und nachher sukzessive bis auf 3 Mann reduziert werden. Der starke Sprung zwischen Element la und lb ist darauf zurückzuführen, dass wir die Phasenverschiebung um 2.0 Wochen unverändert beibehalten haben und sich der Lerneffekt gerade zu Beginn der Arbeiten am stärksten auswirkt. Würde man die Bodenequipe statt dessen für das erste Element durchgehend mit 11 Mann bestücken, so wäre dieses zwar ebenfalls in 4 Wochen fertiggestellt, hingegen würde dann die Phasenverschiebung für die Wandequipe vergrössert.

Zeichnen wir die gesamte, aus den drei Equipen bestehende Baustellenbelegschaft auf (siehe Fig. 5b), so erkennen wir, dass die Belegschaftskurve rasant ansteigt, nach kurzer Zeit einen hohen Höchstwert erreicht, um gleich danach wieder abzufallen. Es tritt also genau das Gegenteil dessen ein, was der Unternehmer anstrebt, nämlich einen vernünftig gestaffelten Aufbau der Belegschaft bis zu einem möglichst geringen Maximum, das dann solange als möglich beibehalten werden kann.

Diese Lösung wird in der Praxis, mangels besserer Erkenntnis, oft angenommen. Das Beispiel zeigt, dass sie, zumal bei hoher Lernrate, wie sie hier zwecks Verdeutlichung der Verhältnisse gewählt wurde, zu Schwierigkeiten führt.

## 2. Lösung

Anstatt die Belegschaft an ein starres Taktprogramm anzupassen, wollen wir nun, bei konstanter Belegschaft von 5 bzw. 6 bzw. 7 Mann, das Bauprogramm dem Lerneffekt entsprechend gestalten.

Aus dem Lerndiagramm entnehmen wir, ausgehend von der durchschnittlichen Bauzeit für 1 Element von 4.0 Wochen, die Kumulativ- bzw. Einzelwerte gemäss Beispiel 4 wie folgt:

| | |
|---|---|
| 1. Haus | 8.4 Wochen |
| 2. Haus | 4.2 Wochen |
| 3. Haus | 3.4 Wochen |
| 4. Haus | 2.9 Wochen |
| 5. Haus | 2.6 Wochen |
| 6. Haus | 2.5 Wochen |
| Total | 24.0 Wochen (= 6 x 4.0 Wochen) |

Die ursprüngliche Phasenverschiebung von 2.0 Wochen für die Wandequipe wird nun zu 5.6 Wochen. Diesen Wert lesen wir mit Hilfe der Linie der Kumulativwerte für n = 0.5 (oder 2.0 Wochen) ab. Die Phasenverschiebung für die Dachequipe wird, für n = 0.6 (oder 2.4 Wochen) mit 6.2 Wochen ermittelt.

Nun kann das Bauprogramm aufgezeichnet werden (siehe Fig. 5c).

Wir stellen zunächst fest, dass die vorgeschriebene Gesamtbauzeit von 8 Monaten wegen der Vergrösserung der Phasenverschiebung infolge des Lerneffektes nicht ganz eingehalten ist, dann aber auch, dass sich die drei Equipen immer weiter voneinander entfernen. Schon beim zweiten Haus hat die vorauslaufende Equipe ihre Arbeit bereits ganz abgeschlossen, wenn die nachfolgende die Arbeit aufnimmt.

Dieses "Auseinanderklaffen" der Equipen ist eine Folge des Lerneffektes und kommt dadurch zustande, dass die zuerst eingesetzten, vorauslaufenden Equipen in einem bestimmten Zeitpunkt bereits grössere Lernfortschritte gemacht haben als die später eingesetzten, nachlaufenden Equipen. Die Klaffung ist umso ausgeprägter, je grösser die Lernrate $\varphi$ (d.h. je kleiner deren Wert) und je grösser die Phasenverschiebung der einzelnen Equipen im Verhältnis zum Zeitaufwand für das einzelne Element ist.

Diese Erscheinung ist in der Praxis höchst unerwünscht, führt sie doch dazu, dass die Baustelle sich zunehmend über einen grösseren geographischen Bereich erstreckt und deshalb vermehrte Installationen nötig werden und die Aufsicht erschwert wird.

Betrachten wir z.B. die 23. Woche, so stellen wir fest, dass gleichzeitig 5 Häuser im Bauzustand sind. Sollen die erforderlichen Baukrane nicht jedesmal dorthin versetzt werden, wo gerade gearbeitet wird, sind im Ganzen 5 Baukrane nötig, im Gegensatz zu lediglich 2 für Variante A oder 3 für die vorhin untersuchte 1. Lösung.

Die Belegschaftskurve verläuft zwar soweit vernünftig, obgleich zu sagen ist, dass sich der Auf- und Abbau, im Vergleich zur Zeitdauer mit konstanter Maximalbelegschaft, über eine zu lange Zeit erstreckt.

Diese Lösung befriedigt somit für unser Beispiel ebenfalls nicht, hauptsächlich wegen der Bauzeitüberschreitung und der starken Klaffung.

3. Lösung:

Nachdem beide vorangegangenen Lösungen nicht befriedigt haben, stellt sich die Frage, ob mit einer kombinierten Massnahme ein besseres Resultat erzielt werden kann.

Wählen wir, analog wie es in Beispiel 5 gezeigt wurde, ein Bauprogramm mit einer weniger stark ausgeprägten Abstufung der Bauzeiten der einzelnen Elemente, wie es einer fiktiven Lernrate von z.B. 0.86 (anstelle von 0.75) entspricht, und kompensieren wir den verbleibenden Teil der Auswirkungen des Lerneffektes durch Variation der Equipengrösse, so stellen wir fest, dass die Nachteile der ersten beiden Lösungen stark vermindert, jedoch nicht vollständig ausgemerzt werden. So wird z.B. die Bodenequipe mit 8 Mann beginnen, die dann auf 4 Mann zu reduzieren sind, der Aufbau der Gesamtbelegschaft erfolgt weniger rasant als bei der 1. Lösung und die Maximalbelegschaft beträgt nur noch 22 Mann, die verfügbare Gesamtbauzeit wird mit 31.3 Wochen eingehalten und die Klaffung ist soweit behoben, dass nur noch während einer ganz kurzen Zeitspanne max. 4 Häuser im Bauzustand sind.

Generell kann zu dieser Methode folgendes gesagt werden:
Der Winkel im Lerndiagramm, der durch die Linie der Kumulativwerte für die Lernrate $\varphi$ und durch die $45^{\circ}$ - Gerade (entsprechend einer Lernrate von 100 %!) gebildet wird, stellt den möglichen Bereich dar, innerhalb dessen, bei gleichem Scheitelpunkt, eine modifizierte Linie der Kumulativwerte für die Bauzeiten gewählt werden kann. Je näher sie bei der $45^{\circ}$-Geraden gewählt wird, umso mehr entsprechen die Resultate der 1. Lösung (reines Taktprogramm) mit ihren Vor- und Nachteilen (keine Bauzeitverlängerung, jedoch starke Variation der Equipenstärke, rasanter Belegschaftsanstieg auf hohes Maximum und bald danach folgendem Abfall). Je näher sie bei der Kumulativwertlinie für $\varphi$ gewählt wird, umso mehr gehen die Resultate über in die 2. Lösung (Lerneffekt voll durch das Bauprogramm aufgefangen) mit deren Vor- und Nachteilen (optimale, konstante Equipengrösse, minimale Belegschaftsspitze, jedoch Bauzeitverlängerung infolge vergrösserter Phasenverschiebung und Klaffung).

Zwischen diesen beiden Extremlösungen kann in vielen Fällen eine zweckmässige Kompromisslösung gefunden werden, sodass diese Methode durchaus ihre Berechtigung hat.

4. Lösung:

Nachfolgend soll nun aber noch eine andere, ebenfalls kombinierte, Massnahme gezeigt werden, die in vielen Fällen vorzuziehen ist.

Betrachten wir das Bauprogramm der 2. Lösung (Fig. 5c), so ist augenfällig, dass die beiden Nachteile (Verlängerung der Gesamtbauzeit und Klaffung) am wirksamsten dadurch vermindert werden, dass jede Equipe für die Ausführung des ersten Elementes und bis zum Zeitpunkt des Einsatzes der nachfolgenden Equipe um ein gewisses, tragbares Mass verstärkt und dadurch die Bauzeit des Teilelementes la verkürzt wird. Diese Verstärkungsequipe kann vorzugsweise aus einer bestimmten Anzahl Arbeiter bestehen. Sie hilft der ersten Equipe solange, bis die zweite Equipe die Arbeit beginnen kann, arbeitet dann mit dieser zusammen solange bis die dritte Equipe anfangen kann und wird schliesslich der dritten Equipe zugeteilt usf. Man kann die Verstärkungsequipe auch als Trainer-Equipe auffassen, besteht sie aus vielseitig versierten, hochqualifizierten Arbeitern, so wird ihre Wirkung, gerade in Verhältnissen, wo mit niedriger Anfangsleistung und hoher Lernrate zu rechnen ist, noch verstärkt.

Als weitere Massnahme können die vorauslaufenden Equipen ab einem geeigneten Zeitpunkt um ein gewisses Mass geschwächt und gleichzeitig die nachlaufenden Equipen entsprechend verstärkt werden. Dadurch wird, bei gleichbleibender Gesamtbelegschaft, die Klaffung weiter reduziert. Hierzu ist zu sagen, dass diese Massnahme von einem aufmerksamen Baustellen-Management fast automatisch getroffen wird, um die zunehmende Klaffung aufzufangen, wichtig ist jedoch, dass deren Notwendigkeit früh genug erkannt wird.

Unsere Aufgabe soll deshalb unter Anwendung dieser beiden Massnahmen gelöst werden und zwar wie folgt:

- Als Verstärkungsequipe sind 2 Mann vorgesehen, die solange im Einsatz bleiben, bis die Dachequipe das erste Haus fertiggestellt hat.

- Die Bodenequipe wird, nach Fertigstellung des zweiten Bodens, von 5 Mann auf 4 Mann reduziert. Der frei werdende Mann wird sofort der Dachequipe als Verstärkung zugeteilt.

Ausgehend von den Bauzeiten der 2. Lösung erhalten wir nun folgende neuen Werte:

| Element | Bodenequipe | | | | Wandequipe | | | | Dachequipe | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2.Lösung | | 4.Lösung | | 2.Lösung | | 4.Lösung | | 2.Lösung | | 4.Lösung | |
| | Mann | Wo | Mann | Wo | Mann | Wo | Mann | Wo | Mann | Wo | Mann | Wo |
| 1a | 5 | 5.6 | 7 | 4.0 | 6 | 6.2 | 8 | 4.6 | | | | |
| 1b | 5 | 2.8 | 5 | 2.8 | 6 | 2.2 | 6 | 2.2 | | | | |
| 1 | | 8.4 | | 6.8 | | 8.4 | | 6.8 | 7 | 8.4 | 9/10 | 6.1*) |
| 2 | 5 | 4.2 | 5 | 4.2 | 6 | 4.2 | 6 | 4.2 | 7 | 4.2 | 8 | 3.7 |
| 3 | 5 | 3.4 | 4 | 4.2 | 6 | 3.4 | 6 | 3.4 | 7 | 3.4 | 8 | 3.0 |
| 4 | 5 | 2.9 | 4 | 3.6 | 6 | 2.9 | 6 | 2.9 | 7 | 2.9 | 8 | 2.5 |
| 5 | 5 | 2.6 | 4 | 3.2 | 6 | 2.6 | 6 | 2.6 | 7 | 2.6 | 8 | 2.3 |
| 6 | 5 | 2.5 | 4 | 3.1 | 6 | 2.5 | 6 | 2.5 | 7 | 2.5 | 8 | 2.2 |

*) Arbeitsinhalt total: 7 M x 8.4 Wo = 58.8 MWo
9 Mann sind während 2.4 Wo im Einsatz = 21.6 MWo ./.
10 Mann sind während 3.7 Wo im Einsatz = 37.2 MWo
6.1 Wo

Nun zeichnen wir das Bauprogramm und die Belegschaftskurve auf (siehe Fig. 5d).

Wir stellen fest, dass die Gesamtbauzeit (etwa) gleich lang geworden ist wie bei der 1. Lösung (Taktprogramm), dass die Klaffung soweit vermindert wurde, dass maximal drei Häuser im Bauzustand sind und dass die Belegschaftskurve einen durchaus vernünftigen Verlauf nimmt. Angesichts ihrer Vorzüge (grosse Einsparung an Lohnkosten und Schalungsmaterial, jedoch 1 zusätzlicher Kran, im Vergleich mit Variante A) stellt diese Lösung die optimale dar.

## 5. Andere Lösungsmöglichkeiten

Ohne auf Details eingehen zu wollen, sollen noch folgende Lösungsmöglichkeiten erwähnt werden:

Ausgehend von der 2. Lösung (Bauprogramm mit vollem Lerneffekt) kann die unerwünschte Klaffung auch dadurch weitgehend reduziert werden, dass den nachfolgenden Equipen (Wand- und Dachequipe), bei gleicher Lernrate, eine im Vergleich zur vorauslaufenden Equipe verkürzte Bauzeit zugestanden wird, unter gleichzeitiger, entsprechender Vergrösserung der Equipenstärke. Diese Massnahme hat jedoch zur Folge, dass die Kurve der Gesamtbelegschaft anfänglich zu langsam ansteigt, in der zweiten Hälfte der Bauzeit eine unerwünschte Massierung anzeigt und am Schluss abrupt abbricht.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, das Taktprogramm (über alle n Elemente bzw. Wochen) mit Hilfe einer passend gewählten fiktiven Lernrate in ein einheitliches Lernprogramm umzuformen, sodass jedem Zeitpunkt des Taktprogrammes ein bestimmter Zeitpunkt im Lernprogramm entspricht und alle Abhängigkeiten zwischen den Equipen gewahrt bleiben. Selbstverständlich muss dann die Equipenstärke für jede Equipe und jedes Element so bestimmt werden, dass der Arbeitsinhalt als Produkt der Equipenstärke und der für das betreffende Element zur Verfügung ste-

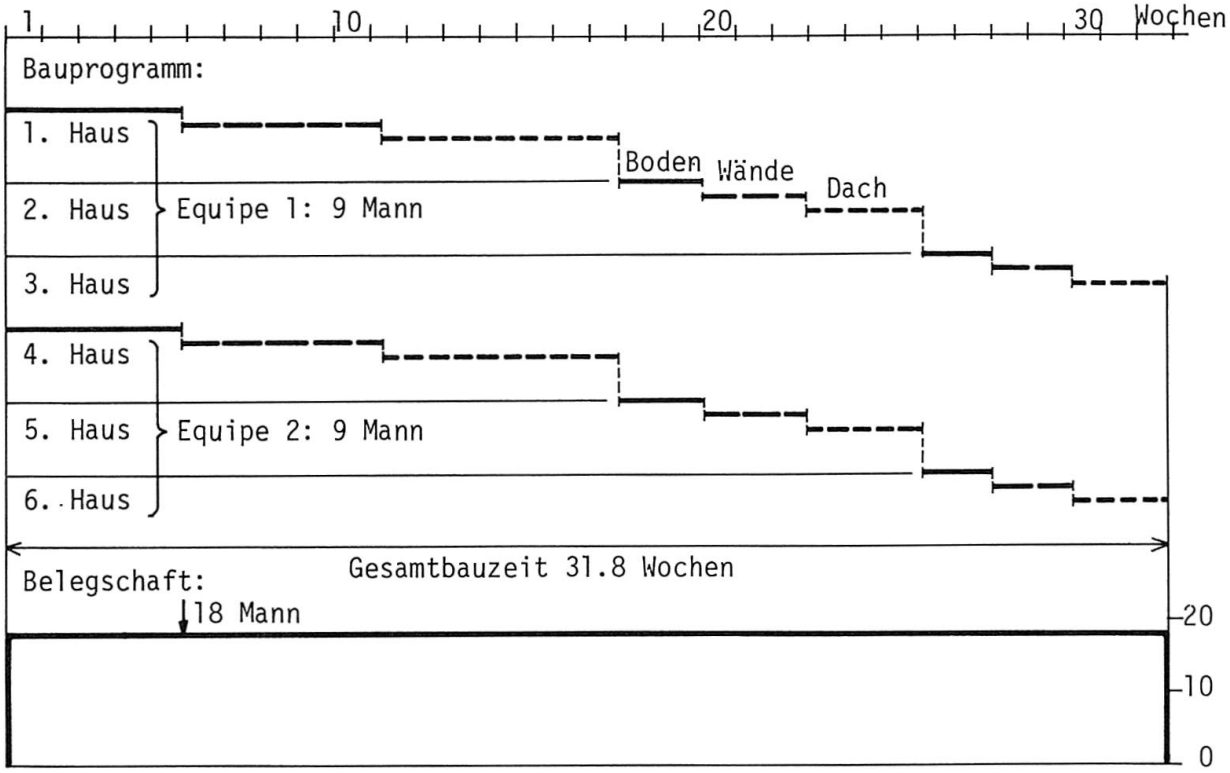


Fig. 5a Variante A: 2 Equipen, jede erstellt nacheinander 3 Häuser

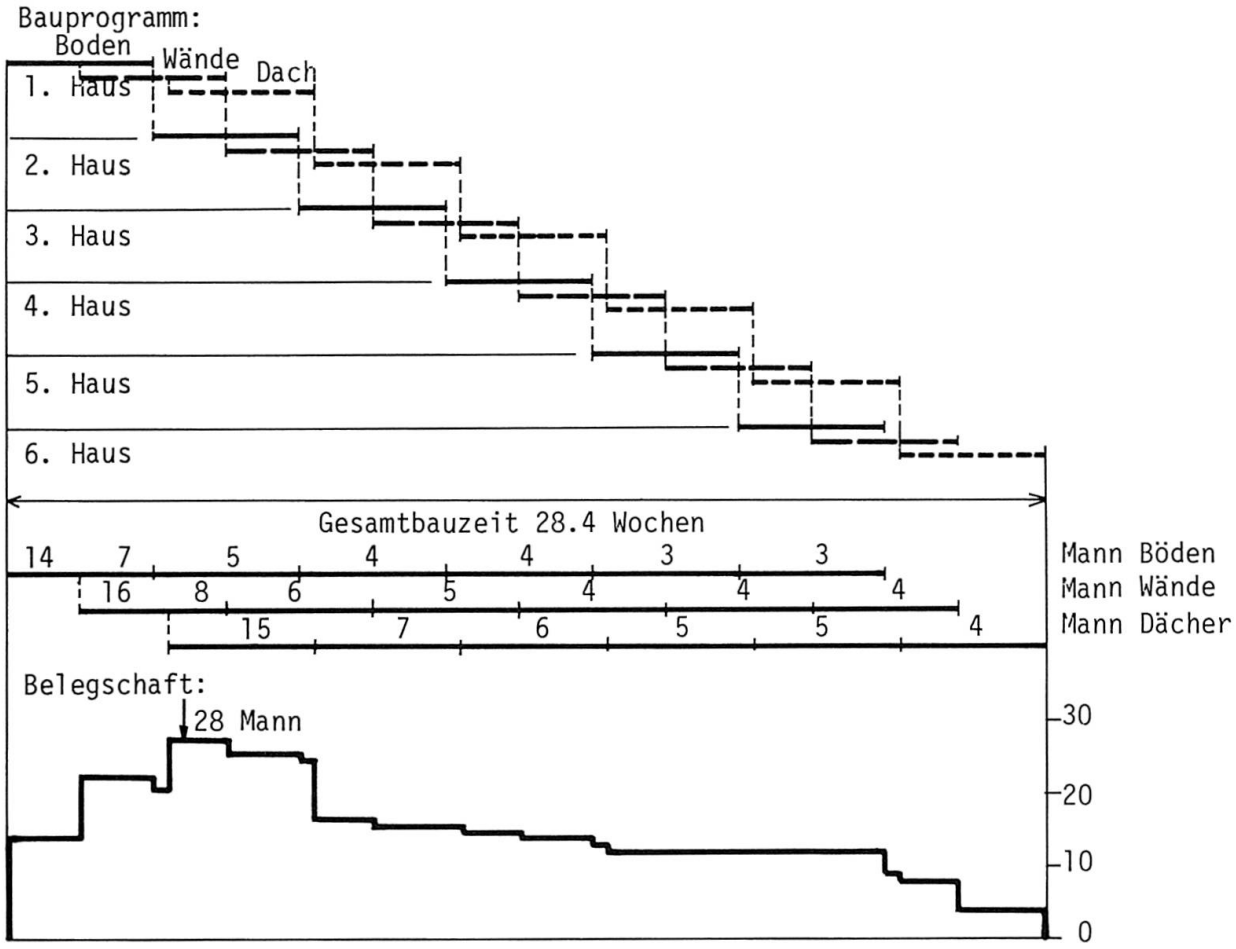


Fig. 5b Variante B, 1. Lösung: Taktprogramm, 3 Equipen
(je 1 für Böden, Wände, Dächer)

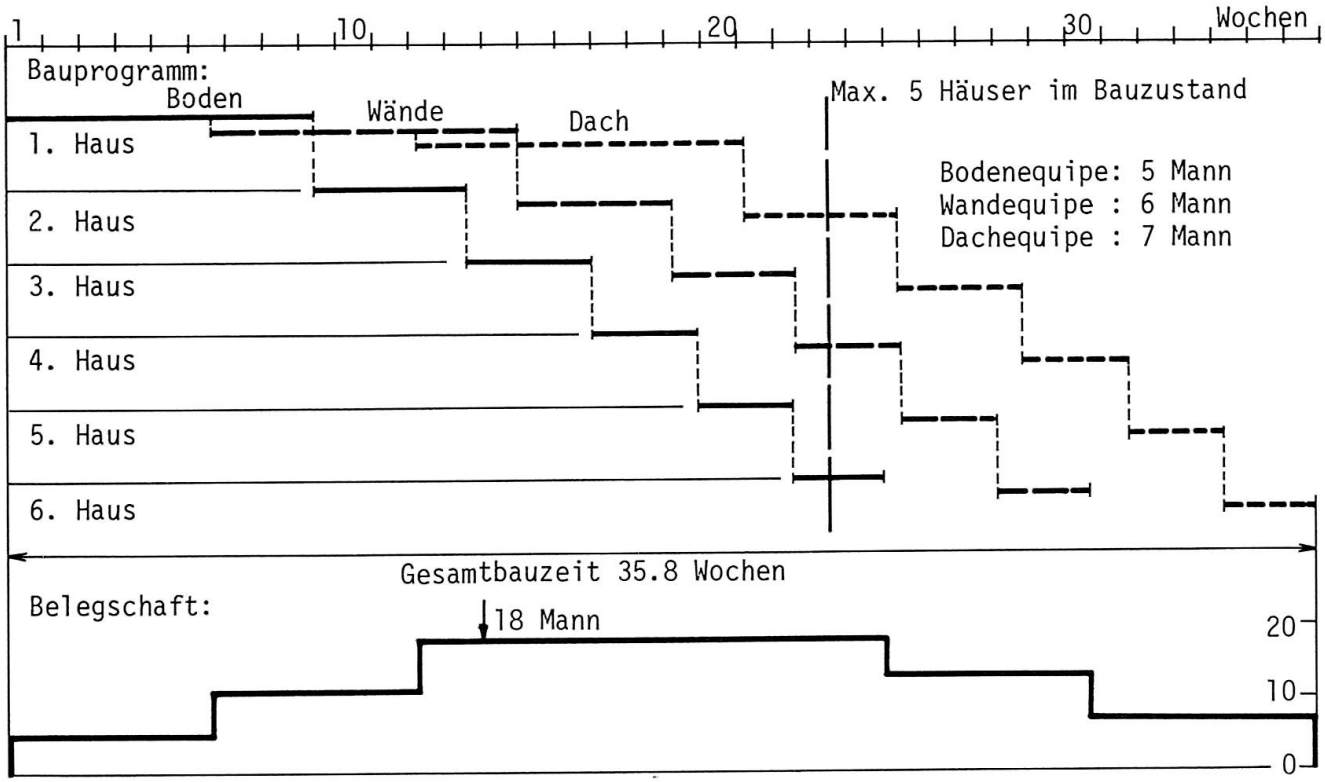


Fig. 5c Variante B, 2. Lösung: Lernprogramm, 3 Equipen

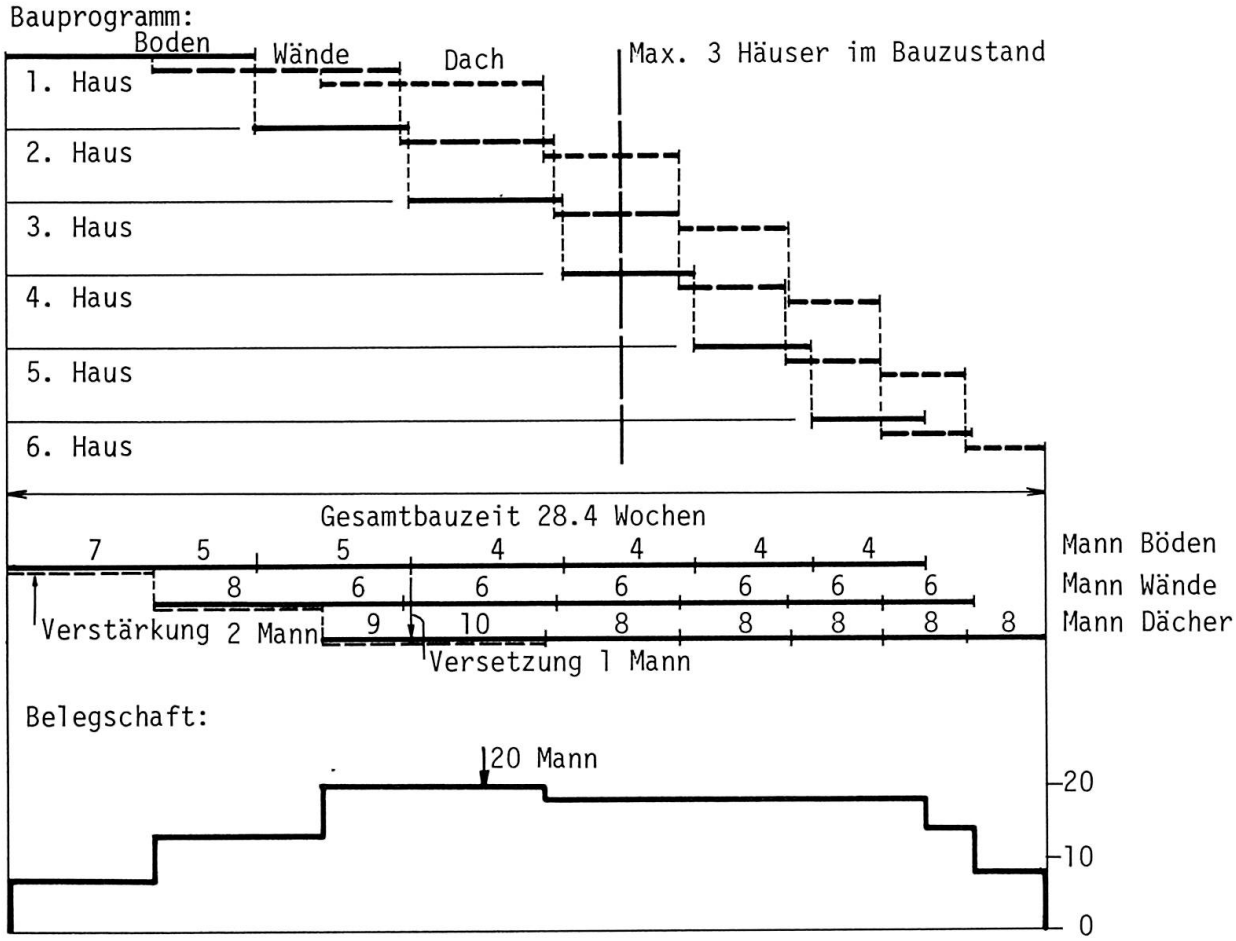


Fig. 5d Variante B, 4. Lösung: Lernprogramm,
Verstärkungsequipe 2 Mann, Versetzung 1 Mann

henden Zeit der Lerntheorie entsprechend erhalten bleibt. Diese Methode kann besonders dann zweckmässig sein, wenn während der Bauzeit immer wieder Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Equipen auftreten, gleichzeitig aber die Summe der anfänglichen Phasenverschiebungen zwischen den Equipen im Vergleich zur Gesamtbauzeit unbedeutend ist.

Bei der letztgenannten Methode werden die nachfolgenden Equipen in den Bauzeitrhythmus gezwungen, den die vorauslaufenden Equipen im Zeitpunkt von deren Einsatz erreicht haben. Bis zu einem gewissen Grad kann dies sogar ohne volle Kompensation durch Variation der Equipenstärke geschehen, wenn wesentliche, die Lernrate bestimmende und ausserhalb der eigentlichen Arbeiterequipe liegende Faktoren im Zuge der Arbeiten der vorauslaufenden Equipen bereits verbessert worden sind (z.B. Planbereitstellung, Arbeitsvorbereitung, Materialversorgung usw.).

### 6.3 Andere Anwendungen

Die Prinzipien der Lerntheorie können für die Behandlung von vielen weiteren Problemen nützlich sein, so z.B. beim Nachweis der Mehr- oder Minderkosten pro Einheit, die bei der Reduktion bzw. Erweiterung von Serienaufträgen entstehen können, oder z.B. beim Festlegen angemessener Akkord- oder Prämiensysteme usw.

Grundsätzlich tritt natürlich nicht nur bei der in unmittelbarer Folge ausgeführten Serie von identischen Arbeitselementen, wie es hier stets dargestellt wurde, ein Lerneffekt ein, jedoch ist er hier am besten zu beobachten. Es liegt aber auf der Hand, dass prinzipiell bei allen Arbeiten, in deren Verlauf sich gewisse Tätigkeiten gleichen, und wo sich der Arbeiter bzw. die Equipe und Aufsicht auf bereits gemachte Erfahrungen abstützt, ein Lerneffekt eintritt. Ein typisches Beispiel dafür stellt das Erstellen von Betonschalungen dar, wo unter Anwendung eines bestimmten Schalungssystems bzw. -verfahrens immer wieder die gleichen Manipulationen vorkommen und zweifellos auch dann ein Lerneffekt eintritt, wenn jeder einzelne Bauteil anders gestaltet ist. Auch diese Probleme können mit den gezeigten Methoden ohne weiteres behandelt werden, wobei an die Stelle von einzelnen Elementen gegebenenfalls bestimmte Mengen der betrachteten Arbeitsgattung treten (z.B. 100,200,300... m2 Wandschalung).

## 7. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Unter den vielen Faktoren, die das Geschehen auf dem Bauplatz beeinflussen und den geplanten Ablauf stören können, stellt die ungenügende Berücksichtigung des Lerneffektes einen der wichtigsten dar. Die Lerntheorie ist zwar keine exakte Wissenschaft, doch ist deren Kenntnis und Berücksichtigung für eine sorgfältige Planung unumgänglich. Da mit dem Lerndiagramm ein nützliches und äusserst einfach zu handhabendes Mittel zur Verfügung steht, verdient sie auch in der Bauindustrie vermehrte Beachtung.