

(Aus dem Lehrstuhl für Arbeitshygiene an der Medizinischen Fakultät der I. Moskauer staatl. Universität. — Dir.: Prof. S. Kaplun.)

Eine Untersuchung der optimalen Bedingungen beim Hammerschlag.

Von
S. J. Philippowitsch.

Mit 7 Textabbildungen.

(Eingegangen am 12. März 1931.)

Die Methodologie der Untersuchung der optimalen Bedingungen für die verschiedenen Arbeitsprozesse gewinnt heutzutage eine besondere Bedeutung, da eben jetzt der Rationalisierung der Arbeitsprozesse zwecks Erhaltung einer maximalen Arbeitsfähigkeit bei relativ minimalem Energieverbrauch große Aufmerksamkeit gewidmet wird.

In neuester Zeit gibt es in der Literatur eine Reihe Arbeiten, welche die optimalen Bedingungen für verschiedene Arbeitsarten auf Grund des Energieverbrauchs feststellen.

In den Arbeiten *Atzlers* und seiner Mitarbeiter^{12, 19, 21}, in denen das Lastenheben und Lastentragen, das Kurbeldrehen, das Schieben und Ziehen eines Wagens, das Hantelstoßen u. a. untersucht wurden, sind auf Grund der Energieverbrauchsberechnung pro Arbeitseinheit die optimalen Bedingungen bestimmt worden. *Baader* und *Lehmann* untersuchten die Arbeit der Maurer; die Höhe des Ziegellegens und die Größe der Ziegel wurden variiert und nach dem mindesten Energieverbrauch pro Ziegelgewichteinheit wurde über die rationellste Legensart geurteilt. Die optimalen Bedingungen bei der Schaufelarbeit sind von *Wenzig*²⁰, dasselbe bei gebückter Körperlage von *Kommerell*²³ untersucht worden. *Farkas, Geldrich* und *Szakall*²⁹ untersuchten den Energieverbrauch des Menschen beim Ernten und Dreschen. *Schroetter*²⁴ untersuchte den Stoffwechsel bei Musikanten und Stenotypistinnen, und *Liljestränd*¹⁴ und *Lindhard*⁸ bei Ruderern. *E. Kagans*¹⁴ und seiner Mitarbeiter Untersuchung der Hand- und Fließarbeit muß hier ebenfalls erwähnt werden.

Es ist zu betonen, daß alle genannten Autoren ihre Ergebnisse hauptsächlich nur auf den Angaben des Energieverbrauches während der Arbeit selbst gründen, indem sie die Restitutionsperiode entweder gar nicht (*Farkas, Geldrich* und *Szakall, Liljestränd* und *Lindhard, Kagan*) oder nur teilweise untersuchten. Die Restitutionsperiode wurde speziell nicht untersucht und in einigen Fällen wurde die Stoffwechselzunahme nach der Arbeit bei den Berechnungen gar nicht in Betracht genommen.

In den Arbeiten *Atzlers* und seiner Mitarbeiter *Wenzigs*, *Kommerels*, *Baadere* und *Lehmans* u. a. wurde der Stoffwechsel im Laufe einiger Zeit nach der Arbeit untersucht, aber diese Zeitfrist wurde bei jeglicher Versuchsanstellung stets gleich genommen, woraus man schließen kann, daß diese Autoren sich nicht die Aufgabe stellten die Dauer und den Charakter der Restitutionsperiode zu kennen und den mit der gegebenen Arbeitsart verbundenen überschüssigen Energieverbrauch genau zu bestimmen.

Es ist deshalb möglich, daß in einigen Fällen der Versuch bei noch stark gesteigertem Stoffwechsel unterbrochen wurde; (so z. B. weist *Simonson*⁷ auf die Arbeit von *Henderson* und *Haggard* hin, welche den Versuch unterbrachen, wenn der Stoffwechsel noch um 20—30% im Vergleich zum Ruhewert gesteigert blieb); es ist aber zweifellos, daß bei physiologischen Forschungen, deren Zweck es ist, dieser oder jener Arbeitsart eine vergleichende Bewertung zu geben, die Berechnung des gesamten überschüssigen Energieverbrauches (den Verbrauch während der Restitutionsperiode inbegriffen) von großer Bedeutung ist.

Nur in allerletzter Zeit erschien nach den Arbeiten *Hills* eine Reihe von Arbeiten, in denen dem O₂-Verbrauch während der Restitutionsperiode eine große Bedeutung zugeschrieben wird. Zu diesen letzteren Arbeiten gehören auch die Arbeiten *Simonsons*⁷, welcher die individuelle Restitutionskonstante nach Arbeitsprozessen von verschiedener Intensität und Dauer untersuchte, die Arbeit von *Efimow* und *Arschawsky*²⁸ über die Wirkung der Hyperventilation auf den Restitutionsverlauf beim Balkenschneiden, die Untersuchung von *Scheidin* und *Ostrow*²⁷ über den Energieverbrauch beim Ballastieren der Eisenbahn, die Untersuchung von *Nemirowsky*²⁹, über die optimale Belastung bei der Arbeit an einem Ergometer, die von *Marschak* und *Nemzowa*⁴⁵ über die Wirkung der Temperaturbedingungen auf die Restitutionsperiode und die Arbeit von *Nemzowa* über die Wirkung der Temperaturbedingungen auf die Restitutionsperiode bei den Hammerschmieden. Wir müssen hier auch auf die Arbeit *Kahns*¹⁷ hinweisen, der zwei energetische Arbeitstypen untersuchte: Eine dauernde Anstrengung beim Besägen, bei der die Grenzen der O₂-Verbrauchsfähigkeit nicht erreicht wird, und eine kurz dauernde Anstrengung von großer Intensität beim Schmieden, wenn der Organismus sein O₂-Aufnahmevermögen maximal entfaltet.

Eine der Grundaufgaben, welche von der Arbeitsphysiologie in letzter Zeit gestellt werden, ist das Problem der physiologischen Rationalisierung der Arbeitsprozesse. Da vorauszusehen ist, daß große Erfolge gerade auf dem Gebiete der schweren körperlichen Arbeit zu erlangen sind und da trotz der rasch fortschreitenden Mechanisierung der Betriebsprozesse zweifellos noch lange Jahre solche Arbeitsarten, wie die Arbeit des Schmiedes, des Hämmerers usw., allgemein angewandt werden, haben wir uns in dieser Untersuchung mit der Hammerarbeit befaßt und stellten uns das Ziel aus einigen Kombinationen des Arbeitstempos und der Belastung, nämlich des Hammergewichts, die in physiologischer Hinsicht vorteilhaftesten Bedingungen zu bestimmen. Bei der Wahl dieses Themas zogen wir auch in Erwägung, daß das Problem der Rationalisierung der Hammerarbeit bis jetzt noch von niemand speziell untersucht worden ist und daß bei der Anstellung der gegebenen Untersuchung auch einige methodologische Fragen erörtert werden konnten.

Wir bestimmten, indem wir in laboratorischen Verhältnissen das Arbeitstempo (die Zahl der Hammerschläge pro Minute) und das Gewicht des Hammers variierten, bei welchen Kombinationen von Tempo und Belastung der mindeste Energieverbrauch pro Arbeitseinheit stattfindet; um die Bedeutung des Energieverbrauchs während der Restitutionsperiode zu demonstrieren, haben wir die Gaswechseluntersuchung stets bis zur völligen Restitution des O_2 -Verbrauchs fortgeführt.

Als Versuchsperson diente ein Student im Alter von 28 Jahren von mittlerem Körperbau, gesund, 166 cm Körperlänge, Gewicht 60,3 kg, an körperliche Arbeit gewöhnt, da er von Herkunft ein Bauer ist. Im Hammerschlagen ist er einigermaßen trainiert, weil er im Laufe zweier Sommerperioden in einem chemischen Werk als Hammerschläger gearbeitet hat, wobei der Hammer bis 8 kg wog.

Um die Dauer der Arbeit, die Tempi und Belastungen, welche der Untersuchung oblagen, zu finden, haben wir zu allererst Orientierungsversuche angestellt. Wir mußten solche Variationen finden, welche voneinander klar zu unterscheiden seien und sich dabei den Betriebsbedingungen in genügendem Maße annähern würden. Nach einer Reihe von Orientierungsversuchen und Beobachtungen der Arbeit der Hammer-schmiede in einem Moskauer Hammerwerk nahmen wir die Arbeitsdauer von 2 Minuten, die Arbeitstempi von 25, 35, 45 Schlägen pro Minute und ein Hammergewicht von 2 kg, 5 kg und 7,2 kg an.

In allen unseren Versuchen war der Schwung des Hammers ein vollständiger, d. h. der Hammer wurde mit beiden Händen zurückgehoben, indem er beim Schwung und Schlag einen fast regelmäßigen Umkreis beschrieb.

Methodik. Die Versuchsperson kam um 8 Uhr morgens, nüchtern, legte sich auf ein Bett und ruhte im Laufe einer Stunde. Dann wurden der Ruhestoffwechsel — liegend, sitzend und stehend nach der Methode von *Douglas-Haldane* untersucht. Jede Untersuchung im Ruhezustand dauerte 6—8 Minuten. Nach genauer Bestimmung des Grundumsatzes wurde vor den Versuchen der Gaswechsel nur bei sitzender und stehender Lage untersucht. Danach arbeitete die Versuchsperson im Laufe von 2 Minuten, indem sie mit dem Hammer nach dem Takt eines *Metro-noms* auf einen 80 cm hohen, hölzernen Stumpf (was ungefähr der Höhe eines Amboßes entspricht) schlug. Nach der Arbeit setzte sie sich sofort. Während der Restitutionsperiode wurde die ausgeatmete Luft je 3 Minuten in einen aparten Douglassack aufgefangen, gewöhnlich dauerte die Restitutionsperiode von 6 bis 20 Minuten, je nach Hammergewicht und Arbeitstempo.

Training. Vor den Versuchen wurde die Versuchsperson trainiert. Anfangs gewöhnte sie sich im Laufe einer Woche ans Atmen durch ein Mundstück, im Ruhezustand. Am Ende einer Woche stellten sich Ventilation und Gaswechsel auf eine beständige Höhe ein. Für die ersten Arbeitsversuche dauerte das Training 10 Tage lang, bei nachfolgendem Variieren des Arbeitstempos und Hammergewichts war nur eine Trainierung von 5—6 Tagen erforderlich. Nach langen Unter-

brechungen der Versuche wurde die Versuchsperson jedesmal wieder neu trainiert.

Es wurden im ganzen 132 Versuche angestellt, inbegriffen die Trainings- und Orientierungsversuche; die Zahl der reinen Versuche (aus denen die Durchschnittswerte abgeleitet wurden) betrug 49. Die Zahl der Gasanalysen betrug 295. Die Durchschnittswerte wurden stets aus 5—6 Versuchen abgeleitet. Der Grundumsatz zeigte im Vergleich zu den Angaben von *Harris* und *Benedict* eine Abweichung um —7%.

Tabelle 1. *Ruhewechsel.*

	Ventilation	R. Q.	O ₂ -Verbrauch pro Min.	Kalorien pro Min.	Abweichungen in Proz. vom Grundwechsel
Grundwechsel	5,26	0,81	195	0,965	—
Gaswechsel im Sitzen . .	5,63	0,82	204	1,005	4,5
Gaswechsel im Stehen .	6,48	0,82	226	1,110	15,8

Die Schwankungen zwischen den Angaben einzelner Versuche überschreiten keine 10%, durchschnittlich sind sie 6% gleich.

Es ist von größtem Interesse, auf das Vorhandensein von Schwankungen des Ruhewechsels nach den Jahreszeiten hinzuweisen. Die Versuche begannen Ende November des Jahres 1928 und wurden bis April 1929 fortgesetzt. Ende März und im April nahm der Gaswechsel scharf um 8—9% ab. Diese Abnahme war stabil und hielt bis zum Ende der Versuche an. Offenbar fand hier jene Erscheinung der chemischen Wärmeregulation statt, auf die *Geffler*⁹ in seinen Arbeiten hinweist; *Geffler* untersuchte nämlich in einer Reihe speziell angestellter Versuche an einigen Versuchspersonen zu verschiedenen Jahreszeiten die Veränderung des Grundwechsels im Zusammenhang mit der Umgebungstemperatur und der Jahreszeit.

Der O₂-Mehrverbrauch wurde durch Abzug des O₂-Verbrauches im Stehen vom O₂-Verbrauch während der Arbeit und durch Abzug des O₂-Verbrauches im Sitzen vom O₂-Verbrauch während der Restitutionsperiode bestimmt. Beim Berechnen der Calorienzahl nach dem O₂-Verbrauch wurde die Verbrennungswärme des O₂-Mehrverbrauches gleich 5,05 cal angenommen (entsprechend R. Q. = 1), da eine Reihe neuester Arbeiten von *Hill*, *Furusawa*, *Meyerhof*, *Simonson* (spezifischer Arbeits-R. Q.) usw. das fast totale Verbrennen der Kohlehydrate während der Arbeit bewiesen haben. Obwohl es in dieser Frage bis zur letzten Zeit keine einheitliche Meinung gibt, halten wir es für möglich, die Calorienzahl auf Grund des Sauerstoffverbrauches mit Anwendung ein und desselben Wärmeäquivalents zu berechnen, indem wir annehmen, daß hauptsächlich Kohlehydrate während der Arbeit verbrennen; wenn wir in solcher Weise als konstantes Wärmeäquivalent 5,05 cal annehmen, wiederholen wir bei der Berechnung der absoluten Werte immer denselben möglichen Fehler, was für die vergleichende Bestimmung des Energieverbrauches bei verschiedenen Arbeitsbedingungen nur von geringer Bedeutung ist.

In der weiter unten angeführten Tabelle, in der die Veränderungen der Lungenventilation, des R. Q. und des O₂-Verbrauches bei ver-

schiedenen Arbeitsbedingungen angegeben werden, sehen wir deutlich eine Ventilationssteigerung, die von der Zunahme des Arbeitstempes und des Hämmergewichts abhängt. Der respiratorische Quotient nimmt in allen Versuchen während der Arbeit zu, indem er sich 1,0 nähert. In den ersten Phasen der Restitutionsperiode ist der R. Q. höher als während der Arbeit; bei Schwerarbeit wird er bis 1,33 gesteigert. Kahn¹⁷ fand beim Hämmerer eine Steigerung des R. Q. bis 1,35; Hill⁸ fand bei schweren Sportübungen sogar R. Q. = 2,10. Alsdann nimmt R. Q. nach und nach ab, ohne jedoch (gleich wie die Lungenventilation) im Laufe der Versuchsdauer den Ruhewert zu erreichen.

Tabelle 2. Veränderungen der Lungenventilation, des Respirationsquotienten und des O₂-Verbrauches in Abhängigkeit vom Hämmergewicht und vom Arbeitstempo.

Hämmergewicht	2 kg			5 kg			7 kg	
	25	35	45	25	35	45	25	35 Min.

Ventilation pro Minute.

Arbeit	19,00	23,80	33,90	23,72	32,01	36,98	27,93	39,50
1. Rest.-Phase.	12,80	14,00	22,59	19,04	23,30	27,48	24,00	28,27
2. „	7,62	7,81	10,80	9,10	11,86	12,93	10,78	10,78*
3. „	6,26	6,76	8,20	7,54	8,36	9,36	8,60	7,57*
4. „	—	6,00	7,44	7,10	7,99	7,98	7,52	7,10
5. „	—	—	—	—	—	7,53	7,38	—

Respirationsquotient.

Arbeit	0,81	0,83	0,94	0,89	0,93	0,97	0,91	0,96
1. Rest.-Phase.	0,95	1,08	1,26	1,20	1,33	1,32	1,27	1,31
2. „	0,88	0,93	1,15	0,98	1,16	1,23	1,02	1,10*
3. „	0,81	0,84	0,96	0,86	0,94	1,01	0,96	0,94*
4. „	—	0,86	0,89	0,86	0,89	0,90	0,92	0,89
5. „	—	—	—	—	0,87	0,88	0,85	—
6. „	—	—	—	—	—	—	0,85	—

O₂-Verbrauch pro Minute.

Arbeit	729	897	1114	871	1071	1220**	1012**	1308**
1. Rest.-Phase.	414	472	631	522	610	718	699	760
2. „	204	218	245	233	255	266	298	258*
3. „	195	198	201	211	213	227	223	201*
4. „	—	177	194	190	200	207	191	189
5. „	—	—	—	—	175	192	199	—
6. „	—	—	—	—	—	—	182	—

* Im gegebenen Fall betrug die Dauer der 2. und 3. Restitutionsphasen aus technischen Gründen 6 Minuten.

** Bei der Urteilung über das Auftreten der Restitution wurden die im Frühjahr entsprechend verminderten Werte (Saisonschwankungen) des Grundumsatzes (O₂-Verbrauch durchschnittlich 185 ccm pro Minute) in Betracht genommen.

Der O₂-Verbrauch steigt proportional der Tempo- und der Belastungszunahme an, und die Restitutionsperiode nimmt je nach der Arbeitsschwere an Dauer zu. Der maximale O₂-Verbrauch pro Minute während der Arbeit gibt verhältnismäßig kleine Werte (1300 ccm bei der Arbeit mit einem Hammer von 7 kg). Jedoch übertrifft in diesen Fällen die Gesamtmenge des während der Restitutionsperiode verbrauchten O₂ den Gesamt-O₂-Verbrauch während der Arbeit. Wenn man die ganze im Überschuß absorbierte O₂-Menge, welche auf eine

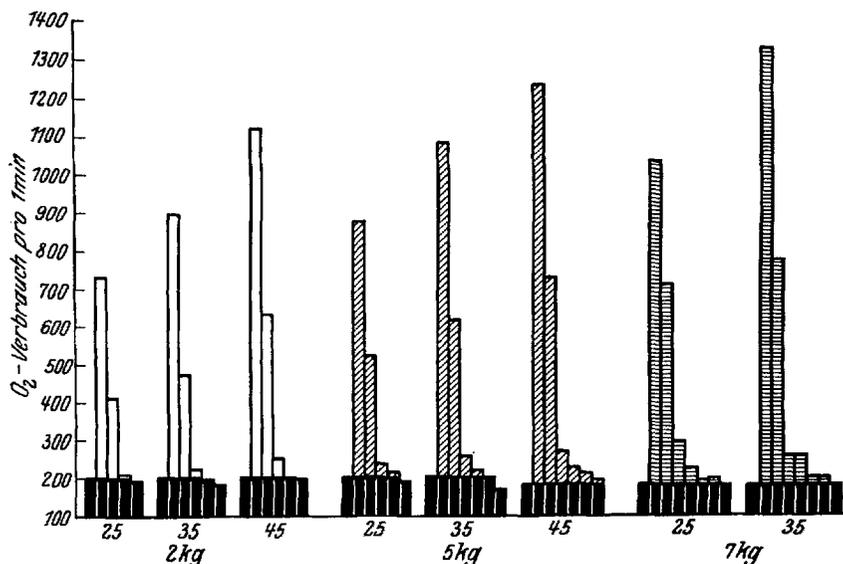


Abb. 1.

Arbeitsminute kommt, berechnet, so erhält man Werte bis 2300 ccm pro Minute. *Nemizowa* erhielt bei einer kurzdauernden, aber sehr intensiven Hammerarbeit (bei Schweißarbeit) Werte, die den unsrigen nahestehen, nämlich 1500 ccm O₂ pro Minute, bei Hammergewicht von etwa 7 kg und 60 Hammerschlägen pro Minute. *Kahn* erhielt bei einem Hammergewicht von 3,7 kg und 60 Hammerschlägen pro Minute viel höhere Werte — bis 2500 ccm O₂ pro Minute während der Arbeit.

Auf dem angeführten Diagramm (Abb. 1) sieht man einen größeren O₂-Verbrauch während des Arbeitsprozesses und eine kürzere Restitutionsperiode, wenn die Arbeit mit kleinen Hämmern und in schnellen Tempi geschah (im Vergleich zu großen Hämmern und langsamen Tempi); hieraus darf man schließen, daß im 1. Fall die Arbeitsbedingungen für ein intensives Verbrennen der Milchsäure während der Arbeit günstiger sind (z. B. 7,2 kg und Tempo 25 im Vergleich zu 5 kg und Tempo 35 und 45; 5 kg, Tempo 25 im Vergleich zu 2 kg und Tempo 35 und 45).

Wenn man die Beziehung des überschüssigen O_2 -Verbrauchs während der Arbeit zum überschüssig verbrauchten O_2 in der Restitutionsperiode graphisch darstellt (Abb. 2), so sieht man deutlich, wie diese Beziehung je nach der Steigerung der Belastung geringer wird auf Grund der Verlängerung der Restitutionsperiode. Beim Vergleich der Arbeit bei raschem Tempo mit leichten Hämmern mit der Arbeit bei langsamem Tempo mit schweren Hämmern sieht man im ersten Falle eine Steigerung der erwähnten Beziehungen.

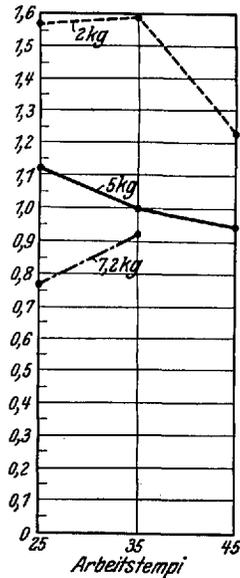


Abb. 2.

und bei beständigem Hammergewicht = 7,2 kg bleibt der Vorzug auf Seiten des schnellen Tempos (in bezug auf einen relativ größeren O_2 -Verbrauch während des Arbeitsprozesses).

Das Dargestellte gibt schon einiges Recht, angesichts einer raschen Restitution dem schnellen Tempo (im gegebenen Fall 35 und 45) gegenüber dem langsamen (im gegebenen Fall 25) den Vorzug zu geben. Die Abb. 3 zeigt die Dauer der Restitutionsperiode (nach dem O_2 -Verbrauch) nach jeder Arbeitsart.

Zur Bestimmung des Vorteils dieses oder jenes Tempos und der verschiedenen Belastung vom Gesichtspunkt des Energieverbrauchs wurde der Energieverbrauch pro Schlag und pro Kilogramm Hammergewicht berechnet. Bei der Berechnung wurde die summarische Quantität der während der ganzen Arbeits- und Restitutionsperiode verbrauchten Energie durch die Anzahl der während der Arbeit gemachten Schläge dividiert und pro Gewichtseinheit umgerechnet. In Abb. 4 sind die erhaltenen Resultate dargestellt. Man sieht eine Verminderung des Energieverbrauchs gemäß der Steigerung des Arbeitstempos, was besonders bei der Arbeit mit einem Hammer von 7,2 kg bemerkbar ist. Der größere Vorteil der schnellen Tempi bei der Arbeit (natürlich nur bis zu bestimmten Grenzen) wurde von vielen Autoren betont (*Atzler, Amar, Benedict, Furusawa, Hill, Dolgin, Kommerell*). *Atzler*¹² äußert, daß bei dynamischer Arbeit bei langsamem Tempo mehr Energie für die Fixierung und Balanzierung verbraucht wird, was den Wirkungsgrad vermindert. Nach den Angaben *Kommerells* steigert die Verlängerung der statischen Momente im Arbeitsprozeß den Energieverbrauch pro Arbeitseinheit.

Bei seiner Untersuchung der Schaufelarbeit bei gebückter Körperstellung zeigte *Kommerell* im Atzleischen Institut wie nachteilig das langsame Arbeitstempo ist wegen des größeren Energieverbrauches für die Haltearbeit. Er berech-

nete theoretisch den Wert dieser Haltearbeit auf Grund der experimentell erhaltenen Werte des Energieverbrauches beim Heben und Werfen von Lasten mittels einer Schaufel (Last und Hebdauer wurden variiert). So z. B. wird die Gesamtmenge der pro 1 kg Last verbrauchten Energie bei 5 kg Last und Hub- und Wurfsdauer 7,5 Sekunden nach folgender Formel berechnet: $A + \frac{1}{5} - L + \frac{7,5}{5} \cdot H.A.$ = 94,1 cal, wobei A = der Energieverbrauch pro Einheit nützlicher Arbeit, L = der Verbrauch pro Einheit Leerarbeit und $H.A.$ = der Verbrauch pro Haltearbeit pro 1 Sekunde ist. Indem Hub- und Wurfsdauer und Last variiert wurden, konnte der Autor aufeinanderfolgend A , L und $H.A.$ berechnen. [$H.A.$

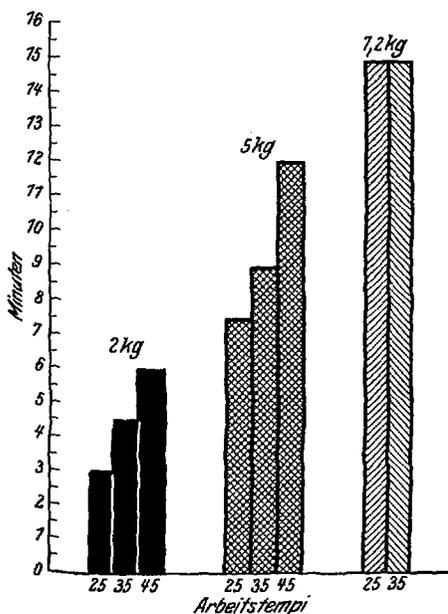


Abb. 3.

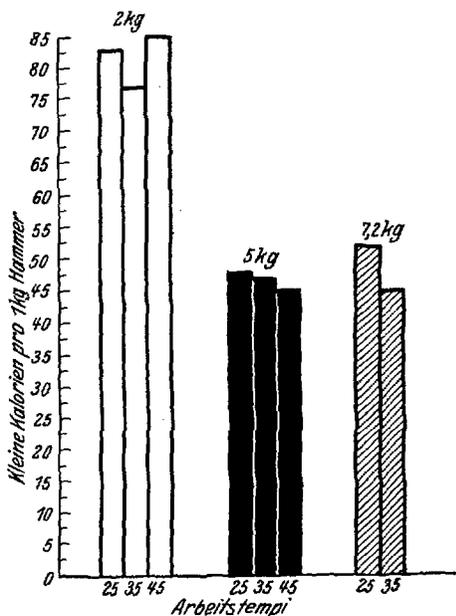


Abb. 4.

beträgt nach seiner Berechnung 11,8 cal. In solcher Weise ist es möglich, $H.A.$ bei jeder Hub- und Wurfsdauer theoretisch zu berechnen. Auf Grund der gegebenen Formel berechnete der Autor theoretisch den notwendigen Energieverbrauch pro Arbeitseinheit für alle Arbeitsarten, verglich das Resultat mit den experimentell erhaltenen Werten und konstatierte, daß diese Werte einander nahe liegen.

Bei einer Hub- und Wurfsdauer von 7,5 Sekunden erhielt der Autor einen Energieverbrauch von 705 cal und bei einer Dauer von 16,5 Sekunden einen Energieverbrauch von 904 cal und schrieb die überschüssigen 201 cal dem größeren Verbrauch auf $H.A.$ bei langsamem Tempo zu.

Wenn man in Betracht nimmt, daß bei unserem Hämmerer beim Tempo 25 Schläge pro Minute ein Schlag 2,4 Sekunden, und beim Tempo 45 Schläge pro Minute 1,3 Sekunden dauert, kann man auch hier bis zu einem gewissen Grade den größeren Energieverbrauch beim

langsamen Tempo durch einen größeren Verbrauch auf Haltearbeit erklären.

Andererseits weisen mehrere Autoren in letzter Zeit auf eine Beziehung hin, die zwischen einem bestimmten optimalen Tempo bei verschiedener Arbeit und der optimalen Dauer der Muskelkontraktion besteht [Hill, Atzler, Lehmann, Herbst und Müller, Pflügers Arch. 208, 226 (1925), Jaschwili²², Dolgin²⁰], wobei die optimale Dauer der Muskelkontraktion von allen Autoren zu 0,5—0,75 Sekunden angegeben wird.

Der in Abb. 4 gezeigte größere Energieverbrauch pro Arbeitseinheit bei der Arbeit mit einem kleinen Hammer kann durch den verhältnismäßig größeren Verbrauch für die Leerbewegung erklärt werden. Nach Johannsons Formel (Atzler¹²), ist $E = L + Ka$, wobei E = der Energieverbrauch für eine bestimmte belastete Arbeit, L = der Energieverbrauch für die den Arbeitsbewegungen gleiche Leerbewegungen und Ka = der Energieverbrauch für Fortbewegung eines Kilogramm/Last, d. h. für die unmittelbar nützliche Arbeit ist.

Die Steigerung der Last bis zu bestimmten Grenzen, steigert natürlich den Energieverbrauch für nützliche Arbeit im Vergleich zum Verbrauch für Leerbewegung. Je kleiner die Last ist, ein desto größerer Teil der verbrauchten Energie wird auf Leerbewegung verwendet. Hieraus folgt die in Abb. 4. gezeigte Zunahme des Energieverbrauches pro Arbeitseinheit bei Arbeit mit kleiner Last.

Aus diesem Diagramm ist auch ersichtlich, daß vom Standpunkt des Energieverbrauchs pro Schlag und Gewichtseinheit die Arbeit mit einem Hammer von 5 kg beim Tempo 45 und die Arbeit mit einem Hammer von 7,2 kg beim Tempo 35 als gleiche optimale Bedingungen betrachtet werden müssen. Allein diese Methode gibt uns nicht die Möglichkeit, die Produktivität des Schlages zu bestimmen und die Schlagarbeit quantitativ zu messen, um zu erkennen, ob sie bei den erwähnten zwei Kombinationen der optimalen Tempi und Belastungen von gleicher Effektivität ist. Hierzu haben wir eine spezielle Bestimmung der kinetischen Energie des Schlages durchgeführt. Die kinetische Energie eines Schlages wird nach der Formel $\frac{m v^2}{2}$ berechnet; da $M = \frac{P}{9,81}$, kann diese durch $\frac{P}{9,81 \cdot 2}$ ausgedrückt werden.

Im gegebenen Fall war die Größe P bekannt, die Größe V wurde mittels der kymocyclographischen Methode bestimmt. Eine solche Methode ist auch von Wenzig und Kommerell angewandt worden, die die kinetische Energie des Wurfs bei Schaufelarbeit bestimmten. Die Methode besteht darin, daß der Arbeitsprozeß auf einem Film aufgenommen wird, wobei die Bewegungen der Hände und der Arbeitsinstrumente als leuchtende Linien fixiert werden, welche eine bestimmte Anzahl Mal pro Sekunde unterbrochen werden, was dann die Möglichkeit gibt, mittels entsprechender Berechnungen die Bewegungsgeschwindigkeit in jedem Abschnitt des zurückgelegten Weges zu bestimmen. Diese Methode ist von Bernstein genau ausgearbeitet worden, welcher

auch bei der vorliegenden Arbeit liebenswürdigerweise die cyclographischen Aufnahmen gemacht hat. Wir drücken ihm hiermit unseren innigsten Dank aus.

Außer der Möglichkeit, die Bewegungsgeschwindigkeit der Lasten, der Arbeitsinstrumente u. dgl. zu bestimmen und hieraus die geleistete Arbeit quantitativ zu messen, besitzt diese Methode noch jenen Hauptvorteil, daß sie es gestattet, die einzelnen Momente der Arbeitsbewegung deutlich zu fixieren und in dieser Weise ihre Formen, Richtung usw. zu analysieren.

Eine Kinoregistrierung der Bewegungen erlaubt jedoch nur 16 Aufnahmen pro Sekunde zu machen und ist deswegen für unser Ziel nicht genügend genau. Bei der Analyse der Arbeitsbewegungen ist jede Methode, welche weniger als 30 Aufnahmen pro Sekunde gibt, nur wenig tauglich. Bei cyclographischen Aufnahmen beträgt die Zahl der Aufnahmen gewöhnlich 80—100 pro Sekunde, und bei feinen raschen Bewegungen 500—600 pro Sekunde (*Bernstein*²²).

Um die Geschwindigkeit der Hammerbewegungen zu bestimmen, brachten wir an seinem Schwerpunkt (gewöhnlich liegt er an der Übergangsstelle des Stieles zum Hammer) eine elektrische Lampe an, welche während der Arbeit auf dem Film eine leuchtende Linie der Hammerbewegungen ergab. Während der Aufnahme wurde die leuchtende Linie eine bestimmte Anzahl Mal pro Sekunde durch einen vor dem Objektiv befindlichen Obturator (eine Scheibe mit Durchschnitten) unterbrochen. Mittels einer Projektionslampe wurden die Striche vom Film auf ein weißes Papierblatt vergrößert, und es wurden mit einem Bleistift in die Zentren der letzten 10—12 Striche Punkte verzeichnet. Die Distanz zwischen zwei Punkten zeigt den vom Hammer zurückgelegten Weg in einem bestimmten Zeitabschnitt. Die Geschwindigkeit der Hammerbewegung wurde berechnet, indem die Distanz zwischen zwei Punkten mit der Häufigkeitszahl der Punkte pro Sekunde multipliziert wurde (das letztere hängt von der Geschwindigkeit der Obturatorrotation und von der Anzahl der Durchschnitte im Obturator ab). Da alle Messungen $\frac{1}{5}$ der natürlichen Größe hatten, wurden die erhaltenen Geschwindigkeitswerte mit 5 multipliziert.

Zur Berechnung der kinetischen Energie wurde die maximale Geschwindigkeit im letzten Augenblick vor dem Schlag genommen. Die Arbeit mit jedem Hammer und Tempo wurde 5—8 mal aufgenommen; jedesmal wurde die kinetische Energie des Schlages bestimmt und darauf der Mittelwert berechnet.

Auf diese Weise erhielten wir die Größe der kinetischen Energie des Schlages in Kilogramm für alle Tempi und Belastungen.

Tabelle 3. Die kinetische Energie der Schläge in Kilogramm.

Tempi	2 kg	5 kg	7,2 kg
25	5,97	15,63	18,05
35	8,34	19,65	18,75
45	9,60	19,08	—

Die biomechanische Untersuchungsmethode der Hammerarbeit bildet eine höchst notwendige Ergänzung zur Untersuchung des Energie-

verbrauchs, sie gab uns die Möglichkeit, auf Grund der erhaltenen Arbeitsleistung pro Schlag die Effektivität bestimmter Tempi und Belastungen in jedem Einzelfall und den Wirkungsgrad zu bestimmen.

Die in solcher Weise bestimmte Arbeitsleistung pro Minute ist in der Tab. 4 und Abb. 5 dargestellt.

Tabelle 4. *Arbeitsleistung pro Minute in Kilogramm.*

Tempi	2 kg	5 kg	7,2 kg
25	149,25	390,75	451,25
35	291,8	687,75	656,25
45	432,0	875,6	—

Ein Hammer von 2 kg Gewicht erwies sich als am wenigsten produktiv. Ein Hammer von 7 kg Gewicht ergibt aber fast dieselben Resultate wie der von 5 kg, bei langsamem Tempo ergibt er sogar eine größere Arbeitsleistung.

Wenn der Energieverbrauch pro 1 kg/m Arbeit mit Abzug des Energieverbrauchs während der Restitutionsperiode berechnet wird (wie es viele Autoren machen), so erhalten wir folgendes Bild (Tab. 5, Abb. 6):

Tabelle 5. *Energieverbrauch pro Kilogramm Arbeit in kleinen Calorien (ohne Berechnung der Restitutionsperiode).*

Tempi	2 kg	5 kg	7,2 kg
25	17,01	8,2	8,7
35	11,50	6,1	8,2
45	13,61	7,2	—

Wird aber der Energieverbrauch während der Restitutionsperiode mitberechnet, dann erhalten wir ganz andere Werte (Tab. 6, Abb. 7).

Tabelle 6. *Energieverbrauch pro Kilogramm Arbeit in kleinen Calorien (die Restitutionsperiode inbegriffen).*

Tempi	2 kg	5 kg	7,2 kg
25	27,8	15,4	20,1
35	18,8	12,1	17,7
45	17,6	11,6	—

Wenn der Energieverbrauch nach der ersten Methode berechnet wird, dann erhalten wir bei Hammerarbeit mit einem Hammer von 7 kg die bei der Arbeit mit einem 5 kg-Hammer erhaltenen gleichen Werte. Für Hämmer von 2—5 kg sind die Tempi von mittlerer Geschwindigkeit optimal, für einen Hammer von 7 kg bei Tempi 25 und 35

ist der Energieverbrauch fast gleich. Wenn wir aber die zweite Berechnungsmethode anwenden, sehen wir einen bedeutenden Vorzug auf seiten des Hammers von 5 kg und der Tempi 35—45, und überhaupt den Vorteil der schnellen Tempi in allen Fällen.

Alles Gesagte spricht dafür, daß das Vernachlässigen des Energieverbrauchs während der Restitutionsperiode zu fehlerhaften Schlüssen führen kann.

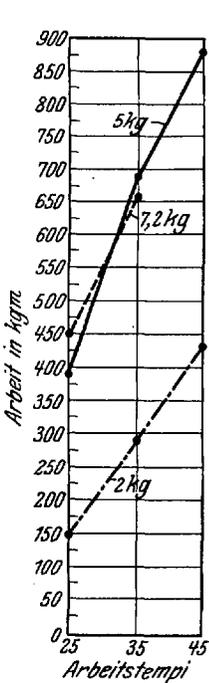


Abb. 5.

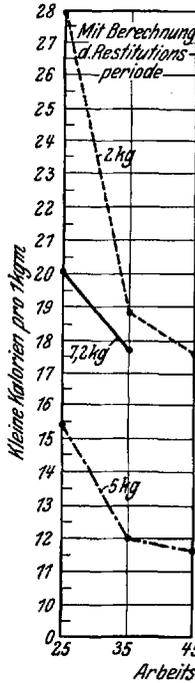


Abb. 7.

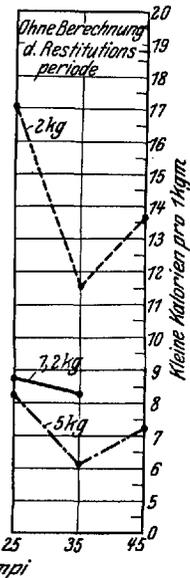


Abb. 6.

Außerdem sieht man klar aus den obenangeführten Diagrammen, daß bei den verschiedenen Arbeitsbedingungen unsere vorläufige Ansicht über den Vorteil eines 7-kg-Hammers (beim Tempo 35 Schlag pro Minute) nicht richtig war, da die schwache Schlagkraft dieses Hammers, die wir nachgewiesen haben, eine geringe Arbeitsproduktivität gibt (Tab. 3). Schon bei der Bestimmung der Geschwindigkeit der Hammerbewegung wurden in diesem Falle Werte erhalten, die auf eine verlangsamte Bewegung hinweisen. Offenbar wird der Impuls, den der Hammer im letzten Schwungmoment erhält, durch seine Schwere vermindert. Wenn die Arbeitsleistung pro 1 kg Hammergewicht berechnet wird, so erhält man die geringste Leistung gerade beim Hammer von 7 kg (Tab. 7).

Tabelle 7. *Die Arbeit in Kilogramm pro 1 Kilogramm Hammergewicht.*

Tempi	2 kg	5 kg	7,2 kg
25	2,98	3,12	2,5
35	4,07	3,93	2,6
45	4,80	3,93	—

Auf diese Weise gab die Anwendung der biomechanischen Methodik die Möglichkeit, eben jenen Hammer vom betrieblichen und vom physiologischen Standpunkt aus zu verwerfen, der auf Grund der Gaswechsellangaben allein einer der besten zu sein schien. Auf diesem Wege vermieden wir einen Fehler, der begangen worden wäre, falls der menschliche Energieverbrauch nicht pro Arbeitseinheit in rein physikalischem Sinne berechnet worden wäre, sondern pro einen Hammerschlag, wie dies oft bei Gaswechseluntersuchungen stattfindet, indem der Energieverbrauch pro Hammerschlag als einziges Maß der geleisteten äußeren Arbeit angenommen wird.

Zusammenfassung.

1. Bei Untersuchungen, die das physiologische Arbeitsoptimum auf Grund des Energieverbrauchs pro Arbeitseinheit verfolgen, ist es notwendig, die ganze Restitutionsperiode mit einzubeziehen.

2. Die Anwendung der biomechanischen Methodik bei Untersuchungen im Gebiete der Arbeitsrationalisierung kann wertvolle praktische Resultate geben und Schlußfolgerungen korrigieren, welche auf Grund von Untersuchung nur des Energieverbrauchs allein bei verschiedenen Arbeitsbedingungen erhalten werden.

3. Von den in dieser Arbeit untersuchten Schnelligkeiten und Belastungen sind bei der Hammerarbeit vom Standpunkt des Energieverbrauchs pro Leistungseinheit die optimalen Bedingungen die folgenden: Hammergewicht 5 kg und Tempo 45 Schläge pro Minute (bei vollem Schwung).

4. Die in einem langsamen Tempo, besonders unter 35 Schläge pro Minute, geleistete Arbeit ist nicht rationell, was offenbar durch den verhältnismäßig bedeutenden Energieverbrauch auf Haltearbeit erklärt werden kann.

5. Die Arbeit mit einem leichteren Hammer (im gegebenen Fall 2 kg) ist nicht rationell infolge des verhältnismäßig großen Energieverbrauchs für die Leerbewegung.

6. Die Arbeit mit einem schweren Hammer (im gegebenen Fall 7 kg) ist infolge der ungenügenden Schlagkraft ebenfalls nicht rationell.

7. Es muß betont werden, daß das Grundziel der vorliegenden Arbeit die Bestimmung der Gesetzmäßigkeiten im Energiewechsel bei einem gegebenen Arbeitsprozeß war.

Die Bestimmung der konkreten Optimalbedingungen bei verschiedener Arbeit, zwecks Erreichung rein praktischer Resultate, muß aber entweder, falls möglich, unmittelbar in Betriebsbedingungen gemacht werden, oder es müssen im Laboratorium solche Versuchsverhältnisse geschaffen werden, die in jedem Einzelfall den Betriebsbedingungen gleichen können.

Außerdem muß hoch betont werden, daß, obgleich wir uns in der vorliegenden Arbeit auf die Angaben der Energiewechsel basieren, wir es doch nicht glauben, daß diese Methode imstande ist ein volles Bild der im Organismus während der Arbeit auftretenden Veränderungen zu geben.

Zur Lösung der praktischen Fragen muß unbedingt, wo es nur möglich ist, eine komplexe Untersuchungsmethode angewandt werden. Indem wir in der vorliegenden Arbeit die Veränderungen des Energiewechsels bei Hammerarbeit untersuchten, haben wir die komplizierte Frage der Rationalisierung dieses Arbeitsprozesses nur teilhaft lösen können.

Literaturverzeichnis.

- ¹ Klein u. Steuber, Die gasanalytische Methodik des dynamischen Stoffwechsels. — ² Müller, Biologische Gasanalyse. — ³ Loewy, Der respiratorische und der Gesamtumsatz. Handbuch der Biochemie, Bd. 6. — ⁴ Benedikt, Methoden zur Bestimmung des Gaswechsels bei Tieren und Menschen. Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden, T. 10, H. 3. 1924. — ⁵ Tigerstedt, Der Energiewechsel. Handbuch der biol. Arbeitsmethoden, T. 10, H. 3. 1924. — ⁶ Grafe, Pathologische Physiologie des Gesamtstoffes und Kraftwechsels. — ⁷ Simonson, Beiträge zur Physiologie der Arbeit, der Restitution und der Atmung. Pflügers Arch. **214**, H. 3 und **215**, H. 6. — ⁸ Hill, Muscular activity. — ⁹ Gessler, Untersuchungen über die Wärmeregulation. Pflügers Arch. **207**. — ¹⁰ Ilzhöfer, Über den Einfluß des Trainings auf Grundumsatz und Arbeitsnutzeffekt. Arch. Hyg. **93**. — ¹¹ Lindhard, Untersuchungen über statische Muskelarbeit. Skand. Arch. Physiol. (Berl. u. Lpz.). — ¹² Atzler, Körper und Arbeit. — ¹³ Rissko, Über die verschiedenen Berufe in der Metallindustrie (russ.). — ¹⁴ Kagan u. a., Eine Untersuchung der Hand- und Fließarbeit. Arb.hyg. (russ.) **1928**, Nr 7 und 8. — ¹⁵ Marschak u. Nemzova, Das Arbeitsregime bei hoher Umgebungstemperatur und der Gaswechsel. Arb.hyg. (russ.) **1928**, Nr 12. — ¹⁶ Bainbridge, The physiology of muscular exercise. — ¹⁷ Kahn, Gaswechseluntersuchungen bei schwerer körperlicher Berufsarbeit. Arb.organisat. (russ.) **1928**, Nr 3. — ¹⁸ Badder u. Lehmann, Über die Ökonomie der Maurerarbeit. Arb.physiol. **1928**, H. 1. — ¹⁹ Atzler u. Herbst, Die Ökonomie des Lasttragens über eine ebene Strecke. Arb.physiol. **1928**, H. 1. — ²⁰ Wenzig, Physiologie des Schaufelns. Arb.physiol. **1**, H. 2 (1928). — ²¹ Atzler, Herbst u. Lehmann, Arbeitsphysiologische Studien mit dem Respirationsapparat. Biochem. Z. **143**, H. 1—2 (1923). — ²² Janschewski, Über den Einfluß der Trägheit der bewegten Massen auf die Ökonomie der Kurbelarbeit. Arb.physiol. **1**, H. 3 (1929). — ²³ Kommerell, Die Schaufelarbeit in gebückter Haltung. Arb.physiol. **1**, H. 4 (1929). — ²⁴ Schrötter, Zur Kenntnis des Energieverbrauches bei Maschinenschreiben. Pflügers Arch. **207**. — ²⁵ Liljeström u. Lindhard, Physiologie des Ruderns. Skand. Arch. Physiol.

(Berl. u. Lpz.) **39** (1920). — ²⁶ *Dolgin*, Optimale Kontraktionsgeschwindigkeit kleiner Muskeln. *Arb.physiol.* **2**, H. 2 (1929). — ²⁷ *Scheidin* u. *Ostrow*, Eine physiologische Untersuchung der Arbeiter beim Ballastieren der Eisenbahn. *Arb.hyg.* (russ.) **1929**, Nr 4. — ²⁸ *Efimow* u. *Arschawsky*, Über den Einfluß der Hyperventilation bei körperlicher Arbeit auf die Verkürzung der Restitutionsperiode. *Arb.hyg.* (russ.) **1929**, Nr 5. — ²⁹ *Farkas*, *Geldrich* u. *Szakall*, *Arb.physiol.* **1**, H. 5 (1929) und **2**, H. 2. — ³⁰ *Bernstein*, Die kymocyclographische Methode der Bewegungsuntersuchungen. *Handbuch der biol. Arbeitsmethoden*, Abt. 5, T. 5a. 1928. — ³¹ Untersuchungen über die Biomechanik des Schlages mittels einer cyclographischen Aufnahme. *Arb. Zentralinstitut f. Arbeitsstud.* (russ.) **1**. — ³² *Bernstein*, *Biomechanik und Arbeitsschutz.* *Arb.hyg.* (russ.) **1930**, Nr 2. — ³³ *Atzler*, *Herbst*, *Lehmann* u. *Müller*, *Pflügers Arch.* **208**, 184 (1925).
