

(Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Arbeitsphysiologie.)

Über den Einfluß der Trägheit der bewegten Massen auf die Ökonomie der Kurbelarbeit.

Von
D. Jaschwili.

Mit 2 Textabbildungen.

(Eingegangen am 11. Mai 1928.)

In den arbeitsphysiologischen Studien von *Atzler, Herbst, Lehmann* und *Müller*¹ sind eingehende Untersuchungen über das optimale Tempo einer Kurbelarbeit veröffentlicht. Diese Untersuchungen hatten das überraschende Ergebnis, daß die optimale Drehgeschwindigkeit, d. h. die Geschwindigkeit, bei welcher pro Meterkilogramm äußerer Arbeit ein Minimum von Energie verbraucht wird, vollkommen unabhängig ist von der Belastung der Kurbel und nur sehr wenig abhängig ist von der Länge des Kurbelradius. Die Autoren schlossen daraus, daß maßgebend für das Geschwindigkeitsoptimum nur die optimale Kontraktionszeit der Muskeln, bzw. die optimale Pause zwischen 2 Kontraktionen sein könne. Dieser Befund ist prinzipiell bedeutungsvoll, weil er in verallgemeinerter Form besagt, daß das optimale Arbeitstempo durch die Eigenschaften der Muskeln, nicht aber durch mechanische Momente bedingt ist.

Die erwähnte Untersuchung wurde am Kroghschen Fahrrad ausgeführt, das in einen Kurbelergostaten umgebaut war. Die bewegte Masse des Rades ist beim Kroghschen Fahrrad recht beträchtlich, da die rotierende Kupferscheibe mit einem schweren Bleiring armiert ist. Diese bewegte Masse war in allen Einzelversuchen der erwähnten Untersuchung die gleiche geblieben. Die Verff. glaubten jedoch, daß die Gleichheit des Trägheitsmomentes in allen Fällen nicht die Ursache für das gleichbleibende Optimaltempo sein könnte, weil es nicht auf die lebendige Kraft des rotierenden Systems allein ankommen könnte, sondern höchstens auf das Verhältnis zwischen der äußeren Arbeitsleistung und der lebendigen Energie des Systems. Dieses Verhältnis war aber entsprechend der Änderung der Kurbelbelastung in weiten Grenzen variiert worden.

¹ *Atzler, E. R. Herbst, G. Lehmann, E. Müller*, Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. 208, 184. 1925.

Bei der prinzipiellen Wichtigkeit des Problems folgte ich gern der Anregung Prof. *Atzlers*, die Richtigkeit der ausgesprochenen Ansicht, daß das optimale Tempo der Kurbelarbeit von der Größe des Trägheitsmomentes unabhängig ist, experimentell zu prüfen.

Methodik.

Die Methodik meiner Versuche mußte sich notwendig eng an die in der vorerwähnten Studie gebrauchte anschließen, aus der alle Einzelheiten zu ersehen sind. Die Respirationsversuche wurden mit einem Benedictschen Respirationsapparat ausgeführt. Bei allen Versuchen befand sich die Kurbelachse 82,2 cm über dem Boden, der Kurbelradius war 19,4 cm. Die Belastung war so gewählt, daß pro Umdrehung der Kurbel eine Arbeit von 14,95 mkg geleistet wurde. Diese Zusammenstellung von Radius und Arbeitsleistung wurde gewählt, weil sie sich in den früheren Versuchen als günstig erwiesen hatte. Nachdem unter diesen Bedingungen die optimale Umdrehungsgeschwindigkeit ermittelt war, wurde das Trägheitsmoment des rotierenden Systems dadurch verringert, daß der Bleiring der Scheibe schmaler gemacht wurde. Unter sonst gleichen Bedingungen wurde nunmehr wiederum mit verschiedenen Geschwindigkeiten gearbeitet. Schließlich wurde der Bleiring ganz abgenommen und in einer dritten Versuchsserie abermals *ceteris paribus* das Geschwindigkeitsoptimum bestimmt.

Für die Berechnung der Trägheitsmomente bei den einzelnen Versuchsserien mußte darauf Rücksicht genommen werden, daß die rotierende Scheibe aus drei Teilen, einem breiten Messingkern, der eigentlichen Kupferscheibe und dem erwähnten Bleiring bestand. Für jeden dieser Teile wurde das Trägheitsmoment getrennt berechnet. Für die Berechnung bedienen wir uns der Formel:

$$T = \frac{1}{2} \pi b \cdot s (r_1^2 - r_2^2).$$

Hierin bedeutet *b* die Dicke des betreffenden Stückes, *s* das spezifische Gewicht, r_1 ist der äußere, r_2 der innere Radius. Diese Formel ergibt sich durch Auflösung des Ausdrucks für das Trägheitsmoment von Hohlzylindern, die um ihre Achse rotieren:

$$T = 2 \pi b \cdot s \int_{r_2}^{r_1} r^3 d r.$$

Die einzelnen Momente betragen (im CGS-System ausgedrückt): Messingkern $0,001 \cdot 10^6$, Kupferscheibe $0,449 \cdot 10^6$, Bleiring in der ursprünglichen Dicke von 3,8 cm $6,635 \cdot 10^6$, bei der in der zweiten Versuchsserie verwandten Dicke von 2,1 cm $3,667 \cdot 10^6$. Demnach verhielten sich die Trägheitsmomente bei den drei Versuchsserien wie 7,09 : 3,67 : 0,45. In der dritten Versuchsserie war also das Trägheitsmoment nur der 16. Teil von dem der ersten Serie.

Versuchsergebnisse.

Im ganzen wurden etwa 200 Respirationsversuche ausgeführt, von denen diejenigen unberücksichtigt blieben, die bei noch nicht vollständiger Übung der V.P. ausgeführt waren. In der nebenstehenden Tabelle geben wir die erhaltenen Resultate in kleinen Kalorien pro 1 mkg äußere Arbeit wieder.

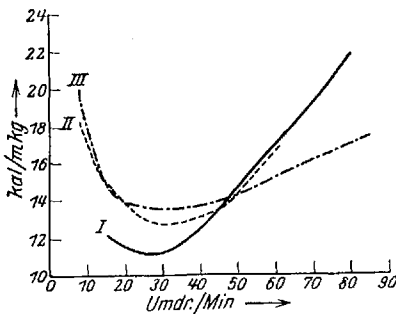


Abb. 1.

Tabelle.

Trägheit des Systems	Zahl der Umdrehungen pro Minute	cal/mkg
7,085	15,1	11,97
	28,5	10,98
	43,6	13,10
	55,9	16,01
	78,7	21,25
4,117	8,7	18,00
	16,7	14,60
	30,8	12,46
	46,0	13,30
	61,0	16,82
0,450	8,6	19,59
	15,6	14,43
	30,4	13,46
	45,1	13,69
	60,0	15,18
	81,2	16,91

Es gelingt bei den Kurbelversuchen meist nicht ganz genau, ein beabsichtigtes Tempo einzuhalten. Das Tempo wurde daher bei jedem Einzelversuche gemessen. Die in der Tabelle für die Tempi angegebenen Zahlen sind die Mittelwerte der eng zusammenliegenden Geschwindigkeiten bei den einzelnen Versuchen. In Abb. 1 sind die Resultate kurvenmäßig zusammengestellt. Kurve I entspricht dem großen, II dem mittleren und III dem kleinen Trägheitsmoment.

Die Abbildung zeigt, daß sich die Kurven keineswegs decken, daß jedoch die niedrigsten Kalorien pro mkg-Werte bei allen 3 Kurven fast genau bei 30 Umdrehungen pro Minute liegen. Damit ist der Nachweis experimentell erbracht, daß die in der Arbeit von Atzler, Herbst, Lehmann und Müller ausgesprochene Ansicht zu Recht besteht, daß das Trägheitsmoment für die Lage des Geschwindigkeitsoptimums ohne Belang ist.

Das Trägheitsmoment bzw. die diesem proportionale lebendige Kraft des rotierenden Systems ist jedoch von Bedeutung für den Wirkungsgrad, unter dem bei den einzelnen Geschwindigkeiten gearbeitet wird. Bei langsameren Geschwindigkeiten sehen wir, daß das hohe Trägheitsmoment (Kurve I) die weitaus günstigeren Werte liefert. Das steht im Einklang mit früher beim Kurbeldrehen gemachten Beobachtungen. Es ist günstig, wenn die eigentliche Arbeit auf einen einzigen Stoß an dem am günstigsten gelegenen Punkte der Kurbelperipherie konzentriert

werden kann. Das ist nur dann möglich, wenn der Geschwindigkeitsverlust bei einer Umdrehung gering ist, d. h. wenn die lebendige Kraft groß ist im Vergleich zur äußeren Arbeitsleistung. Ist die äußere Arbeitsleistung unverändert, so ist das bei hoher Trägheit bereits bei einer kleineren Geschwindigkeit der Fall. Daraus erklärt sich ohne weiteres, daß die Kurve I im Anfangsteil die günstigste sein muß. Interessant ist, daß Kurve II und III hier so nahe zusammenliegen. Offenbar spielt die Verkleinerung der Trägheit, sobald sie unter einen gewissen Wert gesunken ist, keine große Rolle mehr. Im optimalen Bereich sind die 3 Kurven deutlich voneinander getrennt, dann aber schneiden sie sich ungefähr in einem Punkte, so daß sich nunmehr, d. h. bei Geschwindigkeiten, die über 45 pro Minute liegen, die Verhältnisse gerade umkehren. Das große

Trägheitsmoment wirkt hier nicht mehr günstig, weil infolge der hohen Geschwindigkeiten, auch bei geringer Trägheit, die lebendige Kraft relativ zur geleisteten Arbeit groß genug ist, um ein ökonomisches Arbeiten zu ermöglichen. Das würde aber nur erklären können, daß der Kalorienverbrauch pro mkg gleich wird, nicht aber, daß das große Trägheitsmoment jetzt sogar ungünstiger ist. Dieses eigenartige Verhalten dürfte darauf zurückzuführen sein, daß bei hoher

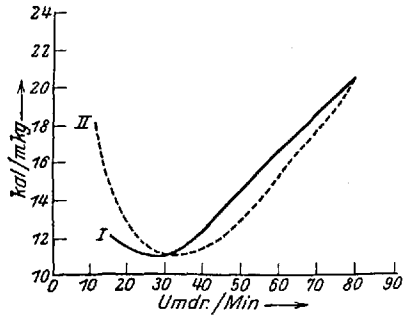


Abb. 2.

Trägheit, die bei hohen Geschwindigkeiten unvermeidlichen Unregelmäßigkeiten im Drehen viel stärker ins Gewicht fallen müssen, indem eine geringe Verlangsamung und Wiederbeschleunigung gleich eine recht beträchtliche Arbeitsleistung bedeutet.

Ein Vergleich unserer Kurven mit den früheren von der V.P. G. L. gewonnenen Kurven gibt uns die Möglichkeit, die Bedeutung individueller Unterschiede zu würdigen. In Abb. 2 ist unsere Kurve I der früher unter den gleichen Bedingungen (II) gefundenen gegenübergestellt. Man sieht, daß unsere Kurve eine Kleinigkeit nach links gerückt ist. Das Geschwindigkeitsoptimum liegt bei beiden V.P. bei 30 bzw. 33 Umdrehungen. Auch der übrige Kurvenverlauf ist außerordentlich ähnlich. Die Unterschiede im Körperbau der beiden V.P. sind dabei nicht unerheblich. In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten anthropometrischen Daten vergleichsweise gegenübergestellt.

Wir dürfen also den Schluß ziehen, daß die Bedeutung individueller Unterschiede für die Ökonomie von Arbeitsleistungen speziell für die Lage von Geschwindigkeitsoptima nur gering ist.

Tabelle.

	G. L.	D. J.
Körpergewicht	60,0 kg	63,3 kg
Körperlänge	171,7 cm	168,1 cm
Höhe des Brustbeins über dem Boden	141,8 „	136,8 „
Höhe des Akromions über dem Boden	138,4 „	137,5 „
Höhe der Ellbogenfuge über dem Boden	108,4 „	105,1 „
Höhe des Handgelenkes über dem Boden	83,9 „	81,5 „
Höhe der Fingerspitzen über dem Boden	64,5 „	63,7 „
Höhe des Darmbeinstachels über dem Boden	94,8 „	94,4 „
Höhe der Kniegelenkfuge über dem Boden	49,9 „	46,1 „
Höhe des Fußknöchels über dem Boden	6,5 „	7,7 „
Fußlänge	26,5 „	24,2 „
Brustumfang, mittlerer	83,2 „	89,0 „
„ eingeatmet	87,3 „	95,0 „
„ ausgeatmet	79,5 „	88,0 „
Oberarmumfang, gestreckt	26,5 „	27,0 „
„ gebeugt	29,4 „	31,0 „
Unterarmumfang, größter	26,8 „	26,0 „
„ kleinster	15,8 „	17,0 „
Oberschenkelumfang	47,8 „	54,0 „
Unterschenkelumfang, größter	32,0 „	34,0 „
„ kleinster	20,1 „	22,0 „

Es ist mir eine angenehme Pflicht, Herrn Prof. *Atzler* für die Stellung des Themas dieser Arbeit und für die Erlaubnis, die Untersuchungen in seinem Laboratorium durchzuführen, herzlich zu danken. Herrn Priv.-Doz. Dr. *Lehmann* danke ich für die gewährte Anleitung.

Zusammenfassung.

Mit dem Benedicktschen Respirationsapparat werden Arbeitsversuche an dem zu einem Kurbelergostaten umgebauten Kroghschen Fahrrad mit verschiedenen Geschwindigkeiten und verschiedener Trägheit des rotierenden Systems ausgeführt.

Es zeigt sich, daß die Lage des Geschwindigkeitsoptimums von der Massenträgheit unabhängig ist. Jedoch ist bei niedrigen Geschwindigkeiten ein größeres, bei großen ein kleineres Trägheitsmoment für die Ökonomie der Arbeitsleistung günstiger.

Ein Vergleich mit früheren Untersuchungen zeigt, daß die Bedeutung individueller körperbaulicher Unterschiede für die Ökonomie der Kurbelarbeit sehr gering ist.