

(Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Arbeitsphysiologie Dortmund-Münster.)

Der Einfluß der Tretkurbellänge auf das Arbeitsmaximum und den Wirkungsgrad beim Radfahren.

Von

E. A. Müller und H. Grosse-Lordemann.

Mit 2 Textabbildungen.

(Eingegangen am 19. Juli 1937.)

Wir haben 1936 eine Arbeit über den Einfluß der Leistung und der Arbeitsgeschwindigkeit auf das Arbeitsmaximum veröffentlicht (*Grosse-Lordemann und E. A. Müller*¹). Etwa gleichzeitig hat das Muskelfluginstitut in seinen Mitteilungen Nr. 3² über ganz gleichartige Versuche berichtet. Während unsere Versuche ein Leistungsbereich von 6—20 mkg/sec umfaßten, beziehen sich die Versuche des Muskelfluginstitutes auf Leistungen von 35—80 mkg/sec. Beide Arbeiten ergänzen sich also sehr gut. Auch im Bereich der hohen Leistungen gelten die von uns gefundenen Gesetzmäßigkeiten. Der Logarithmus der Maximalarbeit ist der Leistung proportional. Das größte Arbeitsmaximum ist an ein sehr schmales optimales Bereich der Arbeitsgeschwindigkeit gebunden. Von besonderem Interesse ist die Lage dieses Geschwindigkeitsoptimums. Nach den Messungen des Muskelfluginstitutes ergaben bei 80 mkg/sec 105 PU/min das größte Arbeitsmaximum. Bei 50 mkg/sec waren es 90 PU/min, bei 40 mkg/sec 80 PU/min, bei 35 mkg/sec 65 PU/min. In unseren Versuchen finden wir 40—50 PU/min zwischen 6 und 20 mkg/sec am günstigsten. Die Abnahme der optimalen PU-Zahl mit abnehmender Leistung in den Versuchen des Muskelfluginstitutes setzt sich also in unseren Versuchen fort. Die in der Veröffentlichung des Muskelfluginstitutes ausgesprochene Hypothese dagegen, daß die optimale PU-Zahl unterhalb 40 mkg/sec der Leistung proportional abnimmt, um bei der Leistung 0 gleichfalls 0 zu werden, ist nach unseren Versuchen nicht zu halten. Diese Theorie war bei Berücksichtigung des vergrößerten statischen Arbeitsanteiles langsamer Muskelkontraktionen an sich unwahrscheinlich.

Die Zunahme der optimalen PU-Zahl mit steigender Leistung ist vermutlich dadurch bedingt, daß die Umfangskraft mit zunehmender PU-Zahl sinkt und in das Bereich der maximal möglichen Muskelkraft gebracht wird.

In der vorliegenden Arbeit haben wir die Arbeitsmaxima und Wirkungsgrade bei veränderter Tretkurbellänge bestimmt. Wir wollen mit diesen Versuchen die praktisch günstigste Tretkurbellänge ermitteln. Zugleich wurde mit dieser Untersuchung die Frage bearbeitet, ob man

bei einer bestimmten Leistung größere Arbeitsmaxima erzielt, wenn man gegen große Kräfte über einen kurzen Weg oder wenn man über einen langen Weg gegen kleine Kräfte arbeitet. Die Zusammenhänge zwischen Arbeitsmaximum und Wirkungsgrad wurden dabei analysiert.

Die Versuchsanordnung war die gleiche, die wir in der zitierten Arbeit ausführlich beschrieben haben. Die Versuchsperson war die Versuchsperson A derselben Arbeit. Das in den Versuchen verwendete Fahrrad hatte ein Übersetzungsverhältnis 2 : 1. Der Winkel der Verbindungslinie Sattelmitte—Tretachse mit der Senkrechten betrug 21°. Als Tretkurbellänge wurde der Abstand zwischen Tretlagerachse und Pedalachse bezeichnet. 3 verschiedene Tretkurbellängen wurden untersucht: die normale Tretkurbel von 18 cm Länge, eine kurze Tretkurbel von 14 cm und eine lange Tretkurbel von 22 cm Länge. Die Sattelhöhe wurde dabei jeweils so eingestellt, daß das Bein in der tiefsten Pedalstellung gestreckt war. Der Abstand der Sattelsitzfläche von der Tretlagerachse, der bei der normalen Tretkurbellänge 72 cm betrug, wurde daher bei der kurzen Tretkurbel auf 76 cm, bei der langen Tretkurbel auf 68 cm gebracht. Sämtliche Versuche wurden bei 45 PU in der Minute, der optimalen Pedalumdrehungszahl, durchgeführt.

Die Ergebnisse der Bestimmungen des Arbeitsmaximums sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Der erste Stab enthält die Arbeit/PU in mkg. Im zweiten Stab ist aus der Arbeit/PU und der Zahl der

Tabelle 1.

Arbeit/PU mkg	Leistung mkg/sec	Tretkurbel- länge cm	Mittlere Umfangs- kraft kg	Maximale Fahrzeit Mittelwert Min.	Mittlere Fehler F ± %	Maximale Gesamt- arbeit mkg · 10 ³
10,7	8	14	12,1	58	3	27,8
		18	9,2	55	1	26,4
		22	7,8	48	5	23,0
13,3	10	14	15,1	23	4	13,8
		18	11,4	24	0	14,4
		22	9,6	28	7	16,8
20,0	15	14	22,7	4,5	11	4,1
		18	17,2	7,0	0	6,3
		22	14,5	11,0	6	9,9
26,7	20	14	30,4	1,4	6	1,7
		18	23,0	2,0	0	2,4
		22	19,4	3,0	1	3,6

Pedalumdrehungen die Leistung in mkg/sec errechnet. Im dritten Stab ist die Tretkurbellänge, im vierten Stab die mittlere Umfangskraft angegeben. In den folgenden Stäben sind die bei jeder Variation erreichte mittlere maximale Fahrzeit in Minuten und der mittlere Fehler F dieses Mittelwertes in Prozent eingetragen. Wir sehen, daß F relativ zu den gemessenen Unterschieden der Fahrzeiten klein ist. Im letzten Stab ist

schließlich die bei der eingestellten Leistung in der erreichten mittleren Maximalzeit geleistete maximale Gesamtarbeit, das Arbeitsmaximum in $\text{mkg} \cdot 10^3$ errechnet.

Einen besseren Überblick über die Zahlen der Tabelle 1 erhält man, wenn man die prozentuale Veränderung des Arbeitsmaximums bei kurzer bzw. langer Tretkurbel gegenüber dem Arbeitsmaximum bei normaler Tretkurbel unter den verschiedenen Leistungen betrachtet (Tabelle 2).

Die Tabelle zeigt, daß bei hohen Leistungen das Arbeitsmaximum

bei langer Tretkurbel um etwa 50% erhöht ist, bei kurzer Kurbel dagegen um etwa 30% erniedrigt. Bei mittleren Leistungen findet sich nur ein geringer Einfluß der Tretkurbellänge auf das Arbeitsmaximum.

Bei 8 mkg/sec kommt es zu einer Erniedrigung des Arbeitsmaximums bei der langen und zu einer Erhöhung des Arbeitsmaximums bei der kurzen Tretkurbel. Diese Umkehr des Einflusses der Tretkurbellänge wird in einer kurvenmäßigen Darstellung deutlicher (Abb. 1a). Wir wollen dabei die Leistung (N) als Abszisse und den Logarithmus des Arbeitsmaximums (ΣA) als Ordinate auftragen. Wir erhalten dann eine ungefähr gradlinig verlaufende Kurve für die normale Tretkurbellänge, die der Gleichung

Tabelle 2.

Leistung mkg/sec	Zunahme bzw. Abnahme des Arbeitsmaximums in % gegenüber normaler Tretkurbellänge (18 cm)	
	bei Tretkurbel 14 cm	bei Tretkurbel 22 cm
8	+ 6	- 13
10	- 4	+ 16
15	- 36	+ 58
20	- 30	+ 50

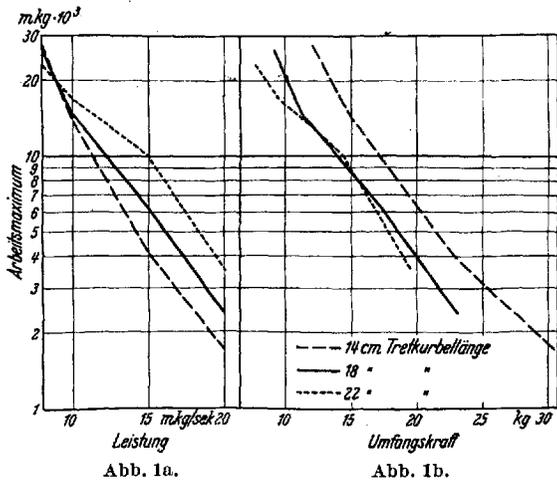


Abb. 1a.

Abb. 1b.

$$\log \Sigma A = a N + b$$

folgt. Die entsprechenden Kurven für die kurze und lange Tretkurbel laufen zwischen 15 und 20 mkg/sec nahezu parallel zu der Kurve der normalen Tretkurbel, die erstere darunter, die letztere darüber. Zwischen 8 und 15 mkg/sec ist die Neigung der Kurve für die kurze Tretkurbel steiler, für die lange Tretkurbel flacher als die Neigung der Kurve für

die normale Tretkurbel, so daß es zu einer Kreuzung der 3 Kurven bei 9 mkg/sec kommt.

Zum Verständnis dieses Kurvenverlaufes müssen wir uns vergegenwärtigen, daß bei konstanter Leistung und konstanter Zahl der Pedalumdrehungen in der Minute sich mit der Änderung der Tretkurbellänge 3 Größen mitverändern: die Kontraktionsgeschwindigkeit der Beinmuskeln, der Pedalweg (Kreisbogen, den die Pedalachse bei einer Umdrehung beschreibt) und die mittlere Umfangskraft. Die mittlere Umfangskraft ist gleich $\frac{\text{Arbeit}}{\text{PU mal Pedalweg}}$. Sie ist im Stab 4 der Tabelle 1 errechnet. Es verhalten sich die Verkürzungsgeschwindigkeiten der Muskeln und die Pedalwege wie die Tretkurbellängen, also wie 14 : 18 : 22, die Umfangskräfte dagegen umgekehrt wie die Tretkurbellängen. Es ist klar, daß bei einer bestimmten Tretkurbellänge und konstanter PU-Zahl die Umfangskraft der Leistung proportional ist. Die Abnahme des Arbeitsmaximums mit steigender Leistung bei konstanter PU-Zahl, die wir in unserer ersten Veröffentlichung¹ beschrieben haben und die auch aus Abb. 1a ersichtlich ist, ist also gleichzeitig eine Folge der zunehmenden Umfangskraft. Die Divergenz der Kurven in Abb. 1a rechts von 9 mkg/sec könnte daher auf die mit der Tretkurbellänge veränderte Umfangskraft bezogen werden; die kleinere Umfangskraft bei der langen Tretkurbel gibt ein größeres, die größere Umfangskraft bei der kurzen Tretkurbel gibt ein kleineres Arbeitsmaximum. Wollen wir prüfen, inwieweit diese Erklärung quantitativ zutrifft, so müssen wir das Arbeitsmaximum als Funktion der Umfangskraft darstellen. Abb. 1 b enthält als Abszisse die Umfangskraft, als Ordinate das Arbeitsmaximum wiederum in logarithmischem Maßstab. Die Verhältnisse in Abb. 1 b wurden so gewählt, daß die Kurven für die normale Tretkurbel in 1 a und 1 b sich decken. Würde das Arbeitsmaximum unabhängig von der Tretkurbellänge eine Funktion der Umfangskraft sein, so müßten in Abb. 1 b alle Punkte der 3 Tretkurbellängen auf einer Linie liegen. Wir sehen, daß die Kurve für die lange Tretkurbel nahe an die Kurve für die normale Tretkurbel herangerückt ist und nur noch wenig von dieser abweicht. Die Kurve für die kurze Tretkurbel, die in 1 a im rechten Teil der Abbildung etwa 50% unter der Kurve für die normale Tretkurbellänge liegt, läuft dagegen in Abb. 1 b im ganzen Bild 60% und mehr über der Kurve für die normale Tretkurbel.

Wir finden also, daß nur zwischen Tretkurbellängen von 18 und 22 cm das Arbeitsmaximum eine Funktion der Umfangskraft ist. Ein Einfluß des gleichzeitig veränderten Pedalweges und der ebenfalls veränderten Verkürzungsgeschwindigkeit auf das Arbeitsmaximum ist offenbar nicht vorhanden. Für die Verhältnisse der Tretkurbellängen unter der Normalen liegen die Dinge nicht so einfach. Hier wird das Arbeitsmaximum größer als bei der gleichen Umfangskraft an der nor-

malen oder langen Tretkurbel. Die Senkung des Arbeitsmaximums in Abb. 1 a bei der kurzen Tretkurbel ist also viel geringer als es dem Anstieg der Umfangskraft entspricht. Die Abnahme des Pedalweges und der Verkürzungsgeschwindigkeit des Muskels müssen hierfür verantwortlich sein.

Wir wollen schließlich untersuchen, ob den Änderungen des Arbeitsmaximums mit der Tretkurbellänge gleichsinnige Änderungen des Wirkungsgrades entsprechen. Tabelle 3 enthält den Calorienverbrauch/mkg für die 3 Tretkurbellängen und die verschiedenen Leistungen. In Abb. 2 ist der Calorienverbrauch als Funktion der Leistung für jede Tretkurbellänge kurvenmäßig dargestellt. Ein Vergleich dieser Abbildungen mit Abb. 1a zeigt, daß die normale und

Tabelle 3.

Leistung mkg/sec	Tretkurbel- länge cm	Mittelwert cal/mkg	Mittlere Fehler F ± %
8	14	12,1	1
	18	13,9	2
	22	14,0	1
10	14	10,9	3
	22	13,2	3
15	14	11,3	3
	18	13,4	3
	22	12,3	2
20	14	13,1	5
	18	14,5	4
	22	12,4	1

lange Tretkurbel bei 8—9 mkg/sec sowohl das gleiche Arbeitsmaximum wie den gleichen Calorienverbrauch haben. Mit steigender Leistung wird in beiden Abbildungen die lange Tretkurbel immer günstiger. Während jedoch das Arbeitsmaximum bis zu 50% zunimmt, sind es für den Wirkungsgrad nur 17%. Eine gewisse Übereinstimmung des Verlaufes von Wirkungsgrad und Arbeitsmaximum beim Vergleich der normalen mit der langen Tretkurbel ist somit wenigstens qualitativ nachzuweisen. Die kurze Tretkurbel zeigt dagegen im Vergleich zur normalen Tretkurbel einen verbesserten Wirkungsgrad bei verschlechtertem Arbeitsmaximum. Der Energieverbrauch für die kurze Tretkurbel liegt sogar mit Ausnahme des Bereichs der größten Leistungen unter dem der langen Tretkurbel.

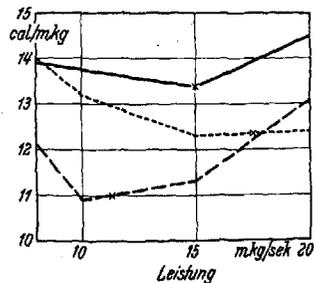


Abb. 2.
Tretkurbellänge 14 cm ———, 18 cm - - - - -, 22 cm
× 17 kg Umfangskraft.

Die sehr kleine Leerbewegung senkt hier offenbar den Energieverbrauch in der bekannten Weise, ohne das Arbeitsmaximum zu verbessern. Interessant ist, daß das Optimum der 3 Kurven sich mit zunehmender Tretkurbellänge nach rechts verlagert. Kreuzt man in jeder Kurve die Stelle an, die einer mittleren Umfangskraft von 17 kg entspricht, so

findet sich diese Stelle jeweils im Bereich des optimalen Energieverbrauches.

Bei konstanter Umfangskraft senkt die Zunahme des Pedalweges von 44 auf 57 cm (um 13 cm) das Arbeitsmaximum um 60%. Die weitere Zunahme des Pedalweges von 57 auf 69 cm (um 12 cm) läßt jedoch das Arbeitsmaximum nicht weiter absinken. Man darf diesen Befund wohl nicht dahin verallgemeinern, daß möglichst weit ausladende Bewegungen am wenigsten ermüden. Mit der größeren Tretkurbellänge kommt es beim Radfahren zu ganz anderen Bewegungsbahnen, die nicht einfache Verlängerungen der Pedalwege bei der kurzen Tretkurbel sind. Das Muskelspiel wird wesentlich verändert. Die Geltung der gewonnenen Resultate beschränkt sich daher auf die Radfahrarbeit.

Die Leistung bei normalem Tourenfahren liegt bei etwa 9 mkg/sec (entsprechend 16 km/Stunde). Bei dieser Leistung ist von einer Verlängerung der Tretkurbel keine Beeinflussung des Arbeitsmaximums zu erwarten. Auch bis herunter zu 8 mkg/sec ist die Verlängerung der Tretkurbel nicht nennenswert nachteilig. Noch kleinere Leistungen, d. h. Fahrgeschwindigkeiten unter 14 km/Stunde haben geringe praktische Bedeutung. Verändert demnach die längere Tretkurbel beim langsamen Tourenfahren die Leistungsfähigkeit nicht, so erhöht sie diese um etwa 50%, sobald bei größerer Geschwindigkeit oder beim Fahren bergauf Leistungen von 15 mkg/sec und darüber verlangt werden. Sie führt zu einer Verbesserung des Wirkungsgrades um etwa 17%.

Die von uns gewählte lange Tretkurbel war die längstmögliche für unsere Vp. A. Eine kleine Vp. hätte mit dieser Tretkurbel nicht fahren können. Wir können daher nicht einfach fordern, daß die „normale Tretkurbel“ eine größere Länge erhält, sondern wir müssen die Forderung nach der Verstellbarkeit der Tretkurbel erheben. Genau wie die Sattelhöhe individuell anpaßbar ist, muß auch die Tretkurbellänge anpaßbar werden. Die jetzige normale Tretkurbel ist lediglich eine Konzession an die kurzbeinigen Menschen auf Kosten aller normal- und langbeinigen. Die Verstellbarkeit der Tretkurbel ist um so eher zu fordern, als sie technisch und wirtschaftlich ohne Schwierigkeit zu verwirklichen ist. An der verstellbaren Tretkurbel muß sich jeder Fahrer die für ihn größtmögliche Länge einstellen.

Zusammenfassung.

Das in einmaliger, nicht unterbrochener Arbeit am Fahrrad erreichbare Arbeitsmaximum und der Wirkungsgrad wurden bei 3 verschiedenen Tretkurbellängen (kurz = 14 cm, normal = 18 cm lang = 22 cm) unter verschiedenen Leistungen und konstanter Zahl der Pedalumdrehungen an einer Versuchsperson untersucht.

Das Arbeitsmaximum wird bei Leistungen zwischen 8 und 10 mkg/sec nicht wesentlich durch die Tretkurbellänge beeinflusst. Bei größeren Leistungen nimmt es jedoch mit der Tretkurbellänge zu. Zwischen 15 und 20 mkg/sec erreicht man mit der langen Tretkurbel ein um 50% größeres Arbeitsmaximum als mit der normalen.

Der Wirkungsgrad ist bei der langen und bei der kurzen Tretkurbel günstiger als bei der normalen.

Es ist praktisch anzustreben, die Tretkurbellänge verstellbar zu machen, damit jeder Fahrer sie längstmöglich einstellt. Er gewinnt dadurch beim normalen Tourenfahren nichts, vergrößert jedoch seine Leistungsdauer bei höheren Leistungen (Bergfahren, Schnellfahren, Gegenwind) um etwa 50%.

Literatur.

¹ *Grosse-Lordemann, H. u. E. A. Müller: Arb.physiol. 9, 454 (1936).* — ² *Flug-sport 28 (1936).*
