

Wolfgang Petzke

Muskelleistung und Wirkungsgrad beim Radfahren

Leistung der Gelenkbewegungen – Erklärung zum „runden Tritt“

Dass die unter dem Begriff „runder Tritt“ diskutierte Idealvorstellung vom Radfahren und die damit verbundene Bezeichnung „biomechanischer Wirkungsgrad“ im Widerspruch zu den Gesetzen der technischen Physik steht, ist seit langem bekannt; diese Diskrepanz wurde verschiedentlich sogar als Besonderheit der Biomechanik gesehen. Messreihen – man denke an Tretkraftuntersuchungen mit Radsportlern und Nichtsportlern – ließen niemals eine befriedigende Korrelation mit erwarteten Ergebnissen erkennen, und die Diskussion von Qualitätskriterien blieb, weil auf irrtümlichen Annahmen beruhend, ergebnislos. Entwicklung und Einsatz eines Messsystems für die Muskelleistung an Hüfte und Knie beim Radfahren brachte den Verfasser des vorliegenden Beitrags zu der Erkenntnis, dass gerade das Bemühen, nach der bisherigen Idealvorstellung mit einer bestimmten definierten Kraft zu treten, keine Verbesserung, sondern eine Verschlechterung der Leistungsabgabe bewirkt.

Sowohl von den Massenträgheitsphänomenen als auch von den Muskeln verursachte Kräfte der Beine sind beim Radfahren am Pedal zu spüren und messtechnisch zu erfassen. Jedoch nur die Muskelkraft und die Bewegungen von Becken, Hüfte, Knie- und Sprunggelenk entsprechen den ursächlichen Leistungen. Diese Leistungswerte zeigen direkt an, bei welchen Bewegungsphasen es sich um Energie abgebende (konzentrische) oder um Energie verzehrende (exzentrische) – gegen die Bewegung wirkende – Anteile handelt. Für das Verständnis und die Beurteilung der Energieabgabe beim Radfahren stehen Muskelspannung und Gelenkbewegung, also die Leistung dieser Bewegungen, im Mittelpunkt und nicht, wie bisher angenommen, die Kraft zwischen Fuß und Kurbelbewegung. Bei gutem Gesundheitszustand und korrekter Fahrweise liegt der Anteil konzentrischer Bewegungen typisch nahe 100 Prozent. Die häufig geäußerte Empfehlung, die Muskelaktion anhand der Kraft

auf die Kurbel zu steuern, führt jedoch dazu, dass der Anteil konzentrischer Bewegungsphasen auf bis ca. 75 Prozent sinkt. Damit verbunden entstehen hohe Energieverluste. Wegen der ungünstigeren und höheren Belastung der Gelenke bei exzentrischen Bewegungsanteilen könnte diese Praktik auch Hüfte und Kniegelenk schädigen. Nach Beobachtungen sind als Folge von Verletzungen teilweise große Unterschiede in der Leistung bestimmter Muskelgruppen zwischen dem gesunden und dem betroffenen Bein vorhanden. Der Lösungsansatz dient dazu, Schäden aufzudecken, besser zu beheben und Heilungsmöglichkeiten zu verbessern.

Eingegangen: 19.12.2005

1. Einleitung

Physikalische Gesetze lassen uns Zusammenhänge der uns umgebenden Welt erkennen. Die Biomechanik beschäftigt sich mit einem Teilbereich daraus, den Vorgängen der belebten Natur, insbesondere des Menschen. Sehnen, Gelenke, Knochen lassen sich in ihren Eigenschaften sehr genau mit den bekannten Methoden für starre und elastische Körper beschreiben. Der Muskel hingegen mit seinen komplexen Eigenschaften (Aktivierbarkeit, Aktivierungszustand, Dehnung, Ermüdung und nicht zuletzt der Steuerung nach den Vorstellungen des „Kopfes“ und des freien Willens unterworfen) muss in der Regel separat betrachtet werden. Er lässt sich jedoch, seiner Lage und Funktion nach, gut abgrenzen.

Die Leistungen der Bewegung von Knie-, Hüft- sowie Becken- und Sprunggelenk im Radsport zu erfassen und für das Training zu nutzen, ist eine bislang nicht gängige Methode. Dies hat zwei wesentliche Ursachen. Zum einen war in der Vergangenheit keine technisch praktikable Messmöglichkeit vorhanden (in Zukunft wird es bestimmt Angebote hierzu geben), zum anderen fehlte nach verbreiteter Meinung in der Literatur eine genaue Vorstellung davon, wie Muskelleistung beim Radfahren abgegeben

wird und wie Energieverluste entstehen können.

Die Erkenntnis, dass die Leistung der Gelenkbewegung – negativ wie positiv – von Hüfte und Knie eins zu eins auch an der Tretkurbel wirkt, und dass gerade die sich automatisch für die Übertragung der Energie einstellende Kraft zwischen Fuß und Kurbel nicht verändert werden darf, um die Arbeitsweise der Muskulatur in Bezug auf den Antrieb des Bewegungssystems (den Wirkungsgrad) nicht zu verschlechtern, ist noch nicht allgemein bekannt. Der Sachverhalt soll mit dem vorliegenden Beitrag erklärt werden. Außerdem soll eine Vorstellung davon vermittelt werden, wie sich eine gesunde oder trainierte Muskelleistung beim Radfahren von einer Leistungsschwäche durch Krankheit, Verletzung oder falschem Training unterscheidet.

Vorüberlegung: Das Fahrzeug ‚Rad‘ verlangt nach Antriebsleistung, die der transportierte Fahrgast Mensch selbst über seine Muskulatur erbringt. Daher ist es von Vorteil, beim Radfahren eine darauf gut abgestimmte Muskelleistung zu haben. Diese kann auf unterschiedliche Prozesse und Eigenschaften hin betrachtet und untersucht werden, etwa die biochemische Stoffwechsel-Funktion oder die Arbeitsweise – als konzentrische, exzentrische oder isometri-

sche. Wie kann diese Arbeitsweise beim Radfahren erfasst werden?

2. Technische Voraussetzungen

Bei der Tretbewegung bilden die Beine zusammen mit der Tretkurbel ein Antriebs- und Bewegungssystem, um Muskelenergie auf den Fahrzeugantrieb zu übertragen. Schwenkbewegungen der Beinglieder werden in eine umlaufende Rotationsbewegung an der Kurbel überführt. An Becken, Ober-, Unterschenkel und Fuß angreifende Muskeln üben Spannungen aus und erzeugen an den dazwischen liegenden Gelenken Momente, welche eine Bewegung bewirken. Die Momente rufen zudem Reaktionskräfte hervor, beispielsweise zwischen Bein und Kurbel am Pedal, wodurch wiederum eine Bewegung und ein Drehmoment an der Kurbelachse entsteht, das über den Kettenstrang zum Antrieb des Fahrzeugs dient.

Das Pedal ist das nächste tragende Element außerhalb des Beines. Hier lässt sich gleichermaßen Kraft-Größe und Kraft-Richtung in Bezug zum Bein als auch zur Kurbel erfassen. Um Einblick in die verborgen liegenden Bewegungsleistungen an den Gelenkpunkten zu erhalten, müssen auch deren effektive Stellungen erfasst und mit einbezogen werden.

3. Massen- und Muskelkräfte

Es wirken auf dem Pedal nicht nur Reaktionskräfte auf die Muskelspannungen, sondern es lasten hierauf auch (vgl. Hammer und Hammer, 1978, Addition von Kräften und Vektoren) Kräfte, die bei Systemen der unbelebten Natur auftreten und die eine Wirkung der beteiligten Massen sind. In erster Linie stützt sich die untere Extremität samt Bekleidung und Schuh gegen die Schwerkraft am Pedal ab. Bei der Bewegung der Kurbel treten zudem wechselnde Beschleunigungen bei der Schwenkbewegung auf und verursachen zusätzliche Kräfte (vgl. Magnus und Müller, 1982, Kapitel 6, Kinetik).

Diese Kräfte sind unter dem Begriff ‚konservativ‘ – Energie erhaltend, nicht verbrauchend oder erzeugend – bekannt, da sie in der Wirkung auf das Gesamtsystem (Fahrer und Fahrzeug) Antriebsenergie neutral sind. Bei der Auswertung der Kräfte an der Kurbel sind diese konservativen „passiven“ Kräfte unbedingt von den durch die Muskeltätigkeit erzeugten „aktiven“ Kräften zu unterscheiden¹.

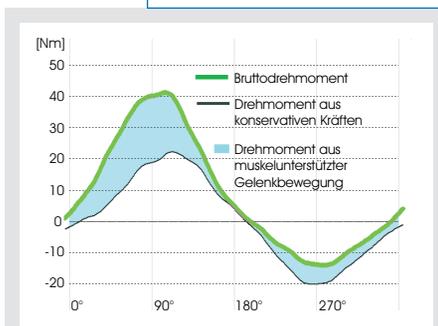
Konservative Kräfte ändern **nicht** die mechanische Energie eines Systems (vgl. Energiesatz der Mechanik $E_{pot} + E_{kin} = const$), konzentrische oder exzentrische Bewegungsleistungen an den Gelenken schon, dies ist deren Wirkung und Zweck.

Ein Teil des an der Kurbel wirkenden Drehmoments (dieses ist proportional zur Leistung) wird durch die Wirkung der konservativen Kräfte verursacht, ein Teil durch konzentrische und exzentrische Gelenkbewegungen. Abb. 1 zeigt

¹ Folgende Ausführung soll den Sachverhalt verdeutlichen. Das Gewicht eines Beines lastet auf dem Pedal. Bei der Bewegung der Kurbel nach oben übt dieses Bein eine Kraft gegen die Kurbelbewegung aus, und gegenwärtig die Kurbel eine Kraft in Richtung der Beinbewegung. Befindet sich das Bein nach einer halben Kurbeldrehung in der oberen Kurbelstellung, hat es etwa eine gegenüber der unteren Kurbelstellung um zwei mal die Kurbellänge erhöhte potentielle Energie. Diese potentielle Energie wurde durch die Kraft der Kurbel gegen das Bein und die gleichgerichtete Bewegung übertragen und wird in der anschließenden Abwärtsbewegung der Kurbel wieder an diese abgegeben. Dabei wirkt nun eine mit der Kurbelbewegung übereinstimmende Kraft auf die Kurbel und gegenwärtig eine gegen die Beinbewegung gerichtete Kraft auf das Bein. Über die gesamte Kurbelumdrehung gerechnet führt diese Kraft jedoch zu keiner Energieabgabe an das Fahrzeug. Bei der aus zwei um 180° gegenüber versetzten Armen bestehenden Tretkurbel neutralisieren sich die Kräfte und Schwankungen zusätzlich. Es kann also kein Vorteil daraus gezogen werden, mit einer bestimmten Kurbelstellung die Ziellinie zu erreichen! Die Befürchtung und Argumentation, diese Kräfte würden die Bewegung bremsen, ist unbegründet. Die Masse des Beines wirkt wie ein Energiespeicher, der periodisch durch Heben und Senken geladen und entladen wird. Dieser Vorgang entzieht oder liefert jedoch keine Leistung.

Kräfte verhalten sich additiv. Die Gesamtwirkung einer Reihe von Kräften entspricht der vektoriellen Addition der einzelnen Kräfte. Übt etwa das Bein in Folge des Gewichtes eine Kraft (hier vereinfachend angenommen nur nach unten und gleichbleibend) von 120 Newton (N) aus, würde eine zusätzliche Muskelkraft dazu führen, dass bei der Aufwärtsbewegung der Kurbel beispielsweise 40 N gemessen wird und bei der Abwärtsbewegung 250 N. Daraus ergibt sich für dieses Beispiel, dass die Muskeln eine Kraft von 80 N in der Auf- und 130 N in der Abwärtsbewegung erzeugen würden.

Abb. 1 Drehmoment



Bruttodrehmoment am Tretkurbelarm bei 80 Watt und 86 Umdrehungen/min.
Drehmoment aus konservativen Kräften über den Kurbelkreis in der Summe Null!
Drehmoment aus muskelunterstützter Gelenkbewegung nicht nach konzentrisch und exzentrisch unterschieden.

den Anteil exemplarisch bei 80 Watt/Bein und 86 Umdrehungen pro Minute.

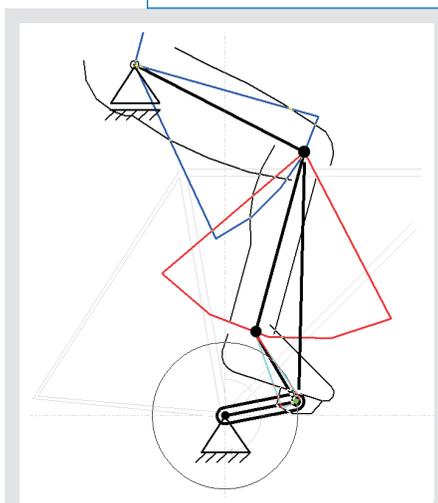
Autoren, die bereits das Phänomen der Tretkraft untersuchten, (vgl. Hillebrecht, Schwirtz, Stapelfeldt, Stockhausen und Bührle, 1998, Abb. 5; u. v. a.) kommen zu den gleichen Resultaten bei der Brutto-Drehmoment-Messung an der Kurbel.

4. Messprinzip für Muskelkraft

Wie kann die zwischen Fuß und Pedal wirkende und gemessene Summenkraft in der Praxis nach ursächlichen aktiven Muskel- und passiven konservativen Anteilen unterschieden und aufgeteilt werden?

Hierfür lässt sich der Umstand nutzen, dass die konservativen Kraftanteile zwar von den beteiligten Massen, von der Sitz- und Griffposition sowie der Drehzahl der Beine abhängen, aber nicht vom Widerstand der Kurbel, wenn sich

Abb. 2 Kurbel & Bein



Kurbel & Bein Ersatzschabild: technisch umlauffähiges Gelenkfünfleck, mit Wirkungslinie für versteiftes Sprunggelenk eindeutig bestimmtes umlauffähiges Gelenkviereck

Hüft- und Kniepositionen bei unterschiedlichen Belastungen näherungsweise nicht ändern.

Messreihen gehen typischerweise über mehrere Laststufen. Für die Auswertung bietet es sich an, auf die Differenz von Laststufen mit ansonsten gleichen äußeren Bedingungen zurückzugreifen. Dabei wiegen sich die jeweils gleich großen konservativen Kraftanteile gegeneinander auf und fallen weg. Das Ergebnis ist die induzierte Muskelkraft am Pedal, die für die Differenz der Leistungsstufen in Erscheinung tritt und ausschließlich auf die unterschiedlichen Muskelaktivitäten bei der Überwindung des Widerstandsmoments zurückzuführen ist.

Durch die Anwendung der „Differenzstufen“-Messmethode werden untereinander vergleichbare Werte geschaffen, die äußere Bedingungen, wie etwa unterschiedliche Muskelvorspannung unter verschiedenen Sitzpositionen, auf die Messapparatur ausgleichen.

Die Differenzstufen-Messmethode ist ein Kunstgriff für die Ermittlung der Leistung der Gelenkbewegung an Hüfte und Knie. Dabei wird der Anteil der konservativen Kräfte – der „leblosen“ Natur – vor der Ermittlung der Muskelleistungen herausgefiltert. Beim idealen technischen System verursachen, leisten oder kosten konservative Systemkräfte keinen Energiebeitrag; vergleiche Gewicht am Ende eines waagrecht ausgestreckten Arm, Kniebeuge ohne und mit zusätzlichem Gewicht. Neben der Berechnung der Netto-Leistung für die Bewegung der Gelenke ist zu untersuchen, welche Muskel-Momente notwendig sind, um zu den konservativen Kräften im System ein Gleichgewicht aufzubauen, und welche Energie dafür nötig ist. (Um zu beurteilen, ob konservative Kräfte im biologischen System Energiekosten verursachen, stelle man sich am besten den Körper mit erschlaffter Muskulatur vor!)

Wenn das Sprunggelenk in einer Lage erstarrt, so können wir uns nach Abb. 2 ein vereinfachtes, äquivalentes Ersatzmodell für das Bein denken. Es ist leicht zu erkennen, dass konservative Kräfte kein zusätzliches Moment auf Knie- und Hüftgelenk ausüben, wenn sich diese an Becken und Pedal über die eingezeichnete Hilfsgerade, die in ihrer Wirkung der Stabilisierung entspricht, zentral abstützen. Unter der Voraussetzung, dass das Sprunggelenk die an ihm angreifenden Lasten abstützt – gleiches gilt für das Becken – wird der Einfluss der konservativen Kräfte auf die Muskelspannungen an Hüfte und Knie zu Null.

5. Aufschlüsse über die Muskelleistung aus den dynamometrischen Daten, Kritik zum bisherigen Gebrauch

In der Vergangenheit wurde mehrfach untersucht, wie die Kraft zwischen Fuß und Kurbel auf die Bewegung der Tretkurbel zu beziehen sei; in der Hoffnung, auf diese Weise biomechanisch relevante Werte zu erhalten.

Als Beispiele unter vielen: Hillebrecht et al. (1998) teilen den Kurbelkreis in vier Sektoren: Schub-, Druck-, Zug- und Hub-Phase. Ückert

(2005) wählt eine Aufteilung in Aufwärts- und Abwärtsphase mit je 4 Abschnitten. Diese Vorgehensweise ist nicht zielführend, da die Kurbel als mechanisches Bauteil daran angreifende mechanische Energie eins zu eins weitergibt und der Kraft selbst keine biomechanische Eigenschaft innewohnt. Es besteht kein Zusammenhang zwischen Kurbelwinkel und Muskelkontraktion, der es ermöglichen würde, die Sitzposition und Fahrergeometrie außer Acht zu lassen. Es ist daher auch nicht zweckmäßig, dem Kurbelwinkel eine andere Bedeutung zuzuschreiben, als eben die Angabe des Winkels der Kurbelstellung.

Von wem ursprünglich der Vorschlag stammt, aus Umfangs- und Gesamtkraft zur Kurbelbewegung ein Zahlenverhältnis zu bilden, und wer dieser „Formel“ zuerst den leicht zu Missverständnissen führenden Namen „biomechanischer Wirkungsgrad“ gab, kann nachträglich nicht geklärt werden. Fest steht jedoch, dass diese Verhältniszahl keine physikalische (weil Bewegung des Kraftansatzpunktes nicht enthalten) oder physiologische (weil Bezug zu den beteiligten Muskeln fehlt) Aussagefähigkeit hat. Alle dazu angefertigten Forschungsarbeiten zeigen dies deutlich, etwa die schon erwähnte Arbeit von Hillebrecht et al. (1998). Die darin enthaltene Deutung der rechnerischen Ergebnisse der „Formel“ – bei einer ungünstigen Muskelkoordination würden Verlustkräfte auftreten und einen Energieverlust in der errechneten Höhe durch Lagerreibung und eine Dehnung oder Stauchung der Kurbel bewirken – führt sich selbst ad absurdum, als es dann keine ungünstige Muskelkoordination gäbe, sondern nur nicht leicht genug laufende Lager und nicht ausreichend stabile Fahrradkurbeln. Die Interpretation rechnerisch mit den Methoden der Elasto-Statik überschlägig nachgeprüft, ergibt, dass Energieverluste an typischen Trekkurbeln durch Verformung und Lagerreibung sehr gering sind (ca. 0,1% max.) und zudem weitgehend unabhängig von der Krafrichtung. Die von den Autoren ausgesprochene Einschätzung und Empfehlung „Die Radialkraft (...) verursacht lediglich eine Längung und Stauchung der Kurbel oder eine Reibung im Lager. Sie sollte demnach möglichst gering gehalten werden.“ zeigt das grundlegende Missverständnis. Die Funktion der Kurbel ist es ja gerade, alle anfallenden Kräfte durch ihre Führung auf die Kreisbahn aufzunehmen und abzustützen. Würde der Fahrer diese Kräfte sinnloserweise über das Bein abstützen, so würden hier extrem hohe und ungünstige Momente und über große Bewegungsanteile exzentrische Bedingungen an Hüfte und Kniegelenk nötig.

Warum sich eine zweifelhafte Hypothese und daraus abgeleitete Trainingsempfehlungen über Jahrzehnte halten können, wäre sicher ein Thema für eine interessante soziokulturelle Studie. Die Faszination, die zweifellos von der „Kraft“-Leitvorstellung ausgeht, auch wenn sie verkehrt ist, beruht auf der Einfachheit und Bedingungslosigkeit und präzisen Handlungsanweisung; ferner besteht die Möglichkeit, diesem Ideal ohne technische Hilfsmittel nachzuspüren und es ist auch nicht so nahe liegend – widerspricht der automatisch gewählten Handlungsweise, so dass es wohl ein gewisses Exklusivitätsgefühl der „Eingeweihten“ auslöst. Existiert kein Leitbild zu „guten und schlechten“ Kräften an der Kurbel, das übrigens ja auch keinerlei Klärung der biomechanischen Zusammenhänge mit sich bringt, müssen andere Maßstäbe gefunden werden.

wirkt die Kraft auf die Kurbel auch in umgekehrter Richtung auf das Bein. Diese Nettokraft kann – und muss! –, wenn biomechanische Fragestellungen der Energieerzeugung beantwortet werden sollen, eben auf das Bein und die Bewegungen von Becken, Hüfte, Knie- und Sprunggelenk hin ausgewertet werden.

Die biomechanisch relevanten Eigenschaften am Bein-Kurbelgetriebe, technisch „umlauffähiges Gelenkfünfeck“, zeigt Abb. 2.

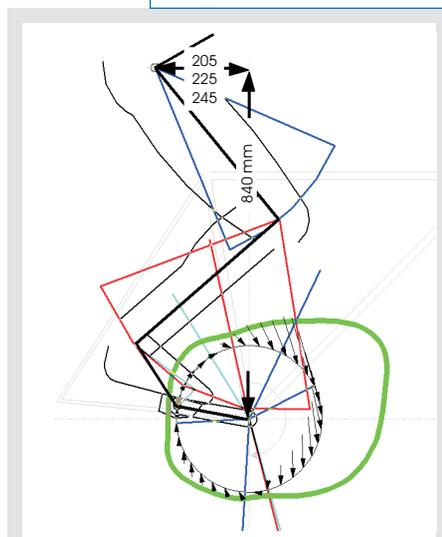
Die Gelenkpositionen werden zweckmäßig über ein Körpermodell des Fahrers ermittelt, das die geometrischen Verhältnisse: Position von Hüftgelenk zu Kurbelachse, Gliederlängen sowie Kurbel- und Fußstellung beschreibt. Die Eingangsdaten dazu werden in der Praxis optisch und manuell erfasst.

Fehler können einfließen, wenn die Abstände der Drehpunkte von Hüfte zu Kurbelachse, Hüfte zu Knie, Knie zu Sprunggelenk und diesem zur Pedalachse nicht genügend genau erfasst werden.

Neptune und Hull (1995) geben eine Abschätzung, wie genau die Hüftgelenkstellung mit unterschiedlichen Methoden ermittelt wird.

Wird für die obere Grenze der Abweichungen vom tatsächlichen Wert zwei Zentimeter angenommen und werden die Eingangswerte für das Körpermodell mit diesen Größen variiert, so zeigt sich, dass die Abweichung für die Leistungsanteile der Gelenkbewegungen bei etwa fünf (im Einzelfall bei zehn) Prozent absolut liegt. Abb. 3 zeigt dies exemplarisch.

Abb. 3 Ergebnisfeld



Y-Achse [mm]	840					
X-Achse [mm]	245	225	205			
Bewegungsform	k	e	k	e	k	e
Hüftstreckung (Watt)	96	0	90	0	85	0
Hüftbeugung (Watt)	10	-4	10	-4	9	-4
Kniestreckung (Watt)	61	-14	65	-12	70	-11
Kniebeugung (Watt)	31	-1	31	-1	31	-2
Fußstreckung (Watt)	9	0	9	0	9	0
Fußbeugung (Watt)	0	-9	0	-8	0	-8

e: exzentrisch; k: konzentrisch

(unten) Ergebnisfeld für Einfluss der Geometrie Erfassung (x-Achse) auf errechnete Leistungswerte konzentrischer und exzentrischer Bewegung an Hüfte, Knie und Sprunggelenk.

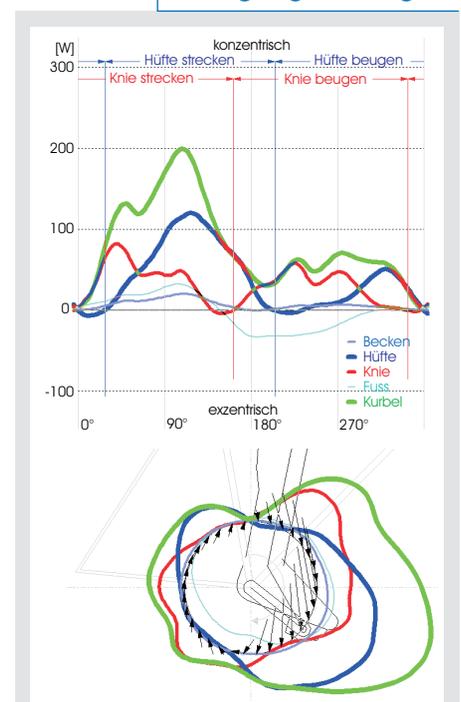
Ablesefehler in Richtung der Reaktionskräfte (hier in y-Achse) haben geometrisch bedingt einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Hebelarmbestimmung.

(oben) Vektoren der Muskelreaktionskraft und Leistung (positiver Betrag nach außen) an der Kurbel.

6. Wie lässt sich die Muskelleistung beschreiben?

Wird der Anteil der konservativen Kräfte – nach dem vorgezeigten Messprinzip für Muskelkraft – von der Pedalkraft abgezogen, so ist die Nettokraft der unteren Extremität auf die Kurbel die Folge der mit der Belastungsänderung geänderten Muskelmomente. Nach dem schon von Newton zitierten Gegenwirkungsprinzip

Abb. 4 Bewegungsleistungen



Bewegungsleistungen von Becken, Hüfte, Knie, Sprunggelenk bei 80 Watt durchschnittlicher Kurbelleistung (pro Bein). Am Kurbelkreis symbolisierte Muskelkraftvektoren (unten). Leistungen exzentrischer Bewegungen vom Kurbelkreis nach innen, konzentrischer nach außen angetragen

Wird aus dem Muskelkraftvektor und den Gelenkpositionen das ursprüngliche Gelenkmoment bei der Tretbewegung nach den Gleichgewichtsbedingungen ermittelt, so ergeben sich folgende Informationen: das wirksame Moment am Gelenk, die Anstiegs- und Abfall-Geschwindigkeit des Momentes.

Das Moment am Gelenk wird zweckmäßigerweise in Verbindung mit der Gelenkbewegung ausgewertet. Dadurch können folgende Informationen gewonnen werden: die Übereinstimmung des Momentes mit der Bewegung, ob es sich um einen konzentrischen oder exzentrischen oder isometrischen Bewegungsanteil handelt.

Durch Multiplikation von Winkelgeschwindigkeit und Moment ergibt sich die Leistung für die Gelenkbewegung.

Beachtenswert ist, dass die Summe der Leistungen für alle Gelenkbewegungen Null Watt beträgt. Vom Bewegungssystem Bein-Kurbel aus gesehen, ist eine abfließende Leistung – typischerweise über den Kettenstrang an der Kurbelachse – negativ. Weil mechanische Energie eine Erhaltungsgröße ist, wenn sie nicht durch Reibung oder Dämpfung in Wärmeenergie umgewandelt wird, ist dieses Ergebnis zu erwarten und eine gute Kontrollmöglichkeit für die durch separate Operationen ermittelten Werte.

Typische Leistungen der Bewegungen an Becken, Hüfte, Knie und Sprunggelenk sowie der Kurbelachse über den Kurbelwinkel angetragen zeigt Abb. 4 als illustrierendes Beispiel. Die ermittelten Leistungen der Beuge- und Streckbewegung von Hüfte und Knie stimmen übrigens qualitativ genau mit bereits von Ericson (1986) ermittelten Leistungen dieser Bewegungen überein.

Die dynamometrische Messmöglichkeit erstreckt sich auf den an einem Gelenk wirkenden Moment Nettowert aus der Summe aller daran angreifenden Muskelspannungen. Es mag als Beschränkung erscheinen, dynamometrisch die Spannung einer einzelnen Muskelgruppe nicht absolut ermitteln zu können. Überlagern sich die Spannungen von gegensätzlich arbeitenden Muskeln, heben diese sich in ihrer Moment-Wirkung teilweise auf.

Die intermuskuläre Koordination sorgt wohl dafür, dass eine unwillkürlich gleichzeitige Aktivierung von Strecker- und Beugermuskulatur bei der Bewegung nicht auftritt, wenn keine Neigung zu Krampfanfällen besteht.

Werden beim Tretkurbelantrieb willentlich gleichzeitig die ein Gelenk betreffenden Muskeln angespannt, kommt es zu signifikant unregelmäßigen und unangepassten Momenten²,

so dass eine solche Koordination sicher zu erkennen ist. Die Leistung der Gelenkbewegung zeigt die funktionelle Einheit der Muskelgruppen, wie diese am Gelenk wirksam ist.

7. Muskelleistung und Wirkungsgrad

Gebräuchlicher Weise werden Energie oder die Leistung betreffende Prozesse nach ihrem Wirkungsgrad bewertet. Dieser sagt aus, welcher Anteil der eingesetzten Energie, in diesem Fall für den Antrieb der Kurbel, zur Verfügung steht und wie viel den internen Prozessen der Umsetzung oder Weiterleitung zum Opfer fällt. Die dazugehörige Frage lautet: Wie viel kann mit (einem Minimum an) zur Verfügung stehender Energie erreicht werden?

Die in vielen Beiträgen, etwa auch in Hillebrecht et al. (1998) getroffene Unterscheidung von Kräften nach vortriebswirksam und nicht-vortriebswirksam bildet keine Grundlage, um den Wirkungsgrad zu untersuchen und zu bestimmen. Werden Kräfte betrachtet, muss immer die Frage gestellt werden, mit welchem Energieaufwand deren **Erzeugung** verbunden ist.

Wird die Wirkung von beliebigen Kräften auf die Leistung einer reibungsfreien Tretkurbel berechnet, so erhält man immer den Wert 1, gleich 100 Prozent. Es müssen dazu nicht nur die Kräfte, sondern auch die Geschwindigkeiten der entsprechenden Kraftansatzpunkte (vgl. Magnus & Müller, 1985, 1.4.1 Kraft und Drehmoment) ins Verhältnis gesetzt werden. Die Gesamtkraft (F) und die Geschwindigkeit (v) kann in die Anteile radial (F_r und v_r) und tangential (F_t und v_t) zur Kurbel zerlegt werden. Da die radiale Richtung der Geschwindigkeit des Kraftansatzpunktes, wegen der Konstanz der Kurbellänge mit guter Näherung den Wert Null hat, bleibt nur der tangential Anteil oberhalb und unterhalb der Bruchtrennungslinie stehen und kürzt sich heraus.

Wirkungsgrad der Kurbelbewegung an der Tretkurbel (K_b)

$$\eta_{kb} = \frac{F_t \cdot v_t}{F \cdot v} = \frac{F_t \cdot vt}{(F_t \cdot vt + F_r \cdot v_r)} = \frac{F_t \cdot v_t}{(F_t \cdot v_t + F_r \cdot 0)} = \frac{F_t \cdot v_t}{F_t \cdot v_t} = 1(100\%)$$

Dieser Wert deckt sich mit der Erfahrung aus der Praxis, dass sich eine Fahrradkurbel im Betrieb nicht erwärmt, hier folglich kein bemerkbarer Energieanteil verloren geht.

Der Wirkungsgrad der Leistung (P) des gesamten Beines zur Leistung der Bewegung der einzelnen Gelenke lässt sich folgendermaßen ausdrücken:

Wirkungsgrad der Beinbewegung (B_b)

$$\eta_{Bb} = \frac{P_{\text{Beinbewegung}}}{\sum P_{\text{Gelenkbewegung}}}$$

Die Leistung, die für die Bewegung des ganzen Beines aufgewendet werden muss, entspricht der Summe der Leistungen für die Bewegung von Becken (B), Hüfte (H), Knie (K) und Sprunggelenk (S)

$$\sum P_{\text{Gelenkbewegung}} = P_B + P_H + P_K + P_S$$

Die Leistung des Beines, die für die Bewegung und den Antrieb der Kurbel, aber auch für andere Aktivitäten wie bspw. das Laufen zur Verfügung steht, ist die Bewegungsleistung der Summe der Gelenke abzüglich der inneren Reibung (iR)³.

$$P_{Bb} = \sum P_{\text{Gelenkbewegung}} - P_{iR}$$

Wird der innere Reibungsanteil zu Null, so ergibt sich $P_{\text{Beinbewegung}} = \sum P_{\text{Gelenkbewegung}}$ und für den Wirkungsgrad der Bewegung des Beines 1 (= 100 Prozent). Auch dieses Ergebnis befindet sich mit den Erfahrungen mit technischen Getrieben im Einklang und ist daher zu erwarten.

Steht der Fuß, ohne zu rutschen, auf dem Pedal, ist die Geschwindigkeitskomponente (v_B) des Beines am Berührungspunkt zur Kurbel und deren Geschwindigkeit (v_K) gleich groß. Auch die Kraft (F_K) auf die Kurbel ist nach dem Gegenwirkungsprinzip gleich groß wie die Kraft auf das Bein (F_B) und es gilt: $P_{\text{Beinbewegung}} = v_B \cdot F_B = v_K \cdot F_K = P_{\text{Kurbelantrieb}}$

Es wird folglich die komplette zur Verfügung stehende Bewegungsenergie des Beines, unabhängig von der Größe und Richtung der Kraft, zwischen Bein und Kurbel übertragen.

Da an den Gelenken exzentrische und konzentrische Bewegungen auftreten können und diese

² Erfahrungsbereich des Verfassers

³ Ein Anhaltswert für die durchschnittliche innere Reibungsgröße je Bein ist nach Messungen eines einbeinig gelähmten Fahrers mit guter Beweglichkeit der Gelenke und vorhandener Restmuskulatur auf ca. 1 Newtonmeter (Nm) gegeben.

⁴ Elastische Verformungen rechnet man nicht unter die Eigenart der ex- und konzentrischen Bewegungen. Elastische Verformungen müssen vielmehr bei der Geometriebestimmung berücksichtigt werden. Sie sind zudem konservativ (energieerhaltend).



LEISTUNGSGRUNDLAGEN

Ein sportspielübergreifendes Trainingskonzept

Das Buch beleuchtet die Aspekte **Kraft, Schnelligkeit, Ausdauer, Beweglichkeit und Koordination im Sportspiel**, wobei umfangreiche und anschauliche **Übungsvorschläge** sogleich den Bezug zur Trainingspraxis herstellen. Ein weiteres Kapitel behandelt die **Besonderheiten des Kinder- und Jugendtrainings**. D. Steinhöfer: **Grundlagen des Athletiktrainings**. 384 Seiten, € 24,80

philippka
SPORTVERLAG

Bestellen Sie unter Telefon: 0251/23005-11, Telefax: 0251/23005-99, e-Mail: buchversand@philippka.de oder nutzen Sie den Bestellschein auf S. 56 Besuchen Sie auch unseren Shop unter www.philippka.de

grundsätzlich unterschiedliche Energie-Aufwand- zu Energie-Nutzen-Verhältnisse haben, ist es nötig, diese Phasen exzentrischer und konzentrischer Muskelleistungen separat zu bilanzieren.

Aufgrund der „Bauart“ des Muskels beim Menschen, im Gegensatz zu einem System mit Energiespeichermöglichkeit, ist es nicht möglich, exzentrische Muskelleistung zu „recyclen“ und für konzentrische Bewegungen zurück zu gewinnen⁴. Diese exzentrische Bewegung ist einerseits mechanisch dem System für den Vortrieb entzogen, andererseits verursacht diese Bewegung zusätzliche physiologische Kosten. Zum dritten fehlen Zeiten exzentrischer Bewegung für nützliche konzentrische Bewegung.

Daraus ist bereits ersichtlich, dass das in Größenordnungen bedeutendste Kriterium der Muskelmechanik beim Radfahren darin besteht, exzentrische Bedingungen zu vermeiden oder zu minimieren.

Der Wirkungsgrad zwischen der Leistung der Bewegung des Gelenkes und der aufgewendeten Muskelleistung lässt sich treffend als Wirkungsgrad der Leistung der Gelenkbewegung bezeichnen, denn er beschreibt die Umsetzung der mechanischen Muskelenergie in Bezug auf die Leistung bei der Gelenkbewegung.

Wirkungsgrad der Leistung der Gelenkbewegung (Gb) zur physiologisch aufgewendeten Muskelleistung

$$\eta_{Gb} = \frac{P_k + P_e}{P_k + |P_e| * f_{bio}} = \frac{P_{Gelenkbewegung}}{P_{Muskelleistung}}$$

P_k : Leistung konzentrischer Bewegung (> 0)

P_e : Leistung exzentrischer Bewegung (< 0)

$P_{Gelenkbewegung} = P_k + P_e$: Gesamte, über den Bewegungsapparat mit einem oder mehreren Gelenken, mit der Außenwelt ausgetauschte Leistung. Diese ergibt sich aus der einfachen Summierung der Leistungen konzentrischer und exzentrischer Bewegung.

Nach Begriffsdefinition ist die abgegebene Leistung konzentrischer Bewegung stets größer Null und die aufgenommene Leistung exzentrische Bewegung stets kleiner Null.

$P_{Muskelleistung} = P_k + |P_e| * f_{bio}$: Mechanischer, muskulärer Leistungsaufwand entspricht der Addition der Beträge, wobei der exzentrische Anteil noch um einen Verhältnisfaktor gewichtet wird.

Der Faktor f_{bio} gibt die spezifischen physiologischen Kosten exzentrischer Bewegung im Verhältnis zur konzentrischen Bewegung an. Es ist anzunehmen, dass dieser Faktor im Bereich zwischen 0 und 1 liegt. Dieser beträgt

- 0, wenn für exzentrische Bewegungen physiologisch keine Energiekosten anfallen;
- 1, wenn die gleichen physiologischen Kosten wie für die konzentrische Bewegung anfallen.

Der Faktor f_{bio} wird vom Verfasser vorläufig auf einen Wert zwischen 0,3 und 0,5 geschätzt. Dieser spiegelt individuelle Unterschiede und Gegebenheiten wider, wie die Beteiligung zweigelenkig wirkender Muskeln an der Bewegung, und ist **keine** Konstante. Die Kenntnis des exakten Zahlenwerts ist für die Praxisanwendung insofern nicht erforderlich, als eine vergleichende Beurteilung des Anteils konzentrischer Bewegung auch so möglich ist; bei 100 Prozent konzentrischer Bewegung entfällt der Einfluss des Faktors ganz.

Rasmussen, Damsgaard und Christensen (2001) gehen bei einer Berechnung zur Muskelspannungsenergiespeicherung bei der Treibbewegung von einem Wert für f_{bio} von ca. 0,8 aus.

Zweckmäßig ist es, den Gelenkbewegungs-Wirkungsgrad auf die Gelenkbewegungsabschnitte Streckung oder Beugung oder die Summe der Bewegungsanteile aller beteiligter Gelenke zu bilanzieren und anzugeben. Die Berechnung erfolgt immer nach diesem Schema. Für die Leistung (P) wird jeweils der Mittelwert des Betrages für den betrachteten Bewegungsabschnitt eingesetzt. Um Schwankungen in der Muskelaktivität und zufällige Fehler zu glätten, kann es zweckmäßig sein, vor oder nach der Berechnung die Ergebnisse einer Anzahl Zyklen zu einem Mittelwert zusammenzufassen.

«Der Mensch wächst am Widerstand»

Werner Kieser



2006. 236 S., 53 Abb., 18 Tab., 4f, Gb € 49.95 / CHF 79.00 (ISBN 3-456-84229-5)

Werner Kieser (Hrsg.)

Krafttraining in Prävention und Therapie

Grundlagen – Indikationen – Anwendungen

Nicht nur Orthopäden, auch Allgemeinmediziner sind täglich mit Beschwerden und Schäden am Bewegungsapparat konfrontiert. Mittlerweile wissen wir, dass die wirksamste präventive und therapeutische Maßnahme nicht Schonung, sondern kontrollierter Muskelaufbau ist.

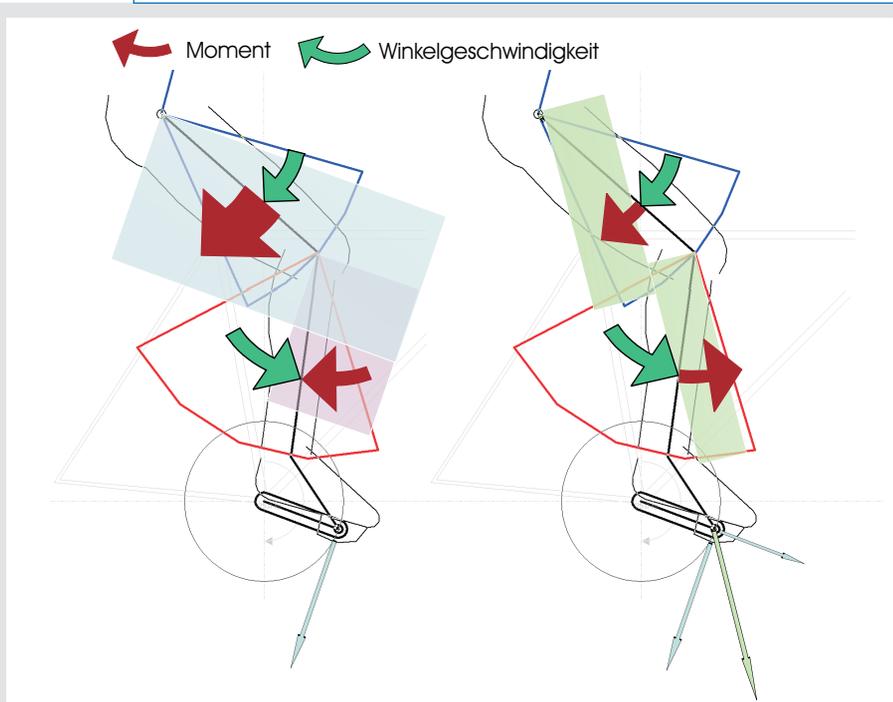
Dieses Fachbuch für Ärzte und andere Gesundheitsberufe gibt eine umfassende Antwort auf Fragen nach Nutzen, Indikation und konkreter Durchführung eines präventiven, therapeutischen und rehabilitativen Krafttrainings.

«Der Mensch wächst am Widerstand – solange wir die Möglichkeiten des Krafttrainings verkennen, entgeht uns Lebensqualität.» Werner Kieser

www.verlag-hanshuber.com

HUBER

Abb. 5 Leistungsbedarf



Leistungsbedarf für (links) Muskelaktion ausgerichtet nach Kurbelbewegung (tangentiale Tretkraft), (rechts) nach Körperbewegung, identische Kurbelleistung bei identischer tangentialer Komponente der resultierenden Muskelkraft, Flächen symbolisieren relatives Drehmoment an Hüfte und Knie mit Vorzeichen. (Unter Berücksichtigung der Vorzeichen) Summe der Flächen rechts und links gleich (!)

Die Zuordnung exzentrisch oder konzentrisch ergibt sich aus dem negativen oder positiven Vorzeichen der Leistung. Der Wirkungsgrad der Leistung der Gelenkbewegung gibt Auskunft darüber, wie die funktionelle Einheit der am Gelenk wirksamen Muskelgruppen mit der vorliegenden Gelenkbewegung zusammenarbeitet, diese unterstützt oder abbremsen. (Bei der Tretbewegung ist ein Abbremsen typischerweise nicht gewollt.)

Die Zuordnung exzentrisch oder konzentrisch ergibt sich aus dem negativen oder positiven Vorzeichen der Leistung. Der Wirkungsgrad der Leistung der Gelenkbewegung gibt Auskunft darüber, wie die funktionelle Einheit der am Gelenk wirksamen Muskelgruppen mit der vorliegenden Gelenkbewegung zusammenarbeitet, diese unterstützt oder abbremsen. (Bei der Tretbewegung ist ein Abbremsen typischerweise nicht gewollt.)

Der Gelenkbewegungs-Wirkungsgrad drückt die Gleichgerichtetheit zwischen Netto-Moment und Gelenkbewegung aus und gibt dem Sportler einen Zahlenwert an die Hand, der die von ihm während der Bewegungsausführung beeinflussbaren Muskelaktionen widerspiegelt. Dabei entspricht ein Wert von 1 (100%) dem Fall, dass alle Energie dem Antrieb dient und keine exzentrischen Muskelleistungen während der Bewegung auftreten. Bei einem Anteil von 90 % konzentrischer und 10% exzentrischer Leistung und einem physiologischen Kostenfaktor dafür von $f_{bio} = 0,5$, errechnet sich ein Gelenkbewegungs-Wirkungsgrad von 84%.

Der Wirkungsgrad der Fahrzeugantriebsbewegung (η_{Fb}) folgt aus der Multiplikation der Einzel-Wirkungsgrade, wobei η_{Kb} und η_{Bb} typischerweise sehr nahe 1 liegen.

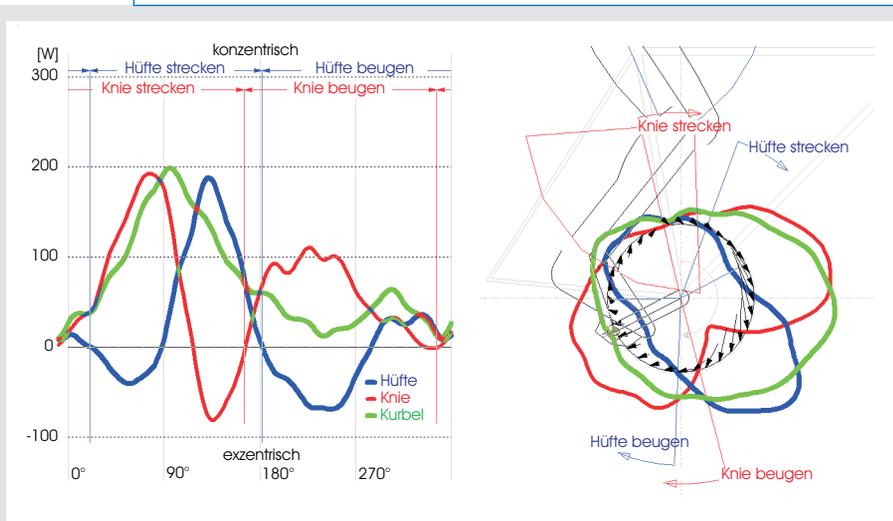
$$\eta_{Fb} = \eta_{Kb} * \eta_{Bb} * \eta_{Gb}$$

8. Wie kommt es zu exzentrischen, energieverbrauchenden Muskelleistungen bei der Tretbewegung

Es gibt Tätigkeiten, bei denen eine bestimmte Bewegung ausgeführt wird und dabei gleichzeitig eine festgelegte Kraft überwunden werden muss. Wird beispielsweise einarmig ein Stab in einer Flüssigkeit auf einer senkrecht zu seiner Achse liegenden Kreisbahn bewegt, muss die Muskulatur so arbeiten, dass sowohl die Kreisbahn beschrieben als auch immer der sich tangential zur Kreisbahn einstellende, gegen die Bewegung gerichtete Widerstand überwunden wird. Es ist wohl für jeden möglich, eine solche Bewegung auszuführen, obgleich dies eine komplexe Koordination konzentrischer und exzentrischer Leistungen an den Gelenken erfordert.

Bei der Tretkurbelbewegung ist es im Gegensatz dazu **nicht** nötig, die Kraft zwischen Fuß und Kurbel dieser Bewegung genau gleichzurichten, denn es liegen äußere Bedingungen vor, welche diese Bewegung zwar eingrenzen, aber gleichzeitig die Energieabgabemöglichkeit stark verbessern. Es besteht hierbei nicht die Notwendigkeit, den Fuß durch die Arbeit der Muskulatur auf der Kurbelbahn zu führen. Die Bewegung ist vielmehr durch die Führung der Kurbel, ggf. die Fixierung der Füße (bedingt auch durch Beingewichtskraft und Reibung zwischen Schuh und Pedal) und die Abstützung des Beckens, sowie die Fußstellung „vorprogrammiert“. Die Muskulatur ist frei, nach den sich bietenden, besten Energieabgabemöglichkeiten (Verkürzung der Muskelfasern) Spannung aufzubauen und Energie abzugeben. Die gespürte Kraft zwischen Fuß und Kurbel ist für diese Muskelsteuerung eine ungeeignete Größe, da diese, besonders wegen der zusätzlichen konservativen Kraft in Richtung und Betrag nicht eindeutig erfasst und der Muskelarbeit zugeordnet werden kann.

Abb. 6 Verlustreiche Trettechnik



Verlustreiche Trettechnik als Folge von Muskelaktionen nach (tangentialer) Kraftrichtung zur Kurbelbewegung orientiert, Moment an Hüfte zur Stabilisierung der Kraft über ca. halben Bewegungsbereich gegen die Bewegung gerichtet, bei etwa halber Kniestreckung bereits Beugemoment ebenfalls gegen die Bewegung, Wirkungsgrad der Gelenkbewegungen ca. 60 Prozent. Kurve unter Null-Linie entspricht Größe der exzentrischen, oberhalb der konzentrischen Muskelaktion, (vgl. Abb. 4 Gelenkbewegung an Becken, Hüfte und Knie beinahe hundert Prozent konzentrisch, gleiche Leistungsabgabe bei um 30 Prozent niedrigeren Leistungsspitzen)

Beispiel für exzentrische, energie-verbrauchende Muskelleistung:

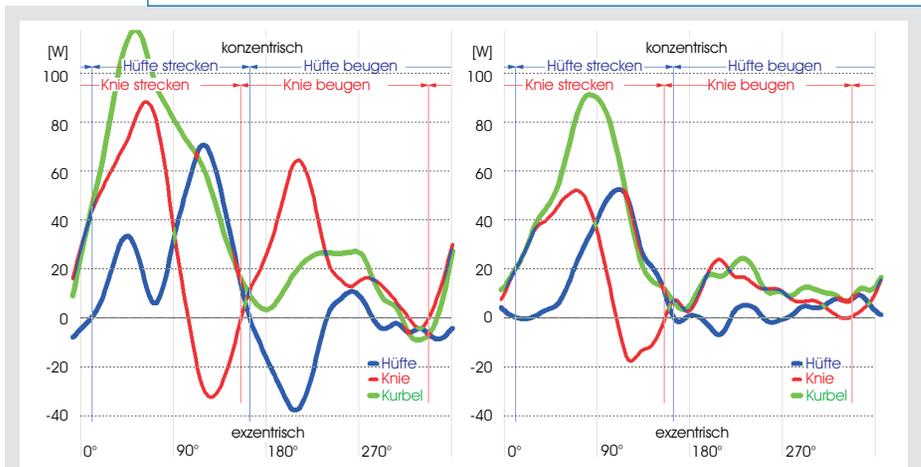
Unter der 16 Uhr Kurbelstellung bewegt sich die Kurbel nach hinten. Die Streckphase der Kniegelenkbewegung ist jedoch noch nicht abgeschlossen. Wird die Kraft nach der Bewegung der Kurbel ausgerichtet und nach hinten gezogen, so muss auch am Kniegelenk ein Moment nach hinten in Richtung Beugung wirken. Da die Streckbewegung des Kniegelenks gegen das wirkende Moment ausgeführt wird, geht Energie verloren (Muskelleistung exzentrisch). Anstatt eines Energieverlusts wird Energie abgegeben und das Kniegelenk weniger belastet, wenn die Muskelspannung mit der Streckbewegung in gleicher Richtung wirkt. Die Kraft (konservativer Kraftanteil ausgelassen) stellt sich wie in Abb. 5 (Muskelaktion ausgerichtet nach Körperbewegung) ein: Der Betrag ist zwar größer, überträgt die gleiche Energiemenge, „verursacht“ und benötigt jedoch wesentlich weniger Leistung in der Muskulatur.

Nach Beobachtungen bei Messungen zu verschiedenen Gelegenheiten mit Personen unterschiedlicher Fahrpraxis und Leistungsfähigkeit liegt der Anteil unter exzentrischer Bedingung ausgeführter Gelenkbewegungen beim Radfahren typischerweise zwischen 35 und 0 Prozent. Dieser Anteil schwankt mit der „Tagesform“. Vorbereitungen wie Warmfahren und Muskeldehnung, aber auch Ermüdungseffekte in der neuronalen Ansteuerung scheinen Einfluss auf ihn zu haben. Das Mitarbeiten und Unterstützen der Bewegung durch die Muskulatur geschieht sowohl bewusst als auch autonom und unbewusst und unterliegt der gegebenenfalls vorhandenen Zielvorstellung bei der Aktion. Es erscheint grotesk, dass gerade die oft publizierten Vorstellungen einer tangentialen als auch gleichmäßigen Kraft an der Kurbel zu einer drastischen Erhöhung exzentrischer Anteile und damit erheblichen Verringerung der für die Abgabe zur Verfügung stehenden Leistung führt. Als Beispiel sind in Abb. 6 Leistungsdiagramme der Gelenkbewegungen eines Fahrers gezeigt, der diese (falsche) Zielvorstellung über einen längeren Zeitraum verinnerlicht hatte. Das Bemühen, die Kraft der Kurbelbewegung anzugleichen, führt hier zu etwa einem Drittel exzentrischer Leistungsanteile. Die Effektivität der Tretbewegung ist entsprechend gering.

In einigen Forschungsarbeiten, als Beispiel sei hier Pawlik (1994) genannt, wurde untersucht, nach welchen äußeren geometrischen Randbedingungen eine Erhöhung der Leistungsabgabe zu erwarten ist. Ob eine Bewegung aber tatsächlich mit 85 oder 98 Prozent konzentrischer Muskelleistung ausgeführt wird, blieb (bisher) unberücksichtigt oder dem „Gefühl“ des Fahrers überlassen.

Der Anteil exzentrischer Bewegungsphasen kann sich bei Änderungen der Sitzposition und anderer geometrischer Verhältnisse, wie etwa

Abb. 7 Leistung nach Knieverletzung

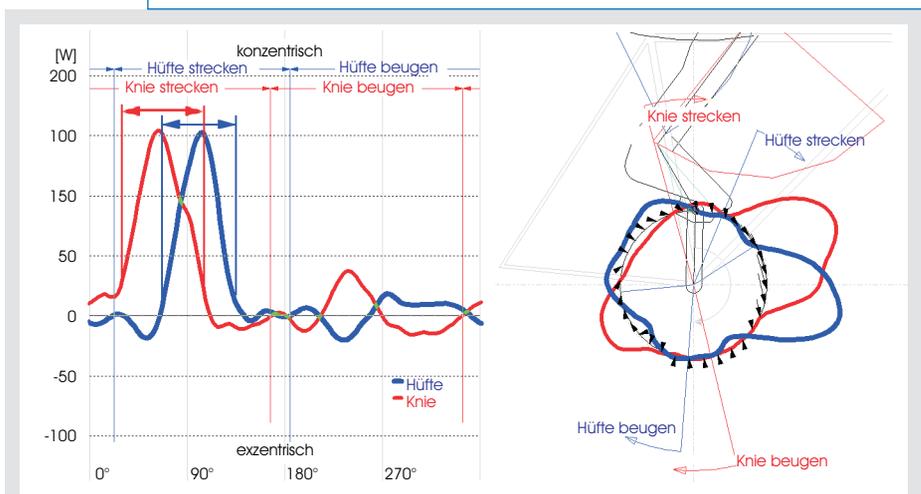


Leistung nach Knieverletzung und Rehabilitation mit stark erhöhter Leistungsspitze und Gegenhalten (exzentrische Bewegung am Hüftgelenk) in der Nähe des „Schmerzpunktes“ (links), gesundes Bein (rechts)

der Kurbellänge, (geringfügig) ändern. Es ist jedoch nicht zweckmäßig die Einstellung der Sitzposition nach der besten Übereinstimmung der Nettomomente mit der Bewegung vorzunehmen. Die Sitzposition muss anhand der gegebenen geometrischen Größen gewählt werden. Mit den geometrischen Daten der Bewegung wird der Rahmen für die Leistungsabgabe der Muskulatur gesteckt. Wie dieser Rahmen tatsächlich, evtl. nach einer gewissen Gewöhnungszeit, vom individuellen Muskelspannungsmuster genutzt wird, ist dann Aussage des hier gezeigten Wirkungsgrades. Ingen Schenau, Dorssers, Welter, Beelen, Groot und Jacobs (1995) brachten eine Variante in die Diskussion ein, wie exzentrische Energie zwischen benachbarten Gelenken über zweigelenkig angelegte Muskeln, die isometrisch als Sehne arbeiten, übertragen werden könnte, ohne die spezifischen Energiekosten

der exzentrischen Bewegung zu verursachen. Hierbei muss jedoch bedacht werden, dass die Energieabgabe der Summe der Leistung der konzentrischen Gelenkbewegungen ($P_{konzentrisch}$) abzüglich des Betrages der exzentrischen Gelenkbewegungen ($abs(P_{exzentrisch})$) entspricht. Durch den Vorgang der Übertragung wird an sich keine Energie, die für den Vortrieb abgegeben werden kann, hinzu gewonnen. Es fallen aber ohne entscheidende Vorteile für den Tretkurbelantrieb die Kosten für die isometrische Arbeit des Muskels (als Sehne) an. Exzentrische Bewegungsanteile werden auch notwendig, falls der in den Beingliedern enthaltene und durch die Tretfrequenz bestimmte kinetische Energiebetrag größer als der Kurbelwiderstand ist. Diese kinetische Energie muss vor jeder Schwenkbewegungsumkehr (Winkelgeschwindigkeit des Gelenks = Null!) verbraucht werden. Bei einem 1,80 m großen und

Abb. 8 Leistungsschwäche



Leistungsschwäche zeigt sich hier durch verkürzte Phase der Leistungsabgabe bei der Bewegung von Hüfte und Knie, mit überproportional hoher Leistungsspitze, keine auffälligen exzentrischen Bewegungsanteile

75 kg schweren Fahrer beträgt dieser Betrag überschlägig berechnet etwa 60 Watt bei 90 U/min. Kann die Kurbel diese Energie nicht aufnehmen, läuft sie dem Fuß davon; man denke an ein Tretkurbelgerät ohne Widerstand: schnelles Treten ist hier überraschend anstrengend und unangenehm, weil Muskeln durch exzentrische Bewegungen das Bein jeweils selbst abbremsen müssen.

Die Untersuchung von Ückert (2004; Abb. 3) zeigt, dass Maximalfrequenzen bei Widerständen im Bereich der Energieabgabe der kinetischen Energie der Beine liegen. Es deutet alles darauf hin, dass die exzentrischen Bewegungsanteile bei kleineren Kurbelwiderständen die Möglichkeit zur Erhöhung der Trittfrequenz verschlechtern. Die Autorin beschreibt den Effekt so, dass „...für das Erreichen der absoluten Maximalfrequenz ein Mindestmaß an Widerstand notwendig ist“. Zur Vermeidung exzentrischer Phasen bei hoher Tretfrequenz und geringem Kurbelwiderstand dient eine starre Schwungmasseverbindung. Diese ist bei Spinning-Bikes oder beim Frühjahrstraining mit starrem Ritzel am Fahrrad gegeben und wohl deshalb in diesen Fällen so beliebt.

9. Welchen Nutzen hat die Kenntnis einzelner Gelenkleistungen?

Die folgenden Beispiele⁵ sollen einen Einblick geben, wie sich Leistungsschwächen in den ermittelten Leistungen der Gelenkbewegungen ausdrücken. Nach Beobachtungen ist der Anteil der Energieabgabe einzelner Gelenkbewegungen einer gewissen Variation, etwa mit dem Ermüdungszustand, unterworfen. So kann es sein, dass die Beugermuskulatur einen höheren Anteil leistet, wenn die Streckermuskulatur nach einem Sprint „leer“ ist.

Ein besonderes Kriterium der Theorie ist es jedoch, Schäden, die sich durch dauerhafte Leistungsunterschiede manifestieren, aufzu-

⁵ aus dem Erfahrungsbereich des Verfassers

decken und Heilungsmöglichkeiten zu verbessern. Sechs Monate nach einem Eingriff am Kniegelenk (nach einem Unfall) und durchgeführter Reha-Behandlung ist zu sehen, dass die Bewegung in der Nähe des „Schmerzpunktes“ immer noch gehalten wird und die Leistungsspitze höher ist, als beim nicht vom Unfall betroffenen Bein (Abb. 7). Halten zeigt sich durch die Erhöhung des Anteils exzentrischer Bewegung und damit Verringerung des Wirkungsgrades der Muskelleistung.

Abb. 8 zeigt die Leistung an Hüft- und Kniegelenk einer Fahrerin mit einem akuten entzündlichen Prozess. Die konzentrische Leistungsabgabe bei der Bewegung von Hüft- und Kniestreckung ist verkürzt und der Maximalwert vergleichsweise hoch. Die Leistungsschwäche zeigt sich hier in der Verkürzung der Phasen positiver Leistungsabgabe, es treten aber nicht „ersatzweise“ exzentrische Phasen auf, die einen Energieverlust bedeuten würden.

Ein entscheidender Vorteil, die Leistungen der Gelenkbewegungen Knie und Hüfte zu erfassen, ist: Sie sind unabhängig von Körpergröße, Kurbellänge, Sitzposition und anderen körper- und radspezifischen Größen direkt in ihrer Qualität vergleichbar.

10. Abschließende Betrachtung zur Muskelleistung

Worauf sollte als Resultat zu den hier vorgestellten Überlegungen zur Tretbewegung geachtet werden? Die (gespürte) Kraft zwischen Bein und Kurbel stellt sich als **automatische** Reaktion ein, insbesondere auch auf die Muskelleistung, welche die Bewegung optimal unterstützt und zum besten Wirkungsgrad führt. Daraus leitet sich als wichtigste Folgerung für die Ausführung der Tretbewegung ab, dass sich die Muskelleistung als Übereinstimmung von Nettomoment der Muskeln und der Gelenkbewegung verbessert, wenn nicht versucht wird, die Kraft auf die Kurbel willentlich zu beeinflussen. Die gespürte Größe Kraft ist ungeeignet, die Muskelleistung bei der Bewegung zu steuern, da die unbekannte konservative Kraft ebenfalls gespürt wird.

Vom Verfasser wird vorgeschlagen, die Muskelleistung direkt an der zugehörigen Gelenkbewegung zu orientieren. Die Muskelleistung auf diese auszurichten, gelingt nach Meinung des Verfassers am besten, wenn bei größtmöglicher Entspannung – hier hilft auch ein starres Ritzel – beim Fahren auf die (Schwenk-)Bewegung von Hüfte und Knie geachtet und die (Kreis-)Bewegung der außerhalb des Körpers befindlichen Kurbel außer acht gelassen wird.

Die mechanische Energie, die Muskeln während einer Bewegung abgeben können, hängt von ihrer Kraft (Spannung und Querschnitt) und dem Verkürzungsweg ab. Unter der Prämisse, dass Kraft oder Trainierbarkeit der eingelenkigen und der zweigelenkigen Muskeln etwa gleich sind, sollte im Hinblick auf den Nutzen für die Energieabgabe den eingelenkig arbeitenden Muskelgruppen eindeutig der Vorrang gegeben werden, da diese bei der Tretbewegung eine wesentlich größere Längenände-

rung erfahren, als die zweigelenkigen. Wird die Aufmerksamkeit auf die Bewegung von Hüfte und Knie gerichtet, werden vermutlich auch die daran ansetzenden eingelenkigen Muskeln stärker aktiviert und eingesetzt.

Die Hypothese, dass sich der biomechanische Wirkungsgrad an der Kraft zur Kurbel orientiert, hat sich als nicht stichhaltig erwiesen. Der bewusst beeinflussbare Wirkungsgrad der Tretleistung lässt sich vielmehr durch die Muskelleistung – als Übereinstimmung von Nettomoment und Gelenkbewegung, das bekannte Phänomen der konzentrischen und exzentrischen Bewegung – beschreiben.

Die für den Vortrieb zur Verfügung stehende Leistung, ist die Summe der Leistungen der Bewegung von Becken, Hüfte, Knie und Sprunggelenk. Die Ursache von „Kraftverschwendung“ sind negative Bewegungsleistungen – Nettomomente, die nicht phasengleich mit der Bewegung (exzentrisch) sind. Die Größe der Nettomomente ist „frei wählbar“, darunter auch das jeweilige Optimum für den aktuellen Fahrzustand. Die Kraft zwischen Bein und Kurbel zur Umlenkung, Abstützung und Energieübertragung stellt sich den Bedingungen entsprechend automatisch ein und sollte nicht aktiv beeinflusst oder als Steuerparameter verwendet werden.

*

Literatur

- Ericson, M. (1986) On the biomechanics of cycling. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine, Jahrgang?.. Ausgabe?, Seite?*.
- Hammer, A. & Hammer, K. (1978) *Taschenbuch der Physik für Schüler und Studierende*. 5. Auflage. München. Lindauer Verlag.
- Hillebrecht, M., Schwirtz, A., Stapelfeldt, B., Stockhausen, W. & Bührle, M. (1998) Trittechnik im Radsport. Der „runde Tritt“ – Mythos oder Realität? *Leistungssport*, 28 (4) 58-62.
- Ingen Schenau, G.J. van, Dorssers, W.M., Welter, T.G., Beelen, A., Groot, G. de & Jacobs, R. (1995) The control of monoarticular muscles in multijoint leg extensions in man. *J. Physiology*, 484, 1, 247-254.
- Magnus, K., Müller, H.H. (1982) *Grundlagen der Technischen Mechanik*. Teubner Studienbücher Mechanik. Stuttgart: Verlag?.
- Neptune, R. R. & Hull, M. L. (1995) Accuracy Assessment of Methods For Determining Hip Movement In Seated Cycling. *J. Biomechanics*, 28, (4), 423-437.
- Pawlik, R. (1994) *Biomechanik des Radfahrens*. Wien. 1994.
- Rasmussen, J., Damsgaard, M. & Christensen, S.T. (2001). *Simulation of tendon energy storage in pedaling. MEDICON 2001, IX Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing*. Pula, Croatia, June 12-15, 2001.
- Ückert, S. (2005) Zur Tretkurbelbewegung im Radsport. Die intrazyklische Dynamik in Abhängigkeit von Frequenz und Widerstand – oder Qualitätskriterien für hohe Maximalfrequenzen. *Leistungssport*, 35 (3), 39-46.

*

Der Autor

Wolfgang PETZKE ist Diplomingenieur für Maschinenbau (TU München).
 Anschrift: Donnersbergerstr. 10, D-80634 München
 E-Mail: info@caloped.de

Leistungssport

Mehrwert im Internet

Ob es sich um vertiefende Informationen oder ausführliche Literaturangaben zu Beiträgen aus „Leistungssport“ handelt, unter www.leistungssport.net finden Sie, was Sie suchen. Einfach auf die abgebildete Titelseite klicken und es öffnet sich ein Untermenü, von dem Sie weiter zur aktuellen Ausgabe oder zum Archiv (ab Ausgabe 1/2002) gelangen.

Hier sind dann – den Beiträgen aus der jeweiligen Printausgabe zugeordnet – Zusatzinformationen in Form von PDF-Dateien hinterlegt und stehen zum kostenlosen Download bereit.

Ein echter Mehrwert für den interessierten Leser.

Ihre Redaktion