

Klaus Wiemann:

120752

Die Muskelaktivität beim Laufen

1. Vorbemerkungen

Betrachtet man Kinematogramme von Laufbewegungen, so fällt auf, daß sich während der Stützphase der Kniewinkel des Standbeines nur unwesentlich verkleinert und vergrößert, der Hüftwinkel (Rumpf-Oberschenkelwinkel) sich aber entscheidend vergrößert (Abb. 1). Dies wird noch deutlicher, wenn die Bewegung des Standbeines auf den Rumpf als Bezugssystem projiziert wird (Abb. 2). Hier läßt sich erkennen, daß die Hüftstreckbewegung schon deutlich vor dem ersten Bodenkontakt beginnt und nach dem Verlassen des Bodens noch anhält, so daß die Phase des Bodenkontaktes (= Stützphase) einen erstaunlich kleinen Ausschnitt in der Gesamtamplitude der Beinbewegung darstellt.

Die Winkeländerung im Kniegelenk zeigt während der Stützphase zuerst eine geringe Winkelverkleinerung, die – je nach Lauftechnik und -geschwindigkeit – schon vor dem ersten Bodenkontakt beginnen kann. Beim Übergang vom Vorderstütz zum Hinterstütz beginnt der Kniewinkel sich wieder geringfügig zu vergrößern (Veränderung des Kniewinkels während der Stützphase s. WASER).

Die Kniewinkeländerung während der Stützphase wird drei Funktionen dienen, von denen die beiden erstgenannten funktional gekoppelt sind:

1. Das von der vorausgehenden Flugphase fallende Körpergewicht muß abgebremst werden. Dieser Bremskraftstoß kann die Anfangskraft für den gegen Ende der Stützphase erfolgenden Beschleunigungskraftstoß vergrößern.
2. Die Kniebeugung vergrößert den Beschleunigungsweg für den Beschleunigungskraftstoß.
3. Die Kniebeugung während der Stützphase garantiert, daß sich der Schwerpunkt möglichst geradlinig in der Horizontalen nach vorn bewegen kann. Würde sich der Kniewinkel während der Stützphase nicht verändern, müßte der Schwerpunkt während der Stützphase eine zweite aufwärts gerichtete Wellenbewegung durchführen (Abb. 3, s. jedoch unten).

WASER (1985) zeigt nun auf, daß zur Erzeugung der Vorwärtsgeschwindigkeit beim Lauf die Streckbewegung des Knies von untergeordneter Bedeutung ist, so daß die genannten Funktionen Nr. 1 und 2 an Gewicht verlieren. Unbestritten ist jedoch die Notwendigkeit der Kniewinkelverkleinerung und -streckung während der Stützphase zur Erfüllung der drittgenannten Funktion: denn wenn man (wie WASER) annimmt, daß die Horizontalbeschleunigung in erster Linie durch die Hüftstreckbewegung erfolgt (was offensichtlich richtig ist), muß man jedoch auch einen opti-

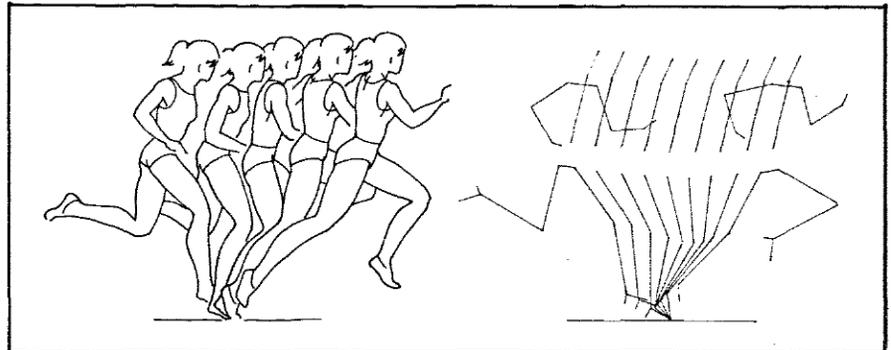


Abb. 1: Umriß- und Gliederachsenkinematogramm eines Laufschrilles

malen Beschleunigungsweg für diesen Beschleunigungskraftstoß fordern. Dieser wäre bei fehlender Winkeländerung im Kniegelenk extrem kurz (s. Abb. 4). Allerdings kann der horizontale Beschleunigungsweg durch Aktionen (Plantarflexion) im Sprunggelenk entscheidend verlängert werden, wie Abb. 5 a verdeutlicht, in der die gleichen Kniewinkeländerungen zugrunde gelegt sind, wie in Abb. 4 b. Das optimale Maß für die Kniewinkeländerung wird sich sicher nur über empirische Reihenuntersuchungen bestimmen lassen.

2. Muskelmechanik der Laufbewegung

Ziel der Laufbewegung ist die Erzeugung einer großen Horizontalgeschwindigkeit bei optimaler Kompensation der Schwerkraftwirkung. Die Horizontalgeschwindigkeit wird während der Stützphase erzeugt und aufrechterhalten, und zwar durch folgende Aktionen des Stützbeines (andere Körperaktionen sollen hier unberücksichtigt bleiben, was keine Abwertung ihrer funktionellen Bedeutung darstellen soll):

1. „Streckung“ (Plantarflexion) im oberen Sprunggelenk

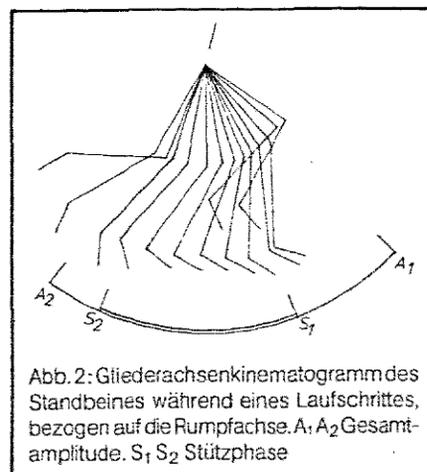


Abb. 2: Gliederachsenkinematogramm des Standbeines während eines Laufschrilles, bezogen auf die Rumpfachse. A₁ A₂ Gesamtamplitude. S₁ S₂ Stützphase

2. Streckung im Kniegelenk
3. Streckung im Hüftgelenk

Die Plantarflexion im Sprunggelenk wird vornehmlich durch den dreiköpfigen Wadenmuskel (M. triceps surae) erzeugt und erfolgt im letzten Teil der Stützphase (s. Abb. 1 u. 2). Bedingt durch die Neigung des Beines zur Horizontalen ist die horizontale Komponente der Streckkraft jedoch relativ gering (F_n in Abb. 5 b). Möglicherweise ist die vornehmliche Aufgabe dieser Muskelaktion die Verlängerung des Beschleunigungsweges für die Hüftstreckung. Gleiches muß für die horizontale Komponente der durch die Kniestreckbewegung erzeugten Kraft gelten.

Schon diese Überlegungen stützen die Vermutung WASERs über die geringe Bedeutung zumindest der Kniestreckaktionen beim Lauf und lassen diejenigen Muskeln als verantwortlich für die Erzeugung der Horizontalgeschwindigkeit erscheinen, die die Hüftstreckung besorgen. Unter den beim Laufen gegebenen Winkelstellungen des Hüftgelenkes kommen folgende Muskeln als Hüftstrekker in Betracht:

1. Großer Gesäßmuskel (M. gluteus maximus)

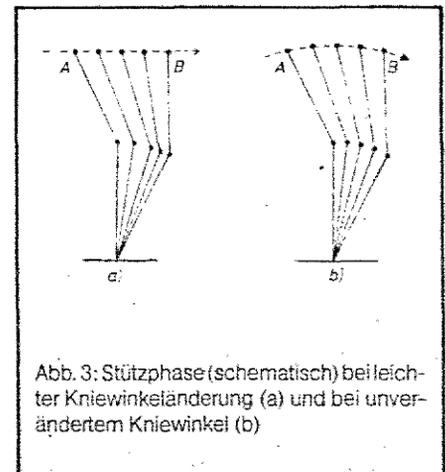
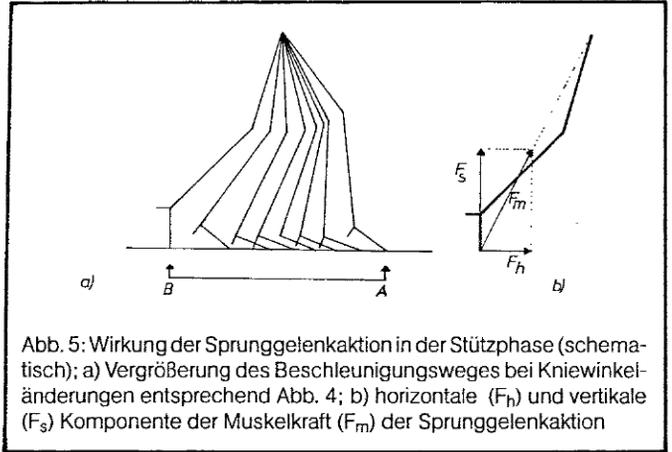
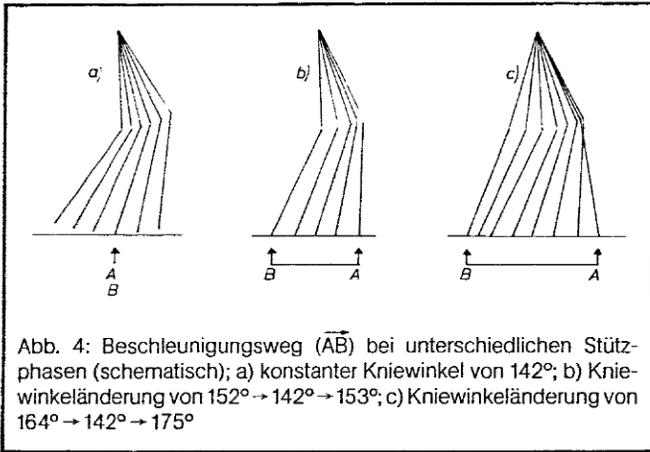


Abb. 3: Stützphase (schematisch) bei leichter Kniewinkeländerung (a) und bei unverändertem Kniewinkel (b)

Eingegangen: 26. 11. 1985



2. Großer Anzieher (M. adduktor magnus)
3. Langer Kopf des zweiköpfigen Oberschenkelmuskels (M. biceps femoris, caput longum)
4. Halbsehnenmuskel (M. semitendinosus)
5. Plattsehnenmuskel (M. semimembranosus)

Der große Gesäßmuskel (Abb. 6 a und b) gilt zwar als einer der Hauptstreckmuskeln des Hüftgelenkes (TITTEL), seine unteren (caudalen) Fasern, die die günstigste Streckwirkung zeigen, rotieren jedoch den Oberschenkel in bezug zur Hüfte nach außen. Bei fixiertem Bein, wie es in der Stützphase des Laufes vorliegt, würde das eine Rückrotation des Beckens bedeuten, genauer: Stützt das rechte Bein fest am Boden, zieht der Gesäßmuskel neben der Streckwirkung den linken Beckenrand nach hinten (Abb. 7). Das würde aber einem raumgreifenden Schritt links nach vorn entgegenstehen. Aus diesem Grunde muß wohl die Beteiligung des Gesäßmuskels auf eine fixatorische Wirkung seiner mittleren Fasern zwecks Vermeidung eines durch die Schwerkraft bedingten Abkippen der Beckenseite gegenüber dem Standbein beschränkt bleiben. Der große Anzieher (M. adduktor longus) entspringt am Sitzbeinhöcker und am Ast des Sitzbeines und setzt an der Rückseite des Oberschenkels und am inneren Gelenkknorren des Oberschenkels an (Abb. 6 d). Speziell derjenige Teil, der am Sitzbein entspringt und am Gelenkknorren ansetzt, muß vor allem bei stärker gewinkelter Hüfte als ausgesprochener Hüftstreckmuskel gelten. Aufgrund seines Verlaufs verliert er aber im Zuge der Hüftstreckbewegung seinen Einfluß auf die Streckbewegung (Abb. 6 c).

Somit bleiben für die gesamte Gelenkampie der Hüfte als Strecker nur noch die oben unter 3 bis 5 genannten Muskeln, die auch als **ischiocurale** Muskeln („Sitzbein-Unterschenkel-Muskeln“) zusammengefaßt werden. Sie scheinen für die Laufbewegung die wirkungsvollsten Hüftstreckmuskeln zu sein (Abb. 6), da ihr durchschnittliches Muskelkraftmoment in den betreffenden Winkelstellungen relativ groß ist – auch wenn dieses mit zunehmender Hüftstreckung etwa abnimmt. Diese Muskeln sind jedoch zweigelenkige Muskeln. Da sie am Unterschenkel angreifen

– der zweiköpfige Oberschenkelmuskel am Wadenbeinköpfchen, der Halbsehnen- und der Plattsehnenmuskel an der inneren Schienbeinfläche – gelten sie als Beugemuskel des Knies.

Selbst wenn man zugesteht, daß bei der in der Stützphase des Laufes vorliegenden Kniewinkelstellung das Muskelkraftmoment bezogen auf das Kniegelenk vergleichsweise klein ist, bleibt die Frage berechtigt, ob diese Muskeln trotz der ihnen zugeschriebenen Beugewirkung im Knie als Kinetoren für die Hüftstreckung mit damit verbundener Knie-streckung beim Lauf gelten können. Bei der Beurteilung der Wirkung dieser Muskeln auf das Kniegelenk muß jedoch der Umstand berücksichtigt werden, daß in der Stützphase der Fuß am Boden durch Reibung festsitzt und der Unterschenkel somit der Beugewirkung der Muskeln nicht folgen kann (Abb. 8). Andererseits setzt am freien Glied der zweigliedrigen kinematischen Kette des Standbei-

nes die Körpermasse der Beugewirkung eine recht hohe Trägheit (F_i in Abb. 8) entgegen, so daß das Kräftepaar, gebildet aus F_i und der horizontalen Komponente (F_h) der Muskelkraft (F_m), auf das Knie **streckend** wirkt.

Diese Überlegung stützen die Vermutung, daß die ischiocruralen Muskeln diejenigen Muskeln sind, die für die Erzeugung der Horizontalgeschwindigkeit beim Lauf hauptverantwortlich sind, da sie bei den in der Stützphase des Laufes vorliegenden mechanischen Bedingungen im Hüftgelenk und im Kniegelenk als Strecker fungieren. Die bei TITTEL dargestellte Körperstreckschlinge beim Lauf (Abb. 8 b) muß demnach wie in Abb. 8 c wiedergegeben korrigiert werden.

3. Elektromyogramm des Laufens

Um die oben formulierte Hypothese zu prüfen, wurden Elektromyogramme (EMG) von Geh-, Lauf- und Sprungschritt-Bewegungen

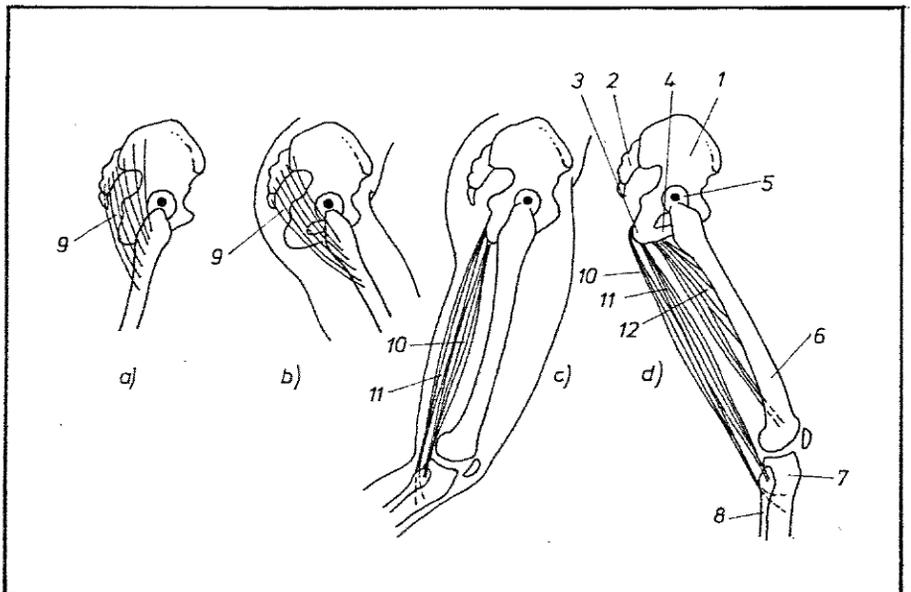


Abb. 6: Streckmuskeln der Hüfte. 1 = Darmbein; 2 = Kreuzbein; 3 = Sitzbein; 4 = Sitzbeinast; 5 = Gelenkkopf des Oberschenkelknochens; 6 = Schaft des Oberschenkelknochens; 7 = Schienbein; 8 = Wadenbein; 9 = Großer Gesäßmuskel; 10-11 = ischiocurale Muskeln; 10 = langer Kopf des zweiköpfigen Oberschenkelmuskels; 11 = Halbsehnen und Plattsehnenmuskel; 12 = großer Anzieher

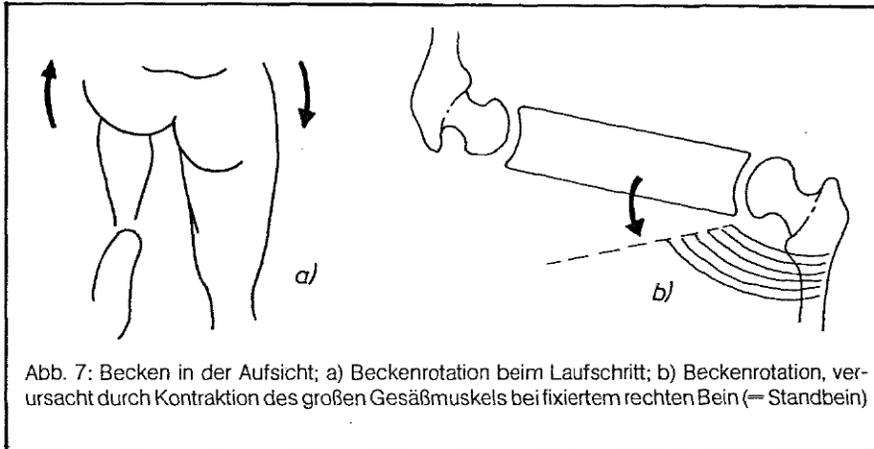


Abb. 7: Becken in der Aufsicht; a) Beckenrotation beim Laufschrift; b) Beckenrotation, verursacht durch Kontraktion des großen Gesäßmuskels bei fixiertem rechten Bein (= Standbein)

erstellt (Abb. 9). Das EMG eines Laufschriftes (Abb. 9 b) bestätigt die obigen Vermutungen: Die ischiocruralen Muskeln sind nicht nur während der gesamten Stützphase aktiv, sondern ihre Aktivität beginnt schon rund 100 ms vor dem ersten Bodenkontakt und endet erst 60 ms nach dem Abheben des Fußes vom Boden. Spiegelt diese Aktivität die Erzeugung der Horizontalgeschwindigkeit wider, dürfte sie bei einem Sprung senkrecht nach oben aus einem Laufschrift nicht auftreten, wie das EMG der Abb. 9 c eindrucksvoll bestätigt. Auch die Aktivität des vierköpfigen Oberschenkelmuskels (M. quadriceps femoris) be-

ginnt – wenn auch erst mit einer schwachen Kontraktion – vor dem ersten Bodenkontakt, nämlich 80 ms, und strebt im ersten Teil der Stützphase hohen Werten zu. Überraschend ist jedoch, daß die Aktivität nach rund zwei Dritteln der Stützphase abrupt abbricht, obwohl, wie das Winkeldiagramm verdeutlicht, die Streckbewegung im Kniegelenk erst zur Hälfte vollzogen ist. Diese Beobachtung könnte als ein Beweis für die streckende Wirkung der ischiocruralen Muskeln auf das Kniegelenk dienen. Um den Einfluß verdeckter Faktoren zu prüfen, wurden in einer Wiederholung des Expe-

riments verschiedene Köpfe des vierköpfigen Oberschenkelmuskels elektromyographiert. Ebenso wurde versucht, den Einfluß der Laborsituation auf die Laufbewegung zu reduzieren (schnellere Laufbewegung, größerer Aktionsbereich der Versuchsperson, Wegfall des Goniometers am Kniegelenk der Versuchsperson). Es zeigt sich (Abb. 10), daß die Ergebnisse des vorangehenden Experiments bestätigt werden können.

Deutlich ist, daß die diversen Köpfe des vierköpfigen Oberschenkelmuskels hier sogar schon vor Beendigung der ersten Hälfte der Stützphase ihre Aktivität einstellen. Dieser Unterschied zum EMG der Abb. 9 mag nicht nur an den geänderten Laborbedingungen, sondern auch an der Tatsache liegen, daß dem zweiten Experiment ein gut trainierter Leichtathlet als Versuchsperson diente.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß durch EMG unsere Vermutungen bestätigt werden, die ischiocruralen Muskeln während der Laufbewegung als Hauptstreckmuskeln (Kinetooren) der Hüft- und Kniestreckbewegung anzusehen. Gleichzeitig wird die Forderung WASERs gestützt, beim Lauftraining vermehrt das „ziehende“ Laufen im Gegensatz zum „stoßenden“ Laufen zu fördern. Das „Ziehen“ (= Hüftstrecken) beim Lauf beginnt jedoch nicht erst mit dem Fußaufsatz (s. KUNZ), sondern sogar deutlich vor dem ersten Bodenkontakt.

4. Beobachtungen aus der Sportpraxis

1 Wer Sportler unterschiedlicher Spezialisierung (wie z. B. Sportstudenten) im Gerätturnen ausbildet, in einer Sportart also, bei der Erfolg von einer guten Hüftbeugefähigkeit abhängig ist, kann feststellen, daß gerade die Leichtathleten und Fußballer sich durch eine eingeschränkte Beugefähigkeit im Hüftgelenk auszeichnen. Im Streckesitz gelingt es ihnen oft kaum, das Hüftgelenk bis zum rechten Winkel zu beugen, obwohl sie bei gewinkeltem Knie die Oberschenkel problemlos bis an die Brust nehmen können (Abb. 11). Verantwortlich für die Einschränkung der Hüftbeugefähigkeit (bei gestrecktem Kniegelenk) sind somit die ischiocruralen Muskeln (Abb. 6), die oben als die wichtigsten Kinetoren für die Horizontalgeschwindigkeit beim Lauf identifiziert wurden. Offensichtlich bewirkt das intensive Betreiben einer Sportart, in der Laufen mit hohen Geschwindigkeiten zu den Hauptaktivitäten gehört, eine Anpassungstendenz zu einer hohen Ruhespannung der ischiocruralen Muskeln. Daraus läßt sich ableiten, daß eine effektive Erzeugung hoher Laufgeschwindigkeiten „kurze“ ischiocrurale Muskeln voraussetzt.

2 Wer guttrainierte Gerätturner beim Anlauf zum Pferdsprung beobachtet und diese mit der Lauftechnik von Sprintern vergleicht, kann schon ohne Einsatz visueller Medien oder kinematographischer Untersuchungen erkennen, daß Turner den Standfuß deutlicher unter dem Körper als vor dem Körper aufsetzen und durch eine stoßende Streckaktion den Körper vorwärts beschleunigen. Die extrem „lange“ ischiocrurale Muskulatur der Turner ist offensichtlich nicht in der Lage, eine ziehende Laufaktion zu realisieren. Gemäß dieser und der genannten Beobachtung muß Sprintern und Fußballspielern empfohlen werden, ein zu intensives Dehnungstraining der ischiocruralen Muskeln zu vermeiden. Im Gegensatz dazu sollten Kunstturner durch ein intensives Lauftraining nicht die Bemühungen ihres Dehnungstrainings zunichte machen.

3 Dem Verfasser sind Beispiele bekannt, in denen Sportler ihre Sprintleistung ohne intensives Lauftraining vorwiegend durch ein Krafttraining der ischiocruralen Muskeln verbessern konnten. Ein Turner, durch „lange“ ischiocrurale Muskeln und eine dementsprechende schlechte 100m-Sprintzeit gekennzeichnet, konnte ohne jegliches Lauftraining ausschließlich durch isometrische Belastung der ischiocruralen Muskeln (s. Abb. 12 a) seine 100m-Sprintleistung um 1,2 Sekunden verbessern.

5. Schlußfolgerungen

Die ischiocruralen Muskeln – der lange Kopf des zweiköpfigen Schenkelmuskels, der Halbsehnenmuskel und der Plattsehnenmuskel – stellen diejenigen Muskeln dar, die während der gesamten Stützphase des Laufes die Hüftstreckung und in der letzten Hälfte der Stützphase (obwohl allgemein als Kniebeuge bezeichnet) die Kniestreckung realisie-

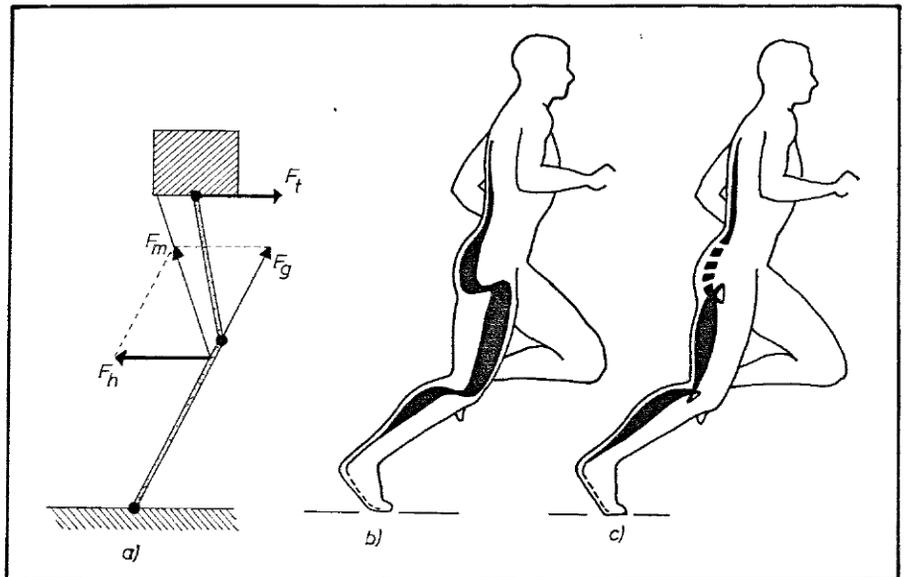


Abb. 8: a) Schematische Darstellung zur Wirkung der Muskelkraft (F_m) der ischiocruralen Muskeln; F_G = Gelenkkomponente; F_h = horizontale Komponente; F_t = Trägheitskraft des Rumpfes; b) Körperstreckschlinge beim Lauf nach TITTEL; c) korrigierte Körperstreckschlinge

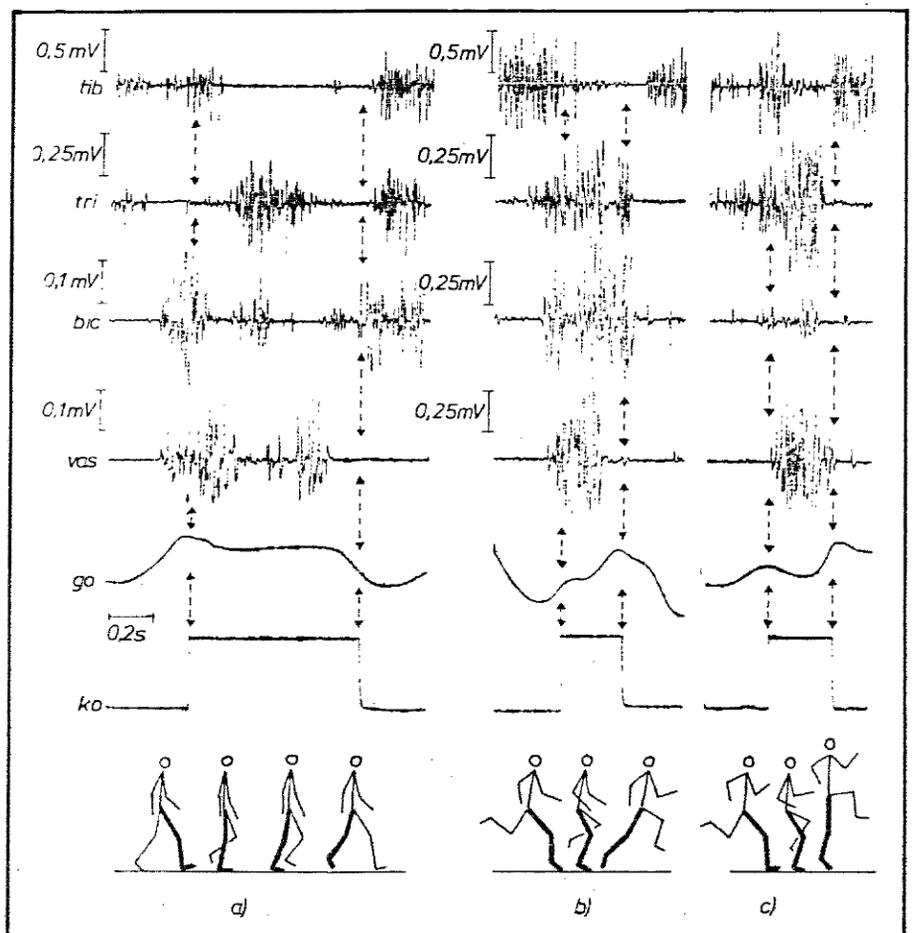


Abb. 9: Elektromyogramm der Stützphase eines Gehschrittes (a), eines Laufschrilles (b) und eines Laufschrilles-Sprunges senkrecht nach oben (c). Die Kanäle des EMG sind von oben nach unten wie folgt belegt: tib = EMG des vorderen Schienbeinmuskels; tri = EMG des dreiköpfigen Wadenmuskels; bic = EMG der ischiocruralen Muskeln; vas = EMG des inneren Kopfes des vierköpfigen Oberschenkelmuskels; go = Kniewinkelkurve; ko = Markierung des Fußkontaktes auf dem Boden

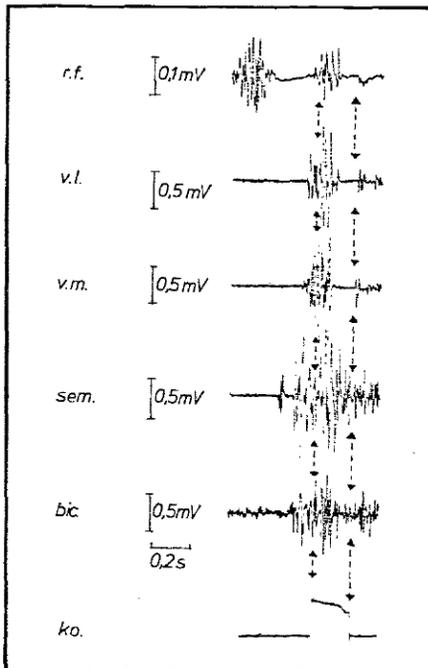


Abb. 10: Elektromyogramm der Stützphase eines Laufschrütes. Die Kanäle des EMG sind von oben nach unten wie folgt belegt. Kniestreckermuskel; r.f. = langer Kopf des vierköpfigen Oberschenkelmuskels; v.l. = seitlicher Kopf des vierköpfigen Oberschenkelmuskels; v.m. = innerer Kopf des vierköpfigen Oberschenkelmuskels. Hüftstreckermuskel; sem. = Halbbsehnen- und Plattsehnenmuskulatur; bic = zweiköpfiger Oberschenkelmuskulatur. ko = Markierung des Fußkontaktes mit dem Boden

ren. Damit sind sie die Kinetoren für die von KUNZ und WASER beschriebene Aktion des „Ziehens“ beim Laufen. Die übrigen Hüftstreckmuskeln (besonders der große Gesäßmuskel) erfüllen offensichtlich hier fixatorische Aufgaben. Die Hauptfunktion des dreiköpfigen Wadenmuskels muß in der Verlängerung des horizontalen Beschleunigungsweges für die Streckaktion der ischiocruralen Muskeln gesucht werden. Für die Verbesserung der Horizontalgeschwindigkeit beim Laufen ist neben einem entsprechenden Techniktraining (s. WASER) auch ein Krafttraining für die ischiocrurale Muskulatur zu empfehlen. Die zum Krafttraining verwendeten Übungsformen müssen dabei nicht unbedingt eine Hüftstreckaktion beinhalten. Auch Übungsformen mit anschließender Kniebeugeaktion (s. Abb. 12) führen, da die beteiligten Muskeln zweigelenkig sind, zu einem Kraftzuwachs für die Hüftstreckbewegung. Allerdings fördert eine Betonung des Ziehens mit geringer Vertikalbewegung des KSP, also das von KUNZ empfohlene „Hochlaufen“ auch zwei Wirkungen, die dem Ziel, nämlich der Erzeugung einer großen Horizontalgeschwindigkeit, entgegenstehen. Als erstes wäre die Verringerung des horizontalen Beschleunigungsweges zu nennen, was vorn (s. auch Abb. 4 und 5) schon besprochen wurde. Darüber hinaus muß folgendes bedacht werden: Haben zwei Läufer zu Beginn der Flugphase

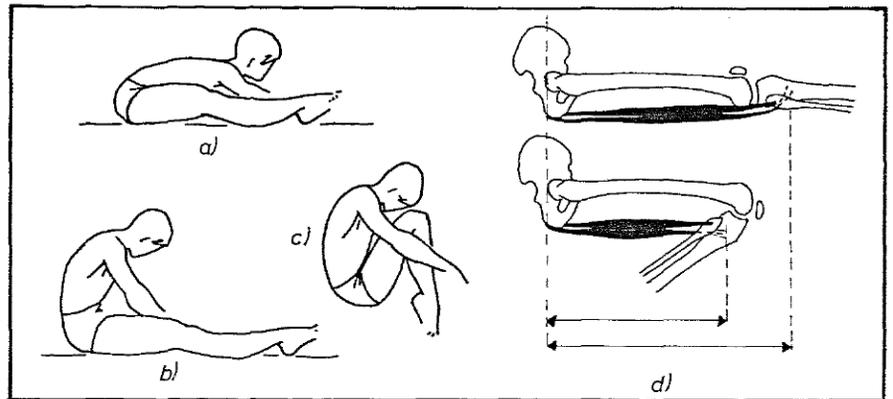


Abb. 11: a) bis c) unterschiedliche Beugefähigkeit im Hüftgelenk; d) Demonstration der Beteiligung der ischiocruralen Muskeln an der Beugehemmung des Hüftgelenks

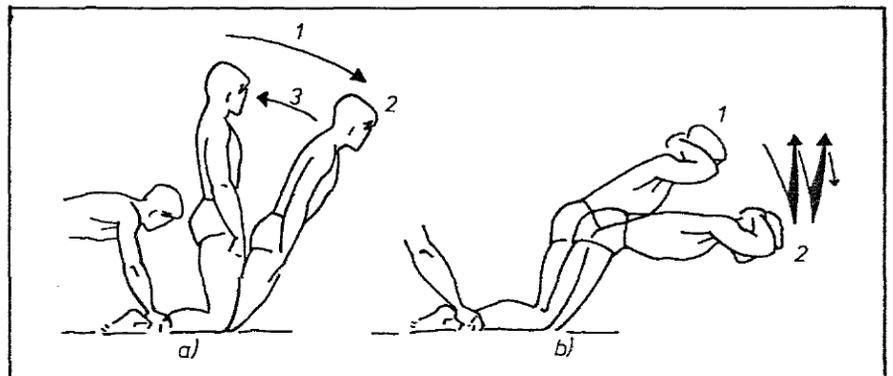


Abb. 12: Belastungsbeispiele für die ischiocruralen Muskeln, a) vorwiegend isometrische Belastung: 1 = senken; 2 = halten; 3 = heben; b) dynamisch-plyometrische Belastung: Aus Stellung 1 Rumpf fallen lassen, in Stellung 2 abbremsen und sofort bis Stellung 1 wieder hochschnellen, wobei die Aktion vornehmlich im Kniegelenk ausgeführt werden sollte

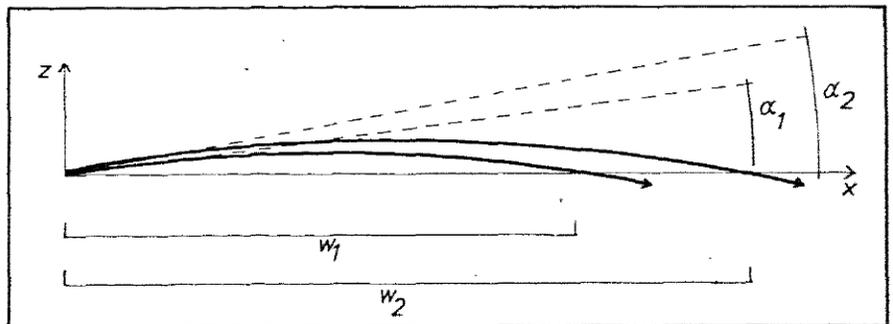


Abb. 13: Unterschiedliche Flugweiten bei unterschiedlichem Abflugwinkel, aber gleicher Horizontalgeschwindigkeit. $\alpha_1 = 8^\circ$, $\alpha_2 = 10^\circ$. W_1 = Flugweite bei Abflugwinkel α_1 , W_2 = Flugweite bei Abflugwinkel α_2

gleiche Horizontalgeschwindigkeiten, aber unterschiedliche Vertikalgeschwindigkeiten, schneidet die KSP-Flugkurve des Läufers mit der geringeren Vertikalgeschwindigkeit früher die Horizontale durch den Abflugpunkt (Abb. 13). Das bedeutet: Der Flug ist im Fall der geringen KSP-Vertikalbewegung kürzer. Daraus muß abgeleitet werden, daß der Läufer mit der geringeren Vertikalbewegung des Schwerpunktes zu einem früheren Zeitpunkt mit der nächsten Stützphase beginnen muß. Wird somit im Training das Ziehen gegenüber dem Stoßen verbessert und auf diese Weise die Vertikalbewegung des KSP minimiert, kann der Sportler seine Laufgeschwindigkeit

nur dann beibehalten, wenn er mit höherer Schrittfrequenz läuft. Die Notwendigkeit zum verstärkten Einsatz der ischiocruralen Muskeln beim Lauf bringt zwangsläufig die Forderung mit sich, auch die Hüftbeugemuskeln, die das Schwingbein nach vorn zur neuen Stützphase bringen, entsprechend zu trainieren. So berechtigt die Forderung nach einem „Hochlaufen“ mit vorwiegendem „Ziehen“ (KUNZ, WASER) sein mag, so wird sie nicht zuletzt durch das Problem der hohen Schrittfrequenzen auf ein noch zu erforschendes Optimum limitiert. Die Literaturliste ist bei der Redaktion erhältlich.