

Diskussion

In Stichpunkten: Aufbau der Diskussion anhand der formulierten Forschungsfragen und Hypothesen:

Forschungsfragen:

1. *Unterschiede zwischen den Körperpositionen Sitzen und Stehen?*
2. *Unterschiede des _{muskulär} bei den Belastungsintensitäten?*
3. *Unterschiede des _{muskulär} zwischen den Belastungsintensitäten in den Körperpositionen?*

Hypothesen:

1. *Keine signifikanten Unterschiede des _{muskulär} zwischen Sitzen und Stehen*
2. *Keine signifikanten Unterschiede des _{muskulär} zwischen leichten, moderaten und schweren Belastungsintensitäten*
3. *Unterschiede zwischen den Intensitäten der Bedingungen*
 1. *Bei niedrigen Intensitäten gibt es keine signifikanten Unterschiede des _{muskulär} zwischen sitzender und stehender Position.*
 2. *Bei mittleren und hohen Intensitäten gibt es keine statistisch signifikanten Unterschiede des _{muskulär} zwischen sitzender und stehender Position*

Wirkungsgradberechnungen

Wirkungsgrade	Berechnung
Brutto	$P_{\text{mech}} / E_{\text{Aerob}}$
Netto	$P_{\text{mech}} / (E_{\text{Aerob}} - E_{\text{Ruhe}})$

Total	$P_{\text{mech}} / (E_{\text{Tot}} - E_{\text{Ruhe}})$
muskulär	$(P_{\text{mech}} + P_{\text{Int}}) / (E_{\text{Tot}} - E_{\text{Ruhe}})$
Arbeit	$P_{\text{mech}} / (E_{\text{Tot}} - E_{\text{Ruhe}} - E_{\text{Leerbewegung}})$
delta	$\Delta P_{\text{mech}} / \Delta E_{\text{Tot}}$

Zu Hypothese 1

- $\eta^2_{\text{muskulär}}$ signifikant höher in sitzender Position ($24.98 \pm 1.06\%$ vs. $24.07 \pm 0.96\%$) ($F(1,8) = 7.64$, $p = .024$, $\eta^2_p = .489$) → **Hypothese widerlegt**
 - Effekt primär durch signifikant höhere P_{Tot} in sitzender Bedingung bei konstanter W_{TOT}
 - Methodische Limitation: Berechnungsalidität von P_{Tot} bzw. P_{Int} für Stehen-Bedingung ist zu hinterfragen
 - Bei Ausklammerung von P_{Int} kein signifikanter Unterschied → siehe η^2_{Total}
- η^2_{Netto} und η^2_{Brutto} unterschieden sich nicht signifikant
 - Tendenziell höhere Werte in stehender Position

Zu Hypothese 2

- Signifikanter Effekt der Intensität auf $\eta^2_{\text{muskulär}}$ ($F(2,16) = 5.23$, $p = .018$, $\eta^2_p = .395$). $\eta^2_{\text{muskulär}}$ nimmt mit steigender Intensität ab ($24.94 \pm 1.27\%$ - $24.14 \pm 0.90\%$) → **Hypothese widerlegt**
 - Post-hoc-Analysen: Signifikanter Unterschied zwischen leicht und schwer ($p = .074$, $d = .75$)
 - Moderate und schwere sowie moderate und leichte Intensitätsstufen ohne statistisch signifikanten Unterschied
- Signifikanter Effekt der Intensität auf $\eta^2_{\text{muskulär}}$ innerhalb der Sitzen Bedingung ($F(2,16) = 10.19$, $p = .001$, $\eta^2_p = .560$). → **Hypothese widerlegt**
 - Post-hoc-Analysen: Signifikanter Unterschied zwischen leicht und schwer ($p = .017$, $d = 1.31$).
 - Moderat und leicht ($p = .217$, $d = .83$) sowie moderat und schwerer ($p = .427$, $d = .63$) nicht signifikant
- Wirkungsgradverhalten bei steigender Belastungsintensität:

- P_{TOT} für $P_{\text{muskulär}}$ bzw. P_{mech} für P_{Total} . Jedoch nur bei $P_{\text{muskulär}}$ signifikant, was womöglich damit zu erklären ist, dass P_{Int} nicht ansteigt mit steigender Belastungsintensität und somit der $P_{\text{muskulär}}$ noch stärker abfällt als P_{Total}
- $P_{\text{Arbeit,sitzen}}$ verhält sich mit steigender Belastungsintensität innerhalb der Sitzen Bedingung vergleichbar wie $P_{\text{muskulär}}$, da zwischen der leichten und schweren Belastungsintensität jeweils ein signifikanter Unterschied besteht. Die Unterschiede bestehen nur darin, wie die Kosten für die innere Leistung bestimmt wurden. Für $P_{\text{muskulär}}$ wurden diese anhand des biomechanischen Modells oder 3D-Kinematik errechnet, während der Sauerstoffumsatz für die Bewegungen anhand des Drehzahltests in $P_{\text{Arbeit,sitzen}}$ berechnet wurde. So scheinen beide Berechnungsansätze valide Methoden für die Bestimmung der inneren Arbeit zu sein. Für die stehende Bedingung können die beiden nicht verglichen werden, da P_{Arbeit} nicht für Stehen berechnet wurde
- P_{Netto} zeigt gegensätzliches Verhalten bei steigender Belastungsintensität. Die Mittelwerte von P_{Netto} steigen bei höheren Intensitäten im Mittel über beide Bedingungen, auch wenn keine signifikanten Unterschiede festzustellen sind. Innerhalb der jeweiligen Bedingungen zeigt sich ein sehr geringer nicht signifikanter Abfall für P_{Netto} , bzw. ein fast konstanter Nettowirkungsgrad innerhalb der Sitzen Bedingung, aber während dem Stehen ein konstanter nicht signifikanter Anstieg von leicht zu schwer
- P_{Brutto} steigt wie zu erwarten signifikant an mit steigender Intensität, was auf den kleiner werdenden prozentualen Anteil des Ruhenergieumsatzes zurückzuführen ist

Zu Hypothese 3

- Signifikanter Effekt zwischen der leichten Intensität zwischen Sitzen und Stehen von $P_{\text{muskulär}}$. Sitzen signifikant höher (25.68 ± 1.03 vs. 24.20 ± 1.05). Die statistische Analyse zeigt eine hohe Signifikanz und Effektstärke ($F(1,8) = 16.63$, $p = .004$, $\eta^2 = .675$) → **Hypothese bestätigt**
- Tendenziell signifikanter, aber nicht vollständig signifikanter Effekt zwischen der moderaten Intensität zwischen Sitzen und Stehen. Sitzen weiterhin numerisch höher (24.92 ± 0.78 vs. 24.08 ± 1.08) → **Hypothese tendenziell bestätigt**
- Nicht signifikanter Effekt von $P_{\text{muskulär}}$ zwischen der schweren Intensität zwischen Sitzen und Stehen. Sitzen numerisch höher (24.36 ± 0.99 vs. 23.92 ± 0.81), jedoch zeigt statistische Prüfung keine relevante Differenz ($F(1,8) = 1.41$, $p = .269$, $\eta^2 = .150$) → **Hypothese bestätigt**
- Unterschied in $P_{\text{muskulär}}$ zwischen Sitzen und Stehen nimmt mit steigender Intensität systematisch ab → **Hypothese bestätigt**

- Alle anderen Wirkungsgradberechnungsmethoden zeigen keine vergleichbaren signifikanten Ergebnisse.
 - Die konsistent höheren P_{Tot} bzw. P_{Int} -Werte im Sitzen über alle Intensitätsbedingungen hinweg legen nahe, dass die beobachteten Unterschiede höchstwahrscheinlich auf eine erhöhte berechnete innere Arbeitsleistung zurückzuführen sind

Erklärung der statistisch signifikanten Unterschiede von $P_{\text{muskulär}}$

- $P_{\text{muskulär}}$ zwischen den moderaten Intensitäten zwar nicht signifikant, aber ganz knapp davor ($F(1,8) = 5.26$, $p = .051$, $\eta^2 = .397$). Bei größerer Stichprobe keine Signifikanz anzunehmen.
- $P_{\text{muskulär}}$ und P_{Total} unterscheiden sich lediglich durch die Einbeziehung der inneren Arbeit. Die innere Arbeit variiert signifikant zwischen Sitzen (37.5 ± 11.3) und Stehen (22.1 ± 6.9).
- Die P_{Int} Mittelwerte bleiben über alle Intensitäten konstant, da sie drehzahlabhängig sind und die Drehzahl nahezu identisch bleibt. Dadurch zeigt sich eine deutlich größere Differenz zwischen $P_{\text{muskulär}}$ und P_{Total} von durchschnittlich 0.80 bei leichter und 0.34 bei schwerer Intensität, weil P_{Int} nahezu gleichbleibt, während der physiologische Energieumsatz steigt.
- Da P_{Int} im Sitzen signifikant höher war, ist $P_{\text{muskulär}}$ auch höher im Sitzen als im Stehen. Ohne Berücksichtigung von P_{Int} (wie in P_{Total}) zeigt sich keine Signifikanz. Daher repräsentiert P_{Total} eher die in der Literatur erwarteten Verhaltensweisen.
- SCHWÄCHEN VON P_{int} :
 - Berechnung ohne Rücksicht der potentiellen ENergie bei der BEcnung der inneren Leistung. Deshalb wahrscheinlich im sitzen unterschätzt und im Stehen massiv unterschätzt. Aber für das sthehen gibt es kien Verleichswerte
 - Eine Valide BErechnung von P_{Int} im stehen könnte auch den beobachteten Effekt erklären, dass bei niedrigen Intensitäten die Stehen ebdingung wahrshceinlich weniger reffizient ist als die sitzen ebdingung, da di einer arbeit wohl warschienlich für die gleich edrehzhal höher ist im stehen und in den untersuchungen mit die glecthe derhzal für sitzen und stehen vergliche wurde.

Fazit von $P_{\text{muskulär}}$:

- $P_{\text{muskulär}}$ wahrscheinlich nur für das Sitzen repräsentativ, aber für die stehenden Bedingung wahrscheinlich etwas unterschätzt. Hier also noch mehr Forschungsbedarf, um die P_{Int} fürs Stehen noch präziser einschätzen zu können.

- _{muskulär} wahrscheinlich valide Ergebnisse für das Fahren im Sitzen, aber die Ergebnisse für das Stehen sind anzuzweifeln.
- Für den Vergleich der beiden Bedingungen wahrscheinlich _{Total} am besten geeignet und hier sind im Gegensatz zu _{muskulär} keine signifikanten Ergebnisse zu sehen.

Relevanz für die Praxis

- Das Fahren im Stehen stellt bezüglich des Wirkungsgrades eine valide Alternative zum Sitzen dar, um kurzzeitig die Körperposition zu variieren und unterschiedliche Muskelgruppen zu belasten. Wie beschrieben, ist der gemittelte _{muskulär} über alle Intensitäten in stehender Position niedriger als im Sitzen. Dieser Wirkungsgrad eignet sich jedoch, wie bereits diskutiert, für die Berechnungen im Sitzen nur bedingt als Bewertungsmethode.
- Ein entscheidender Aspekt beim Radfahren in der Praxis, der in der Studie nicht berücksichtigt wurde, ist der signifikante Anstieg des Luftwiderstands beim Wechsel von sitzender zu stehender Position. Dies kann insbesondere bei Profiradsportlern, die hohe Geschwindigkeiten sowohl auf ebenen Strecken als auch in bergigen Terrains erreichen, zu einer substantiellen Reduktion der Geschwindigkeit bei gleichbleibender mechanischer Leistung führen. Daher ist das Fahren im Stehen in der Praxis primär für kurze Zeitintervalle an steilen Anstiegen oder in Situationen mit geringer Geschwindigkeit sinnvoll, bei denen der Luftwiderstand gegenüber der Gravitationskraft oder dem Rollwiderstand eine untergeordnete Rolle spielt. Eine potenzielle Ausnahme bilden Situationen, in denen kurzzeitig sehr hohe mechanische Leistungen erforderlich sind. Gemäß vorliegender Literatur kann im Stehen über kurze Zeiträume eine höhere mechanische Leistung generiert werden.

Weiteres

- Einordnung der prozentualen Energieanteile die ich bestimmt habe im Vergleich zu Gastin2001
- Ist es valide die anaeroben Laktaziden Anteil überhaupt bei so langen Belastungen auf diese Weise zu bestimmen, kann nicht mehr Laktazid erschält werden aber auch schon abgebaut währenddessen?

Limitationen

- Geringe Stichprobengröße
- Leichte und moderate Intensität zu schwer
- Innere Leistung im Stehen vermutlich unterschätzt, da für gleiche Drehzahl kaum höher als im Sitzen

- Wurde vergleichbar berechnet wie im Sitzen
 - Haltearbeit sowie vertikale Änderungen des Körperschwerpunktes nicht einbezogen
- Einfluss der leichten Belastung von 50 Watt in den Erholungsphasen auf die EPOC-Messung
 - Keine geregelte Trittrate in dieser Phase
- Zu kurze Erholung nach den jeweiligen Belastungen, vor allem an Testtag 2 nach dem Sprinttest
 - Sprinttest kontraproduktiv keine Rückkehr auf Laktat-Baseline
- Mögliche Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der ventilatorischen Schwellen durch das 30s-Stufenprotokoll im Vergleich zum BDR-Protokoll
- Mögliche Ungenauigkeiten bei der Modellierung der EPOC-Kurven und der Berechnung des WPCR aufgrund der 50-Watt Nachbelastung
- Mögliche Ungenauigkeiten der Atemgasmessung bei hohen Ventilationsraten
- Mögliche Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Körpersegmentmassen und -schwerpunkte für die 3D-Bewegungsanalyse
- Das Ergometer hat manchmal aussetzer gehabt, wodurch in der Nachbelastungsphase teilweise statt der gewollten 50 Watt Belastung über einen Zeitraum von bis zu mehreren Minuten kein Trettwiderstand vorhanden war. Die könnte dazu geführt haben, dass in wenigen Belastungsdurchgängen bzw. der Nachbelastung davon der Sauerstoffvolumenstrom tiefer gefallen war als es eigentlich sein sollte und somit die EPOC - berechnung in manchen wenigen Fällen evtl leicht verfälscht wurde. Es konnte aber nicht genau nachvollzogen werden in welchen Fällen dies eingetreten ist und für wie lange, weshalb dies in der EPOC berechnung nicht beachtet wurde. Und bis auf potentiell drei Werte die an der oberen Grenze der physiologisch plausiblen Grenze lagen waren die restlichen Werte gut.
- ...
- Probleme bei der Berechnung der inneren Leistung wie in Ettema

Ausblick

- Weitere Studien mit größerer Stichprobengröße, um die Validität der Ergebnisse zu erhöhen, gibt teilweise große Effekte, die aber nicht signifikant sind
- Vergleich der verwendeten EPOC-Berechnungsmethode mit anderen Ansätzen aus der Literatur
- Berücksichtigung der Wärmeabgabe bei der Berechnung des Gesamtenergieumsatzes und des Wirkungsgrades, bzw. Berechnung des Wirkungsgrades über die Wärmeabgabe
- Einfluss der Torque Efficiency oder Pedal-Smoothness (hohe Leistungsspitzen) auf den Wirkungsgrad
- Einfluss von Kurbellängen auf den Wirkungsgrad

- Messung der Kräfte an dem Lenker um die Wirkenden Kräfte besser einzuschätzen und vll auch für die messung der inneren arbeit
- Physiologisch Variablen zwischen den Bedingungen noch besprechen, so ähnlich wie Har-nish et al. (2007)
- ...
- Zusammenhang zwischen negativer mechanischer Leistung und innerer Arbeit erforschen
- Sind Leistungsspitzen schneller ermüdend als gleichmäßige Leistungen -> Pedal Smoothness
- Zur Validierung von Wint berechnungen den Probanden für verschiedene Drehzahlen eine gewisse P_{Tot} vorgeben und schauen ob die gleiche physiologische Reaktion auftritt. Also beispielsweise einmal bei 60 80 100 und 120 Trittrate fahren lassen alles bei P_{Tot} von 300 Watt. Vorher die theoretischen P_{int} kosten bestimmen und dann dementsprechend P_{mech} vorgeben mit bspw. 290 / 260 / 220 und 180 Watt.... Wie bei Ferguson et al. (2002)
- Oder für die Bestimmung der P_{int} im Stehen ordentliche Stufentest bei vorgegebener Drehzahl fahren lassen vll bei 40 50 60 70 80 90 100 nicht zwingen bis zur Ausbelastung und dann schauen was die metabolischen Kosten über 0 sind wie bei Deltawirkungsgrad und damit dann ein genauere Modell der P_{int} für das Stehen bestimmen.

Erklärung der höheren VO₂ Kosten von höheren Trittraten aus TOKUI2007 Dies wäre auf den zusätzlichen Energieumsatz durch die Ca²⁺-ATPase für nicht-kontraktile Prozesse bei höheren Trittfrequenzen zurückzuführen (Abbate et al. 2001; Baker et al. 1994). Die aus ATP freigesetzte Energie wird in Leistungsabgaben einschließlich P_{int} und P_{ext} umgewandelt und wird auch von verschiedenen Ionenpumpen genutzt, insbesondere der Ca²⁺-Pumpe des sarkoplasmatischen Retikulums (SR) (Barclay 1994). Blinks et al. (1978) zeigten, dass die Ca²⁺-Reabsorption in das SR bei höheren Kontraktionsfrequenzen weiter zunahm. Andererseits wurde berichtet, dass ein großer Anteil (*43%) des ATP für nicht-kontraktile Prozesse verwendet wird, wobei mehr ATP aus dem anaeroben als aus dem aeroben Stoffwechsel stammt (Baker et al. 1994). Diese Annahme stimmt mit den vorliegenden Daten überein, die zeigen, dass bei 120 U/min ein höherer [DLA]-Wert beobachtet wurde als bei 40 und 80 U/min (Tabelle 2), was zu mehr anaerober Energie bei 120 U/min führen würde und somit zu einer geringeren Muskeleffizienz. Hogan et al. (1998) zeigten, dass Muskelkontraktionen von kurzer Dauer im Hundemuskel zu einer signifikant höheren berechneten ATP-Verbrauchsrate, einer dreifachen Steigerung der Glykolyse und einer größeren Ermüdung führten, die mit erhöhten intrazellulären [La⁻] und [H⁺]-Konzentrationen verbunden war, verglichen mit Muskelkontraktionen von langer Dauer. Es ist möglich, dass die geringere Muskeleffizienz als Folge des höheren Energieverbrauchs bei der höheren Trittfrequenz mit nicht-kontraktilen Prozessen zusammenhängt, wie zum Beispiel übermäßigem Energieverbrauch im Zusammenhang mit der Wiederansammlung von Ca²⁺ durch das SR. Die Muskeleffizienz bei 40 U/min war in Exp. 1 signifikant niedriger als bei 80 U/min, aber in Exp. 2 gab es keinen signifikanten Unterschied im Vergleich zur Effizienz bei 80 U/min. Der menschliche Skelettmuskel besteht hauptsächlich aus Typ-I- und Typ-II-Muskelfasern. Darüber hinaus wird das Verhältnis der beiden Fasertypen in den rekrutierten Muskelfasern durch die Spannung im arbeitenden Muskel oder durch die Übungsintensität verändert (Sargeant 1994). Typ-II-Muskelfasern sind beim Menschen inef-

fizienter als Typ-I-Muskelfasern (Coyle et al. 1992; Jones et al. 2004; Hansen et al. 2002; Horowitz et al. 1994; Mogensen et al. 2006). Ahlquest et al. (1992) zeigten unter den gleichen experimentellen Bedingungen wie in unserem Exp. 1, dass bei gleicher Stoffwechselrate die Glykogenentleerung in Typ-II-Muskelfasern bei 50 U/min größer war als bei 100 U/min während des Radfahrens. Dies bedeutet, dass eine stärkere Rekrutierung von Typ-II-Muskelfasern bei der niedrigeren Trittfrequenz aufgrund der höheren Muskelkraft induziert werden könnte, die erforderlich ist, um den höheren Widerstand pro Zyklus bei gleicher Stoffwechselrate zu überwinden. Die geringere Muskeffizienz bei der niedrigeren Trittfrequenz mit höherer Pedalkraft könnte aus der stärkeren Rekrutierung von Typ-II-Muskelfasern mit niedriger Effizienz resultieren, vermutlich aufgrund der höheren ausgeübten Muskelkraft. Dies unterstützt die Ergebnisse von Exp. 1, dass die Muskeffizienz bei einer niedrigeren Trittfrequenz (40 U/min) mit höherer Pedalkraft (250%) unter der gleichen P_{tot} -Bedingung signifikant niedriger war als bei 80 U/min. ##### # Diskussion als Fließtext:

Zentrale Ergebnisse im Kontext der Forschungsfragen

Die vorliegende Untersuchung liefert differenzierte Erkenntnisse zu den komplexen Wechselwirkungen zwischen Körperposition, Belastungsintensität und muskulärem Wirkungsgrad beim Radfahren. Die Ergebnisse deuten auf subtile, jedoch bedeutsame Unterschiede zwischen den untersuchten Parametern hin.

Körperpositionseffekte auf den muskulären Wirkungsgrad

Bezüglich der ersten Forschungsfrage nach Unterschieden zwischen den Körperpositionen zeigte sich entgegen der ursprünglichen Hypothese ein signifikant höherer $\eta_{\text{muskulär}}$ in sitzender Position ($24,98 \pm 1,06\%$ vs. $24,07 \pm 0,96\%$; $F(1,8) = 7,64$, $p = 0,024$, $\eta_p^2 = 0,489$). Dieser Effekt ist primär auf eine signifikant höhere P_{Tot} in sitzender Bedingung bei konstanter W_{TOT} zurückzuführen. Allerdings muss die Berechnungvalidität von P_{Tot} bzw. P_{Int} für die Stehen-Bedingung kritisch hinterfragt werden. Bei Ausklammerung von P_{Int} zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Positionen, wie die Analyse des η_{Total} belegt. Die Wirkungsgrade η_{Netto} und η_{Brutto} unterschieden sich ebenfalls nicht signifikant zwischen den Positionen, wobei tendenziell höhere Werte in stehender Position zu beobachten waren.

Intensitätsabhängige Modulation des Wirkungsgrades

Die Untersuchung des Intensitätseinflusses auf $\eta_{\text{muskulär}}$ offenbarte entgegen der ursprünglichen Annahmen einen signifikanten Effekt ($F(2,16) = 5,23$, $p = 0,018$, $\eta_p^2 = 0,395$). Mit steigender Intensität zeigte sich eine systematische Abnahme des $\eta_{\text{muskulär}}$ von $24,94 \pm 1,27\%$ auf $24,14 \pm 0,90\%$. Dieser Effekt manifestierte sich besonders deutlich in der sitzenden Position ($F(2,16) =$

10,19, $p = 0,001$, $p^2 = 0,560$). Die beobachtete Dynamik lässt sich möglicherweise durch das überproportionale Ansteigen von W_{TOT} gegenüber P_{TOT} bei gleichbleibender P_{Int} erklären.

Interaktionseffekte zwischen Position und Intensität

Die Analyse der Wechselwirkungen zwischen Körperposition und Belastungsintensität ergab ein aufschlussreiches Muster. Bei leichter Intensität wurde ein signifikant höherer $\dot{V}_{O_2 \text{ muskulär}}$ im Sitzen nachgewiesen ($25,68 \pm 1,03\%$ vs. $24,20 \pm 1,05\%$; $F(1,8) = 16,63$, $p = 0,004$, $p^2 = 0,675$). Diese Differenz verringerte sich systematisch mit zunehmender Intensität, sodass bei schwerer Belastung keine signifikanten Positionsunterschiede mehr nachweisbar waren ($24,36 \pm 0,99\%$ vs. $23,92 \pm 0,81\%$; $F(1,8) = 1,41$, $p = 0,269$, $p^2 = 0,150$).

Methodologische Betrachtungen und Einschränkungen

Die methodischen Aspekte der Studie erfordern eine sorgfältige Reflexion. Die Berechnung der inneren Arbeit stellt einen zentralen Punkt dar, da sich $\dot{V}_{O_2 \text{ muskulär}}$ und $\dot{V}_{O_2 \text{ Total}}$ ausschließlich durch die Einbeziehung der inneren Arbeit unterscheiden. Die signifikante Variation zwischen Sitzen ($37,5 \pm 11,3$) und Stehen ($22,1 \pm 6,9$) könnte teilweise auf methodische Limitationen zurückzuführen sein. Die höhere P_{Int} im Sitzen resultierte in einem erhöhten $\dot{V}_{O_2 \text{ muskulär}}$, während sich ohne Berücksichtigung von P_{Int} keine signifikanten Positionsunterschiede zeigten.

Die begrenzte Stichprobengröße sowie die möglicherweise zu intensive Auslegung der leichten und moderaten Belastungsstufen könnten die Generalisierbarkeit der Ergebnisse einschränken. Insbesondere die Bestimmung der inneren Leistung im Stehen erscheint methodisch herausfordernd, da Aspekte wie Haltearbeit und vertikale Schwerpunktverschiebungen nicht vollständig erfasst wurden.

Implikationen für Wissenschaft und Praxis

Die gewonnenen Erkenntnisse legen nahe, dass das Fahren im Stehen hinsichtlich des Wirkungsgrades eine valide Alternative zur sitzenden Position darstellen könnte. Allerdings sollten diese Laborergebnisse mit Bedacht auf die Praxis übertragen werden. Der in realen Bedingungen erhöhte Luftwiderstand beim Stehen wurde in dieser Untersuchung nicht abgebildet. Daher erscheint das Fahren im Stehen primär für definierte Situationen wie steile Anstiege oder Abschnitte mit geringer Geschwindigkeit empfehlenswert.

Forschungsperspektiven

Zukünftige Forschungsarbeiten könnten von erweiterten Stichprobengrößen und methodischen Verfeinerungen bei der Bestimmung der inneren Leistung profitieren. Vielversprechende Ansätze wären die detaillierte Untersuchung der Beziehung zwischen negativer mechanischer Leistung und innerer Arbeit sowie die Analyse des Einflusses der Pedal-Smoothness auf Wirkungsgrad und Ermüdungserscheinungen. Auch die Integration weiterer biomechanischer Parameter könnte das Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen Körperposition, Belastungsintensität und Bewegungseffizienz vertiefen.

Quellenverzeichnis

- Ferguson, R. A., Ball, D., & Sargeant, A. J. (2002). Effect of muscle temperature on rate of oxygen uptake during exercise in humans at different contraction frequencies. *Journal of Experimental Biology*, 205(7), 981–987. <https://doi.org/10.1242/jeb.205.7.981>
- Harnish, C., King, D., & Swensen, T. (2007). Effect of cycling position on oxygen uptake and preferred cadence in trained cyclists during hill climbing at various power outputs. *European Journal of Applied Physiology*, 99(4), 387–391. <https://doi.org/10.1007/s00421-006-0358-7>