

Leistungssteigerung mit Hilfe eines biomechanischen Feedbacksystems im Radsport

Validierung im Einsatz auf der Straße
(AZ 070607/10)

Lorenz Assländer, Florian Jesse, Carolin Lang
& Björn Stapelfeldt (Projektleiter),

Universität Freiburg, Institut für Sport und Sportwissenschaft,
Abteilung Sportmotorik

Einleitung

Im Radsport wird der Vortrieb durch die Übertragung von Kräften auf das Pedal erzeugt. Dabei treten sowohl vortriebswirksame Kräfte F_e tangential zur Kurbelbewegung, als auch ungenutzte Kräfte F_u radial zur Kurbelbewegung auf. Mit einem Pedalkraftmesssystem wie dem Powerforce System der Radlabor GmbH (Stapelfeldt et al., 2007) können diese beiden Kraftkomponenten getrennt von einander gemessen werden (Abb. 1).

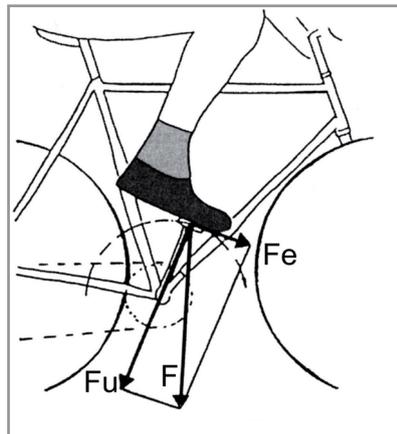


Abb.1. Die auf das Pedal wirkende Kraft F wird in eine vortriebswirksame Komponente F_e und eine unwirksame Komponente F_u zerlegt (Gressmann 2005).

Ein Ziel biomechanischer Analysen ist die Leistungssteigerung. Im Radsport soll dabei die dem Sportler bzw. der Sportlerin zur Verfügung stehende Energie durch Krafteinwirkung auf die Pedale so effektiv wie möglich in Vortrieb umgesetzt werden. Bei gleichem Energiebedarf kann so entweder die Geschwindigkeit erhöht oder bei gleicher Geschwindigkeit der Energiebedarf gesenkt werden.

Pedalkräfte im Radsport waren bereits Gegenstand vieler Arbeiten (Hull und Davis, 1980; Boyd et al., 1996; Hillebrecht et al., 1998; Henke et al., 2001; Korff et al., 2007; Álvarez und Vinyolas, 1996; Dorel et al., 2010). Auch wurden schon einige Studien über den Einsatz von Feedback Systemen im Radsport publiziert (Stapelfeldt et al.,

2008; Wolff und Strunz, 2008). Allerdings fanden sie bisher überwiegend im Labor statt. Eine Neuerung dieses Projektes ist der Einsatz eines Pedalkraftmesssystems mit Online-Feedback auf der Straße.

Eine weitere bisher nicht publizierte Erweiterung ist die online Rückmeldung der muskulären Pedalkraftkomponenten an die Sportlerin bzw. den Sportler. Hintergrund ist, dass eine ungenutzte Kraftkomponente F_u nicht automatisch bedeutet, dass der Athlet bzw. die Athletin diese Kraft auch mit den Muskeln aufbringt. Sie kann auch durch die Schwerkraft oder die Trägheitskräfte des Beines hervorgerufen werden und ist in diesem Sinne gar keine Kraft, die vom Körper unnötiger Weise aufgebracht wird. Um dem Athleten bzw. der Athletin also ein sinnvolles Feedback über die selbst aufgebrauchten Kräfte bieten zu können, ist es nötig Informationen über die rein muskuläre Kraftkomponente zur Verfügung zu stellen.

Durch invers-dynamische Berechnungen, basierend auf einem Modell der unteren Extremitäten können, die nicht muskulären Anteile (Schwerkraft und Trägheitskräfte) aus den gemessenen Pedalkräften heraus gerechnet werden (Hull und Jorge, 1985; Gregor et al., 1985; Kautz und Hull, 1993). Mit einem im Rahmen dieses Projektes erarbeiteten Algorithmus ist es nun auch möglich, die erzeugten muskulären Pedalkraftkomponenten den Athletinnen und Athleten online zurück zu melden. Dies bietet die Möglichkeit, beispielsweise durch eine Verringerung der ungenutzten Kräfte F_{u_mus} , die Trettechnik zu optimieren.

In der vorliegenden Studie wurde die Wirksamkeit des in Freiburg entwickelten Online-Feedback Systems mit Anzeige der muskulären Pedalkraftkomponente im Einsatz auf der Straße überprüft.

Methoden

Für den Feldtest wurde ein eigenes Messrad aufgebaut, das neben dem Powerforce Pedalkraft Messsystem mit SRM Kurbel und Tacho zur Leistungsmessung auch eine eigens konstruierte Halterung für ein Netbook am Lenker beinhaltet. Die Pedalkräfte wurden dabei per Funkübertragung an das Netbook gesendet und direkt für die Anzeige des Online-Feedbacks verwendet.



Abb.2. Das Messrad mit Netbook und Powerforce Messsystem.

Zunächst wurde eine Eingangsmessung im Labor zur Ermittlung grundsätzlicher anthropometrischer Daten wie Gewicht der Testperson, Schuh und Pedal sowie Segmentlängen des Beines durchgeführt. Nach Erhebung der physiologischen Leistungsparameter ($VO_2\text{max}$) sowie der Einstellung des Testrades auf die Größe der Testperson nahmen aus einem Pool von 16 Athletinnen bzw. Athleten 11 am Feldtest teil. Die Eingangsmessung diente auch der Erstellung eines Technikabbildes, um die Veränderungen durch das Feedback System besser einschätzen zu können.

Die einzelnen Personen der Probandengruppe waren entweder Lizenzfahrer bzw. -fahrerinnen oder Kaderathleten bzw. -athletinnen aus den Disziplinen Rennrad und Mountainbike im Alter zwischen 20 und 38 Jahren ($m = 31$) mit einer VO_2/kg zwischen 57,1 und 71,7 ($m = 65,4$).

Der Feldtest wurde mit einem vorgegebenen Belastungsprogramm auf einer leicht ansteigenden, kaum befahrenen Straße in der Nähe von Freiburg durchgeführt. Hierbei wurde versucht die einzelnen Messungen bei möglichst konstanten Umweltbedingungen durchzuführen. Gefahren wurden nach einem vorgegebenen Protokoll zuerst 5 submaximale Intervalle (ca. 240 W) und anschließend 3 maximale Intervalle, wobei zwischen Intervallen mit Feedback und Intervallen ohne Feedback gewechselt wurde. Alle Probanden fuhren für jedes Intervall die gleiche Distanz. Vorgegeben waren bei den submaximalen Intervallen Trittfrequenz und Gang, woraus sich unter Berücksichtigung des Gewichtes von Athlet bzw. Athletin und Rad die Leistung ergibt. Für die maximalen Intervalle wurde eine Obergrenze der Trittfrequenz festgelegt, schalten war in diesen Versuchen erlaubt. Gestartet wurde stets in festen Zeitintervallen, so dass jeweils gleiche Belastungs- und Erholungszeiten auftraten.

Aufnahme, Berechnung und Darstellung der Feedback Parameter wurde mit einer selbst entwickelten Software auf Basis der Programmierumgebung LabView durchgeführt. Die aufgenommenen Pedalkräfte wurden mit einer Funkübertragung auf ein Netbook übertragen. Die Darstellung aktualisierte sich jede Umdrehung und hatte softwarebedingt etwa 500 ms Verzögerung.

Der Probandengruppe wurden zwei Visualisierungen zur Verfügung gestellt, wobei die eine überwiegend bei den submaximalen Intervallen genutzt werden sollte, die andere vor allem bei den maximalen. Das rechte Diagramm zeigt das Verhältnis von tangentialer Pedalkraftkomponente zur radialen Pedalkraftkomponente (Wirkungsgrad, rote Linie) bezogen auf den Kurbelzyklus (oben: oberer Totpunkt, rechts: Druckphase, unten: unterer Totpunkt, links Hubphase). Darüber hinaus geben die Zahlen Aufschluss, wie groß die vortriebswirksame muskuläre Pedalkraftkomponente F_{e_mus} im Mittel in den jeweiligen Sektoren ist. Die blaue Linie kennzeichnet den für das linke Diagramm ausgewählten Teilbereich. Dieses Diagramm beinhaltet eine Vektordarstellung und gibt den Probanden Aufschluss darüber, in welche Richtung die eingeleitete Kraft gelenkt werden muss, um einen ökonomischeren Tritt, also eine Erhöhung der Tangentialkraft, bzw. Reduktion der ungenutzten Komponente, zu erreichen.

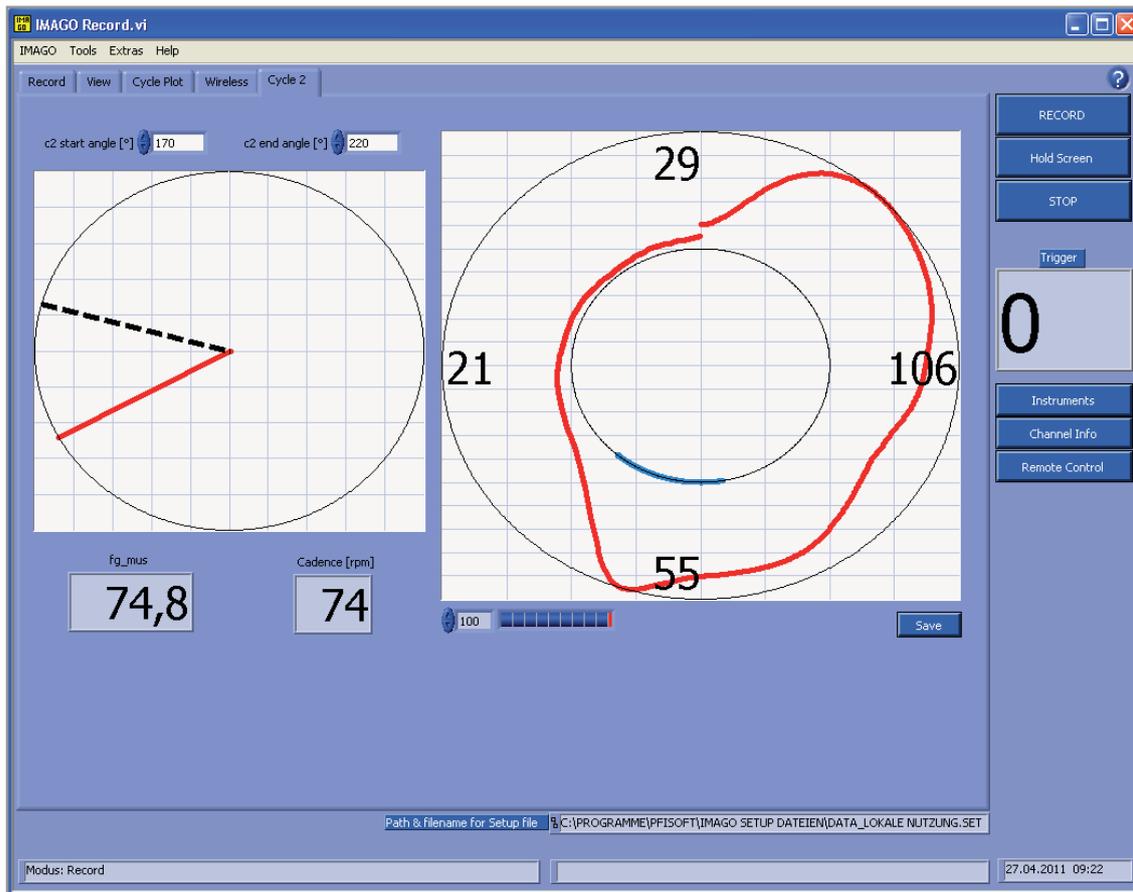


Abb. 3. Die Darstellung des Online-Feedbacks auf dem Netbook.

Zwei Vektoren (Linien) dienen als Orientierung. Die schwarze Linie zeigt in die Zielrichtung, die rote die aktuell erzeugte Richtung der eingeleiteten muskulären Kraft. Ziel ist es nun für die Athleten, die Kraft in die optimale Richtung zu lenken, also die rote Linie in Deckung mit der schwarzen zu bringen. Zu beachten ist hierbei, dass es sich um eine berechnete Größe unter Berücksichtigung der Trägheits- und Schwerkraftkomponente handelt, die sich nicht mit dem taktilen Gefühl der Kraftübertragung am Fuß deckt.

Für die Auswertung wurden Pedalkraftkomponenten und Herzfrequenz aufgezeichnet. Aus diesen Werten wurden verschiedene Parameter wie Leistung, Trittfrequenz, Pedalkraftkomponenten, sowie Effizienzparameter berechnet.

Ergebnisse

Durch das visuelle Feedback der muskulären Pedalkraftkomponente konnte in dem Feldtest eine signifikante Veränderung der Tritttechnik festgestellt werden. Die veränderte Tritttechnik führte bei den submaximalen Intervallen im Mittel zu einer um bis zu 26 N größeren vortriebswirksamen Pedalkraftkomponente F_e im Feedback-Bereich zwischen 170° und 220° , zu einer Verringerung der ungenutzten Pedalkraftkomponente F_u um bis zu 19 N und zu einer Erhöhung des mechanischen Wirkungsgrades FoE von 61,8 % auf 69,8 % über den gesamten Kurbelzyklus.

Submaximale Intervalle

Bei den submaximalen Intervallen zeigt sich bei den Intervallen mit Feedback eine um bis zu 21 N geringere Kraft F_e in der Druckphase, während in der Zugphase die Kraft um bis zu 26 N höher ist. Die ungenutzte Kraftkomponente F_u nimmt im Bereich zu Beginn und Ende der Druckphase um 25 N bzw. 44 N ab. Im Bereich des Feedbacks kann ebenfalls eine deutliche Reduktion der ungenutzten Kraftkomponente um ca. 43 N beobachtet werden. Im Mittel ist die ungenutzte Kraftkomponente mit Feedback um 19 N signifikant niedriger als ohne Feedback. Alle beschriebenen Unterschiede waren statistisch signifikant.

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass zum einen die ungenutzte muskuläre Kraftkomponenten reduziert und somit der mechanische Wirkungsgrad verbessert wurde. Zum anderen gab es eine Umverteilung der verrichteten Arbeit innerhalb des Kurbelzyklus, was zu einer Entlastung im Bereich der Hauptvortriebsphase (der Druckphase) führt.

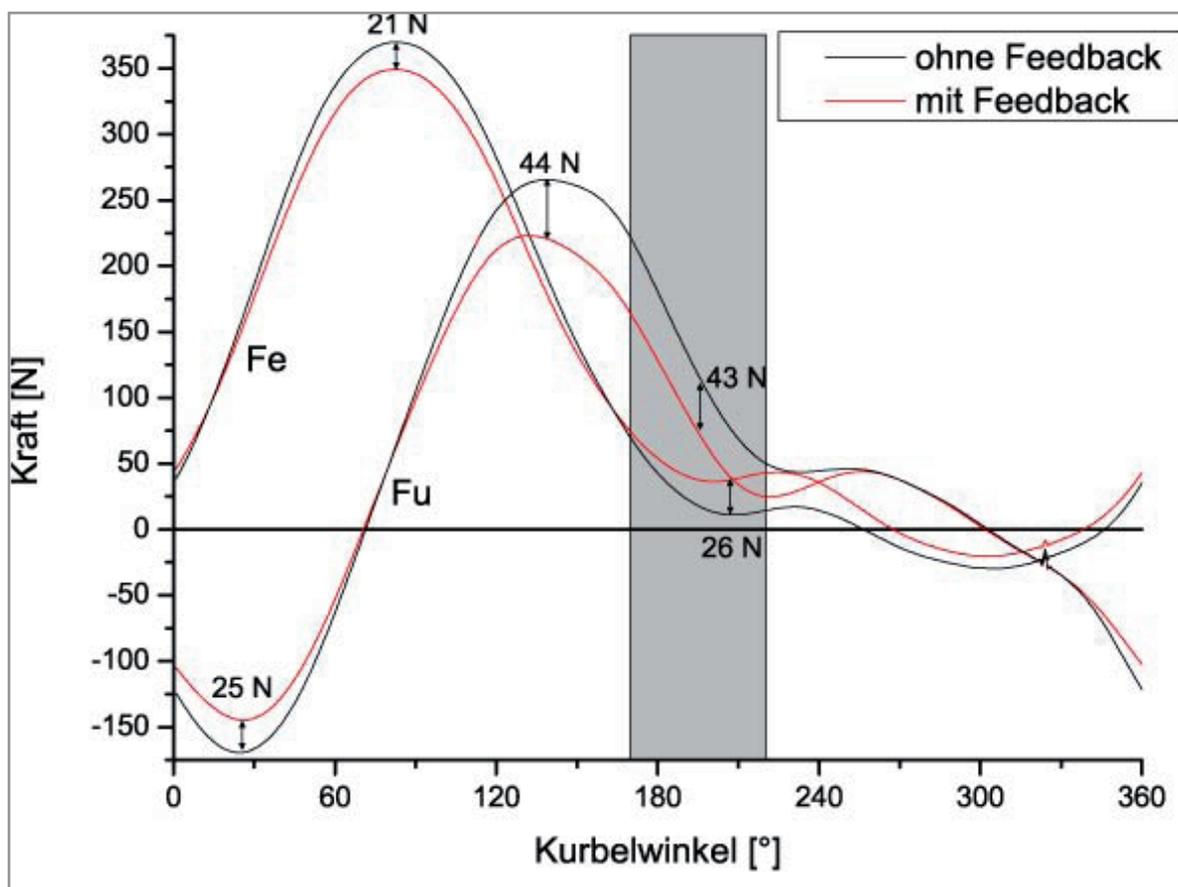


Abb. 4. Durchschnittlicher Kraftverläufe für F_e und F_u bei submaximalen Intervallen. In dem grau markierten Bereich (170 bis 220 Grad) wurde das Online-Feedback dargestellt.

Maximale Intervalle

Bei den mit maximaler Intensität gefahrenen Intervallen zeigt sich sowohl bei F_e als auch bei F_u eine Verringerung der Kräfte, ähnlich wie bei den submaximalen Intervallen. Die um bis zu 28 N niedrigere Kraft von F_e in der Druckphase kann jedoch nicht vollständig durch eine höhere Kraft in der Zugphase ausgeglichen werden (9 N), so dass die Gesamtkraft und somit die Leistung über einen Kurbelzyklus um durchschnittlich 9 N geringer ist.

Die Verringerung der ungenutzten Kraftkomponente F_u ist in dem Feedback Bereich mit ca. 43 N in gleicher Stärke wie bei den submaximalen Intervallen möglich, nur zu Beginn der Druckphase sind die Unterschiede geringer. Insgesamt wird F_u über den Kurbelzyklus bei den Intervallen mit Feedback um 16 N signifikant geringer.

Mechanischer Wirkungsgrad

Der mechanische Wirkungsgrad der Intervalle mit Feedback, ist sowohl bei den reinen Pedalkräften, als auch bei den muskulären Pedalkraftkomponenten für die submaximalen und maximalen Intervalle signifikant größer als bei den Intervallen ohne Feedback. Die höhere Effizienz wird dabei hauptsächlich im dem Feedback Bereich zwischen 170° und 220° Grad sowie zu einem geringeren Teil in der Hubphase erzielt. Während der Druckphase ist nur bei den submaximalen Intervallen eine signifikante Veränderung feststellbar, da hier die Effizienz auch ohne Feedback bereits sehr hoch (nahe 100 %) ist.

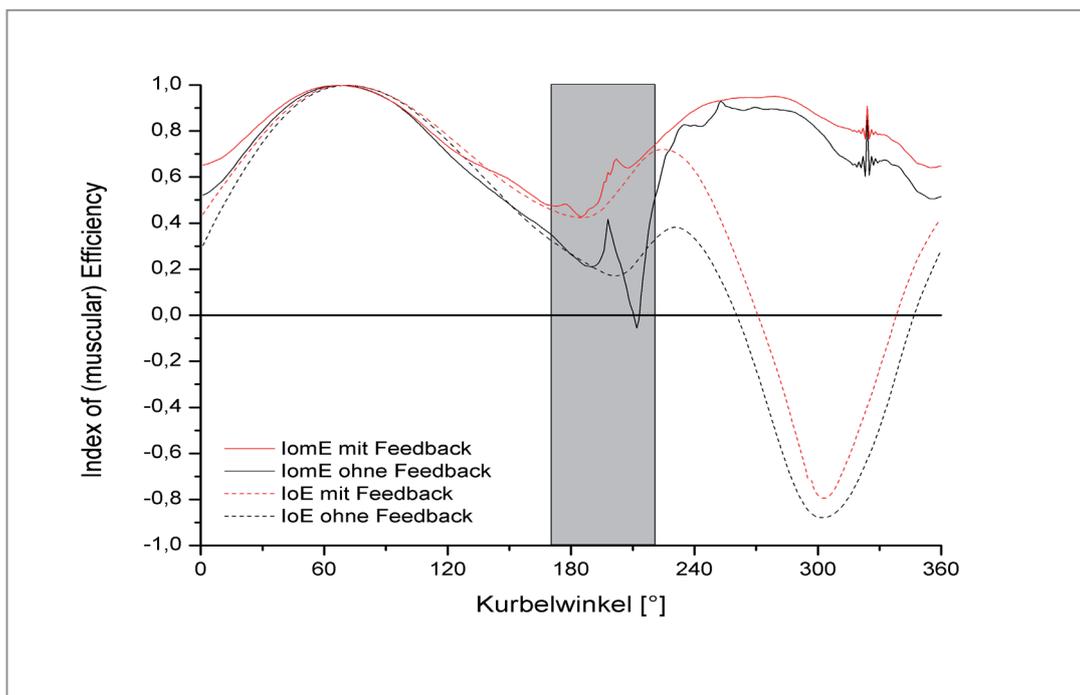


Abb. 5. Mechanischer Wirkungsgrad bei submaximalen Intervallen mit (rot) und ohne Feedback (schwarz). Die gestrichelte Linie gibt den Wirkungsgrad der gemessenen Pedalkraftkomponenten an, die durchgezogene Linie den Wirkungsgrad der muskulären Pedalkraftkomponenten.

Physiologische Belastung und Herzfrequenz

Eine geringere physiologische Belastung, ausgedrückt durch die Herzfrequenz, ließ sich in dem Feldtest, ebenso wie eine Erhöhung der Leistung bei maximaler Belastung, nicht nachweisen. Dies ist auf Grund der neuen, ungelerten Bewegung nachvollziehbar, da diese zum einen eine größere Variabilität zwischen den Versuchen (eigene Experimente) aufweisen, zum anderen auf Grund des neuen Bewegungsmusters eine schlechtere inter- und intramuskuläre Koordination zur Folge haben.

Diskussion

Im Gesamtergebnis war eine Erhöhung der maximalen Leistung durch ein Feedback nicht möglich. Die Werte einzelner Probanden zeigen aber durchaus eine solche Leistungssteigerung. Wir vermuten, dass dies an unterschiedlichen Vorerfahrungen liegt, da diese Athleten entweder schon ein längerfristiges Feedbacktraining in einer anderen Studie absolviert hatten oder im Training ein aktives Ziehen am Pedal integriert haben.

Eine frühere Studie (Stapelfeldt et al. 2007) hat gezeigt, dass es möglich ist durch ein Feedback-Training die Tritttechnik zu verändern. Allerdings konnte hier keine messbare Leistungssteigerung erzielt werden. Auf Grund eigener Beobachtungen und Gesprächen mit Athleten wissen wir, dass Feedback Training oder Training mit Ziehen am Pedal häufig als Ersatz für konventionelles Krafttraining auf dem Rad eingesetzt wird. Die Vermutung ist, dass es aber zusätzlich zu diesem durchgeführt werden muss, da sonst im Bereich der Druckphase weniger Kraft aufgebaut wird, so dass dabei nur eine Umverteilung stattfindet.

Zusammenfassung

Die Probandengruppe war in der Lage das Online-Feedback umzusetzen und die tangentiale Kraftkomponente wie gewünscht in der Zugphase zu erhöhen sowie die radiale Kraftkomponente zu reduzieren. Es fand eine Verlagerung der vortriebswirksamen Kraft von der Druckphase in die Zugphasen und somit eine gleichmäßigere Kraftausübung über den Kurbelzyklus statt. Dies führt zum einen zu einer anderen muskulären Belastung, was speziell in intensiven Rennphasen genutzt werden kann, zum anderen kann hierdurch eine gleichmäßigere Vortriebserzeugung erzielt werden, was vor allem im Bereich des MTB zu einer besseren Traktion führen kann.

Literatur

- Álvarez, G. & Vinyolas, J. (1996). A New Bicycle Pedal Design for On-Road Measurements of Cycling Forces. *Journal of applied biomechanics*, 12, 130-142.
- Boyd, T., Hull, M. L. & Wootten, D. (1996). An improved accuracy six-load component pedal dynamometer for cycling. *Journal of biomechanics*, 29, 1105-1110.
- Dorel, S., Ccouterier, A., Lacour, J.-R., Vandewalle, H., Hautier, C., & Hug, F. (2010). Force–Velocity Relationship in Cycling Revisited: Benefit of Two-Dimensional Pedal Forces Analysis. *Medicine and science in sports and exercise*, 42, 1174-1183.
- Gregor, R. J., Cavanagh, P. R. & LaFortune, M. (1985). Knee flexor moments during propulsion in cycling – a creative solution to lombard's paradox. *Journal of biomechanics*, 18, 307-316.
- Gressmann, M. (2005). *Fahrradphysik und Biomechanik*. S. 195. Bielefeld: Delius Klasing.
- Henke, T., Monfeld, C. & Heck, H. (2001). Trettechnik – Einzelzyklusdarstellung im Radsport. *BISp-Jahrbuch 2001*.
- Hillebrecht, M., Schwirtz, A., Stapelfeld, B., Stockhausen, W. & Bührle, M. (1998). Trittechnik im Radsport: Der „runde Tritt“ – Mythos oder Realität?. *BISp Forschungsbericht*.
- Hull, M. L. & Davis, R. R. (1980). Measurement of pedal loading in bicycling. *Journal of biomechanics*, 14, 843-856.
- Hull, M. L. & Jorge, M. (1985). A method of biomechanical analysis of bicycle pedaling. *Journal of biomechanics*, 18, 631-644.
- Kautz, S. A. & Hull, M. L. (1993). A theoretical basis for interpreting the force applied to the pedal in cycling. *Journal of biomechanics*, 26, 155-165.
- Korff, T., Romer, L. M., Mayhew, I. & Martin, J. C. (2007). Effect of Pedaling Technique on Mechanical Effectiveness and Efficiency in Cyclists. *Medicine and science in sports and exercise*, 39, 475.
- Stapelfeldt, B., Mornieux, G. & Gollhofer, A. (2007). Wirkung von Feedback-Training im Radsport auf physiologische und biomechanische Parameter. In Bundesinstitut für Sportwissenschaft (Hrsg.), *BISp-Jahrbuch Forschungsförderung 2006/07* (S. 175-179). Köln: Sportverlag Strauß.
- Stapelfeldt, B., Mornieux, G., Herms, M., Kaulfuß, C. & Gollhofer, A. (2008). Wirkung von Feedback-Training im Radsport auf physiologische und biomechanische Parameter. *BISp Forschungsprojekt VF07_05_02_2005*.
- Wolff, R. & Strunz, J. (2008). Biomechanische Leistungsdiagnostik und Feedback-training zur Optimierung der Trettechnik im Elitebahnradspport. In Bundesinstitut für Sportwissenschaft (Hrsg.), *BISp-Jahrbuch Forschungsförderung 2008/09* (S. 233-237). Köln: Sportverlag Strauß.