

# Leistungssteigerung mit Hilfe eines biomechanischen Feedbacksystems im Radsport -

## Validierung im Einsatz auf der Straße

(AZ 070607/10)

Lorenz Aszländer, 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.

Ein Ziel biomechanischer Analysen ist die Leistungssteigerung. Im Radsport soll dabei die dem Athleten 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. Für diesen Zweck sind neben der Veränderung innerhalb des Systems Athlet-Rad, beispielsweise durch eine Veränderung der Sitzposition aus biomechanischer Sicht vor allem Verbesserungen der Trettechnik durch gezieltes Training sinnvoll. Zu diesem Zweck können Hilfsmittel, wie beispielsweise eine direkte Rückmeldung von Technikparametern (z.B. die auf die Pedale übertragenen Kräfte) an die Athleten eingesetzt werden (online Feedback).

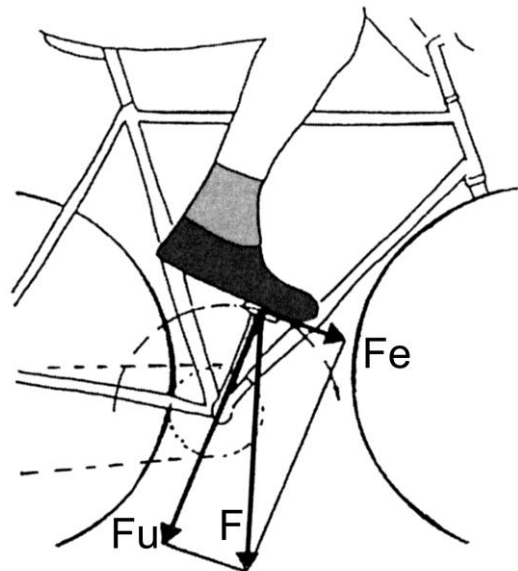


Abb 1: Die auf das Pedal wirkende Kraft  $F$  wird in eine vortriebswirksame Komponente  $F_e$  und eine unwirksame Komponente  $F_u$  zerlegt [Gressmann 2005].

Pedalkräfte im Radsport waren bereits Gegenstand vieler Arbeiten (Hull und Davis 1980, Boyd et al. 1996, Hillebrecht et al. 1998, Henke 2001 et al., 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, Mornieux et al. 2008). Allerdings fanden die Untersuchungen bisher überwiegend im Labor statt. Da Anpassungen der Trettechnik neben einer neuronalen vor allem auch physiologische und muskuläre Anpassungen erfordern, ist es jedoch nötig, Feedbacksysteme in den Trainingsalltag und somit in das Training auf der Straße zu integrieren, da nur hier ausreichende Umfänge gefahren werden. Sowohl technisch, als auch aus biomechanischer und trainingsmethodischer Sicht stellen sich hier neue Herausforderungen. In diesem Projekt erfolgten die technische Einführung eines Pedalkraftfeedbacks im Einsatz auf der Straße, sowie die Erprobung der Umsetzbarkeit eines komplexen Feedbacks unter Test- und Trainingsbedingungen auf der Straße.

Eine weitere bisher nicht publizierte Erweiterung mit sehr innovativem Potenzial für ein Techniktraining ist die online Rückmeldung von *muskulären Pedalkraftkomponenten* an die Athleten. In der resultierenden Pedalkraft stecken immer drei Komponenten unterschiedlicher Ursache: muskuläre, Schwerkraft bedingte und durch Massenträgheit erzeugte Kraft (Kautz et al. 1993).

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 et al. 1993). Mit einem im Rahmen dieses Projektes angepassten und vereinfachten Algorithmus, ist es nun auch möglich, die erzeugten muskulären Pedalkraftkomponenten den Athleten online mit nur sehr geringer Zeitverzögerung zurück zu melden. Dies bietet die Möglichkeit, beispielsweise durch eine Verringerung der ungenutzten muskulären Kräfte ( $F_{u\_mus}$ ), die Trettechnik zu optimieren.

Da eine in  $F_u$ -Richtung wirkende Kraft (= ungenutzte, da am Vortrieb nicht beteiligte Kraftkomponente) nicht automatisch bedeutet, dass der Athlet diese Kraft auch mit seinen Muskeln aufbringt, ist es auch nicht notwendig, diese Komponente möglichst gering zu halten.  $F_u$  kann neben der muskulären Ursache 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 also ein sinnvolles Feedback über die von ihm selbst aufgebrauchten Kräfte bieten zu können, ist es nötig Informationen über die rein muskuläre Kraftkomponente zur Verfügung zu stellen.

Da mit Hilfe eines solchen Modells viele Feedback Parameter möglich sind (vgl. Korff et al. 2007), wurden in Vorexperimenten mehrere Größen in die Feedback Software integriert und getestet. Darüber hinaus wurde in einer weiteren Vorstudie ein Labortest durchgeführt, um zum einen die Leistungsfähigkeit der Probanden zu überprüfen und zum anderen ein biomechanisches Abbild der Trettechnik ohne Feedback zu erstellen.

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

## Methoden

### *Probanden*

Der Eingangstest wurde mit N=17 Probanden durchgeführt, von denen 11 erfolgreich am Feldtest teilnahmen. Diese waren entweder aktive Lizenzfahrer oder Kaderathleten aus den Disziplinen Rennrad und Mountainbike.

Probanden (n=11)	AM	Stabw	Range
Alter (Jahre)	30,5	4,19	24/38
Größe (m)	1,83	0,06	1,72/1,91
Gewicht (kg)	73,5	6,14	60,2/81
VO <sub>2</sub> max (ml/min/kg)	64,5	5,07	57,1/71,7

Tabelle 1: Anthropometrische und physiologische Daten der Probanden. AM:= arithmetisches Mittel; Stabw:= Standardabweichung.

### *Eingangsmessung*

In einer Eingangsmessung im Labor wurden die für das Modell benötigten Parameter erfasst (Gewicht von: Probanden, Schuhen und Pedalen; Segmentlängen von: Verbindung Knöchel zu Pedalachse, Unterschenkel und Oberschenkel). Die Geometrie der Sitzposition wurde erfasst und jeweils auf Ergometer und Messrad

übertragen. Das anschließende Messprotokoll diente als Abgleich mit der Tritttechnik im Feldtest, der Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Probanden und um die Kinematik der Beinbewegung für die invers dynamischen Berechnungen zu erfassen. Die Messung erfolgte bei drei 6 Minuten Intervallen mit unterschiedlichen Trittfrequenzen (60, 85, 110 U/min) bei 250W Leistung, von denen die letzten 4 Minuten in die Auswertung eingingen. Zur Berechnung physiologischer und biomechanischer Effizienzparameter wurde die Sauerstoffaufnahme erfasst (Jäger, OxyconPro) und parallel Pedalkraftdaten, sowie der Sprunggelenkwinkel eines Beines aufgezeichnet. Aus dem Sprunggelenkwinkel wurde unter der Annahme einer fixierten Hüfte die Beinbewegung berechnet, welche in die Berechnung der passiven Anteile der Pedalkräfte (Gravitation und Trägheit) einging. Abschließend wurde die maximale Sauerstoffaufnahme ( $VO_{2max}$ ) als Maß für die physiologische Leistungsfähigkeit mit Hilfe eines Ausbelastungstests (Rampenprotokoll; Einfahren: 360s 150W; 10W Steigerung alle 10s) mit gleichzeitiger Atemgasanalyse (Jäger, OxyconPro) bestimmt.

### *Feldtest*

Für den Feldtest wurde ein Messrad aufgebaut, ausgestattet mit einem Powerforce Pedalkraft Messsystem, einem SRM-System zur Leistungsmessung und einer Halterung für ein Netbook am Lenker. Die Pedalkräfte wurden dabei per Funkübertragung an das Netbook gesendet und direkt für die Berechnung und Anzeige des Online-Feedbacks verwendet.

Der Feldtest wurde mit einem vorgegebenen Belastungsprogramm auf einer leicht ansteigenden, wenig befahrenen Straße durchgeführt. Hierbei wurde darauf geachtet, 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 randomisiert 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 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.



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

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

Den Athleten 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 in Abb.3 zeigt das Verhältnis von tangentialer muskulärer Pedalkraftkomponente zur radialen (muskulärer 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 die Darstellung im linken Diagramm ausgewählten Teilbereich.

Der Bereich von 170° bis 220° wurde gewählt, da in diesem Bereich häufig zu früh am Pedal nach „oben“ gezogen wird, wobei ein nach „hinten“ Ziehen mit

anschließendem Übergang in ein aktives Heben in dieser Phase vortriebswirksam ist. Das im Feedback dargestellte Diagramm (Abb.3 links) beinhaltet eine Vektordarstellung und gibt dem Athleten Aufschluss, 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. Zwei Vektoren (Linien) dienen als Orientierung. Die schwarze Linie zeigt in die Zielrichtung (also in tangentielle Richtung), 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, da das taktile Gefühl sich aus der erzeugten gesamten Pedalkraft ergibt und die angezeigte Kraft nur die muskuläre Pedalkraft beinhaltet..

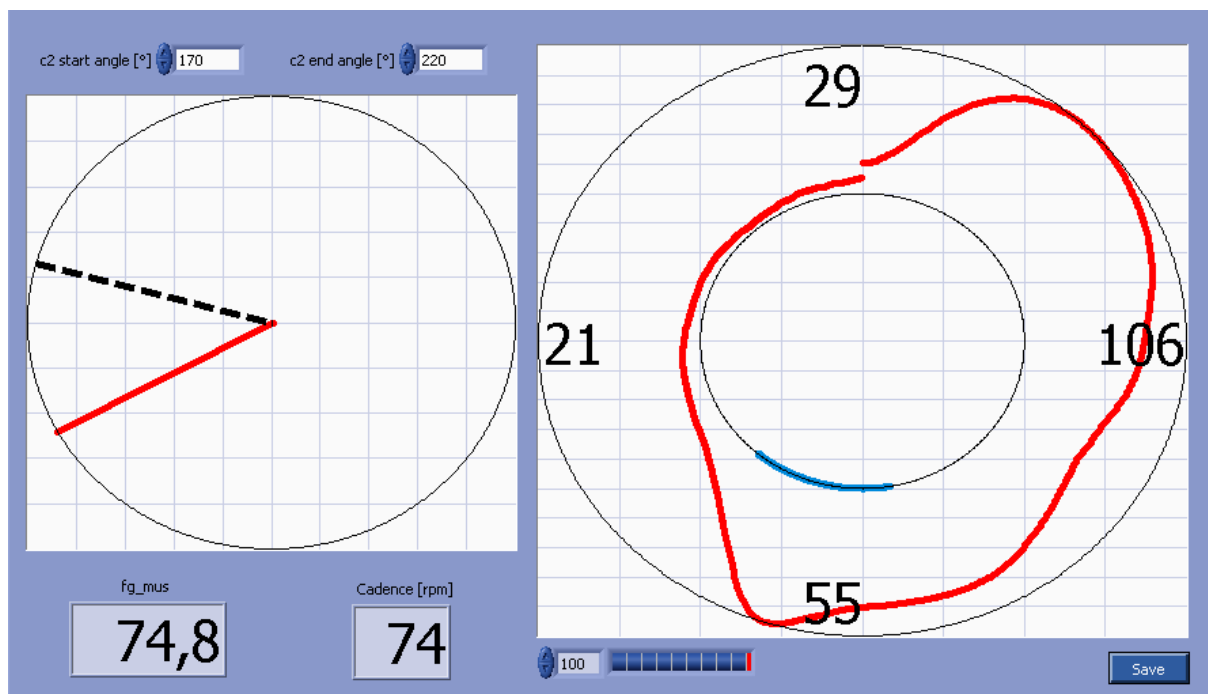


Abb.3: Die Darstellung des Online-Feedbacks auf dem Netbook. Beschreibung siehe Text.

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. Im Folgenden sind, falls nicht explizit angegeben, die Ergebnisse der gemessenen Pedalkräfte dargestellt, da sie sich von den Ergebnissen mit den muskulären Kräften decken, jedoch nicht die Fehler des Modells zur Berechnung der muskulären Kräfte beinhalten. 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  $170^\circ$  und  $220^\circ$ , zu einer Verringerung der 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.

### *Eingangsmessung*

Die Eingangsmessung zeigte die bereits aus der Literatur bekannte Abnahme der physiologischen Effizienz (vortriebswirksame Leistung bezogen auf den aus den Atemgasen berechneten Energieumsatz; Gross Efficiency) bei zunehmender Trittfrequenz. Diese geht auch mit einer Steigerung der ungenutzten muskulären Pedalkraftkomponente  $PvF_{u\_mus}$  einher (siehe Abb. 4).

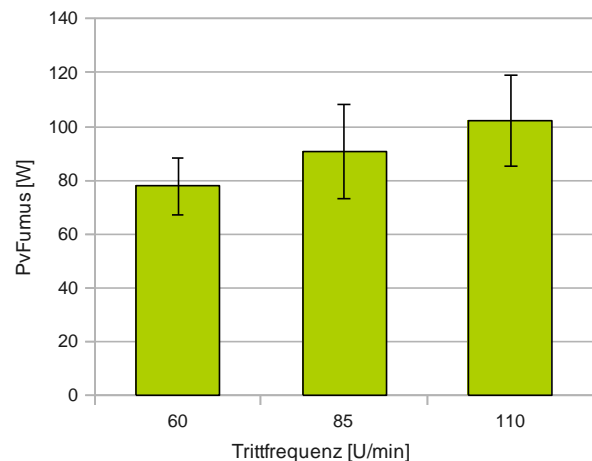


Abb. 4:  $PvF_{u\_mus}$  bei Trittfrequenzen 60, 85 und 110 U/min

$PvF_{u\_mus}$  steht für die virtuelle Leistung der muskulären Pedalkraftkomponente  $F_{u\_mus}$  und berechnet sich aus  $F_{u\_mus}$  multipliziert mit der Bewegungsgeschwindigkeit des Pedals (Eine Umrechnung auf eine virtuelle Leistung ist nötig, da sich die Gesamtkraft bei zunehmender Trittfrequenz reduziert). Ein engerer Zusammenhang zwischen der auf eine virtuelle Leistung umgerechneten Pedalkraftkomponente  $F_{u\_mus}$  und der Gross Efficiency konnte nicht gefunden werden. Dies ist vor allem im Hinblick auf die Wahl der Feedbackparameter in zukünftigen Studien ein wichtiges Ergebnis (siehe Diskussion).

### Submaximale Intervalle

Bei den submaximalen Intervallen zeigt sich bei der Bedingung 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.

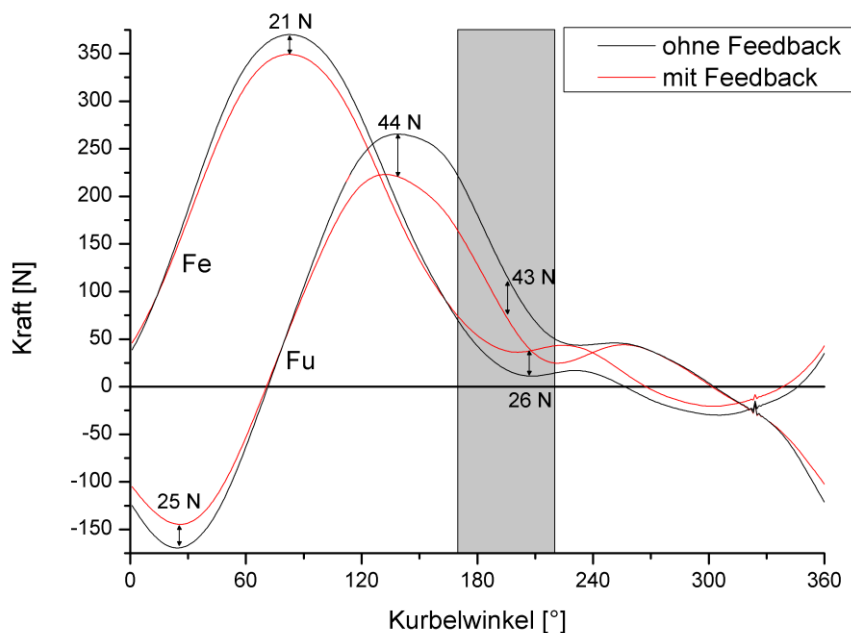


Abb.5: Durchschnittlicher Kraftverläufe für  $F_e$  und  $F_u$  bei submaximalen Intervallen. In dem grau markierten Bereich (170 bis 220 Grad) wurde das Online-Feedback dargestellt.

### Maximale Intervalle

Bei den mit maximaler Intensität gefahrenen Intervallen zeigt sich in der Bedingung mit Feedback 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 gemessenen Pedalkräften, als auch bei den berechneten muskulären Pedalkraftkomponenten für die submaximalen und maximalen Intervalle signifikant größer als bei den Intervallen ohne Feedback. Die höhere Effizienz wird dabei hauptsächlich in dem Feedback Bereich zwischen 170° und 220° Grad sowie zu einem kleinen 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.

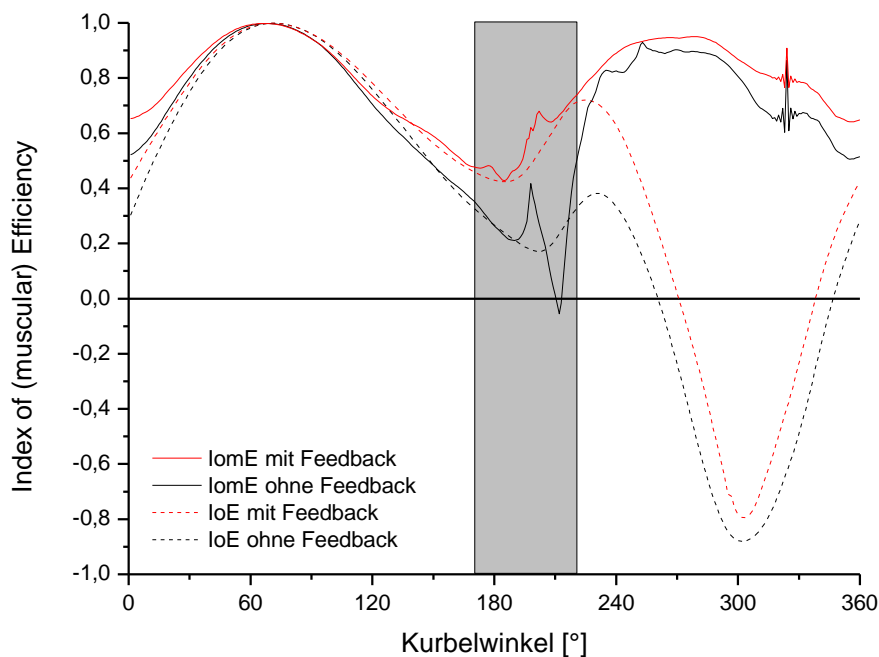


Abb.6: Mechanischer Wirkungsgrad bei submaximalen Intervallen mit (rot) und ohne Feedback (schwarz). Die gestrichelte Linie gibt den Wirkungsgrad der gemessenen

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. Dies könnte an unterschiedlichen Vorerfahrungen liegen, da diese Athleten entweder in der Vergangenheit ein längerfristiges Feedbacktraining absolviert hatten oder im täglichen Training ein aktives Ziehen am Pedal integriert haben.

Verschiedene Testmessungen im Vorfeld der Studie und die Studie selbst lassen keinen eindeutigen Schluss zu, ob die Komponente  $F_{u\_mus}$  der am besten geeignete Parameter für ein biomechanisches Online Feedback zur Verbesserung der Effizienz ist. Die Ergebnisse der Eingangsmessung liefern darüber hinaus Hinweise, dass die muskulären Effizienzparameter zwar plausibel, jedoch nicht in Zusammenhang mit der gemessenen physiologischen Effizienz stehen. Endgültige Schlüsse können auf Grund der Ergebnisse jedoch nicht gezogen werden. Für den praktischen Zugang wurde in dieser Studie dennoch dieser muskuläre Parameter gewählt, da hier zunächst die Nachvollziehbarkeit und Umsetzbarkeit vorgegebener Veränderungen im Vordergrund stand. Darüber hinaus ist in der Literatur auch kein anderer biomechanischer Parameter bekannt, der die physiologische Effizienz erklärt. Um zu testen, welcher Parameter und welche Form des Feedbacks am besten geeignet sind, ist eine systematische Analyse und eine langfristig angelegte Zusammenarbeit mit Athleten und Trainern notwendig, wie sie im Rahmen dieser Studie nicht möglich war. Die hier durchgeführte Studie hat allerdings durch die

Weiterentwicklung der Technik und das Lösen vieler kleiner Probleme speziell im Bezug auf die Darstellung der Technikparameter die Voraussetzung hierfür geschaffen und erste Erfahrungen im Einsatz auf der Straße geliefert.

Das Feedback bei maximalen Intervallen hat bei zwei Kaderathleten deutliche Veränderungen gezeigt. Interessant war in diesem Zusammenhang vor allem die Aussage eines Fahrers, der von einem „Aha Erlebnis“ bezogen auf die Möglichkeit durch zusätzliches Ziehen mehr Vortrieb zu erzeugen sprach. Hier ist zu betonen, dass eine quantitative Rückmeldung über den erzeugten Vortrieb beim Ziehen eine wesentliche Voraussetzung für die Athleten ist, das Potential des zusätzlichen Vortriebes zu erfahren. Häufig erfolgt ein Ziehen beispielsweise zu früh im Kurbelzyklus und erzeugt somit eine Große Kraft  $F_u$  im Bereich des unteren Totpunktes. In einem solchen Fall wäre eine subjektiv empfundene große Kraft nicht vortriebswirksam und somit kontraproduktiv.

Die Diskussion mit weiteren Athleten und Beobachtungen aus anderen Experimenten lassen darüber hinaus vermuten, dass im Training die für das „Ziehen“ am Pedal zuständige Muskulatur häufig vernachlässigt wird und dann bei hohen Belastungen in Anspruch genommen und überfordert wird. Dies wird insbesondere durch Aussagen von Fahrern gestützt, die von Schmerzen in den betroffenen Muskelgruppen berichteten, die während und nach den ersten Rennen der Saison auftraten. Das gezielte Training im Bereich des Ziehens ist somit eine vielversprechende Anwendungsmöglichkeit der im Rahmen des Forschungsprojektes verwendeten und weiterentwickelten Technik.

## **Zusammenfassung**

Die Studie zeigte, dass Probanden in der Lage sind, ein Online-Feedback - hier der muskulären Kraftkomponente der mit dem Powerforce-System gemessenen Pedalkräfte - beim Training auf der Straße umzusetzen und die tangential Kraftkomponente 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 zu einer anderen muskulären Belastung, was speziell in intensiven Rennphasen genutzt werden kann.

Eine wesentliche Neuerung in der Studie war die Implementierung eines biomechanischen Modells in ein online Feedback für Athleten, das es ermöglichte, den muskulären Anteil der von den Athleten erzeugten Pedalkräfte von den passiven Kräften (Gewichtskraft und Trägheitskräfte der Beine) zu trennen und darzustellen. Die Studie zeigte, dass das Prinzip funktioniert und somit erweiterte biomechanische Feedback Parameter im Training verwendet werden können.

Die Studie lässt offen, welche biomechanischen Parameter am besten geeignet sind, um die Trettechnik von Athleten im Hinblick auf eine höhere Effizienz zu verbessern. Für das Training zusätzlicher Muskelgruppen zur Vortriebserzeugung, speziell im Bereich des Ziehens oder des unteren Totpunktes lässt sich jedoch ein großes Potential des Systems erkennen. Biomechanisches Online Feedback im Radsport findet jedoch bisher im Trainingsalltag von Spitzenathleten noch wenig Verwendung. Die Studie hat auch hier durch die Zusammenarbeit mit Kaderathleten dazu beigetragen, den Einsatz dieser Technik (Powerforce-System in Kombination mit Feedback-Software) im Training von Spitzenathleten voran zu treiben.

## Literaturverzeichnis

- Álvarez, G. und 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 ML, Wootten D. (1996) An improved accuracy six-load component pedal dynamometer for cycling. *J. Biomechanics*. **29**, 1105 - 1110.
- Dorel S., Ccouturier A., Lacour J.-R., Vandewalle H., Hautier C., and Hug F. (2010) Force–Velocity Relationship in Cycling Revisited: Benefit of Two-Dimensional Pedal Forces Analysis. *Medicine & Science in Sports & 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. *J. Biomechanics*. **18**, 307 - 316.
- Gressmann, M. (2005) *Fahrradphysik und Biomechanik*. S. 195. Delius Klasing. Bielefeld.
- 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. and Davis R. R. (1980) Measurement of pedal loading in bicycling. *J. Biomechanics*. **14**, 843 - 856.
- Hull M.L. and Jorge M. (1985) A method of biomechanical analysis of bicycle pedalling. *J. Biomechanics*. **18**, 631 - 644.
- Kautz, S. A. und Hull, M. L. (1993) A theoretical basis for interpreting the force applied to the pedal in cycling. *J. Biomechanics*. **26**, 155 - 165.
- Korff T., Romer L. M., Mayhew I. and Martin J. C. (2007) Effect of Pedaling Technique on Mechanical Effectiveness and Efficiency in Cyclists. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. **39**, 475.
- Stapelfeldt B., Mornieux G., Herms M., Kaulfuß C. & Gollhofer, A. (Projektleiter) (2008) Wirkung von Feedback-Training im Radsport auf physiologische und biomechanische Parameter. *BISp Forschungsprojekt VF07\_05\_02\_2005*.
- Stapelfeldt B., Mornieux, G. & Gollhofer, A. (Projektleiter) (2007) Wirkung von Feedback-Training im Radsport auf physiologische und biomechanische Parameter. *BISp-Jahrbuch – Forschungsförderung 2006/07*.
- Wolff, R. (Projektleiter) & Strunz, J. (2008) Biomechanische Leistungsdiagnostik und Feedbacktraining zur Optimierung der Trettechnik im Elitebahnrad sport. *BISp-Jahrbuch - Forschungsförderung 2008/09*.