

Effekte der Trittfrequenz auf das Laktatverhalten bei Dauerbelastungen auf dem Fahrradergometer

Belegarbeit zur Erlangung des B-Trainerscheins im Radsport

Alexander Goldbach

E-Mail: al.gold@gmx.de

Inhalt

1	Einleitung:.....	3
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Die Trittfrequenz beim Radfahren.....	4
2.2	Fragestellung der vorliegenden Arbeit.....	6
3	Probanden und Methoden	7
3.1	Methoden und Datenerhebung.....	7
3.1.1	Eingangsuntersuchung.....	8
3.1.2	Schwellenbestimmung.....	8
3.1.3	Dauerbelastung	9
4	Ergebnisse.....	10
4.1	Ergebnisse der Eingangsuntersuchung.....	10
4.2	Herzfrequenzverhalten während der Dauerbelastung	10
4.3	Laktatverhalten während der Dauerbelastung.....	12
4.4	Herzfrequenzverhalten der Dauerbelastung im Vergleich zu den Herzfrequenzen an der IAS.....	13
4.5	Laktatverhalten der Dauerbelastung im Vergleich zu den Laktatwerten an der IAS	14
5	Diskussion	14
5.1	Herzfrequenzverhalten	14
5.1.1	Herzfrequenzverhalten während der Dauerbelastung.....	15
5.1.2	Herzfrequenz bei verschiedenen Trittfrequenzen	15
5.2	Laktatverhalten.....	16
5.2.1	Laktatkonzentration während der Dauerbelastung.....	16
5.2.2	Laktatverhalten bei verschiedenen Trittfrequenzen	17
5.2.3	Laktatkonzentration an der IAS.....	19
6	Fazit und Praxisbezug	20
7	Literaturverzeichnis	21

1 Einleitung:

In der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik wurden bereits mehrere Untersuchungen zu den Auswirkungen unterschiedlicher Bewegungsgeschwindigkeiten gemacht. Diese bezogen sich jedoch zumeist auf unterschiedliche Intensitäten. Aus den bisherigen Untersuchungen geht hervor, dass bei zunehmender körperlicher Belastung eine erhöhte Herz-Kreislaufaktivität und ein Anstieg des Energiebedarfs zustande kommen. Einhergehend mit diesen Reaktionen kommt es außerdem zu einem vermehrten Abbau von Kohlenhydrate und Fetten. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Art der Energiebereitstellung bei Dauerbelastungen und welche Substratquellen herangezogen werden. Es ist bekannt, dass sich die Skelettmuskulatur aus verschiedenen Muskelfasertypen zusammensetzt. Demzufolge wird zwischen langsam Skelettmuskelfasern (Slow twitch fibres – ST Fasern) und schnellen Skelettmuskelfasern („fast twitch fibres – FT Fasern) unterschieden. Die langsamen ST Fasern decken ihren Energiebedarf vorwiegend aus dem aeroben Stoffwechsel, während die schnellen FT Fasern ihren Energiebedarf vorwiegend anaerob bereitstellen (de Marées, 2003, S. 176). Bei ausdauertrainierten Personen, wie zum Beispiel Triathleten und Straßen-Radrennfahrern überwiegen die ST Fasern (de Marées, 2003, S. 177).

Die Bewegungsgeschwindigkeit wird auf dem Fahrradergometer durch die Trittfrequenz vorgegeben. Mit zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit muss sich die Zahl der Muskelkontraktionen ebenfalls erhöhen. Daraus lässt sich schließen, dass bei hohen Trittfrequenzen zunehmend die FT Fasern rekrutiert werden, welche, wie oben beschrieben, ihre Energie vorwiegend anaerob bereitstellen.

Vor dem Hintergrund, dass, besonders in Ausdauersportarten mit langanhaltenden und gleichmäßigen Belastungen, oftmals die Wettkampftintensität im Übergangsbereich der vorwiegend aeroben, hin zur anaeroben Energiebereitstellung gewählt wird, ist die Frage nach einer optimalen Bewegungsgeschwindigkeit, innerhalb dieses Übergangsbereiches, von hohem trainingsphysiologischem Interesse.

Zunächst soll eine Literaturübersicht die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen einen Einblick in die Bedeutung der Trittfrequenz beim Radfahren ermöglichen (Kapitel 2.1). Anschließend wird die Fragestellung der vorliegenden Untersuchung präzisiert (Kapitel 2.2). Kapitel 3 widmet sich der Beschreibung des Probandenkollektivs und der verwendeten methodischen Verfahren. Eine Ergebnisdarstellung erfolgt in Kapitel 4, bevor in Kapitel 5 die dargestellten Ergebnisse vor dem Hintergrund bisheriger Erkenntnisse diskutiert werden.

2 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird die Bedeutung der Trittfrequenz beim Radfahren dargestellt. Aus der vorhandenen Literatur sollen Befunde über die Einflussnahme der Trittfrequenz auf verschiedene Parameter beim Radfahren gezeigt und erste Ergebnisse vorheriger Studien erläutert werden. Auf Grund der theoretischen Einführung in das Thema wird im Anschluss die Fragestellung der vorliegenden Studie und deren Bedeutung beschrieben.

2.1 Die Trittfrequenz beim Radfahren

Untersuchungen zur Tretgeschwindigkeit beim Radfahren haben in der sportwissenschaftlichen und sportmedizinischen Forschung eine lange Tradition. Dickinson begann bereits im Jahre 1928 erste Untersuchungen. Schon früh wurde herausgefunden, dass die Trittfrequenz beim Radfahren eine wichtige Einflussgröße im Leistungs- und Energiestoffwechsel ist. Mit einer steigenden Trittfrequenz steigt die Kontraktionsgeschwindigkeit der beanspruchten Muskulatur. Um eine höhere Kontraktionsgeschwindigkeit zu realisieren steigt daher der Anteil an fast-twitch Fasern (FT-Fasern), die innerhalb der Muskulatur innerviert werden (Weiß, 1996, S. 464). Diese stellen ihren Energiebedarf überwiegend anaerob bereit (de Marées, 2003, S. 176). Bei einer vermehrten anaeroben Energiebereitstellung wird mehr Laktat im Muskel produziert, was bei einer zu hohen Laktatkonzentration im Muskel zu einem Leistungsabfall führt (de Marées, 2003, S. 355). Daher geht mit einer steigenden Trittfrequenz bei gleicher Leistung ein höherer Blutlaktatspiegel einher (Weiß, 1996, S. 464). Leistungssportler im Radsport und auch nicht speziell erfahrene Radfahrer bevorzugen jedoch in der Regel relativ hohe Trittfrequenzen, die zwischen 80 und 100 Tritten pro Minute liegen (Stegemann, Ulmer & Heinrich, 1968, S. 224, Hagberg, Mullin, Giese & Spitznagel, 1981, S. 449, Marsh & Martin, 1993, S. 1271). Bei Leistungen von 500 bis 1000 Watt werden sogar Tretfrequenzen von 120 bis 160 Umdrehungen pro Minute gewählt (Weiß, 1996, S. 465). Studien zur subjektiven Wahrnehmung des Kraftempfindens bei niedrigen und hohen Tretfrequenzen bei Radsportlern und Radsportunerfahrenen ergaben, dass die aufzubringende Kraft bei gleicher Leistung aber niedrigen Trittfrequenzen wesentlich höher empfunden wird, als bei hohen Trittfrequenzen (Stegemann et al., 1968, S. 233, Ulmer, 1969, S. 392). Hingegen wird konstante Leistung mit steigender Tretgeschwindigkeit als zunehmend

leichter empfunden (Löllgen, Ulmer & Nieding, 1977, S. 302). Ulmer fand 1969 heraus, dass Radsportler die die Bremskraft bei vorgegebener Tretgeschwindigkeit selbst so einstellen sollten, dass ihr subjektives Leistungsempfinden dem eines vorherigen Versuchs entsprach (bei 50 Umdrehungen pro Minute und ca. 75 Watt), eher die Bremskraftwerte als die physikalische Leistung reproduziert wurden, wodurch die gewählte Leistung mit steigender Tretfrequenz größer wurde (Ulmer, 1969, S. 392). Die, mittels der RPE-Skala von Borg ermittelten, als angenehm empfundenen Tretfrequenzen lagen dabei im Bereich von 60 bis 90 Umdrehungen pro Minute (Hagberg et al., 1981, S. 451, Coast & Cox, 1985, S. 227, Marsh et al., 1993, S. 1271). In weiteren Untersuchungen zeigte Marsh jedoch, dass die von Radsportlern und Radsportunerfahrene gewählte Tretfrequenz mit den niedrigsten RPE-Werten noch deutlich unter der freiwillig und bevorzugten Tretfrequenz liegt. Somit kann der diagnostische Wert der RPE-Skala für die Ermittlung des subjektiven Beanspruchungsempfindens angezweifelt werden (Marsh & Martin, 1998, S. 948). Bei der Betrachtung aller Ergebnisse der vorherigen Studien ist außerdem festzuhalten, dass eine große interindividuelle Streuung vorliegt.

Unter energetischen Aspekten haben sich mehrere Studien mit der Erfassung des günstigsten Wirkungsgrades, dem Verhältnis von mechanisch umgesetzter und chemisch umgesetzter Energie, beim Radfahren mit verschiedenen Trittfrequenzen befasst. Bereits 1929 wurde von Dickinson ein optimaler Wirkungsgrad bei 33 Umdrehungen pro Minute ermittelt (Dickinson, 1929, o.S. zitiert nach Dieterich, 2000, S. 5). Diese Angabe wurde in weiteren Studien nach oben korrigiert. Böning ermittelte 1984 die höchste Effizienz bei Trittfrequenzen von 40 bis 70 Umdrehungen pro Minute (Böning, Gönen & Maassen, 1984, S. 93). Ähnliche Umdrehungszahlen hatten bereits Eckermann, der zu einem Drehzahloptimum von 45 Umdrehungen pro Minute (U/Min) bei einer Belastung von konstanten 100 Watt und 150 Watt kam (Eckermann & Millahn, 1967, S. 344), und Stegemann der den größten Wirkungsgrad bei 50 U/Min für untrainierte Personen bestimmte (Stegemann et al., 1968, S. 226).

Doch ähnlich wie beim subjektiven Belastungsempfinden trat auch beim optimalen Wirkungsgrad eine interindividuelle Streuung auf. Eine Untersuchung von Suzuki zeigte, dass zwischen Probanden mit einem extrem hohen Anteil an FT-Fasern und Probanden mit einem extrem hohen Anteil an ST-Fasern Unterschiede des Wirkungsgrades bei 100 U/Min hervortraten. Probanden mit einem prozentualen hohen Anteil von FT-Fasern erzielten bei 100 U/Min einen signifikant höheren Wirkungsgrad

als die Probanden mit einem hohen Anteil an ST-Fasern. Bei einer Trittfrequenz von 60 U/Min ergab sich kein signifikanter Unterschied im Wirkungsgrad zwischen den beiden Probandengruppen. Suzuki folgerte daraus, dass ST-Fasern bei hohen Trittfrequenzen einen geringeren Wirkungsgrad haben und bei niedrigen Trittfrequenzen einen höheren Wirkungsgrad besitzen im Vergleich zu FT-Fasern (Suzuki, 1979, S. 265). Diese These wird durch eine Studie von Coyle unterstützt (Coyle, Sidossis, Horowitz & Beltz, 1992, S. 787). Zusammenfassend deuten viele Untersuchungen darauf hin, dass die frei gewählten Trittfrequenzen oftmals oberhalb der energetisch günstigsten Umdrehungsgeschwindigkeiten liegen.

Neben dem Wirkungsgrad beeinflusst die Trittfrequenz auch die Laktatkonzentration im Blut und die Herzfrequenz während der Belastung. Untersuchungen von Coast zeigten die geringste Laktatbildung bei Trittfrequenzen bei 80 U/Min (Coast et al., 1986, S. 228) beziehungsweise bei 50 U/Min und 75 U/Min (Dieterich, 2000, S. 43). Jedoch zeigten die Studien von Böning und Hagan keine signifikante Beeinflussung des Laktatspiegels durch unterschiedliche Trittfrequenzen. (Böning et al., 1984, S.95, Hagan, Weis & Raven, 1992, S. 1092).

2.2 Fragestellung der vorliegenden Arbeit

Die bisherigen Forschungsansätze zu den Effekten unterschiedlicher Trittfrequenzen bezogen sich unter anderem auf das subjektive Belastungs-empfinden der Probanden bei unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten. Sowohl bei den Untersuchungen zum subjektiven Belastungs-empfinden als auch beim Energieumsatz ist die aktuelle Forschungslage jedoch nach wie vor nicht eindeutig. Dies liegt zu einem großen Teil auch an den unterschiedlichen Forschungsdesigns der einzelnen Studien. In Bezug auf die Optimierung der Bewegungsgeschwindigkeit bei Dauerbelastungen unter Bedingungen eines maximalen Laktat Steady State wurden bisher kaum Studien durchgeführt. Mit Ausnahme von Böning et al (1984), der eine Versuchsdauer von jeweils 15 Minuten hatte, lag die Versuchsdauer anderer Studien bei unter sechs Minuten, woraus sich nicht auf Effekte bei Dauerbelastungen schließen lässt.

Lediglich Coast et al. (1986), Hagan et al. (1992) und Dieterich (2000) untersuchten die Frage nach der optimalen Trittfrequenz bei Dauerbelastungen. Die drei Studien hatten eine Belastungszeit von 45 Minuten, es gab jedoch starke Unterschiede in der gewählten Intensität. Die gewählten Intensitäten lagen mit 85% der VO_2max (Coast

et al., 1986, S. 226) entweder über der individuellen anaeroben Schwelle (IAS) beziehungsweise bei Dieterich unterhalb der IAS. In der Untersuchung von Hagan wurde die Intensität als „moderate intensity“ bei 127 Watt und als „high-moderate intensity“ bei 166 Watt festgelegt, ohne die Berücksichtigung der IAS der jeweiligen Probanden. Da es sich bei den Probanden jedoch um ausdauertrainierte Radfahrer gehandelt hat, ist davon auszugehen, dass die gewählten Intensitäten unterhalb der IAS lagen.

Auf Grund der Tatsache, dass es bisher kaum weitere Studien zu den Effekten unterschiedlicher Trittfrequenzen unter Belastungen, die länger als 30 Minuten dauern, gibt, dies aber im Wettkampfalltag sämtlicher Ausdauerathleten vorkommt, besteht noch weiterer Studienbedarf. Zudem sind die Intensitätsbereiche der jeweiligen Untersuchungen entweder weit unterhalb der IAS der Probanden oder aber im maximalen Leistungsbereich der Probanden angesiedelt. Daher soll die vorliegende Untersuchung das Laktatverhalten bei unterschiedlichen Trittfrequenzen direkt an der individuellen anaeroben Schwelle untersuchen. Anhand der bisherigen Forschungslage lässt sich die Hypothese aufstellen, dass eine Trittfrequenz von 80 U/Min geringere Laktatwerte aufweist als eine, von den Probanden individuell gewählte Trittfrequenz oder eine Trittfrequenz von 100 U/Min. Als Parameter werden die Blutlaktatkonzentration sowie die Herzfrequenz der Probanden erhoben.

3 Probanden und Methoden

Es folgt eine Beschreibung des Probandenkollektivs sowie die Beschreibung der verwendeten Untersuchungsmethoden und der statistischen Verfahren, die zum Auswerten der Daten herangezogen wurden.

3.1 Methoden und Datenerhebung

Während der Eingangsuntersuchung wurden von allen Probanden die anthropometrischen Daten erhoben. Im Anschluss erfolgte ein Ruhe - EKG, eine Körperfettmessung sowie ein Stufentest auf dem Fahrradergometer bis zur subjektiven Ausbelastung des Probanden. Anhand des Stufentests wurde mit einem Computerprogramm die individuelle anaerobe Schwelle berechnet, welche die Grundlage zur Bestimmung der Intensität während der Dauerbelastung war.

3.1.1 *Eingangsuntersuchung*

Zu Beginn der Eingangsuntersuchung erfolgte eine Abfrage der Personendaten sowie eine Erfassung der sportlichen Aktivität, wöchentlichen Trainingsumfängen und der Krankheitsvorgeschichte mit einem Fragebogen.

Anschließend wurde von jedem Proband das aktuelle Gewicht und die Körpergröße erfasst sowie eine Körperfettmessung durchgeführt. Das Wiegen wurde in Strümpfen, nur mit einer Radhose und einem Unterhemd bekleidet durchgeführt. Zur Erfassung möglicher gesundheitlicher Beeinträchtigungen wurde ein Ruhe - EKG im Liegen aufgezeichnet.

Der Eingangstest auf dem Fahrradergometer, sowie alle weiteren Ergometertests wurden auf demselben drehzahlunabhängigen Ergometer durchgeführt. Alle Probanden begannen bei einer Anfangsbelastung von 100 Watt. Die Belastungsintensität wurde nach jeweils 3 Minuten um 40 Watt gesteigert, bis zum Belastungsabbruch bei einer subjektiv maximalen Erschöpfung durch den Probanden. Die Trittfrequenz während des Stufentests konnte frei gewählt werden. Die Herzfrequenz wurde mit dem EKG Gerät aufgezeichnet und in Ruhe, nach jeder vollendeten Belastungsstufe, bei Belastungsabbruch sowie jeweils eine, drei, fünf und zehn Minuten danach aufgeschrieben. Parallel zur EKG Aufzeichnung wurde für die Bestimmung der Blutlaktatwerte jeweils 20 µl Blut aus dem Ohrläppchen zu den gleichen Messzeitpunkten wie die Pulsaufzeichnung, entnommen. Die entnommenen Blutproben wurden unmittelbar nach dem Belastungstest analysiert. Zur gesundheitlichen Kontrolle wurde bei Minute zwei jeder zweiten Stufe der Blutdruck gemessen.

3.1.2 *Schwellenbestimmung*

Zur Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle (IAS) wurde die Methode nach Dickhuth (Roecker, Prettin, Pottgiesser, Schumacher & Dickhuth, 2010, S. 6) verwendet. Auf einen Basislaktatwert wird eine Konstante addiert. Der Basislaktatwert ist dabei, der am niedrigsten gemessene Laktatwert den die Funktionskurve aufweist. Die Konstante beträgt bei Untersuchungen auf dem Fahrradergometer 1,0 (Roecker et al. 2010, S. 6). Die genaue Berechnung der IAS erfolgte mit dem Computerprogramm „Ergonizer“.

3.1.3 Dauerbelastung

Während der Dauerbelastung wurde jeder Proband auf dem Fahrradergometer bei 100% seiner zuvor berechneten IAS für 45 Minuten mit einer Trittfrequenz von 80 (TF80) und 100 (TF 100) Umdrehungen pro Minute sowie einer selbstgewählten Trittfrequenz (TFI) belastet. Dabei konnte die Trittfrequenz auf einer analogen und einer digitalen Anzeige kontinuierlich vom Probanden und vom Versuchsleiter kontrolliert werden. Wenn die Trittfrequenz um mehr als zwei Umdrehungen pro Minute von der vorgegebenen Trittfrequenz ab, wurde der Proband durch den Versuchsleiter darauf hingewiesen und korrigiert. Die Reihenfolge der verschiedenen Trittfrequenzen erfolgte randomisiert. Die Randomisierung erfolgte durch ein Losverfahren. Zwischen zwei Versuchen lag mindestens ein untersuchungsfreier Tag. Außerdem wurden die Probanden angewiesen ihr übliches Training fortzuführen, jedoch am Vortag einer Untersuchung keine intensiven oder ausbelastenden Trainingseinheiten durchzuführen. Vor der Dauerbelastung, nach einer dreiminütigen Aufwärmphase, sowie nach jeweils 7,5 Minuten während der Belastung und eine, drei und fünf Minuten nach der Belastung wurde der Puls aufgezeichnet und zur Laktatbestimmung Kapillarblut entnommen. Die Aufwärmphase sowie die Cool Down Phase erfolgte bei einer Intensität von 60% der IAS. Die Laktatbestimmung wurde unmittelbar nach der Untersuchung durchgeführt. Auf Wunsch der Probanden konnten sie Klickpedalen, wie sie sie auch an ihren Rennrädern nutzen, während der Dauerbelastung gebrauchen. Voraussetzung war, dass die Klickpedalen sowohl während des Stufentests in der Eingangsunter-suchung als auch bei allen folgenden Dauerbelastungen verwendet wurden. Hatte der Proband keine Klickpedalen, absolvierte er alle Untersuchungen mit normalen Korbchenpedalen. Als Abbruchkriterien galt die subjektiv maximale Ausbelastung durch den Probanden oder eine dauerhafte Abweichung der Trittfrequenz von der Zielvorgabe, welche nicht mehr durch den Probanden korrigiert werden konnte.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Eingangsuntersuchung

Die Probanden waren im Mittel 25,9 Jahre ($\pm 3,73$) alt und hatten bei einer Größe von 184,45 cm ($\pm 6,05$) ein Gewicht von 77,3 kg ($\pm 8,21$). Der Körperfettanteil lag im Mittel bei 15,5 % ($\pm 3,51$) und der Trainingsumfang betrug 11,8 Stunden ($\pm 4,87$) in der Woche. Tabelle 1 zeigt alle anthropometrischen Daten der Probanden sowie die leistungsphysiologischen Ergebnisse im Ausbelastungstest

Untersuchungsparameter	Probanden (n = 10)	
	Mittelwert (MW)	Standardabweichung (s)
Alter (Jahre)	25,9	3,73
Größe (cm)	184,45	6,05
Gewicht (kg)	77,3	8,21
Körperfett (%)	15,5	3,51
BMI (kg/m ²)	22,8	2,2
Trainingsumfang in der Woche (Stunde)	11,8	4,87
Maximale Herzfrequenz (1/min)	181,2	6,36
Maximale Leistung (Watt)	367	44,08
Maximale Leistung / KG (W/kg)	4,79	0,7
Laktat an der IAS (mmol/l)	2,06	0,2
Herzfrequenz an der IAS (1/min)	152	7,99
Leistung an der IAS (Watt)	251,2	34,98
Watt / KG an der IAS (Watt/kg)	3,24	0,55

Tab 1 Anthropometrische Daten und leistungsphysiologische Größen der Eingangsuntersuchung aller Probanden

4.2 Herzfrequenzverhalten während der Dauerbelastung

Die Herzfrequenz steigt zu Beginn der Belastung stark an. Sie steigt im Mittel, bei allen erhobenen Trittfrequenzen, während der dreiminütigen Aufwärmphase bereits um 51 Schläge pro Minute und anschließend bis zu Minute 7,5 der Dauerbelastung noch einmal um 30 Schläge. Diesem raschen Anstieg folgt eine kontinuierliche Steigerung von 22,33 Schlägen zwischen Minute 7,5 bis Minute 45 der Dauerbelastung.

Der Anstieg von 22,33 Schlägen entspricht, bezogen auf den Wert bei Minute 7,5, einer Steigerung um etwa 15 %. Bei isolierter Betrachtung der Herzfrequenzsteigerung ergibt sich für TF 80 eine höchst signifikante Steigerung ($T(9) = -8,321$; $p \leq 0,001$), ebenso wie bei TF 100 ($T(9) = -10,220$; $p \leq 0,001$) und bei TFI ($T(9) = -10,557$; $p \leq 0,001$).

Bei dem Vergleich der mittleren Herzfrequenzwerte aller drei Trittfrequenzen ergeben sich keine signifikanten Unterschiede ($F_{2, 18} = 1,919$; $\eta^2 = 0,176$; $p = 0,176$).

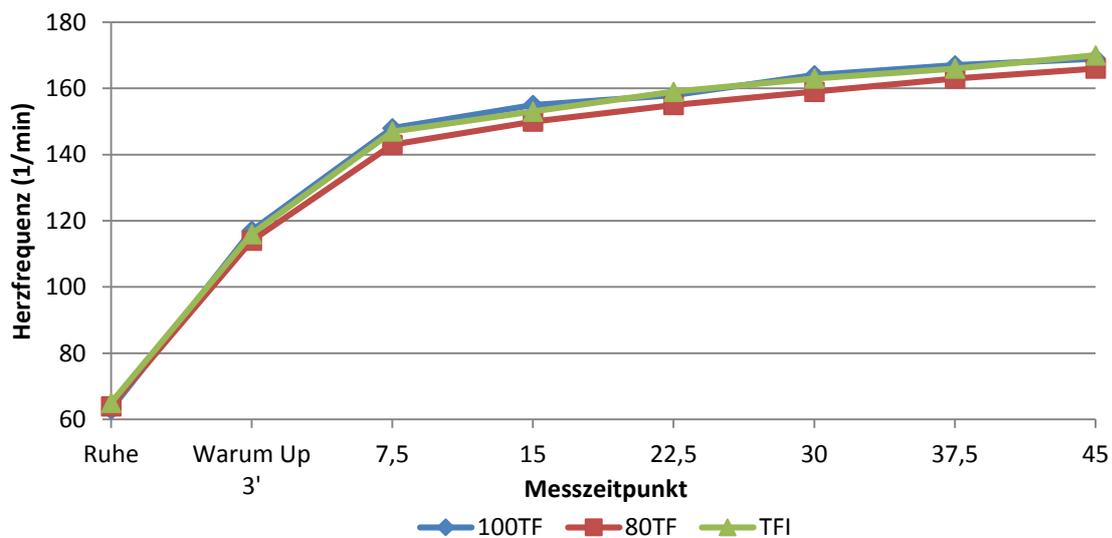


Abb. 1: Verlauf der Herzfrequenz während der Dauerbelastung (MW aller Probanden)

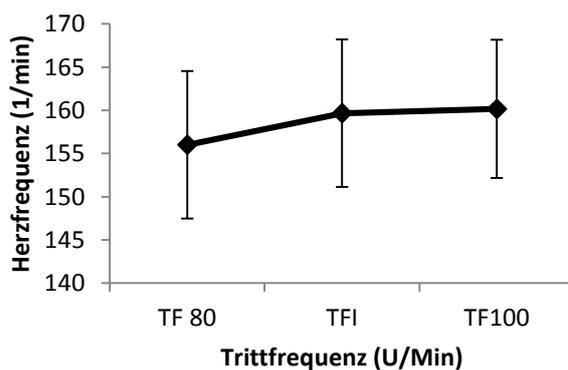


Abb. 2: Herzfrequenzen (MW \pm s 7,5 - 45. Min) während der Dauerbelastung

4.3 Laktatverhalten während der Dauerbelastung

Der Verlauf der Laktatkurven ist bei den Dauerbelastungen mit unterschiedlichen Trittfrequenzen nicht einheitlich. Zunächst kommt es bei allen Trittfrequenzen zu einem initialen Anstieg der Laktatwerte. Bei der Trittfrequenz 80 kommt es anschließend zu einem leichten Absinken, bevor anschließend eine kontinuierliche Zunahme der Laktatwerte bis zum Belastungsende folgt. Im Mittel liegen die Laktatwerte bei TF 80 bei 2,09 mmol/l von Minute 7,5 bis Minute 45. Sowohl bei TF 100 als auch bei TFI steigen die Laktatwerte weiterhin bis zu Minute 15, der Dauerbelastung. Bei TF 100 variieren die Laktatwerte ab Minute 15 nur noch um maximal 0,10 mmol/l und liegen im Mittel bei 2,63 mmol/l bis Belastungsende. Bei TFI steigen die Laktatwerte von Minute 7,5 bis Minute 30 signifikant von 2,08 mmol/l auf 2,72 mmol/l um 0,57 mmol/l bevor sie sich im Mittel bei 2,74 mmol/l stabilisieren bis zum Ende der Belastung.

Es lässt sich feststellen, dass sich bei jeder der drei Trittfrequenzen auch über die 30ste Minute hinaus ein steady state gebildet hat. Bei TF 80 liegt der Anstieg der Laktatkonzentration von Minute 7,5 bis Minute 30 bei 0,12 mmol/l und von Minute 30 bis Minute 45 bei 0,26 mmol/l. TFI hat einen Anstieg der Laktatkonzentration von Minute 7,5 bis Minute 30 von 0,64 mmol/l und von Minute 30 bis Minute 45 bei 0,11 mmol/l. Der Anstieg der Laktatkonzentration bei TFI liegt von Minute 7,5 bis Minute 30 bei 0,34 mmol/l und von Minute 30 bis Minute 45 steigt die Laktatkonzentration noch einmal um 0,11 mmol/l. Da bei keiner der Trittfrequenzen die Laktatkonzentration innerhalb der letzten 20 Minuten der Dauerbelastung um mehr als 1,0 mmol/l bzw. in den letzten 10 Minuten um mehr als 0,5 mmol/l ansteigt, kann von einem Laktat steady state ausgegangen werden (siehe Abbildung).

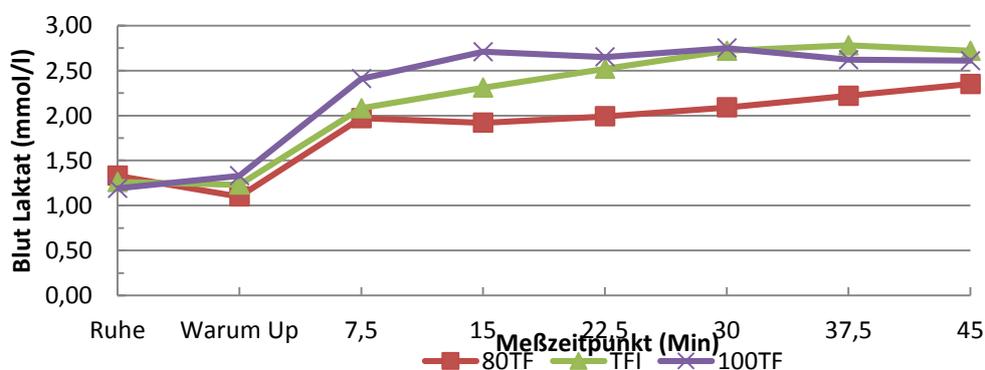


Abb. 3: Verlauf der Laktatkonzentration während der Dauerbelastung (MW aller Probanden)

Im Vergleich der durchschnittlichen Laktatkonzentrationen von Minute 7,5 bis Minute 45 ergibt sich bei TF 80 die niedrigste Laktatkonzentration. Die durchschnittliche

Laktatkonzentration von TF 100 und TFI liegen lediglich um 0,11 mmol/l auseinander (siehe Abbildung 4). Der Unterschied der Laktatkonzentrationen von TF 80 und TF 100 bzw. TF IND ist jedoch nicht signifikant.

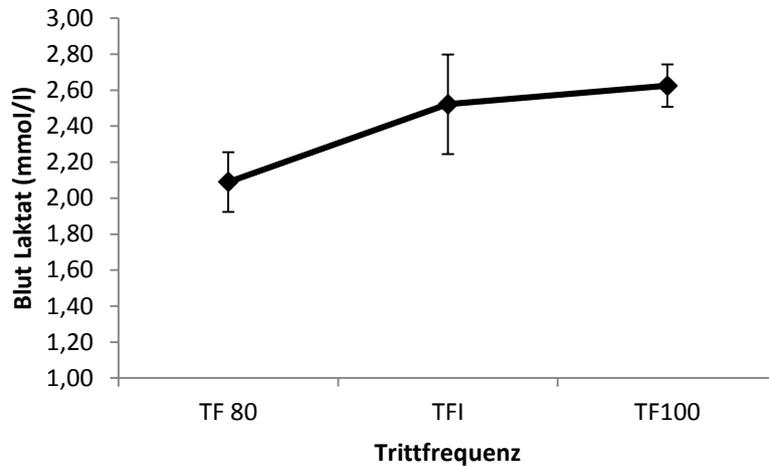


Abb. 3 Laktatkonzentration (MW \pm s 7,5 - 45. Min) während der Dauerbelastung

4.4 Herzfrequenzverhalten der Dauerbelastung im Vergleich zu den Herzfrequenzen an der IAS

Tabelle 2 zeigt die Herzfrequenzen die, nach der Auswertung des Stufentests mit dem Programm „Ergonizer“, von den Probanden an ihrer jeweiligen IAS erreicht werden sollten. Außerdem werden die, während den Dauerbelastungen tatsächlich erreichten Herzfrequenzen beschrieben. Es zeigt sich, dass die tatsächlich erreichten Herzfrequenzen im Mittel leicht über der, vom Programm ermittelte Herzfrequenz liegen. Mit Ausnahme von TF 100 ist jedoch keine Differenz signifikant.

	HF an der IAS (1/Min) (Ergo- nizer)	HF an der IAS (1/Min) (Dauerbelas- tung)	T	df	p-Wert
TF 100	151,60	160,08	-2,770	9	p=.022
TFI	151,60	159,65	-2,102	9	P=.065
TF 80	151,60	155,83	-1,461	9	p=.178

Tab. 2: Vergleich der Herzfrequenzprognose von "Ergonizer" für die IAS und den real erreichten Herzfrequenzwerten

4.5 Laktatverhalten der Dauerbelastung im Vergleich zu den Laktatwerten an der IAS

Im Vergleich der Laktatkonzentration der Probanden, die diese nach der Auswertung des Stufentests durch das Programm „Ergonizer“ an der IAS erreichen sollten, ergibt sich für TF 100 kein signifikantes Ergebnis ($T(9) = -1,874$; $p = .094$). Auch bei TFI ($T(9) = -1,119$; $p=.292$) und bei TF 80 ($T(9) = -0,125$; $p= .903$) wird der Unterschied zwischen den errechneten Laktatwerten und den, während der Dauerbelastung erreichten Werten, nicht signifikant.

	Laktat an der IAS (mmol/L) (Ergonizer)	Laktat an der IAS (mmol/L) (Dauerbelastung)	T	df	p-Wert
TF 100	2,06	160,08	-1,874	9	p=.094
TFI	2,06	159,65	-1,119	9	P=.292
TF 80	2,06	155,83	-0,125	9	p=.903

Tab. 3: Vergleich der Laktatkonzentrationsprognose von "Ergonizer" für die IAS und den real erreichten Laktatwerte

5 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Studie unter dem Aspekt der eingangs formulierten Hypothesen anhand der untersuchten Parameter und im Kontext ausgewählter Literatur diskutiert. Dabei stehen die Effekte der Trittfrequenz auf die erhobenen Parameter im Fokus. Es sollen jedoch auch der zeitliche Verlauf der Parameter sowie Unterschiede zwischen den prognostizierten Werten der Laktatstufentests an der IAS der Probanden, und den tatsächlich ermittelten Werten während der Dauerbelastung berücksichtigt werden.

5.1 Herzfrequenzverhalten

Zunächst soll die Reaktion der Herzfrequenz während der Dauerbelastung unter der Bedingung der verschiedenen Trittfrequenzen analysiert werden. Dazu wird zunächst auf den zeitlichen Verlauf während der Dauerbelastung eingegangen, bevor im An-

schluss die Reaktion der Herzfrequenz auf die verschiedenen Trittfrequenzen analysiert wird.

5.1.1 *Herzfrequenzverhalten während der Dauerbelastung*

Die Herzfrequenz zeigt einen typischen Verlauf während einer Ausdauerbelastung. Nach einem anfänglich starken Initialanstieg zu Beginn und während des Warm Up's steigt die Herzfrequenz langsam von Minute 7,5 bis Minute 45. Einen ähnlichen Verlauf wurde bereits von Hagan et al. in der Studie von 1992 (S. 1091) sowie von Dietrich (2000, S. 25) gefunden. Der starke Initialanstieg der Herzfrequenz lässt sich mit dem Wechsel von körperlicher Ruhe zur Bewältigung körperlicher Belastung erklären. Über die kortikale Mitinnervation bei Belastungsbeginn wird die Herzfrequenz erhöht. Durch die Einflussnahme von stoffwechselsensibler Rezeptoren der Muskulatur kommt es zu einer weiteren Steigerung der Herzfrequenz: „Sie sorgen nicht nur für eine lokale Gefäßweitstellung mit verbesserter Durchblutung der Arbeitsmuskulatur, sondern senden gleichzeitig Impulse zum Kreislaufzentrum, wodurch es wie bei der kortikalen Mitinnervation zu einer Erhöhung des Sympathikotonus und damit zur Anhebung der Herzfrequenz kommt.“ (Stegemann, 1971, S. 97, zitiert nach Weineck, 2010, S. 161). Als mögliche Ursache für den langsamen Anstieg der Herzfrequenz im weiteren Verlauf der Dauerbelastung nimmt Hagan et al. den Anstieg der Körpertemperatur und die damit verbundene verstärkte Thermoregulation an (S. 1093). Darüber hinaus wird ein Anstieg der Plasmakatecholamine, die Bluttemperatur und die Einflussnahme von „zentralen Einflüssen“ als weitere mögliche Ursachen für einen langsamen kontinuierlichen Anstieg der Herzfrequenz während der Dauerbelastung diskutiert (Hagan et al., 1992, S. 1093). Einen Einfluss der unterschiedlichen Trittfrequenzen auf den Anstieg der Herzfrequenz lässt sich aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie nicht ableiten, da die prozentuale Steigerungsrate bei allen Trittfrequenzen die gleiche war. Dies wird von Hagan unterstützt (Hagan et al., 1992, S. 1094).

5.1.2 *Herzfrequenz bei verschiedenen Trittfrequenzen*

Der Vergleich der mittleren Herzfrequenzen in Abhängigkeit der verschiedenen Trittfrequenzen zeigt keine signifikanten Unterschiede. Dieses Ergebnis deckt sich mit der Studie von Hagan, der ebenfalls keinen Einfluss auf die Herzfrequenz durch verschiedene Trittfrequenzen feststellen konnte (Hagan et al., 1992, S. 1094). In Stu-

dien von Dieterich (Dieterich, 2000, S. 24) und Coast (Coast et al., 1986, S. 227) wurden jedoch signifikante Unterschiede der Herzfrequenzen bei verschiedenen Trittfrequenzen festgestellt. Bei Coast wurden die niedrigsten Herzfrequenzen bei einer Umdrehungszahl von 80 U/Min erreicht im Vergleich zu Umdrehungszahlen von 40 U/Min, 60 U/Min, 100 U/Min und 120 U/Min (Coast et al., 1986, S. 227). Auch Swain fand bei einer Trittfrequenz von 84 U/Min eine signifikant niedrigere Herzfrequenz als bei 41 U/Min (Swain & Wilcox, 1992, S. 1126). In den meisten anderen Studien wurde jedoch mit zunehmender Trittfrequenz auch eine steigende Herzfrequenz beobachtet (Hagberg et al. 1981, S: 448, Böning et al., 1984, S. 93, Eckermann et al., 1967, S 341, Dietrich, 2000, S. 24). Eine Tendenz, dass mit zunehmender Trittfrequenz auch die Herzfrequenz zunimmt lässt sich auch in der vorliegenden Studie feststellen. Als ein möglicher Grund für den Anstieg der Herzfrequenz bei zunehmender Trittfrequenz gibt Gotshall eine Erhöhung des Herzminutenvolumens an. Infolge einer Aktivierung des Sympathikus bei gleichzeitiger Hemmung des Parasympathikus erhöht sich die Herzfrequenz bei größerer motorischer Bewegungsgeschwindigkeit. Darüber hinaus deuten die Ergebnisse auf eine Verbesserung der Ejektionsfraktion des Herzens hin und einen verstärkten venösen Rückfluss bei höheren Trittfrequenzen hin (Gotshall, Bauer & Fahmer, 1996, S. 20).

5.2 Laktatverhalten

Bevor das Laktatverhalten zwischen den jeweiligen Trittfrequenzen betrachtet und mit Bezug zu weiterer relevanten Literatur analysiert wird, soll der zeitlicher Verlauf der Laktatwerte von Minute 7,5 bis Minute 45 der Dauerbelastung näher betrachtet werden. Hierbei soll vor allem die Frage beantwortet werden, ob sich bei jeder Trittfrequenz ein steady state einstellt und ob dieses auch über Minute 30 hinaus anhält. Anschließend werden die von dem Programm „Ergonizer“ angegebenen Laktatwerte an der IAS mit denen aus der Dauerbelastung verglichen und analysiert.

5.2.1 Laktatkonzentration während der Dauerbelastung

Obwohl der Verlauf der Laktatkonzentration während der Dauerbelastung sehr unterschiedlich ist, hat sich nach der Definition, dass ein steady state vorliegt, wenn in den letzten 30 Minuten der Belastung kein größerer Anstieg als 1 mmol/L zustande kommt, bei allen Trittfrequenzen eine Laktat steady state gebildet. Dies deutet darauf

hin, dass die Bewegungsgeschwindigkeit keinen Einfluss auf die Laktateliminationsrate nimmt. Bei einer ähnlichen Studie von Hagan et al. zeigte sich jedoch ab Minute 15 bis zur Minute 45 ein Abfall der Laktatkonzentration. Dies kann jedoch in diesem Falle mit der geringeren Intensität der Belastung zusammen hängen, da die Intensität nicht an der IAS lag, sondern deutlich darunter (Hagan et al. 1992, S. 1092). Die Bildung eines maximalen Laktat steady states, unabhängig von der Trittfrequenz wurde auch von Denadai bestätigt (Denadai, de Araújo & Figueroa 2005, S. 479).

Vor dem Hintergrund der Eingangsfrage, ob sich auch bei einer Dauerbelastung von über 30 Minuten ein maximales Laktat steady state bildet, hat die vorliegende Studie gezeigt, dass, wenn sich einmal ein steady state gebildet hat, dieses auch über einen längeren Zeitraum aufrecht erhalten werden kann.

5.2.2 *Laktatverhalten bei verschiedenen Trittfrequenzen*

Der rasche Anstieg der Laktatkonzentration nach der Warm Up Phase bis zu Minute 7,5 lässt sich mit einem Startlaktat vergleichen. Dieses fällt über den Gesamtzeitraum jedoch nicht stark ins Gewicht. Von diesem Anstieg abgesehen, zeichnet sich bei allen Trittfrequenzen ein typischer Verlauf bei einer Belastung an der IAS ab. Im Sinne der IAS, dem Übergang vom aeroben zum anaeroben Stoffwechsel, halten sich der Laktatproduktion und der Laktatelimination im Gleichgewicht und bildet ein konstantes steady state. Zu den Effekten unterschiedlicher Trittfrequenzen bei längerer Belastungsdauer liegen nur wenige Vergleichsdaten vor. In einer Studie von Coast et al. lagen die niedrigsten Laktatwerte, die bei fünf Radsportlern bei einer Belastung mit 85% der $VO_2\text{max}$ erhoben wurden, sowohl nach 10 als auch nach 20 Minuten bei einer Trittfrequenz von 80 U/Min vor. Die Mittelwerte lagen jedoch alle zwischen fünf und acht mmol/L und damit deutlich höher als in der vorliegenden Studie. Der Grund für diese Abweichung könnte in der höheren Intensität zu finden sein. In Studien von Hagan et al. zeigte sich ein niedrigerer Laktatspiegel bei Umdrehungszahlen von 60 U/Min im Vergleich zu 90 U/Min. Dieser Unterschied war jedoch nicht signifikant, woraus geschlossen wurde, dass die Trittfrequenz keinen Einfluss auf die Laktatkonzentration im Blut hat. (1992, S 1092). Ebenso lag die Laktatkonzentration in der Studie von Dietrich bei einer Trittfrequenz von 50 U/Min am niedrigsten gefolgt von der Konzentration bei 75 U/Min und 90 U/Min. Die Unterschiede in der Laktatkonzentration waren dabei alle signifikant. Böning et al. fand lediglich bei einer Belastung von 200 Watt, welche von untrainierten Probanden gefahren wurden, signifikan-

te Unterschiede in der Laktatkonzentration zwischen den Umdrehungszahlen 40 U/Min, 60 U/Min, 80 U/Min und 100 U/Min. Auch in dieser Studie lag die niedrigste Konzentration bei 60 U/Min. Bei niedrigeren Belastungen oder aber bei ausdauertrainierten Probanden ergaben sich nahezu unveränderte Werte (Böning et al. 1984). Ebenso zeigten sich keine Unterschiede in der Laktatkonzentration in Abhängigkeit der Trittfrequenz bei Zoldaz, Duda & Majerczak. Erst bei einer Trittfrequenz von 120 U/Min ergab sich ein signifikanter Unterschied zu den vorherigen Trittfrequenzen von 40 U/Min, 60 U/Min, 80 U/Min und 100 U/Min. Als Ursache für den Unterschied der Laktatkonzentration ging Coast et al. von einer besseren Durchblutung und damit effektiveren Laktatausschwemmung aus der Arbeitsmuskulatur durch eine höhere Bewegungsgeschwindigkeit aus. Auf diese Weise sollten höhere Laktatkonzentrationen im Blut zustande kommen. Als eine weitere mögliche Ursache werden Unterschiede in der Muskelfaserzusammensetzung vermutet (1986, S. 228). Weiß schreibt, dass je höher die Kontraktionsgeschwindigkeit ist, desto höher ist auch der Anteil an FT-Fasern. Da diese schlechter für die aerobe Energiegewinnung ausgestattet sind, resultiert eine stärkere Nutzung der FT-Fasern in eine höhere Laktatkonzentration (Weiß, 1996, S 465). Zu dem gleichen Schluss kommt Woolford et al. in seiner Studie. Er geht davon aus, dass eine höhere Trittfrequenz die Glykolyse stimuliert, was langfristig in einer erhöhten Laktatproduktion resultiert (Woolford et al. 1999, S 290).

Der Umstand, dass in der vorliegenden Studie keinerlei signifikante Unterschiede bei der Laktatkonzentration der verschiedenen Trittfrequenzen herauskam, könnte mit der Tatsache zusammenhängen, dass alle Probanden bereits eine gut ausgebildete radsportspezifische Arbeitsmuskulatur hatten und sie dadurch auch bei höheren Trittfrequenzen noch den Energiebedarf aerob und mit Beanspruchung von ST-Fasern decken konnten. Diese These würde auch von den Untersuchungsergebnissen von Dieterich gestützt werden, der in einem Versuch mit Radsportlern und untrainierten Probanden zu dem Ergebnis kam, dass die Radsportler auch bei hohen Trittfrequenzen eine wesentlich niedrigere Laktatkonzentration aufwiesen. Er erklärte dies mit einem besseren Trainingszustand und der disziplinspezifischen Anpassung, die es ermöglichte auch bei hohen Trittfrequenzen noch vermehrt ST-Fasern zu rekrutieren (Dieterich, 2000, S. 65).

Zu gänzlich anderen Ergebnissen kam Lucia et al., der die geringste Laktatkonzentration bei einer Trittfrequenz von 60 U/Min im Vergleich zu 80 U/Min und 100 U/Min

fand. Er erklärt dies, mit einer erhöhten Ansteuerung von Motoneuronen bei niedrigen Trittfrequenzen. Dadurch würden auch mehr FT-Fasern rekrutiert werden, da diese eine größere Kraft entwickeln könnten. Typ I Fasern würden verstärkt bei höheren Frequenzen beansprucht werden. (2004, S. 1053). Diese Studie wurde jedoch mit Radsportprofis durchgeführt, welche mit im Schnitt 366 Watt eine wesentlich höhere Leistung zu erbringen hatten, als die Probanden in den vorherigen Studien. Zusammenfassend lässt die Analyse der vorhandenen Literatur und den Ergebnissen der vorliegenden Studie den Schluss zu, dass mit steigender Intensität und bei gleichzeitig guter radsportspezifischer Arbeitsmuskulatur der Einfluss der Trittfrequenz auf die Laktatkonzentration geringer wird.

5.2.3 *Laktatkonzentration an der IAS*

Bei der Betrachtung der Laktatkonzentration, die die Probanden im Mittel nach der Ausgabe von dem Programm „Ergonizer“ nach dem Modell von Dickhuth an der IAS erreichen sollten, und den während der Dauerbelastung erreichten Laktatkonzentrationen fällt auf, dass diese durchgehend über den Zielvorgaben des Programmes liegen. In der statistischen Prüfung anhand des T-Tests ergeben sich jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zielvorgaben und den realen Konzentrationen. Vor diesem Hintergrund, und auch aus der Tatsache heraus, dass alle Probanden, mit einer Ausnahme, sämtliche Testdurchläufe erfolgreich bewältigen konnten, lässt sich schließen, dass die Prognosen und Empfehlungen durch das Programm und nach dem Modell von Dickhuth durchaus realistisch sind. Dennoch fällt bei der Einzelbetrachtung der Werte der Probanden auf, dass es bei einigen Testdurchläufen zu keinem steady state gekommen ist. Proband 11 musste sogar erschöpfungsbedingt einen Testdurchlauf vorzeitig abbrechen (siehe Anhang). Dies verdeutlicht noch einmal die Notwendigkeit einer individuellen Prüfung der Ergebnisse bei jedem Sportler und macht notfalls eine Korrektur der ermittelten Schwellenwerte notwendig.

6 Fazit und Praxisbezug

In der vorliegenden Studie gab es keine signifikante Einflussnahme auf das Laktatniveau durch die Trittfrequenz. Wie bereits in Kapitel 5 geschrieben, lässt die Analyse der vorhandenen Literatur und den Ergebnissen der vorliegenden Studie den Schluss zu, dass mit steigender Intensität und bei gleichzeitig guter radsportspezifischer Arbeitsmuskulatur der Einfluss der Trittfrequenz auf die Laktatkonzentration geringer wird. Bezugnehmend auf das Anforderungsprofil im Straßenradspport, aber auch im Mountainbikesport und Cross Country ist es durch das unregelmäßige Fahrverhalten und die schnell wechselnden Geländebedingungen kaum möglich durchgehend sich nahe bei einer Trittfrequenz von 80 U/min, wie sie von Coast et al. und Dieterich als Optimum beurteilt wird, zu fahren. Am besten umzusetzen ist eine derartige Trittfrequenz in einem Einzelzeitfahren im Straßenradspport, bei dem zum Einen die Schwankungen zwischen Führungsarbeit und Windschattenfahren und zum Anderen die starken Geländeunterschiede entfallen. Daher kann unter den genannten Bedingungen auch eine ausreichend große Übersetzung gewählt werden um auf ausreichend hohe Geschwindigkeiten bei einer gleichzeitig niedrigen Trittfrequenz zu kommen.

7 Literaturverzeichnis

Böning D., Gönen, Y. & Maassen, N. (1984). Relationship between work load, pedal frequency, and physical fitness. *Internation Journal of Sports Medicine*. 5, S. 92–97

Coast, J.R., Cox, R.H. & Welch, H.G. (1986). Optimal pedaling rate in prolonged bouts of cycle ergometry. *Medicine and science and excersie*, 18 (2), 225-230.

Coyle, E. F., Sidossis, L. S., Horowitz, J. F. & Beltz, J. D. (1992). *Medicine and Science in sports and exercise*, 24 (7), 782-788.

Denadai, S. B., de Araújo Ruas, V. D. & Figuera, T. R. (2005). Maximal lactate steady state concentration independent of pedal cadence in active individuals. *Europ. J. appl. Physiol*, 96 (4), 477-480

De Marées, H. (2003). *Sportphysiologie* (9. Überarb. und erw. Aufl.). Köln: Sportverlag Strauß.

Dickinson, S. (1929). The efficiency of bicycle pedalling affected by speed and load. *J Physiol*, 67, o. S.

Dieterich, S. (2000). Effekte der Trittfrequenz und der Belastungsintensität auf den Energiestoffwechsel und die sympathische Aktivierung bei Dauerbelastungen auf dem Fahrradergometer. Kelkheim: M. – G. – Schmitz Verlag

Eckermann, P. & Millahn, H. P. (1966). Der Einfluss der Drehzahl auf die Herzfrequenz und die Sauerstoffaufnahme bei konstanter Leistung am Fahrradergometer. . *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie*, 23, 340-344.

Hagan, R., D., Weis, S. E. & Raven, P. B. (1992). Effect of pedal rate on cardiorespiratory responses during continuous exercise. . *Medicine and Science in sports and exercise*, 24 (10), 1088-1095.

Hagberg, J. M., Mullin, J. P., Giese, M. D. & Spitznagel, E. (1981). Effect of pedaling rate on submaximal exercise responses of competitive cyclists. *J Appl Physiol.*, 51, 447–451.

Löllgen, H., Ulmer, H. V. & Nieding, G. v. (1977). Heart rate and perceptual response to exercise with different pedalling speed in normal subject and patients. *Europ. J. appl. Physiol.*, 37, 297-304.

Lucia, A., San Juan, A. F., Montilla, M., CANETE, S., Santalla, A., Earnest, C. & Perez, M. (2004). In Professional Road Cyclists, Low Pedaling Cadences Are Less Efficient. *Medicine & Science In Sports & Exercise*, 36 (6), 1048–1054.

Marsh, A. P. & Martin, P. E. (1993). The association between cycling experience and preferred and most economical cadence. *Medicine and Science in sports and exercise*, 25 (11), 1269-1274.

Roecker, K., Prettin, S., Pottgiesser, T, Schumacher, Y. O. & Dickhuth, H. H. (2010). Metabolische Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung in der Sportmedizin. *sport- und präventivmedizin.*, 1, 2–8.

Stegemann, J., Ulmer, H. V., Heinrich, K. W. (1968). Die Beziehung zwischen Kraft und Kraftempfinden als Ursache für die Wahl energetisch ungünstiger Tretfrequenzen beim Radsport. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie*, 25 (3), 224–234.

Stegemann, J (1971). *Leistungsphysiologie*. Stuttgart: Thieme Verlag

Suzuki, Y. (1979). Mechanical efficiency of fast- and slow-twitch muscle fibers in man during cycling. *J. Appl. Physiol.*, 47 (2), 263-267

Swain, D. P. & Wilcox, J. P. (1992). Effect of cadence on the economy of uphill cycling. *Medicine and Science in sports and exercise*, 24 (10), 1123-1127.

Ulmer, H. V. (1969). Die Abhängigkeit des Leistungsempfindens von der Tretfrequenz bei Radsportlern. *Sportarzt und Sportmedizin*, 10, 385-394

Weineck, J. (2010). *Optimales Training* (10. überarb. u. erw. Aufl.), Balingen: Spitta Verlag GmbH & Co. KG.

Weiß, C. (Red.). (1996). *Handbuch Radsport – Geschichte und Entwicklung, Freizeitrad sport und Radrennsport, Technik und Training, Ernährung und Medizin, Ausrüstung und Material*. München: BLV

Woolford, S. M., Withers, R. T., Craig, N. P., Bourdon, P. C., Stanef, T. & McKenzie, I. (1999). Effect of pedal cadence on the accumulated oxygen deficit, maximal aerobic power and blood lactate transition thresholds of high-performance junior endurance cyclists. *Europ. J. appl. Physiol*, 80 (4), 285-291.

Zoldaz, J. A., Duda, K. & Majerczak, J. (1998). VO_2 /Power Output Relationship and the Slow Component of Oxygen Uptake Kinetics During Cycling at Different Pedalling Rates: Relationship to Venous Lactate Accumulation and Blood Acis-Base Balance. *Physiol. Res.*, 47, 427-438.