

LEISTUNGSDIAGNOSTIK IM RADSPORT

—

VALIDITÄT UND STÖREINFLÜSSE

**Dissertation zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Philosophie
der Fakultät HW
Bereich Empirische Humanwissenschaften
der Universität des Saarlandes**

**vorgelegt von
Sascha Schwindling
aus Saarbrücken**

Saarbrücken, 2016

Dekan der Fakultät:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Cornelius König

Berichterstatter:

Univ.-Prof. Dr. med. Tim Meyer

Univ.-Prof. Dr. phil. Georg Wydra

Tag der Disputation: 05.12.2016

„MIR IST ES EINGEFALLEN, WÄHREND ICH FAHRRAD FUHR.“

(Albert Einstein über die Relativitätstheorie)

Inhaltsverzeichnis

TABELLENVERZEICHNIS	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	IX
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XI
1 EINLEITUNG	1
1.1 Struktur des Radsports	3
1.2 Anforderungsprofil im Radsport	4
1.2.1 Aerobe Leistungsfähigkeit	6
1.2.2 Anaerobe Leistungsfähigkeit	9
1.3 Physiologische Hintergründe des Radsports	11
1.3.1 Physiologie der Ausdauerleistung	11
1.3.2 Physiologie der Sprintleistung	16
1.4 Erfassung leistungsphysiologischer Komponenten	16
1.4.1 Maximale Parameter des Leistungstests	19
1.4.2 Submaximale Parameter des Leistungstests	22
1.5 Methodische Überlegungen zur Schwellenvalidierung	39
1.6 Forschungsdefizit und Zielsetzung der Arbeit.....	41
2 STUDIE 1 – VALIDIERUNG VON LAKTATSCHWELLENKONZEPTEN	
 AM MLSS.....	43
2.1 Einleitung	43
2.2 Darstellung der empirischen Untersuchung	44
2.2.1 Fragestellung und Arbeitshypothese.....	44
2.2.2 Untersuchungsmethodik	44
2.2.3 Statistische Hypothese.....	50
2.2.4 Statistik	50
2.3 Ergebnisse	51
2.3.1 Hypothesenprüfung	57
2.4 Diskussion.....	57
2.4.1 Ergebnisdiskussion	57
2.5 Schlussfolgerung.....	64

3	STUDIE 2 – VALIDIERUNG VON LAKTATSCHWELLENKONZEPTEN AM 40-KM-ZEITFAHREN	65
3.1	Einleitung	65
3.2	Darstellung der empirischen Untersuchung	67
3.2.1	Fragestellung und Arbeitshypothese	67
3.2.2	Untersuchungsmethodik	67
3.2.3	Statistische Hypothese	69
3.2.4	Statistik	69
3.3	Ergebnisse	70
3.3.1	Hypothesenprüfung	76
3.4	Diskussion	76
3.4.1	Ergebnisdiskussion	76
3.5	Schlussfolgerung	81
4	STUDIE 3 – EINFLUSS VON ERMÜDUNG AUF DIE LEISTUNGSDIAGNOSTIK	82
4.1	Einleitung	82
4.2	Darstellung der empirischen Untersuchung	85
4.2.1	Fragestellung und Arbeitshypothese	85
4.2.2	Untersuchungsmethodik	86
4.2.3	Statistische Hypothese	88
4.2.4	Statistik	88
4.3	Ergebnisse	89
4.3.1	Hypothesenprüfung	95
4.4	Diskussion	96
4.4.1	Ergebnisdiskussion	96
4.5	Schlussfolgerung	101
5	STUDIENLIMITATIONEN UND METHODENKRITIK.....	102
5.1	Studie 1.....	102
5.2	Studie 3.....	104
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	106

6.1	Studie 1 – Validierung von Laktatschwellenkonzepten am MLSS ..	106
6.2	Studie 2 – Validierung von Laktatschwellenkonzepten am 40-km- Zeitfahren.....	107
6.3	Studie 3 – Einfluss von Ermüdung auf die Leistungsdiagnostik	108
6.4	Schlussfolgerung.....	109
6.5	Ausblick	110
LITERATURVERZEICHNIS.....		112
DANKSAGUNG		133
ERKLÄRUNG.....		134

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Anthropometrische, submaximale und maximale leistungsphysiologische Charakteristika der Fahrer eines typischen professionellen Rennradteams unterteilt nach ihren Spezialgebieten (Mittelwert \pm Standardabweichung) (Mujika & Padilla, 2001b).
- Tabelle 2: Maximale Sauerstoffaufnahme männlicher und weiblicher Straßenrad-sportler und Mountainbiker (Faria, Parker, & Faria, 2005b).
- Tabelle 3: Aktuelle Bahn-Weltrekorde und geschätzte Energieverteilung, sowie geschätzte Leistung in Relation zur maximalen Sauerstoffaufnahme (# aktualisiert) (Craig & Norton, 2001; Jeukendrup, Craig, & Hawley, 2000; Union Cycliste Internationale, 2016b).
- Tabelle 4: Anaerobe Laktatschwellenkonzepte (LLK = Laktatleistungskurve, IAS = individuelle anaerobe Schwelle), modifiziert nach Faude, Kindermann, Meyer (2009).
- Tabelle 5: Mittlere Abweichungen (Differenz maximales Laktat-Steady-State [MLSS] - Laktatschwelle [LT]) und 95 %-Konfidenzintervalle (LoA) für vier verschiedene Laktatschwellenkonzepte bei Laufband- (n = 16) und Fahrradbelastungen (n = 22) (Faude, Kindermann, & Meyer, 2009). Die Ergebnisse wurden mit Erlaubnis aus den Rohdaten von Heck et al. berechnet (Heck, 1990; Heck, Hess, & Mader, 1985; Heck, Mader, et al., 1985).
- Tabelle 6: Anthropometrische Daten und Leistung am maximalen Laktat-Steady-State (MLSS) (Mittelwert \pm Standardabweichung).
- Tabelle 7: Mittlere maximale Beanspruchungsparameter (Herzfrequenz [HF], Blutlaktatkonzentration [BLa] und respiratorischer Quotient [RQ]) aus dem Stufentest (n = 26; Alter: 25 ± 4 J).
- Tabelle 8: Mittelwerte des maximalen Laktat-Steady-States (MLSS), der maximalen Leistung im Stufentest (P_{max}) und der Schwellenkonzepte, sowie Korrelation und mittlerer Unterschied zum MLSS (*p < 0,05; n = 26).
- Tabelle 9: Übersicht der mittleren Abweichungen (mittlere Differenzen [MD] \pm 95 %-Konfidenzintervalle [LoA]) der Laktatschwellenkonzepte und der maximalen Leistung im Stufentest (P_{max}) zum MLSS (1 = alle Probanden (n = 26), 2 = Ausdauertrainierte (n = 13), 3 = Nichtausdauertrainierte (n = 13)).
- Tabelle 10: Anzahl der Probanden mit einer Abweichung von weniger als einer relevanten Trainingszone (45 W, ausreichend), weniger als der mittleren Jahresschwankung der Dauerleistungsfähigkeit (30 W, genau) und weniger als der Genauigkeit in der Bestimmung des MLSS (15 W, sehr genau) zwischen den Schwellen, der maximalen Leistung im Stufentest (P_{max}) und P_{max} minus der mittleren Differenz zwischen P_{max} und dem MLSS (106 W) zum MLSS (n = 26).
- Tabelle 11a und 11b: Verteilung der Probanden zur Berechnung des Chi-Quadrat-Tests für eine sehr genaue Abschätzung (± 15 W) des MLSS zwischen den fixen und individuellen Schwellenkonzepten und für eine genaue Abschätzung (± 30 W) für P_{max} minus 106 W bzw. D_{max} und 4-mmol (n = 26).
- Tabelle 12: Maximale Beanspruchungsparameter (Herzfrequenz [HF], Blutlaktatkonzentration [BLa] und subjektives Belastungsempfinden [RPE]) aus dem Zeitfahren, Wingate-Test und Stufentest (Mittelwert \pm Standardabweichung; n = 23; Alter: 29 ± 8 J).

- Tabelle 13: Korrelationen und mittlere Unterschiede (mittlere Differenzen [MD] und 95 %-Konfidenzintervalle [LoA]) der leistungsphysiologischen Parameter aus dem Stufentest (ST) und Wingate-Test (WT) zur mittleren Leistung im Zeitfahren (TT) (n = 23; *p < 0,05).
- Tabelle 14: Anzahl der Probanden mit einer ausreichenden (24 %), einer genauen (12 %) und einer sehr genauen (8 %) Abweichung zwischen den anaeroben Schwellen und der maximalen Leistung im Stufentest (P_{max}) zur mittleren Leistung im 40-km-Zeitfahren (TT) (n = 23).
- Tabelle 15: Verteilung der Probanden zur Berechnung des Chi-Quadrat-Tests für eine sehr genaue Abschätzung (± 8 %) des TT zwischen 4-mmol und den anderen Schwellen (n = 26).
- Tabelle 16: Maximale Beanspruchungsparameter (Herzfrequenz [HF], Blutlaktatkonzentration [BLa] und subjektives Belastungsempfinden [RPE]) aus dem Zeitfahren, Wingate- und Stufentest (n = 23, * p < 0,05 zu Tag 1, # p < 0,05 zu Tag 8; Alter: 29 ± 8 J).
- Tabelle 17: Veränderungen der leistungsphysiologischen Parameter vor (Tag 1) und nach (Tag 8) einem 6-tägigen Radtrainingslager, sowie nach anschließenden zwei Regenerationstagen (Tag 11) (n = 23).
- Tabelle 18: Veränderung der leistungsphysiologischen Parameter vor (Tag 1) und nach (Tag 8) einem 6-tägigen Radtrainingslager, sowie nach anschließenden zwei Regenerationstagen (Tag 11) für die Athleten mit einer Reduktion der Zeit im Zeitfahren an Tag 8 und einem Anstieg zu Tag 11 von mehr als der Spontanvariabilität (1,2 %) (Hopkins, Schabort, & Hawley, 2001) (n = 10).
- Tabelle 19: Unterschiede (Mittlere Differenz [MD] \pm 95 %-Konfidenzintervalle [LoA]) der Laktatschwellen zwischen Tag 1, 8 und 11 (n = 23, *p < 0,05).
- Tabelle 20: Anzahl der Probanden mit einer Abweichung der Laktatschwellen größer als die in der Literatur angegebenen Spontanvariabilitäten (SV; $\pm 2,5$ % für Stegmann, $\pm 2,8$ % für Dickhuth, $\pm 1,6$ % für D_{max} und $\pm 1,4$ % für 4-mmol; n = 23).

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Schematischer, beispielhafter, parabolischer Verlauf der individuellen Bestleistungen zur Zeit (Critical-Power-Konzept; eigene Daten [—] und errechnetes Modell [·····]).
- Abbildung 2: Eine typische Laktatleistungskurve (Faude, Kindermann, et al., 2009).
- Abbildung 3: Beispiel für die Bestimmung des maximalen Laktat-Steady-States (MLSS) mittels dreier Dauertests.
- Abbildung 4: Schematische Darstellung der Bestimmung der Stegmann-Schwelle.
- Abbildung 5: Schematische Darstellung der Bestimmung der Dickhuth-Schwelle.
- Abbildung 6: Schematische Darstellung der Bestimmung der D_{\max} -Schwelle.
- Abbildung 7: Schematische Darstellung der Bestimmung der 4-mmol-Schwelle.
- Abbildung 8: Studienablauf der ersten Studie.
- Abbildung 9: Korrelationen der Stegmann-, 4-mmol-, Dickhuth- und D_{\max} -Schwelle zum MLSS (im Uhrzeigersinn; $n = 26$).
- Abbildung 10: Korrelation der maximalen Leistung (P_{\max}) zum MLSS ($n = 26$).
- Abbildung 11: Bland-Altman-Plots zum Unterschied des maximalen Laktat-Steady-States (MLSS) vs. Stegmann, Dickhuth, 4-mmol und D_{\max} (im Uhrzeigersinn; rotes Karo = Nichtausdauertrainierte ($n = 13$), blauer Punkt = Ausdauertrainierte ($n = 13$)).
- Abbildung 12: Bland-Altman-Plot zum Unterschied des maximalen Laktat-Steady-States (MLSS) vs. P_{\max} (rotes Karo = Nichtausdauertrainierte ($n = 13$), blauer Punkt = Ausdauertrainierte ($n = 13$)).
- Abbildung 13: Mittelwerte verschiedener Laktatschwellenkonzepte in Abhängigkeit vom Belastungsanstieg und im Vergleich zum maximalen Laktat-Steady-State (MLSS), modifiziert nach Heck & Beneke (2008) (Punkte) mit eigenen Daten (Dreiecke) und den Daten aus Hauser et al. (2013) (Karos).
- Abbildung 14: Studienablauf der zweiten Studie.
- Abbildung 15: Korrelationen der absoluten und relativen maximalen Leistung (P_{\max} ; links, von oben nach unten) und der absoluten und relativen maximalen Sauerstoffaufnahme ($VO_{2\max}$; rechts, von oben nach unten) aus dem Stufentest zur Leistung im Zeitfahren (TT) ($n = 23$).
- Abbildung 16: Korrelationen der Schwellenkonzepte Stegmann, Dickhuth, 4-mmol und D_{\max} zur Leistung im Zeitfahren (TT) (im Uhrzeigersinn; $n = 23$).
- Abbildung 17: Bland-Altman-Plots zum Unterschied der Leistung im 40-km-Zeitfahren (TT) und der submaximalen Schwellen nach Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und 4-mmol (oben, im Uhrzeigersinn), sowie die maximale Leistung im Stufentest (P_{\max} ; unten) ($n = 23$).
- Abbildung 18: Studienablauf der dritten Studie (TT = Zeitfahren, WT = Wingate-Test, ST = Stufentest, IAS = individuelle anaerobe Schwelle).
- Abbildung 19: Mittlere Laktatverläufe im Stufentest vor (Tag 1) und nach einem 6-tägigen Trainingslager (Tag 8), sowie nach weiteren zwei Regenerationstagen (Tag 11) ($n = 23$).

Abbildung 20: Mittlere Herzfrequenzverläufe im Stufentest vor (Tag 1) und nach einem 6-tägigen Trainingslager (Tag 8), sowie nach weiteren zwei Regenerationstagen (Tag 11) ($n = 23$).

Abbildung 21: Individuelle Verläufe der Laktatschwellen (Stegmann, Dickhuth, 4-mmol, D_{\max} – im Uhrzeigersinn) vor (Tag 1), direkt nach (Tag 8) und zwei Regenerationstagen nach (Tag 11) einem Trainingslager ($n = 23$; blau = Abfall und Anstieg, rot = Anstieg und Abfall, Schwarz = Anstieg, grau = Abfall).

Abkürzungsverzeichnis

4-mmol	4-mmol-Schwelle
α	Signifikanzgrenze
ANOVA	Varianzanalyse
AT	ausdauertrainierte Subgruppe
ATP	Adenosintriphosphat
β	Fehler zweiter Art
BLa	Blutlaktatkonzentration
BLa _{max}	maximale Blutlaktatkonzentration
χ	Prüfungsgröße beim Chi-Quadrat-Test
CP	Critical-Power
CV	Critical-Velocity
cm	Zentimeter
d	Effektstärke nach Cohen
Δ	Differenz
D'	anaerobe Kapazität beim Laufen
Dickhuth	Basislaktat +1,5 mmol/l-Schwelle
D _{max}	Schwelle nach der D _{max} -Methode
D _{mod}	modifizierte D _{max} -Schwelle
EMG	Elektromyografie
F	Prüfungsgröße bei der ANOVA
FSL	funktionelle Schwellenleistung
HF	Herzfrequenz
HF _{max}	maximale Herzfrequenz
HIIT	Hochintensives Intervalltraining
IAS	individuelle anaerobe Schwelle
J	Jahre
kcal	Kilokalorien
kg	Kilogramm
KI	Konfidenzintervall
l	Liter
LLK	Laktatleistungskurve
LMS	anaerobe Schwelle nach dem Laktatsenke-Modell
LoA	Limits-of-Agreement
LSCT	Lamberts and Lambert Submaximal Cycling Test

LT	Laktatschwelle
LTP	Laktatumschlagpunkt
m	Meter
Max	Maximum
MD	Mittlere Differenz
min	Minute
Min	Minimum
μl	Mikroliter
ml	Milliliter
MLSS	maximales Laktat-Steady-State
mmol	Millimol
MTB	Mountainbike
MW	Mittelwert
n	Anzahl der Versuchspersonen
NAT	nichtausdauertrainierte Subgruppe
OBLA	Onset of Blood Lactate Accumulation
p	Fehlerwahrscheinlichkeit
P_{max}	maximale Leistung
P_{mean}	mittlere Leistung
r	Korrelationskoeffizient
RPE	subjektives Belastungsempfinden (Skala 1 bis 10)
RPE_{max}	maximales subjektives Belastungsempfinden (Skala 1 bis 10)
RQ	respiratorischer Quotient
RQ_{max}	maximaler respiratorischer Quotient
s	Sekunde
SD	Standardabweichung
ST	Stufentest
SV	Spontanvariabilität
TT	Zeitfahren
U	Umdrehung
VO_{2max}	maximale Sauerstoffaufnahme
VT	ventilatorische Schwelle
W	Watt
W'	anaerobe Kapazität beim Radfahren
WT	Wingate-Test

1 Einleitung

Der Radsport zählt sowohl im Freizeit- als auch im Leistungssport zu einer der populärsten Sportarten weltweit. Betrachtet man die Wettkampfdisziplinen, so handelt es sich mit wenigen Ausnahmen wie dem Hallenradsport (Kunstrad und Radball/-polo), dem BMX, dem Trial und dem Bahnsprint in erster Linie um die Ausdauerdisziplinen Bahn (Ausdauer), Straßenradsport, Querfeldein und Mountainbiken (Schmidt, 2007). Dabei weisen Strecken und entsprechenden Weltrekorde dieser verschiedenen Disziplinen eine extreme Bandbreite auf. Als kürzeste Ausdauerdisziplin gilt die 4000 m-Einerverfolgung der Männer mit einem Weltrekord von 4:10,534 min bzw. 3000 m für die Frauen mit dem entsprechenden Weltrekord von 3:22,269 min. Als längster Radsportwettkampf, der an einem Stück gefahren wird, gelten die ~4.800 km des „Race Across America“ mit dem Weltrekord der Männer von 7 Tagen, 15 Stunden und 56 Minuten bzw. 9 Tagen, 4 Stunden und 2 Minuten bei den Frauen. So stellt jede Disziplin ein ganz eigenes Anforderungsprofil an den Sportler (Allen & Coggan, 2012; Friel, 2012; Schmidt, 2007; Union Cycliste Internationale, 2016b).

Das Anforderungsprofil im Straßenradsport und den Geländedisziplinen ist zusätzlich zu den Langzeitausdaueranforderungen dadurch gekennzeichnet, dass die Athleten bei Wettkämpfen über mehrere Stunden in den entscheidenden Momenten in der Lage sein müssen, über eine relativ kurze Zeitdauer hohe Leistung abzurufen und diese auch tolerieren zu können (z. B. bei Massenstarts, Anstiegen, Zwischen- oder Endsprints) (Gregory, Johns, & Walls, 2007; Menaspá, Quod, Martin, Peiffer, & Abbiss, 2015). Da sich die Radsportler innerhalb der Disziplinen auf bestimmte Arten von Rennen (z. B. Rundfahrten, Marathon, Kriterium oder „Frühjahrs-Klassiker“) oder bestimmte Streckenabschnitte (z. B. Kletterer, Zeitfahrer, Sprinter oder „Rouleur“) spezialisiert haben (Faria et al., 2005b; Friel, 2012; Schmidt, 2007), unterscheiden sich die Anforderungsprofile dieser Spezialisten auch im Detail voneinander (Friel, 2012).

Die Gemeinsamkeit aller Ausdauerdisziplinen liegt darin, dass die Sportler einen hohen Anteil an aerober Leistungsfähigkeit benötigen (Craig & Norton, 2001; Faria et al., 2005b). So verfügen professionelle Radsportler sowohl über eine hohe maximale Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) als auch eine maximale ergometrische Leistungsfähigkeit (P_{max}) und sind in der Lage hohe Leistungen über einen langen Zeitraum aufrecht zu halten (Faria et al., 2005b).

Zur Erfassung der Leistungsfähigkeit über einen definierten Zeitraum dient ein Zeitfahren. Mit mehrerer solcher Zeitfahren über unterschiedliche Zeiten kann die sogenannte

„Critical-Power-Kurve“ erstellt werden (Allen & Coggan, 2012; Hill, 1993). Dabei bleibt der physiologische Hintergrund allerdings unberücksichtigt und leistungsbestimmende oder -limitierende Komponenten können nicht oder nur schlecht erfasst werden. Zur Bestimmung dieser (physiologischen) Komponenten haben sich Leistungsdiagnostiken im Labor etabliert. Die Diagnostik der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit erfolgt in der Regel mit Hilfe von ansteigenden Belastungstests (Faude, Kindermann, et al., 2009; Meyer, Lucia, Earnest, & Kindermann, 2005). Hierbei werden unterschiedliche Parameter ausgewertet. Zu den maximalen Parametern zählen die P_{\max} und $VO_{2\max}$ (Meyer & Kindermann, 1999). Zu beachten ist, dass die erreichte und gemessene Ausbelastung stark von der Motivation des Athleten abhängt. Dies stellt sowohl in Studien als auch in der Praxis oft ein Problem bei der Interpretation der maximalen Parameter ($VO_{2\max}$ und P_{\max}) dar (Meyer, Scharhag, & Kindermann, 2005).

Neben den maximalen Parametern können auch submaximale Parameter, wie spirometrische „Schwellen“ (erste und zweite ventilatorische Schwelle; VT1 und VT2) oder Schwellen aus der Laktatleistungskurve (aerobe und anaerobe Schwelle), bei ansteigenden Tests ausgewertet werden (Faude, Kindermann, et al., 2009; Meyer, Lucia, et al., 2005). Das Ziel der VT2 und der anaeroben Laktatschwelle ist es, das maximale Laktat-Steady-State (MLSS) abzubilden (Billat, Sirvent, Py, Koralsztein, & Mercier, 2003; Faude, Kindermann, et al., 2009; Meyer, Lucia, et al., 2005). Das MLSS gilt neben der $VO_{2\max}$ als einer der wichtigsten Parameter der aeroben Leistungsdiagnostik (Billat et al., 2003). In diesem Zusammenhang hat sich in den vergangenen 40 Jahren die anaerobe Laktatschwelle zur Abschätzung des MLSS etabliert (Heck & Beneke, 2008).

Über die Jahre wurde eine Vielzahl verschiedener Laktatschwellenmodelle entwickelt, welche sich in (halb)fixe und individuelle Konzepte unterteilen lassen (Faude, Kindermann, et al., 2009). Die Frage nach der Konstruktvalidität, also der Genauigkeit eines Schwellenkonzepts das MLSS abzubilden, gilt jedoch für die meisten Konzepte als unzureichend erforscht (Faude, Kindermann, et al., 2009) und wird für ausgewählte Schwellenmodelle aufgrund interindividueller Heterogenität durch zwei kürzlich veröffentlichte Arbeiten in Frage gestellt (Grossl, De Lucas, De Souza, & Antonacci Guglielmo, 2012; Hauser, Adam, & Schulz, 2014). Die prädiktive Validität, d. h. wie genau das Ergebnis einer Laktatleistungsdiagnostik in der Lage ist, eine Wettkampfleistung vorherzusagen, gilt zwar für den Laufsport als hoch (Faude, Kindermann, et al., 2009), vor allem aber für längere Zeitfahren (40 km oder 60 bis 90 min) im Radsport bislang als unzureichend erforscht. Zudem kamen diesbezügliche Studien (Aman, Subudhi, & Foster, 2006; Bentley, McNaughton, Thompson, Vleck, & Batterham, 2001;

Bishop, Jenkins, & Mackinnon, 1998) zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen (Faude, Kindermann, et al., 2009). Klar ist, dass Ermüdung einen negativen Einfluss auf die sportartspezifische Leistungsfähigkeit und die maximalen Parameter der Leistungsdiagnostik hat (Meeusen et al., 2013; Urhausen & Kindermann, 2002) und daher die Interpretationen der maximalen leistungsdiagnostischen Parameter durch den aktuellen Ermüdungsstand des Athleten beeinflusst werden. Da maximale Laktatkonzentrationen im ermüdeten Zustand reduziert sind (Urhausen & Kindermann, 2002), wäre es denkbar, dass auch die Laktatschwellen von Ermüdung beeinflusst werden. Allerdings wurde dies bislang noch nicht gezielt untersucht.

Ziel dieser Arbeit war es deshalb, die anaeroben Laktatschwellen nach den Konzepten von Stegmann (Stegmann, Kindermann, & Schnabel, 1981), Dickhuth (Dickhuth et al., 1999), D_{\max} (Cheng et al., 1992) und 4-mmol (Heck, Mader, et al., 1985) auf ihre Genauigkeit beim Abschätzen des MLSS (Kriteriumsvalidität) und dem Vorhersagen der Leistung im 40-km-Zeitfahren (Prädiktorvalidität), sowie auf den Einfluss von Ermüdung zu überprüfen.

1.1 Struktur des Radsports

Die typische Dauer bei Straßen- und Mountainbikerennen liegt zwischen einer und fünf Stunden. Rundfahrten oder Etappenrennen sind durch das mehrere Tage andauernde, meist direkte Aufeinanderfolgen von verschiedenen Massenstarts oder Zeitfahrwettkämpfen gekennzeichnet. Bei den „Großen Drei“ der Radsportszene, der Tour de France, der Vuelta a Espana und dem Giro d'Italia, müssen professionelle Radsportler in der Lage sein, über drei Wochen nahezu täglich eine hohe Leistungsfähigkeit abzurufen und zu tolerieren. Dabei setzen die Radsportler ihre Leistung in erster Linie dazu ein, um den Rollwiderstand, aber auch unterschiedliche Windwiderstände zu überwinden. Bei Bergetappen und Geländewettkämpfen kommt hingegen dem Überwinden der Schwerkraft eine größere Bedeutung zu. Bei Bahnwettkämpfen stehen in Abhängigkeit vom Wettkampfmodus harte Antritte, gefolgt von einer hochintensiven Sprintleistung im Vordergrund (Faria et al., 2005b).

Auch wenn es auf den ersten Blick nicht so scheint, so ist der Straßenradsport eine komplexe Sportart. In jeder Saison absolvieren professionelle Athleten zwischen 90 und 100 Wettkampftage, die von Ein-Tages-Events bis hin zu dreiwöchigen Rundfahrten reichen (Lucia, Hoyos, & Chicharro, 2001; Lucia, Hoyos, Santalla, Earnest, & Chicharro, 2003). Innerhalb dieser Rennen werden verschiedene Anforderungen an die

Rennfahrer gestellt. Lange flache Etappen, Einzel- oder Mannschaftszeitfahren, „Windkantenabschnitte“, wellige Höhenprofile, lange Bergpässe und Sprintankünfte fordern jeweils darauf abgestimmte spezielle Individual- und Teamtaktiken (de Koning, Bobbert, & Foster, 1999; Lucia et al., 2001; Lucia, Hoyos, et al., 2003; Nikolopoulos, Arkinstall, & Hawley, 2001).

Von all diesen Anforderungen hat das Einzelzeitfahren den größten Einfluss auf den Endstand im Gesamtklassement von Etappenrennen (Lucia et al., 2001; Padilla, Mujika, Orbananos, & Angulo, 2000). Dabei ist das Zeitfahren ein Wettkampf im „closed-loop design“, bei dem die Teilnehmer eine vorher festgelegte Strecke so schnell wie möglich zu absolvieren haben (Padilla, Mujika, Orbananos, et al., 2000). Bei diesem Rennformat oder einem solchen Rennabschnitt müssen die Sportler verschiedene physiologische Systeme bis zum Äußersten belasten, und das Regulieren der Geschwindigkeit bzw. das Einteilen der Leistung über die Zeit oder Strecke (Pacing) ist essentiell und fordert die Fahrer (Jeukendrup et al., 2000).

Viele wissenschaftliche Arbeiten beschäftigen sich mit den Faktoren, die die Zeitfahrleistung beeinflussen. Zu diesen zählen physiologische (Balmer, Davison, & Bird, 2000; Jeukendrup et al., 2000; Laursen, Shing, & Jenkins, 2003; Lucia, Hoyos, Carvajal, & Chicharro, 1999; Lucia, Hoyos, Perez, & Chicharro, 2000), umweltbedingte (Jeukendrup et al., 2000; Kay et al., 2001) und biomechanische (de Koning et al., 1999; Jeukendrup et al., 2000). Verschiedene Faktoren spielen beim Ergebnis im langen Zeitfahren eine Rolle, wobei die absolute maximale durchhaltbare Leistung über die Zeit und die Aerodynamik den größten Einfluss auf die Endzeit zu haben scheinen (Candau et al., 1999; de Koning et al., 1999; Jeukendrup et al., 2000).

1.2 Anforderungsprofil im Radsport

In Tabelle 1 werden beispielhaft die anthropometrischen und physiologischen Charakteristika von professionellen StraßenradSPORTlern dargestellt. Untersucht man die physiologischen Parameter dieser Athleten, so lässt sich nachweisen, dass erfolgreiche Fahrer im Schnitt über eine hohe maximale Sauerstoffaufnahme (VO_{2max} ; ~79 ml/min/kg) und eine hohe anaerobe Laktatschwelle (~90 % VO_{2max}) verfügen (Coyle et al., 1991; Faria, Faria, Roberts, & Yoshimura, 1989; Fernandez-Garcia, Perez-Landaluce, Rodriguez-Alonso, & Terrados, 2000; Lucia, Pardo, Durantez, Hoyos, & Chicharro, 1998). Die maximale Leistungsfähigkeit im Stufen- oder Rampentest liegt bei mehr als 5,5 Watt/kg (Palmer, Hawley, Dennis, & Noakes, 1994; Santalla, Earnest,

Marroyo, & Lucia, 2012). Dabei werden professionelle Radsportler, wie in Tabelle 1 vorgenommen, anhand ihrer Spezialgebiete in die Kategorien „Rouleure“ (Flat terrain), Zeitfahrer (Time trialist), Allrounder (All terrain) und Kletterer (Uphill) eingeteilt (Faria, Parker, & Faria, 2005a; Padilla, Mujika, Cuesta, & Goiriena, 1999). Für Sprinter liegen bislang nur vereinzelte Daten vor (Menaspa et al., 2015).

Tabelle 1: Anthropometrische, submaximale und maximale leistungsphysiologische Charakteristika der Fahrer eines typischen professionellen Rennradteams, unterteilt nach ihren Spezialgebieten (Mittelwert \pm Standardabweichung) (Mujika & Padilla, 2001b).

Charakteristik	Gruppe			
	Rouleure (n = 5)	Zeitfahrer (n = 4)	Allrounder (n = 6)	Kletterer (n = 9)
Alter [J]	27 \pm 3	28 \pm 5	25 \pm 2	25 \pm 4
Größe [cm]	186 \pm 4	181 \pm 6	180 \pm 2	175 \pm 7 ^a
Gewicht [kg]	76 \pm 3	71 \pm 6	68 \pm 3 ^a	62 \pm 4 ^{a,b,c}
P_{max} [W]	461 \pm 39	457 \pm 46	432 \pm 27	404 \pm 34 ^{a,b}
P_{max} [W/kg]	6,0 \pm 0,3	6,4 \pm 0,1	6,4 \pm 0,2	6,5 \pm 0,3 ^a
VO_{2max} [l/min]	5,7 \pm 0,4	5,7 \pm 0,5	5,4 \pm 0,3	5,1 \pm 0,4 ^{a,b}
VO_{2max} [ml/min/kg]	74,4 \pm 3,0	79,2 \pm 1,1 ^a	78,9 \pm 1,9 ^a	80,9 \pm 3,9 ^a
W_{LT} [W]	356 \pm 31	357 \pm 41	322 \pm 43	308 \pm 46
W_{LT} [W/kg]	4,7 \pm 0,3	5,0 \pm 0,2	4,7 \pm 0,5	4,9 \pm 0,5
W_{OBLA} [W]	417 \pm 45	409 \pm 46	366 \pm 38	356 \pm 41 ^{a,b}
W_{OBLA} [W/kg]	5,5 \pm 0,4	5,7 \pm 0,2	5,4 \pm 0,4	5,7 \pm 0,5
^a signifikanter Unterschied zu Rouleure ^b signifikanter Unterschied zu Zeitfahrer ^c signifikanter Unterschied zu Allrounder LT = aerobe Schwelle, OBLA = 4-mmol-Schwelle, VO _{2max} = maximale Sauerstoffaufnahme, P _{max} = maximale Leistungsfähigkeit				

1.2.1 Aerobe Leistungsfähigkeit

1.2.1.1 Die maximale Sauerstoffaufnahme von Radsportlern

Umfangreich dokumentiert ist eine hohe maximale Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) von professionellen Radsportlern (Faria, 1992; Fernandez-Garcia et al., 2000; Padilla et al., 1999; Santalla et al., 2012). Bei trainierten Radsportlerinnen konnte eine hohe negative Korrelation ($r = -0,91$) zwischen der Leistungsfähigkeit in einem 14-tägigen Etappenrennen und der VO_{2max} nachgewiesen werden (Pfeiffer, Harder, Landis, Barber, & Harper, 1993). Für männliche Teilnehmer der Tour de France und der Vuelta a España wird im Mittel von einer VO_{2max} von 73,5 ml/min/kg berichtet (Fernandez-Garcia et al., 2000). Die höchste relative VO_{2max} zeigen dabei im Mittel vor allem die „Kletterer“, was vermutlich am geringen Körpergewicht dieser Spezialisten liegt. Die höchste VO_{2max} für einen Tour de France-Sieger konnte mit 86 ml/min/kg nachgewiesen werden (Santalla, Naranjo, & Terrados, 2009). Um die Tour de France gewinnen zu können, scheint eine VO_{2max} von mehr als 80 ml/min/kg notwendig zu sein (Santalla et al., 2012). Eine hohe VO_{2max} wird überdies als Voraussetzung für das Erbringen einer hohen Leistungsfähigkeit angesehen, die im professionellen Radsport notwendig ist (Barbeau, Serresse, & Boulay, 1993; Santalla et al., 2012). Tabelle 2 zeigt die maximale Sauerstoffaufnahme von männlichen und weiblichen Straßenradsportlern und Mountainbikern verschiedenster Leistungsklassen und soll sich zur Auswahl und Einordnung von Radsportlern in die Kategorien „Professionell“, „Elite“ und „Amateur“ eignen (Faria et al., 2005b). Allerdings werden in dieser Tabelle keine klaren Cut-off-Werte der VO_{2max} für die einzelnen Kategorien dargestellt und eine eindeutige Einordnung eines Athleten in die jeweilige Kategorie aufgrund seiner VO_{2max} erscheint schwierig.

Tabelle 2: Maximale Sauerstoffaufnahme männlicher und weiblicher Straßenradfahrer und Mountainbiker (Faria et al., 2005b).

Studie	Kategorie	VO _{2max} [ml/min/kg]
Männliche Athleten [n]		
18 (Fernandez-Garcia et al., 2000)	Professionell	73,7
11 (Lucia, Hoyos, Perez, Santalla, & Chicharro, 2002)	Professionell	72,0
12 (Lucia, Hoyos, Santalla, Perez, & Chicharro, 2002b)	Professionell	71,3
24 (Padilla et al., 1999)	Professionell	78,8
23 (Sjogaard, 1984)	Professionell	71,0
8 (Terrados, Melichna, Sylven, Jansson, & Kaijser, 1988)	Professionell	70,0
14 (Gnehm, Reichenbach, Altpeter, Widmer, & Hoppeler, 1997)	Elite	69,4
6 (Saltin & Astrand, 1967)	Elite	74,0
22 (Burke, Cerny, Costill, & Fink, 1977)	Elite	67,1
9 (Coyle et al., 1991)	Elite	69,1
5 (Stromme, Ingjer, & Meen, 1977)	Elite	69,1
10 (Wilber, Zawadzki, Kearney, Shannon, & Disalvo, 1997)	Elite (MTB)	79,3
10 (Wilber et al., 1997)	Elite	70,0
15 (Faria et al., 1989)	Elite	75,5
8 (Lindsay et al., 1996)	Amateur	65,7
9 (Impellizzeri, Sassi, Rodriguez-Alonso, Mognoni, & Marcora, 2002)	Amateur (MTB)	75,9
10 (Lucia, Hoyos, et al., 2002b)	Amateur	69,5
12 (Padilla, Mujika, Cuesta, Polo, & Chatard, 1996)	Amateur	66,1
7 (Palmer et al., 1994)	Amateur	66,7
10 (Palmer, Dennis, Noakes, & Hawley, 1996)	Amateur	73,6
38 (Tanaka, Bassett, Swensen, & Sampedro, 1993)	Amateur	69,4
8 (Hopkins & McKenzie, 1994)	Amateur	68,0
Weibliche Athleten [n]		
10 (Wilber et al., 1997)	Elite (MTB)	57,9
10 (Wilber et al., 1997)	Elite	68,0

1.2.1.2 Die maximale Leistungsfähigkeit von Radsportlern

Betrachtet man die maximale Leistungsfähigkeit (P_{\max}) von professionellen Radsportlern, so ist diese zunächst abhängig vom Belastungsprotokoll. Bei sogenannten Rampentests (linearer Anstieg bzw. Stufendauer unter 1 min) variiert die maximale Leistung zwischen 450 und 500 W (6,5 - 7,5 W/kg) (Lucia, Hoyos, Perez, et al., 2002; Lucia et al., 2004; Lucia, Hoyos, Santalla, Perez, & Chicharro, 2002a; Lucia, Hoyos, et al., 2002b; Lucia, Joyos, & Chicharro, 2000; Lucia et al., 2006). Für Stufentests mit einer Stufendauer von 4 min liegt die P_{\max} im Mittel zwischen 400 und 450 Watt (6,0 - 6,5 W/kg) (Padilla et al., 1999; Santalla et al., 2009), bis hin zur P_{\max} vom fünfmaligen Tour de France-Sieger Miguel Indurain mit 572 W (7,1 W/kg), gemessen bei einem Stufentest mit 35 Watt Anstieg alle 4 min (Padilla, Mujika, Angulo, & Goiriena, 2000). Bei beiden Testvarianten liegt die P_{\max} von Zeitfahrern und Rouleuren generell höher als die der anderen Spezialisten (Lucia, Joyos, et al., 2000; Padilla, Mujika, Angulo, et al., 2000).

1.2.1.3 Submaximale Schwellen von professionellen Radsportlern

Messungen haben gezeigt, dass professionelle Radsportler neben einer hohen P_{\max} und $VO_{2\max}$ ebenso über hohe submaximale Schwellen verfügen (Faria et al., 2005b). Dabei liegt die Leistungsfähigkeit von Tour de France-Startern am Punkt des ersten Laktatanstiegs (aerobe Laktatschwelle [LT], Tabelle 2) bei etwa 330 W und die Leistung bei einer Laktatkonzentration von 4-mmol/l (OBLA) bei 386 W (Earnest et al., 2009; Fernandez-Garcia et al., 2000; Lucia, Hoyos, et al., 1999; Mujika & Padilla, 2001b; Padilla, Mujika, Santisteban, Impellizzeri, & Goiriena, 2008). Bei Rampenprotokollen liegt die erste ventilatorische Schwelle (VT1, welche in etwa der aeroben Laktatschwelle entspricht) zwischen 315 W und 370 W und die zweite ventilatorische Schwelle (VT2, welche etwa der anaeroben Laktatschwelle entspricht) bei 400 bis 450 W (Earnest et al., 2009; Lucia, Hoyos, et al., 1999; Lucia, Hoyos, & Chicharro, 2000; Lucia, Hoyos, et al., 2003). Die VT1 und VT2 von Tour de France-Teilnehmern liegen damit deutlich höher, als es für Elite-Radsportler sonst berichtet wird (Lucia, Hoyos, et al., 2002b; Lucia et al., 1998). Insgesamt scheint es so, dass Tour de France-Teilnehmer eine Selektion von professionellen Straßenradsportlern darstellt, die über besonders hohe aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit verfügen. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die VT1 mit der Leistung bei Zeitfahretappen der Tour de France zusammenhängt (Earnest et al., 2009) und Zeitfahrern besonders hohe 4-mmol-Schwellen haben (z. B. 505 W bzw. 6,2 W/kg für Miguel Indurain) (Padilla, Mujika, Angulo, et al., 2000).

In Fachkreisen wird einheitlich berichtet, dass die anaerobe Schwelle von professionellen Radsportlern bei etwa 90 % VO_{2max} liegt (Fernandez-Garcia et al., 2000) und diese sich im Gegensatz zur VO_{2max} signifikant zwischen Profis und Amateuren unterscheidet (Lucia et al., 1998). Auch sind die Athleten bei einzelnen Etappen des Giro d'Italia, der Tour de France oder der Vuelta a Espana in der Lage, hohe submaximale Belastungen nahe ihrer zweiten ventilatorischen Schwelle (VT2) bzw. bei ~90 % VO_{2max} für ~60 Minuten, durchzuhalten (Lucia, Hoyos, Perez, et al., 2000). Daher scheint eine hohe VT2 (in Relation zum Körpergewicht) von Vorteil zu sein, wenn Anstiege zwischen 30 und 60 min zu erklimmen sind. Denn solche Abschnitte verlangen von den Athleten Leistungen entsprechend der VT2 oder anaeroben Laktatschwelle und scheinen den Unterschied zwischen Elite-Amateuren und Tour de France-Profis auszumachen (Lucia, Carvajal, Calderon, Alfonso, & Chicharro, 1999; Lucia et al., 1998; Padilla et al., 1999).

Bei den großen Rundfahrten gelten neben dem Zeitfahren die Bergpässe als die Wettkampfsituationen, die den größten Einfluss auf den Stand im Endklassement haben. Da in solchen Abschnitten die Leistung in erster Linie zur Überwindung der Schwerkraft eingesetzt werden muss, scheint ein geringes Körpergewicht von Vorteil zu sein. Diesbezüglich konnte gezeigt werden, dass sich die physiologischen und anthropometrischen Charakteristika der jeweiligen Spezialisten unterscheiden. So liegt wie in Tabelle 2 dargestellt die absolute aerobe Leistungsfähigkeit von „Kletterern“ zwar deutlich tiefer als die der anderen Spezialisten, da sie aber deutlich leichter und kleiner sind, ist ihre Leistungsfähigkeit in Relation zum Körpergewicht wiederum höher (Mujika & Padilla, 2001b; Padilla et al., 2008).

Bei der Interpretation der hier präsentierten leistungsphysiologischen Daten von professionellen Radsportlern ist zu beachten, dass diese aus einer Phase des Radsports stammen, in der den Radsportlern eine Steigerung der aeroben Leistungsfähigkeit unter anderem durch EPO-Konsum und Blutdoping unterstellt und teilweise auch nachgewiesen wurde (Lentillon-Kaestner, Hagger, & Hardcastle, 2012).

1.2.2 Anaerobe Leistungsfähigkeit

Ein Anteil der anaeroben Energiebereitstellung zum Erbringen der Wettkampfleistung wird für fast alle Disziplinen anerkannt und auch teilweise für wettkampfscheidende Situationen als ausschlaggebend angesehen (Faria et al., 2005b; Impellizzeri & Marcora, 2007). Dennoch wurde der jeweilige Anteil einzig für die Bahnwettbewerbe zumindest abgeschätzt und liegt hier zwischen 95 % (200 m Sprint) und 5 % (1 h-Weltrekord) (Craig & Norton, 2001; Jeukendrup et al., 2000).

Tabelle 3: Aktuelle Bahn-Weltrekorde und geschätzte Energieverteilung, sowie geschätzte Leistung in Relation zur maximalen Sauerstoffaufnahme (# aktualisiert) (Craig & Norton, 2001; Jeukendrup et al., 2000; Union Cycliste Internationale, 2016b).

Event	Weltrekord [min:s]	Anteil an der Leistung [%]			Geschätzte Leistung [% VO _{2max}]
		alaktazid	anaerob-laktazid	aerob	
200 m-Sprint					
Männer	0:09,347 [#]	40	55	5	280
Frauen	0:10,384 [#]	40	55	5	235
Olympischer Sprint					
1. Position	0:41,871 [#]	40	55	5	355
2. Position		30	60	10	290
3. Position		20	40	40	245
Zeitfahren					
Männer (1000 m)	0:56,303 [#]	10	40	50	180
Frauen (500 m)	0:32,268 [#]	20	45	35	245
Verfolgung					
Männer (4000 m)	4:10,534 [#]	1	14	85	105
Frauen (3000 m)	3:22,269 [#]	1	24	75	110
Mannschaftsverfolgung (4000 m)	3:50,265 [#]	1	24	75	125 - 135
1-Std. Weltrekord					
Männer [km]	56,375	< 1	4	> 95	85 - 90
Frauen [km]	48,159	< 1	4	> 95	85 - 90

Um aber im olympischen Straßen- oder Mountainbike-Rennen für einen kurzen Zeitraum eine extrem hohe Leistung zu bringen, so wie es beim Start, bei Attacken, an Anstiegen oder beim Endsprint notwendig ist, oder um im Feld und im Ziel seine Position gegenüber den anderen Konkurrenten zu verteidigen, zu halten oder auszubauen, wird ebenso eine hohe anaerobe Ausdauerleistungsfähigkeit als notwendig angesehen.

Damit kommt neben der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit der anaeroben eine entscheidende Rolle vor allem bei rennentscheidenden Situationen zu (Faria et al., 2005a, 2005b). Mit der (anaeroben) Leistung, die für einen Endsprint im professionellen Radsport notwendig ist, hat sich bislang nur eine Studie beschäftigt (Menaspa et al., 2015). Die Autoren konnten für 17 Rennergebnisse von sechs professionellen Radsportlern zeigen, dass für eine Top 5-Platzierung im Sprint nach durchschnittlich vier Stunden Renndauer mit moderater Intensität 200 ± 27 W (2,8 W/kg) in den letzten 13 Sekunden eines Rennens eine durchschnittliche Leistung von 1020 ± 77 W ($14,2 \pm 1,1$ W/kg) mit einer Spitzenleistung von 1248 ± 122 W ($17,4 \pm 1,7$ W/kg) notwendig war. Die Autoren schlussfolgern, dass speziell für die Sprintentscheidung, neben einer hohen aeroben auch eine hohe anaerobe Leistungsfähigkeit notwendig ist.

1.3 Physiologische Hintergründe des Radsports

Das Anforderungsprofil von Radsportlern besteht in erster Linie aus einer hohen aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit, wobei die anaerobe Leistungsfähigkeit aber in rennentscheidenden Situationen über Sieg oder Niederlage entscheiden kann. Der Begriff „Ausdauer“ wird in der Sportwissenschaft als die Fähigkeit definiert, eine gegebene Belastung möglichst lange durchhalten zu können. Sie wird auch als Ermüdungswiderstandsfähigkeit bezeichnet (Martin, 2001) und ist aus physiologischer Sicht im Wesentlichen dadurch bestimmt, wie lange der Organismus Energie bereitstellen kann. Wie Tabelle 3 verdeutlicht, wird die Energiebereitstellung je nach Dauer der Belastung mehr aus dem aeroben oder dem anaeroben System bereitgestellt.

1.3.1 Physiologie der Ausdauerleistung

Je nach Dauer der Ausdauerbelastung spielen verschiedene Funktionen hinsichtlich der maximal möglichen Leistung unterschiedlich wichtige Rollen. Bei Ausdauerbelastungen bis etwa 10 min Dauer ist entscheidend, wie viel Energie pro Zeiteinheit maximal auf aerobem Weg bereitgestellt werden kann, wobei zusätzlich aufgrund der hohen Intensität auch anaerobe Stoffwechselprozesse ablaufen (McArdle, Katch, & Katch, 2010). Bei der maximalen aeroben Kapazität, die üblicherweise als VO_{2max} gemessen wird, lässt sich daher nicht eindeutig auflösen, welches Teilsystem die Leistungsfähigkeit begrenzt. Es gibt Theorien, die der Sauerstofftransportkapazität limitierenden Charakter zusprechen. Anderen Theorien zufolge soll die Umsatzrate von Sauerstoff durch die oxidativen Enzyme, also die maximale Durchflussrate im Zitratzyklus und der Atmungskette limitierend sein (Kenney, Wilmore, & Costill, 2015).

Bei länger andauernden Ausdauerbelastungen kommt es neben der maximalen aeroben Kapazität vor allem darauf an, welche Leistung bzw. wie viel Prozent der maximalen aeroben Kapazität über den gegebenen Belastungszeitraum durchgehalten werden kann (Jeukendrup et al., 2000). Das hängt im Wesentlichen davon ab, bis zu welcher Leistung ausreichend Energie auf aerobem Weg ohne zu große anaerobe Stoffwechselbeteiligung zur Verfügung gestellt werden kann. Oberhalb dieser Grenze, der so genannten anaeroben Schwelle, muss die Belastung bald eingestellt oder reduziert werden (De Marées & Mester, 1981; Kenney et al., 2015).

Nimmt die Länge der Ausdauerbelastung weiter zu, gewinnen die Glykogenspeicherkapazität und die Fettstoffwechselrate an Bedeutung (McArdle et al., 2010). Da die Verstoffwechslung von Fetten langsamer abläuft und pro erzeugtem Adenosintriphosphat (ATP) mehr Sauerstoff verbraucht als die von Kohlenhydraten, zwingt ein Aufbrauchen der nur begrenzt vorhandenen Glykogenreserven (etwa 1 % des Körpergewichts, davon ein Drittel in der Leber und zwei Drittel in der Muskulatur) zur Drosselung der Belastungsintensität (Jeukendrup, Saris, & Wagenmakers, 1998a). Eine hohe Fettstoffwechselkapazität spart hingegen Kohlenhydratreserven und ermöglicht Energiegewinn aus der fast unerschöpflichen Quelle der Fettreserven (Jeukendrup, Saris, & Wagenmakers, 1998b). Daneben spielt auch die Bewegungsökonomie eine Rolle, da ein reduzierter Energiebedarf bei Belastung längere Durchhaltezeiten und damit höhere Leistungen ermöglicht (Coyle, Sidossis, Horowitz, & Beltz, 1992).

Die Ausdauerleistungsfähigkeit wird in erster Linie dadurch bestimmt, wieviel Energie auf dem aeroben Weg bereitgestellt werden kann. Dies ist wiederum von den Funktionen verschiedener Organsysteme abhängig, die in periphere und zentrale Funktionen unterteilt werden können.

1.3.1.1 Zentrale physiologische Funktionen der Ausdauerleistung

Als zentrale Funktionen werden die Tätigkeiten von Herz, Lunge, Blut und Gefäßsystem und die metabolischen Vorgänge außerhalb der Arbeitsmuskulatur verstanden. Dazu gehören der Transport von Sauerstoff und Nährstoffen zur und der Abtransport von Metaboliten aus der Arbeitsmuskulatur (Brooks, Fahey, White, & Baldwin, 2000; Delp & Laughlin, 1998; Green, 1997; Noakes, 2000). Über die Hautdurchblutung leisten Herz, Blut und Gefäßsystem außerdem einen Beitrag zur Regulierung der Körpertemperatur. Die zentralen metabolischen Aufgaben liegen in der Glykogenspeicherung in Leber, Blut und der unbeteiligten Muskulatur, sowie in der Mobilisation von Glukose

und freien Fettsäuren (McArdle et al., 2010). Für die Ausdauerleistungsfähigkeit sind im Wesentlichen folgende zentrale Funktionen entscheidend:

- maximales Herzzeitvolumen,
- Blutvolumen, Hämoglobingehalt und Viskosität des Bluts,
- Blutverteilung im Organismus (kollaterale Vasokonstriktion),
- maximale Glykolyse- und Lipolyserate,
- Größe der Kohlenhydratspeicher in der Leber und der unbeteiligten Muskulatur,
- Diffusionskapazität der Lunge und Ventilation.

Das Herzzeitvolumen kann durch das Schlagvolumen und durch einen Anstieg der Herzfrequenz gesteigert werden (Brooks et al., 2000; Kenney et al., 2015). Die spezifischen Anpassungen des Herzens an ein Ausdauertraining sind mittlerweile gut dokumentiert. Ein leistungssportliches Ausdauertraining führt sowohl zu funktionellen als auch strukturellen Adaptationen des Herzens (Saltin, Radegran, Koskolou, & Roach, 1998). Resultierend aus einer veränderten Hämodynamik zeichnet sich ein trainiertes Herz durch ein erhöhtes Schlagvolumen im Vergleich zum untrainierten aus. Leistungssportlich trainierte und professionelle Radsportler weisen zudem strukturell vergrößerte Herzen im Vergleich zu Normalpersonen auf. Dabei sind beide Ventrikel vergrößert und der Herzmuskel proportional hypertrophiert, was zu einem größeren Schlagvolumen führt (Hoogsteen, Hoogeveen, Schaffers, Wijn, & van der Wall, 2003; Lucia, Carvajal, Boraita, et al., 1999). Das größere Schlagvolumen und eine vergrößerte arteriovenöse Sauerstoffdifferenz führen in Ruhe und während submaximaler Belastung zu einer niedrigeren Herzfrequenz (HF), also zu einer Ökonomisierung der Herzarbeit. Während maximaler Belastung ergibt sich aus dem höheren Schlagvolumen bei unveränderter maximaler Herzfrequenz (HF_{max}) ein größeres maximales Herzzeitvolumen, wodurch mehr Blut und damit mehr Sauerstoff und mehr Nährstoffe in die Arbeitsmuskulatur transportiert werden können (Brooks et al., 2000; Green, 1997; Tonkonogi & Sahlin, 1997). Der Sauerstoffverbrauch in der Arbeitsmuskulatur kann durch die Sauerstoffaufnahme bestimmt werden. Die VO_{2max} beschreibt die maximale Fähigkeit des kardiovaskulären Systems diesen Sauerstoff zu transportieren und in der Muskulatur zu verarbeiten (Brooks et al., 2000; Noakes, 2000).

Ausdauertraining führt außerdem zu einer Zunahme des Blutvolumens, die sich aus einer deutlichen Zunahme des Blutplasmas und einer geringeren Zunahme der Erythrozyten zusammensetzt. Daraus ergeben sich für den Ausdauertrainierten sowohl ein reduzierter Hämatokrit, der mit besseren Fließeigenschaften in Verbindung gebracht

wird, als auch eine größere Sauerstofftransportkapazität infolge der Zunahme der Gesamthämoglobinmenge (Hahn & Gore, 2001; Levine & Stray-Gundersen, 1997; Warburton, Gledhill, Jamnik, Krip, & Card, 1999). Ausdauertrainierte Radsportler weisen daher ein insgesamt größeres Blutvolumen auf als untrainierte Normalpersonen (Coyle, Hopper, & Coggan, 1990; Warburton et al., 1999). Das vergrößerte Blutvolumen verändert in der Regel die Druck-Volumen-Verhältnisse des Herzens und trägt dadurch neben weiteren Faktoren zur Absenkung der Ruhe- und submaximalen Herzfrequenz bei. Außerdem steht der Hautdurchblutung mehr Blutvolumen zur Thermoregulation zur Verfügung (Convertino, 1991; Fellmann, 1992; Kenney et al., 2015; Sawka, Convertino, Eichner, Schnieder, & Young, 2000).

Ferner kommt es durch Ausdauertraining zur Neubildung zahlreicher Kapillaren in der Skelett- und Herzmuskulatur, wodurch die Flächen zum Austausch von Gasen, Substraten und Metaboliten vergrößert und die entsprechenden Transportwege verkleinert werden. Durch einen erhöhten Venentonus, eine verbesserte Vasokonstriktion und Vasodilatation und einen reduzierten submaximalen sowie erhöhten maximalen systolischen Belastungsblutdruck ist die Blutverteilung im ausdauertrainierten Organismus zudem effektiver (Kenney et al., 2015; Saltin et al., 1998).

Auch am respiratorischen System kommt es durch Ausdauertraining zu verschiedenen Adaptationen. So ist die Atemfrequenz während submaximaler Belastung beim Trainierten infolge eines geringeren Atemstimulus reduziert. Bei maximaler Belastung ermöglicht die kräftige Atemmuskulatur durch ein gesteigertes maximales Atemzugvolumen ein größeres maximales Atemminutenvolumen (Kenney et al., 2015). Allerdings scheint nach Meinung der meisten Autoren das respiratorische System beim Gesunden nicht leistungslimitierend zu sein, so dass die Adaptationen vermutlich für die Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit nicht von primärer Bedeutung sind (Dempsey & Babcock, 1995; Kenney et al., 2015).

Ausdauertraining führt ferner zu einer Veränderung im vegetativen Nervensystem. Zu den wichtigsten Anpassungen auf dieser Ebene gehören ein erhöhter Vagotonus sowie eine in Ruhe und während submaximaler Belastung reduzierte Sympathikusaktivität. Dadurch nimmt die Herzfrequenz in Ruhe und bei submaximaler Belastung ab und der periphere Gefäßwiderstand ist infolge des veränderten Sympathikotonus reduziert. Dies hat eine Reduzierung des submaximalen systolischen Belastungsblutdrucks und eine Zunahme des Schlagvolumens zur Folge. Dieselben Prozesse werden auch durch die Ausschüttung von Katecholaminen vom endokrinen System beeinflusst, weshalb bei Ausdauertrainierten gegenüber Untrainierten niedrigere Katecholaminkonzentrationen

in Ruhe und während submaximalen Belastungen zu beobachten sind (Kenney et al., 2015; Kindermann, Dickhuth, Nieß, Röcker, & Urhausen, 2008).

1.3.1.2 Periphere physiologische Funktionen der Ausdauerleistung

Neben diesen zentralen spielen auch periphere Funktionen eine wichtige Rolle beim Bereitstellen von Energie auf dem aeroben Weg. Unter peripheren Funktionen versteht man alle Vorgänge, die auf der Ebene der Arbeitsmuskulatur ablaufen. Zu diesen zählen:

- die Kapazität des mitochondrialen Stoffwechsels der Energieproduktion,
- das intrazelluläre Sauerstoffangebot, das vom Myoglobingehalt der Muskulatur abhängt,
- die Größe des intramuskulären Glykogenspeichers,
- der Anteil des Fettstoffwechsels an der Energiebereitstellung und
- die Bewegungskoordination und –ökonomie.

Es ist sehr gut belegt, dass Ausdauertraining zu einem Anstieg des aeroben Energiestoffwechsels bzw. der oxidativen Phosphorylierungsrate der Muskulatur führt (Tonkonogi & Sahlin, 1997). Eine ausdauertrainierte Skelettmuskulatur weist dabei eine höhere Mitochondriendichte (in Anzahl und Größe), eine höhere aerobe Enzymaktivität, eine verbesserte Kapillarisation und einen höheren Myoglobingehalt auf (Bizeau, Willis, & Hazel, 1998; Hood, Takahashi, Connor, & Freyssenet, 2000; Hoppeler & Fluck, 2003; Kraus, Stallings, Yeager, & Gavin, 2004; Pringle et al., 2003; Tonkonogi, Walsh, Svensson, & Sahlin, 2000). Diese Anpassungen haben wiederum eine erhöhte aerobe ATP-Produktionsrate in den Mitochondrien zur Folge (Bizeau et al., 1998; Hood et al., 2000). Das Nährstoffangebot wird durch größere Glykogenspeicher und eine Zunahme der kohlenhydrat- und fettmobilisierenden Enzyme erhöht. Neben dem Leberglykogen steigen auch die Speicherkapazitäten des Muskelglykogens, die Glykogenolyserate, die Glykogensyntheserate und die Lipolyserate an (Kenney et al., 2015; McArdle et al., 2010). In geringerem Maße verbessert sich auch die anaerobe Stoffwechselkapazität. Die zum Teil genetisch determinierte Zusammensetzung der Skelettmuskulatur aus langsam zuckenden, ermüdungsresistenten Typ I- und schnell zuckenden, schneller ermüdenden Typ IIa-, IIb- und IIx-Fasern wird durch Ausdauertraining dahingehend verändert, dass mehr Muskelfasern hinsichtlich ihrer kapillaren Dichte, ihrer aeroben Stoffwechselkapazität und ihrer kontraktiven Eigenschaften der Charakteristik von Typ I-Fasern entsprechen (Kenney et al., 2015). Querschnittsvergleiche von trainierten Rad-

sportlern und Untrainierten zeigen Unterschiede in der Bewegungsökonomie, die möglicherweise auf eine verbesserte oxidative Kapazität, veränderte Rekrutierungsmuster von motorischen Einheiten sowie auf eine Reduzierung von Ventilation und Herzfrequenz zurückzuführen sind (Lucia, Hoyos, Perez, et al., 2002).

1.3.2 Physiologie der Sprintleistung

Bei maximalen Sprints laufen drei energiebereitstellenden Systeme sofort und annähernd vollständig ab (Hultman & Sjoholm, 1983; Jones & McCartney, 1986). Die anaerobe Glykolyse, der Verbrauch der Kreatinphosphate und die aerobe Energiegewinnung machen dabei etwa 50 - 55 %, 23 - 29 % und 16 - 25 % der ATP-Bereitstellung während eines 30-s-Sprints aus (Beneke, Pollmann, Bleif, Leithauser, & Hutler, 2002; Faria et al., 2005b; Serresse, Lortie, Bouchard, & Boulay, 1988; Smith & Hill, 1991; Spriet, 1992; Spriet, Lindinger, McKelvie, Heigenhauser, & Jones, 1989; Withers et al., 1991). Die Leistungsfähigkeit während eines 30-s-Sprints rührt also in erster Linie aus der anaerob-alaktaziden Energiegewinnung, aus dem Kreatinphosphat-Speicher und der anaerob-laktaziden Energiegewinnung aus der Glykolyse, bei der es auch zu einer Laktatproduktion kommt (Beneke et al., 2002).

Für die Sprintstrategie sind zwei Erkenntnisse wichtig: Zum einen braucht es für eine 80 - 100 %ige Resynthese von ATP eine Pause von etwa zwei bis vier Minuten (Harris, Hultman, & Nordesjo, 1974; McCartney et al., 1986; Sahlin, Harris, & Hultman, 1979), zum anderen beginnt der Abbau des Kreatinphosphats mit dem Einsetzen der Belastung und die maximale Rate ist innerhalb der ersten zehn Sekunden erreicht. Anschließend lässt dieser energiebereitstellende Prozess nach und erlischt zwischen der 10. und 30. Sekunde (Beneke et al., 2002; Gaitanos, Williams, Boobis, & Brooks, 1993; Hultman & Sjoholm, 1983; Jones & McCartney, 1986; Spriet, 1992). Bei ermüdenden, kurzen, hochintensiven Sprints werden die Kreatinphosphatspeicher nahezu komplett entleert (Brooks, Fahey, & White, 1984; Green, 1997; St Clair Gibson, Schabort, & Noakes, 2001) und stellen damit einen wichtigen leistungslimitierenden Faktor dar.

1.4 Erfassung leistungsphysiologischer Komponenten

Für eine umfassende Bestimmung der Langzeitausdauerleistungsfähigkeit eines Radsportlers sollten theoretisch alle limitierenden Faktoren bestimmt werden. Dies scheint jedoch in der Praxis kaum machbar. Deshalb werden in der Regel einzelne Parameter bestimmt, die eine hohe Korrelation zur Wettkampfleistung oder Dauertests, und damit

möglicherweise auch zu anderen limitierenden Systemen der Ausdauerleistungsfähigkeit aufweisen.

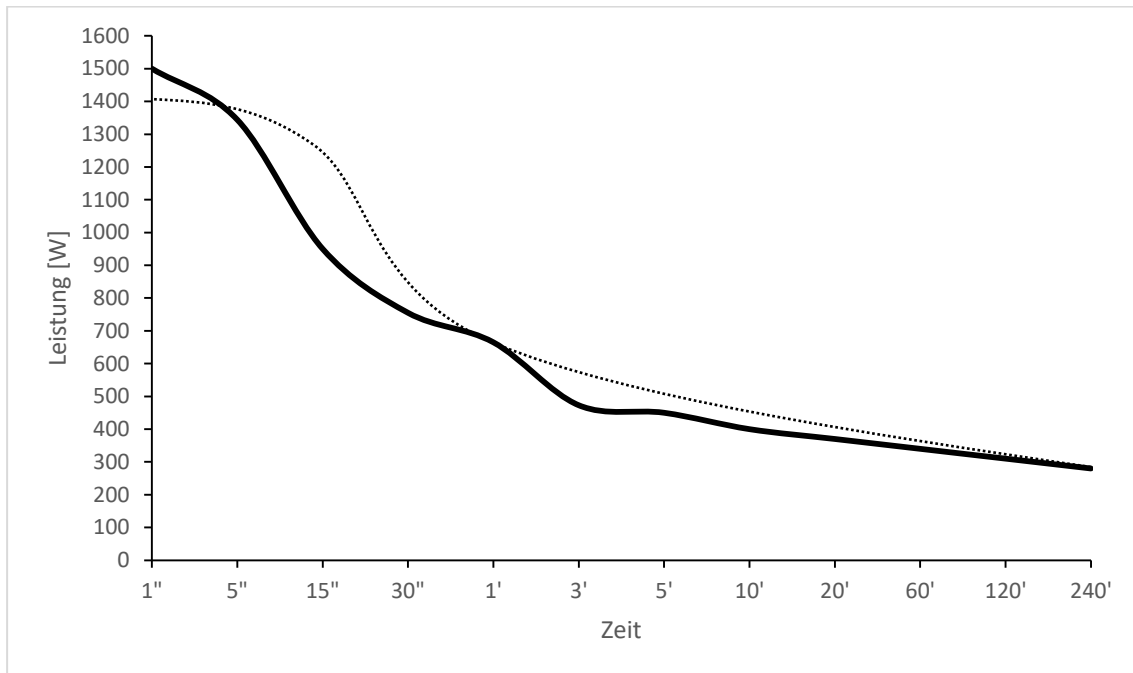


Abbildung 1: Schematischer, beispielhafter, parabolischer Verlauf der individuellen Bestleistungen zur Zeit (Critical-Power-Konzept; eigene Daten [—] und errechnetes Modell [.....]).

Es gibt Konzepte, die sich (auf den ersten Blick) unabhängig von den physiologischen Gesichtspunkten rein mit der Leistungsfähigkeit der Athleten über einen fixen Zeitraum oder fixe Distanzen beschäftigen (Hill, 1925; Hill, 1993). Anhand derer werden die aktuelle Leistungsfähigkeit diagnostiziert und Trainingsempfehlungen abgeleitet (Allen & Coggan, 2012). Zusätzlich versuchen diese Konzepte auch die maximale Leistungsfähigkeit über andere Belastungszeiten vorherzusagen (Allen & Coggan, 2012; Faria et al., 2005a; Hill, 1993). Eine aus der Praxis stammende Alternative zu den gängigen Labortests stellt ein Zeitfahren dar. Diese Methode ist unblutig, kostenlos (sofern man einen Leistungsmesser oder Ergometer besitzt) und unabhängig von einem Labor, entstehenden Kosten oder einem Testleiter wiederholbar. Hierdurch erhält der Sportler oder Trainer die Leistung über eine gegebene Zeit oder Strecke. Diese wird z. B. als CP20 (Critical Power über 20 Minuten) angegeben. Das sogenannte „Critical-Power-Konzept“ hat die Grundidee die durchschnittliche maximale Leistung über verschiedene Zeiträume zu erfassen, beginnend bei wenigen Sekunden bis hin zu mehreren Minuten und Stunden. Durch den bekannten parabolischen Verlauf (Abbildung 1) des Verhältnisses von Leistung zur Zeit entsteht dann die Critical-Power Kurve (Allen & Coggan,

2012; Hill, 1925; Hill, 1993). Dabei sollen praxisrelevante Leistungsprofile eines Fahrers herauskommen, die über Stärken und Schwächen Aufschluss geben können (Allen & Coggan, 2012; Friel, 2012).

Die Rahmenbedingungen und Einflüsse wie Ermüdung, Ernährung, Motivation, etc. sollten aber bei allen Tests möglichst gleich gehalten werden. Hat man eine große Menge solcher Trainings-, Wettkampf- und Testdaten, so kann man daraus deutlich mehr Informationen gewinnen als aus einem einzigen Labortest. Da die Testdauer im Prinzip beliebig wählbar ist und die Tests sehr praxisnah durchführbar sind, können sie an die persönlichen sportlichen Anforderungen angepasst werden. Zum Beispiel kann jeder selbst überprüfen, ob sich die Leistung an seinem „Hausberg“ (z. B. Anstieg um die 5 min) verbessert hat (Allen & Coggan, 2012). Auch lässt sich die Entwicklung der Sprintleistung testen (Allen & Coggan, 2012). Anhand dieser Methode konnte bei 13 trainierten Wettkampfradsportlern gezeigt werden, dass die unter Laborbedingungen gemessene CP in einem hohen negativen Zusammenhang zur Zeitfahrleistung auf der Straße steht ($r = -0,92$) (Smith, Dangelmaier, & Hill, 1999).

Im Gegensatz zu den Laktat- und spiroergometischen Schwellenkonzepten wird im Fall des „Critical-Power-Konzepts“ der Begriff „Schwelle“ anders verwendet. Es dreht sich hier nicht um einen Umschlagspunkt. Der häufigste Begriff ist die „funktionelle Schwellenleistung“, die die durchschnittliche Leistung über eine Stunde darstellen soll und häufig durch 95 % der Bestleistung über 20 Minuten ermittelt wird. Um herzfrequenzgesteuerte Trainingsempfehlungen abzuleiten, funktioniert dieser Test auch ohne Leistungsmesser. Grundlage dafür stellt die mittlere Herzfrequenz über 20 Minuten dar. Eine Diagnostik der Leistungsfähigkeit ist damit allerdings nicht möglich (Allen & Coggan, 2012).

Zu dieser Art der Leistungsdiagnostik zählen Konzepte wie die „Funktionelle Schwellenleistung“ (FSL), die „Critical Power“ (CP) oder „Critical Velocity“ (CV) mit der jeweiligen Bestimmung der anaeroben Kapazität (W' und D') (Hill, 1993; Poole, Burnley, Vanhatalo, Rossiter, & Jones, 2016). Obwohl diese Konzepte zur Zeit wie ein neuer Trend vermarktet werden (Allen & Coggan, 2012), ist die Grundidee dahinter ähnlich alt wie die der Laktat- und Spiro-Schwellenkonzepte (Hill, 1925; Hill, Long, & Lupton, 1924); und auch wenn hier der Begriff „Schwelle“ fällt, so wird zur Diagnostik doch die maximale Leistungsfähigkeit benötigt, weswegen diese Tests ebenso von der Ausbelastung abhängig sind, wie andere Maximalparameter. Diese Konzepte beruhen rein auf der Leistungsfähigkeit und geben daher keine Auskunft darüber, wodurch diese Leistungsfähigkeit limitiert ist. Auch wenn die Korrelationen der FSL zum MLSS hoch

ist (Poole et al., 2016), so ist der physiologische Hintergrund dieser Konzepte bislang unzureichend geklärt. Außerdem sind für die Erstellung einer validen Critical-Power-Kurve mindestens drei unterschiedlich lange Zeitfahren notwendig, welche nicht an einem Tag durchgeführt werden können (Hill, Smith, Leuschel, Chasteen, & Miller, 1995).

Viele weitere Konzepte der Ausdauerleistungsdiagnostik beschäftigen sich mit der physiologischen Reaktion des Athleten auf ansteigende Belastungen (Faude, Kindermann, et al., 2009; Meyer, Lucia, et al., 2005), wobei sowohl maximale (VO_{2max} und P_{max}) als auch submaximale Parameter bestimmt werden können. Eine Möglichkeit bietet die Spiroergometrie, die in der Regel aus linear ansteigenden Belastungen die Atemgase erfasst, analysiert und darüber zwei submaximale Schwellen ermittelt. Was auf den ersten Blick als einfache und nichtinvasive Methode einige Vorteile mit sich bringt, birgt in der Praxis jedoch einen großen messtechnischen Aufwand, dessen Präzision in manchen Fällen in Frage gestellt werden kann (Meyer, Lucia, et al., 2005).

Weitere Konzepte, die sich an submaximalen Parametern orientieren, sind die Laktatschwellenkonzepte. Hier werden in der Regel physiologische „Schwellen“ diagnostiziert, die anhand der Laktatleistungskurve bei stufenweise ansteigenden Belastungen bestimmt werden (Faude, Kindermann, et al., 2009). Es wurde eine Vielzahl von verschiedenen Konzepten entwickelt, die sich über die Jahre mehr oder weniger gut durchgesetzt haben (Faude, Kindermann, et al., 2009). Da in Deutschland die Laktatleistungsdiagnostik in den letzten Jahrzehnten einen hohen Stellenwert eingenommen hat, wird von den meisten Instituten eine solche angeboten. Aus diesem Grund und den oben genannten Nachteilen des Critical-Power-Konzepts und der spiroergometrischen Schwellen sind in erster Linie die Laktatschwellenkonzepte Inhalt dieser Dissertation.

1.4.1 Maximale Parameter des Leistungstests

1.4.1.1 Maximale Parameter der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit

Seit der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts gilt die VO_{2max} als das am meisten verbreitete Konzept zur Evaluation der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit (Meyer & Kindermann, 1999). Sie misst, wieviele Milliliter Sauerstoff der Körper im Stande ist maximal pro Minute zu verwerten. Damit repräsentiert sie die obere Leistungsgrenze der aeroben Stoffwechselwege und integriert damit die maximalen Funktionen aller sauerstofftransportierenden und sauerstoffverbrauchenden Systeme (Meyer & Kindermann, 1999) und wird oft auch als das „Bruttokriterium“ der Ausdauerleistungsfähigkeit bezeichnet (Kenney et al., 2015; Meyer & Kindermann, 1999). Im Gegensatz zur P_{max} ist die Messung der VO_{2max} technisch anspruchsvoll und in der Anschaffung teuer.

Die VO_{2max} ist anerkannt, um zwischen fitten und unfitten Personen zu unterscheiden. Allerdings konnte gezeigt werden, dass es schwierig ist, innerhalb einer leistungsfähigen homogenen Personengruppe eine weitere Selektion mittels der VO_{2max} durchzuführen (Conley & Krahenbuhl, 1980; Coyle, Coggan, Hopper, & Walters, 1988; Coyle et al., 1991; Faria et al., 2005b; Impellizzeri, Marcora, Rampinini, Mognoni, & Sassi, 2005; Jacobs, 1986; Lucia et al., 1998; Sjodin & Svedenhag, 1985). Außerdem konnte kein Unterschied in der VO_{2max} zwischen professionellen und Elite-Amateur-Radsportlern gefunden werden (Lucia et al., 1998). Zudem scheint es alleine durch die Bestimmung der VO_{2max} nicht möglich zu sein, die Leistung abzuschätzen, die ein Sportler über einen vorgegebenen Zeitraum durchhalten kann. Gleiche prozentuale Anteile der VO_{2max} können individuell zu höchst unterschiedlichen metabolischen Beanspruchungen führen (Scharhag-Rosenberger, Meyer, Gassler, Faude, & Kindermann, 2010). Somit ist es fraglich, ob sich prozentuale Ableitungen der VO_{2max} zur Trainingssteuerung eignen (Mann, Lamberts, & Lambert, 2013). Insgesamt betrachtet scheint es so, dass sich submaximale Schwellen im Gegensatz zur VO_{2max} besser eignen, um Intensitäten abzuschätzen, die ein Athlet über eine längere Zeit durchhalten kann. Folglich wären sie auch besser geeignet, um die sportartspezifische Ausdauerleistungsfähigkeit zu bestimmen (Scharhag-Rosenberger et al., 2010; Sjodin & Jacobs, 1981; Sjodin & Svedenhag, 1985; Stegmann & Kindermann, 1982). Aber auch wenn dies physiologisch plausibel erscheint, konnte es bislang empirisch noch nicht nachgewiesen werden (Mann et al., 2013).

Wie oben (Kapitel 1.2.1.2 - Die maximale Leistungsfähigkeit von Radsportlern) beschrieben, verfügen professionelle Radsportler über eine relative maximale Leistungsfähigkeit von mehr als 5,5 W/kg (Palmer et al., 1994). Dieser Parameter wird bei ansteigenden ergometrischen Belastungstests als die höchste erreichte Leistung bestimmt. Er ist einfach zu erfassen und bedarf zur Messung lediglich eines Ergometers. Daher wird die P_{max} wahrscheinlich das in der Praxis am meisten verwendete Ergebnis zur Bestimmung der Ausdauerleistungsfähigkeit sein und eignet sich ebenso wie die VO_{2max} als grober Prädiktoren der radsportlichen Leistungsfähigkeit (Bentley, Wilson, Davie, & Zhou, 1998; Hawley & Noakes, 1992; Lucia et al., 1998).

1.4.1.2 Maximale Parameter der anaeroben Ausdauerleistungsfähigkeit

Um die anaerobe Leistungsfähigkeit zu bestimmen, werden spezielle anaerobe Leistungstests empfohlen (Faria et al., 2005b). Einen weitestgehend anerkannten und in der Literatur am häufigsten angewendeten Test zur Bestimmung der anaeroben Leis-

tungsfähigkeit und Kapazität stellt der Wingate-Test als 30-s-Sprint bei einem Widerstand von 0,075 kg pro kg Körpergewicht dar (Bar-Or, 1987; Faria et al., 2005b). Durchgeführt wird dieser Test zur Bestimmung der anaeroben Leistungsfähigkeit auf einem isokinetischen bzw. drehzahlabhängigen Fahrradergometer im Sitzen. Dabei sollten Lenker, Sattel, Schuhe, Klickpedale etc. so wettkampfnah wie möglich eingestellt sein. Über den gesamten Testzeitraum, der zwischen 10 und 30 Sekunden liegen sollte, soll der Proband sitzen bleiben und zwischen 50 und 140 U/min generieren. Zu beachten ist, dass die anaerobe Leistung im Sitzen in der Regel geringer als in stehender Position ausfällt (Faria et al., 2005b).

1.4.1.3 Einflussfaktoren auf die maximalen Parameter

Einen großen Einfluss auf das Ergebnis von maximalen Parametern hat die Ausbelastung der Versuchsperson, weswegen die jeweils erzielten Ergebnisse von der Motivation bzw. der Einstellung sowohl des Athleten, als auch des Versuchsleiters abhängig sind. Des Weiteren scheint es so, dass zu Testbeginn eine annähernd vollständige Erholtheit des Athleten vorliegen sollte (Faude, Meyer, Urhausen, & Kindermann, 2009). Daher ist es schwierig, eine völlige Sicherheit bei der exakten Bestimmung der Maximalparameter zu gewährleisten (Meyer, Scharhag, et al., 2005). Da der negative Einfluss von Ermüdung auf die maximalen Parameter in ansteigenden Belastungstests anerkannt ist (Meeusen et al., 2013), wird behauptet, dass eine Veränderung in der P_{\max} und $VO_{2\max}$ eher ein Indikator für Ermüdung und Erholung als für eine Anpassung an den aktuellen Trainingsstatus wäre (Faria et al., 2005b).

Auch die Wahl des Testprotokolls bzw. Art des Tests hat einen Einfluss auf die maximalen Parameter. So werden Athleten bei kürzeren Tests mit einem steileren Stufen- oder Rampenanstieg der Leistung auch eine höhere Endleistung erreichen, als bei einem „flacheren“ Protokoll (Bentley, Newell, & Bishop, 2007).

Insgesamt kann man daher sagen, dass sich die maximalen Parameter aus den klassischen, (stufenweise oder linear) ansteigenden Tests zwar zur groben Einordnung der Leistungsfähigkeit von Radsportlern eignen, allerdings die Sensitivität zur Unterscheidung innerhalb einer homogenen Gruppe fraglich ist. Zudem sind die Parameter stark vom Testprotokoll und von der Ausbelastung und damit von der Erholtheit des Athleten abhängig.

1.4.2 Submaximale Parameter des Leistungstests

Seit Beginn des letzten Jahrhunderts weiß man, dass bei anstrengenden Belastungen die Blutlaktatkonzentration ansteigt. Daraus entstand die Theorie, dass das Laktat dafür verantwortlich sei, dass die Muskelleistung eingeschränkt wird (Hill et al., 1924). Fortan galt Laktat bis etwa Ende der 70er Jahre als das Abfallprodukt des anaeroben Stoffwechsels, das die Ausdauerleistungsfähigkeit limitiert. Der erste Anstieg der Laktatkonzentration über das Basislevel und der erste Anstieg des Sauerstoffatemäquivalents bei ansteigenden Belastungstests wurden als der Punkt der optimalen Atemeffizienz definiert (Hollmann, 2001). Diese Intensität wurde ebenfalls durch das Darstellen des Atemminutenvolumens gegen die Sauerstoffaufnahme bestimmt und als anaerobe Schwelle definiert (Wasserman & McIlroy, 1964). Da zur damaligen Zeit eher die Messung der spiroergometrischen Daten, als die Messung der Blutlaktatkonzentrationen verbreitet war, hat sich die Messung der anaeroben Schwelle nach Wasserman verbreitet (Wasserman, Hansen, Sue, Whipp, & Froelicher, 1987; Wasserman & McIlroy, 1964).

In den 60er Jahren hat sich dann die enzymatische Messung der Blutlaktatkonzentration etabliert. Hierdurch verbreitete sich auch die Messung der Blutlaktatkonzentrationen bei Ausdauerbelastungen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit (Hollmann, 2001; Wells, Balke, & Van Fossan, 1957). In den darauffolgenden Jahren entstand eine Vielzahl an Laktatschwellenkonzepten. Die Anzahl der wissenschaftlichen Publikationen über Laktatschwellen stieg enorm an und die Laktatleistungskurve bei stufenweise ansteigenden Belastungen wurde eine der wichtigsten Werkzeuge zur Ausdauerleistungsdiagnostik (Faria et al., 2005b; Faude, Kindermann, et al., 2009; Sjodin & Svedenhag, 1985). Da sich die unterschiedlichen Arbeitsgruppen unter anderem bei der Nomenklatur nicht einig waren, führte die hohe Anzahl von unterschiedlichen Konzepten auch zu einem gewissen Durcheinander und zu Fehlinterpretationen (Faude, Kindermann, et al., 2009).

Der Punkt, bei dem sich die Laktatproduktion und –elimination gerade noch die Waage halten, gilt als ein physiologisch begründeter Indikator der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit und wird als das MLSS definiert und in der täglichen Praxis durch die anaerobe Schwelle bestimmt (Hall, Rajasekaran, Thomsen, & Peterson, 2016; Kindermann, Simon, & Keul, 1979; Mader et al., 1976; Stegmann & Kindermann, 1982). Die korrekte Definition der anaeroben Schwelle ist daher das MLSS. Die Laktatkonzentration am MLSS ist jedoch nicht bei allen Sportlern gleich, sie kann interindividuell zwischen 2 und 10 mmol/l variieren (Billat et al., 2003; Hauser, Bartsch, Baumgartel, & Schulz,

2013). Um diesen Punkt exakt zu bestimmen, müssen mehrere 30-minütige Tests bei konstanter Leistung durchgeführt werden. Dieses Verfahren ist somit sehr zeitaufwändig, da mindestens drei solcher Tests durchgeführt werden müssen und diese nicht an einem Tag stattfinden können (Beneke, 2003; Faude, Kindermann, et al., 2009; Heck & Beneke, 2008). Um das MLSS auf kürzerem Weg bestimmen zu können, entstand die Ableitung aus der Laktatleistungskurve, die anhand eines Laktatstufentest erstellt wird. Hierzu gibt es mittlerweile etliche Schwellenkonzepte, die zur Anwendung kommen (Faude, Kindermann, et al., 2009; Heck & Beneke, 2008). Zudem wurde eine intensive und noch immer andauernde Diskussion überwiegend über Terminologie und physiologische Hintergründe geführt (Faude, Kindermann, et al., 2009; Svedahl & MacIntosh, 2003). So wird zum Beispiel argumentiert, dass die Blutlaktatkonzentration bei ansteigender Belastung zwar exponentiell aber kontinuierlich verläuft, anstatt eine klare Schwelle aufzuzeigen. Auch die Verteilung der aeroben und anaeroben Energiebereitstellung würde sich nicht plötzlich ändern, sondern vielmehr einen kontinuierlichen Übergang aufweisen, weshalb der Begriff „Schwelle“ irreführenderweise verwendet wäre (Faude, Kindermann, et al., 2009; Myers & Ashley, 1997).

Zur Schwelle gibt es eine Vielzahl von Definitionen mit unterschiedlichen Belastungsprotokollen, Auswertungskonzepten und -programmen. Einheitlich gilt: je höher die Schwelle liegt, desto besser ist die aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit. Daher wird das Konstrukt „Grundlagenausdauer“ oft anhand der anaeroben Schwelle operationalisiert und definiert. Diese Terminologie soll auch in dieser Arbeit verwendet werden. Daneben dienen Laktatschwellen auch zum Ableiten von Intensitätsbereichen für das Ausdauertraining. Diese werden dann oft in prozentualen Angaben von der Schwelle oder in entsprechenden Herzfrequenzbereichen angegeben (Faude, Kindermann, et al., 2009).

1.4.2.1 Laktatleistungskurve

Die Grundlage bei der Bestimmung einer submaximalen Schwelle bildet die Laktatleistungskurve, die durch ein ansteigendes Belastungsprotokoll erstellt wird. Dabei zeigt sich, dass sich bereits das Belastungsprotokoll zwischen den einzelnen Schwellenkonzepten unterscheidet. Das Grundprinzip der ansteigenden Belastungstests im Labor ist aber in den meisten Fällen gegeben. Es unterscheiden sich lediglich die Form des Anstiegs (linear oder stufenweise), die Höhe und Länge der Stufen oder die Steilheit bei linearen Protokollen und die Wahl der Eingangsstufe voneinander (Faria et al., 2005b; Faude, Kindermann, et al., 2009).

Um dem Laktat genügend Zeit zur Verfügung zu stellen, damit es aus dem Muskel ins Blut diffundieren und dann ein Steady-State annehmen kann, werden bei der Laktatleistungsdiagnostik stufenweise ansteigende Belastungsprotokolle genutzt. In der Regel kann dann ein exponentiell ansteigender Verlauf der Blutlaktatkonzentration beobachtet werden. Grundlegend gilt für die Interpretation der Ausdauerleistungsfähigkeit aus der Laktatleistungskurve: Eine Rechtsverschiebung und damit geringere Laktatkonzentrationen bei einer gegebenen Belastung stellen eine Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit dar (Acevedo & Goldfarb, 1989; Bosquet, Leger, & Legros, 2002; Faude, Kindermann, et al., 2009; Yoshida, Udo, Chida, et al., 1990). Im Gegensatz dazu werden höhere Laktatkonzentrationen bei einer gegebenen Belastung bzw. eine Linksverschiebung der Laktatleistungskurve als eine Verschlechterung der Ausdauerleistungsfähigkeit interpretiert (Faude, Kindermann, et al., 2009; Mujika & Padilla, 2001a).

1.4.2.2 Der aerob-anaerobe Übergangsbereich

Seit 1979 das Konzept des aerob-anaeroben Übergangsbereichs (Abbildung 2) definiert und publiziert wurde, gilt es als das Grundgerüst für die Leistungsdiagnostik und Ableitungen von Trainingsempfehlungen im Ausdauersport (Kindermann et al., 1979). Seither wurde dieses Konzept von mehreren Arbeitsgruppen entweder durch die Analyse von Blutlaktatkonzentrationen oder spiroergometrische Messungen angenommen, angewendet und auch verfeinert (Beneke, Leithauser, & Ochentel, 2011; Faria et al., 2005b; Faude, Kindermann, et al., 2009; Heck, Mader, et al., 1985; Lucia et al., 2001; McLellan & Skinner, 1981; Meyer, Lucia, et al., 2005; Midgley, McNaughton, & Jones, 2007; Seiler & Kjerland, 2006; Skinner & McLellan, 1980).

Dieses Modell beruht auf zwei typischen „Knickpunkten“ der Laktatleistungskurve bei ansteigenden Belastungstests (Abbildung 2). Zunächst gibt es bei lockerer Belastung keinen Anstieg der Blutlaktatkonzentration. Dies wird als „Baseline“ bezeichnet und kann als niedrigster Quotient aus Blutlaktatkonzentration und Leistung bestimmt werden. Die Intensität, bei der die Blutlaktatkonzentration zum ersten Mal über diese Baseline ansteigt, ist der erste „Knickpunkt“ und wird als „aerobe Schwelle“ bezeichnet. Ursprünglich wurde er mittels spirometrischer Daten ermittelt und von Wasserman als „anaerobe Schwelle“ bezeichnet (Wasserman & McIlroy, 1964). Dieser Begriff wurde für verschiedenste Laktatschwellenmodelle verwendet, die teilweise einen anderen physiologischen Hintergrund beschreiben, was zu einer gewissen Verwirrung geführt hat. Andere Arbeitsgruppen bezeichnen diesen Punkt als „aerobe Schwelle“, da sie den höchsten Punkt mit annähernd kompletter aerober Energiebereitstellung darstellen soll,

die ein stundenlanges Ausdauertraining ermöglicht (Kindermann et al., 1979; Skinner & McLellan, 1980). Nachgewiesenermaßen eignet sich diese Intensität für eine Verbesserung der kardiorespiratorischen Fitness im Freizeitsport, als kardiologisches Rehabilitationstraining für Patienten und als regeneratives bzw. lockeres Ausdauertraining im Leistungssport (Atkinson, Davison, Jeukendrup, & Passfield, 2003; Faria et al., 2005b; Faude, Kindermann, et al., 2009; Faude, Meyer, et al., 2009; Londeree, 1997; Lucia et al., 2001; McLellan & Skinner, 1981; Meyer, Faude, Urhausen, Scharhag, & Kindermann, 2004; Meyer, Gorge, et al., 2005; Weltman et al., 1992).

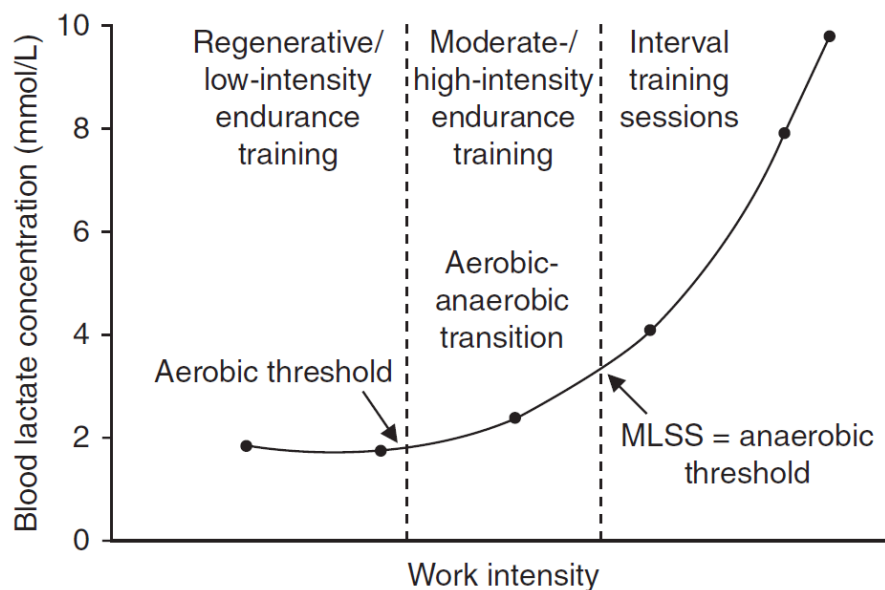


Abbildung 2: Eine typische Laktatleistungskurve (Faude, Kindermann, et al., 2009).

Belastungsintensitäten knapp oberhalb der aeroben Schwelle führen zu einem Anstieg der Blutlaktatkonzentration, die aber während Dauerbelastungen konstant bleibt und über eine lange Belastungsdauer durchgehalten werden kann. Dies gilt für den Bereich der aeroben Schwelle für mindestens vier Stunden (Meyer, Gabriel, Auracher, Scharhag, & Kindermann, 2003; Scharhag et al., 2005) und für Intensitäten, die etwa dem MLSS entsprechen, für etwa 45 bis 60 Minuten (Baron et al., 2008; Urhausen, Coen, Weiler, & Kindermann, 1993). Da bei diesen Intensitäten überwiegend die aerobe Glykolyse angeregt ist, wird spekuliert, dass diese Belastungen auch zu einer positiven Anpassung des oxidativen Metabolismus der Muskelzellen führen (Kindermann et al., 1979; Mader & Heck, 1986). So existiert eine Theorie, dass ein hoher Stimulus des oxidativen Metabolismus über eine möglichst lange Zeitdauer, wie er in diesem Intensitätsbereich möglich ist, eine angemessene Intensität für ein aerobes Ausdauertraining darstellt. Einige Autoren definieren das MLSS als „anaerobe Schwelle“ (Faude,

Kindermann, et al., 2009; Kindermann et al., 1979; Stegmann et al., 1981; Svedahl & MacIntosh, 2003). Dabei kann das MLSS als die höchste Intensität für ein Ausdauertraining nach der Dauerperiode genutzt werden (Beneke, Leithauser, & Hutler, 2001; Beneke et al., 2011; Kindermann et al., 1979; Weltman et al., 1992). Belastungsintensitäten oberhalb des MLSS werden hingegen zur Steuerung für Intervalltraining eingesetzt (Beneke et al., 2011; Coen, Schwarz, Urhausen, & Kindermann, 1991; Faude et al., 2008; Meyer, Lucia, et al., 2005; Niess et al., 2003)

Eine große Debatte wurde darüber geführt, ob es klare „Eckpunkte“ in der Laktatleistungskurve gibt, oder ob der Verlauf bei ansteigenden Belastungen kontinuierlich ist (Bentley et al., 2007). Bereits die Terminologie der aeroben und anaeroben Schwelle an sich erweckt die Vorstellung von klar getrennten physiologischen Prozessen. Allerdings sind die Übergänge zwischen dem aeroben und anaeroben Energiestoffwechsel - von leichter bis zur intensiven Belastungen - fließend, und es laufen immer beide energiebereitstellenden Prozesse zu verschiedenen Anteilen parallel ab. Das Modell des aerob-anaeroben Übergangs muss überdies auch aus praktischen und didaktischen Gesichtspunkten betrachtet werden. So scheinen die beiden Schwellen doch eine physiologische Relevanz zu haben, da gezeigt werden konnte, dass es bei Dauerbelastungen oberhalb des MLSS zu einem vermehrten Anstieg von Stresshormonen und Entzündungsparametern im Blut kommt (Gabriel & Kindermann, 1997; Urhausen, Weiler, Coen, & Kindermann, 1994). Außerdem konnte bei 28 Radfahrern im aerob-anaeroben Übergangsbereich eine Veränderung der elektromyographischen Aktivitäten des M. vastus lateralis und des M. rectus femoris nachgewiesen werden (Lucia, Sanchez, Carvajal, & Chicharro, 1999). Des Weiteren scheint es oberhalb der anaeroben Schwelle zum ersten signifikanten Abfall des absoluten Fettstoffwechsels zu kommen (Kindermann, 2004; Schwindling, Scharhag-Rosenberger, Kindermann, & Meyer, 2014).

Zusammengefasst kann man daher sagen, dass das Modell des aerob-anaeroben Übergangs zur Zeit weit verbreitet und akzeptiert ist und daher dazu genutzt wird, um Laktatschwellenkonzepte in diesen Rahmen einzuordnen (Faude, Kindermann, et al., 2009).

1.4.2.3 Laktatschwellenkonzepte

2009 wurden insgesamt 25 verschiedene Laktatschwellenkonzepte aus allen bis dahin in der MEDLINE Datenbank „PubMed“ gefundenen Originalartikeln zu Laktatschwellenkonzepten zusammengefasst (Faude, Kindermann, et al., 2009) und in die Kategorien

„aerob“ und „anaerob“ bzw. „fix“ und „individuell“ unterteilt. Fixe Schwellen werden entweder bei 2, 2,5, 3 oder 4-mmol/l festgelegt. Mit der original beschriebenen 4-mmol-Schwelle und mit den später als „Onset of Blood Lactate Accumulation“ [OBLA] beschriebenen Modellen ist dies die am meisten publizierte Methode (Faude, Kindermann, et al., 2009; Fohrenbach, Mader, & Hollmann, 1987; Hurley et al., 1984; Sjodin & Jacobs, 1981; Weltman et al., 1987).

1.4.2.4 Aerobe Laktatschwellen

Die aerobe Schwelle wird von verschiedenen Wissenschaftlern beschrieben als (Faude, Kindermann, et al., 2009, S. 475):

„the first significant / marked / systematic / non-linear / sharp / abrupt / sustained increase in bLa above baseline (Caiozzo et al., 1982; Davis, Vodak, Wilmore, Vodak, & Kurtz, 1976; Faude, Kindermann, et al., 2009; Hughson & Green, 1982; Ivy, Withers, Van Handel, Elger, & Costill, 1980; Kindermann et al., 1979; Tanaka, 1986; Tanaka & Matsuura, 1984; Tanaka et al., 1984; Yoshida, Chida, Ichioka, & Suda, 1987; Yoshida, Udo, Iwai, et al., 1990; Yoshida, Udo, Iwai, & Yamaguchi, 1993).“

Obwohl die visuelle Bestimmung des ersten Anstiegs der Blutlaktatkonzentration über die Baseline eine einfache und offensichtliche Methode darzustellen scheint, kann es wegen der geringen Veränderung der Blutlaktatkonzentration auf den ersten Belastungsstufen im Stufentest in der Praxis zu Problemen kommen. Allerdings scheint es nicht ratsam, diese Schwelle ausschließlich visuell zu bestimmen, da nachgewiesen wurde, dass es bei der Bestimmung dieser Schwelle durch verschiedene Analysten zu relevanten Unterschieden kommen kann (Yeh, Gardner, Adams, Yanowitz, & Crapo, 1983). Daher wurden andere Methoden entwickelt, um die Bestimmung zu objektivieren. Einige Arbeitsgruppen verwendeten den typischen Messfehler ihrer Laktatmessgeräte (hier: 0,2 mmol/l) und bestimmten die aerobe Schwelle ab einem Anstieg der Blutlaktatkonzentration von mehr als 0,2 mmol/l (Weltman et al., 1987). Andere verwendeten willkürliche Laktatkonzentrationen, wie einen Anstieg von 0,5 mmol/l über dem Ruhewert (Hughson & Green, 1982) oder einen Anstieg der Blutlaktatkonzentration von 1,0 mmol/l über dem Wert bei niedriger Intensität (zwischen ~40 % und 60 % $\text{VO}_{2\text{max}}$) (Coyle et al., 1983; Hagberg & Coyle, 1983). Eine weitere Methode stellt das Modell des kleinsten Laktatäquivalents dar. Hierzu wird die Blutlaktatkonzentration durch die Belastung oder die Sauerstoffaufnahme geteilt. Das kleinste Ergebnis stellt dann die aerobe Schwelle dar (Dickhuth et al., 1999; Roecker, Schotte, Niess, Horstmann, & Dickhuth, 1998). Andere nutzen logarithmisch transformierte Werte, um den Punkt des ersten Laktatanstiegs als die Überschneidung zweier linearer Regressionen abzubilden

(Beaver, Wasserman, & Whipp, 1985). Eine weitere Arbeitsgruppe bildet die Differenz der Blutlaktatkonzentrationen zwischen zwei aufeinander folgenden Stufen gegen die Leistung und bezeichnet den ersten Anstieg dieses Verhältnisses als aerobe Schwelle („Onset of Plasma Lactate Accumulation“) (Farrell, Wilmore, Coyle, Billing, & Costill, 1979).

Insgesamt lässt sich sagen, dass es für die Bestimmung der aeroben Schwelle aus der Laktatleistungskurve kein einheitliches Konzept zu geben scheint, sodass die Bestimmung aus den spirometrischen Daten möglicherweise die bessere Alternative ist (Meyer, Lucia, et al., 2005).

1.4.2.5 Anaerobe Laktatschwellen

Alle Laktatschwellenkonzepte, die das MLSS oder den Punkt der schnellsten Änderung der Steigung der Laktatleistungskurve abbilden, werden in die Kategorie der anaeroben Schwellen eingeordnet (Faude, Kindermann, et al., 2009). Allgemein befindet sie sich im bauchigen Teil der Laktatleistungskurve.

Da 16 gesunde Männer mit unterschiedlicher Ausdauerleistungsfähigkeit bei einer 25-minütigen Dauerbelastung auf dem Laufband bei einer durchschnittlichen Blutlaktatkonzentration von $4,0 \pm 0,7$ mmol/l keinen weiteren Anstieg in der Blutlaktatkonzentration aufwiesen, war die 4-mmol-Schwelle (4-mmol) ursprünglich etabliert (Heck, Mader, et al., 1985). Allerdings ließ sich eine fixe Laktatkonzentration nicht mit den interindividuellen Unterschieden vereinbaren. Zudem unterschätzte die 4-mmol-Schwelle (vor allem bei anaerob Ausdauertrainierten) und überschätzte (in erster Linie bei aerob Ausdauertrainierten) regelmäßig die wahre aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit (Stegmann & Kindermann, 1982; Stegmann et al., 1981). Daraufhin wurden mehrere sogenannte „individuelle Laktatschwellenkonzepte“ entwickelt. Es wurden fixe Steigungsgrade für die Tangenten zwischen 45° und 51° an der Laktatleistungskurve festgelegt. Die Überlegungen resultieren aus der Beobachtung, dass insbesondere bei gut ausdauertrainierten Sportlern die fixe Laktatkonzentration von 4-mmol/l im Stufentest eine Überforderung darstellte. Davon ausgehend wurde vielmehr in der Kinetik des Laktatverhaltens, d. h. bei einem bestimmten Anstieg in der Laktatbildung, ein geeigneter Ansatz zur Bestimmung der Laktatschwelle gesehen. Danach müsste gegenüber der fixen 4-mmol/l-Schwelle bei einer bestimmten Steigung der Laktatleistungskurve mit einer gleichen Änderung der Laktatproduktion für alle Individuen zu rechnen sein. Fraglich bleibt aber, ob eine fixe Neigung besser geeignet ist, um die anaerobe Schwelle abzubilden, als eine fixe Laktatkonzentration (Faude, Kindermann, et al., 2009).

Eine Weiterentwicklung der Methode mit einer fixen Steigung stellt die individuelle anaerobe Schwelle nach Stegmann dar (Stegmann et al., 1981), die sowohl die Laktatleistungskurve als auch das Verhalten der Blutlaktatkonzentrationen in der Nachbelastungsphase in die Bestimmung einbezieht. Dadurch sollen die Laktatverteilung im Blut und der Muskulatur, die Laktatdiffusion durch biologische Membrane und die Laktatelimination berücksichtigt werden. Das Modell basiert auf der Annahme, dass die Laktatkinetik im Blut während und nach einer stufenförmig ansteigenden Belastung auf Diffusionsprozessen entlang von Gradienten und gleichzeitig ablaufenden Eliminationsvorgängen beruht (Stegmann & Kindermann, 1982).

Die D_{\max} -Methode (D_{\max}) bestimmt die anaerobe Schwelle als den Punkt der Laktatleistungskurve, der von der Linie, die den Start- und Endpunkt miteinander verbindet, im Lot am weitesten entfernt ist (Cheng et al., 1992). Um den Einfluss des Startpunktes des Stufentests zu eliminieren, wurde eine modifizierte D_{\max} -Methode entwickelt, die den Punkt der aerobe Schwelle mit dem Endpunkt der Belastung verbindet und davon den Punkt auf der Laktatleistungskurve sucht, der lotrecht am weitesten davon entfernt ist (Bishop et al., 1998).

Aus empirischen Beobachtungen schätzt die Arbeitsgruppe um Dickhuth die anaerobe Schwelle bei Laufbandbelastungen bei einer Blutlaktatkonzentration von 1,5 mmol/l über dem Punkt des geringsten Laktatäquivalents bzw. der aeroben Schwelle ab (Dickhuth et al., 1999; Roecker et al., 1998). Bei Leistungsdiagnostiken mit professionellen Radfahrern wird die anaerobe Schwelle bei +1,0 mmol/l oberhalb der aeroben Schwelle definiert (Vogt et al., 2006). Allerdings wird dabei ein sehr „flaches“ Belastungsprotokoll mit Start bei 100 W und einem Anstieg von 20 W alle 3 min gewählt.

Tabelle 4 zeigt alle gefundenen anaeroben Laktatschwellenmodelle in einer Übersicht. Für die hier vorliegende Arbeit wurden aus Gründen der Relevanz die Konzepte nach Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und 4-mmol ausgewählt. Diese sind zum einen die am häufigsten publizierten Modelle und zum anderen lassen sie sich innerhalb einer Laktatleistungskurve miteinander vergleichen (Faude, Kindermann, et al., 2009). Außerdem bildet diese Auswahl mit einer fixen (4-mmol), einer halbfixen (Dickhuth) und zwei individuellen Schwellen, von denen eine aufwändig (Stegmann) und die andere einfach (D_{\max}) zu bestimmen ist, eine breite Auswahl.

Tabelle 4: Anaerobe Laktatschwellenkonzepte (LLK = Laktatleistungskurve, IAS = individuelle anaerobe Schwelle), modifiziert nach Faude, Kindermann & Meyer (2009).

Schwellenkonzept	Methode und Beschreibung
4-mmol (Mader et al., 1976)	Belastung entsprechend 4-mmol/l aus der LLK
IAS (Stegmann et al., 1981)	Tangente zur LLK aus der Nachbelastung von dem Punkt der gleichen Laktatkonzentration wie bei Abbruch der Belastung
IAS (Keul et al., 1979)	Tangente von 51° zur LLK
IAS (Simon, Berg, Dickhuth, Simon-Alt, & Keul, 1981)	Tangente von 45° zur LLK
IAS (Berg, Stippig, Keul, & Huber, 1980)	Schnittpunkt der Tangente am minimalen Laktatäquivalent und der linearen Funktion der letzten 90 s der LLK
IAS (Bunc, Heller, Novack, & Leso, 1985)	Schnittpunkt der LLK und der Halbierenden aus den Tangenten aus dem oberen und unteren Bereich der LLK
IAS (Dickhuth et al., 1991; Vogt et al., 2006)	1,5 mmol/l bzw. 1,0 mmol/l oberhalb des minimalen Laktatäquivalents
IAS (Baldari & Guidetti, 2000)	Zweiter Anstieg von mehr als 0,5 mmol/l und mehr als der letzte Anstieg
D_{max} (Cheng et al., 1992)	Maximale Distanz auf der LLK zu der Geraden mit den Endpunkten der LLK
D_{mod} (Bishop et al., 1998)	Maximale Distanz auf der LLK zu der Geraden mit den Endpunkten des ersten Laktatanstiegs und dem Ende der Belastung
LTP (Smith & Jones, 2001)	Letzte Intensität vor der Beobachtung eines plötzlichen und anhaltenden Anstiegs der LLK oberhalb der aeroben Schwelle
LMS (Tegtbur, Busse, & Braumann, 1993)	Niedrigster Punkt der LLK nach einer hochintensiven Belastung

Die Reproduzierbarkeit der Laktatschwellenkonzepte wird, unabhängig davon ob aerob oder anaerob, ob fix oder individuell, als hoch angesehen ($r > 0,9$). Für die Sauerstoffaufnahme an der Laktatschwelle scheint hingegen ein etwas geringerer Reproduzierbarkeitskoeffizient von $r = 0,8$ bis $0,9$ zu gelten (Faude, Kindermann, et al., 2009).

1.4.2.6 Laktatschwellen und das MLSS

Wie beschrieben, zählt die Bestimmung der anaeroben Schwelle neben der VO_{2max} zu den populärsten Markern für die Ausdauerleistungsdiagnostik. Durch die Bestimmung der anaeroben Schwelle soll das MLSS abgebildet werden. Definiert ist es als die höchste Intensität, bei der Laktatproduktion und Laktatelimination ausgeglichen sind und daher die Blutlaktatkonzentration in den letzten 20 Minuten eines 30-minütigen Dauertests nicht mehr als $1,0$ mmol/l ansteigt (Beneke, 2003). Dies stellt sich bei Dauerbelastungen nach einer Einschwingphase (in der Regel 10 Minuten) individuell unterschiedlich zwischen 2 und 8 mmol/l ein. Da das gebildete Laktat also entweder im aeroben Stoffwechsel über Pyruvat oxidativ abgebaut oder zu Glukose aufgebaut wird, läuft der Energiestoffwechsel, auf den ganzen Organismus bezogen, aerob ab (De Marées & Mester, 1981). Das MLSS stellt daher die höchste Intensität für ein aerobes Ausdauertraining und ein Maß zur Bestimmung der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit dar. Da aerobes Ausdauertraining in der Regel als Grundlagenausdauertraining verstanden wird, werden diese Begriffe im Weiteren synonym verwendet.

Weil die genaue Bestimmung des MLSS sehr aufwändig ist, wird versucht über die Laktatleistungskurve, die aus einem ansteigenden Stufentest erstellt wird, die anaerobe Schwelle und damit das MLSS zu bestimmen. Dazu werden verschiedene Tests genutzt. Manche Autoren schätzten das MLSS durch die Leistung im Zeitfahren (von 5 km bis 40 km oder 8 min bis 30 min) ab (Gavin et al., 2012; Harnish, Swensen, & Pate, 2001; McNaughton, Roberts, & Bentley, 2006; Swensen, Harnish, Beitman, & Keller, 1999). Andere beschäftigten sich mit der physiologischen Belastungsreaktion (Blutlaktatkonzentration, Herzfrequenz, Sauerstoffaufnahme und subjektivem Belastungsempfinden) während submaximaler Dauerbelastungen (Billat, Dalmy, Antonini, & Chassain, 1994; Dekerle, Baron, Dupont, Vanvelcenaher, & Pelayo, 2003; Kilding & Jones, 2005; Laplaud, Guinot, Favre-Juvin, & Flore, 2006; Loat & Rhodes, 1993; Palmer, Potteiger, Nau, & Tong, 1999; Scheen, Juchmes, & Cession-Fossion, 1981; Simon, Young, Gutin, Blood, & Case, 1983; Snyder, Woulfe, Welsh, & Foster, 1994; Yamamoto et al., 1991). Weitere Studien beschreiben zwar die Blutlaktatkonzentrationen bei Dauertests, die der Leistung der Laktatschwelle entsprechen, allerdings wurden keine Dauerbelastungen bei höheren oder tieferen Intensitäten durchgeführt (Loat,

1991; Oyono-Enguelle et al., 1990; Schnabel, Kindermann, Schmitt, Biro, & Stegmann, 1982; Stegmann & Kindermann, 1982; Stegmann et al., 1981). So wurde bei 50-minütigen Dauerläufen bei einer Geschwindigkeit, die der IAS nach Stegmann et al. (1981) entspricht, eine durchschnittliche, konstante Blutlaktatkonzentration von etwa 4,5 mmol/l gemessen (Schnabel et al., 1982). Allerdings wurde keine weitere Dauermethode mit einer anderen Intensität durchgeführt. Bei 50-minütigen Dauerbelastungen von 19 Probanden auf dem Fahrradergometer mit einer Belastungsintensität entsprechend der IAS nach Stegmann et al. (1981) wurde eine Laktatkonzentration von etwa 4-mmol/l gemessen. Die gleichen Probanden hatten jedoch bei einem Dauertest entsprechend der Intensität der 4-mmol-Schwelle aus dem Stufentest über die 50 Minuten einen Anstieg der Blutlaktatkonzentration auf bis zu 9,6 mmol/l bei einem teilweise auch vorzeitigen Abbruch (Stegmann & Kindermann, 1982). Auch eine andere Studie berichtet von keinem Laktat-Steady-State bei drei von fünf Probanden während einer Dauerbelastung entsprechend der 4-mmol-Schwelle (Oyono-Enguelle et al., 1990). Bei einer 60-minütigen Dauerbelastung an der individuellen anaeroben Schwelle fand eine andere Arbeitsgruppe hingegen einen Anstieg der Blutlaktatkonzentration von der 15. zur 45. Minute von 3,4-mmol/l auf 4,6 mmol/l im Mittel. Auch hier kam es zu frühzeitigen Abbrüchen der Belastung (Loat, 1991). Allerdings benutzte die Arbeitsgruppe nicht das Originalprotokoll. Es wurde überdies gezeigt, dass die Bestimmung der Laktatschwelle von dem gewählten Protokoll abhängig ist (Heck, 1990).

Beim Vergleich der Dauerlaufgeschwindigkeit, wenn die Laktatkonzentrationen im Stufentest entsprechend der Leistung abgebildet wurden (IAS_1), und der Dauerlaufgeschwindigkeit, bei der die Blutlaktatkonzentrationen der vorangegangenen Stufe abgebildet wurden (IAS_2), fanden andere Autoren Laktat-Steady-State Bedingungen (~4-mmol/l) für die IAS_2 , aber nicht für die IAS_1 (Baldari & Guidetti, 2000). Kritisiert wird, dass der Unterschied zwischen den beiden Schwellen exakt einer Stufenhöhe aus dem Stufentest entsprach und die Bereiche dazwischen nicht evaluiert wurden (Faude, Kindermann, et al., 2009). Bei vier verschiedenen 40-minütigen Dauerbelastungen auf dem Fahrradergometer (eine an der aeroben Schwelle, eine zwischen der aeroben und anaeroben Schwelle, eine an der anaeroben Schwelle sowie eine zwischen der anaeroben Schwelle und der maximalen Belastungsstufe aus dem Stufentest) fand die Arbeitsgruppe Laktat-Steady-State-Bedingungen bis zu einer Blutlaktatkonzentration von ~5 mmol/l. Die höchste Dauerbelastungsintensität führte zu einer Akkumulierung der Blutlaktatkonzentration und einem vorzeitigen Abbruch der Belastung bei allen Probanden (Ribeiro et al., 1986).

Die meisten Studien befassten sich mit dem Verhältnis der 4-mmol-Schwelle zum MLSS (Beneke, 1995; Heck, Hess, et al., 1985; Heck, Mader, et al., 1985; Jones & Doust, 1998; Lajoie, Laurencelle, & Trudeau, 2000; Van Schuylenbergh, Vanden Eynde, & Hespel, 2004). Dabei fand vor allem die Arbeitsgruppe um Heck hohe Korrelationen zwischen dem MLSS und der 4-mmol-Schwelle sowohl für Lauf- also auch für Fahrradbelastungen (Heck, 1990; Heck, Hess, et al., 1985; Heck, Mader, et al., 1985). Allerdings waren die ausgewählten Probanden sehr heterogen in ihrer Ausdauerleistungsfähigkeit, was Korrelationen begünstigt. Es wird kritisiert, dass die Korrelationen aus diesem Grund so hoch sein könnten (Faude, Kindermann, et al., 2009). Unabhängig von dieser Kritik konnte die Arbeitsgruppe zeigen, dass die 4-mmol-Schwelle höher als das MLSS liegt, wenn der Stufentest mit 3-min-Stufendauer durchgeführt wurde, was hingegen bei 5-min-Stufendauer nicht der Fall war. Dies entspricht dem Ergebnis einer anderen Arbeitsgruppe, die bei einer homogenen Läufergruppe und 3-min-Stufendauer trotz höherer 4-mmol-Schwelle im Vergleich zum MLSS eine hohe Korrelation feststellte (Jones & Doust, 1998). Zwei Arbeitsgruppen fanden hingegen geringere Korrelationen bei Elite-Radsportlern (Van Schuylenbergh et al., 2004) und einer homogenen Gruppe von Ruderern (Beneke, 1995). Außerdem konnte kein signifikanter Unterschied zwischen der 4-mmol-Schwelle bei 6-min-Stufen und dem MLSS (Van Schuylenbergh et al., 2004) gefunden werden. Im Gegensatz dazu lag die 4-mmol-Schwelle bei 3-min-Stufen signifikant über dem MLSS (Beneke, 1995).

Zwischen der Stegmann-Schwelle (Stegmann et al., 1981) und dem MLSS wurden hohe Korrelationen gefunden (Heck, 1990; Heck, Hess, et al., 1985). Des Weiteren konnte unabhängig von der Stufenlänge (3 min vs. 5 min) kein Unterschied zwischen der Laufgeschwindigkeit an der Stegmann-Schwelle und dem MLSS festgestellt werden, während bei Radfahrern die Schwelle nach Stegmann im Mittel etwa 8 % höher als das MLSS lag (Heck, 1990; Heck, Hess, et al., 1985). Urhausen et al. (1993) fanden sowohl für Radfahrer als auch für Läufer heraus, dass eine Dauerbelastung an der Stegmann-Schwelle im Gegensatz zu einer um 5 % erhöhten Dauerbelastung im Mittel zu keinem Anstieg in der Blutlaktatkonzentration zwischen der 10. und 30. Belastungsminute führt. Dies wird auch von einer anderen Arbeitsgruppe bestätigt, die schlussfolgert, dass die Stegmann-Schwelle für die meisten Menschen eine valide Messmethode ist, um das MLSS zu bestimmen und es nur in wenigen Fällen zu erheblichen Abweichungen kommt (McLellan & Jacobs, 1993). Allerdings werden in der Arbeit keine Korrelationen und keine absoluten Unterschiede zwischen dem MLSS und der Stegmann-Schwelle angegeben. Eine Arbeit mit neun Ruderern beschreibt im Gegensatz zu den oben aufgeführten Studien eine signifikant ($p < 0,001$) höhere Stegmann-Schwelle (287 ± 25 W) als

MLSS (255 ± 18 W) (Beneke, 1995). Auch war die Korrelation zwischen dem MLSS und der Stegmann-Schwelle deutlich geringer als in den vorangegangenen Arbeiten, was Faude et al. (2005) auf die Homogenität der Probanden und die zu geringe Stufenhöhe (35 W) im gewählten Protokoll zurückführen.

Eine Studie (Smith & Jones, 2001) hat mittels Bland-Altman-Plots bei acht Läufern die Leistung der visuell bestimmten anaeroben Schwelle mit dem MLSS verglichen. Dabei lag der mittlere Unterschied zwar bei lediglich 0,1 km/h, doch schlussfolgerte die Arbeitsgruppe aufgrund der hohen Streuung von $\pm 1,8$ km/h, dass sich keine individuellen Rückschlüsse vom Ergebnis der anaeroben Schwelle auf die Leistung am MLSS ableiten lassen und für wissenschaftliche Studien die exakte Bestimmung des MLSS notwendig ist.

Zwei weitere Arbeiten berechneten den Unterschied zwischen Schwellenkonzepten und dem MLSS mittels Bland-Altman-Plots bei Radfahrern. Eine Studie (Grossl et al., 2012) verglich die Leistung bei der fixen 3,5 mmol-Schwelle (Heck, Mader, et al., 1985), der Dickhuth-Schwelle (Dickhuth et al., 1991; Dickhuth et al., 1999) und dem Schwellenmodell, bei der sich die Laktatkonzentration von einer Stufe auf die nächste zum zweiten Mal um mehr als 0,5 mmol/l erhöht und dabei die zweite Erhöhung höher oder mindestens gleich zur ersten ist (Baldari & Guidetti, 2000). Dabei fanden sie hohe signifikante Korrelationen zwischen den drei Schwellenmodellen und dem MLSS ($r = 0,87$ bis $0,94$) und eine hohe Streuung für die mittleren Differenzen (9,5 % bis 16,5 %) zwischen dem MLSS und den Schwellenkonzepten. Daher schlussfolgerte die Arbeitsgruppe, dass der potentielle Fehler bei der Abschätzung von präzisen, individuellen Trainingsempfehlungen offensichtlich zu groß sei (Grossl et al., 2012), ohne dies jedoch an einem Kriterium festzumachen.

In einer weiteren Arbeit (Hauser et al., 2014) wurde das MLSS mit den Schwellenkonzepten 4-mmol, Dickhuth und Stegmann verglichen. Dabei wurden für die 57 Probanden mit sehr heterogener Ausdauerleistungsfähigkeit signifikante und hohe Korrelationen gefunden ($r = 0,83$ bis $0,89$). Allerdings waren die mittleren Differenzen teilweise erheblich und vor allem die Streuung der mittleren Differenzen zwischen den Schwellenkonzepten und dem MLSS lag zwischen 49 und 57 W und wurde als „noticeably quite large“ interpretiert, ohne vorher ein fixes Kriterium dafür festgelegt zu haben. Betrachtet man die Unterschiede auf individueller Ebene, so halten die Autoren fest, dass die Schwellenkonzepte keine validen Methoden zur Bestimmung des MLSS darstellen.

1.4.2.7 Laktatschwellen und (simulierte) Wettkampfleistungen

In einer Zusammenfassung von 32 Studien, die den Zusammenhang zwischen Laktatschwellen und der Wettkampfleistung in Ausdauerwettbewerben oder simulierten Wettkämpfen überprüften (Faude, Kindermann, et al., 2009), wurde festgehalten, dass insbesondere für homogene Athletengruppen die Laktatschwellen der maximalen Sauerstoffaufnahme überlegen sind (Coyle et al., 1988; Coyle et al., 1991; Farrell et al., 1979; Hagberg & Coyle, 1983; Yoshida et al., 1987).

Von den 32 Studien wurden 18 Lauf-Studien zusammengefasst, die sich mit der Korrelation von Belastungsintensitäten (Laufgeschwindigkeiten oder Sauerstoffaufnahmen) an verschiedensten Laktatschwellenkonzepten mit den Laufgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Wettkämpfen über verschiedene Distanzen (von 800 m bis hin zum Marathon) beschäftigten (Faude, Kindermann, et al., 2009). Generell konnte dabei festgestellt werden, dass es bei nahezu allen Studien zu einer hohen Korrelation zwischen den Laktatschwellenkonzepten und den (simulierten) Wettkämpfen kam (Faude, Kindermann, et al., 2009). Unterteilt man diese in Kurz- (800 m bis 3,2 km), Mittel- (5 bis 16,1 km) und Langzeitwettkämpfe (21,1 bis 42,2 km), so lässt sich die Tendenz erkennen, dass die Korrelation für längere Wettkampfdistanzen höher als für kürzere Distanzen ist (Faude, Kindermann, et al., 2009). Auch lässt sich eine Tendenz erkennen, nach der die Korrelationen für fixe und anaerobe Laktatschwellen höher zu sein scheinen als für aerobe Schwellen (Faude, Kindermann, et al., 2009). Dies wird mit der höheren Wettkampfgeschwindigkeit im Vergleich zur Geschwindigkeit an der aeroben Schwelle begründet.

Für den Radsport konnten lediglich acht Studien zusammengefasst werden, die sich mit der Evaluation von Laktatschwellenkonzepten anhand von (simulierten) Zeitfahrwettkämpfen beschäftigten (Faude, Kindermann, et al., 2009). Nur eine Studie beschäftigte sich mit dem Zusammenhang zu kurzen Wettkämpfen und fand bei 18 männlichen Bahnradспортlern einen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,86$ zur 4000 m-Zeit (Craig et al., 1993). Vier Studien beschäftigten sich mit Wettkampfdistanzen zwischen 13,5 und 20 km bzw. einer Wettkampfzeit zwischen 20 und 30 Minuten. Diese Studien konnten eine hohe Korrelation ($r = 0,8 - 0,9$) nachweisen (Bentley et al., 2001; MacIntosh, Esau, & Svedahl, 2002; McNaughton et al., 2006; Nichols, Phares, & Buono, 1997). Für längere Wettkampfzeiten, für 40-km-Zeitfahren oder eine Dauer zwischen 60 und 90 Minuten wurde hingegen nur eine geringere Korrelation ($r = \sim 0,7$) festgestellt (Amann et al., 2006; Bentley et al., 2001; Bishop et al., 1998). Zusammenfassend lässt sich die Datenlage im Gegensatz zum Laufen als heterogener beschreiben. Die Korrelationen

von Laktatschwellen und (simulierten) Wettkampfleistungen variieren von $r = 0,23$ (Bentley et al., 2001) bis $r = 0,93$ (MacIntosh et al., 2002). Daher schlussfolgerten Faude, Kindermann et al. (2009), dass aufgrund der geringen Studienanzahl und der heterogenen Studienlage weitere Forschungsarbeit im Bereich des Zusammenhangs von Laktatschwellen und Zeitfahrwettbewerben von Radfahrern notwendig ist.

Zwei Studien analysierten den Zusammenhang von Laktatschwellen mit Mountainbike-wettkämpfen (Gregory et al., 2007; Impellizzeri, Rampinini, Sassi, Mognoni, & Marcora, 2005). Solche Wettkämpfe zeichnen sich durch einen ständigen Wechsel von Anstiegen und Abfahrten aus, wobei in den Abfahrten ein Mititreten in der Regel nicht möglich ist. In diesen Studien wurde eine hohe Korrelation sowohl für die 4-mmol-Schwelle als auch für eine individuelle anaerobe Schwelle zu einem 31 km langen MTB-Rennen festgestellt (Impellizzeri, Rampinini, et al., 2005). Die Korrelation zur Wettkampfleistung lag bei $r = \sim 0,7$ für die absolute Leistung, war aber deutlich höher ($r = \sim 0,9$), wenn die Leistung in Relation zum Körpergewicht gesetzt wurde. In der anderen Studie lagen die Korrelationen zum Zeitfahren im Gelände für 11 männliche Mountainbiker absolut bei $r = 0,5$ und in Relation zum Körpergewicht bei $r = 0,8$ für die individuelle anaerobe Schwelle. Die Ergebnisse dieser beiden Studien können in erster Linie durch den hohen Einfluss vom Körpergewicht der Radsportler auf die Wettkampfleistung an Anstiegen erklärt werden (Coyle, 2005; Impellizzeri & Marcora, 2007; Lucia, Earnest, & Arribas, 2003).

Faude, Kindermann et al. (2009) zogen daraus das Fazit, dass die verschiedenen Laktatschwellenkonzepte in einem hohen Zusammenhang zur Ausdauerwettkampfleistungen stehen und dies insbesondere für Laufwettbewerbe zu gelten scheint. Diese Ergebnisse werden auch von Trainingsstudien bestätigt, die zeigten, dass eine Verbesserung in der Wettkampfleistung mit einer Verbesserung der Laktatschwelle korreliert (Nicholson & Sleivert, 2001; Tanaka et al., 1984). Obwohl noch weitere Einflussfaktoren, wie zum Beispiel neuromuskuläre, biomechanische, muskeltraumatische, thermoregulatorische oder auch psychologische eine Rolle bei der Erbringung einer Ausdauerleistung spielen (Abbiss & Laursen, 2005), scheinen die peripher metabolischen Gründe aufgrund ihrer hohen Korrelation zur Laktatschwelle (Midgley et al., 2007) eine notwendige und wichtige Voraussetzung zur Erbringung der Wettkampfleistung in aeroben Ausdauersportarten zu sein (Faude, Kindermann, et al., 2009).

1.4.2.8 Einflussfaktoren auf submaximale Laktatschwellen

Entleerte Glykogenspeicher führen bei ansteigenden Belastungstests zu reduzierten (sub)maximalen Blutlaktatkonzentrationen, was eine nach unten verschobene Laktatleistungskurve (LLK) zur Folge hat. Eine Verbesserung der Grundlagenausdauer führt hingegen zu einer Rechtsverschiebung der Laktatleistungskurve. Beides hat niedrigere submaximale Blutlaktatkonzentrationen zur Folge, unterscheidet sich aber durch die maximale Blutlaktatkonzentration im ansteigenden Belastungstest. Im Einzelfall, vor allem wenn keine einheitliche Ausbelastung vorliegt, kann es schwierig sein das eine von dem anderen zu unterscheiden (Faude, Kindermann, et al., 2009; Maassen & Busse, 1989a). Entleerte Glykogenspeicher können sowohl an einer kohlenhydratarmen Diät oder an vorausgegangenem umfangreichem Training liegen (McLellan & Gass, 1989; Reilly & Woodbridge, 1999; Yoshida, 1984). Auch scheint Ermüdung möglicherweise zu niedrigeren Blutlaktatkonzentrationen und damit zu einer nach unten verschobenen Laktatleistungskurve zu führen (Urhausen, Gabriel, Weiler, & Kindermann, 1998). Allerdings sind diese Ergebnisse nicht eindeutig von einer Glykogenverarmung zu unterscheiden. Eine Frage mit der sich bislang keine Studie gezielt beschäftigt hat, ist der alleinige Einfluss von Ermüdung, d. h. ohne Glykogenverarmung, auf submaximale Laktatschwellen.

Auch wird von veränderten Blutlaktatkonzentrationen unter verschiedenen klimatischen Bedingungen berichtet (Bishop, 2001; Buckley, Bourdon, & Woolford, 2003; Medbo, Mamen, Holt Olsen, & Evertsen, 2000; van Someren, Howatson, Nunan, Thatcher, & Shave, 2005). So konnte eine Studie nachweisen, dass sich das MLSS im Mittel von 180 ± 11 W bei 22° C auf 148 ± 11 W bei 40° C signifikant reduziert (de Barros et al., 2011).

Daneben kann die komplette Laktatleistungskurve auch von methodischen Faktoren beeinflusst werden, die bei einer Interpretation immer beachtet werden müssen (Faude, Kindermann, et al., 2009). Dazu zählen neben den oben genannten auch das Testdesign und die Datenverarbeitung, sowie die Methoden der Blutlaktatmessung.

Testdesign und Datenverarbeitung

Testdesigns zur Ausdauerdiagnostik lassen sich prinzipiell in die Kategorien Stufentests, Rampentests und Dauertests unterteilen. Für die Laktatdiagnostik werden in erster Linie Stufentests herangezogen, welche sich im Hinblick auf die Startleistung, Stufenhöhe und Stufendauer voneinander unterscheiden können. In einem Übersichtsartikel beschäftigte man sich mit den Auswirkungen von veränderten Testprotokollen auf

die Marker der Ausdauerleistungsdiagnostik (Bentley et al., 2007). Zum Beispiel kann eine Veränderung der Stufendauer zu relevanten Veränderungen der Laktatleistungskurve und der Laktatschwellen führen (Faude, Kindermann, et al., 2009; Foxdal, Sjodin, Sjodin, & Ostman, 1994). Eine mögliche Ursache dafür kann die Zeit darstellen, die dem Laktat zur Diffusion von der Muskulatur ins Blut auf einer Belastungsstufe gelassen wird (Bentley et al., 2007). Daher werden in der Regel höhere Laktatwerte bei gleicher Belastung, aber längerer Dauer der Belastungsstufen erreicht.

Des Weiteren kann sich das Fitting der einzelnen Laktatwerte zu einer Laktatleistungskurve unterscheiden. Bisher hat sich diesbezüglich kein Modell etabliert (Bentley et al., 2007). Es werden zum Beispiel ein- (Lundberg, Hughson, Weisiger, Jones, & Swanson, 1986) oder zweiphasige Modelle (Grant et al., 2002), zwei oder drei lineare Regressionen, ein zweifach geloggtes Modell (Beaver et al., 1985), ein Polynom dritter Ordnung (Cheng et al., 1992), ein parametrisiertes Spline-Fitting (Roecker et al., 1998) oder eine exponentielle Funktion (Hughson, Weisiger, & Swanson, 1987) eingesetzt. Zwar wird empfohlen für die verwendete Laktatschwelle auch das passende Testprotokoll und Fittingprozedere anzuwenden (Faude, Kindermann, et al., 2009), aber neuere Erkenntnisse aus über 3500 Laktatleistungskurven im Schwimmen zeigen, dass die exponentielle Fittingkurve gegenüber dem Polynom dritter Ordnung und dem einphasigen Modell die geringsten Fehler verursacht und somit scheinbar am geeignetsten ist (Endler, Secker, & Bügner, 2016). Inwieweit sich dieses Ergebnis aber auf den Radsport übertragen lässt, ist fraglich.

Methode der Blutlaktatmessung

In einem Übersichtsartikel werden zudem auch methodische Aspekte angesprochen, die die Laktatmessung beeinflussen können (Faude, Kindermann, et al., 2009). So können die Punkte (Ohrläppchen oder Fingerbeere) oder die Art (venös, arteriell oder kapillar) der Blutentnahme (Feliu et al., 1999; Robergs et al., 1990), sowie die Art der labortechnischen Bestimmung der Blutprobe (Buono & Yeager, 1986; Thin, Hamzah, FitzGerald, McLoughlin, & Freaney, 1999) das Ergebnis beeinflussen. Gezeigt werden konnte, dass Blutproben aus dem Ohrläppchen durchschnittlich höhere Werte als jene aus der Fingerbeere aufweisen (Draper, Brent, Hale, & Coleman, 2006; Feliu et al., 1999; Forsyth & Farrally, 2000). Auch hat die Art des analysierten Bluts einen Einfluss. So ist die Laktatkonzentration im Plasma höher als im Vollblut. Die Konzentrationen im Kapillarblut hingegen liegen dazwischen (Foxdal, Sjodin, Ostman, & Sjodin, 1991; Foxdal et al., 1990; Foxdal et al., 1994; Hildebrand et al., 2000; Robergs et al., 1990).

Des Weiteren wird in mehreren Studien von unterschiedlichen Konzentration durch unterschiedliche Analysesysteme (tragbare Feldmessgeräte gegenüber festinstallierten Labormesssystemen bzw. amperometrischen gegenüber fotometrischen Messsystemen) auch unter verschiedenen klimatischen Bedingungen berichtet (Bishop, 2001; Buckley et al., 2003; Medbo et al., 2000; van Someren et al., 2005).

Idealerweise sollte ein Laktatschwellenkonzept nicht von den oben genannten Faktoren beeinflusst werden, wie es zum Beispiel für fixe Schwellenkonzepte nicht der Fall ist. Auch wird empfohlen den Ort der Entnahme und die Art des Bluts in Studien immer mit anzugeben und intraindividuell gleich zu halten (Faude, Kindermann, et al., 2009).

1.5 Methodische Überlegungen zur Schwellenvalidierung

Es scheint Laktatschwellenkonzepte zu geben, die in der Lage sind, das MLSS abzuschätzen (Faude, Kindermann, et al., 2009). Teilweise stimmt dies für das Konzept der IAS nach Stegmann et al. (1982) und die 4-mmol-Schwelle (Heck, Mader, et al., 1985). Jedoch wird in den meisten Fällen lediglich von einer linearen Korrelation oder der mittleren Laktatabweichung berichtet. Die Korrelationen von zwei Methoden geben zwar die relative Reliabilität an, lassen aber nicht auf eine systematische Abweichung oder eine absolute Übereinstimmung schließen. Des Weiteren sind diese stark von der Streuung der ausgewählten Stichprobe abhängig (Atkinson & Nevill, 1998).

Aus praktischer und statistischer Sicht wäre es interessant, die absolute Variabilität der individuellen Differenzen zwischen den Laktatschwellenkonzepten und dem MLSS zu kennen. Als eine angemessene Methode wird dabei die Angabe der mittleren Differenz und der 95 %-Konfidenzintervalle (als „Limits of Agreement“ [LoA]), angesehen (Bland & Altman, 1986). Ein solches Verfahren würde außerdem eine Beurteilung der Homoskedastizität bzw. Heteroskedastizität der Daten ermöglichen (Atkinson & Nevill, 1998).

In Tabelle 5 wird beispielhaft die Berechnung der mittleren Differenzen und der 95 %-Konfidenzintervalle für vier verschiedene Laktatschwellenkonzepte aus den Rohdaten der Arbeitsgruppe um Heck gezeigt (Faude, Kindermann, et al., 2009; Heck, 1990; Heck, Hess, et al., 1985; Heck, Mader, et al., 1985). Diese Daten zeigen eine mittlere Abweichung zwischen 0,5 % und 8 % mit 95 %-Konfidenzintervallen von etwa 10 % für Laufbelastungen. Dies bedeutet, dass für jeden neuen Probanden, dessen Ausdauerleistungsfähigkeit innerhalb derer der bisher getesteten Probanden liegt, mit einer 95- %igen Sicherheit gesagt werden kann, dass seine Abweichung zwischen der anaeroben Schwelle und dem MLSS innerhalb dieses Bereiches liegt (Atkinson & Nevill,

1998). Für Belastungen auf dem Fahrradergometer sind die Ergebnisse heterogener und die mittleren Abweichungen, sowie die Konfidenzintervalle größer. Auf Grund der geringen Datenmenge kann dieses Ergebnis nur als eine Vorbereitung für weitere Studien gesehen werden (Faude, Kindermann, et al., 2009).

Tabelle 5: Mittlere Abweichungen (Differenz maximales Laktat-Steady-State [MLSS] - Laktatschwelle [LT]) und 95 %-Konfidenzintervalle [LoA] für vier verschiedene Laktatschwellenkonzepte bei Laufband- (n = 16) und Fahrradbelastungen (n = 22) (Faude, Kindermann, et al., 2009). Die Ergebnisse wurden mit Erlaubnis aus den Rohdaten von Heck et al. berechnet (Heck, 1990; Heck, Hess, et al., 1985; Heck, Mader, et al., 1985).

Schwellen- konzept	Laufbandergometrie 3-min-Stufe, +0,4 m/s			Laufbandergometrie 5-min-Stufe, +0,4 m/s			Fahrradergometrie 2-min-Stufe, +25 W		
	Mean bias (m/s)	LoA (m/s)	LoA (%)	Mean bias (m/s)	LoA (m/s)	LoA (%)	Mean bias (W)	LoA (W)	LoA (%)
LT4 (Heck, Mader, et al., 1985)	-0,13	± 0,35	± 8	0,02	± 0,39	± 9	-19,8	± 28,4	± 14
IAS (Keul et al., 1979)	-0,20	± 0,39	± 9	0,06	± 0,35	± 8	-21,0	± 22,4	± 11
IAS (Stegmann et al., 1981)	-0,03	± 0,51	± 12	-0,03	± 0,37	± 9	-15,0	± 35,0	± 18
IAS (Bunc et al., 1985)	-0,33	± 0,33	± 8	-0,14	± 0,37	± 9	-71,4	± 52,8	± 27

IAS = Individuelle anaerobe Schwelle; LT4 = 4-mmol-Schwelle

Eine andere Möglichkeit ein Laktatschwellenkonzept zu validieren, ist der Vergleich mit einem Ausdauerwettkampf (prädiktive Validität). Als Alternative zur echten Wettkampfleistung kann auch das Ergebnis eines im Labor simulierten Wettkampftests herangezogen werden, welcher den Vorteil einer höheren Standardisierung und damit möglicherweise auch eine größere Reliabilität hat. Dabei kann die Korrelation zwischen der zu testenden Laktatschwelle und dem Validierungskriterium (Wettkampfergebnis) von mehreren Faktoren, wie zum Beispiel dem gewählten Wettkampf, der Sportart und der Heterogenität der Ausdauerleistungsfähigkeit der Probanden, beeinflusst werden (Faude, Kindermann, et al., 2009).

1.6 Forschungsdefizit und Zielsetzung der Arbeit

Als Fazit vergangener Studien und Schlussfolgerung aus dem Vorgesagten ist hervorzuheben, dass Straßenradfahrer für Rennen zwischen einer und fünf Stunden Dauer sowohl über eine hohe VO_{2max} und P_{max} als auch eine hohe submaximale Schwelle verfügen. Je nach Rennlänge oder Dauer von rennentscheidenden Situationen (z. B. Länge eines Anstiegs) scheint auch ein Anteil an anaerober Leistungsfähigkeit notwendig zu sein.

So werden in der Ausdauerdiagnostik die P_{max} , die VO_{2max} und die submaximalen Schwellen, die zur Abschätzung des MLSS dienen, als die wichtigsten Parameter angesehen. Die Maximalparameter sollten aber immer mit Vorsicht interpretiert werden, da diese sowohl eine hohe Abhängigkeit von der Ausbelastung des Athleten als auch vom Testdesign haben. Für die VO_{2max} gibt es zudem mehrere Bedenken hinsichtlich der Ableitung von Trainingsempfehlungen und der Sensitivität innerhalb einer leistungsfähig homogenen Personengruppe.

Die Blutlaktatkonzentrationen bei verschiedenen submaximalen Intensitätsbereichen oder im Speziellen das MLSS scheinen hingegen eine höhere Trennschärfe in der Ausdauerdiagnostik aufzuweisen. Da der Aufwand zur exakten Bestimmung des MLSS sehr hoch ist, wurden submaximale Laktatschwellenkonzepte entwickelt, um das MLSS anhand eines einzelnen Tests abzuschätzen. Im Mittel scheint es so, dass Laktatschwellen in der Lage sind, das MLSS abzuschätzen. Allerdings fehlen bislang größtenteils Informationen über die interindividuelle Variabilität der Abweichung der Laktatschwellen vom MLSS.

Laut aktuellem Forschungsstand haben Laktatschwellen und das MLSS im Mittel einen hohen Zusammenhang, weswegen Laktatschwellen im Mittel valide Parameter beim Abschätzen des MLSS zu sein scheinen (Faude, Kindermann, et al., 2009). Den Vergleich der Laktatschwellenkonzepte mit dem MLSS auf individueller Ebene haben bislang nur zwei Arbeiten für den Radsport veröffentlicht, die beide zu dem Schluss kommen, dass die Schwellenkonzepte auf individueller Ebene keine validen Parameter sind, um das MLSS abzuschätzen. Da damit jahrzehntelange leistungsdiagnostische Routine in Frage gestellt wird, war es das Ziel der ersten Studie der vorgelegten Dissertation, die Ergebnisse dieser beiden Arbeiten und damit die Validität von Laktatschwellen im Radsport anhand des MLSS zu überprüfen (Kriteriumsvalidität).

Die Validität von Laktatschwellenkonzepten anhand eines langen Zeitfahrens (40 km oder 60 bis 90 min) wurde bisher in drei Studien überprüft, bei denen nur eine geringe

Korrelation gefunden wurde. Dies ist insofern verwunderlich, da submaximale Laktatschwellen offenbar am ehesten ein Maß für die aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit darstellen und bei einem langen Zeitfahren über 95 % der Energie aerob bereitgestellt werden müssen. Daher war es das Ziel der zweiten Studie der vorgelegten Arbeit die Validität von Laktatschwellenkonzepten im Radsport anhand eines 40-km-Zeitfahrens zu überprüfen (prädiktive Validität).

Gezeigt werden konnte, dass maximale leistungsdiagnostische Parameter (VO_{2max} und P_{max}) von der Ausbelastung der Sportler abhängig sind und ermüdete Athleten aufgrund der geringeren Ausbelastbarkeit auch eine reduzierte P_{max} und VO_{2max} aufweisen. Auch konnten bei stark ermüdeten Athleten reduzierte (sub)maximale Blutlaktatkonzentrationen und damit eine nach unten verschobenen Laktatleistungskurve nachgewiesen werden (Urhausen et al., 1998). Eine Frage, mit der sich bislang keine Studie gezielt beschäftigt hat, ist der Einfluss von Ermüdung auf submaximale Laktatschwellen. Als Goldstandard für Ermüdung und Erholtheit zählt dabei die sportartspezifische Leistungsfähigkeit. Ob sich die ermüdungsbedingte Reduktion der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit auch auf die Laktatschwellen auswirkt, die ja eher eine stabilere „Eigenschaft“ darstellen sollen, ist bislang unklar. Das Überprüfen des Einflusses dieser Störgröße auf die Laktatschwellen ist das Ziel der dritten Studie der vorgelegten Dissertation.

Die Forschungsfragen dieser Arbeit können wie folgt zusammengefasst werden:

- Studie 1: Wie genau können Laktatschwellenkonzepte das MLSS (Kriteriumsvalidität) abschätzen?
 - Studie 2: Wie genau können Laktatschwellenkonzepte die Leistung im 40-km-Zeitfahren (prädiktive Validität) vorhersagen?
 - Studie 3: Wie verändern sich die Laktatschwellen durch Ermüdung?
-

2 Studie 1 – Validierung von Laktatschwellenkonzepten am MLSS

2.1 Einleitung

Unter Trainern scheint es eine weit verbreitete Ansicht zu sein, dass die VO_{2max} das Ausdauerpotential des Athleten und die Laktatschwelle seine aktuelle Ausdauerfähigkeit darstellt (Hall et al., 2016). Diese Überlegung basiert scheinbar auf einem Übersichtsartikel, der besagt, dass sich die Leistung an der Laktatschwelle (4-mmol oder MLSS) bei Untrainierten schon durch leichtes Ausdauertraining verbessert, Ausdauertrainierte hingegen intensivere Trainingsreize benötigen. Unabhängig davon scheint die VO_{2max} nur minimal trainierbar (Londeree, 1997).

Die Tag-zu-Tag-Variabilität des MLSS im Radsport ist gering. Hauser et al. (2013) beschreiben in einer Reproduzierbarkeitsstudie an 32 moderat trainierten Probanden einen Variationskoeffizienten von 3 % bei einem Unterschied der aufeinanderfolgenden Dauertests von 10 W (Hauser et al., 2013). In der Praxis sind die Iterationsschritte bei der Bestimmung des MLSS in der Regel mit 5 - 10 % bzw. 10 - 15 W deutlich weiter, als es dem Variationskoeffizienten entsprechen würde (Beneke, 2003; Billat et al., 2003; Faude, Kindermann, et al., 2009; Hauser et al., 2014). Gründe hierfür sind mutmaßlich die Beschränkung der Anzahl von Dauertests, insbesondere in leistungssportlichen Probandenkollektiven, sowie die Anforderungen und Möglichkeiten der Trainingssteuerung in der Sportpraxis.

In Ausdauersportarten beruhen die Trainingsempfehlungen in der Regel auf einer definierten metabolischen Beanspruchung, da diese Ausgangspunkt der Signalprozesse ist, die letztlich die Trainingsanpassung bedingen (Faude, Kindermann, et al., 2009; Seiler & Kjerland, 2006). Vor diesem Hintergrund scheint es plausibel, dass eine Beschreibung der Trainingsintensität genauer ist, wenn das MLSS bekannt ist (Faude, Kindermann, et al., 2009). Daher kann man davon ausgehen, dass eine hohe Korrelation der Laktatschwellen zum MLSS mit einer geringen individuellen Streuung eine valide Festlegung von Intensitätsbereichen für das Ausdauertraining ermöglicht (Faude, Kindermann, et al., 2009; Mann et al., 2013).

Leistungsbezogene Trainingszonen im Radsport haben im Schnitt eine Spannbreite von 15 % einer Schwelle (z. B. IAS oder FSL) und liegen zwischen 56 - 75 %, 76 - 90 %, 91 - 105 % und 106 - 120 % für Ausdauer-, Tempo-, Schwellen- und VO_{2max} -Training (Allen & Coggan, 2012; Friel, 2012). Diese Breite der Trainingsbereiche basiert weniger auf

statistischen Erwägungen als auf sportpraktischer Erfahrung. Sie hat sich aber in der Trainingssteuerung etabliert und kann somit als sportartspezifische Grenze der praktischen Relevanz von Abweichungen in der Trainingsintensität betrachtet werden. Um diese sportpraktische Perspektive einer gewissen Verifikation zu unterziehen, wurde anhand eigener Daten die jahreszeitliche Variabilität der CP20 (Bestleistung über 20 min) und CP60 (Bestleistung über 60 min) bei drei leistungssportlichen Radfahrern analysiert. Hier zeigte sich im Jahresverlauf (der jeweiligen Monatsbestwerte) im Mittel ein Unterschied von 29 W zwischen der Saisonpause (November und Dezember) und dem Saisonhöhepunkt (Juni und Juli).

Daher wird folgende Festlegung getroffen: Die individuelle Genauigkeit eines Laktatschwellenmodells wird dann als sehr genau angesehen, wenn es das MLSS genauso genau abschätzen kann wie die Dauertests (± 15 W), als genau, wenn es das MLSS so gut abschätzt, wie die Jahresschwankung von Radsportlern (± 30 W) und als ausreichend, wenn es das MLSS so genau abschätzt, wie die Spannbreite der in der Trainingspraxis verwendeten Trainingsbereiche (± 45 W).

2.2 Darstellung der empirischen Untersuchung

2.2.1 Fragestellung und Arbeitshypothese

Das Ziel dieser Studie war es, auf die von Faude, Kindermann et al. (2009) vorgeschlagene Art und Weise den Zusammenhang der vier gängigen Laktatschwellenkonzepte zum MLSS zu überprüfen. Infolgedessen werden die Konzepte 4-mmol (Mader et al., 1976), Stegmann (Stegmann et al., 1981), D_{\max} (Cheng et al., 1992) und Dickhuth (Dickhuth et al., 1991; Dickhuth et al., 1999) auf ihre Genauigkeit und interindividuelle Variabilität beim Abschätzen des MLSS untersucht.

Demzufolge lautet die Arbeitshypothese, dass es bei geringer interindividueller Variabilität einen Zusammenhang zwischen den vier Schwellenkonzepten und dem MLSS gibt.

2.2.2 Untersuchungsmethodik

2.2.2.1 Personenstichprobe

Untersuchungsgegenstand dieser Studie waren zu einer Hälfte gesunde männliche Sportstudenten (NAT, $n = 13$) und zur anderen Hälfte ausdauertrainierte männliche Radsportler (AT, $n = 13$). Bereits bei der Rekrutierung wurde versucht, die Probanden

in eine der beiden Subgruppen einzuordnen. Zudem wurde die Gruppe durch Mediansplit anhand des MLSS in W/kg in die Subgruppen (NAT = $2,6 \pm 0,4$ W/kg, AT = $3,7 \pm 0,3$ W/kg) unterteilt.

Tabelle 6: Anthropometrische Daten und Leistung am maximalen Laktat-Steady-State (MLSS) (Mittelwert \pm Standardabweichung).

	Alter [J]	Größe [cm]	Gewicht [kg]	MLSS [W/kg]
Gesamt (n = 26)	25 \pm 4	182 \pm 5	79 \pm 8	3,1 \pm 0,7
AT (n = 13)	24 \pm 4	181 \pm 5	75 \pm 6	3,7 \pm 0,4
NAT (n = 13)	25 \pm 5	183 \pm 6	82 \pm 9	2,5 \pm 0,3

Bei zwei Probanden entsprach die erwartete Leistungsfähigkeit auf Grund der Angaben in der Anamnese nicht dem gemessenen MLSS, weshalb diese durch den Mediansplit der anderen Subgruppe, als eingangs erwartet, zugeordnet wurden. Die anthropometrischen Daten und das MLSS der Probanden und der Subgruppen werden in Tabelle 6 dargestellt.

2.2.2.2 Variablenstichprobe

Im Folgenden werden die Hauptzielparameter der Studie sowie die angewendeten Mess- und Auswertungsverfahren detailliert erläutert.

Hauptzielparameter

Die Hauptzielparameter der Studie waren die Leistung am MLSS, sowie die Leistung an der zweiten bzw. anaeroben Laktatschwelle, die nach den Methoden von Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und 4-mmol bestimmt wurden.

Das maximale Laktat-Steady-State

Das MLSS ist definiert als die Intensität bei einer konstanten Dauerbelastung über 30 Minuten, bei der es zwischen der 10. und 30. Minute zu keinem größeren Anstieg als 1,0 mmol/l in der Blutlaktatkonzentration kommt (Beneke, 2003; Beneke et al., 2011) (Abbildung 3).

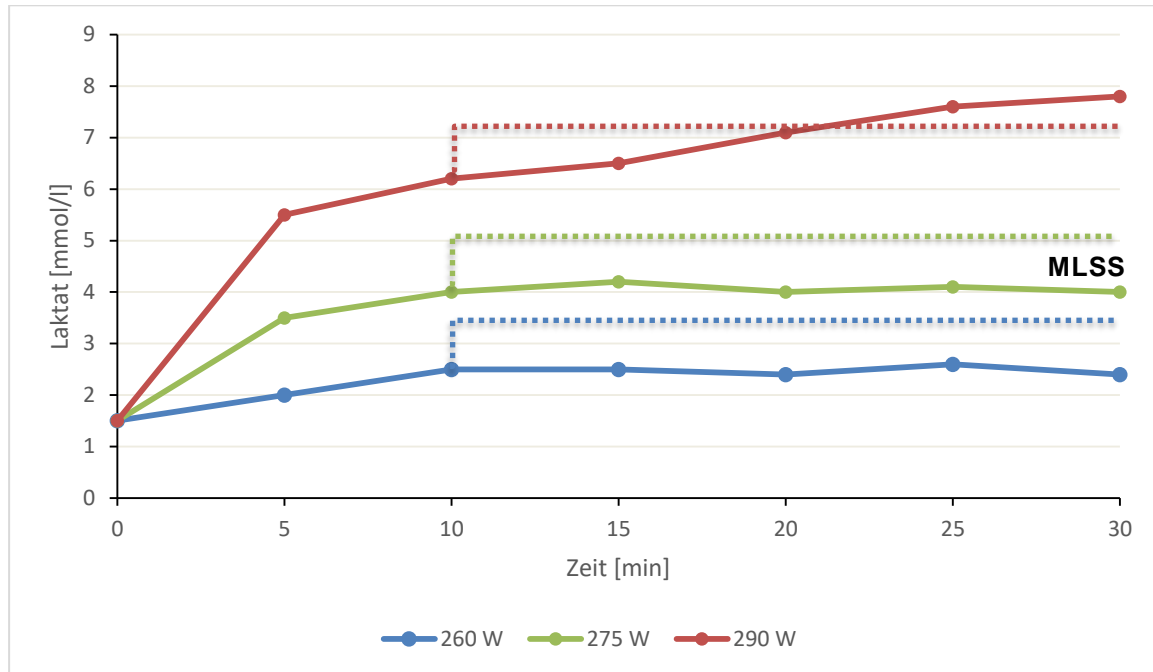


Abbildung 3: Beispiel für die Bestimmung des maximalen Laktat-Steady-States (MLSS) mittels dreier Dauertests.

Stegmann-Schwelle

Die Stegmann-Schwelle (IAS, Abbildung 4) wurde aus einem stufenförmig ansteigenden Belastungsprotokoll des Eingangstests bestimmt. Sie entspricht dem zweiten Punkt einer Tangenten, die ihren ersten Punkt in der Laktatkonzentration in der Nachbelastungsphase hat, die der Konzentration bei Abbruch der Belastung entspricht (Stegmann et al., 1981). Die Auswertung erfolgte dabei computerunterstützt mit der „Ergometrie“-Software von H. Heck (Bochum, Germany).

Dickhuth-Schwelle

Die Dickhuth-Schwelle (+1,5 mmol) ist definiert als die Belastung, aus einem stufenförmig ansteigenden Protokoll, entsprechend einer Laktatkonzentration des Basislaktats plus 1,5 mmol/l (Dickhuth et al., 1991). Das Basislaktat ist dabei definiert als die geringste Laktatkonzentration unter Belastung. Die Auswertung erfolgte zeichnerisch anhand der zuvor mit der „Ergometrie“-Software von H. Heck (Bochum, Germany) erstellten Laktatleistungskurve (Abbildung 5).

D_{max} -Methode

Bei der D_{max} -Methode (D_{max}) zur Bestimmung der anaeroben Schwelle wird zwischen den gemessenen Blutlaktatkonzentrationen zu Beginn und bei Abbruch der Belastung eine Gerade gelegt. Der Punkt auf der Laktatleistungskurve, der im rechten Winkel zu dieser Geraden den größten Abstand aufweist, ist als Schwelle nach D_{max} definiert (Cheng et al., 1992). Die Auswertung erfolgte dabei zeichnerisch aus der vorher mit der „Ergometrie“-Software von H. Heck (Bochum, Germany) erstellten Laktatleistungskurve (Abbildung 6).

4-mmol-Schwelle

Die 4-mmol-Schwelle (4-mmol) entspricht der in einem stufenförmigen ansteigenden Belastungsprotokoll erreichten Intensität bei einer Blutlaktatkonzentration von 4 mmol/l. Die Auswertung erfolgte dabei computerunterstützt mit Hilfe der „Ergometrie“-Software von H. Heck (Bochum, Germany) (Abbildung 7).

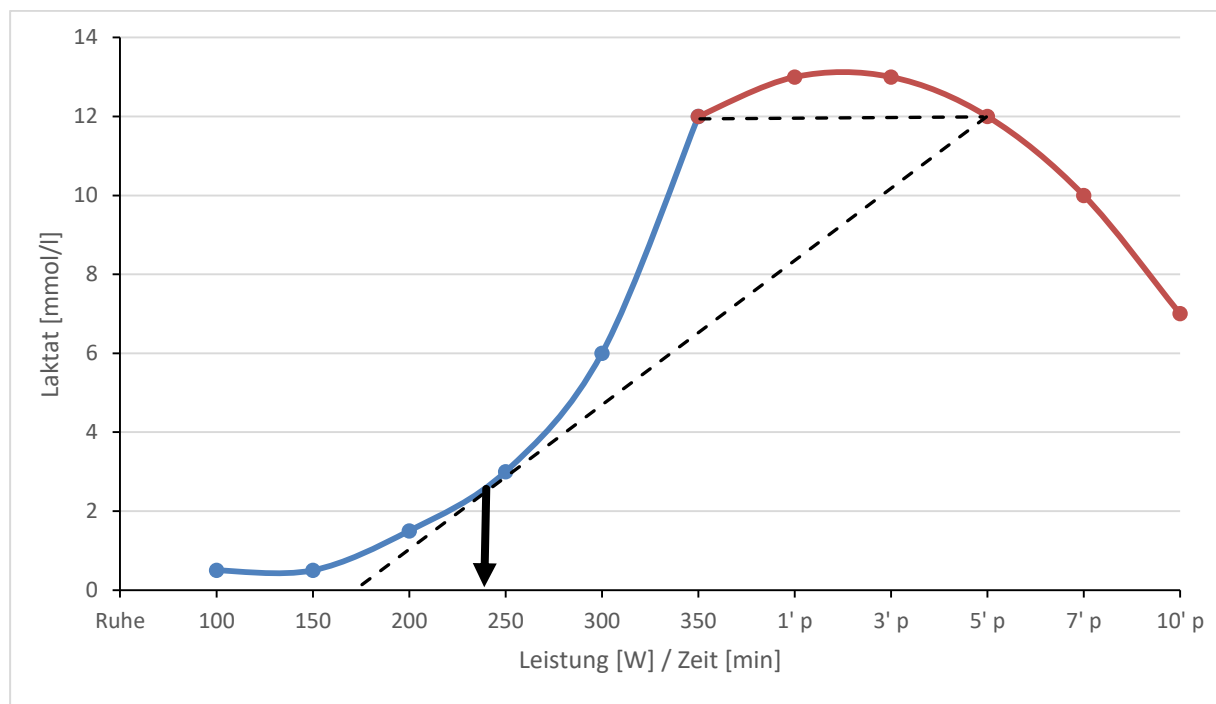


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Bestimmung der Stegmann-Schwelle.

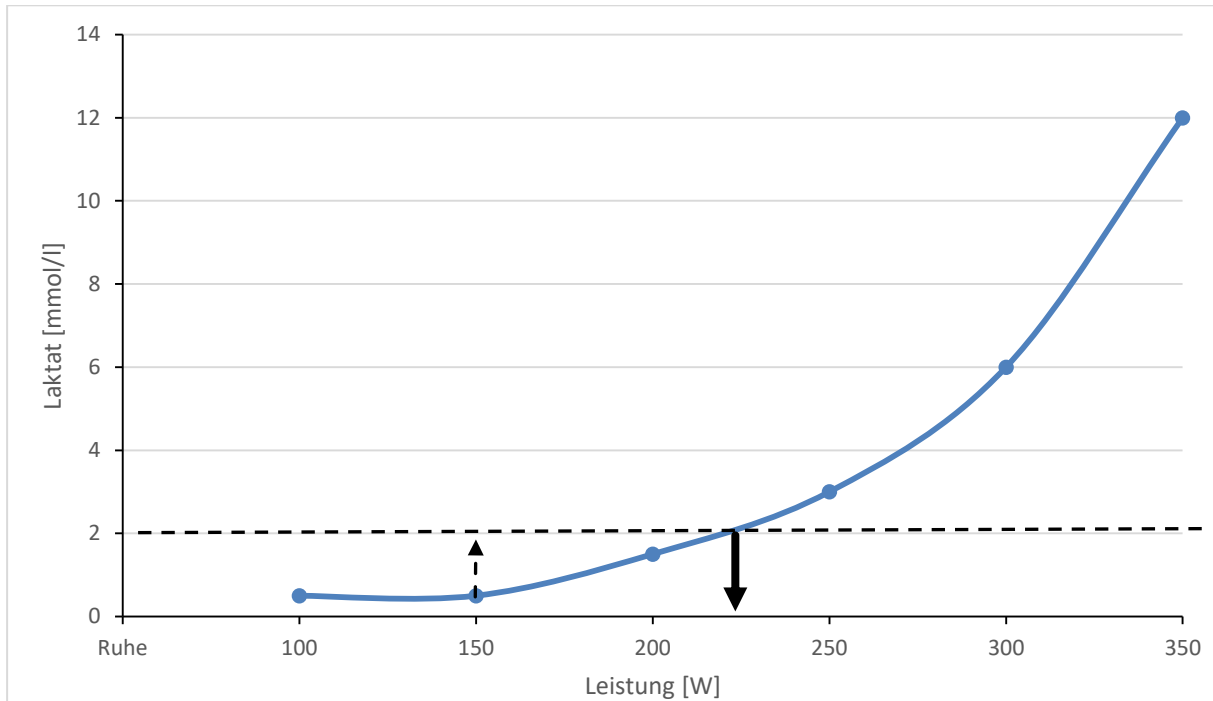


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Bestimmung der Dickhuth-Schwelle.

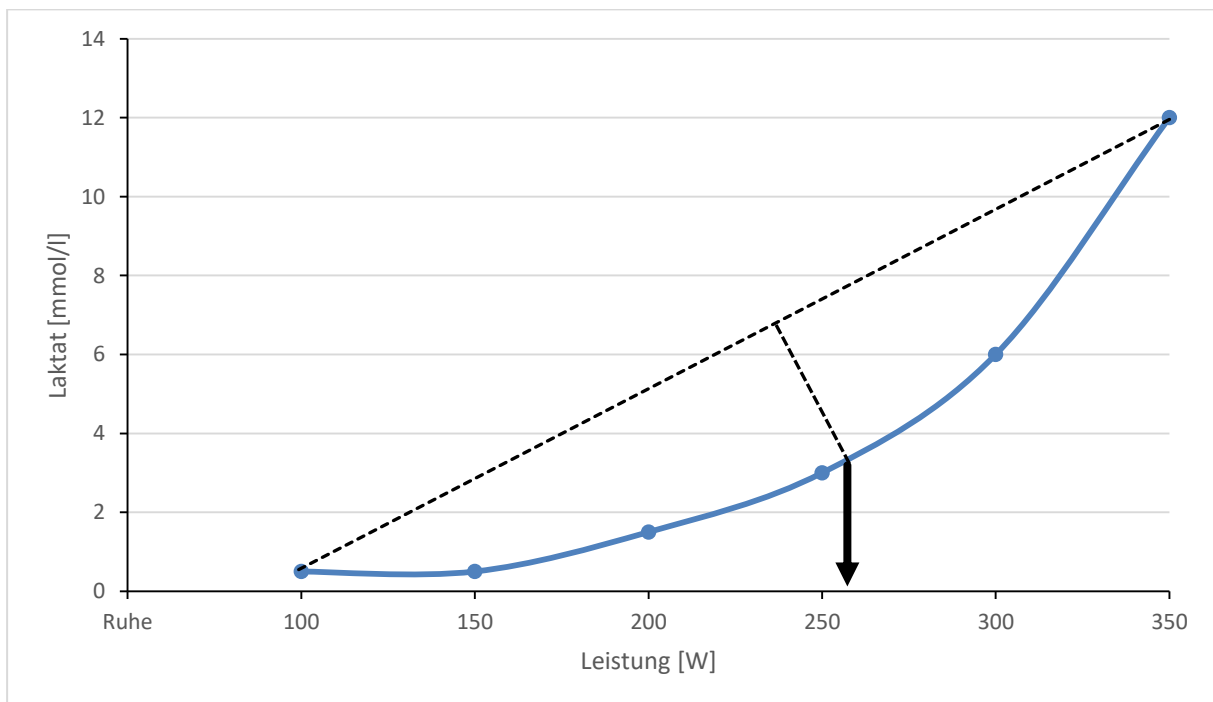


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Bestimmung der D_{max} -Schwelle.

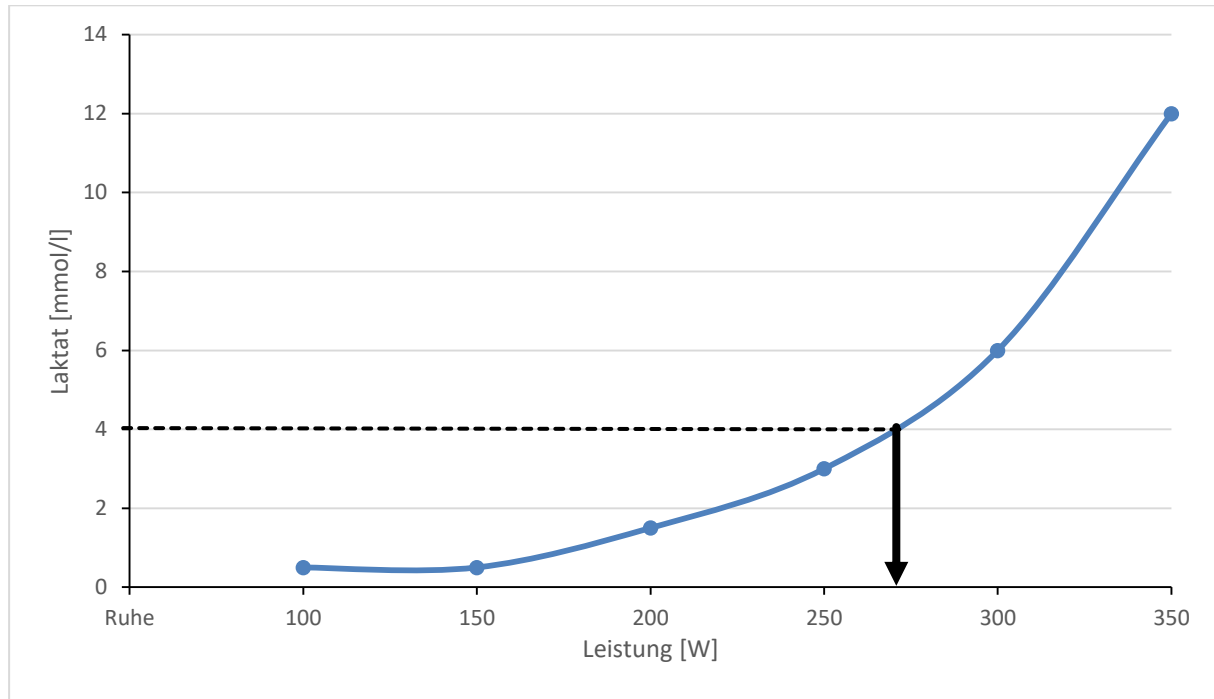


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Bestimmung der 4-mmol-Schwelle.

Laktatbestimmung

Für die Laktatbestimmung wurde das Ohrläppchen mit Finalgon® hyperämisiert, desinfiziert und mit einer Lanzette angestochen. Anschließend wurde mit einer 20 µl End-to-End-Kapillare etwas Blut entnommen und die Kapillare wurde in einem Töpfchen mit 1 ml Hämolyselösung gelöst. Aus der Lösung wurde dann im Labor des Instituts für Sport- und Präventivmedizin enzymatisch-amperimetrisch die Blutlaktatkonzentration analysiert (Super GL, Fa. Rolf Greiner Biochemica, Flacht, Deutschland).

Anthropometrische Daten

Die Körpergröße wurde mittels Zollstock und Geodreieck gemessen. Für das Messen des Körpergewichts wurde eine handelsübliche Personenwaage benutzt.

2.2.2.3 Ablauf der Gesamtuntersuchung

Alle Probanden absolvierten zunächst einen fahrradergometrischen Stufentest (Start: 100 oder 150 W, Steigerung um 50 W alle 3 min). In Ruhe, am Ende jeder Stufe, bei Abbruch sowie eine, drei, fünf, sieben und zehn Minuten nach Abbruch der Belastung wurde aus dem Ohrläppchen eine kapillare Blutprobe zur Bestimmung der Blutlaktatkonzentration entnommen.

Es folgte die Bestimmung der Schwellen nach Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und der 4-mmol-Methode. Anhand des Mittelwerts der vier Konzepte wurde die Belastung für den ersten Dauertest festgelegt. Es folgte im Abstand von mindestens zwei Tagen nach dem Stufentest der erste Dauertest. Während des Dauertests wurden bis zur zehnten Minute alle zwei Minuten und ab der zehnten Minute alle fünf Minuten die Blutlaktatkonzentrationen gemessen. War der Anstieg zwischen der 10. und 30. Belastungsminute geringer als 1,0 mmol/l, wurde die Belastung zum nächsten Dauertest um 15 Watt erhöht. War der Anstieg höher, wurde die Leistung entsprechend um 15 Watt reduziert. Die auf diese Art gefundene Belastung, bei der es nicht mehr zu einem Anstieg von mehr als 1,0 mmol/l zwischen der 10. und 30. Belastungsminute kam, wohingegen dies bei einer 15 Watt höheren Dauerbelastung der Fall war, wurde als das MLSS definiert. Bis zur Bestimmung des MLSS erfolgten in der Regel drei bis vier Dauertests innerhalb von maximal 21 Tagen. Alle Tests wurden dabei auf einem einheitlichen Fahrradergometer, dem „Excalibur Sport“ der Firma Lode (Groningen, Niederlande) durchgeführt.

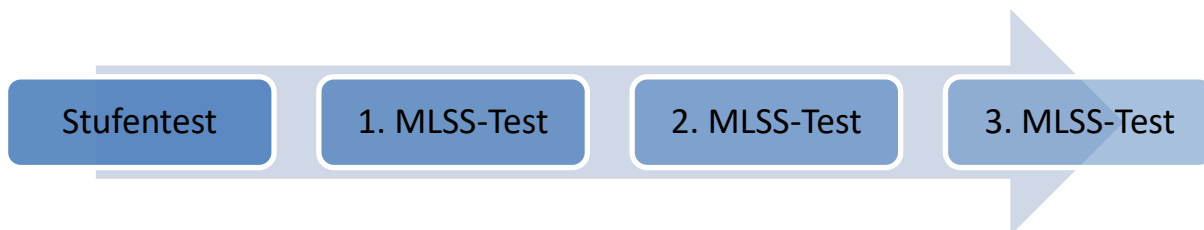


Abbildung 8: Studienablauf der ersten Studie.

2.2.3 Statistische Hypothese

Für die weitere Untersuchung wird die Arbeitshypothese in zwei statistische Hypothesen umgewandelt:

H1: Es gibt einen signifikanten, perfekten ($r > 0,9$), linearen Zusammenhang zwischen dem MLSS und den Laktatschwellenmodellen nach Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und 4-mmol.

H2: Die Laktatschwellenkonzepte schätzen das MLSS für 95 % der Probanden genau (≤ 30 W) ab.

2.2.4 Statistik

Alle Berechnungen, Ergebnisse und Abbildungen wurden mit der Computersoftware Statistica (Version 8) oder mit Microsoft Office Excel (2013) erstellt.

Deskriptiv werden Daten sowohl als Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD), als auch als mittlere Differenzen (MD) und 95 %-Konfidenzintervalle als „Limits of Agreements“ (LoA) dargestellt.

Deskriptiv wird die Anzahl der Probanden, deren Laktatschwelle das MLSS sehr genau (≤ 15 W), genau (≤ 30 W) und ausreichend (≤ 35 W) abschätzen, dargestellt. Mittels Chi-Quadrat-Test wurde auf Unterschiede in der Verteilung getestet.

Außerdem wurden Bland-Altman-Plots erstellt, um eine graphische Differenz zwischen dem jeweiligen Laktatschwellenmodell und der maximalen Leistung im Stufentest (P_{\max}) zum MLSS darzustellen. Zusätzlich wurden die jeweiligen LoA eingezeichnet (Atkinson & Nevill, 1998; Bland & Altman, 1986, 1995; Hopkins, 2000).

Lineare Zusammenhänge zwischen dem MLSS und dem jeweiligen Schwellenkonzept wurden mittels Pearsons-Produkt-Moment-Korrelation berechnet und als Korrelationskoeffizient (r) angegeben. Zur Interpretation des Korrelationskoeffizienten dient die nachfolgende Übersicht (Hopkins, Marshall, Batterham, & Hanin, 2009):

$0,0 < r \leq 0,1$	sehr niedriger Zusammenhang
$0,1 < r \leq 0,3$	niedriger Zusammenhang
$0,3 < r \leq 0,5$	mittlerer Zusammenhang
$0,5 < r \leq 0,7$	hoher Zusammenhang
$0,7 < r \leq 0,9$	sehr hoher Zusammenhang
$0,9 < r \leq 1$	perfekter Zusammenhang

Mittels t-Test für abhängige Stichproben wurde auf Unterschiede zwischen dem MLSS und den Schwellen getestet. Die Berechnung der Teststärke ($\alpha = 0,05$) erfolgte post-hoc als Powerkalkulation mittels G*Power (Version 3.1.9.2).

Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

2.3 Ergebnisse

Im Mittel lag das MLSS bei 242 ± 41 W, die IAS nach Stegmann bei 238 ± 46 W, die Dickhuth-Schwelle bei 231 ± 50 W, die D_{\max} -Schwelle bei 245 ± 41 , die 4-mmol-Schwelle bei 260 ± 56 W und die P_{\max} bei 348 ± 49 W (Tabelle 8).

Tabelle 7: Mittlere maximale Beanspruchungsparameter (Herzfrequenz [HF], Blutlaktatkonzentration [BLa] und respiratorischer Quotient [RQ]) aus dem Stufentest ($n = 26$; Alter: 25 ± 4 J).

	HF _{max} [/min]	BLa _{max} [mmol/l]	RQ _{max}
Alle Probanden	188 ± 9	12,3 ± 1,9	1,17 ± 0,06
AT (n = 13)	190 ± 8	12,1 ± 2,3	1,16 ± 0,07
NAT (n = 13)	185 ± 9	12,6 ± 1,4	1,18 ± 0,06

Die mittleren maximalen Beanspruchungsparameter sind in Tabelle 7 dargestellt. Alle 26 Probanden erfüllten mindestens zwei der drei Ausbelastungskriterien (Meyer, Scharhag, et al., 2005):

- maximale Laktatkonzentration (BLa_{max}) über 8 mmol/l,
- maximale Herzfrequenz (HF_{max}) über 200 minus Lebensalter [J],
- maximaler respiratorischer Quotient (RQ_{max}) von über 1,10.

Tabelle 8: Mittelwerte des maximalen Laktat-Steady-States (MLSS), der maximalen Leistung im Stufentest (P_{max}) und der Schwellenkonzepte, sowie Korrelation und mittlerer Unterschied zum MLSS (* $p < 0,05$; $n = 26$).

	MW ± SD [W]	Min - Max [W]	Korrelation zum MLSS	t-Test [p]	Power [1-β]
MLSS	242 ± 41	146 - 315			
Stegmann	238 ± 46	147 - 333	$r = 0,94^*$	0,24	0,34
Dickhuth	231 ± 50	125 - 323	$r = 0,91^*$	0,01	-
D_{max}	245 ± 41	170 - 335	$r = 0,92^*$	0,45	0,23
4-mmol	260 ± 56	150 - 315	$r = 0,93^*$	0,001	-
P_{max}	348 ± 49	242 - 442	$r = 0,97^*$	< 0,001	-

Es zeigt sich eine signifikante Korrelation zwischen der Stegmann-Schwelle und dem MLSS mit einem $r = 0,94$ (Tabelle 8, Abbildung 9). Dabei unterscheiden sich die Stegmann-Schwelle und das MLSS mit einer mittleren Differenz von -4 ± 32 Watt. Die LoA liegen bei 13 %. Auf die beiden Subgruppen aufgegliedert liegt der Unterschied für AT bei 1 ± 37 Watt, respektive 14 % für die LoA und für NAT bei -8 ± 25 Watt, respektive 12 % für die LoA (Tabelle 9, Abbildung 11).

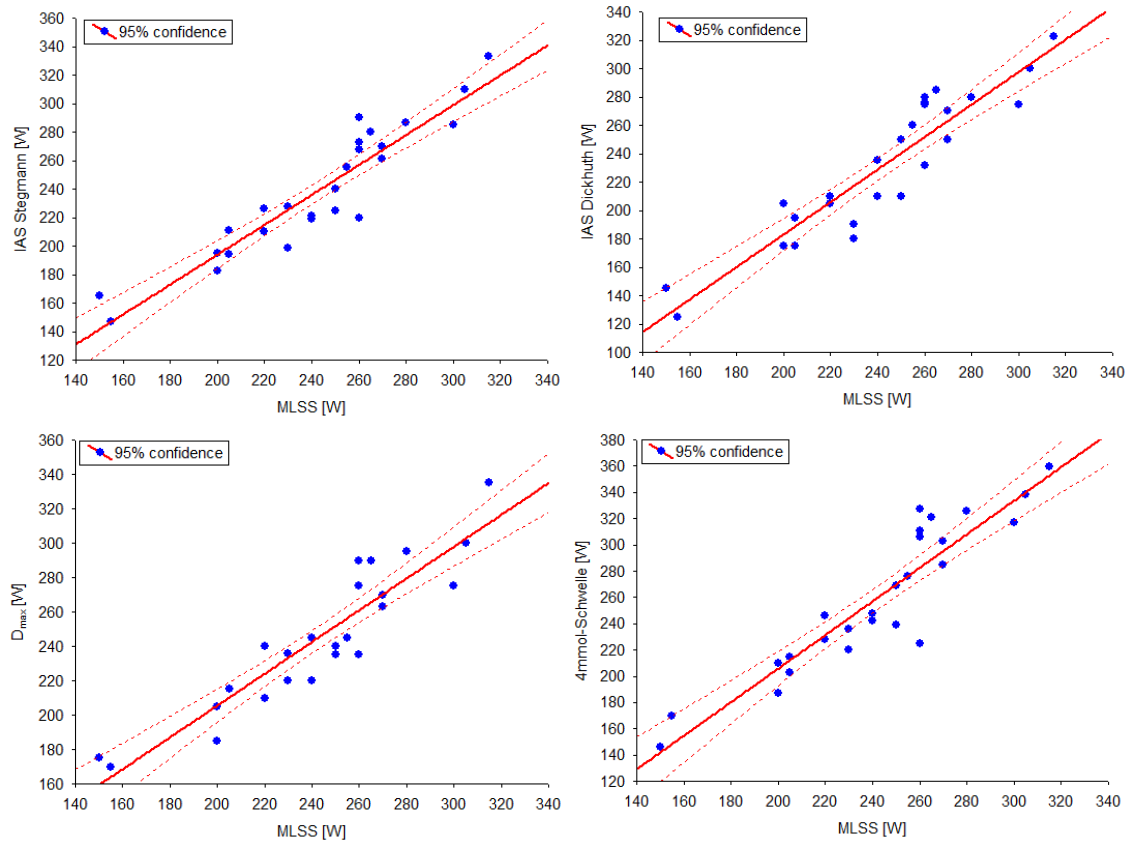


Abbildung 9: Korrelationen der Stegmann-, Dickhuth-, 4-mmol- und D_{max} -Schwelle zum MLSS (im Uhrzeigersinn; $n = 26$).

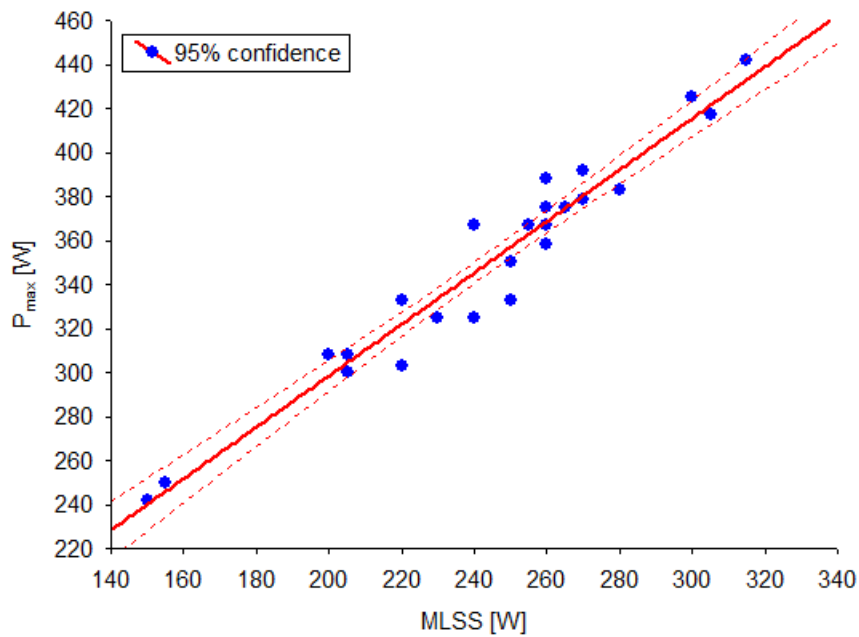


Abbildung 10: Korrelation der maximalen Leistung (P_{max}) zum MLSS ($n = 26$).

Zwischen dem MLSS und der Dickhuth-Schwelle wurde eine signifikante Korrelation mit einem $r = 0,91$ gefunden (Abbildung 9), das Schwellenkonzept nach Dickhuth und das MLSS unterscheiden sich mit einer mittleren Differenz von -4 ± 32 Watt. Die LoA liegen bei 13 %. Dieser Unterschied liegt bei der Subgruppe AT bei -3 ± 39 Watt, respektive 14 % für die LoA und bei der Subgruppe NAT bei -19 ± 33 Watt, respektive 16 % für die LoA (Tabelle 9, Abbildung 11).

Die D_{max} -Schwelle und das MLSS unterscheiden sich mit einer mittleren Differenz von 3 ± 32 Watt. Die LoA liegen auch hier bei 13 % (Tabelle 9, Abbildung 11). Bei AT beträgt der Unterschied 3 ± 36 Watt, respektive 15 % für die LoA und bei NAT 2 ± 28 Watt, respektive 13 % für die LoA. Die Korrelation zwischen D_{max} und MLSS war dabei mit einem $r = 0,92$ signifikant (Tabelle 9, Abbildung 11).

Die fixe 4-mmol-Schwelle und das MLSS unterscheiden sich mit einer mittleren Differenz von 18 ± 48 Watt. Die LoA liegen bei 20 %. Dieser Unterschied liegt bei der Subgruppe AT bei 30 ± 45 Watt, respektive 17 % für die LoA und für die Subgruppe NAT bei 6 ± 22 Watt, respektive 10 % für die LoA (Tabelle 9, Abbildung 11). Auch hier zeigt sich zwischen der 4-mmol-Schwelle und dem MLSS mit einem $r = 0,93$ eine signifikante Korrelation (Tabelle 8, Abbildung 9).

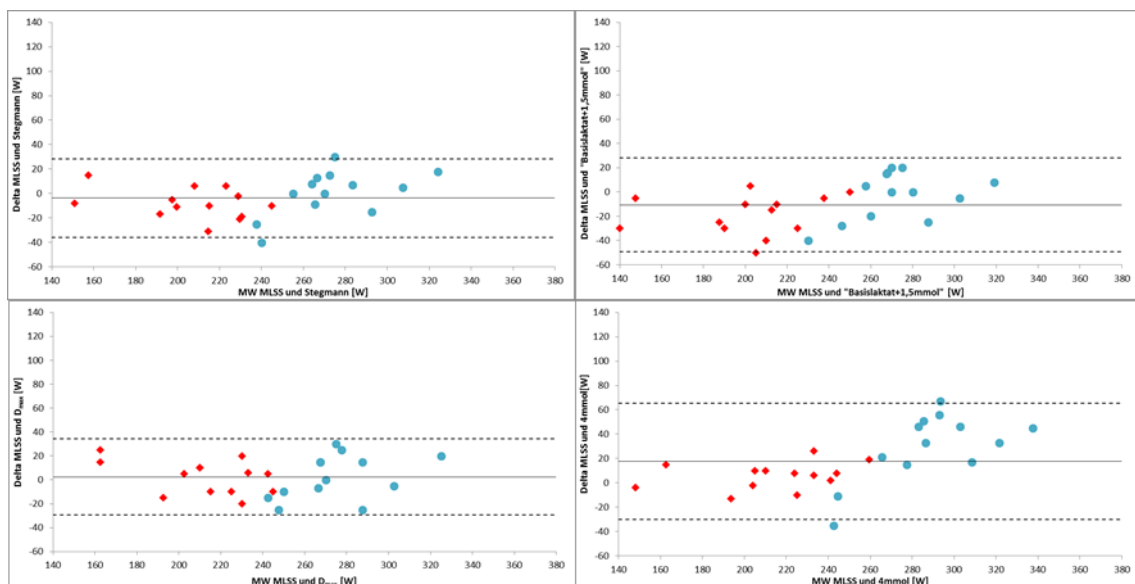


Abbildung 11: Bland-Altman-Plots zum Unterschied des maximalen Laktat-Steady-States (MLSS) vs. Stegmann, Dickhuth, 4-mmol und D_{max} (im Uhrzeigersinn; rotes Karo = Nichtausdauertrainierte ($n = 13$), blauer Punkt = Ausdauertrainierte ($n = 13$)).

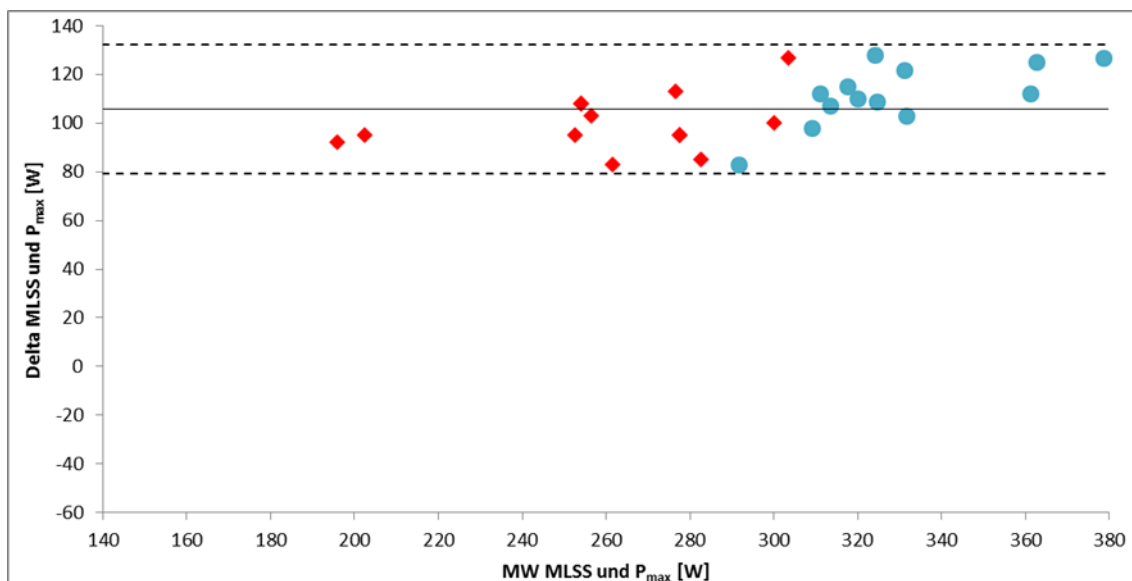


Abbildung 12: Bland-Altman-Plot zum Unterschied des maximalen Laktat-Steady-States (MLSS) vs. P_{max} (rotes Karo = Nichtausdauertrainierte ($n = 13$), blauer Punkt = Ausdauertrainierte ($n = 13$)).

Die mittleren Differenzen zwischen den Schwellenmodellen und dem MLSS liegen für die Subgruppen zwischen -8 und +30 Watt mit einer Streuung (LoA) zwischen 22 und 48 Watt, respektive 10 und 20 % (Tabelle 9).

Tabelle 9: Übersicht der mittleren Abweichungen (mittlere Differenzen [MD] \pm 95 %-Konfidenzintervalle [LoA]) der Laktatschwellenkonzepte und der maximalen Leistung im Stufentest (P_{max}) zum maximalen Laktat-Steady-State (MLSS) (1 = alle Probanden ($n = 26$), 2 = Ausdauertrainierte ($n = 13$), 3 = Nichtausdauertrainierte ($n = 13$)).

	Stegmann		Dickhuth		D_{max}		4-mmol		P_{max}	
	MD \pm LoA [W]	LoA [%]	MD \pm LoA [W]	LoA [%]	MD \pm LoA [W]	LoA [%]	MD \pm LoA [W]	LoA [%]	MD \pm LoA [W]	LoA [%]
1	-4 \pm 32	13	-11 \pm 38	16	3 \pm 32	13	18 \pm 48	20	106 \pm 26	11
2	1 \pm 37	14	-3 \pm 39	14	3 \pm 36	15	30 \pm 45	17	112 \pm 25	9
3	-8 \pm 25	12	-19 \pm 33	16	2 \pm 28	13	6 \pm 22	10	100 \pm 23	11

P_{max} und das MLSS unterscheiden sich mit einer mittleren Differenz von 106 \pm 26 Watt. Die LoA liegen bei 11 %. Dieser Unterschied liegt bei der Subgruppe AT bei 112 \pm 25

Watt, respektive 9 % für die LoA und für die Subgruppe NAT bei 100 ± 23 Watt, respektive 11 % für die LoA (Tabelle 9, Abbildung 12). Dabei zeigt sich zwischen P_{\max} und dem MLSS mit einem $r = 0,97$ eine signifikante Korrelation (Tabelle 8, Abbildung 10).

Tabelle 10: Anzahl der Probanden mit einer Abweichung von weniger als einer relevanten Trainingszone (45 W, ausreichend), weniger als der mittleren Jahresschwankung der Dauerleistungsfähigkeit (30 W, genau) und weniger als der Genauigkeit in der Bestimmung des MLSS (15 W, sehr genau) zwischen den Schwellen, der maximalen Leistung im Stufentest (P_{\max}) und P_{\max} minus der mittleren Differenz zwischen P_{\max} und dem MLSS (106 W) zum MLSS ($n = 26$).

	Δ MLSS > 45 W [n]	45 W \geq Δ MLSS > 30 W [n]	30 W \geq Δ MLSS > 15 W [n]	15 W $\geq \Delta$ MLSS [n]
Stegmann	0	2	6	18
Dickhuth	1	5	7	13
D_{max}	0	0	8	18
4-mmol	6	3	4	13
P_{max}	26	0	0	0
P_{max} – 106 W	0	0	9	17

Tabelle 10 zeigt die jeweilige Anzahl der Probanden mit einer Abweichung von weniger als einer relevanten Trainingszone (± 45 W), weniger als der mittleren Jahresschwankung der Dauerleistungsfähigkeit (± 30 W) und weniger als der Genauigkeit in der Abschätzung des MLSS (± 15 W).

Der Chi-Quadrat-Test zeigt kein signifikantes Ergebnis ($p = 0,16$) für die Verteilung ober- und unterhalb einer sehr genauen Abweichung (± 15 W) im Vergleich der individuellen (Stegmann und D_{max}) mit den (halb)fixen (Dickhuth und 4-mmol) Schwellen. Dagegen lässt sich ein signifikanter Unterschied ($p < 0,001$) in der Verteilung ober- und unterhalb einer genauen Abweichung (± 30 W) zwischen D_{max} und 4-mmol feststellen.

Tabelle 11a und 12b: Verteilung der Probanden zur Berechnung des Chi-Quadrat-Tests für eine sehr genaue Abschätzung (± 15 W) des MLSS zwischen den fixen und individuellen Schwellenkonzepten und für eine genaue Abschätzung (± 30 W) für die P_{max} minus 106 W bzw. D_{max} und 4-mmol ($n = 26$).

$\chi^2 = 2,00$ $p = 0,16$	Δ MLSS > 15 W [n]	Δ MLSS ≤ 15 W [n]	$\chi^2 = 10,9$ $p < 0,001$	Δ MLSS > 30 W [n]	Δ MLSS ≤ 30 W [n]
Dickhuth oder 4-mmol	13	13	D_{max} $P_{max} - 106$ W	0	26
Stegmann oder D_{max}	8	18	4-mmol	9	17

2.3.1 Hypothesenprüfung

H1: Es gibt einen signifikanten, perfekten ($r > 0,9$), linearen Zusammenhang zwischen dem MLSS und den Laktatschwellenmodellen nach Stegmann, Dickhuth, D_{max} und 4-mmol.

Die Hypothese 1 kann angenommen werden.

H2: Die Laktatschwellenkonzepte schätzen das MLSS für 95 % der Probanden genau (≤ 30 W) ab.

Die Hypothese 2 muss für die Schwellenkonzepte abgelehnt werden.

2.4 Diskussion

Das Ziel der Studie war es, die Laktatschwellenkonzepte nach Stegmann, Dickhuth, D_{max} und 4-mmol mit dem MLSS auf dem Fahrradergometer zu vergleichen. Da in einer Übersichtsarbeit gefordert wird, dass die Schwellenkonzepte mit dem MLSS mittels Bland-Altman-Plots und nicht nur mittels Berechnung des mittleren Unterschieds oder der mittleren Zusammenhänge verglichen werden sollten (Faude, Kindermann, et al., 2009), wurde dieses Verfahren in der vorliegenden Arbeit angewendet.

2.4.1 Ergebnisdiskussion

Zusammenhänge und Unterschiede zum MLSS

Die Ergebnisse in der präsentierten Studie weisen signifikante und hohe Korrelationen zwischen dem MLSS und allen vier verwendeten Schwellenkonzepten auf, was sich mit

dem Ergebnis anderer Studien deckt (Faude, Kindermann, et al., 2009). Dabei konnte für die Stegmann- und die D_{max} -Schwelle statistisch kein Unterschied zum MLSS gefunden werden, allerdings zeigt die Power-Kalkulation ($1 - \beta = 0,23$ bzw. $0,34$), dass womöglich die Anzahl der Probanden nicht ausreichend war, um dieses Ergebnis zu verallgemeinern. Allgemein wird für ein β ein viermal so hoher Wert wie für das Signifikanzniveau α vorgeschlagen. Wenn $\alpha = 5\%$ ist, dann sollte das β -Fehler-Niveau also 20% betragen. Liegt die β -Fehler-Wahrscheinlichkeit unter dieser 20% -Grenze, so ist die Teststärke ($1 - \beta$) damit größer als 80% , was notwendig ist, um einen Fehler zweiter Art auszuschließen (Faul, Erdfelder, Lang, & Buchner, 2007). Dies kann für die vorliegenden Daten nicht angenommen werden. Die 4-mmol- und Dickhuth-Schwelle unterschieden sich im Mittel vom MLSS. 4-mmol überschätzt im Mittel das MLSS, wohingegen Dickhuth das MLSS systematisch unterschätzt. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass auch die P_{max} , die als solche interpretiert werden darf, da die Probanden mindestens zwei von drei anerkannten Ausbelastungskriterien erfüllten (Meyer, Scharhag, et al., 2005), einen perfekten Zusammenhang ($r = 0,97$) zum MLSS hat. Erwartungsgemäß lag die P_{max} dabei höher als das MLSS.

Die mittleren Unterschiede zum MLSS liegen für die jeweiligen Schwellen aller Probanden zwischen einer Unterschätzung von 11 Watt bis zu einer Überschätzung von 18 Watt. Dabei weichen die individuellen Schwellenkonzepte nach Stegmann (AT: 1 W, NAT -8 W) und D_{max} (AT: 3 W, NAT: 2 W) unabhängig von der Leistungsfähigkeit der Probanden im Mittel gleich viel vom MLSS ab. Die fixe 4-mmol-Schwelle überschätzt vor allem AT (30 W) und weicht dafür im Mittel bei NAT wenig (6 W) vom MLSS ab. Das halbfixe Schwellenkonzept nach Dickhuth unterschätzt das MLSS von NAT (-19 W), weicht dafür im Mittel vom MLSS von AT (-3 W) nur gering ab. Die P_{max} liegt erwartungsgemäß im Mittel mit 105 W (AT: 112 W, NAT: 100 W) über dem MLSS.

Individuelle Analyse

Die LoA, die für 95% der Probanden angeben, um wieviel Watt oder Prozent ihre Schwelle vom MLSS abweicht und daher als Maß für die individuelle Genauigkeit dienen, liegen zwischen ± 32 W (Stegmann und D_{max}) und ± 40 W (4-mmol). Demzufolge kann keines der Schwellenkonzepte nach der einleitend festgelegten Kategorie das MLSS für 95% der Probanden genau (± 30 W) abschätzen. Lediglich für die Subgruppe NAT können die Stegmann- und 4-mmol-Schwelle das MLSS genau abschätzen (± 25 W und ± 22 W). Nach einer Korrektur um -106 W kann für die P_{max} gesagt werden, dass sie das MLSS genau abschätzt (± 26 W) und dazu nominell auch besser geeignet ist als die Schwellenkonzepte.

Festzuhalten ist, dass ausgehend von der Bland-Altman-Analyse die Schwellenkonzepte und die P_{\max} minus 106 W für 95 % der Probanden geeignet zu sein scheinen, um das MLSS genau bis ausreichend abzuschätzen. Um diese Vermutung näher zu überprüfen, wurde in Tabelle 10 deskriptiv die Anzahl der Probanden dargestellt, deren Schwellen und P_{\max} das MLSS nach den Kategorien ausreichend (± 45 W), genau (± 30 W) und sehr genau (± 15 W) abschätzen. Die Unterteilung in diese Kategorien lässt sich mit folgenden Klassifizierungen begründen: mit der praxisüblichen Genauigkeit der Bestimmung des MLSS per Dauertestests (± 15 W), der Jahresschwankung der Dauerleistungsfähigkeit von Radsportlern (± 30 W) und der Spannbreite eines Trainingsbereichs (± 45 W). Dieser Einteilung zufolge wird das MLSS durch je 18 von 26 individuellen Schwellen nach Stegmann und D_{\max} so präzise abgeschätzt, wie es üblicherweise durch Dauertests möglich wäre (≤ 15 W). Bei den fixen Modellen (Dickhuth und 4-mmol) ist dies lediglich für die Hälfte der 26 Probanden zutreffend. Dieser nominelle Unterschied konnte statistisch allerdings nicht nachgewiesen werden. Dies gelang hingegen dafür, dass mehr D_{\max} -Schwellen das MLSS genauer als 30 W abschätzen konnten, als 4-mmol-Schwellen. Betrachtet man die Verteilung der Anzahl der Schwellen, die das MLSS nach den Kategorien sehr genau, genau und ausreichend abschätzen können, so scheint die D_{\max} -Methode die genaueste zu sein. Denn sie schätzt gemeinsam mit dem Stegmann-Modell die meisten MLSS sehr genau (≤ 15 W; $n = 18$) und als einziges Modell alle MLSS genau ab (≤ 30 W, $n = 26$). Zu beachten bleibt dabei allerdings, dass die maximale Leistung im Stufentest (nach einem Abzug der systematischen Überschätzung von 106 W) das MLSS mit nur einer Abweichung ähnlich genau abschätzt wie die D_{\max} -Methode und nominell genauer als alle anderen Modelle.

Vergleich mit Hauser et al. (2013)

Vergleicht man die vorgefundenen Ergebnisse mit der einzigen anderen Arbeit, die sich ebenfalls mit dem Vergleich der Stegmann-, Dickhuth- und 4-mmol-Schwelle und dem MLSS mittels Bland-Altman-Plots bei Radfahrern beschäftigt hat (Hauser et al., 2014), so zeigen sich relevante Unterschiede. Zunächst fallen die Korrelationen in der vorgelegten Studie ($r = 0,91$ bis $0,94$) etwas höher aus als in der Arbeit von Hauser et al. (2013) ($r = 0,83$ bis $0,89$) und die mittleren Abweichungen sind etwas geringer (MD = -4 W bis 18 W) als bei Hauser et al. (MD = -37,4 W bis 12,4 W). Auch die 95 %-Konfidenzintervalle liegen nicht ganz so weit (32 bis 48 W) wie bei Hauser et al. (49 bis 57 W). Dennoch kann man sagen, dass sich die Ergebnisse der vorgelegten Arbeit und die der Arbeitsgruppe um Hauser et al. (2013) im Grundsatz nicht unterscheiden. Im Mittel gibt es hohe Korrelationen zwischen den Laktatschwellenkonzepten und dem

MLSS, allerdings können die Abweichungen in Einzelfällen für die Trainingspraxis erheblich sein.

Vergleicht man das Ergebnis der einzelnen Schwellenkonzepte beim Abschätzen des MLSS miteinander, so fällt auf, dass in der vorliegenden Arbeit die individuellen Konzepte nach Stegmann und D_{\max} den (halb)fixen Konzepten 4-mmol und Dickhuth überlegen sind. Dies deckt sich allerdings nicht mit dem Ergebnis der Arbeit von Hauser et al. und liegt womöglich an der Verwendung von unterschiedlichen Stufenprotokollen (+ 50 W / 3 min vs. + 40 Watt / 4 min). In der vorliegenden Studie wurde ein steileres Protokoll gewählt, was einen systematischen Einfluss auf die Laktatleistungskurve hat (Abbildung 13) und diese im Vergleich zu einem flacheren Protokoll insgesamt nach rechts verschiebt. Dass diese Verschiebung vor allem einen Einfluss auf die fixe 4-mmol-Schwelle hat, ist nachgewiesen (Heck, 1990; Heck, Hess, et al., 1985) und wird beim Vergleich der beiden Arbeiten bestätigt. Überschätzt die 4-mmol das MLSS in der hier vorliegenden Arbeit im Mittel erheblich (18 W), so unterschätzt sie es beim flacheren Protokoll in der Studie von Hauser et al. (2013) im Mittel sogar um 7 Watt. Ein weiterer Punkt, der dazu beitragen könnte, ist das im Mittel etwas schlechter ausdauertrainierte Probandenkollektiv in der Arbeit von Hauser et al. (2013) (MLSS: 242 W vs. 221 W). Durch diese beiden Faktoren kommt es auch zum unterschiedlichen Ergebnis für die Dickhuth-Schwelle. Während diese in der vorliegenden Arbeit das MLSS im Mittel nur um 11 Watt unterschätzt, so unterschätzt sie es in der Arbeit von Hauser et al. im Mittel um 37 Watt. Dies liegt im Vergleich zu der vorliegenden Arbeit zum einen an der durch das flachere Testprotokoll nach links verschobenen Laktatleistungskurve, die auch eine Linksverschiebung der (halb)fixen Schwellen zur Folge hat (Abbildung 13) und zum anderen am etwas untrainierteren Probandengut. Dass das Ausdauernde der Probanden einen erheblichen Einfluss auf das unterschiedliche Ergebnis für diese (halb)fixen Schwellenkonzepte hat, unterstützt das Ergebnis der vorliegenden Arbeit. Denn die 4-mmol-Schwelle überschätzt im Mittel das MLSS für AT, wohingegen sie es für NAT sehr genau trifft. Die Dickhuth-Schwelle unterschätzt das MLSS systematisch für NAT, wohingegen sie es für AT sehr genau trifft.

Vergleicht man das Ergebnis der Stegmann-Schwelle, sind die Unterschiede zwischen den beiden Arbeiten im Mittel deutlich. In der vorliegenden Arbeit wird das MLSS im Mittel um 4 Watt unterschätzt und bei Hauser et al. (2013) wird es im Mittel um 12 Watt überschätzt. Auch dies liegt in dem unterschiedlichen Stufenprotokoll begründet und deckt sich mit der bisherigen Studienlage (Abbildung 13). Denn im Gegensatz zu den (halb)fixen Laktatschwellen, bei denen die Leistung bei steileren Belastungsprotokollen

höher liegt, verhält sich die Stegmann-Schwelle umgekehrt und liegt bei einem steileren Belastungsprotokoll tiefer (Heck & Beneke, 2008). Dies könnte an einer geringeren maximalen Laktatkonzentration und einem dementsprechend geringeren Überhang bei längeren Belastungstests liegen. Das hätte wiederum eine steilere Tangente an die LLLK und damit eine höhere Stegmann-Schwelle zur Folge. Eine höhere maximale Laktatkonzentration führt hingegen zu einem größeren Überhang in der Nachbelastung, was eine flachere Tangente und dementsprechend eine tiefere Stegmann-Schwelle zur Folge hat. Die unterschiedlich hohen maximalen Laktatkonzentrationen liegen in den unterschiedlich hohen maximal erreichten Intensitäten und dementsprechenden Rekrutierung von Typ II-Fasern begründet.

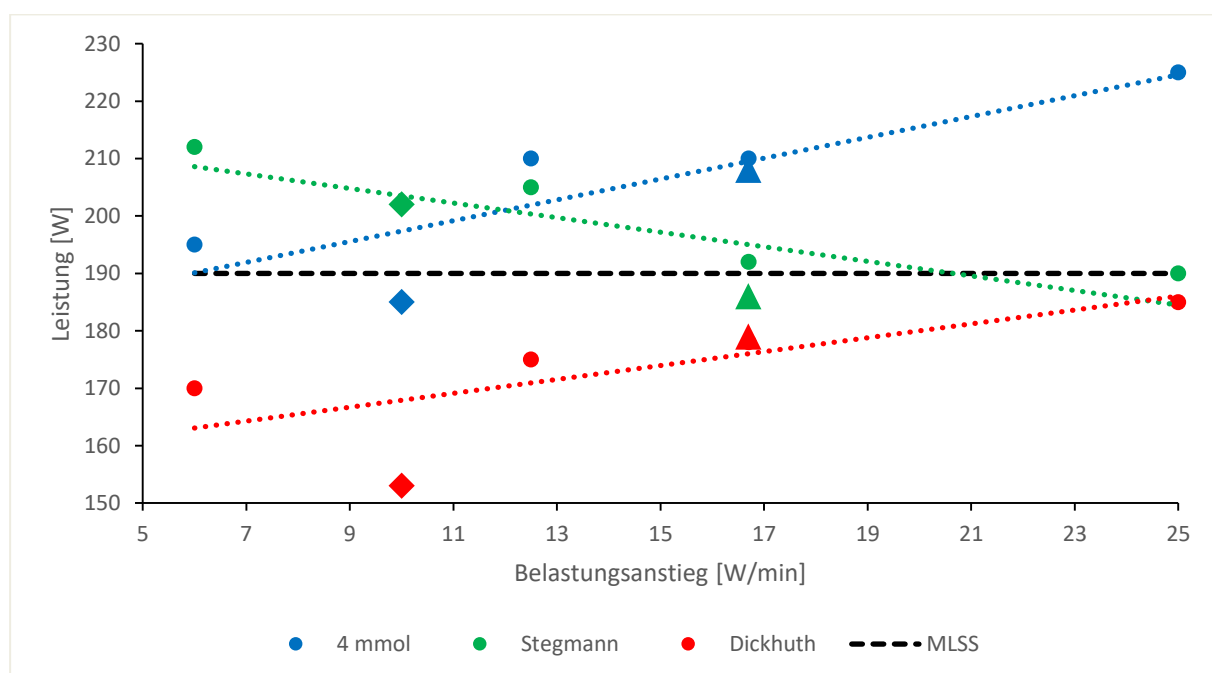


Abbildung 13: Mittelwerte verschiedener Laktatschwellenkonzepte in Abhängigkeit vom Belastungsanstieg und im Vergleich zum maximalen Laktat-Steady-State (MLSS), modifiziert nach Heck & Beneke (2008) (Punkte) mit eigenen Daten (Dreiecke) und den Daten aus Hauser et al. (2013) (Karos).

Die vorliegende Arbeit ist die erste, die sich mit der interindividuellen Streuung beim Vergleich des MLSS und der D_{\max} -Methode beschäftigt und so ist ein Vergleich mit den Ergebnissen aus anderen Studien nicht möglich. Da D_{\max} bei einem kompletten Verzicht auf Laktatentnahmen in der Nachbelastungsphase beim Abschätzen des MLSS zu einem nominell ähnlichen Ergebnis ($MD \pm LoA: 3 \pm 32$ W) wie die Stegmann-Schwelle ($MD \pm LoA: -4 \pm 32$ W) kommt, kann man für die vorliegende Arbeit sagen, dass die

D_{\max} -Methode der Sieger im „Preis-Leistungs-Verhältnis“ unter den Laktatschwellenkonzepten ist.

Vergleicht man die 95 %-Konfidenzintervalle zwischen der vorliegenden Arbeit und der von Hauser et al. (2013), so ist der Unterschied für die (halb)fixen Schwellenkonzepte wenig überraschend und für die 4-mmol-Schwelle sogar annähernd gleich. Da die Streuung unabhängig von systematischen Fehlern (Probanden und Stufendesign) ist, ist dieses Ergebnis erwartungsgemäß und zeigt die einfache und fehlerunanfällige Bestimmung der (halb)fixen Schwellenkonzepte. Dagegen weist die Streuung für die Stegmann-Schwelle zwischen den beiden Arbeiten einen erheblichen Unterschied auf: Während in der vorliegenden Arbeit die 95 %-Konfidenzintervalle bei 32 Watt liegen, sind sie in jener von Hauser et al. (2013) mit 57 Watt fast doppelt so weit. Diese große Streuung kann mehrere Gründe haben, wie zum Beispiel die unterschiedliche Genauigkeit der Abnahme bzw. der Zeitpunkte der Abnahme des Abbruchlaktats oder unterschiedliche Personen, die die Stegmann-Schwelle bestimmt haben (Faude, Kindermann, et al., 2009). Der letzte Punkt scheint am wahrscheinlichsten, da die Expertise zur Bestimmung der Stegmann-Schwelle in Saarbrücken im Vergleich zu Chemnitz durchaus als höher angesehen werden kann. Insgesamt lässt sich resümieren, dass die Bestimmung des MLSS durch die Stegmann-Schwelle fehleranfälliger ist, als die durch die (halb)fixen Laktatschwellen und es relativ viel Übung erfordert, die Stegmann-Schwelle zuverlässig zu bestimmen.

Basierend auf der großen Streuung von bis zu 57 Watt stellen Hauser et al. (2013) in ihrer Arbeit die Fähigkeit von Laktatschwellenkonzepten, sinnvolle Empfehlungen für ein Ausdauertraining ableiten zu können, in Frage. Dieser Rückschluss scheint jedoch nicht gerechtfertigt zu sein, wenn man das Ergebnis der vorliegenden Arbeit betrachtet. Denn bei der vorliegenden Arbeit wurde eine nicht einmal halb so große Streuung festgestellt. Dennoch kann es für wenige Einzelfälle bedeuten, dass die abgeleiteten Trainingsempfehlungen genau eine Trainingszone ($\pm 15\%$) daneben liegen (Allen & Coggan, 2012; Friel, 2012). Dies konnte in der vorliegenden Arbeit für sechs Probanden durch die 4-mmol- und einen Probanden durch die Dickhuth-Schwelle nachgewiesen werden. In Folge einer derartigen „Fehleinschätzung“ würde es langfristig zu einer Über- oder Unterforderung im Trainingsprozess kommen. Selbst wenn in der vorgelegten Arbeit 45 W als „Cut-off-Wert“ herangezogen wurde, wird dieser Übergang nicht „schwarz-weiß“, sondern fließend sein. Auch durch Schwellen, die um 30 - 45 W (10 - 15 %) abweichen, kann es zu über- oder unterfordernden Trainingsreizen kommen.

Weitere Überlegungen und praktische Empfehlungen

Ausgehend von den vorstehenden Überlegungen sollte im absoluten Hochleistungssport, in dem im Trainingsprozess eine hohe Genauigkeit gefordert ist, in jedem Fall im Anschluss an eine solche Ausdauerdiagnostik eine Trainingskontrolle erfolgen. Im Breiten- und Gesundheitssport, in dem die Ansteuerung der empfohlenen Trainingsbereiche nicht so wichtig ist, scheint eine MLSS-Kontrolle höchstens in Einzelfällen notwendig.

Durch Trainingsstudien konnte bestätigt werden, dass eine Verbesserung in der Wettkampfleistung mit einer Verbesserung der Laktatschwelle korreliert (Nicholson & Sleivert, 2001; Tanaka et al., 1984). Es bleibt die Frage offen, ob ein Training nach dem Konzept des MLSS einem anderen Ausdauertraining überlegen ist. Da noch weitere Einflussfaktoren, wie zum Beispiel neuromuskuläre, biomechanische, muskeltraumatische, thermoregulatorische oder auch psychologische, eine Rolle bei der Erbringung einer Ausdauerleistung spielen (Abbiss & Laursen, 2005), wäre auch ein anderer, nicht metabolischer Trainingsansatz denkbar.

Die Klärung dieser Frage ist nur mit Hilfe einer Trainingsstudie an entsprechend trainierten Radsportlern möglich. Dieses Probandengut wäre deshalb erforderlich, da Trainingsadaptationen vom Ausdauerniveau abhängig sind. Vor dem Hintergrund individueller Unterschiede in der Trainingsadaptation und realisierbarer Fallzahlen sollte dabei ein randomisiertes Cross-Over-Design gewählt werden. Um entsprechende Veränderungen der Ausdauerleistungsfähigkeit zu dokumentieren, müsste die Dauer der Trainingsphasen mindestens vier, besser zwölf Wochen betragen. Die Dauer der Auswaschphase sollte zumindest gleich lang sein. Aus diesen Charakteristika (Untersuchung an Wettkampfsportlern, Dauer bis zu zwölf Wochen, Bedeutung gleicher Baselinebedingungen im Cross-Over-Design) ergibt sich bereits, dass die beiden Trainingsphasen wohl kaum innerhalb einer Wettkampfsaison durchgeführt werden können. Da Wettkämpfe während der Trainingsphase ausgeschlossen sind und das Ausdauerniveau zu Studienbeginn intraindividuell ähnlich sein sollte, wäre für trainierte Radsportler nur die Vorbereitungsphase der Saison (November bis März) denkbar. Die Trainingsinhalte beider Bedingungen (Steuerung nach MLSS und Alternative z. B. Steuerung an EMG-basierten Parametern oder der Körperkerntemperatur) sollten in einem Kriterium gleich sein, hier wäre Umfang oder Kalorienverbrauch denkbar. Der Unterschied in der Verbesserung der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit im Zeitfahren wäre die primäre abhängige Variable. Allerdings wäre es sinnvoll, auch die Konzeptvalidität der jeweiligen Intervention zu überprüfen, also ob die angestrebten Adaptionen

auf physiologischer Ebene erreicht werden. Für das „metabolische Training“ wäre es die Verbesserung im MLSS (oder entsprechender Laktatschwelle). Für den „anderen Trainingsansatz“ müsste ein entsprechendes Kriterium festgelegt (z. B. Veränderung in der EMG-Messung oder der Körperkerntemperatur unter Belastung) und dessen Veränderung ebenso bestimmt werden. Beide Nebenkriterien werden selbstverständlich vor und nach beiden Trainingsphasen bestimmt und die Veränderung zwischen den Bedingungen verglichen. In wie weit sich diese leistungsphysiologischen Veränderungen auch auf das sportartspezifische Zeitfahren übertragen lassen, könnte dann in einem weiteren Schritt überprüft werden. Bei einer solchen Studie muss nach bisherigen Erfahrungen mit einer Drop-Out-Quote von 50 % gerechnet werden. Betrachtet man das radsportliche Einzugsgebiet um Saarbrücken wäre nach Abzug der Drop-Out-Quote mit maximal zehn, eher fünf Probanden zu rechnen. Damit wäre keine statistische Analyse, sondern lediglich die Betrachtung von Einzelfällen möglich.

Zusammengefasst kann man sagen, dass die Schwellenkonzepte Stegmann, Dickhuth, D_{max} und 4-mmol das MLSS im Mittel annähernd gleich gut und präzise abschätzen. Die LoA der Schwellenmodelle liegen zwischen 10 und 20 % des MLSS. Dabei schätzen die Stegmann- und D_{max} -Schwelle unabhängig von der Leistungsfähigkeit das MLSS ähnlich genau ab (Homoskedastizität). Die Genauigkeit der Dickhuth- und 4-mmol-Schwelle ist hingegen von der Leistungsfähigkeit der Probanden abhängig (Heteroskedastizität). Insgesamt überschätzt die 4-mmol-Schwelle im Mittel das MLSS, wohingegen die Dickhuth-Schwelle es im Mittel eher unterschätzt. Die maximale Leistung im Stufentest schätzt das MLSS mit einem Korrekturfaktor nominell präziser ab als die Schwellenkonzepte.

2.5 Schlussfolgerung

Es konnte festgestellt werden, dass die Schwellenkonzepte Stegmann, Dickhuth, D_{max} und 4-mmol das MLSS im Mittel annähernd gleich gut und präzise abschätzen. Die individuellen Schwellenkonzepte Stegmann und D_{max} tun dies unabhängig von der Ausdauerleistungsfähigkeit der Athleten. Die individuelle Genauigkeit im Abschätzen des MLSS ist für eine Steuerung im Trainingsalltag für die meisten Athleten akzeptabel, sollte jedoch in Einzelfällen (besonders im Leistungssport) durch Trainingskontrollen überprüft werden.

3 Studie 2 – Validierung von Laktatschwellenkonzepten am 40-km-Zeitfahren

3.1 Einleitung

Der Anteil an der Energiebereitstellung zum Erbringen der Wettkampfleistung für den 1-h-Weltrekord wird auf 95 % aerob und 5 % anaerob geschätzt (Craig & Norton, 2001; Jeukendrup et al., 2000). Da die P_{\max} , $VO_{2\max}$ und die submaximalen Schwellenkonzepte in der Lage sind, die aerobe Leistungsfähigkeit abzuschätzen, sollten diese auch mit der Leistung im Zeitfahren korrelieren. Allerdings konnte bereits gezeigt werden, dass sich submaximale Schwellen im Gegensatz zur $VO_{2\max}$ besser eignen, um Intensitäten abzuschätzen, die ein Athlet über eine längere Zeit durchhalten kann. Damit wären sie auch potentiell besser geeignet, um die sportartspezifische Ausdauerleistungsfähigkeit u. a. im 40-km-Zeitfahren (was bei Amateurradfahrern der Dauer von etwa einer Stunde entspricht) zu bestimmen (Sjodin & Jacobs, 1981; Sjodin & Svedenhag, 1985; Stegmann & Kindermann, 1982). Anhand von Tests mit 24 trainierten Radsportlerinnen konnte gezeigt werden, dass die P_{\max} ($r = 0,81$) einen geeigneten Parameter bei der Abschätzung der 1-h-Dauerleistung im Labor darstellt (Bishop et al., 1998). Von den dabei getesteten Schwellenkonzepten dieser Radsportlerinnen (aerobe Schwelle, +1,0 mmol-Schwelle, D_{\max} , D_{mod} , 4-mmol und einem logarithmierten Modell) hatte D_{\max} ($r = 0,84$) den nominell höchsten Zusammenhang zur 1-h-Dauerleistung (Bishop et al., 1998).

Ausgehend von der Schätzung, es würden nur 5 % der benötigten Energie im Zeitfahren über eine Stunde anaerob bereitgestellt werden (Jeukendrup et al., 2000), sollte die anaerobe Kapazität bzw. die Leistung im 30-s-Wingate-Test keinen wesentlichen Zusammenhang zur Leistung im 40-km-Zeitfahren aufweisen. Lediglich innerhalb einer sehr homogenen aerob-trainierten Gruppe könnte diese dazu beitragen, die Varianz aufzuklären.

Wie einleitend beschrieben, befassten sich lediglich acht Studien mit der Evaluation von Laktatschwellenkonzepten anhand von (simulierten) Zeitfahrwettkämpfen (Amann et al., 2006; Bentley et al., 2001; Bishop et al., 1998; Coyle et al., 1991; Craig et al., 1993; MacIntosh et al., 2002; McNaughton et al., 2006; Nichols et al., 1997). Faude, Kindermann, et al. (2009) stellen zusammenfassend fest, dass die vorgefundene Datenlage im Gegensatz zu derjenigen beim Laufen als heterogener zu beschreiben ist. Die Korrelationen von Laktatschwellen und (simulierten) Wettkampfleistungen variieren

von $r = 0,23$ (Bentley et al., 2001) bis $r = 0,93$ (MacIntosh et al., 2002). Daher schlussfolgern die Autoren, dass es auf Grund der geringen Anzahl und der heterogenen Studienlage notwendig ist, weitere Forschung im Bereich des Zusammenhangs von Laktatschwellen und Zeitfahrwettbewerben von Radfahrern zu betreiben.

Um die prädiktive Validität der Laktatschwellen zu bestimmen, wurden bislang ausschließlich die mittleren Unterschiede und Korrelationen zu einem simulierten Wettkampf berechnet. Unklar bleibt dabei, wie genau die Prädiktion im individuellen Fall ausfällt. Zur Bestimmung des interindividuellen Unterschieds eignet sich die Erstellung von Bland-Altman-Plots mit der Angabe der mittleren Differenz und der 95 %-Konfidenzintervalle (LoA) zwischen dem leistungsdiagnostischen Parameter und dem (simulierten) Zeitfahren (Atkinson & Nevill, 1998; Bland & Altman, 1986). Zur Beurteilung sowohl der mittleren Differenzen und der LoA als auch für den individuellen Fall gibt es keine klar definierten Grenzen. Zudem ist die Tag-zu-Tag-Variabilität für Zeitfahren als gering anerkannt und liegt im Mittel bei 1,2 % (Hopkins, 2000; Hopkins et al., 2001). Als sportpraktisch relevant kann der Unterschied in der Leistung zwischen dem ersten und vierten Platz bei Großereignissen angesehen werden. Bei den Weltmeisterschaften in Doha 2016 betrug der Unterschied im 40-km-Zeitfahren zwischen der Goldmedaille und dem vierten Platz 1:11 min, zu Platz 11 1:57 min und zum Median der Starter (Platz 33) 3:26 min (Union Cycliste Internationale, 2016a). Berechnet man für die einzelnen Endzeiten die erforderlichen Leistungsdaten mit Hilfe eines validierten Programms (Cycling Power Lab, 2016; Martin, Milliken, Cobb, McFadden, & Coggan, 1998), so scheint für die Plätze 1, 4, 11 und 33 eine durchschnittliche Leistung von 495 W, 456 W, 436 W und 400 W bezogen auf den gleichen Fahrertyp (hier gewählt: Tony Martin, 185 cm, 75 kg) notwendig zu sein. Der Vergleich dieser benötigten durchschnittlichen Wattzahlen offenbart prozentuale Abweichungen von 8 %, 12 % und 24 % für die Plätze 4, 11 und 33 gegenüber der für Platz eins nötigen Leistung.

Daher wird folgende Festlegung getroffen: Die individuelle Genauigkeit eines Laktatschwellenmodells wird als sehr genau angesehen, wenn es die mittlere Leistung im Zeitfahren genauso gut abschätzen kann, wie es dem Unterschied zwischen Platz 1 und 4 entspricht (± 39 W, 8 %), als genau, wenn es die Leistung so gut abschätzt, wie es dem Unterschied zwischen Platz 1 und 11 entspricht (± 59 W, 12 %) und als ausreichend, wenn es die Zeitfahrleistung entsprechend des Unterschieds des Siegers zum Median (± 95 W, 24 %) abschätzt.

3.2 Darstellung der empirischen Untersuchung

3.2.1 Fragestellung und Arbeitshypothese

Ziel dieser zweiten Studie war es daher, die vier gebräuchlichen Laktatschwellenmodelle Stegmann (Stegmann et al., 1981), D_{\max} (Cheng et al., 1992), Dickhuth (Dickhuth et al., 1991) und 4-mmol (Heck, Mader, et al., 1985) im Hinblick auf die Prädiktion der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit auf dem Fahrradergometer zu überprüfen. Außerdem sollte der Zusammenhang des 40-km-Zeitfahrens zu den maximalen Parametern P_{\max} und $VO_{2\max}$ aus dem Stufentest und der Leistung im anaeroben 30-s-Wingate-Test bestimmt und mit den genannten Schwellenmodellen verglichen werden.

Daher lautet die Arbeitshypothese, dass es bei geringer interindividueller Variabilität einen Zusammenhang zwischen den aeroben Parametern der Leistungsdiagnostik und der mittleren Leistung im 40-km-Zeitfahren gibt. Dagegen gibt es keinen Zusammenhang zwischen den anaeroben Parametern der Leistungsdiagnostik und dem 40-km-Zeitfahren.

3.2.2 Untersuchungsmethodik

3.2.2.1 Personenstichprobe

Insgesamt wurden 29 männliche Probanden für die Untersuchung rekrutiert. Im Studienverlauf ergaben sich allerdings sechs Drop-Outs. Die Probanden mussten die Studie wegen muskulärer Probleme ($n = 3$), Gefäßverschluss ($n = 1$) oder krankhaftem Blutbild ($n = 2$) vorzeitig abbrechen.

So setzten sich die Probanden der Studie aus 23 männlichen Wettkampfradfahrern zusammen. Im Schnitt waren sie 29 ± 8 Jahre alt, 180 ± 6 cm groß und 74 ± 8 kg schwer. Ihre $VO_{2\max}$ im Stufentest betrug im Mittel $59,4 \pm 7,4$ ml/min/kg.

3.2.2.2 Variablenstichprobe

Im Folgenden werden die Hauptzielparameter der Studie sowie die angewendeten Mess- und Auswertungsverfahren erläutert oder auf die Methodik in Studie 1 verwiesen.

Hauptzielparameter

Die Hauptzielparameter der Studie waren zum einen die durchschnittliche Leistung im simulierten 40-km-Zeitfahren, die mittlere und maximale Leistung im 30-s-Wingate-Test

sowie die Leistung an der „zweiten“ Laktatschwelle. Sie wurden, wie in Studie 1 bereits dargestellt, nach den Methoden von Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und 4-mmol bestimmt.

Leistung im 40-km-Zeitfahren

Das 40-km-Zeitfahren war ein im Labor simulierter Wettkampf auf einem „Cyclus2“ Ergometer der Firma RBM elektronik-automation GmbH (Leipzig, Deutschland). Auf dem Ergometer wurde das eigene Fahrrad eingespannt und der Proband konnte am Display simuliert schalten, womit der Trittwidestand selbst eingestellt wurde. Über die durch den Widerstand pro Umdrehung und die Anzahl der Umdrehungen erbrachte Leistung wurde dann vom System eine Geschwindigkeit simuliert. Hauptzielparameter war dabei die erbrachte Durchschnittsleistung über eine simulierte 40-km-Strecke.

Schwellenkonzepte

Wie in der ersten Studie vorgestellt, wurden auch hier die Schwellen nach den Konzepten von Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und 4-mmol aus einem stufenförmig ansteigenden Belastungstest auf dem Fahrradergometer ermittelt. Auch die entsprechenden Schwellen wurden nach der Methodik der ersten Studie bestimmt, mit dem einzigen Unterschied, dass die Tests in dieser Studie auf dem „Cyclus2“ Ergometer der Firma RBM elektronik-automation GmbH (Leipzig, Deutschland) durchgeführt wurden.

Mittlere Leistung im Wingate-Test

Der Wingate-Test ist ein maximaler Sprint über 30 Sekunden. Die durchschnittliche Leistung über die 30 Sekunden stellt die mittlere Leistung (WT P_{mean}) dar. Für diesen Test wird das Ergometer trittfrequenzabhängig eingestellt und der Widerstand anhand des Körpergewichts festgelegt. Je höher die Trittfrequenz ist bzw. je länger der Sportler die Trittfrequenz hoch halten kann, desto höher ist die Leistung. Dabei werden die Teilnehmer angewiesen, von Anfang an volle Leistung abzurufen und sich die 30 Sekunden nicht „einzuteilen“.

Maximale Leistung im Wingate-Test

Dadurch erreichen die Teilnehmer in der Regel innerhalb der ersten 5 Sekunden eine Spitzenleistung. Die Spitzenleistung über eine Sekunde wird als die maximale Leistung (WT P_{\max}) im Wingate-Test definiert.

Laktatbestimmung

Die Laktatbestimmung erfolgte wie in Studie 1.

Anthropometrische Daten

Die anthropometrischen Daten wurden wie in Studie 1 erfasst.

3.2.2.3 Ablauf der Gesamtuntersuchung

Alle Teilnehmer absolvierten in der gleichen Reihenfolge ein simuliertes, flaches 40-km-Zeitfahren (TT), einen 30-sekündigen Wingate-Test (WT) und einen stufenweise ansteigenden Test (ST) bis zur Erschöpfung auf dem Radergometer. Alle Tests fanden an einem Tag im Abstand von jeweils zwei Stunden statt.

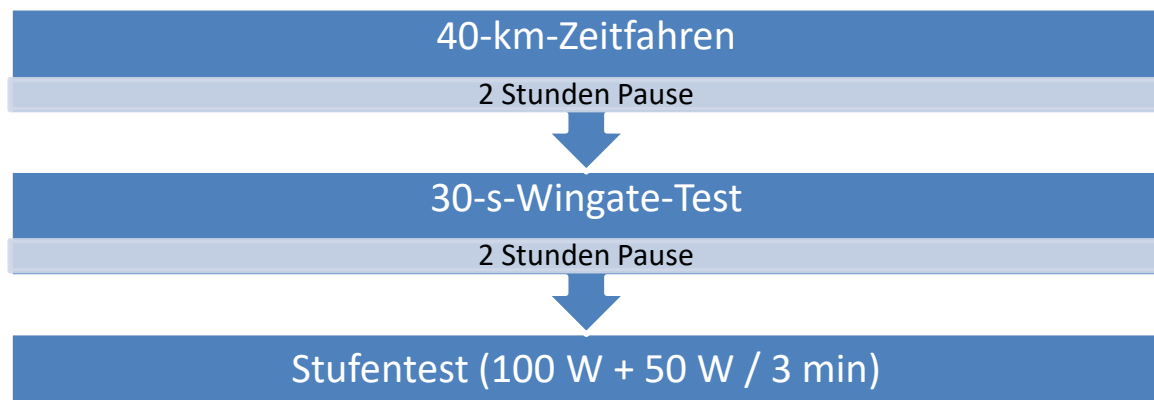


Abbildung 14: Studienablauf der zweiten Studie.

3.2.3 Statistische Hypothese

Im Folgenden werden die Arbeitshypothesen in statistische Hypothesen umgewandelt:

H3: Es gibt einen sehr hohen ($r > 0,7$) linearen Zusammenhang zwischen der Leistung im 40-km-Zeitfahren und den Laktatschwellenmodellen nach Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und 4-mmol, sowie mit den maximalen Parametern ($VO_{2\max}$ und P_{\max}) im Stufentest.

H4: Die Schwellenmodelle können die mittlere Leistung im 40-km-Zeitfahren sehr genau ($\pm 8\%$) abschätzen.

H5: Es gibt keinen hohen ($r > 0,5$) linearen Zusammenhang zwischen der Leistung im 40-km-Zeitfahren und der maximalen und mittleren Leistung im 30-s-Wingate-Test.

3.2.4 Statistik

Alle Berechnungen, Ergebnisse und Abbildungen wurden mit der Computersoftware Statistica (Version 8) oder mit Microsoft Office Excel (2013) erstellt.

Deskriptiv werden Daten sowohl als Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) als auch als mittlere Differenzen (MD) und 95 %-Konfidenzintervalle als „Limits-of-Agreements“ (LoA) dargestellt.

Deskriptiv wird die Anzahl der Probanden, die die mittlere Leistung im Zeitfahren sehr genau ($\leq 8\%$), genau ($\leq 12\%$) und ausreichend ($\leq 24\%$) abschätzen, dargestellt. Mittels Chi-Quadrat-Test wurde auf Unterschiede in der Verteilung getestet.

Außerdem wurden Bland-Altman-Plots erstellt, um eine graphische Differenz zwischen dem jeweiligen Laktatschwellenmodell und der maximalen Leistung im Stufentest (P_{\max}) zur mittleren Leistung im Zeitfahren darzustellen. Weiterhin wurden die LoA eingezeichnet (Atkinson & Nevill, 1998; Bland & Altman, 1986, 1995; Hopkins, 2000).

Lineare Zusammenhänge zwischen der Leistung im 40-km-Zeitfahren und dem jeweiligen Schwellenkonzept wurden mittels Pearsons-Produkt-Moment-Korrelation berechnet und als Korrelationskoeffizient (r) angegeben. Zur Interpretation des Korrelationskoeffizienten dient die nachfolgende Übersicht (Hopkins et al., 2009):

$0,0 < r \leq 0,1$	sehr niedriger Zusammenhang
$0,1 < r \leq 0,3$	niedriger Zusammenhang
$0,3 < r \leq 0,5$	mittlerer Zusammenhang
$0,5 < r \leq 0,7$	hoher Zusammenhang
$0,7 < r \leq 0,9$	sehr hoher Zusammenhang
$0,9 < r \leq 1$	perfekter Zusammenhang

Mittels t-Test für abhängige Stichproben wurde auf Unterschiede zwischen dem MLSS und den Schwellen getestet. Die Berechnung der Teststärke ($\alpha = 0,05$) erfolgte post-hoc als Powerkalkulation mittels G*Power (Version 3.1.9.2).

Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

3.3 Ergebnisse

Im Schnitt schafften die Probanden das 40-km-Zeitfahren (TT) in 3942 ± 212 s und mit einer Durchschnittsleistung von 236 ± 38 W. Signifikante Zusammenhänge zur Leistung im Zeitfahren wurden für die P_{\max} ($r = 0,89$), die Schwellenkonzepte Stegmann ($r = 0,84$), Dickhuth ($r = 0,80$), 4-mmol ($r = 0,81$) und die $VO_{2\max}$ ($r = 0,56$) gefunden. In Relation zum Körpergewicht waren die Zusammenhänge zum TT für die P_{\max} und die

Schwellenkonzepte ebenfalls signifikant, aber geringer. Alle anderen Parameter zeigten keine signifikanten Zusammenhänge (Tabelle 13).

Tabelle 12: Maximale Beanspruchungsparameter (Herzfrequenz [HF], Blutlaktatkonzentration [BLa] und subjektives Belastungsempfinden [RPE]) aus dem Zeitfahren, Wingate-Test und Stufentest (Mittelwert \pm Standardabweichung, $n = 23$; Alter: 29 ± 8 J).

	HF_{max} [/min]	BLa_{max} [mmol/l]	RPE_{max}
Zeitfahren	185 \pm 8	8,0 \pm 2,4	9,5 \pm 0,7
Wingate-Test	-	11,2 \pm 2,0	-
Stufentest	188 \pm 8	9,3 \pm 1,9	9,5 \pm 0,5

*Tabelle 13: Korrelationen und mittlere Unterschiede (mittlere Differenzen [MD] und 95 %-Konfidenzintervalle [LoA]) der leistungsphysiologischen Parameter aus dem Stufentest (ST) und Wingate-Test (WT) zur mittleren Leistung im Zeitfahren (TT) ($n = 23$; * $p < 0,05$).*

	MW \pm SD	Korrelation zum TT	MD \pm LoA zum TT [W]	LoA [%]
TT [W]	236 \pm 38	-	-	-
ST P_{max} [W]	338 \pm 30	$r = 0,89^*$	103 \pm 35	12
ST P_{max} [W/kg]	4,63 \pm 0,55	$r = 0,56^*$	-	-
Stegmann [W]	265 \pm 31*	$r = 0,83^*$	29 \pm 41	17
Dickhuth [W]	268 \pm 38*	$r = 0,80^*$	32 \pm 44	18
D_{max} [W]	265 \pm 29*	$r = 0,79^*$	30 \pm 46	18
4-mmol [W]	295 \pm 34*	$r = 0,81^*$	54 \pm 45	17
VO_{2max} [ml/min]	4,38 \pm 0,39	$r = 0,56^*$	-	-
VO_{2max} [ml/min/kg]	60,1 \pm 7,2	$r = 0,32$	-	-
WT P_{max} [W]	904 \pm 95	$r = 0,14$	-	-
WT P_{mean} [W]	701 \pm 58	$r = 0,39$	-	-

Die mittleren maximalen Beanspruchungsparameter sind in Tabelle 12 dargestellt. Dabei erfüllten alle 23 Probanden mindestens zwei der drei Ausbelastungskriterien für das

Zeitfahren und den Stufentest (Meyer, Scharhag, et al., 2005) und ein Kriterium für den Wingate-Test:

- maximale Laktatkonzentration über 6 mmol/l (für Ausdauertrainierte modifiziert),
- maximale Herzfrequenz über 200 minus Lebensalter [J],
- maximales subjektives Belastungsempfinden (RPE) über 9.

Die Abbildung 15 zeigt die Korrelationen zwischen dem Zeitfahren und den maximalen Parametern (P_{max} und VO_{2max}) aus dem Stufentest, einmal absolut und einmal in Relation zum Körpergewicht. Dabei haben die absoluten Parameter eine höhere Korrelation als die relativen (Tabelle 13).

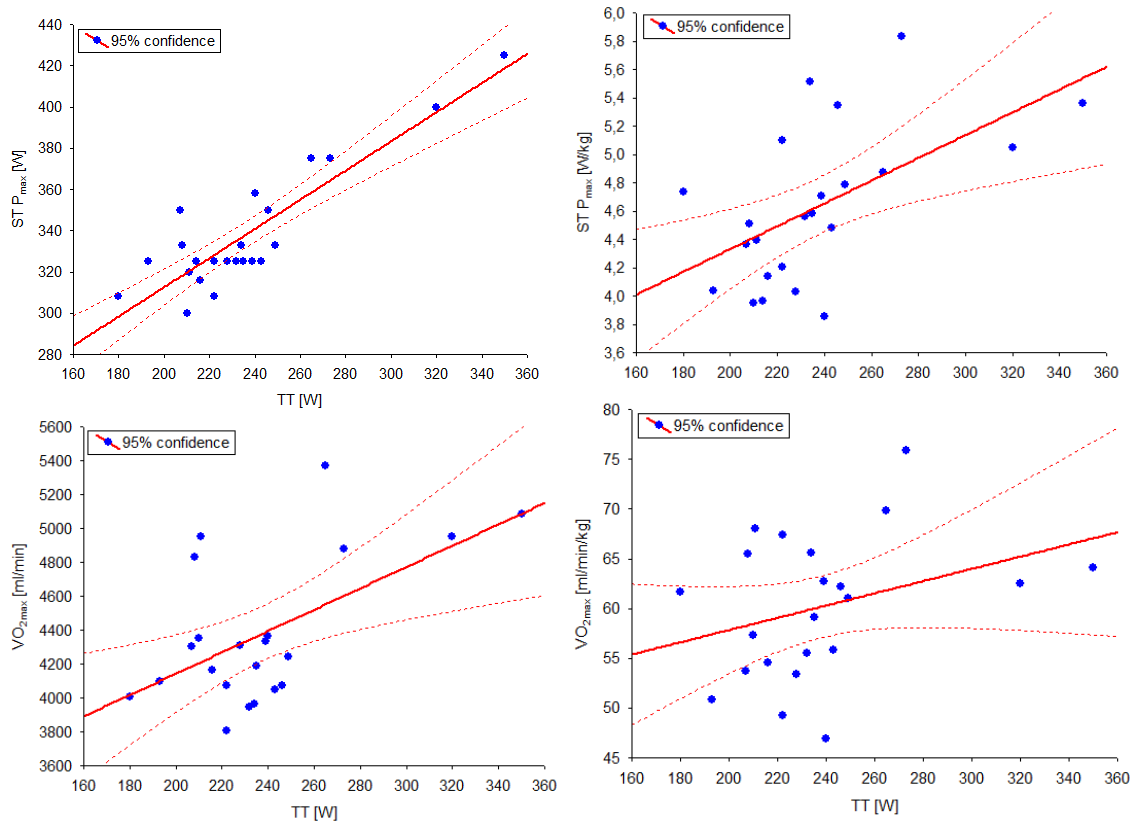


Abbildung 15: Korrelationen der absoluten und relativen maximalen Leistung (P_{max} ; links von oben nach unten) und der absoluten und relativen maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max} ; rechts von oben nach unten) aus dem Stufentest zur Leistung im Zeitfahren (TT) ($n = 23$).

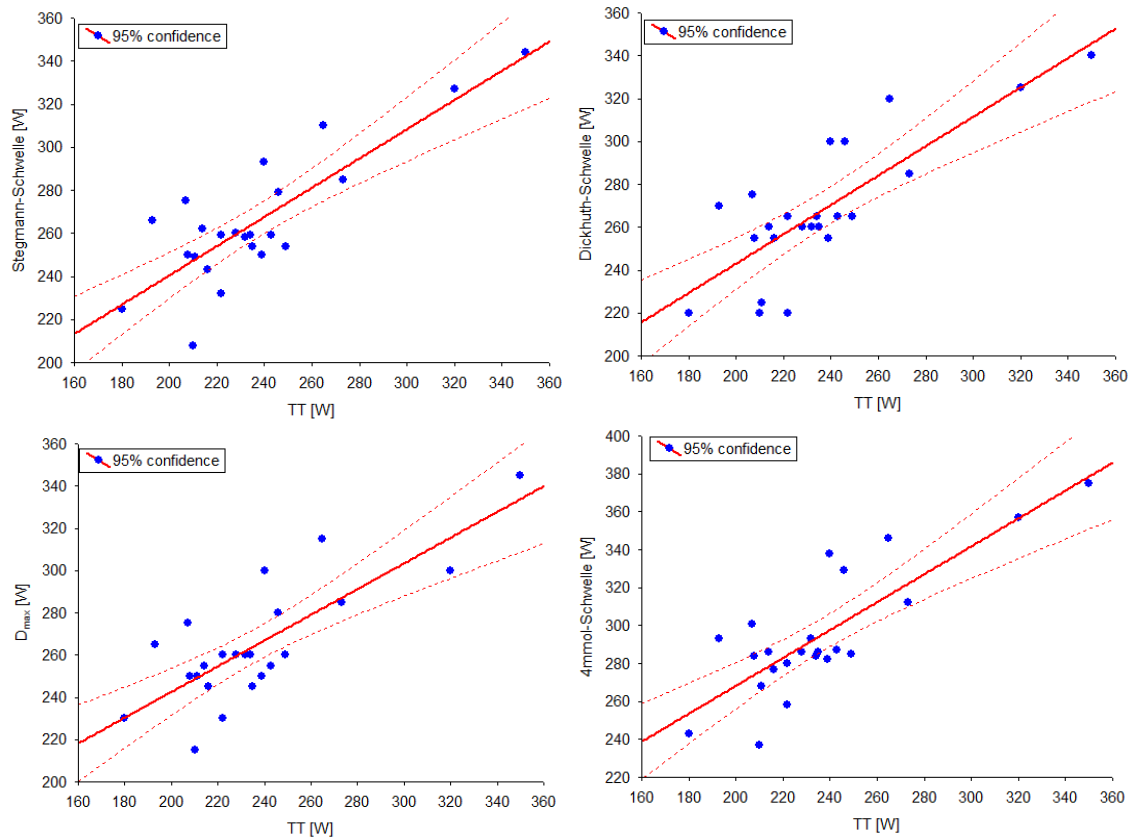


Abbildung 16: Korrelationen der Schwellenkonzepte Stegmann, Dickhuth, 4-mmol und D_{max} zur Leistung im Zeitfahren (TT) (im Uhrzeigersinn; $n = 23$).

Die Abbildung 16 zeigt die Korrelationen zwischen dem Zeitfahren und dem jeweiligen Schwellenmodell. Dabei haben alle Schwellenmodelle einen signifikant hohen Zusammenhang zur Leistung im Zeitfahren (Tabelle 14).

Im Folgenden werden die Bland-Altman-Plots zwischen den Schwellenkonzepten und der P_{max} zur Leistung im 40-km-Zeitfahren dargestellt. Veranschaulicht werden neben der mittleren Differenz und den 95 %-Konfidenzintervallen auch die individuellen Abweichungen jedes einzelnen Probanden (Abbildung 17). Zur Übersicht sind die Ergebnisse der Bland-Altman-Plots auch in Tabelle 13 zusammengefasst.

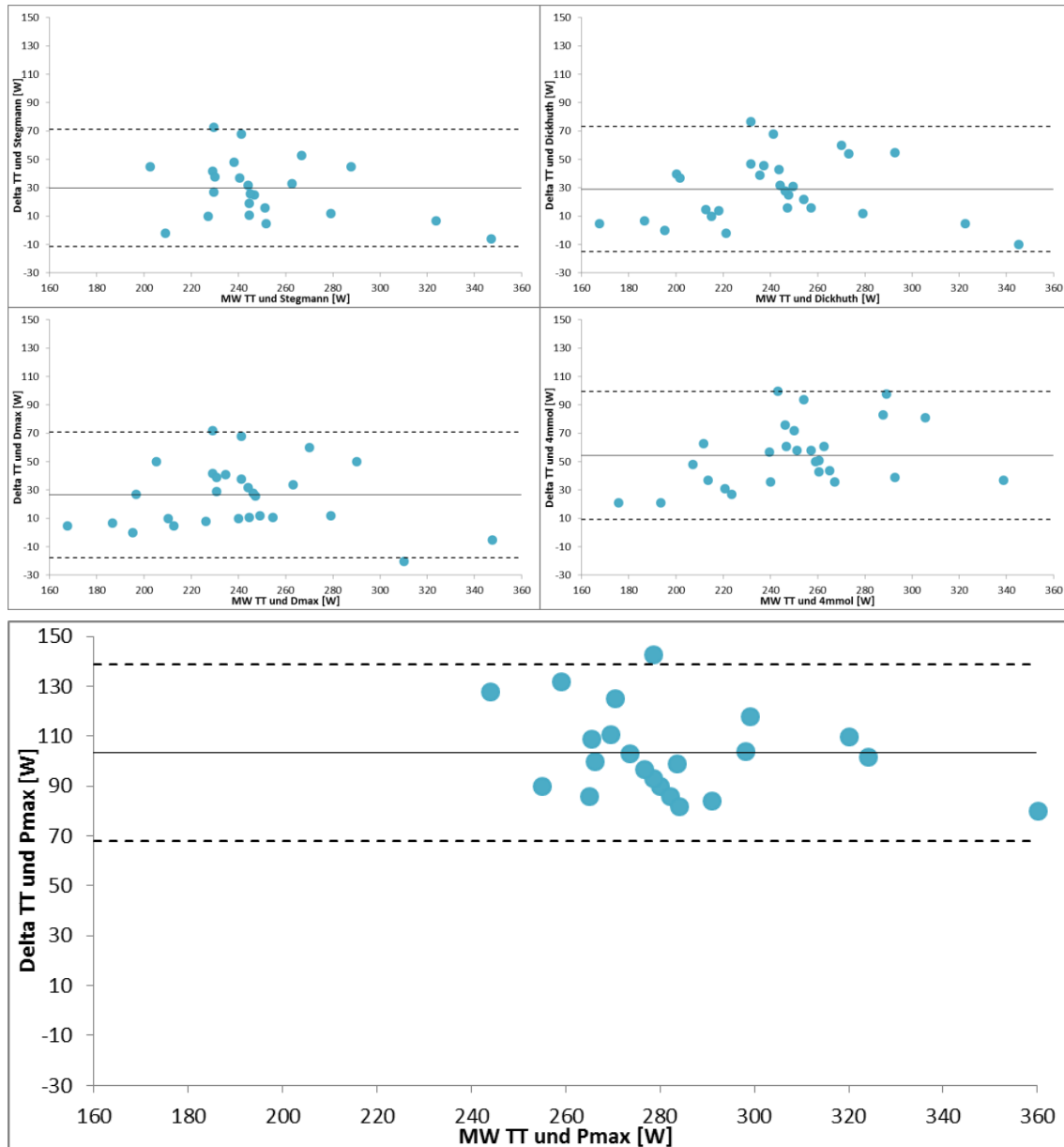


Abbildung 17: Bland-Altman-Plots zum Unterschied der Leistung im 40-km-Zeitfahren (TT) und der submaximalen Schwellen nach Stegmann, Dickhuth, 4-mmol und D_{max} (oben im Uhrzeigersinn), sowie der maximalen Leistung im Stufentest (P_{max} ; unten) ($n = 23$).

Tabelle 14 zeigt die Anzahl der Probanden mit einer Abweichung zwischen der maximalen Leistung im Stufentest (P_{max}), den Schwellen nach Stegmann, Dickhuth, D_{max} und 4-mmol zur mittleren Leistung im 40-km-Zeitfahren von weniger als dem modellierten Unterschied der mittleren Leistung zwischen Platz 1 und 33 (24 %), zwischen Platz 1 und 11 (12 %) und Platz 1 und 4 (8 %) bei den Weltmeisterschaft 2016 im 40-km-Zeitfahren; sowie nach entsprechender „Korrektur“ mit den mittleren Abweichungen (minus 29 W für Stegmann, minus 32 W für Dickhuth, minus 30 W für D_{max} , minus 54 W

für 4-mmol und minus 103 W für P_{\max}). In Tabelle 15 wird die Verteilung der Probanden zur Berechnung des Chi-Quadrat-Tests für eine sehr genaue Abschätzung ($\pm 8\%$) des TT zwischen der 4-mmol-Schwelle und den anderen Schwellenkonzepten und für eine genaue Abschätzung ($\pm 30\text{ W}$) für die P_{\max} minus 106 W bzw. D_{\max} und 4-mmol-Schwelle dargestellt.

Tabelle 14: Anzahl der Probanden mit einer ausreichenden (24 %), einer genauen (12 %) und einer sehr genauen (8 %) Abweichung zwischen den anaeroben Schwellen und der maximalen Leistung im Stufentest (P_{\max}) zur mittleren Leistung im 40-km-Zeitfahren (TT) ($n = 23$).

	$\Delta TT > 24\%$ [n]	24 % \geq $\Delta TT > 12\%$ [n]	12 % \geq $\Delta TT > 8\%$ [n]	8 % $\geq \Delta TT$ [n]
Stegmann	2	7	5	9
Dickhuth	2	8	4	9
D_{\max}	2	7	5	9
4-mmol	5	13	2	1
P_{\max}	22	1	0	0
Stegmann – 29 W	0	3	6	14
Dickhuth – 32 W	0	3	6	14
D_{\max} – 30 W	0	4	5	14
4-mmol – 54 W	0	4	3	16
P_{\max} – 103 W	0	3	2	18

Tabelle 15: Verteilung der Probanden zur Berechnung des Chi-Quadrat-Tests für eine sehr genaue Abschätzung ($\pm 8\%$) des TT zwischen der 4-mmol und den anderen Schwellenkonzepten ($n = 26$).

$\chi^2 = 8,18$ $p = 0,004$	$\Delta TT > 8\%$ [n]	$\Delta TT \leq 8\%$ [n]
Stegmann, Dickhuth, D_{\max}	14	9
4-mmol	22	1

3.3.1 Hypothesenprüfung

H3: Es gibt einen sehr hohen ($r > 0,7$) linearen Zusammenhang zwischen der Leistung im 40-km-Zeitfahren und den Laktatschwellenmodellen nach Stegmann, Dickhuth, D_{max} und 4-mmol, sowie mit den maximalen Parametern (VO_{2max} und P_{max}) im Stufentest.

Die Hypothese 3 kann außer für die VO_{2max} bestätigt werden.

H4: Die Schwellenmodelle können die mittlere Leistung im 40-km-Zeitfahren sehr genau ($\pm 8\%$) abschätzen.

Die Hypothese 4 muss abgelehnt werden

H5: Es gibt keinen hohen ($r > 0,5$) linearen Zusammenhang zwischen der Leistung im 40-km-Zeitfahren und der maximalen und mittleren Leistung im 30-s-Wingate-Test.

Die Hypothese 5 kann bestätigt werden.

3.4 Diskussion

Ziel dieser Studie war es, die vier gebräuchlichen Laktatschwellenmodelle, die Stegmann-, D_{max} -, Dickhuth- und 4-mmol-Schwelle auf ihre jeweilige Vorhersagefähigkeit der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit im (simulierten) 40-km-Zeitfahren auf dem Fahrradergometer zu überprüfen. Des Weiteren sollte die mittlere Leistung im 40-km-Zeitfahren mit den maximalen Parametern P_{max} und VO_{2max} aus dem Stufentest und der Leistung im anaeroben 30-s-Wingate-Test verglichen werden.

3.4.1 Ergebnisdiskussion

Zusammenhänge der aeroben Parameter zum Zeitfahren

Die Ergebnisse zeigen für die Schwellenkonzepte insgesamt sehr hohe signifikante Zusammenhänge, wobei die Stegmann-Schwelle den nominell höchsten Korrelationskoeffizienten aufweist. Damit liegen die Korrelationskoeffizienten ($r = 0,79 - 0,83$) in der vorgelegten Arbeit insgesamt etwas höher als die bisher in der Literatur veröffentlichten Ergebnisse ($r = \sim 0,75$) zum 40-km-Zeitfahren oder für Zeitfahren von einer Dauer zwischen 60 und 90 Minuten (Amann et al., 2006; Bentley et al., 2001; Bishop et al., 1998). Da sie sich aber innerhalb der Streuung ($r = 0,52 - 0,84$) befinden, lässt sich sagen, dass sie den Ergebnissen aus der Literatur nicht widersprechen, sondern für eine höhere als bisher angenommene Korrelation sprechen. In einer Studie, in der die Korrelationen zu den Laktatschwellen deutlich niedriger ausfielen ($r = 0,52 - 0,72$), wurde eine sehr homogene Gruppe von 15 gut trainierten Radfahrern (P_{max} : 363 ± 29 W) ge-

testet (Amann et al., 2006). Möglicherweise überschätzt die Korrelation in der vorliegenden Arbeit auf Grund der heterogeneren Ausdauerleistungsfähigkeit der Probanden den Zusammenhang zwischen der mittleren Leistung im TT und den Laktatschwellen.

Betrachtet man die maximalen Parameter (P_{\max} und $VO_{2\max}$), die als solche interpretiert werden können, da von allen Probanden mindestens zwei der drei Ausbelastungskriterien erfüllt wurden, so hat die P_{\max} von allen gemessenen Parametern den höchsten signifikanten Zusammenhang zur Leistung im Zeitfahren, während die $VO_{2\max}$ zwar einen signifikanten, aber nur mittleren Zusammenhang aufweist. Dies deckt sich auch mit dem Ergebnis einer anderen Arbeit mit 39 vorher untrainierten Läufern. In jener wurde sowohl vor als auch nach einer sechswöchigen Trainingsphase gezeigt, dass die maximale Leistung im Stufentest, verglichen mit der Schwellenleistung und der $VO_{2\max}$, die beste Korrelation zur 5000-m-Wettkampfzeit aufweist (Stratton et al., 2009), weshalb geschlussfolgert wird: „performance predicts performance“ (Hall et al., 2016).

Da die Leistung in Relation zum Körpergewicht eine schlechtere Korrelation zur Wettkampfleistung aufweist als die absoluten Werte, scheint ein hohes Körpergewicht für Radsportler für ein flaches 40-km-Zeitfahren, im Gegensatz zur Belastung an Anstiegen, bei der die Akteure ihre Leistung gegen ihr Körpergewicht einsetzen müssen, von Vorteil zu sein. Dies entspricht den Ergebnissen einer anderen Arbeit, die sich mit dem Zusammenhang eines flachen 20-km-Zeitfahrens auf der Straße und der P_{\max} beschäftigte. Für 19 trainierte Radsportler konnte ein hoher negativer Zusammenhang zwischen der absoluten P_{\max} und der Endzeit im Zeitfahren gefunden werden ($r = -0,91$), der in Relation zum Körpergewicht geringer war ($r = -0,68$) (Hawley & Noakes, 1992). Deshalb wird von diesen Autoren geschlussfolgert, dass sich die maximale Leistungsfähigkeit aus einem Radtest mit ansteigendem Testprotokoll eignet, um die Wettkampfzeit in einem Zeitfahren bei Radsportlern vorherzusagen. Eine weitere Arbeit konnte für 16 trainierte Radsportler zwischen 25 und 63 Jahren zeigen, dass sich die P_{\max} eignet, um die Leistung in einem 16,1 km-Zeitfahren vorherzusagen ($r = 0,99$). Allerdings konnte nur ein mittlerer Zusammenhang zur Wettkampfzeit gefunden werden ($r = -0,46$) (Balmer et al., 2000). Dies ist damit zu begründen, dass die Daten über einen Zeitraum von vier Monaten aufgenommen wurden und so unterschiedliche äußere Bedingungen beim Zeitfahren herrschten, die einen Einfluss auf die Endzeit hatten. Die Autoren schlussfolgern, dass nicht die reine Endzeit, sondern vielmehr die jeweils abgerufene Leistung einen präziseren Parameter zur Bewertung der aktuellen sportartspezifischen Leistungsfähigkeit darstellt. Zudem wird anhand dieser Studie der hohe Umwelteinfluss nachgewiesen.

Zwei Studien, die den Zusammenhang von Laktatschwellen mit Mountainbikewettkämpfen analysierten (Gregory et al., 2007; Impellizzeri, Rampinini, et al., 2005), konnten eine hohe Korrelation sowohl für OBLA als auch für eine individuelle anaerobe Schwelle zu einem 31 km langen MTB-Rennen feststellen (Impellizzeri, Rampinini, et al., 2005). Dabei lag die Korrelation bei $r = \sim 0,7$ für die absolute Leistung, die hingegen deutlich höher ($r = \sim 0,9$) war, wenn die am Körpergewicht relativierte Leistung zur Wettkampfleistung in Zusammenhang gebracht wurde. In der anderen Studie lagen die Korrelationen bei elf männlichen Mountainbikern für die individuelle anaerobe Schwelle zum Zeitfahren im Gelände absolut bei $r = 0,5$ und in Relation zum Körpergewicht bei $r = 0,8$. Die Ergebnisse dieser beiden Studien werden in erster Linie durch den hohen Einfluss von Körpergewicht und –zusammensetzung der Radsportler auf die Wettkampfleistung an Anstiegen erklärt (Coyle, 2005; Impellizzeri & Marcora, 2007; Lucia, Earnest, et al., 2003). In der vorliegenden Arbeit wurde jedoch ein flaches 40-km-Zeitfahren simuliert. Hier scheint ein hohes Körpergewicht sogar eher eine positive Rolle bei der Erbringung der Wettkampfleistung zu spielen, da schwerere Radsportler (mit mehr aktiver Muskelmasse) eher in der Lage sind, hohe absolute Leistungen zu produzieren. Dies ist ein Beispiel dafür, wie unterschiedlich das Anforderungsprofil bei den verschiedenen Wettkämpfen im Radsport sein kann.

Zusammenhänge der anaeroben Parameter zum Zeitfahren

Die Ergebnisse aus dem Wingate-Test scheinen trotz eines Endsprints keinen relevanten Einfluss auf die Leistung im Zeitfahren zu haben (Abbiss & Laursen, 2008). Dies war zu erwarten, da die Energiebereitstellung im 40-km-Zeitfahren lediglich zu 5 % aus dem anaeroben Energiestoffwechsel bereitgestellt wird (Craig & Norton, 2001). Denkbar wäre ein Einfluss innerhalb einer Gruppe mit sehr homogener aerober Ausdauerleistungsfähigkeit, da hier die anaerobe Start- und Endphase (Skorski et al., 2015) einen höheren Einfluss auf den Unterschied in der Endzeit zwischen den Athleten ausmachen könnte.

Individuelle Analyse

Erwartungsgemäß weicht die P_{\max} im Mittel erheblich von der Leistung im Zeitfahren ab, schätzt die Leistung aber mit einer Streuung von nur 35 W genauer ab als die Schwellenkonzepte. Für die Praxis bedeutet das, dass für 95 % der Athleten die Leistung im 40-km-Zeitfahren zwischen ~ 65 und ~ 135 Watt unter ihrer P_{\max} liegt. Somit kann man für einen Probanden mit einer P_{\max} von 338 Watt (was dem Mittelwert in dieser

Studie entspricht) prognostizieren, dass er ein 40-km-Zeitfahren mit 95 %-iger Wahrscheinlichkeit mit einer Durchschnittsleistung zwischen 200 und 270 Watt bewältigen kann, was in der Praxis unter den anthropometrischen Voraussetzungen von Tony Martin und den Umweltbedingungen ähnlich wie in Doha einer Zeit zwischen 56:08 min und 62:51 min entspricht (Cycling Power Lab, 2016). Grundsätzlich ist es schwierig, allgemeingültige Grenzen der sportartspezifischen Relevanz festzulegen. Aber diese Streuung von fast sieben Minuten ist offensichtlich zu groß und entspricht für die Weltmeisterschaft im Einzelzeitfahren in Doha dem Rückstand des 51. auf den Sieger. Ein Parameter kann dabei nie genauer als seine Grundvariabilität sein. Dabei liegt der Variationskoeffizient für 1-h-Zeitfahren bei 1,2 % (Hopkins et al., 2001).

Für die vorliegende Arbeit wurde durch die Modellierung der Leistungsunterschiede im 40-km-Zeitfahren bei der Weltmeisterschaften in Doha versucht, Grenzen der sportartspezifischen Relevanz festzulegen (Martin et al., 1998). Als Kriterium gelten die prozentualen Leistungsunterschiede zwischen Platz 1 (495 W) und 4 (457 W), Platz 1 und 11 (437 W) und Platz 1 und 33 (dem Median; 400 W), als eine sehr genaue ($\leq 8\%$), genaue ($\leq 12\%$) und ausreichende ($\leq 24\%$) Abschätzung der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit. Vergleicht man nach dieser Kategorisierung die Konfidenzintervalle der mittleren Unterschiede zwischen den Schwellen und der maximalen Leistung im Stufentest mit der Zeitfahrleistung, so schätzen die Schwellenmodelle nach der Korrektur mit der mittleren Differenz für 95 % der Probanden die mittlere Leistung im 40-km-Zeitfahren mindestens „ausreichend“ genau ab (17 bis 18 %). Die maximale Leistung im Stufentest schätzt hingegen nominell genauer und nach den festgelegten Kriterien „genau“ (12 %) ab. Beim Einteilen der Einzelfälle in die einzelnen Kategorien zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen 4-mmol und allen anderen Schwellen im sehr genauen Abschätzen der mittleren Zeitfahrleistung. Dies wird allerdings durch die Korrektur mit dem mittleren Unterschied zwischen der jeweiligen Schwelle und der mittleren Leistung im Zeitfahren minimiert. Durch diesen Minuend wird die Anzahl der Probanden, für die die Leistung im Zeitfahren genau vorhergesagt werden kann, signifikant erhöht. Dadurch können die Schwellen und die P_{\max} die mittlere Leistung im Zeitfahren für alle Probanden ausreichend genau vorhersagen und in den meisten Fällen ($n = 14$ bis 16 für die Schwellen und $n = 18$ für die P_{\max}) sogar sehr genau ($\leq 8\%$) und die P_{\max} minus 103 W scheint nominell ein besserer Prädiktor für die sportartspezifische Leistung im 40-km-Zeitfahren zu sein, als die Schwellenkonzepte. Dennoch kann in drei bis vier Fällen die Leistung nur ausreichend genau vorhergesagt werden.

Weitere Überlegungen

Ausgehend von der Prämisse, dass die Schwellenkonzepte das MLSS abbilden können, ist es fraglich wieso es zu dieser großen mittleren Abweichung und Streuung zwischen den klassischen Leistungstests und der mittleren Leistung im Zeitfahren kommt. Das Ziel des MLSS und der Schwellenkonzepte ist es, die aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit (Grundlagenausdauer) zu diagnostizieren. Die mittlere Leistung im 40-km-Zeitfahren setzt sich allerdings auch zu Teilen aus anaerober Leistungsfähigkeit zusammen. So werden Abschnitte der Strecke auch oberhalb des MLSS gefahren und diese Fähigkeit ist interindividuell unterschiedlich. Dies trifft vor allem für die Start- und Endspurtphase zu (Abbiss & Laursen, 2008). Zusätzlich hat die Verteilung der Leistung über die Zeit (Pacing) einen weiteren Einfluss und kann in Einzelfällen nicht optimal und interindividuell nicht einheitlich gewesen sein.

Auch wenn die Energiebereitstellung beim Zeitfahren über 40 km oder eine Stunde zu 95 % aerob abläuft, können weitere Ursachen dafür sorgen, dass die Leistung limitiert ist. Die Gründe für akute Ermüdung während lang andauernder Ausdauerwettkämpfe zu verstehen ist eine der großen Forschungsfragen der letzten 50 Jahre. Allerdings wurde bis heute neben vielen verschiedenen Theorien und Modellen noch keine präzise, einheitliche Erklärung gefunden (Abbiss & Laursen, 2005; Noakes, 2000). Prinzipiell lassen sie sich in physiologisch, biochemisch, biomechanisch oder kognitiv begründete Ansätze unterteilen (Abbiss & Laursen, 2005; Hampson, St Clair Gibson, Lambert, & Noakes, 2001; Hunter, St Clair Gibson, Lambert, Nobbs, & Noakes, 2003; Noakes, 2000). Die Erklärungsansätze sind womöglich so unterschiedlich, da sich die Ermüdungsgründe mit der zu bewältigten Dauer ändern, auf mehreren Ebenen parallel ablaufen und sich gegenseitig beeinflussen könnten (Abbiss & Laursen, 2005; Cairns, Knicker, Thompson, & Sjogaard, 2005). Dazu ist es denkbar, dass dies zudem interindividuell unterschiedlich abläuft.

Für ein 60-min-Zeitfahren, das in etwa dem 40-km-Zeitfahren der vorgelegten Arbeit entspricht, konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass der Leistungsabfall mit zentralen und peripheren neuromuskulären Veränderungen zu erklären ist (Kay et al., 2001). So könnte auch die Leistung in der vorliegenden Arbeit nicht (nur) durch die aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit der Probanden, sondern durch deren neuromuskuläre Ermüdung limitiert gewesen sein.

3.5 Schlussfolgerung

Es lässt sich festhalten, dass sich keiner der Parameter aus den klassischen Leistungstests eignet, um auf individueller Ebene die Leistung in einem 40-km-Zeitfahren sehr genau vorhersagen zu können. Zwar haben die Schwellenkonzepte Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und 4-mmol einen hohen Zusammenhang zur Leistung im 40-km-Zeitfahren, aber eine zu große Streuung ($> 12\%$) bei der Abweichung zur Zeitfahrleistung. Ähnliches gilt für die maximalen Parameter, wobei die maximale Leistung im Stufentest einen höheren, die maximale Sauerstoffaufnahme hingegen einen deutlich geringeren Zusammenhang zur Zeitfahrleistung aufweist. Die anaerobe Leistungsfähigkeit scheint hingegen keinen wesentlichen Einfluss zu haben. Bei flachen Zeitfahren zählt die absolute Leistungsfähigkeit stärker als die zum Körpergewicht relativierte.

4 Studie 3 – Einfluss von Ermüdung auf die Leistungsdiagnostik

4.1 Einleitung

Im Leistungssport werden Eingriffe in die Trainingsroutine nicht selten als störend wahrgenommen. Leistungstests können solche Störfaktoren sein, vor allem wenn sie eine maximale Ausbelastung und zuvor eine maximale Erholtheit erfordern. Daher wäre es vorteilhaft, einen Parameter der Leistungsdiagnostik zu haben, der unabhängig von Ausbelastung und Ermüdung Fortschritte in der Ausdauerleistungsfähigkeit diagnostizieren kann.

Ermüdung ist ein normaler Bestandteil des Trainings und gilt als Voraussetzung für Adaptationsprozesse im Organismus (Banister, Morton, & Fitz-Clarke, 1992; Fitz-Clarke, Morton, & Banister, 1991). Mit dem Ziel im Wettkampf die höchstmögliche Leistung abzurufen, absolvieren Sportler viele Trainingseinheiten, um ihre Leistungsfähigkeit zu steigern. Dabei ist der Zusammenhang von Trainingsbelastung und Leistungssteigerung nicht linear (Martin, 2001) und Trainingsanpassungen und trainingsinduzierte Ermüdung können sich vermischen. Infolgedessen durchlaufen Sportler im Saisonverlauf verschiedene Phasen von Leistungssteigerung, Leistungsabfall und auch Plateaus der Leistungsfähigkeit (Faria et al., 2005a; Mujika, 2012).

Um ihre Leistungsfähigkeit zu verbessern, müssen Ausdauerathleten meist ihre Trainingsbelastung steigern oder modifizieren (Faria et al., 2005a). Als Konsequenz folgt zunächst eine Phase der Ermüdung, die durch eine adäquate Phase der Regeneration wieder rückgängig gemacht wird und bestenfalls eine Anpassung in Form einer Leistungssteigerung zur Folge hat. In der Literatur wird dieser Zustand trainingsinduzierter Ermüdung als „akute Ermüdung“ bezeichnet, bei dem sich allerdings kein Leistungsabfall nach einer 24 - 36 h dauernden Pause zeigt (Mujika, 2012). Des Weiteren kann sich nach der Pause eine Leistungssteigerung einstellen. Ein Ungleichgewicht zwischen (zu viel) Training und (zu wenig) Erholung kann zu einem funktionellen oder nicht-funktionellen, kurzfristigen Übertraining führen, was in der Literatur als „Overreaching“ bezeichnet wird. Selbst wenn man nur den Radsport betrachtet, so besteht doch eine große Schwierigkeit darin, dass verschiedene Trainingsarten auch zu verschiedenen Ermüdungsarten auf unterschiedlichen Ebenen führen können (Abbiss & Laursen, 2005), die wiederum in unterschiedlicher zeitlicher Reihenfolge ablaufen. Auch eine Überlappung bzw. gegenseitige Einflussnahme der Faktoren ist wahrscheinlich (Abbiss

& Laursen, 2005). Diese Komplexität scheint der Hauptgrund für die bislang lückenhafte wissenschaftliche Bearbeitung des Themas sein (Abbiss & Laursen, 2005; Meeusen et al., 2013; Urhausen & Kindermann, 2002).

Bei der Diagnostik von Ermüdung zählt eine reduzierte sportartspezifische Leistungsfähigkeit als Goldstandard (Meeusen et al., 2013; Mujika, 2012; Urhausen & Kindermann, 2002). So konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass es durch eine intensive Trainingsphase, wie etwa einem Trainingslager, zunächst zu einer Reduktion der Leistung im Zeitfahren im Mittel um 4 % kommt (Halson et al., 2002; Jeukendrup, Hesselink, Snyder, Kuipers, & Keizer, 1992; Rietjens et al., 2005) und in einer anschließenden Regenerationsphase die Leistung jene vor dem Trainingslager übersteigt (Jeukendrup et al., 1992). Eine weitere Arbeit konnte keinen Einfluss eines Trainingslagers auf die sportartspezifische Leistung nachweisen (Faude, Meyer, et al., 2009). Allerdings beinhaltete dort das Trainingslager im Gegensatz zu den anderen Studien überwiegend Grundlagenausdauertraining und keine hohen Intensitäten, wie beispielsweise Intervalle. Daher wird geschlossen, dass die Intensität des Trainingslagers nicht ausreichend war, damit die Athleten in einen Zustand des Overreaching, d. h. ausschließende Leistungsreduktion, gerieten.

Eine ermüdungsbedingte Reduktion der VO_{2max} und P_{max} konnte bisher nur teilweise in Trainingslagerstudien nachgewiesen werden. Einige Studien fanden nach intensiven Trainingsphasen eine Reduktion der P_{max} (Bosquet, Leger, & Legros, 2001; Fry, Morton, Garcia-Webb, Crawford, & Keast, 1992; Halson et al., 2002; Hedelin, Kentta, Wiklund, Bjerle, & Henriksson-Larsen, 2000; Jeukendrup et al., 1992), wohingegen andere Arbeiten keine solche Reduktion nachweisen konnten (Faude, Meyer, et al., 2009; Lehmann et al., 1992; Rietjens et al., 2005; Urhausen et al., 1998). Ähnlich verhält es sich in den aufgeführten Studien mit der VO_{2max} . Dies ist in erster Linie durch eine reduzierte Ausbelastbarkeit im ermüdeten Zustand begründet, was durch das einheitliche Bild der reduzierten maximalen Herzfrequenzen und Blutlaktatkonzentrationen nach einer intensiven Trainingsphase gezeigt wird (Jeukendrup et al., 1992). Daher gelten reduzierte maximale Herzfrequenzen und Blutlaktatkonzentrationen bei maximaler Beanspruchung als Surrogatparameter der Ermüdung. Des Weiteren konnten bei Athleten im Status des Overreaching geringere submaximale Laktatkonzentrationen nachgewiesen werden (Urhausen et al., 1998), was vermutlich an reduzierten Glykogenspeichern liegt und durch ein Überschätzen der anaeroben Schwelle zu einer Fehlinterpretation der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit führen kann. So wurden für fixe Laktat-

konzentrationen signifikant höhere Leistungen im ermüdeten Zustand gefunden. Betrachtet man die Leistung jedoch bei Laktatkonzentrationen im Verhältnis zur maximalen Laktatkonzentration, so zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Werten im ermüdeten und erholten Zustand (Bosquet et al., 2001). Auch wenn diese Studie mit Läufern durchgeführt wurde, so scheint das Ergebnis daraufhin zu deuten, dass Ermüdung oder eine reduzierte Glykogenverfügbarkeit einen Einfluss auf das Ergebnis von fixen Laktatschwellenkonzepten hat. Dagegen konnte bei 16 Probanden im intraindividuellen Vergleich gezeigt werden, dass eine kohlenhydratarme Ernährung eine nach unten verschobene Laktatleistungskurve zur Folge hat, welche aber die Stegmann-Schwelle nicht beeinflusst (Fröhlich, Urhausen, Seul, & Kindermann, 1989). Allerdings konnte nur in einer Studie der Einfluss von Trainingslagerinduzierter Ermüdung auf ein Laktatschwellenkonzept (Stegmann) gefunden werden (Faude, Meyer, et al., 2009). In jener zeigte sich durch das Trainingslager schon direkt im Anschluss ein signifikant positiver Effekt. Unklar ist aber, ob diese Steigerung der Stegmann-Schwelle auf einer Fehlinterpretation durch niedrigere Laktatkonzentrationen unter Belastung beruht oder eine wirkliche Leistungssteigerung vorlag. Für das Zweite spricht, dass die Athleten in dieser Studie anscheinend nicht so stark durch das Trainingslager ermüdet waren, wie es in anderen Studien vorkommt (s. keine Reduktion der P_{max} und VO_{2max}) und in dieser Studie überwiegend Grundlagenausdauertraining durchgeführt wurde.

Des Weiteren kann es durch Ermüdung aufgrund von Muskelschädigung zu einer veränderten Ansteuerung, Rekrutierung und Kontraktion der Muskelfasern kommen (Avela, Kyrolainen, & Komi, 2001). Dies kann den Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus verändern, was wiederum eine veränderte Effizienz der Bewegung zur Folge hat (Gollhofer, Komi, Fujitsuka, & Miyashita, 1987; Gollhofer, Komi, Miyashita, & Aura, 1987). Diese Verschlechterung in der Bewegungsökonomie kann zu einer früheren Anhäufung von Metaboliten führen (Abbiss & Laursen, 2005). Bei ansteigenden Belastungen würde dies einen früheren Anstieg der Blutlaktatkonzentration und damit eine Linksverschiebung der Laktatleistungskurve zur Folge haben. Durch intensives Training ist in erster Linie eine Ermüdung der schnellzuckenden Typ II-Fasern zu erwarten, da diese im Gegensatz zu den Typ I-Fasern unter Belastung die Energie mehr anaerob bereitstellen und damit mehr Laktat produzieren (Kenney et al., 2015). Das könnte möglicherweise eine Verschiebung der Laktatleistungskurve nach unten (oder nach rechts) zur Folge haben. Auf jeden Fall wäre die maximale Laktatkonzentration und maximale Leistung im Vergleich zum erholten Zustand reduziert. Auch wenn die Typ I-Fasern ermüdungsresistenter sind, können diese Muskelfasern auf Grund von sehr umfangreichem Training geschädigt werden und damit ermüden (Kenney et al., 2015). Dies hätte

zur Folge, dass bei ansteigender Belastung früher Typ II-Fasern rekrutiert werden müssen, um die gleiche Leistung zu erbringen. Da die Typ II-Fasern die erforderliche Energie hauptsächlich auf anaerobem Weg bereitstellen, führt dies zu einem früheren Anstieg der Laktatproduktion und damit zu einer nach oben und möglicherweise auch nach links verschobenen Laktatleistungskurve.

Zieht man folglich maximale Parameter zur Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit heran, so scheint eine vollständige Erholtheit des Athleten notwendig zu sein, um die Ergebnisse eindeutig interpretieren zu können. Doch eine vollständige Erholung, wie sie für die Beurteilung von maximalen Parametern notwendig ist, führt zu einem Eingriff in den Trainingsalltag von Leistungssportlern und kann in der Regel nicht zu allen Saisonzeitpunkten gewährleistet werden. Auch hat eine notwendige völlige Ausbelastung wiederum einen Einfluss auf den aktuellen Ermüdungszustand des Athleten, was ebenfalls nicht zu allen Saisonzeitpunkten wünschenswert ist.

Wie einleitend beschrieben, wäre es vorteilhaft, einen Parameter der Leistungsdiagnostik zu haben, der unabhängig von Ausbelastung und Ermüdung Fortschritte in der Ausdauerleistungsfähigkeit diagnostizieren kann. Hierfür könnten submaximale Laktatschwellen die geeigneten Parameter sein. Bisher hat allerdings keine Studie den Einfluss von Ermüdung auf die Laktatschwellenkonzepte gezielt überprüft. Aus diesem Grund war es das Ziel der dritten Studie der vorgelegten Dissertation, den Einfluss von trainingslagerinduzierter Ermüdung auf die Leistung submaximaler Laktatschwellenkonzepte zu überprüfen.

4.2 Darstellung der empirischen Untersuchung

4.2.1 Fragestellung und Arbeitshypothese

Ziel dieser Studie war es, trainingslagerinduzierte Ermüdung durch den Abfall der mittleren Leistung im 40-km-Zeitfahren zu operationalisieren und den Einfluss dieser Ermüdung auf das Ergebnis der anaeroben Schwelle, die nach den vier gebräuchlichen Laktatschwellenmodellen (Stegmann- (Stegmann et al., 1981), D_{max} - (Cheng et al., 1992), Dickhuth- (Dickhuth et al., 1991) und 4-mmol-Schwelle (Heck, Mader, et al., 1985)) bestimmt wurde, zu überprüfen. Des Weiteren sollte der Einfluss der Ermüdung auf die Ergebnisse anderer Parameter aus dem klassischen Stufentest und dem 30-s-Wingate Test überprüft werden.

Daher lautet die Arbeitshypothese, dass es im Gegensatz zu den maximalen Parametern der Leistungsdiagnostik durch ein Trainingslager zu keiner ermüdungsbedingten Veränderung der anaeroben Schwelle kommt.

4.2.2 Untersuchungsmethodik

4.2.2.1 Personenstichprobe

Die Personenstichprobe setzt sich aus den gleichen Probanden wie in Studie 2 zusammen.

4.2.2.2 Variablenstichprobe

Im Folgenden werden die Hauptzielparameter der Studie sowie die angewendeten Mess- und Auswertungsverfahren erläutert oder auf die Methodik in Studie 1 oder 2 verwiesen.

Hauptzielparameter

Die Hauptzielparameter der Studie waren die Leistung im simulierten 40-km-Zeitfahren, im 30-s-Wingate-Test sowie die Leistung an der „zweiten“ Laktatschwelle, die nach den Methoden von Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und 4-mmol bestimmt wurden. Diese Parameter wurden wie in Studie 1 und 2 bestimmt.

Leistung im 40-km-Zeitfahren

Das Zeitfahren wurde wie in Studie 2 beschrieben durchgeführt.

Schwellenkonzepte

Die Laktatschwellen wurden wie in Studie 1 und 2 bestimmt.

Mittlere und maximale Leistung im Wingate-Test

Die mittlere und maximale Leistung im Wingate-Test wurden wie in Studie 2 erfasst.

Laktatbestimmung

Die Laktatbestimmung erfolgte wie in Studie 1 und 2.

Anthropometrische Daten

Die anthropometrischen Daten wurden wie in Studie 1 erfasst.

4.2.2.3 Ablauf der Gesamtuntersuchung

Die Untersuchungen begannen nach drei Ruhetagen mit dem ersten Testtag und wurden an den Tagen 8 und 11 wiederholt. An jedem Testtag wurde zunächst ein 40-km-Zeitfahren (TT1, TT2, TT3), dann ein 30-s-Wingate Test (WT1, WT2, WT3) und zum Abschluss ein institutsüblicher Stufentest (ST1, ST2, ST3) durchgeführt. Zwischen den einzelnen Tests lag eine Pause von zwei Stunden. Zwischen den ersten beiden Testtagen lagen sechs Trainingstage, in denen die Teilnehmer insgesamt 11 Trainingseinheiten absolvierten. Davon waren zwei Einheiten hochintensive Intervalle (HIIT), die aus drei Serien mit je fünf Sprints über dreißig Sekunden und dreißig Sekunden Pause bestanden. Die Serienpause betrug 10 Minuten. Diese Einheiten wurden an dem zweiten und fünften Trainingstag vormittags durchgeführt. Drei Einheiten waren ein sogenanntes „Schwellentraining“, bei dem die Sportler für eine Stunde herzfrequenzgesteuert an ihrer Stegmann-Schwelle fuhren. Diese Einheiten wurden an dem ersten, dritten und sechsten Trainingstag vormittags durchgeführt. Der vierte Vormittag war trainingsfrei. An den sechs Nachmittagen absolvierten die Probanden je eine dreistündige Ausfahrt im Grundlagenausdauerbereich herzfrequenzorientiert bei 80 % der Stegmann-Schwelle. Die Tage 9 und 10 waren trainingsfrei (Abbildung 18). Alle Trainingseinheiten wurden überwacht und größtenteils mit dem Fahrrad begleitet. Mittels Pulsuhr (Polar RS800; Polar Electro Oy, Kempele, Finnland) wurde das Training gesteuert und aufgezeichnet. Während der gesamten Studienphase wurde zudem die Ernährung der Probanden durch Ernährungstagebücher erfasst und in einer separaten Bachelorarbeit ausgewertet (Weinmann, 2014).

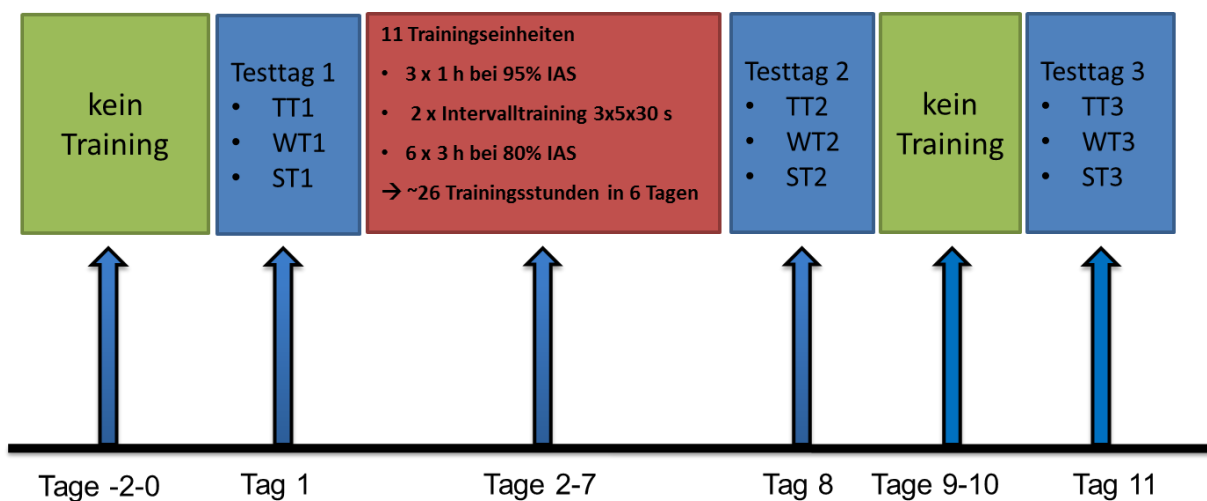


Abbildung 18: Studienverlauf der dritten Studie (TT = Zeitfahren, WT = Wingate-Test, ST = Stufentest, IAS = individuelle anaerobe Schwelle).

4.2.3 Statistische Hypothese

Im Folgenden werden die Arbeitshypothesen in statistische Hypothesen umgewandelt:

H6: Die Leistung im 40-km-Zeitfahren nimmt im Mittel nach den sechs Trainingstagen ab und steigt nach den zwei Ruhetagen wieder an.

H7: Die Leistungen an der individuellen anaeroben Schwelle nach Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und 4-mmol ändern sich nicht von Tag 1 zu 8 und von Tag 8 zu 11.

H8: Die maximale Leistung im Stufentest und die Leistungen im Wingate-Test ändern sich entsprechend der Leistung im Zeitfahren.

4.2.4 Statistik

Alle Berechnungen, Ergebnisse und Abbildungen wurden mit der Computersoftware Statistica (Version 8) oder mit Microsoft Office Excel (2013) erstellt.

Deskriptiv werden Daten sowohl als Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD), als auch als mittlere Differenzen (MD) und Standardabweichung (SD) dargestellt.

Deskriptiv wird die Anzahl der Probanden, deren Laktatschwelle sich an Tag 8 mehr als die jeweilige Spontanvariabilität ($\pm 2,5\%$ für Stegmann, $\pm 2,8\%$ für Dickhuth, $\pm 1,6\%$ für D_{\max} und $\pm 1,4\%$ für 4-mmol) von Tag 1 und Tag 11 unterscheidet (Hopkins et al., 2001), dargestellt.

Zur Bestimmung der Unterschiede zwischen den Testtagen wurde für die Leistungs- und Beanspruchungsparameter aus dem Zeitfahren, dem Stufentest und dem Wingate-Test eine ANOVA mit Messwiederholung berechnet. Bei signifikanten Unterschieden wurde ein post-hoc Scheffé-Test gerechnet. Die Berechnung der Teststärke ($\alpha = 0,05$) erfolgte post-hoc als Powerkalkulation mittels G*Power (Version 3.1.9.2).

Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

Zum Vergleich des Unterschieds in den Belastungs- und Beanspruchungsparametern wurden mittels „Cohen's d“ und den entsprechenden 90 %-Konfidenzintervallen die Effektstärken der Unterschiede zwischen Tag 1 und 8, sowie Tag 8 und 11 bestimmt. Die Schwellen für die Effektstärke wurden als 0,2, 0,6, 1,2, 2,0 und 4,0 für klein, moderat, groß, sehr groß und extrem groß festgelegt (Hopkins, 2000).

Zum Vergleich der Herzfrequenz- und Laktatverläufe im Stufentest wurde je eine zweifaktorielle ANOVA (Faktor „Test“: 3-fach gestuft, Faktor „Stufe“: 5-fach gestuft) berechnet.

Neben der allgemein anerkannten Inferenzstatistik wurden unter Berücksichtigung der 90 %-Konfidenzintervalle auch Wahrscheinlichkeiten berechnet (Hopkins et al., 2009). Die Berechnungen erfolgten mittels Kalkulationstabellen, die online verfügbar sind (Hopkins, 2016). Dabei werden Wahrscheinlichkeiten für positive, triviale und negative Veränderungen angegeben. Anschließend werden diese Angaben folgendermaßen interpretiert (Hopkins et al., 2009):

- < 1 % „almost certainly not“
- > 1 % bis 5 % „very unlikely“
- > 5 % bis 25 % „unlikely“
- > 25 % bis 75 % „possibly“
- > 75 % bis 95 % „likely“
- > 95 % bis 99 % „very likely“
- > 99 % „almost certainly“

Falls die Wahrscheinlichkeit sowohl für einen positiven, als auch für einen negativen Effekt mehr als 5 % beträgt, wird sie als „unclear“ bezeichnet. Dabei wurde, wie in den meisten Studien üblich, ein kleiner Effekt ($d = 0,2$) als bedeutsam eingestuft (Hopkins et al., 2009).

4.3 Ergebnisse

Die Probanden absolvierten das 40-km-Zeitfahren an Tag 1 im Mittel in 3942 ± 212 s, an Tag 8 in 4008 ± 201 s und an Tag 11 in 3929 ± 219 s. Der Unterschied zwischen Tag 1 und Tag 8 sowie Tag 8 und Tag 11 war dabei hochsignifikant ($p < 0,001$). Ebenso wurden signifikante Unterschiede ($p < 0,01$) in der mittleren Leistung im Wingate-Test zwischen Tag 1 (701 ± 58 W) und Tag 8 (679 ± 65 W), sowie zwischen Tag 8 und Tag 11 (696 ± 69 W) gefunden. Die maximale Leistung im Stufentest unterschied sich ebenfalls signifikant ($p < 0,01$) zwischen den Messtagen 1 (338 ± 30 W) und 8 (327 ± 31 W) sowie den Messtagen 8 und 11 (347 ± 30 W; $p < 0,001$). Alle weiteren Ergebnisse sind in den Tabellen 17 und 18 dargestellt. Die submaximalen Laktatverläufe (Abbildung 19) zwischen den Messzeitpunkten zeigten keinen signifikanten Unterschied (Interaktionseffekt: $F[8, 176] = 1,5$; $p = 0,16$). Die submaximalen Herzfrequenzverläufe (Abbildung 20) sind hingegen signifikant unterschiedlich zwischen den Messzeitpunkten (Interaktionseffekt: $F[8, 176] = 3,7$; $p < 0,001$).

Tabelle 16: Maximale Beanspruchungsparameter (Herzfrequenz [HF], Blutlaktatkonzentration [BLa] und subjektives Belastungsempfinden [RPE]) aus dem Zeitfahren, Wingate- und Stufentest ($n = 23$, * $p < 0,05$ zu Tag 1, # $p < 0,05$ zu Tag 8; Alter: 29 ± 8 J).

	HF _{max} [/min]	BLa _{max} [mmol/l]	RPE _{max}
Zeitfahren 1	185 ± 8	8,0 ± 2,4	9,5 ± 0,7
Zeitfahren 2	170 ± 9*	6,5 ± 2,6*	9,5 ± 0,7
Zeitfahren 3	190 ± 9 [#]	9,2 ± 2,4 [#]	9,5 ± 1,0
Wingate-Test 1	-	11,2 ± 2,0	-
Wingate-Test 2	-	9,7 ± 2,1*	-
Wingate-Test 3	-	10,7 ± 2,2 [#]	-
Stufentest 1	188 ± 8	9,3 ± 1,9	9,5 ± 0,5
Stufentest 2	175 ± 9*	7,8 ± 2,4*	9,6 ± 0,5
Stufentest 3	183 ± 8 [#]	9,9 ± 2,3 [#]	9,4 ± 0,9

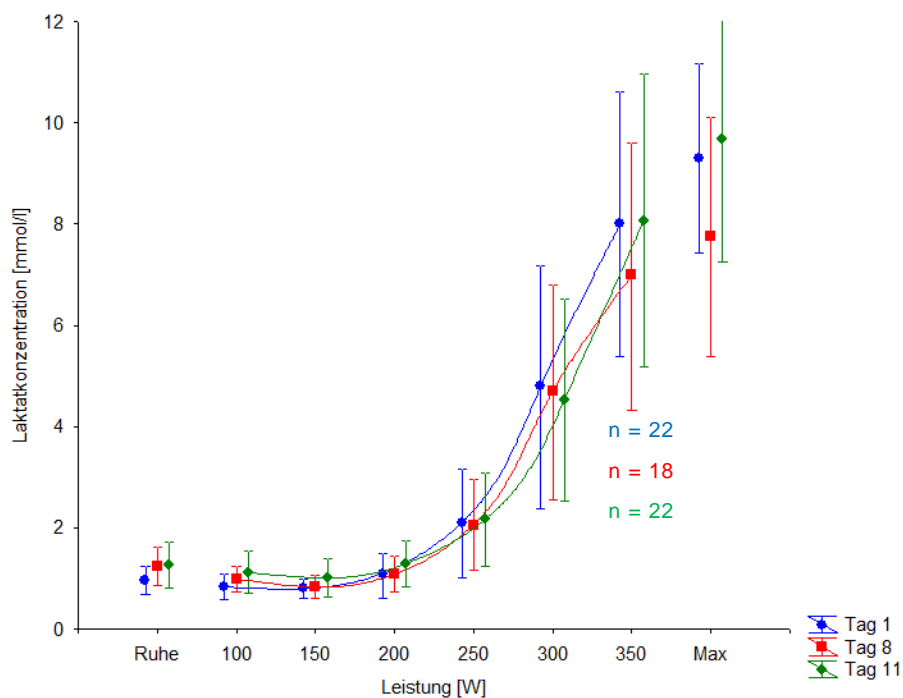


Abbildung 19: Mittlere Laktatverläufe im Stufentest vor (Tag 1) und nach einem 6-tägigen Trainingslager (Tag 8), sowie nach weiteren zwei Regenerations-Tagen (Tag 11) ($n = 23$).

Tabelle 17: Veränderungen der leistungsphysiologischen Parameter vor (Tag 1) und nach (Tag 8) einem 6-tägigen Radtrainingslager, sowie nach anschließenden zwei Regenerationstagen (Tag 11) (n = 23).

	Tag 1 MW ± SD	Tag 8 MW ± SD	Tag 11 MW ± SD	Tag 8 - 1 MD ± SD	Tag 8 - 1 d ± 90 % KI	% Chances (+/trivial/-)	Tag 11 - 8 MD ± SD	Tag 11 - 8 d ± 90 % KI	% Chances (+/trivial/-)
TT P_{mittel} [W]	236 ± 38	225 ± 35**	238 ± 40##	-11 ± 17	-0,29 ± 0,16	0/17/83 likely negative	13 ± 16	0,33 ± 0,14	94/6/0 likely positive
ST P_{max} [W]	338 ± 30	327 ± 31**	347 ± 30##	-11 ± 22	-0,36 ± 0,25	0/14/86 likely negative	20 ± 11	0,64 ± 0,13	100/0/0 almost certainly positive
ST VO_{2max} [l/min]	4,4 ± 0,4	4,2 ± 0,5	4,3 ± 0,5	-0,2 ± 0,5	-0,34 ± 0,38	2/51/47 possibly trivial	0,2 ± 0,3	0,05 ± 0,28	12/85/4 likely trivial
ST P_{Stegmann} [W]	265 ± 31	264 ± 30	270 ± 28#	-1 ± 11	-0,04 ± 0,12	0/98/1 very likely trivial	6 ± 9	0,20 ± 0,10	0/100/0 almost certainly trivial
ST P_{Dickhuth} [W]	268 ± 32	265 ± 32	270 ± 33	-3 ± 15	-0,08 ± 0,15	0/91/9 likely trivial	4 ± 11	0,12 ± 0,11	12/88/0 likely trivial
ST P_{Dmax} [W]	265 ± 29	256 ± 27**	269 ± 25##	-8 ± 14	-0,28 ± 0,17	0/21/79 likely negative	12 ± 8	0,40 ± 0,09	100/0/0 almost certainly positive
ST P_{4-mmol} [W]	295 ± 34	295 ± 31	297 ± 33	-1 ± 13	-0,02 ± 0,13	0/98/1 very likely trivial	2 ± 8	0,06 ± 0,08	0/100/0 almost certainly trivial
WT P_{max} [W]	904 ± 95	883 ± 87	904 ± 90	-21 ± 49	-0,21 ± 0,18	0/45/55 possibly negative	21 ± 56	0,21 ± 0,17	56/44/0 possibly positive
WT P_{mittel} [W]	701 ± 58	679 ± 65**	696 ± 69##	-25 ± 37	-0,42 ± 0,22	0/5/95 very likely negative	21 ± 22	0,35 ± 0,13	97/3/0 very likely positive

*signifikanter Unterschied zu Tag 1, #signifikanter Unterschied zu Tag 2; * und # p < 0,05; ** und ## p < 0,01; Mittelwert (MW) ± Standardabweichung (SD), Effektstärke nach Cohen (d) ± 90 %-Konfidenzintervalle (KI).

Tabelle 18: Veränderungen der leistungsphysiologischen Parameter vor (Tag 1) und nach (Tag 8) einem 6-tägigen Radtrainingslager, sowie nach anschließenden zwei Regenerationstagen (Tag 11) für die Athleten mit einer Reduktion der Zeit im Zeitfahren an Tag 8 und einem Anstieg zu Tag 11 von mehr als der Spontanvariabilität (1,2 %) (Hopkins et al., 2001) (n = 10).

	Tag 1 MW ± SD	Tag 8 MW ± SD	Tag 11 MW ± SD	Tag 8 - 1 MD ± SD	Tag 8 - 1 d ± 90 % KI	% Chances (+/trivial/-)	Tag 11 - 8 MD ± SD	Tag 11 - 8 d ± 90 % KI	% Chances (+/trivial/-)
TT P_{mittel} [W]	253 ± 38	228 ± 41**	252 ± 43##	-26 ± 13	-0,61 ± 0,18	0/0/100 almost certainly negative	25 ± 12	0,59 ± 0,17	100/0/0 almost certainly positive
ST P_{max} [W]	347 ± 36	331 ± 40*	347 ± 40#	-17 ± 19	-0,43 ± 0,28	0/8/92 likely negative	16 ± 9	0,41 ± 0,13	99/1/0 very likely positive
ST VO_{2max} [l/min]	4,5 ± 0,5	4,2 ± 0,7	4,3 ± 0,6	-0,4 ± 0,6	-0,63 ± 0,66	2/11/87 likely negative	0,1 ± 0,5	0,20 ± 0,57	49/39/12 unclear
ST P_{Stegmann} [W]	274 ± 34	274 ± 32	278 ± 32	0 ± 5	0,00 ± 0,07	0/100/0 almost certainly trivial	3 ± 9	0,09 ± 0,14	9/91/0 likely trivial
ST P_{Dickhuth} [W]	277 ± 35	277 ± 35	280 ± 33	0 ± 13	-0,01 ± 0,19	4/91/5 likely trivial	3 ± 14	0,08 ± 0,22	16/82/2 likely trivial
ST P_{Dmax} [W]	274 ± 36	260 ± 38**	274 ± 34##	-14 ± 13	-0,35 ± 0,19	0/8/92 likely negative	14 ± 9	0,35 ± 0,13	97/3/0 very likely positive
ST P_{4-mmol} [W]	306 ± 36	306 ± 32	306 ± 33	0 ± 11	0,00 ± 0,16	3/95/2 very likely trivial	1 ± 8	0,01 ± 0,11	1/99/0 very likely trivial
WT P_{max} [W]	910 ± 95	904 ± 79	921 ± 85	-6 ± 55	-0,05 ± 0,31	8/71/21 unclear	17 ± 29	0,17 ± 0,16	36/64/0 possibly trivial
WT P_{mittel} [W]	720 ± 49	684 ± 67*	710 ± 68	-35 ± 35	-0,66 ± 0,38	0/3/97 very likely. negative	25 ± 19	0,47 ± 0,21	98/2/0 very likely positive

*signifikanter Unterschied zu Tag 1, #signifikanter Unterschied zu Tag 2; * und # p < 0,05; ** und ## p < 0,01; Mittelwert (MW) ± Standardabweichung (SD), Effektstärke nach Cohen (d) ± 90 %-Konfidenzintervalle (KI).

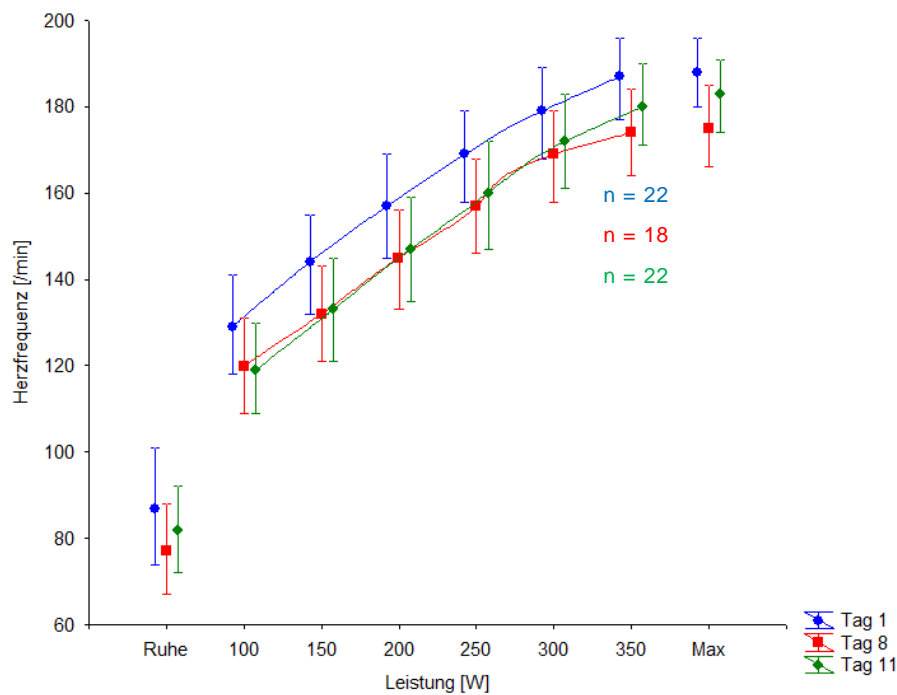


Abbildung 20: Mittlere Herzfrequenzverläufe im Stufentest vor (Tag 1) und nach einem 6-tägigen Trainingslager (Tag 8), sowie nach weiteren zwei Regenerations-Tagen (Tag 11) ($n = 23$).

Die mittleren maximalen Beanspruchungsparameter sind in Tabelle 16 dargestellt. Dabei erfüllten alle 23 Probanden mindestens zwei der drei Ausbelastungskriterien für das Zeitfahren und den Stufentest (Meyer, Scharhag, et al., 2005) an Testtag 1 und Testtag 3 und ein Kriterium für den Wingate-Test an allen drei Testtagen:

- maximale Laktatkonzentration über 6 mmol/l (für Ausdauertrainierte modifiziert),
- maximale Herzfrequenz über 200 minus Lebensalter [J],
- maximales subjektives Belastungsempfinden (RPE_{max}) über 9.

Die maximalen Beanspruchungsparameter Herzfrequenz und Blutlaktatkonzentration waren im ermüdeten Zustand an Tag 8 in allen drei Belastungstests signifikant niedriger als im erholteten Zustand an Tag 1 und Tag 11. Dabei war das mittlere subjektive Belastungsempfinden unverändert (Tabelle 16). Dies stellt eine klassische Konstellation akuter Ermüdung dar.

*Tabelle 19: Unterschiede (Mittlere Differenzen [MD] und 95 %-Konfidenzintervalle [LoA]) der Laktatschwellen zwischen Tag 1, 8 und 11 (n = 23; * p < 0,05).*

	Tag 8 - 1		Tag 11 - 8		ANOVA
	MD ± SD [W]	Power [1 - β]	MD ± SD [W]	Power [1 - β]	
Stegmann	-1 ± 11	0,11	6 ± 9*	-	F (2, 44) = 4,5; p = 0,02
Dickhuth	-3 ± 15	0,24	4 ± 11	0,52	F (2, 44) = 1,1; p = 0,34
D_{max}	-8 ± 14*	-	12 ± 8*	-	F (2, 44) = 12,5; p < 0,01
4-mmol	-1 ± 13	0,09	2 ± 8	0,32	F (2, 44) = 0,4; p = 0,69

Für die Laktatschwellen zwischen Tag 1 und Tag 8, sowie Tag 8 und Tag 11 wurde bei nicht signifikantem Unterschied eine Powerkalkulation durchgeführt (Tabelle 19). In Abbildung 19 sind die Einzelfallverläufe der einzelnen Schwellenkonzepte an Tag 1, Tag 8 und Tag 11 dargestellt. Tabelle 21 zeigt die Anzahl der Probanden mit einer Abweichung der Laktatschwelle von mehr oder weniger als die in der Literatur angegebene Spontanvariabilität.

Tabelle 20: Anzahl der Probanden mit einer Abweichung der Laktatschwellen größer als die in der Literatur angegebenen Spontanvariabilitäten (SV; ± 2,5 % für Stegmann, ± 2,8 % für Dickhuth, ± 1,6 % für D_{max} und ± 1,4 % für 4-mmol; n = 23).

	Δ Tag 8 - 1		Δ Tag 11 - 8	
	> SV [n]	< SV [n]	> SV [n]	< SV [n]
Stegmann	8	15	13	10
Dickhuth	11	12	12	11
D_{max}	20	3	20	3
4-mmol	13	10	12	11

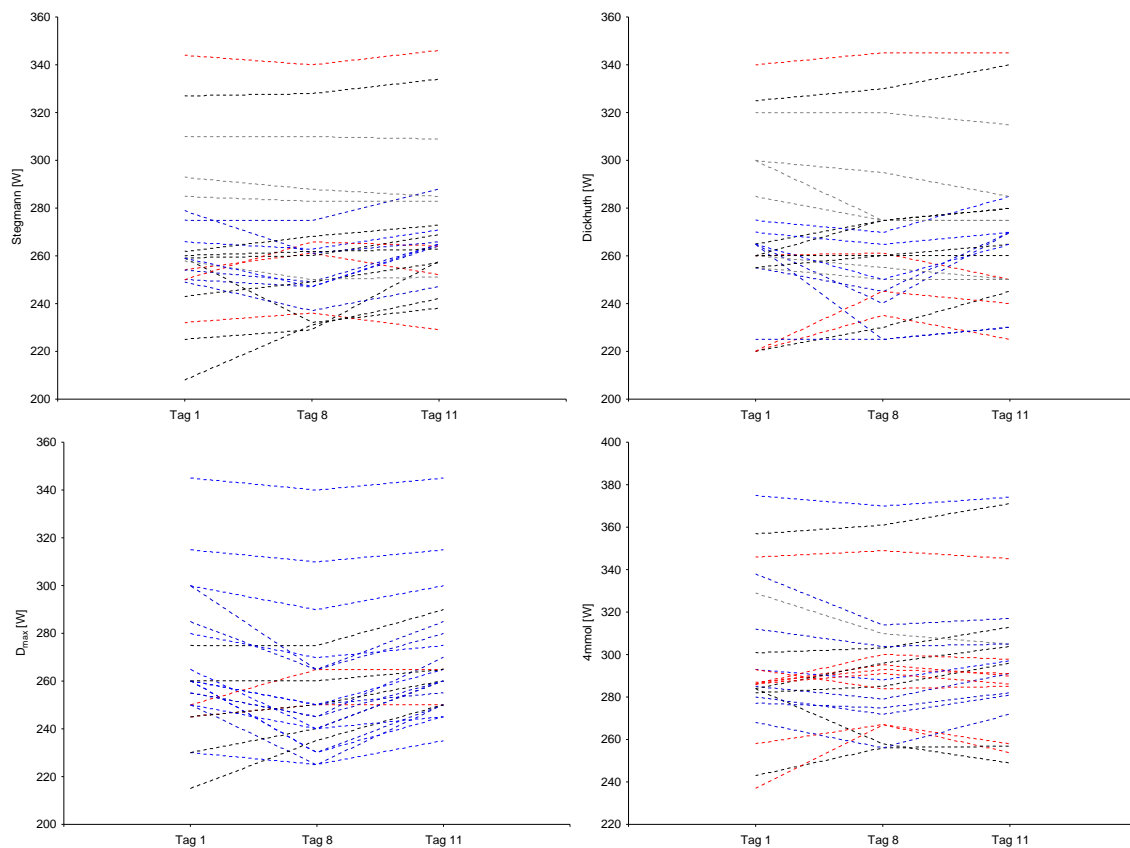


Abbildung 21: Individuelle Verläufe der Laktatschwellen (Stegmann, Dickhuth, 4-mmol, D_{max} - im Uhrzeigersinn) vor (Tag 1), direkt nach (Tag 8) und zwei Regenerationstage nach (Tag 11) einem Trainingslager ($n = 23$; blau = Abfall und Anstieg, rot = Anstieg und Abfall, schwarz = Anstieg, grau = Abfall).

4.3.1 Hypothesenprüfung

H6: Die mittlere Leistung im 40-km-Zeitfahren nimmt nach den sechs Trainingstagen ab und steigt nach den zwei Ruhetagen wieder an.

Die Hypothese 6 kann damit angenommen werden.

H7: Die Leistungen an der individuellen anaeroben Schwelle nach Stegmann, Dickhuth, D_{max} und 4-mmol ändern sich nicht von Tag 1 zu 8 und von Tag 8 zu 11.

Die Hypothese 7 kann mit Ausnahme für die D_{max} ebenfalls angenommen werden.

H8: Die maximale Leistung im Stufentest und die Leistungen im Wingate-Test ändern sich entsprechend der Leistung im Zeitfahren.

Auch die Hypothese 8 kann angenommen werden.

4.4 Diskussion

Ziel dieser Studie war es, den Einfluss einer induzierten Ermüdung durch ein typisches Trainingslager auf die vier gebräuchlichen Laktatschwellenmodelle (Stegmann, D_{max} , Dickhuth und 4-mmol) sowie auf andere Parameter der klassischen Leistungsdiagnostik zu überprüfen.

4.4.1 Ergebnisdiskussion

Trainingslagerinduzierte Ermüdung

Im Mittel zeigten sich ein erwarteter Abfall in der Leistung im Zeitfahren von Tag 1 zu Tag 8 von 4,7 % und wieder ein Anstieg von Tag 8 zu Tag 11 von 5,5 %. Dies entspricht auch dem Ergebnis anderer Studien, bei denen es durch eine intensive Trainingsphase zu einer Reduktion der Leistung im Zeitfahren um etwa 4 % kam (Halson et al., 2002; Jeukendrup et al., 1992; Rietjens et al., 2005) und in einer anschließenden Regenerationsphase die Ausgangswerte wieder überstiegen wurden (Jeukendrup et al., 1992). Dieser Verlauf in der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit gibt die mittelfristige Ermüdung und Erholtheit der Sportler durch das sechstägige Trainingslager und die zwei Ruhetage an. Im Mittel zeigen die P_{max} im Stufentest und die P_{mean} im 30-s-Wingate-Test diese Ermüdung und Erholtheit ebenfalls an.

Da es in der vorgelegten Arbeit zu einem Abfall der Leistung im 40-km-Zeitfahren kam, kann man davon ausgehen, dass die Probanden ermüdet waren und sich an Tag 8 entweder in einem funktionellen oder nicht-funktionellen Overreaching befanden (Meeusen et al., 2013; Mujika, 2012). Sowohl die Herzfrequenzen als auch die Laktatkonzentrationen im Zeitfahren waren an Tag 8 signifikant niedriger. Dies ist mit den Ergebnissen anderer Studien im Einklang, die eine ähnliche Reaktion nach intensiven Trainingsphasen nachweisen (Faude, Meyer, et al., 2009; Halson et al., 2002; Jeukendrup et al., 1992; Urhausen et al., 1998). Diese Ergebnisse können als eine Verbesserung der aeroben Leistungsfähigkeit fehlinterpretiert werden, wenn man nicht das subjektive Belastungsempfinden (RPE) mit abfragt. Ein nützliches Tool, um sowohl Leistungsveränderungen als auch Ermüdung und Erholung zu diagnostizieren, kann der submaximale LSCT („Lamberts and Lambert Submaximal Cycle Test“) sein, der Belastung (W), Beanspruchung (HF) und subjektives Belastungsempfinden (RPE) in Beziehung setzt (Lamberts, Swart, Noakes, & Lambert, 2011). Sind die Beanspruchungsparameter Herzfrequenz und Blutlaktatkonzentration bei gleicher Belastung niedriger, so wird dies in der Regel mit einer Leistungssteigerung in Verbindung gebracht. Liegt in dem oben angesprochenen Szenario aber das subjektive Belastungsempfinden für die

gegebene Belastung gleichhoch oder sogar höher, kann auf eine Ermüdung des Athleten geschlossen werden (Hammes et al., 2016). Dies hat für zukünftige Studien zur Folge, dass sich der LSCT als Surrogatparameter für Ermüdung und Erholung eignen könnte.

In einer kürzlich veröffentlichten Studie wird versucht, den Grund für die reduzierten submaximalen und maximalen Herzfrequenzen zu belegen. Es konnte gezeigt werden, dass es bei Triathleten, die durch eine Phase mit erhöhter Trainingsbelastung im Stadium des Overreaching sind, zu reduzierten Herzzeitvolumina kommt und dies sowohl für maximale als auch submaximale Belastungen zutrifft (Le Meur et al., 2014). Begründet wurde dies mit einer reduzierten trainingsinduzierten Adrenalinreaktion von ermüdeten Athleten, was im Blut auch nachgewiesen werden konnte. Da die Fähigkeit des Herzens, Blut zur Arbeitsmuskulatur zu pumpen, zu einem leistungslimitierenden Faktor gezählt werden kann (Delp & Laughlin, 1998; Radegran, Blomstrand, & Saltin, 1999), ist ein reduziertes Herzzeitvolumen, falls es nicht durch eine erhöhte arteriovenöse Sauerstoffdifferenz ausgeglichen werden kann, mit einer reduzierten Leistungsfähigkeit verbunden. Das Herzzeitvolumen kann zum einen durch das Schlagvolumen und zum anderen durch einen Anstieg der Herzfrequenz gesteigert werden (Brooks et al., 2000; Kenney et al., 2015). Dabei sind die spezifischen Anpassungen an ein Ausdauertraining mittlerweile gut dokumentiert. So kann das maximale Herzzeitvolumen durch ein längerfristiges Ausdauertraining signifikant gesteigert werden (Saltin et al., 1998). So weisen sowohl trainierte als auch professionelle Radsportler im Gegensatz zu untrainierten Normalpersonen vergrößerte Herzen auf. Die Vergrößerung des Ventrikels führt zu einem größeren Schlagvolumen während Belastung (Hoogsteen et al., 2003; Lucia, Carvajal, Boraita, et al., 1999). Diese Anpassungen deuten darauf hin, dass die Erbringung von Leistung im Radsport durch die Bereitstellung von Sauerstoff an die Arbeitsmuskulatur durch das Herzzeitvolumen limitiert ist (Brooks et al., 2000; Green, 1997; Tonkonogi & Sahlin, 1997). Die Bereitstellung von Sauerstoff kann aber auch durch die Diffusion des Sauerstoffs vom Blut in die Muskulatur (arteriovenöse Sauerstoffdifferenz) limitiert sein (Abbiss & Laursen, 2005). Hier konnte gezeigt werden, dass es bei Triathleten im Overreaching unter Belastung zu einer erhöhten arteriovenösen Sauerstoffdifferenz kommt, um das reduzierte Herzzeitvolumen zu kompensieren (Le Meur et al., 2014). Dieses Modell besagt, dass es durch Ermüdung zu einer reduzierten belastungsinduzierten Adrenalinausschüttung kommt, welche in der Folge ein reduziertes Herzzeitvolumen und, falls die arteriovenöse Sauerstoffdifferenz dies nicht kompensieren kann, eine reduzierte Leistungsfähigkeit nach sich zieht. Dies wird mit den Daten der vorliegenden Arbeit unterstützt, zumindest was die reduzierten Herzfrequenzen und

Leistungen angeht. Da die (sub)maximalen Herzfrequenzen im ermüdeten Zustand nominell reduziert sind (Abbildung 20) könnte dies für herzfrequenzgesteuerte Trainingsempfehlungen im Trainingsalltag zu erheblichen Unterschieden führen, was die metabolisch angestrebten Trainingsbereiche angeht.

Die Ergebnisse im Wingate-Test widersprechen dabei den bisherigen Erkenntnissen (Urhausen et al., 1998). So konnte in einer Langzeitbeobachtung über 19 Monate bei 15 Athleten im Zustand des Übertrainings kein Einfluss auf die Leistung im 30-s-Wingate-Test gefunden werden. Die reduzierte anaerobe Leistungsfähigkeit der Athleten in der vorliegenden Studie könnte auch damit zusammenhängen, dass die Probanden den Wingate-Test zwei Stunden nach dem 40-km-Zeitfahren durchführten. Zwar hat das Zeitfahren potentiell an allen drei Testtagen einen identischen Einfluss auf die anschließende Leistung im Wingate-Test, allerdings könnte dieser Einfluss im ermüdeten Zustand ein anderer, stärker ermüdender sein. Dass die Athleten in der Arbeit von Urhausen et al. (1998) den Wingate-Test ohne vorherige Belastung an dem Testtag durchführten, könnte möglicherweise ein Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse sein.

Für die P_{\max} konnte ein Einfluss von trainingslagerinduzierter Ermüdung bisher nur teilweise nachgewiesen werden. Einige Studien fanden nach intensiven Trainingsphasen eine Reduktion (Bosquet et al., 2001; Fry et al., 1992; Halson et al., 2002; Hedelin et al., 2000; Jeukendrup et al., 1992), wohingegen andere Arbeiten keinen solchen Abfall beobachteten (Faude, Meyer, et al., 2009; Lehmann et al., 1992; Rietjens et al., 2005; Urhausen et al., 1998). Allerdings hatten die Athleten nicht in allen Studien einen Abfall in der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit und waren daher nicht in gleicher Weise nachweislich ermüdet.

Einfluss der Ermüdung auf die Laktatschwellen

Bei der Betrachtung des Einflusses der trainingslagerinduzierten Ermüdung auf das Ergebnis in den submaximalen Schwellenkonzepten lässt sich im Mittel kein Unterschied für die Stegmann-, Dickhuth- und 4-mmol-Schwelle feststellen. So liegt die mittlere Differenz für die einzelnen Konzepte zwischen 1 W und 8 W für die Ermüdung und 4 W bis 12 W für die Erholung und scheint „fast gewiss trivial“ zu sein. Lediglich D_{\max} liegt im ermüdeten Zustand statistisch mit einem moderaten Effekt tiefer als im erholten (-8 ± 14 W). Der Einfluss der Ermüdung auf die D_{\max} -Schwelle ist „bestimmt negativ“. Auch zum erholten Zustand an Tag 11 zeigt sich ein statistischer Unterschied mit einem kleinen Effekt, der als „fast gewiss positiv“ interpretiert wird.

Berücksichtigt man allerdings die Spontanvariabilität (Variationskoeffizient) der einzelnen Parameter (Hopkins et al., 2001), die größtenteils auf dem Laufband ermittelt wurden, so liegt diese bei 1,4 % für die 4-mmol-Schwelle (Pfitzinger & Freedson, 1998), bei 1,6 % für die D_{\max} -Methode (Zhou & Weston, 1997), bei 2,5 % für die Stegmann-Schwelle (McLellan & Jacobs, 1993) und bei 2,8 % für das Modell nach Dickhuth (Dickhuth et al., 1999). Betrachtet man auf dieser Grundlage die Änderungen der submaximalen Laktatschwellen durch Ermüdung und Erholung, so liegen die Modelle Stegmann (0,4 - 2,2 %), Dickhuth (1,1 - 1,5 %) und 4-mmol (0,3 - 0,7 %) im Mittel innerhalb dieser Grundvariabilität. Lediglich das D_{\max} -Modell weicht durch Ermüdung und Erholung (3,4 - 4,5 %) im Mittel stärker als die Grundvariabilität ab.

Dieses Bild bestätigt sich bei Betrachtung der Einzelverläufe (Abbildung 20) und ist auch verständlich, wenn man bedenkt, dass die Ermittlung der D_{\max} -Schwelle von zwei Punkten bestimmt wird: der Laktatkonzentration auf der 1. Stufe und der bei Ende der Belastung. Da die maximale Laktatkonzentration im Stufentest durch die Ermüdung reduziert ist, führt dies auch zu einer reduzierten Schwelle nach der D_{\max} -Methode. In der Literatur wird auch von reduzierten submaximalen Laktatkonzentrationen im ermüdeten Zustand berichtet, was auch einen Einfluss auf die (halb)fixen Schwellenmodelle haben sollte (Jeukendrup et al., 1992; Maassen & Busse, 1989b; Urhausen et al., 1998). Dieser Zusammenhang konnte in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht nachgewiesen werden. Der Grund für reduzierte Butlaktatkonzentrationen kann dabei an einer reduzierten Verfügbarkeit von Glukose in der Muskulatur oder einer Glykogenverarmung liegen. Eine Kohlenhydratverarmung nach einer intensivierten Trainingsphase kann daher nicht ganz ausgeschlossen werden, was nachgewiesenermaßen einen Einfluss auf die Laktatleistungskurven hat (Maassen & Busse, 1989b) und damit auch auf die (halb)fixen Schwellen hätte. Reduzierte submaximale Laktatkonzentrationen wurden in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht gefunden. Dies zeigt Vergleich der Laktatleistungskurven (Abbildung 19) und der nicht nachgewiesene ermüdungsbedingte Einfluss auf die fixe 4-mmol-Schwelle. So ist die Ermüdung in der vorliegenden Arbeit nicht durch reduzierte Kohlenhydratspeicher zu begründen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der begleitenden Bachelorarbeit, in der gezeigt werden konnte, dass es während des Trainingslagers (3107 ± 816 kcal) im Vergleich zu den drei Tagen davor (2160 ± 695 kcal) und den zwei Tagen danach (2547 ± 820 kcal) zu einem Anstieg der täglichen Energieaufnahme der Athleten kam (Weinmann, 2014). Somit kann geschlussfolgert werden, dass ein erhöhter Energiebedarf, wie er während eines solchen Trainingslagers notwendig ist, durch eine bedarfsgerechte Ernährung ohne Einfluss auf die Glykogenspeicher gedeckt werden kann.

Vergleich mit Trainingslagerstudien

Vergleicht man dies mit dem Ergebnis einer ähnlichen Trainingslagerstudie, so kam es dort bei Athleten mit ähnlicher Leistungsfähigkeit (IAS: $3,7 \pm 0,5$ W/kg zu $3,6 \pm 0,5$ W/kg) zu einer signifikanten positiven Änderung der Stegmann-Schwelle sowohl direkt nach einem intensiven Trainingslager, als auch in der anschließenden Phase der Erholung (Faude, Meyer, et al., 2009). Allerdings war die sportartspezifische Leistungsfähigkeit im 30-min-Zeitfahren direkt nach dem Trainingslager auch nicht reduziert. Deshalb ist davon auszugehen, dass diese Athleten durch das Trainingslager nicht ausreichend ermüdeten und die Erhöhung der Stegmann-Schwelle schon eine Trainingsadaptation an das Trainingslager war. Dafür spricht, dass sich P_{\max} und $VO_{2\max}$ im Stufentest weder durch das Trainingslager, noch durch die Phase der Erholung danach veränderten (Faude, Meyer, et al., 2009). Dieses zu der vorliegenden Arbeit unterschiedliche Ergebnis kann am unterschiedlichen Trainingsinhalt während des Trainingslagers liegen. Während in der Arbeit von Faude et al. das Training überwiegend aus Grundlagenausfahrten bestand, trainierten die Probanden in der vorliegenden Arbeit auch zwei Einheiten mit hochintensiven Intervallen und drei Einheiten an der Herzfrequenz entsprechend ihrer anaeroben Schwelle. Zudem absolvierten die Athleten in der älteren Studie ein deutlich längeres Trainingslager (13 Tage) als in der vorliegenden Arbeit (6 Tage).

Subgruppenanalyse

Zehn Athleten der getesteten Stichprobe zeigten im ermüdeten Zustand eine reduzierte Zeit im Zeitfahren von mehr als der Spontanvariabilität (1,0 %; Hopkins et al., 2001) von Tag 1 zu Tag 8 und eine Erhöhung dieser von Tag 8 zu Tag 11. Da bei diesen Athleten eine definitive Reduktion der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit vorliegt, ist von einem Zustand des Overreaching auszugehen. Diese Subgruppe zeigt dabei ähnliche Ergebnisse für den ermüdungsbedingten Einfluss auf die leistungsdiagnostischen Parameter wie die gesamte Stichprobe: Im Stufentest sind P_{\max} und D_{\max} und im Wingate-Test die P_{mean} an Tag 8 im Vergleich zu Tag 1 und Tag 11 reduziert, auf alle anderen Schwellen hat die Ermüdung keinen Einfluss (Tabelle 18).

Weitere Überlegungen und praktische Empfehlungen

Zu überlegen bleibt, welche Parameter der Ausdauerleistungsdiagnostik nun die „Wahrheit“ anzeigen. Die submaximalen Parameter sind stabil gegen den Einfluss von Ermüdung, zeigen aber ermüdungsbedingte Veränderungen in der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit nicht an. Die maximalen Parameter sind dagegen sensibel gegen den

Einfluss von Ermüdung aber kein „stabiler“ Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit. Die Ermüdung in der vorliegenden Studie war relativ kurzfristig und innerhalb von zwei Ruhetagen reversibel. Offen bleibt die Frage, wie es bei längerfristigen Veränderungen der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit aussieht. Hier konnte in einer aktuellen Studie gezeigt werden, dass sich bei einer 4-wöchigen Trainingspause von jugendlichen Spitzenradsportlern sowohl die Laktatschwellen (4-mmol [W/kg]: $-13,4 \pm 7,6 \%$) als auch die maximalen Parameter (P_{\max} [W/kg]: $-8,5 \pm 3,3 \%$) reduzierten (Maldonado-Martín, Cámara, James, Fernández-López, & Artetxe-Gezuraga, 2016). Zwar wurde die sportartspezifische Leistungsfähigkeit nicht getestet, bei einer solchen Trainingspause ist aber davon auszugehen, dass diese sich ebenfalls reduziert. Somit scheinen beide Parameter längerfristige Veränderungen anzeigen zu können. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Ergebnisse der Studie dem Konstrukt entsprechen, wonach die anaeroben Schwellen (mit Ausnahme der D_{\max} und im Gegensatz zur P_{\max}) die Grundlagen- ausdauer als eine (zumindest über eine Woche) überdauernde Eigenschaft darstellen.

4.5 Schlussfolgerung

Damit ist diese Arbeit die erste, die bei ermüdeten Athleten im Overreaching nachweisen konnte, dass eine reduzierte (Aus-)Belastbarkeit aufgrund einer trainingslagerinduzierten Ermüdung keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis in den submaximalen Schwellen nach Stegmann, Dickhuth und 4-mmol hat. Lediglich die D_{\max} -Schwelle ist aufgrund fehlender Ausbelastung im ermüdeten Zustand relevant reduziert. Für die maximalen Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit ist das Ergebnis uneinheitlich. Einige sind im ermüdeten Zustand erwartungsgemäß reduziert (P_{\max} im Stufentest, P_{mittel} im Wingate-Test) wohingegen andere unbeeinflusst bleiben ($VO_{2\max}$ und P_{\max} im Wingate-Test).

5 Studienlimitationen und Methodenkritik

Zunächst gelten die Ergebnisse der vorliegenden Studien lediglich für das getestete Probandenkollektiv von gesunden Männern zwischen 18 und 40 Jahren mit unterschiedlicher Ausdauerleistungsfähigkeit. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Personengruppe wie Kinder, Ältere oder Kranke müsste in weiteren Studien geklärt werden. Gegen eine Übertragung der Ergebnisse auf Kinder könnte die geringere Fähigkeit zur Laktatproduktion vor der Adoleszenz sprechen (Kenney et al., 2015). Jedoch konnte gezeigt werden, dass es keinen signifikanten Unterschied in der Laktatkonzentration am MLSS innerhalb der zweiten Lebensdekade zu geben scheint (Beneke, Heck, Schwarz, & Leithauser, 1996). Daher wäre es möglich, dass es in dieser Alterspanne auch keinen Einfluss auf die Laktatschwellen gibt (Beneke, Hutler, & Leithauser, 2000).

Zudem wurden in allen Studien die Schwellenkonzepte bei einem Laktatstufentest mit 50-W-Steigerung alle drei Minuten durchgeführt. Gezeigt wurde, dass eine Veränderung des Stufentestdesigns zu einer Veränderung der Laktatleistungskurve und damit auch der ermittelten Schwellen führen kann (Bentley et al., 2007). Folglich sind die Ergebnisse dieser Studien nur für das hier verwendete Stufendesign gültig. Besonders für die Bestimmung der 4-mmol-Schwelle führt dieses Protokoll zu einer Überschätzung der Leistung, was auch in Studie 1 nachgewiesen werden konnte. Dieses Ergebnis war daher zu erwarten und stützt die bisherigen Ergebnisse (Abbildung 13), die zeigen, dass für eine adäquate Bestimmung der 4-mmol-Schwelle längere Stufen erforderlich sind (Heck & Beneke, 2008).

Auch für die Dickhuth-Schwelle wurde ein anderes als das empfohlene Protokoll gewählt. Zur Berechnung der Dickhuth-Schwelle ist die exakte Bestimmung der aeroben Schwelle (als niedrigstes Laktatäquivalent) notwendig, weshalb ein Anstieg von 20 W alle drei Minuten empfohlen wird. Allerdings wird auch ein anderer Summand (+1,0 mmol/l) für Radfahrer empfohlen (Vogt et al., 2006). Bedenkt man, dass die Dickhuth-Schwelle in der ersten Studie im Mittel das MLSS und in der zweiten Studie die mittlere Leistung im Zeitfahren unterschätzte und dies vor allem bei NAT, so würde die empfohlene Methodik das MLSS vor allem für NAT definitiv noch mehr unterschätzen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus der Literatur (Heck & Beneke, 2008).

5.1 Studie 1

Der konstante Minuend von 106 W für die P_{\max} gilt nur für das vorgestellte Probandenkollektiv und wird bei anderen Personen mit höherem oder niedrigerem Körpergewicht

(z. B. Frauen und Kinder) vermutlich zu einem anderen Ergebnis führen, dazu könnte eventuell eine körperrgewichtbezogene Konstante herangezogen werden. Außerdem gilt dieses Ergebnis wahrscheinlich nur bei entsprechender Ausbelastung. Denkbar wäre zunächst auch eine prozentuale Angabe der P_{max} , allerdings könnte die Subtraktion einer Konstanten zu valideren Ergebnissen führen, da das MLSS von höher Ausdauertrainierten auch bei höheren Intensitäten in Relation zur P_{max} liegt (Lucia et al., 1998). Zudem deuten die Ergebnisse anderer Arbeiten darauf hin, dass prozentual von einem maximalen Parameter abgeleitete Belastungen zu unterschiedlichen metabolischen Beanspruchungen führen (Scharhag-Rosenberger et al., 2010). Um diese Frage zu klären, müssten Studien mit einer größeren Stichprobe und in Bezug zum Körpergewicht und der Ausdauerleistungsfähigkeit heterogenen Probanden durchgeführt werden.

Anzumerken ist auch, dass die MLSS-Definition von einem geringeren Laktatanstieg als 1,0 mmol/l zwischen der 10. und 30. Belastungsminute eines Dauertests willkürlich gewählt ist (Beneke, 2003; Beneke et al., 2011; Heck, 1990). In der Praxis sieht man im Einzelfall trotz akribischer Präanalytik ungewöhnliche Verläufe bei den Dauertests, auch wenn das typische Laktatverhalten beim Dauertest am MLSS, bei dem die Blutlaktatkonzentration in den ersten zehn Minuten deutlich ansteigt und dann zwischen der 10. und 30. Minute nicht mehr als 1,0 mmol/l ansteigt, am häufigsten vorkommt. So kann es vor allem unter ausdauertrainierten Athleten im Einzelfall auch zu einem langsameren Anstieg kommen, wodurch sich die Blutlaktatkonzentration erst zwischen der 10. und 20. Minute einpendelt. Dadurch ist der gemessene Wert bei der 10. Belastungsminute allerdings niedriger als erwartet und nach Definition ein Anstieg von mehr als 1,0 mmol/l zwischen der 10. und 30. Minute deutlich überschritten. In einem solchen Fall wird das MLSS vermutlich unterschätzt. Noch deutlicher wird es bei Athleten, die in etwa der Hälfte der Belastung eine sehr hohe Laktatkonzentration aufweisen (etwa 8 - 10 mmol/l) und es dann im Verlauf der zweiten Hälfte sogar zu einem Abfall der Laktatkonzentration kommt. Da die Konzentration nach 30 Minuten aber noch immer mehr als 1,0 mmol/l über der Konzentration bei 10 Minuten liegt, wird auch bei diesen Probanden die Belastung als oberhalb des MLSS angesehen und damit das MLSS des Probanden unterschätzt. Allerdings gibt es zurzeit keine Lösung für dieses Problem und das Verfahren gilt weiterhin als Goldstandard zur Bestimmung des MLSS in der Wissenschaft. Für die Praxis macht es aber deutlich, dass nicht alleine eine Entnahme bei der 10. und 30. Belastungsminute ausreicht, um über das MLSS zu urteilen. So kann ein Verlauf der Laktatkonzentration bis zur 30. Minute und darüber hinaus im Einzelfall durchaus Sinn ergeben. Hat ein Sportler zum Beispiel zwischen der 20. und 40. Minute

einen kleineren Anstieg als 1,0 mmol in der Blutlaktatkonzentration, so sollte diese Belastung aus Sicht des Autors ebenfalls als das MLSS anerkannt werden. Eine mögliche Definition des MLSS wäre eine Dauerbelastung von mindestens 30 Minuten Dauer, bei der es in den letzten 20 Minuten zu keinem Anstieg von mehr als 1,0 mmol/l kommt.

5.2 Studie 2 und 3

Die sportartspezifische Leistung in Studie 2 und 3 wurden in einem 40-km-Zeitfahren unter Laborbedingungen erhoben, was zwar den Vorteil einer höheren Standardisierung und damit vermutlich auch eine größeren Reliabilität hat, sich aber nicht zu 100 % auf den Wettkampf im Feld übertragen lässt. So wurde gezeigt, dass die Endzeit bei solchen simulierten Zeitfahren im Labor ($54:21 \pm 2:59$ min:s) niedriger ist als bei Zeitfahren auf der Straße ($57:29 \pm 3:22$ min:s; $p < 0,05$), sich die durchschnittliche Leistung sich aber nicht unterscheidet (303 ± 35 W, 312 ± 23 W; $p = 0,34$) und die durchschnittliche Leistung bei beiden Tests ähnlich reproduzierbar ist (Variationskoeffizient 1,9 % und 2,1 %) (Smith, Davison, Balmer, & Bird, 2001). Da sich die ermittelten Ergebnisse der hier vorgestellten Studie auf die Leistung beziehen, lässt sich vermuten, dass sich diese auch auf ein Zeitfahren unter realen Bedingungen übertragen ließen.

Die Tests in Studie 2 und 3 fanden an einem Tag im Abstand von je zwei Stunden in der Reihenfolge Zeitfahren, Wingate-Sprint und Stufentest statt. Nicht auszuschließen ist dabei, dass das Zeitfahren einen Einfluss auf das Ergebnis der beiden anderen Tests hat. Diese Reihenfolge wurde gewählt, da das Zeitfahren und der Wingate-Sprint eine Ausbelastung vom Sportler zwingend erfordern und dabei das Zeitfahren als derjenige Test eingeschätzt wurde, bei dem Ermüdung den höheren Einfluss auf das Ergebnis hat. Der Stufentest wurde als letzter Test durchgeführt, da bei diesem eine vollständige Ausbelastung zur Erstellung der Laktatschwellen nicht zwingend notwendig ist. Da die Probanden aber alle die Ausbelastungskriterien erfüllten, scheint es, dass es keinen übermäßigen Einfluss von vorher durchgeführten Ausdauer Tests auf das Ergebnis im Stufentest gibt. Dies konnte auch durch andere Arbeiten bestätigt werden (Scharhag-Rosenberger et al., 2014).

5.3 Studie 3

Studie 3 ist eine unkontrollierte Trainingsstudie und ein Problem bei überwachten Trainingsstudien stellt die Rekrutierung von passenden Probanden dar. Daher ist es schwierig, die nötige statistische Power ($1 - \beta = 0,8$) für solche Studie zu erreichen. Dennoch ist die Zahl der Probanden in dieser Studie im Vergleich zu ähnlichen Arbeiten, bei denen die Probandenzahl zwischen fünf und elf liegt, deutlich höher (Faude,

Meyer, et al., 2009; Fry et al., 1992; Halson et al., 2002; Jeukendrup et al., 1992; Lehmann et al., 1992; Rietjens et al., 2005).

Inwieweit sich die Ergebnisse auf andere Ermüdungszustände übertragen lassen ist fraglich. So kann schon eine andere Trainingsform, wie z. B. ein reines Grundlagentraining (Faude, Meyer, et al., 2009), zu einem anderen Ergebnis führen. Ein ermüdungsbedingter Einfluss auf die Laktatschwellen ist vor allem für zwei Szenarien denkbar:

- *Ausbelastung*: Zwar sind die submaximalen Schwellen (außer D_{max}) ausbelastungsunabhängig, doch muss für alle Konzepte eine Mindestbelastung vorliegen. So muss zur Bestimmung der 4-mmol- und Dickhuth-Schwelle offensichtlich der Punkt der Schwelle überschritten werden. Für Stegmann ist hingegen eine höhere Ausbelastung notwendig, da ein weiterer Anstieg der Blutlaktatkonzentration in der Nachbelastungsphase erforderlich ist (Coen, Urhausen, & Kindermann, 2001; Heck, Porwell, & Schulz, 2005).
 - *Glykogenverarmung*: Der Zustand der Ermüdung ist schwer von einer Kohlenhydratverarmung durch Mangelernährung oder extensivem Training abzugrenzen. Beides hat einen Einfluss auf die Laktatleistungskurve, wodurch vor allem (halb)fixe Schwellen verfälscht werden könnten.
-

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorgelegten Dissertation war es, den aktuellen Forschungsbedarf hinsichtlich der Validität von Laktatschwellenkonzepten im Radsport zu beschreiben und zu verringern. Daher wurden in dieser Arbeit die am häufigsten publizierten Laktatschwellenkonzepte 4-mmol (Heck, Mader, et al., 1985; Mader et al., 1976), Stegmann (Stegmann et al., 1981), Dickhuth (Dickhuth et al., 1999) und D_{\max} (Cheng et al., 1992) zunächst in der ersten Studie auf ihre Genauigkeit beim Abschätzen des MLSS überprüft. Je genauer diese Abschätzung sowohl im Mittel als auch auf individueller Ebene ist, desto exakter fallen auch die entsprechenden Trainingsempfehlungen in der Praxis aus. Auch in Bezug auf die Genauigkeit in der Übertragbarkeit der Schwellenkonzepte auf den Wettkampf bestand weiterer Forschungsbedarf. Daher war es das Ziel der zweiten Studie, die prädiktive Validität der Laktatschwellenkonzepte für die sportartspezifische Leistung im simulierten 40-km-Zeitfahren zu überprüfen. Völlig unklar war bislang, ob Ermüdung einen Einfluss auf submaximale Laktatschwellenkonzepte hat. Daher war das Ziel der dritten Studie dieser Arbeit, diesen Einfluss auf die vier ausgewählten Konzepte zu überprüfen. Im Folgenden werden die drei Studien noch einmal zusammengefasst dargestellt und abschließend bewertet, inwieweit das Ziel der Dissertation erreicht wurde.

6.1 Studie 1 – Validierung von Laktatschwellenkonzepten am MLSS

Verschiedene Modelle haben versucht, das MLSS aus der Laktatleistungskurve eines Stufentests abzuleiten. Offen ist allerdings bislang, wie genau die submaximalen Schwellenkonzepte bei der individuellen Bestimmung des MLSS und bei der Bestimmung der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit sind. Ziel dieser Arbeit war es daher, im ersten Schritt die submaximalen Schwellenkonzepte auf ihre individuelle Genauigkeit im Abschätzen des MLSS zu überprüfen (Kriteriumsvalidität).

Zur Bestimmung der submaximalen Schwellen absolvierten 26 gesunde Männer (25 ± 4 Jahre, 182 ± 5 cm, 79 ± 8 kg) einen fahrradergometrischen Stufentest (Start: 100 oder 150 W, Steigerung um 50 W alle 3 min). Es folgten zur Bestimmung des MLSS (242 ± 41 W) im Abstand von maximal 21 Tagen drei bis vier Dauerbelastungen über 30 Minuten. Zur Bestimmung des MLSS durfte die Laktatkonzentration zwischen der 10. und 30. Minute nicht mehr als 1,0 mmol/l ansteigen. Anhand des MLSS wurden die Probanden in zwei Hälften unterteilt (Mediansplit): Ausdauertrainierte (AT, $n = 13$): $3,7 \pm 0,3$ W/kg und Nicht-Ausdauertrainierte (NAT, $n = 13$): $2,6 \pm 0,4$ W/kg. Mittels Bland-Altman-

Plots wurden die mittleren Differenzen (MD) und 95 %-Konfidenzintervalle (LoA) dargestellt. Zusammenhänge zwischen dem MLSS und dem jeweiligen Schwellenkonzept wurden mittels Pearsons-Produkt-Moment-Korrelation berechnet.

Im Mittel zeigen alle Schwellenkonzepte sehr hohe signifikante Korrelationen zum MLSS ($r = 0,91$ bis $0,94$). Die LoA der Schwellenmodelle liegen zwischen 10 % und 20 % des MLSS. Dabei schätzen die Stegmann- und D_{\max} -Schwelle unabhängig von der Leistungsfähigkeit das MLSS ähnlich genau ab (Homoskedastizität). Die Genauigkeit der Dickhuth- und 4-mmol-Schwelle ist hingegen von der Leistungsfähigkeit der Probanden abhängig (Heteroskedastizität). Im Mittel überschätzt die 4-mmol-Schwelle das MLSS, wohingegen die Dickhuth-Schwelle es im Mittel eher unterschätzt.

Die individuellen Schwellenkonzepte Stegmann und D_{\max} schätzen das MLSS im Mittel unabhängig von der Ausdauerleistungsfähigkeit annähernd gleich gut und präzise ab. Die 4-mmol-Schwelle überschätzt es vor allem bei Ausdauertrainierten, wohingegen es die Dickhuth-Schwelle bei Untrainierten unterschätzt. Die individuelle Genauigkeit im Abschätzen des MLSS ist für eine Steuerung im Trainingsalltag für die meisten Athleten akzeptabel, sollte jedoch in Einzelfällen (besonders im Leistungssport) durch Trainingskontrollen überprüft werden.

6.2 Studie 2 – Validierung von Laktatschwellenkonzepten am 40-km-Zeitfahren

Das 40-km-Zeitfahren, bei dem die Energie zu 95 % aus dem aeroben System bereitgestellt wird, gilt als eine der wichtigsten Wettkampfdistanzen im Radsport. Unklar ist jedoch, inwieweit die Daten aus den klassischen Leistungstests in der Lage sind die Leistung im 40-km-Zeitfahren vorherzusagen. In der Praxis könnte ein geeigneter Prädiktor beispielsweise das Pacingverhalten optimieren. Daher war es das Ziel der zweiten Studie, die externe Validität der Laktatschwellenkonzepte hinsichtlich ihrer Genauigkeit in der Prädiktion der sportartspezifischen Leistung im simulierten 40-km-Zeitfahren zu überprüfen.

23 männliche Wettkampfradfahrer (29 ± 8 J, 180 ± 6 cm, 74 ± 8 kg, $VO_{2\max} 59,4 \pm 7,4$ ml/min/kg) absolvierten im Abstand von zwei Stunden ein 40-km-Zeitfahren (TT), einen 30-s-Wingate-Test (WT) und einen Stufentest (ST, 100 W + 50 W / 3 min). Aus dem ST wurden die maximale Sauerstoffaufnahme ($VO_{2\max}$) und die Schwellenkonzepte nach Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und 4-mmol bestimmt. Mittels Bland-Altman-Plots wurden die

mittleren Differenzen (MD) und 95 %-Konfidenzintervalle (LoA) dargestellt. Zusammenhänge zwischen dem MLSS und dem jeweiligen Schwellenkonzept wurden mittels Pearsons-Produkt-Moment-Korrelation berechnet.

Signifikante Zusammenhänge zur Leistung im Zeitfahren wurden für P_{\max} ($r = 0,89$), die Schwellenkonzepte Stegmann ($r = 0,83$), Dickhuth ($r = 0,80$), D_{\max} ($r = 0,79$) und 4-mmol ($r = 0,81$) und die $VO_{2\max}$ ($r = 0,56$) gefunden. In Relation zum Körpergewicht waren die Zusammenhänge zum TT für die P_{\max} und die Schwellenkonzepte auch signifikant, aber geringer. Alle anderen Parameter zeigten keine signifikanten Zusammenhänge. Die MD lag in allen Fällen über 29 W und die LoA über 17 % für alle Schwellenmodelle. Mit einer MD von 103, aber LoA von 12 % hat die P_{\max} die geringste Streuung in der Differenz zum TT.

Ziel einer Leistungsdiagnostik ist es auch, die aktuelle Wettkampfleistungsfähigkeit eines Sportlers zu ermitteln. Dazu scheint die P_{\max} für die Leistung im 40-km-Zeitfahren nominell ein besserer Prädiktor zu sein, als die submaximalen Laktatschwellen. Allerdings kann die individuelle Abweichung dennoch erheblich sein.

6.3 Studie 3 – Einfluss von Ermüdung auf die Leistungsdiagnostik

Leistungstests, für die eine maximale Ausbelastung nötig ist, können störende Eingriffe im Trainingsalltag von Leistungssportlern darstellen. Daher wäre es vorteilhaft, einen Parameter der Leistungsdiagnostik zu haben, der unabhängig von Ausbelastung und Ermüdung die Ausdauerleistungsfähigkeit diagnostizieren könnte. Ziel der dritten Studie war es daher, den Einfluss einer Trainingslagerinduzierten Ermüdung auf die vier gebräuchlichsten Laktatschwellenmodelle sowie andere Parameter der klassischen Leistungsdiagnostik zu überprüfen.

23 männliche Wettkampfradfahrer (29 ± 8 J, 180 ± 6 cm, 74 ± 8 kg, $VO_{2\max}$ $59,4 \pm 7,4$ ml/min/kg) absolvierten ein sechstägiges intensives Trainingslager. Vor, direkt nach und nach weiteren zwei Tagen Pause absolvierten die Sportler folgende Tests: ein 40-km-Zeitfahren (TT), einen 30-s-Wingate-Test (WT) und einen Stufentest (ST, 100 W + 50 W / 3 min) im Abstand von je zwei Stunden. Aus dem ST wurden die Schwellenkonzepte nach Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und 4-mmol bestimmt. Zur Bestimmung der Unterschiede zwischen den Testtagen wurde für die Leistungs- und Beanspruchungsparameter aus dem TT, WT und ST eine ANOVA mit Messwiederholung berechnet. Bei signifikanten Unterschieden wurde ein post-hoc Scheffé-Test durchgeführt.

Die Probanden absolvierten TT an Tag 1 im Mittel in 3942 ± 212 s, an Tag 8 in 4008 ± 201 s und an Tag 11 in 3929 ± 219 s. Der Unterschied zwischen Tag 1 und Tag 8 sowie Tag 8 und Tag 11 war dabei hochsignifikant ($p < 0,001$). Ebenso wurden signifikante Unterschiede ($p < 0,01$) in der mittleren Leistung im WT zwischen Tag 1 (701 ± 58 W) und Tag 8 (679 ± 65 W) sowie zwischen Tag 8 und Tag 11 (696 ± 69 W) gefunden. Die maximale Leistung im ST unterschied sich ebenfalls signifikant ($p < 0,01$) zwischen den Messtagen 1 (338 ± 30 W) und 8 (327 ± 31 W) sowie den Messtagen 8 und 11 (347 ± 30 W; $p < 0,001$). Für die submaximalen Schwellen nach Dickhuth ($p = 0,34$) und 4-mmol ($p = 0,69$) konnte kein Einfluss der Ermüdung gefunden werden. Die Stegmann-Schwelle lag nach den Regenerationstagen höher als im ermüdeten Zustand (Tag 1 - 8: $p = 0,85$; Tag 8 - 11: $p = 0,03$). D_{\max} lag an Tag 8 (256 ± 27 W) niedriger als an Tag 1 ($p = 0,006$; 265 ± 29 W) und Tag 11 ($p < 0,001$; 269 ± 25 W). Die drei submaximalen LLK ($p = 0,16$) unterschieden sich im Gegensatz zur Herzfrequenzleistungskurve ($p < 0,001$) nicht voneinander. Für die P_{\max} im WT und die $VO_{2\max}$ im ST konnte kein ermüdungsbedingter Einfluss gefunden werden.

Damit ist diese Arbeit die erste, die bei ermüdeten Athleten im Overreaching zeigen konnte, dass eine Ermüdung keinen Einfluss auf das Ergebnis in den submaximalen Schwellenkonzepten nach Stegmann, Dickhuth und 4-mmol hat. Lediglich die D_{\max} -Methode weicht auf Grund reduzierter maximaler Ausbelastung im ermüdeten Zustand im Mittel mehr als die Grundvariabilität vom erholteten Zustand ab. Der fehlende Effekt auf die 4-mmol-Schwelle spricht dafür, dass eine Glykogenverarmung in der vorliegenden Studie ausgeschlossen werden kann.

6.4 Schlussfolgerung

Die wichtigsten Ergebnisse der vorgelegten Dissertationsschrift können in folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Die submaximalen Schwellenkonzepte (Stegmann, Dickhuth, D_{\max} und 4-mmol) sind in den meisten Fällen valide Messgrößen zur Ableitung des maximalen Laktat-Steady-States. Ist aber eine erhöhte Präzision notwendig, sollte das Ergebnis der Diagnostik durch Trainingskontrollen überprüft werden.
- Die individuellen Schwellenkonzepte Stegmann und D_{\max} schätzen im Gegensatz zu den (halb)fixen Modellen (Dickhuth und 4-mmol) das MLSS unabhängig von der Ausdauerleistungsfähigkeit der Athleten gleich gut ab.
- Liegt eine Ausbelastung des Athleten vor, kann die maximale Leistungsfähigkeit durchaus hilfreich sein, um das MLSS abzuschätzen.

- Von den Parametern der klassischen Leistungsdiagnostik zeigt die maximale Leistung im Stufentest nominell den höchsten Zusammenhang zur Leistung im 40-km-Zeitfahren.
- Auf individueller Ebene lässt sich allerdings durch keinen Parameter aus dem klassischen Stufentest die Leistung im 40-km-Zeitfahren genau, d. h. mit einer geringeren Abweichung als 8 %, vorhersagen.
- Ermüdung (ohne Glykogenverarmung) hat keinen Einfluss auf die submaximalen Laktatschwellen nach Stegmann, Dickhuth und 4-mmol. Dies gilt nicht für die D_{\max} -Schwelle.

6.5 Ausblick

Studie 1: Weitere Studien sind notwendig, um die individuelle Streuung beim Ableiten von Trainingsempfehlungen aus der Laktatleistungsdiagnostik aufzuklären und zu minimieren. Um die für den Trainingsalltag notwendige Präzision von Intensitätsvorgaben zu ermitteln, sollten Reproduzierbarkeitsstudien von Trainingseinheiten im Feld durchgeführt werden. Des Weiteren fehlt es an Trainingsstudien, die belegen, ob ein Training mit MLSS-Bezug gegenüber einem anderen Modell Vorteile in der Trainingsadaptation hat.

Studie 2: In weiteren Studien sollte geklärt werden, durch welche leistungsphysiologischen Parameter die Wettkampfleistungsfähigkeit über verschiedene Zeiträume limitiert wird und wie Ausdauertraining über unterschiedliche Zeiträume auch unterschiedliche Anpassungen zur Folge hat.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass weder die Leistungen im Wingate-Test noch die maximale Sauerstoffaufnahme, sondern die anaerobe Schwelle eine hohe Korrelation zur Zeitfahrleistung über etwa 60 min aufweist. In zukünftigen Studien könnte auf ähnliche Weise die Leistung über andere Zeiträume mit leistungsphysiologischen Parametern verglichen werden. Leistungsphysiologische Parameter wären zum Beispiel:

- P_{\max} und Elektromyografie im Wingate-Test sowie Größe und Anteil an Typ II-Muskelfasern als Maße der neuromuskulären und anaerob-alkalischen Leistungsfähigkeit,
- P_{mean} und die maximale Laktatkonzentration im Wingate-Test sowie Größe der Bikarbonat-Puffer als Maße der anaerob-alkalischen Leistungsfähigkeit,
- $VO_{2\max}$, Herzvolumen und Gesamthämoglobin als Maße der zentralen Ausdauerleistungsfähigkeit,

- MLSS, Mitochondriendichte, Muskelkapillarisation und Anteil und Größe an Typ I-Muskelfasern als Maße der peripher-aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit,
- die maximale Fettstoffwechselrate und die Intensität entsprechend der maximalen Fettstoffwechselrate als Maße der Lipolyse.

Wie sehr diese physiologischen Parameter dann mit den Zeitfahrleistungen bzw. persönlichen Bestleistungen über wenige Sekunden bis zu Stunden in unterschiedlichem Ausmaß in Zusammenhang stehen, könnte Aufschluss über die physiologische Limitation der Wettkampf- und Bestleistung für die unterschiedlichen Zeiträume geben.

Auch wenn es zunächst plausibel erscheint, so sollte anschließend durch Trainingsstudien geklärt werden, ob es durch ein unterschiedlich langes (Intervall-)Training auch zu entsprechenden Verbesserungen der limitierenden Systeme kommt. Dies würde zu leistungsphysiologischen Profilen für unterschiedliche Distanzen und Personen führen und Trainingsvorgaben, was Intensität und Umfang betrifft, präzisieren und individualisieren.

Studie 3: Für zukünftige Studien und die Praxis der Laktatleistungsdiagnostik konnte gezeigt werden, dass submaximale Schwellen (mit Ausnahme der D_{max}) unabhängig von der ermüdungsbedingten reduzierten Ausbelastbarkeit und anderer eventueller Ermüdungsfolgen des Sportlers interpretiert werden können. In zukünftigen Studien sollte geklärt werden, inwieweit sich diese Ergebnisse auf andere Formen der Ermüdung übertragen lassen. Da das Maß der Ermüdung (und damit der Ausbelastbarkeit) nicht dichotom, sondern fließend ist, sollte in weiteren Studien geklärt werden, wieviel Ermüdung noch tolerierbar ist oder wieviel Ausbelastbarkeit notwendig ist, damit die anaeroben Schwellenkonzepte nicht beeinflusst werden.

Literaturverzeichnis

- Abbiss, C. R., & Laursen, P. B. (2005). Models to explain fatigue during prolonged endurance cycling. *Sports Med*, 35(10), 865-898.
- Abbiss, C. R., & Laursen, P. B. (2008). Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Med*, 38(3), 239-252.
- Acevedo, E. O., & Goldfarb, A. H. (1989). Increased training intensity effects on plasma lactate, ventilatory threshold, and endurance. *Med Sci Sports Exerc*, 21(5), 563-568.
- Allen, H., & Coggan, A. (2012). *Training and racing with a power meter*. Boulder/Colorado: VeloPress.
- Amann, M., Subudhi, A. W., & Foster, C. (2006). Predictive validity of ventilatory and lactate thresholds for cycling time trial performance. *Scand J Med Sci Sports*, 16(1), 27-34. doi:10.1111/j.1600-0838.2004.00424.x
- Atkinson, G., Davison, R., Jeukendrup, A., & Passfield, L. (2003). Science and cycling: current knowledge and future directions for research. *J Sports Sci*, 21(9), 767-787. doi:10.1080/0264041031000102097
- Atkinson, G., & Nevill, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Med*, 26(4), 217-238.
- Avela, J., Kyrolainen, H., & Komi, P. V. (2001). Neuromuscular changes after long-lasting mechanically and electrically elicited fatigue. *Eur J Appl Physiol*, 85(3-4), 317-325. doi:10.1007/s004210100455
- Baldari, C., & Guidetti, L. (2000). A simple method for individual anaerobic threshold as predictor of max lactate steady state. *Med Sci Sports Exerc*, 32(10), 1798-1802.
- Balmer, J., Davison, R. C., & Bird, S. R. (2000). Peak power predicts performance power during an outdoor 16.1-km cycling time trial. *Med Sci Sports Exerc*, 32(8), 1485-1490.
- Banister, E. W., Morton, R. H., & Fitz-Clarke, J. (1992). Dose/response effects of exercise modeled from training: physical and biochemical measures. *Ann Physiol Anthropol*, 11(3), 345-356.
- Bar-Or, O. (1987). The Wingate anaerobic test. An update on methodology, reliability and validity. *Sports Med*, 4(6), 381-394.
- Barbeau, P., Serresse, O., & Boulay, M. R. (1993). Using maximal and submaximal aerobic variables to monitor elite cyclists during a season. *Med Sci Sports Exerc*, 25(9), 1062-1069.
- Baron, B., Noakes, T. D., Dekerle, J., Moullan, F., Robin, S., Matran, R., & Pelayo, P. (2008). Why does exercise terminate at the maximal lactate steady state intensity? *Br J Sports Med*, 42(10), 828-833. doi:10.1136/bjism.2007.040444
- Beaver, W. L., Wasserman, K., & Whipp, B. J. (1985). Improved detection of lactate threshold during exercise using a log-log transformation. *J Appl Physiol*, 59(6), 1936-1940.
-

-
- Beneke, R. (1995). Anaerobic threshold, individual anaerobic threshold, and maximal lactate steady state in rowing. *Med Sci Sports Exerc*, 27(6), 863-867.
- Beneke, R. (2003). Methodological aspects of maximal lactate steady state-implications for performance testing. *Eur J Appl Physiol*, 89(1), 95-99. doi:10.1007/s00421-002-0783-1
- Beneke, R., Heck, H., Schwarz, V., & Leithauser, R. (1996). Maximal lactate steady state during the second decade of age. *Med Sci Sports Exerc*, 28(12), 1474-1478.
- Beneke, R., Hutler, M., & Leithauser, R. M. (2000). Maximal lactate-steady-state independent of performance. *Med Sci Sports Exerc*, 32(6), 1135-1139.
- Beneke, R., Leithauser, R. M., & Hutler, M. (2001). Dependence of the maximal lactate steady state on the motor pattern of exercise. *Br J Sports Med*, 35(3), 192-196.
- Beneke, R., Leithauser, R. M., & Ochentel, O. (2011). Blood lactate diagnostics in exercise testing and training. *Int J Sports Physiol Perform*, 6(1), 8-24.
- Beneke, R., Pollmann, C., Bleif, I., Leithauser, R. M., & Hutler, M. (2002). How anaerobic is the Wingate Anaerobic Test for humans? *Eur J Appl Physiol*, 87(4-5), 388-392. doi:10.1007/s00421-002-0622-4
- Bentley, D. J., McNaughton, L. R., Thompson, D., Vleck, V. E., & Batterham, A. M. (2001). Peak power output, the lactate threshold, and time trial performance in cyclists. *Med Sci Sports Exerc*, 33(12), 2077-2081.
- Bentley, D. J., Newell, J., & Bishop, D. (2007). Incremental exercise test design and analysis: implications for performance diagnostics in endurance athletes. *Sports Med*, 37(7), 575-586.
- Bentley, D. J., Wilson, G. J., Davie, A. J., & Zhou, S. (1998). Correlations between peak power output, muscular strength and cycle time trial performance in triathletes. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 38(3), 201-207.
- Berg, A., Stippig, J., Keul, J., & Huber, G. (1980). Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit von Patienten mit coronarer Herzkrankheit. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 31, 199-205.
- Billat, V., Dalmay, F., Antonini, M. T., & Chassain, A. P. (1994). A method for determining the maximal steady state of blood lactate concentration from two levels of submaximal exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 69(3), 196-202.
- Billat, V. L., Sirvent, P., Py, G., Koralsztein, J. P., & Mercier, J. (2003). The concept of maximal lactate steady state: a bridge between biochemistry, physiology and sport science. *Sports Med*, 33(6), 407-426.
- Bishop, D. (2001). Evaluation of the Accusport lactate analyser. *Int J Sports Med*, 22(7), 525-530. doi:10.1055/s-2001-17611
- Bishop, D., Jenkins, D. G., & Mackinnon, L. T. (1998). The relationship between plasma lactate parameters, W_{peak} and 1-h cycling performance in women. *Med Sci Sports Exerc*, 30(8), 1270-1275.
- Bizeau, M. E., Willis, W. T., & Hazel, J. R. (1998). Differential responses to endurance training in subsarcolemmal and intermyofibrillar mitochondria. *J Appl Physiol*, 85(4), 1279-1284.
-

-
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet*, *1*(8476), 307-310.
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (1995). Comparing methods of measurement: why plotting difference against standard method is misleading. *Lancet*, *346*(8982), 1085-1087.
- Bosquet, L., Leger, L., & Legros, P. (2001). Blood lactate response to overtraining in male endurance athletes. *Eur J Appl Physiol*, *84*(1-2), 107-114. doi:10.1007/s004210000343
- Bosquet, L., Leger, L., & Legros, P. (2002). Methods to determine aerobic endurance. *Sports Med*, *32*(11), 675-700.
- Brooks, G., Fahey, T., & White, T. (1984). Fatigue during muscular exercise. *Exercise Physiology: Human Bioenergetics and Its Applications*, 800-822.
- Brooks, G., Fahey, T., White, T., & Baldwin, K. (2000). Cardiovascular dynamics during exercise. *Exercise Physiology: Human Bioenergetics and its applications. Mountain View, Ca: Mayfield Publishing Company*, 317-339.
- Buckley, J. D., Bourdon, P. C., & Woolford, S. M. (2003). Effect of measuring blood lactate concentrations using different automated lactate analysers on blood lactate transition thresholds. *J Sci Med Sport*, *6*(4), 408-421.
- Bunc, V., Heller, J., Novack, J., & Leso, J. (1985). Determination of the individual anaerobic threshold. *Acta Univ Carol Gymnica*, *21*, 73-81.
- Buono, M. J., & Yeager, J. E. (1986). Intraerythrocyte and plasma lactate concentrations during exercise in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *55*(3), 326-329.
- Burke, E. R., Cerny, F., Costill, D., & Fink, W. (1977). Characteristics of skeletal muscle in competitive cyclists. *Med Sci Sports*, *9*(2), 109-112.
- Caiozzo, V. J., Davis, J. A., Ellis, J. F., Azus, J. L., Vandagriff, R., Prietto, C. A., & McMaster, W. C. (1982). A comparison of gas exchange indices used to detect the anaerobic threshold. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, *53*(5), 1184-1189.
- Cairns, S. P., Knicker, A. J., Thompson, M. W., & Sjogaard, G. (2005). Evaluation of models used to study neuromuscular fatigue. *Exerc Sport Sci Rev*, *33*(1), 9-16.
- Candau, R. B., Grappe, F., Menard, M., Barbier, B., Millet, G. Y., Hoffman, M. D., . . . Rouillon, J. D. (1999). Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling. *Med Sci Sports Exerc*, *31*(10), 1441-1447.
- Cheng, B., Kuipers, H., Snyder, A. C., Keizer, H. A., Jeukendrup, A., & Hesselink, M. (1992). A new approach for the determination of ventilatory and lactate thresholds. *Int J Sports Med*, *13*(7), 518-522. doi:10.1055/s-2007-1021309
- Coen, B., Schwarz, L., Urhausen, A., & Kindermann, W. (1991). Control of training in middle- and long-distance running by means of the individual anaerobic threshold. *Int J Sports Med*, *12*(6), 519-524. doi:10.1055/s-2007-1024727
- Coen, B., Urhausen, A., & Kindermann, W. (2001). Individual anaerobic threshold: methodological aspects of its assessment in running. *Int J Sports Med*, *22*(1), 8-16. doi:10.1055/s-2001-11332
-

- Conley, D. L., & Krahenbuhl, G. S. (1980). Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 12(5), 357-360.
- Convertino, V. A. (1991). Blood volume: its adaptation to endurance training. *Med Sci Sports Exerc*, 23(12), 1338-1348.
- Coyle, E. F. (2005). Improved muscular efficiency displayed as Tour de France champion matures. *J Appl Physiol*, 98(6), 2191-2196. doi:10.1152/jappphysiol.00216.2005
- Coyle, E. F., Coggan, A. R., Hopper, M. K., & Walters, T. J. (1988). Determinants of endurance in well-trained cyclists. *J Appl Physiol*, 64(6), 2622-2630.
- Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Montain, S. J., Baylor, A. M., . . . Petrek, G. W. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc*, 23(1), 93-107.
- Coyle, E. F., Hopper, M. K., & Coggan, A. R. (1990). Maximal oxygen uptake relative to plasma volume expansion. *Int J Sports Med*, 11(2), 116-119. doi:10.1055/s-2007-1024774
- Coyle, E. F., Martin, W. H., Ehsani, A. A., Hagberg, J. M., Bloomfield, S. A., Sinacore, D. R., & Holloszy, J. O. (1983). Blood lactate threshold in some well-trained ischemic heart disease patients. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 54(1), 18-23.
- Coyle, E. F., Sidossis, L. S., Horowitz, J. F., & Beltz, J. D. (1992). Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. *Med Sci Sports Exerc*, 24(7), 782-788.
- Craig, N. P., & Norton, K. I. (2001). Characteristics of track cycling. *Sports Med*, 31(7), 457-468.
- Craig, N. P., Norton, K. I., Bourdon, P. C., Woolford, S. M., Stanef, T., Squires, B., . . . Walsh, C. B. (1993). Aerobic and anaerobic indices contributing to track endurance cycling performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 67(2), 150-158.
- Cycling Power Lab. (2016, 27.10.2016). Power Models : Variable Power Pacing Model [Beta]. Verfügbar unter <http://www.cyclingpowerlab.com/TimeTrialPacingStrategy.aspx>
- Davis, J. A., Vodak, P., Wilmore, J. H., Vodak, J., & Kurtz, P. (1976). Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise. *J Appl Physiol*, 41(4), 544-550.
- de Barros, C. L., Mendes, T. T., Mortimer, L. A., Simoes, H. G., Prado, L. S., Wisloff, U., & Silami-Garcia, E. (2011). Maximal lactate steady state is altered in the heat. *Int J Sports Med*, 32(10), 749-753. doi:10.1055/s-0031-1277191
- de Koning, J. J., Bobbert, M. F., & Foster, C. (1999). Determination of optimal pacing strategy in track cycling with an energy flow model. *J Sci Med Sport*, 2(3), 266-277.
- De Marées, H., & Mester, J. (1981). *Sportphysiologie*. Frankfurt: Diesterweg.
-

-
- Dekerle, J., Baron, B., Dupont, L., Vanvelcenaher, J., & Pelayo, P. (2003). Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. *Eur J Appl Physiol*, 89(3-4), 281-288. doi:10.1007/s00421-002-0786-y
- Delp, M. D., & Laughlin, M. H. (1998). Regulation of skeletal muscle perfusion during exercise. *Acta Physiol Scand*, 162(3), 411-419. doi:10.1046/j.1365-201X.1998.0324e.x
- Dempsey, J., & Babcock, M. (1995). *An integrative view of limitations to muscular performance*. Paper presented at the Fatigue, New York.
- Dickhuth, H.-H., Huonker, M., Münzel, T., Drexler, H., Berg, A., & Keul, J. (1991). Individual anaerobic threshold for evaluation of competitive athletes and patients with left ventricular dysfunction *Advances in ergometry* (pp. 173-179): Springer.
- Dickhuth, H. H., Yin, L., Niess, A., Rocker, K., Mayer, F., Heitkamp, H. C., & Horstmann, T. (1999). Ventilatory, lactate-derived and catecholamine thresholds during incremental treadmill running: Relationship and reproducibility. *International Journal of Sports Medicine*, 20(2), 122-127. doi:DOI 10.1055/s-1999-970277
- Draper, N., Brent, S., Hale, B., & Coleman, I. (2006). The influence of sampling site and assay method on lactate concentration in response to rock climbing. *Eur J Appl Physiol*, 98(4), 363-372. doi:10.1007/s00421-006-0289-3
- Earnest, C. P., Foster, C., Hoyos, J., Muniesa, C. A., Santalla, A., & Lucia, A. (2009). Time trial exertion traits of cycling's Grand Tours. *Int J Sports Med*, 30(4), 240-244. doi:10.1055/s-0028-1105948
- Endler, S., Secker, C., & Bügner, J. (2016). *What is the best fitting function? Evaluation of lactate curves with common methods from the literature*. Paper presented at the Proceedings of the 10th International Symposium on Computer Science in Sports (ISCSS).
- Faria, E. W., Parker, D. L., & Faria, I. E. (2005a). The science of cycling: factors affecting performance - part 2. *Sports Med*, 35(4), 313-337.
- Faria, E. W., Parker, D. L., & Faria, I. E. (2005b). The science of cycling: physiology and training - part 1. *Sports Med*, 35(4), 285-312.
- Faria, I. E. (1992). Energy expenditure, aerodynamics and medical problems in cycling. An update. *Sports Med*, 14(1), 43-63.
- Faria, I. E., Faria, E. W., Roberts, S., & Yoshimura, D. (1989). Comparison of physical and physiological characteristics in elite young and mature cyclists. *Res Q Exerc Sport*, 60(4), 388-395. doi:10.1080/02701367.1989.10607469
- Farrell, P. A., Wilmore, J. H., Coyle, E. F., Billing, J. E., & Costill, D. L. (1979). Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports*, 11(4), 338-344.
- Faude, O., Kindermann, W., & Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts: how valid are they? *Sports Med*, 39(6), 469-490. doi:10.2165/00007256-200939060-00003
- Faude, O., Meyer, T., Scharhag, J., Weins, F., Urhausen, A., & Kindermann, W. (2008). Volume vs. intensity in the training of competitive swimmers. *Int J Sports Med*, 29(11), 906-912. doi:10.1055/s-2008-1038377
-

-
- Faude, O., Meyer, T., Urhausen, A., & Kindermann, W. (2009). Recovery training in cyclists: ergometric, hormonal and psychometric findings. *Scand J Med Sci Sports*, 19(3), 433-441. doi:10.1111/j.1600-0838.2008.00795.x
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior research methods*, 39(2), 175-191.
- Feliu, J., Ventura, J. L., Segura, R., Rodas, G., Riera, J., Estruch, A., . . . Capdevila, L. (1999). Differences between lactate concentration of samples from ear lobe and the finger tip. *J Physiol Biochem*, 55(4), 333-339.
- Fellmann, N. (1992). Hormonal and plasma volume alterations following endurance exercise. A brief review. *Sports Med*, 13(1), 37-49.
- Fernandez-Garcia, B., Perez-Landaluce, J., Rodriguez-Alonso, M., & Terrados, N. (2000). Intensity of exercise during road race pro-cycling competition. *Med Sci Sports Exerc*, 32(5), 1002-1006.
- Fitz-Clarke, J. R., Morton, R. H., & Banister, E. W. (1991). Optimizing athletic performance by influence curves. *J Appl Physiol (1985)*, 71(3), 1151-1158.
- Fohrenbach, R., Mader, A., & Hollmann, W. (1987). Determination of endurance capacity and prediction of exercise intensities for training and competition in marathon runners. *Int J Sports Med*, 8(1), 11-18. doi:10.1055/s-2008-1025633
- Forsyth, J. J., & Farrally, M. R. (2000). A comparison of lactate concentration in plasma collected from the toe, ear, and fingertip after a simulated rowing exercise. *Br J Sports Med*, 34(1), 35-38.
- Foxdal, P., Sjodin, A., Ostman, B., & Sjodin, B. (1991). The effect of different blood sampling sites and analyses on the relationship between exercise intensity and 4.0 mmol.l⁻¹ blood lactate concentration. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 63(1), 52-54.
- Foxdal, P., Sjodin, B., Rudstam, H., Ostman, C., Ostman, B., & Hedenstierna, G. C. (1990). Lactate concentration differences in plasma, whole blood, capillary finger blood and erythrocytes during submaximal graded exercise in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 61(3-4), 218-222.
- Foxdal, P., Sjodin, B., Sjodin, A., & Ostman, B. (1994). The validity and accuracy of blood lactate measurements for prediction of maximal endurance running capacity. Dependency of analyzed blood media in combination with different designs of the exercise test. *Int J Sports Med*, 15(2), 89-95. doi:10.1055/s-2007-1021026
- Friel, J. (2012). *The cyclist's training bible*. Boulder/Colorado: VeloPress.
- Fröhlich, J., Urhausen, A., Seul, U., & Kindermann, W. (1989). Beeinflussung der individuellen anaeroben Schwelle durch kohlenhydratarme und-reiche Ernährung. *Leistungssport*, 19(18-20), 8.
- Fry, R. W., Morton, A. R., Garcia-Webb, P., Crawford, G. P., & Keast, D. (1992). Biological responses to overload training in endurance sports. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 64(4), 335-344.
-

- Gabriel, H., & Kindermann, W. (1997). The acute immune response to exercise: what does it mean? *Int J Sports Med*, 18 Suppl 1, S28-45. doi:10.1055/s-2007-972698
- Gaitanos, G. C., Williams, C., Boobis, L. H., & Brooks, S. (1993). Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *J Appl Physiol* (1985), 75(2), 712-719.
- Gavin, T. P., Van Meter, J. B., Brophy, P. M., Dubis, G. S., Potts, K. N., & Hickner, R. C. (2012). Comparison of a field-based test to estimate functional threshold power and power output at lactate threshold. *J Strength Cond Res*, 26(2), 416-421. doi:10.1519/JSC.0b013e318220b4eb
- Gnehm, P., Reichenbach, S., Altpeter, E., Widmer, H., & Hoppeler, H. (1997). Influence of different racing positions on metabolic cost in elite cyclists. *Med Sci Sports Exerc*, 29(6), 818-823.
- Gollhofer, A., Komi, P. V., Fujitsuka, N., & Miyashita, M. (1987). Fatigue during stretch-shortening cycle exercises. II. Changes in neuromuscular activation patterns of human skeletal muscle. *Int J Sports Med*, 8 Suppl 1, 38-47.
- Gollhofer, A., Komi, P. V., Miyashita, M., & Aura, O. (1987). Fatigue during stretch-shortening cycle exercises: changes in mechanical performance of human skeletal muscle. *Int J Sports Med*, 8(2), 71-78. doi:10.1055/s-2008-1025644
- Grant, S., McMillan, K., Newell, J., Wood, L., Keatley, S., Simpson, D., . . . Fairlie-Clark, S. (2002). Reproducibility of the blood lactate threshold, 4 mmol.l(-1) marker, heart rate and ratings of perceived exertion during incremental treadmill exercise in humans. *Eur J Appl Physiol*, 87(2), 159-166. doi:10.1007/s00421-002-0608-2
- Green, H. J. (1997). Mechanisms of muscle fatigue in intense exercise. *J Sports Sci*, 15(3), 247-256. doi:10.1080/026404197367254
- Gregory, J., Johns, D. P., & Walls, J. T. (2007). Relative vs. absolute physiological measures as predictors of mountain bike cross-country race performance. *J Strength Cond Res*, 21(1), 17-22. doi:10.1519/R-17635.1
- Grossl, T., De Lucas, R. D., De Souza, K. M., & Antonacci Guglielmo, L. G. (2012). Maximal lactate steady-state and anaerobic thresholds from different methods in cyclists. *European Journal of Sport Science*, 12(2), 161-167.
- Hagberg, J. M., & Coyle, E. F. (1983). Physiological determinants of endurance performance as studied in competitive racewalkers. *Med Sci Sports Exerc*, 15(4), 287-289.
- Hahn, A. G., & Gore, C. J. (2001). The effect of altitude on cycling performance: a challenge to traditional concepts. *Sports Med*, 31(7), 533-557.
- Hall, M. M., Rajasekaran, S., Thomsen, T. W., & Peterson, A. R. (2016). Lactate: Friend or Foe. *PM R*, 8(3 Suppl), S8-S15. doi:10.1016/j.pmrj.2015.10.018
- Halson, S. L., Bridge, M. W., Meeusen, R., Busschaert, B., Gleeson, M., Jones, D. A., & Jeukendrup, A. E. (2002). Time course of performance changes and fatigue markers during intensified training in trained cyclists. *J Appl Physiol* (1985), 93(3), 947-956. doi:10.1152/jappphysiol.01164.2001
-

- Hammes, D., Skorski, S., Schwindling, S., Ferrauti, A., Pfeiffer, M., Kellmann, M., & Meyer, T. (2016). Can the Lamberts and Lambert Submaximal Cycle Test Indicate Fatigue and Recovery in Trained Cyclists? *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 11(3).
- Hampson, D. B., St Clair Gibson, A., Lambert, M. I., & Noakes, T. D. (2001). The influence of sensory cues on the perception of exertion during exercise and central regulation of exercise performance. *Sports Med*, 31(13), 935-952.
- Harnish, C. R., Swensen, T. C., & Pate, R. R. (2001). Methods for estimating the maximal lactate steady state in trained cyclists. *Med Sci Sports Exerc*, 33(6), 1052-1055.
- Harris, R. C., Hultman, E., & Nordesjo, L. O. (1974). Glycogen, glycolytic intermediates and high-energy phosphates determined in biopsy samples of musculus quadriceps femoris of man at rest. Methods and variance of values. *Scand J Clin Lab Invest*, 33(2), 109-120.
- Hauser, T., Adam, J., & Schulz, H. (2014). Comparison of selected lactate threshold parameters with maximal lactate steady state in cycling. *Int J Sports Med*, 35(6), 517-521. doi:10.1055/s-0033-1353176
- Hauser, T., Bartsch, D., Baumgartel, L., & Schulz, H. (2013). Reliability of maximal lactate-steady-state. *Int J Sports Med*, 34(3), 196-199. doi:10.1055/s-0032-1321719
- Hawley, J. A., & Noakes, T. D. (1992). Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 65(1), 79-83.
- Heck, H. (1990). *Laktat in der Leistungsdiagnostik*. Schorndorf: Hofmann.
- Heck, H., & Beneke, R. (2008). 30 Jahre Laktatschwellen--was bleibt zu tun? *Deutsche Zeitschrift fur Sportmedizin*, 59(12), 297.
- Heck, H., Hess, G., & Mader, A. (1985). Comparative study of different lactate threshold concepts [Vergleichende Untersuchung zu verschiedenen Laktat-Schwellenkonzepten]. *Deutsche Zeitschrift fur Sportmedizin*, 36(1), 2.
- Heck, H., Mader, A., Hess, G., Mucke, S., Muller, R., & Hollmann, W. (1985). Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *Int J Sports Med*, 6(3), 117-130. doi:10.1055/s-2008-1025824
- Heck, H., Porwell, S., & Schulz, H. (2005). Einfluss unterschiedlicher Endbelastungslaktatwerte auf die individuelle anaerobe Schwelle (IAS) nach Stegmann und Kindermann. *Deutsche Zeitschrift fur Sportmedizin*, 56(7-8), 219.
- Hedelin, R., Kentta, G., Wiklund, U., Bjerle, P., & Henriksson-Larsen, K. (2000). Short-term overtraining: effects on performance, circulatory responses, and heart rate variability. *Med Sci Sports Exerc*, 32(8), 1480-1484.
- Hildebrand, A., Lormes, W., Emmert, J., Liu, Y., Lehmann, M., & Steinacker, J. M. (2000). Lactate concentration in plasma and red blood cells during incremental exercise. *Int J Sports Med*, 21(7), 463-468. doi:10.1055/s-2000-7412
- Hill, A. V. (1925). The physiological basis of athletic records. *The Lancet*, 206(5323), 481-486.
-

-
- Hill, A. V., Long, C., & Lupton, H. (1924). Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilisation of oxygen. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 97(681), 84-138.
- Hill, D. W. (1993). The critical power concept. A review. *Sports Med*, 16(4), 237-254.
- Hill, D. W., Smith, J. C., Leuschel, J. L., Chasteen, S. D., & Miller, S. A. (1995). Effect of pedal cadence on parameters of the hyperbolic power-time relationship. *Int J Sports Med*, 16(2), 82-87. doi:10.1055/s-2007-972969
- Hollmann, W. (2001). 42 years ago--development of the concepts of ventilatory and lactate threshold. *Sports Med*, 31(5), 315-320.
- Hood, D. A., Takahashi, M., Connor, M. K., & Freyssenet, D. (2000). Assembly of the cellular powerhouse: current issues in muscle mitochondrial biogenesis. *Exercise and sport sciences reviews*, 28(2), 68-73.
- Hoogsteen, J., Hoogeveen, A., Schaffers, H., Wijn, P. F., & van der Wall, E. E. (2003). Left atrial and ventricular dimensions in highly trained cyclists. *Int J Cardiovasc Imaging*, 19(3), 211-217.
- Hopkins, S. R., & McKenzie, D. C. (1994). The laboratory assessment of endurance performance in cyclists. *Can J Appl Physiol*, 19(3), 266-274.
- Hopkins, W. G. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med*, 30(1), 1-15.
- Hopkins, W. G. (2016, 10.10.2016). Sportscience. Verfügbar unter <http://www.sportsci.org/>
- Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., & Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc*, 41(1), 3-13. doi:10.1249/MSS.0b013e31818cb278
- Hopkins, W. G., Schabert, E. J., & Hawley, J. A. (2001). Reliability of power in physical performance tests. *Sports Med*, 31(3), 211-234.
- Hoppeler, H., & Fluck, M. (2003). Plasticity of skeletal muscle mitochondria: structure and function. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(1), 95-104.
- Hughson, R. L., & Green, H. J. (1982). Blood acid-base and lactate relationships studied by ramp work tests. *Med Sci Sports Exerc*, 14(4), 297-302.
- Hughson, R. L., Weisiger, K. H., & Swanson, G. D. (1987). Blood lactate concentration increases as a continuous function in progressive exercise. *J Appl Physiol* (1985), 62(5), 1975-1981.
- Hultman, E., & Sjöholm, H. (1983). Energy metabolism and contraction force of human skeletal muscle in situ during electrical stimulation. *J Physiol*, 345, 525-532.
- Hunter, A. M., St Clair Gibson, A., Lambert, M. I., Nobbs, L., & Noakes, T. D. (2003). Effects of supramaximal exercise on the electromyographic signal. *Br J Sports Med*, 37(4), 296-299.
- Hurley, B. F., Hagberg, J. M., Allen, W. K., Seals, D. R., Young, J. C., Cuddihee, R. W., & Holloszy, J. O. (1984). Effect of training on blood lactate levels during submaximal exercise. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 56(5), 1260-1264.
-

-
- Impellizzeri, F., Sassi, A., Rodriguez-Alonso, M., Mognoni, P., & Marcora, S. (2002). Exercise intensity during off-road cycling competitions. *Med Sci Sports Exerc*, 34(11), 1808-1813. doi:10.1249/01.MSS.0000036690.39627.F7
- Impellizzeri, F. M., & Marcora, S. M. (2007). The physiology of mountain biking. *Sports Med*, 37(1), 59-71.
- Impellizzeri, F. M., Marcora, S. M., Rampinini, E., Mognoni, P., & Sassi, A. (2005). Correlations between physiological variables and performance in high level cross country off road cyclists. *Br J Sports Med*, 39(10), 747-751. doi:10.1136/bjism.2004.017236
- Impellizzeri, F. M., Rampinini, E., Sassi, A., Mognoni, P., & Marcora, S. (2005). Physiological correlates to off-road cycling performance. *J Sports Sci*, 23(1), 41-47. doi:10.1080/02640410410001730061
- Ivy, J. L., Withers, R. T., Van Handel, P. J., Elger, D. H., & Costill, D. L. (1980). Muscle respiratory capacity and fiber type as determinants of the lactate threshold. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 48(3), 523-527.
- Jacobs, I. (1986). Blood lactate. Implications for training and sports performance. *Sports Med*, 3(1), 10-25.
- Jeukendrup, A. E., Craig, N. P., & Hawley, J. A. (2000). The bioenergetics of World Class Cycling. *J Sci Med Sport*, 3(4), 414-433.
- Jeukendrup, A. E., Hesselink, M. K., Snyder, A. C., Kuipers, H., & Keizer, H. A. (1992). Physiological changes in male competitive cyclists after two weeks of intensified training. *Int J Sports Med*, 13(7), 534-541. doi:10.1055/s-2007-1021312
- Jeukendrup, A. E., Saris, W. H., & Wagenmakers, A. J. (1998a). Fat metabolism during exercise: a review--part II: regulation of metabolism and the effects of training. *Int J Sports Med*, 19(5), 293-302. doi:10.1055/s-2007-971921
- Jeukendrup, A. E., Saris, W. H., & Wagenmakers, A. J. (1998b). Fat metabolism during exercise: a review. Part I: fatty acid mobilization and muscle metabolism. *Int J Sports Med*, 19(4), 231-244. doi:10.1055/s-2007-971911
- Jones, A. M., & Doust, J. H. (1998). The validity of the lactate minimum test for determination of the maximal lactate steady state. *Med Sci Sports Exerc*, 30(8), 1304-1313.
- Jones, N. L., & McCartney, N. (1986). Influence of muscle power on aerobic performance and the effects of training. *Acta Med Scand Suppl*, 711, 115-122.
- Kay, D., Marino, F. E., Cannon, J., St Clair Gibson, A., Lambert, M. I., & Noakes, T. D. (2001). Evidence for neuromuscular fatigue during high-intensity cycling in warm, humid conditions. *Eur J Appl Physiol*, 84(1-2), 115-121. doi:10.1007/s004210000340
- Kenney, W. L., Wilmore, J., & Costill, D. (2015). *Physiology of Sport and Exercise 6th Edition*. Stanningley: Human kinetics.
- Keul, J., Simon, G., Berg, A., Dickhuth, H., Goerttler, I., & Kübel, R. (1979). Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle zur Leistungsbewertung und Trainingsgestaltung. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 30(7), 212-218.
-

- Kilding, A. E., & Jones, A. M. (2005). Validity of a single-visit protocol to estimate the maximum lactate steady state. *Med Sci Sports Exerc*, 37(10), 1734-1740.
- Kindermann, W. (2004). Anaerobe Schwelle. *Dtsch Z Sportmed*, 55(6), 161-162.
- Kindermann, W., Dickhuth, H.-H., Nieß, A., Röcker, K., & Urhausen, A. (2008). *Sportkardiologie: Körperliche Aktivität bei Herzerkrankungen*. Heidelberg: Springer.
- Kindermann, W., Simon, G., & Keul, J. (1979). The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 42(1), 25-34.
- Kraus, R. M., Stallings, H. W., Yeager, R. C., & Gavin, T. P. (2004). Circulating plasma VEGF response to exercise in sedentary and endurance-trained men. *Journal of Applied Physiology*, 96(4), 1445-1450.
- Lajoie, C., Laurencelle, L., & Trudeau, F. (2000). Physiological responses to cycling for 60 minutes at maximal lactate steady state. *Can J Appl Physiol*, 25(4), 250-261.
- Lamberts, R. P., Swart, J., Noakes, T. D., & Lambert, M. I. (2011). A novel submaximal cycle test to monitor fatigue and predict cycling performance. *Br J Sports Med*, 45(10), 797-804. doi:10.1136/bjism.2009.061325
- Laplaud, D., Guinot, M., Favre-Juvin, A., & Flore, P. (2006). Maximal lactate steady state determination with a single incremental test exercise. *Eur J Appl Physiol*, 96(4), 446-452. doi:10.1007/s00421-005-0086-4
- Laursen, P. B., Shing, C. M., & Jenkins, D. G. (2003). Reproducibility of a laboratory-based 40-km cycle time-trial on a stationary wind-trainer in highly trained cyclists. *Int J Sports Med*, 24(7), 481-485. doi:10.1055/s-2003-42012
- Le Meur, Y., Louis, J., Aubry, A., Gueneron, J., Pichon, A., Schaal, K., . . . Hausswirth, C. (2014). Maximal exercise limitation in functionally overreached triathletes: role of cardiac adrenergic stimulation. *J Appl Physiol (1985)*, 117(3), 214-222. doi:10.1152/jappphysiol.00191.2014
- Lehmann, M., Gastmann, U., Petersen, K. G., Bachl, N., Seidel, A., Khalaf, A. N., . . . Keul, J. (1992). Training-overtraining: performance, and hormone levels, after a defined increase in training volume versus intensity in experienced middle- and long-distance runners. *Br J Sports Med*, 26(4), 233-242.
- Lentillon-Kaestner, V., Hagger, M. S., & Hardcastle, S. (2012). Health and doping in elite-level cycling. *Scand J Med Sci Sports*, 22(5), 596-606. doi:10.1111/j.1600-0838.2010.01281.x
- Levine, B. D., & Stray-Gundersen, J. (1997). "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J Appl Physiol (1985)*, 83(1), 102-112.
- Lindsay, F. H., Hawley, J. A., Myburgh, K. H., Schomer, H. H., Noakes, T. D., & Dennis, S. C. (1996). Improved athletic performance in highly trained cyclists after interval training. *Med Sci Sports Exerc*, 28(11), 1427-1434.
- Loat, C. E. (1991). *Comparison of the lactate and ventilatory thresholds during prolonged work*. (phd Thesis/Dissertation), University of British Columbia.
-

-
- Loat, C. E., & Rhodes, E. C. (1993). Relationship between the lactate and ventilatory thresholds during prolonged exercise. *Sports Med*, 15(2), 104-115.
- Londeree, B. R. (1997). Effect of training on lactate/ventilatory thresholds: A meta-analysis. *Med Sci Sports*, 29(6), 837-843. doi:10.1097/00005768-199706000-00016
- Lucia, A., Carvajal, A., Boraita, A., Serratos, L., Hoyos, J., & Chicharro, J. L. (1999). Heart dimensions may influence the occurrence of the heart rate deflection point in highly trained cyclists. *Br J Sports Med*, 33(6), 387-392.
- Lucia, A., Carvajal, A., Calderon, F. J., Alfonso, A., & Chicharro, J. L. (1999). Breathing pattern in highly competitive cyclists during incremental exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 79(6), 512-521. doi:10.1007/s004210050546
- Lucia, A., Earnest, C., & Arribas, C. (2003). The Tour de France: a physiological review. *Scand J Med Sci Sports*, 13(5), 275-283.
- Lucia, A., Hoyos, J., Carvajal, A., & Chicharro, J. L. (1999). Heart rate response to professional road cycling: the Tour de France. *Int J Sports Med*, 20(3), 167-172. doi:10.1055/s-1999-970284
- Lucia, A., Hoyos, J., & Chicharro, J. L. (2000). The slow component of VO₂ in professional cyclists. *Br J Sports Med*, 34(5), 367-374.
- Lucia, A., Hoyos, J., & Chicharro, J. L. (2001). Physiology of professional road cycling. *Sports Med*, 31(5), 325-337.
- Lucia, A., Hoyos, J., Perez, M., & Chicharro, J. L. (2000). Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med Sci Sports Exerc*, 32(10), 1777-1782.
- Lucia, A., Hoyos, J., Perez, M., Santalla, A., & Chicharro, J. L. (2002). Inverse relationship between VO₂max and economy/efficiency in world-class cyclists. *Med Sci Sports Exerc*, 34(12), 2079-2084. doi:10.1249/01.MSS.0000039306.92778.DF
- Lucia, A., Hoyos, J., Perez, M., Santalla, A., Earnest, C. P., & Chicharro, J. L. (2004). Which laboratory variable is related with time trial performance time in the Tour de France? *Br J Sports Med*, 38(5), 636-640. doi:10.1136/bjism.2003.008490
- Lucia, A., Hoyos, J., Santalla, A., Earnest, C., & Chicharro, J. L. (2003). Tour de France versus Vuelta a Espana: which is harder? *Med Sci Sports Exerc*, 35(5), 872-878. doi:10.1249/01.MSS.0000064999.82036.B4
- Lucia, A., Hoyos, J., Santalla, A., Perez, M., & Chicharro, J. L. (2002a). Curvilinear VO₂:power output relationship in a ramp test in professional cyclists: possible association with blood hemoglobin concentration. *Jpn J Physiol*, 52(1), 95-103.
- Lucia, A., Hoyos, J., Santalla, A., Perez, M., & Chicharro, J. L. (2002b). Kinetics of VO₂ in professional cyclists. *Med Sci Sports Exerc*, 34(2), 320-325.
- Lucia, A., Joyos, H., & Chicharro, J. L. (2000). Physiological response to professional road cycling: climbers vs. time trialists. *Int J Sports Med*, 21(7), 505-512.
- Lucia, A., Pardo, J., Durantez, A., Hoyos, J., & Chicharro, J. L. (1998). Physiological differences between professional and elite road cyclists. *Int J Sports Med*, 19(5), 342-348.
-

-
- Lucia, A., Rabadan, M., Hoyos, J., Hernandez-Capilla, M., Perez, M., San Juan, A. F., . . . Chicharro, J. L. (2006). Frequency of the VO₂max plateau phenomenon in world-class cyclists. *Int J Sports Med*, 27(12), 984-992. doi:10.1055/s-2006-923833
- Lucia, A., Sanchez, O., Carvajal, A., & Chicharro, J. L. (1999). Analysis of the aerobic-anaerobic transition in elite cyclists during incremental exercise with the use of electromyography. *Br J Sports Med*, 33(3), 178-185.
- Lundberg, M. A., Hughson, R. L., Weisiger, K. H., Jones, R. H., & Swanson, G. D. (1986). Computerized estimation of lactate threshold. *Comput Biomed Res*, 19(5), 481-486.
- Maassen, N., & Busse, M. W. (1989a). The relationship between lactic acid and work load: a measure for endurance capacity or an indicator of carbohydrate deficiency? *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 58(7), 728-737.
- Maassen, N., & Busse, M. W. (1989b). The relationship between lactic acid and work load: a measure for endurance capacity or an indicator of carbohydrate deficiency? *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 58(7), 728-737.
- MacIntosh, B. R., Esau, S., & Svedahl, K. (2002). The lactate minimum test for cycling: estimation of the maximal lactate steady state. *Can J Appl Physiol*, 27(3), 232-249.
- Mader, A., & Heck, H. (1986). A Theory of the Metabolic Origin of Anaerobic Threshold. *International Journal of Sports Medicine*, 7, 45-65.
- Mader, A., Liesen, H., Heck, H., Philippi, H., Rost, R., Schürch, P., & Hollmann, W. (1976). Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. *Sportarzt sportmed*, 27(80), 199.
- Maldonado-Martín, S., Cámara, J., James, D. V., Fernández-López, J. R., & Artetxe-Gezuraga, X. (2016). Effects of long-term training cessation in young top-level road cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 1-6.
- Mann, T., Lamberts, R. P., & Lambert, M. I. (2013). Methods of prescribing relative exercise intensity: physiological and practical considerations. *Sports Med*, 43(7), 613-625. doi:10.1007/s40279-013-0045-x
- Martin, C. (2001). *Lehnertz: Handbuch Trainingslehre*. Schorndorf: Hofmann
- Martin, J. C., Milliken, D. L., Cobb, J. E., McFadden, K. L., & Coggan, A. R. (1998). Validation of a mathematical model for road cycling power. *Journal of applied biomechanics*, 14, 276-291.
- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2010). *Exercise physiology: nutrition, energy, and human performance*. Lippincott: Williams & Wilkins.
- McCartney, N., Spriet, L. L., Heigenhauser, G. J., Kowalchuk, J. M., Sutton, J. R., & Jones, N. L. (1986). Muscle power and metabolism in maximal intermittent exercise. *J Appl Physiol (1985)*, 60(4), 1164-1169.
- McLellan, T. M., & Gass, G. C. (1989). The relationship between the ventilation and lactate thresholds following normal, low and high carbohydrate diets. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 58(6), 568-576.
-

-
- McLellan, T. M., & Jacobs, I. (1993). Reliability, reproducibility and validity of the individual anaerobic threshold. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 67(2), 125-131.
- McLellan, T. M., & Skinner, J. S. (1981). The use of the aerobic threshold as a basis for training. *Can J Appl Sport Sci*, 6(4), 197-201.
- McNaughton, L. R., Roberts, S., & Bentley, D. J. (2006). The relationship among peak power output, lactate threshold, and short-distance cycling performance: effects of incremental exercise test design. *J Strength Cond Res*, 20(1), 157-161. doi:10.1519/R-15914.1
- Medbo, J. I., Mamen, A., Holt Olsen, O., & Evertsen, F. (2000). Examination of four different instruments for measuring blood lactate concentration. *Scand J Clin Lab Invest*, 60(5), 367-380.
- Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., . . . American College of Sports, M. (2013). Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Med Sci Sports Exerc*, 45(1), 186-205. doi:10.1249/MSS.0b013e318279a10a
- Menaspa, P., Quod, M., Martin, D. T., Peiffer, J. J., & Abbiss, C. R. (2015). Physical Demands of Sprinting in Professional Road Cycling. *Int J Sports Med*, 36(13), 1058-1062. doi:10.1055/s-0035-1554697
- Meyer, T., Faude, O., Urhausen, A., Scharhag, J., & Kindermann, W. (2004). Different effects of two regeneration regimens on immunological parameters in cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(10), 1743-1749. doi:10.1249/01.Mss.0000142422.87805.74
- Meyer, T., Gabriel, H. H. W., Auracher, M., Scharhag, J., & Kindermann, W. (2003). Metabolic profile of 4 h cycling in the field with varying amounts of carbohydrate supply. *European journal of applied physiology*, 88(4-5), 431-437. doi:10.1007/s00421-002-0712-3
- Meyer, T., Gorge, G., Schwaab, B., Hildebrandt, K., Walldorf, J., Schafer, C., . . . Kindermann, W. (2005). An alternative approach for exercise prescription and efficacy testing in patients with chronic heart failure: A randomized controlled training study. *American Heart Journal*, 149(5). doi:ARTN e110.1016/j.ahj.2004.72.006
- Meyer, T., & Kindermann, W. (1999). Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO₂max). *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 50(9), 285-286.
- Meyer, T., Lucia, A., Earnest, C. P., & Kindermann, W. (2005). A conceptual framework for performance diagnosis and training prescription from submaximal gas exchange parameters--theory and application. *Int J Sports Med*, 26 Suppl 1, S38-48. doi:10.1055/s-2004-830514
- Meyer, T., Scharhag, J., & Kindermann, W. (2005). Peak oxygen uptake. Myth and truth about an internationally accepted reference value. *Z Kardiol*, 94(4), 255-264. doi:10.1007/s00392-005-0207-4
- Midgley, A. W., McNaughton, L. R., & Jones, A. M. (2007). Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance: can valid
-

- recommendations be given to runners and coaches based on current scientific knowledge? *Sports Med*, 37(10), 857-880.
- Mujika, I. (2012). *Endurance training: science and practice*. Vitoria-Gasteiz: Mujika.
- Mujika, I., & Padilla, S. (2001a). Cardiorespiratory and metabolic characteristics of detraining in humans. *Med Sci Sports Exerc*, 33(3), 413-421.
- Mujika, I., & Padilla, S. (2001b). Physiological and performance characteristics of male professional road cyclists. *Sports Med*, 31(7), 479-487.
- Myers, J., & Ashley, E. (1997). Dangerous curves. A perspective on exercise, lactate, and the anaerobic threshold. *Chest*, 111(3), 787-795.
- Nichols, J. F., Phares, S. L., & Buono, M. J. (1997). Relationship between blood lactate response to exercise and endurance performance in competitive female master cyclists. *Int J Sports Med*, 18(6), 458-463. doi:10.1055/s-2007-972664
- Nicholson, R. M., & Sleivert, G. G. (2001). Indices of lactate threshold and their relationship with 10-km running velocity. *Med Sci Sports Exerc*, 33(2), 339-342.
- Niess, A. M., Fehrenbach, E., Strobel, G., Roecker, K., Schneider, E. M., Buergler, J., . . . Dickhuth, H. H. (2003). Evaluation of stress responses to interval training at low and moderate altitudes. *Med Sci Sports Exerc*, 35(2), 263-269. doi:10.1249/01.MSS.0000048834.68889.81
- Nikolopoulos, V., Arkinstall, M. J., & Hawley, J. A. (2001). Pacing strategy in simulated cycle time-trials is based on perceived rather than actual distance. *J Sci Med Sport*, 4(2), 212-219.
- Noakes, T. D. (2000). Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. *Scand J Med Sci Sports*, 10(3), 123-145.
- Oyono-Enguelle, S., Heitz, A., Marbach, J., Ott, C., Gartner, M., Pape, A., . . . Freund, H. (1990). Blood lactate during constant-load exercise at aerobic and anaerobic thresholds. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 60(5), 321-330.
- Padilla, S., Mujika, I., Angulo, F., & Goiriena, J. J. (2000). Scientific approach to the 1-h cycling world record: a case study. *J Appl Physiol (1985)*, 89(4), 1522-1527.
- Padilla, S., Mujika, I., Cuesta, G., & Goiriena, J. J. (1999). Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 31(6), 878-885.
- Padilla, S., Mujika, I., Cuesta, G., Polo, J. M., & Chatard, J. C. (1996). Validity of a velodrome test for competitive road cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 73(5), 446-451.
- Padilla, S., Mujika, I., Orbananos, J., & Angulo, F. (2000). Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 32(4), 850-856.
- Padilla, S., Mujika, I., Santisteban, J., Impellizzeri, F. M., & Goiriena, J. J. (2008). Exercise intensity and load during uphill cycling in professional 3-week races. *Eur J Appl Physiol*, 102(4), 431-438. doi:10.1007/s00421-007-0602-9
-

-
- Palmer, A. S., Potteiger, J. A., Nau, K. L., & Tong, R. J. (1999). A 1-day maximal lactate steady-state assessment protocol for trained runners. *Med Sci Sports Exerc*, *31*(9), 1336-1341.
- Palmer, G. S., Dennis, S. C., Noakes, T. D., & Hawley, J. A. (1996). Assessment of the reproducibility of performance testing on an air-braked cycle ergometer. *Int J Sports Med*, *17*(4), 293-298. doi:10.1055/s-2007-972849
- Palmer, G. S., Hawley, J. A., Dennis, S. C., & Noakes, T. D. (1994). Heart rate responses during a 4-d cycle stage race. *Med Sci Sports Exerc*, *26*(10), 1278-1283.
- Pfeiffer, R. P., Harder, B. P., Landis, D., Barber, D., & Harper, K. (1993). Correlating Indices of Aerobic Capacity With Performance in Elite Women Road Cyclists. *J Strength Cond Res*, *7*(4), 201-205.
- Pfitzinger, P., & Freedson, P. S. (1998). The reliability of lactate measurements during exercise. *Int J Sports Med*, *19*(5), 349-357. doi:10.1055/s-2007-971929
- Poole, D. C., Burnley, M., Vanhatalo, A., Rossiter, H. B., & Jones, A. M. (2016). Critical Power: An Important Fatigue Threshold in Exercise Physiology. *Med Sci Sports Exerc*. doi:10.1249/MSS.0000000000000939
- Pringle, J. S., Doust, J. H., Carter, H., Tolfrey, K., Campbell, I. T., & Jones, A. M. (2003). Oxygen uptake kinetics during moderate, heavy and severe intensity 'submaximal' exercise in humans: the influence of muscle fibre type and capillarisation. *Eur J Appl Physiol*, *89*(3-4), 289-300.
- Radegran, G., Blomstrand, E., & Saltin, B. (1999). Peak muscle perfusion and oxygen uptake in humans: importance of precise estimates of muscle mass. *J Appl Physiol* (1985), *87*(6), 2375-2380.
- Reilly, T., & Woodbridge, V. (1999). Effects of moderate dietary manipulations on swim performance and on blood lactate-swimming velocity curves. *Int J Sports Med*, *20*(2), 93-97. doi:10.1055/s-2007-971099
- Ribeiro, J. P., Hughes, V., Fielding, R. A., Holden, W., Evans, W., & Knuttgen, H. G. (1986). Metabolic and ventilatory responses to steady state exercise relative to lactate thresholds. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *55*(2), 215-221.
- Rietjens, G. J., Kuipers, H., Adam, J. J., Saris, W. H., van Breda, E., van Hamont, D., & Keizer, H. A. (2005). Physiological, biochemical and psychological markers of strenuous training-induced fatigue. *Int J Sports Med*, *26*(1), 16-26. doi:10.1055/s-2004-817914
- Robergs, R. A., Chwalbinska-Moneta, J., Mitchell, J. B., Pascoe, D. D., Houmard, J., & Costill, D. L. (1990). Blood lactate threshold differences between arterialized and venous blood. *Int J Sports Med*, *11*(6), 446-451. doi:10.1055/s-2007-1024835
- Roecker, K., Schotte, O., Niess, A. M., Horstmann, T., & Dickhuth, H.-H. (1998). Predicting competition performance in long-distance running by means of a treadmill test. *Med Sci Sports Exerc*, *30*, 1552-1557.
- Sahlin, K., Harris, R. C., & Hultman, E. (1979). Resynthesis of creatine phosphate in human muscle after exercise in relation to intramuscular pH and availability of oxygen. *Scand J Clin Lab Invest*, *39*(6), 551-558. doi:10.3109/00365517909108833
-

-
- Saltin, B., & Astrand, P. O. (1967). Maximal oxygen uptake in athletes. *J Appl Physiol*, 23(3), 353-358.
- Saltin, B., Radegran, G., Koskolou, M. D., & Roach, R. C. (1998). Skeletal muscle blood flow in humans and its regulation during exercise. *Acta Physiol Scand*, 162(3), 421-436. doi:10.1046/j.1365-201X.1998.0293e.x
- Santalla, A., Earnest, C. P., Marroyo, J. A., & Lucia, A. (2012). The Tour de France: an updated physiological review. *Int J Sports Physiol Perform*, 7(3), 200-209.
- Santalla, A., Naranjo, J., & Terrados, N. (2009). Muscle efficiency improves over time in world-class cyclists. *Med Sci Sports Exerc*, 41(5), 1096-1101. doi:10.1249/MSS.0b013e318191c802
- Sawka, M. N., Convertino, V. A., Eichner, E. R., Schnieder, S. M., & Young, A. J. (2000). Blood volume: importance and adaptations to exercise training, environmental stresses, and trauma/sickness. *Med Sci Sports Exerc*, 32(2), 332-348.
- Scharhag-Rosenberger, F., Carlsohn, A., Lundby, C., Schüler, S., Mayer, F., & Scharhag, J. (2014). Can more than one incremental cycling test be performed within one day? *European Journal of Sport Science*, 14(5), 459-467.
- Scharhag-Rosenberger, F., Meyer, T., Gassler, N., Faude, O., & Kindermann, W. (2010). Exercise at given percentages of VO₂max: heterogeneous metabolic responses between individuals. *J Sci Med Sport*, 13(1), 74-79. doi:10.1016/j.jsams.2008.12.626
- Scharhag, J., Meyer, G. T., Gabriel, H. H. W., Schlick, B., Faude, O., & Kindermann, W. (2005). Does prolonged cycling of moderate intensity affect immune cell function? *Br J Sports Med*, 39(3), 171-177. doi:10.1136/bjism.2004.013060
- Scheen, A., Juchmes, J., & Cession-Fossion, A. (1981). Critical analysis of the "anaerobic threshold" during exercise at constant workloads. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 46(4), 367-377.
- Schmidt, A. (2007). *Das große Buch vom Radsport*. Aachen: Meyer & Meyer.
- Schnabel, A., Kindermann, W., Schmitt, W. M., Biro, G., & Stegmann, H. (1982). Hormonal and metabolic consequences of prolonged running at the individual anaerobic threshold. *Int J Sports Med*, 3(3), 163-168. doi:10.1055/s-2008-1026082
- Schwindling, S., Scharhag-Rosenberger, F., Kindermann, W., & Meyer, T. (2014). Limited benefit of Fatmax-test to derive training prescriptions. *Int J Sports Med*, 35(4), 280-285. doi:10.1055/s-0033-1349106
- Seiler, K. S., & Kjerland, G. O. (2006). Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an "optimal" distribution? *Scand J Med Sci Sports*, 16(1), 49-56. doi:10.1111/j.1600-0838.2004.00418.x
- Serresse, O., Lortie, G., Bouchard, C., & Boulay, M. R. (1988). Estimation of the contribution of the various energy systems during maximal work of short duration. *Int J Sports Med*, 9(6), 456-460. doi:10.1055/s-2007-1025051
-

-
- Simon, G., Berg, A., Dickhuth, H., Simon-Alt, A., & Keul, J. (1981). Bestimmung der anaeroben Schwelle in Abhängigkeit vom Alter und von der Leistungsfähigkeit. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 32(1), 7-14.
- Simon, J., Young, J. L., Gutin, B., Blood, D. K., & Case, R. B. (1983). Lactate accumulation relative to the anaerobic and respiratory compensation thresholds. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 54(1), 13-17.
- Sjodin, B., & Jacobs, I. (1981). Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int J Sports Med*, 2(1), 23-26. doi:10.1055/s-2008-1034579
- Sjodin, B., & Svedenhag, J. (1985). Applied physiology of marathon running. *Sports Med*, 2(2), 83-99.
- Sjogaard, G. (1984). Muscle morphology and metabolic potential in elite road cyclists during a season. *Int J Sports Med*, 5(5), 250-254. doi:10.1055/s-2008-1025915
- Skinner, J. S., & McLellan, T. H. (1980). The Transition from Aerobic to Anaerobic Metabolism. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 51(1), 234-248.
- Skorski, S., Hammes, D., Schwindling, S., Veith, S., Pfeiffer, M., Ferrauti, A., . . . Meyer, T. (2015). Effects of training-induced fatigue on pacing patterns in 40-km cycling time trials. *Med Sci Sports Exerc*, 47(3), 593-600. doi:10.1249/MSS.0000000000000439
- Smith, C. G., & Jones, A. M. (2001). The relationship between critical velocity, maximal lactate steady-state velocity and lactate turnpoint velocity in runners. *Eur J Appl Physiol*, 85(1-2), 19-26.
- Smith, J. C., Dangelmaier, B. S., & Hill, D. W. (1999). Critical power is related to cycling time trial performance. *Int J Sports Med*, 20(6), 374-378. doi:10.1055/s-2007-971147
- Smith, J. C., & Hill, D. W. (1991). Contribution of energy systems during a Wingate power test. *Br J Sports Med*, 25(4), 196-199.
- Smith, M. F., Davison, R. C., Balmer, J., & Bird, S. R. (2001). Reliability of mean power recorded during indoor and outdoor self-paced 40 km cycling time-trials. *Int J Sports Med*, 22(4), 270-274. doi:10.1055/s-2001-13813
- Snyder, A. C., Woulfe, T., Welsh, R., & Foster, C. (1994). A simplified approach to estimating the maximal lactate steady state. *Int J Sports Med*, 15(1), 27-31. doi:10.1055/s-2007-1021015
- Spriet, L. L. (1992). Anaerobic metabolism in human skeletal muscle during short-term, intense activity. *Canadian journal of physiology and pharmacology*, 70(1), 157-165.
- Spriet, L. L., Lindinger, M. I., McKelvie, R. S., Heigenhauser, G. J., & Jones, N. L. (1989). Muscle glycogenolysis and H⁺ concentration during maximal intermittent cycling. *J Appl Physiol* (1985), 66(1), 8-13.
- St Clair Gibson, A., Schabort, E. J., & Noakes, T. D. (2001). Reduced neuromuscular activity and force generation during prolonged cycling. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 281(1), R187-196.
-

-
- Stegmann, H., & Kindermann, W. (1982). Comparison of prolonged exercise tests at the individual anaerobic threshold and the fixed anaerobic threshold of 4 mmol.l(-1) lactate. *Int J Sports Med*, 3(2), 105-110. doi:10.1055/s-2008-1026072
- Stegmann, H., Kindermann, W., & Schnabel, A. (1981). Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. *Int J Sports Med*, 2(3), 160-165. doi:10.1055/s-2008-1034604
- Stratton, E., O'Brien, B. J., Harvey, J., Blitvich, J., McNicol, A. J., Janissen, D., . . . Knez, W. (2009). Treadmill Velocity Best Predicts 5000-m Run Performance. *Int J Sports Med*, 30(1), 40-45.
- Stromme, S. B., Ingjer, F., & Meen, H. D. (1977). Assessment of maximal aerobic power in specifically trained athletes. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 42(6), 833-837.
- Svedahl, K., & MacIntosh, B. R. (2003). Anaerobic threshold: the concept and methods of measurement. *Can J Appl Physiol*, 28(2), 299-323.
- Swensen, T. C., Harnish, C. R., Beitman, L., & Keller, B. A. (1999). Noninvasive estimation of the maximal lactate steady state in trained cyclists. *Med Sci Sports Exerc*, 31(5), 742-746.
- Tanaka, H. (1986). Predicting running velocity at blood lactate threshold from running performance tests in adolescent boys. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 55(4), 344-348.
- Tanaka, H., Bassett, D. R., Jr., Swensen, T. C., & Sampedro, R. M. (1993). Aerobic and anaerobic power characteristics of competitive cyclists in the United States Cycling Federation. *Int J Sports Med*, 14(6), 334-338. doi:10.1055/s-2007-1021188
- Tanaka, K., & Matsuura, Y. (1984). Marathon performance, anaerobic threshold, and onset of blood lactate accumulation. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 57(3), 640-643.
- Tanaka, K., Matsuura, Y., Matsuzaka, A., Hirakoba, K., Kumagai, S., Sun, S. O., & Asano, K. (1984). A longitudinal assessment of anaerobic threshold and distance-running performance. *Med Sci Sports Exerc*, 16(3), 278-282.
- Tegtbur, U., Busse, M. W., & Braumann, K. M. (1993). Estimation of an individual equilibrium between lactate production and catabolism during exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 25(5), 620-627.
- Terrados, N., Melichna, J., Sylven, C., Jansson, E., & Kaijser, L. (1988). Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 57(2), 203-209.
- Thin, A. G., Hamzah, Z., FitzGerald, M. X., McLoughlin, P., & Freaney, R. (1999). Lactate determination in exercise testing using an electrochemical analyser: with or without blood lysis? *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 79(2), 155-159. doi:10.1007/s004210050489
- Tonkonogi, M., & Sahlin, K. (1997). Rate of oxidative phosphorylation in isolated mitochondria from human skeletal muscle: effect of training status. *Acta Physiol Scand*, 161(3), 345-353. doi:10.1046/j.1365-201X.1997.00222.x
-

- Tonkonogi, M., Walsh, B., Svensson, M., & Sahlin, K. (2000). Mitochondrial function and antioxidative defence in human muscle: effects of endurance training and oxidative stress. *J Physiol*, *528 Pt 2*, 379-388.
- Union Cycliste Internationale. (2016a, 20.10.2016). 2016 Road World Championships - Final Results Men Elite Individual Time Trial. Verfügbar unter <http://www.uci.ch/road/ucievents/2016-road-uci-road-world-championships/111129016/widgets/entries-start-lists-results-179892/>
- Union Cycliste Internationale. (2016b, 27.10.2016). Historical of the World Records. Verfügbar unter <http://www.uci.ch/track/about/>
- Urhausen, A., Coen, B., Weiler, B., & Kindermann, W. (1993). Individual anaerobic threshold and maximum lactate steady state. *Int J Sports Med*, *14*(3), 134-139. doi:10.1055/s-2007-1021157
- Urhausen, A., Gabriel, H. H., Weiler, B., & Kindermann, W. (1998). Ergometric and psychological findings during overtraining: a long-term follow-up study in endurance athletes. *Int J Sports Med*, *19*(2), 114-120. doi:10.1055/s-2007-971892
- Urhausen, A., & Kindermann, W. (2002). Diagnosis of overtraining: what tools do we have? *Sports Med*, *32*(2), 95-102.
- Urhausen, A., Weiler, B., Coen, B., & Kindermann, W. (1994). Plasma catecholamines during endurance exercise of different intensities as related to the individual anaerobic threshold. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *69*(1), 16-20.
- Van Schuylenbergh, R., Vanden Eynde, B., & Hespel, P. (2004). Correlations between lactate and ventilatory thresholds and the maximal lactate steady state in elite cyclists. *Int J Sports Med*, *25*(6), 403-408. doi:10.1055/s-2004-819942
- van Someren, K. A., Howatson, G., Nunan, D., Thatcher, R., & Shave, R. (2005). Comparison of the Lactate Pro and Analox GM7 blood lactate analysers. *Int J Sports Med*, *26*(8), 657-661. doi:10.1055/s-2004-830337
- Vogt, S., Heinrich, L., Schumacher, Y. O., Blum, A., Roecker, K., Dickhuth, H. H., & Schmid, A. (2006). Power output during stage racing in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc*, *38*(1), 147-151.
- Warburton, D. E., Gledhill, N., Jamnik, V. K., Krip, B., & Card, N. (1999). Induced hypervolemia, cardiac function, VO₂max, and performance of elite cyclists. *Med Sci Sports Exerc*, *31*(6), 800-808.
- Wasserman, K., Hansen, J. E., Sue, D. Y., Whipp, B. J., & Froelicher, V. F. (1987). Principles of exercise testing and interpretation. *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation and Prevention*, *7*(4), 189.
- Wasserman, K., & McIlroy, M. B. (1964). Detecting the Threshold of Anaerobic Metabolism in Cardiac Patients during Exercise. *Am J Cardiol*, *14*, 844-852.
- Weinmann, A. (2014). *Ernährungsverhalten trainierter Radsportler innerhalb eines intensiven Trainingslagers*. (Bachelorarbeit), Universität des Saarlandes.
- Wells, J. G., Balke, B., & Van Fossan, D. D. (1957). Lactic acid accumulation during work; a suggested standardization of work classification. *J Appl Physiol*, *10*(1), 51-55.
-

- Weltman, A., Seip, R. L., Snead, D., Weltman, J. Y., Haskvitz, E. M., Evans, W. S., . . . Rogol, A. D. (1992). Exercise Training at and above the Lactate Threshold in Previously Untrained Women. *Int J Sports Med*, 13(3), 257-263. doi:DOI 10.1055/s-2007-1021263
- Weltman, A., Snead, D., Seip, R., Schurrer, R., Levine, S., Rutt, R., . . . Rogol, A. (1987). Prediction of lactate threshold and fixed blood lactate concentrations from 3200-m running performance in male runners. *Int J Sports Med*, 8(6), 401-406. doi:10.1055/s-2008-1025694
- Wilber, R. L., Zawadzki, K. M., Kearney, J. T., Shannon, M. P., & Disalvo, D. (1997). Physiological profiles of elite off-road and road cyclists. *Med Sci Sports Exerc*, 29(8), 1090-1094.
- Withers, R. T., Sherman, W. M., Clark, D. G., Esselbach, P. C., Nolan, S. R., Mackay, M. H., & Brinkman, M. (1991). Muscle metabolism during 30, 60 and 90 s of maximal cycling on an air-braked ergometer. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 63(5), 354-362.
- Yamamoto, Y., Miyashita, M., Hughson, R. L., Tamura, S., Shinohara, M., & Mutoh, Y. (1991). The ventilatory threshold gives maximal lactate steady state. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 63(1), 55-59.
- Yeh, M. P., Gardner, R. M., Adams, T. D., Yanowitz, F. G., & Crapo, R. O. (1983). "Anaerobic threshold": problems of determination and validation. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 55(4), 1178-1186.
- Yoshida, T. (1984). Effect of dietary modifications on lactate threshold and onset of blood lactate accumulation during incremental exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 53(3), 200-205.
- Yoshida, T., Chida, M., Ichioka, M., & Suda, Y. (1987). Blood lactate parameters related to aerobic capacity and endurance performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 56(1), 7-11.
- Yoshida, T., Udo, M., Chida, M., Ichioka, M., Makiguchi, K., & Yamaguchi, T. (1990). Specificity of physiological adaptation to endurance training in distance runners and competitive walkers. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 61(3-4), 197-201.
- Yoshida, T., Udo, M., Iwai, K., Chida, M., Ichioka, M., Nakadomo, F., & Yamaguchi, T. (1990). Significance of the contribution of aerobic and anaerobic components to several distance running performances in female athletes. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 60(4), 249-253.
- Yoshida, T., Udo, M., Iwai, K., & Yamaguchi, T. (1993). Physiological characteristics related to endurance running performance in female distance runners. *J Sports Sci*, 11(1), 57-62. doi:10.1080/02640419308729964
- Zhou, S., & Weston, S. B. (1997). Reliability of using the D-max method to define physiological responses to incremental exercise testing. *Physiol Meas*, 18(2), 145-154.
-

Danksagung

Mein erster und wichtigster Dank gilt Univ.-Prof. Dr. med. Tim Meyer, der mich zu dieser Promotion anspornte und mir ermöglichte ein Thema in meiner Lieblingssportart zu wählen. Dabei stand er mir immer mit konstruktiver Kritik und Anregungen zur Seite, eine Betreuung, die nicht zielführender hätte sein können. Ein ganz besonderer Dank auch dafür, dass ich diese Studien an seinem Institut durchführen durfte und er mir die nötige Zeit und Freiheit ließ, mich dieser Dissertationsschrift zu widmen. Danken möchte ich auch Univ.-Prof. Dr. phil. Georg Wydra, der ohne zu zögern die Betreuung von sportwissenschaftlicher Seite übernahm.

Den aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des Instituts für Sport- und Präventivmedizin der Universität des Saarlandes bin ich für die gute und zahlreiche Unterstützung sowie die effektive und angenehme Zusammenarbeit sehr dankbar.

Besonders Prof. (FH) Dr. phil. habil. Friederike Scharhag-Rosenberger und PD Dr. phil. Oliver Faude danke ich dafür, dass sie mir das wissenschaftliche Arbeiten und ergometrische „Handwerkszeug“ beibrachten.

Auch Dr. med. Anne Hecksteden danke ich für die zahlreichen angenehmen fachlichen Gespräche, Ratschläge und Anmerkungen, die mich auf dem Weg zur fertigen Arbeit neue Aspekte und Ansätze entdecken ließen.

Ein besonderer Dank gilt meiner langjährigen Kollegin und sehr guten Freundin Dr. phil. Sabrina Skorski. Unsere hilfreichen Diskussionen und uneingeschränkte gegenseitige Unterstützung über die letzten Jahre sind nicht selbstverständlich. Auch die vielen nicht-wissenschaftlichen und motivierenden Gespräche haben meine Arbeit unterstützt.

Auch den Studenten, die im Rahmen dieser Studien ihre Abschlussarbeiten schrieben und so bei der Aufnahme der Daten mithalfen, bin ich dankbar.

Melissa Wegmann und Silke Ulrich möchte ich für ihr gutes sprachliches Feedback danken.

Ein weiterer Dank gilt den Probanden, die an diesen Studien teilnahmen.

Zum Schluss ein ganz besonderer Dank an meine Lebensgefährtin Angela Huwig, die mich auf eine unfassbar selbstlose Art und Weise unterstützt. Sie akzeptiert nicht nur meine Radsportsucht, sondern steht mir dabei in jeder Hinsicht zur Seite. Auch zu diesem Promotionsvorhaben, das einen beträchtlichen Teil meiner Zeit in Anspruch nahm, bestärkte sie mich ohne Vorbehalt. Auch meinen Eltern und Geschwistern danke ich für ihre Unterstützung und Motivation.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit

„Leistungsdiagnostik im Radsport – Validität und Störeinflüsse“

selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe. Alle Stellen, die anderen Werken nach Sinn und Wortlaut entnommen sind, hab ich kenntlich gemacht und deren Herkunft nachgewiesen.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form weder veröffentlicht, noch einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Sascha Schwindling
