

Energetische Anforderungsprofile intermittierender und hochintensiv-anaerober Belastungen

Sebastian Kaufmann



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Energetische Anforderungsprofile intermittierender und hochintensiv - anaerober Belastungen





Energetische Anforderungsprofile intermittierender und hochintensiv-anaerober Belastungen

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der Philosophie (Dr. phil.)

der Fakultät für Humanwissenschaften
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von

Sebastian Kaufmann

aus Gerbrunn

2021

Gutachter:

Erstgutachter: Prof. Dr. Olaf Hoos, Sportzentrum

Zweitgutachter: Prof. Dr. Heinz Reinders, Empirische Bildungsforschung

Tag des Kolloquiums: 31.05.2021



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2021

Zugl.: Würzburg, Univ., Diss., 2021

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2021

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2021

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7351-0

eISBN 978-3-7369-6351-1



Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die dieses Promotionsprojekt mit unterstützt haben und bei allen ohne die dieses Projekt nicht zu Stande gekommen wäre.

Zunächst bei allen Hiwis des Sportzentrums der Universität Würzburg und allen Studierenden, die mich bei diversen Datenerhebungen unterstützt haben. Hier gilt mein besonderer Dank Thomas Tietz und Frido Gerhart, außerdem auch Aaron Beck und Fabian Füller. Außerdem möchte ich mich bei Felix Rother und der Handballmannschaft des DJK Waldbüttelbrunn für die Teilnahme an den Tests, sowie bei allen weiteren Probanden bedanken, sowie bei Dr. Leonie Schelp für die vielen ablenkenden Laufeinheiten.

Bei René Frank, Dr. Dominik Reim, Dr. Felix Megerle und Prof. Dr. Olaf Hoos, die mir die notwendigen Grundlagen für diese Arbeit vermittelt haben. Moreover, I would like to thank Dr. James Faulkner for the opportunity to experience the work life of a sports scientist and for the good, scientific training.

Ich möchte mich außerdem bei Prof. Dr. Richard Latzel und Prof. Dr. Ralph Beneke bedanken. Richard Latzel unterstützte diese Arbeit gleich in mehrfacher Hinsicht und war immer ein guter Berater bei allen wissenschaftlichen und beruflichen Fragen. Ohne seine Arbeit mit der PCr-LA-O₂ Methode wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Letzteres gilt auch für Ralph Beneke dessen Rat besonders in methodischen Fragen immer eine große Hilfe war.

Bei Prof. Dr. Heinz Reinders für die unkomplizierte wissenschaftliche Unterstützung und die differenzierten Anmerkungen und Kommentare.



Ganz besonders, möchte ich mich bei Prof. Dr. Olaf Hoos bedanken. Er unterstützte die Arbeit vom Anfang bis zum Ende und seine Ideen verliehen der Arbeit Form. Durch seine Expertise und Offenheit sowie die hervorragende Betreuung war es mir möglich diese Arbeit, trotz vieler anderer Aufgaben, fertigzustellen.

Schließlich möchte ich mich bei Andi Arbinger und meinem Bruder Flo bedanken sowie bei meinen Eltern. Mein großer Dank gilt meiner Frau Marina, ohne ihre Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.



Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	V
1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
2 THEORETISCHER BEZUGSRAHMEN	7
2.1 Energiebereitstellungswege und Interaktionen bei Belastung .	7
2.1.1 ATP-PCr-System	8
2.1.2 Anaerobe Glykolyse	11
2.1.3 Mitochondriale Respiration	14
2.1.4 Kapazität und Leistungsfähigkeit des Metabolismus.....	18
2.2 Energetische Anforderungsprofile sportlicher Belastungen	20
2.2.1 Methoden zur Berechnung der Energiebereitstellung	21
2.2.1.1 Leistungs- und Bewegungsbasierte Ansätze.....	22
2.2.1.2 Maximal Accumulated Oxygen Deficit.....	24
2.2.1.3 Dreikomponentenmethode – PCr-LA-O ₂	25
2.2.2 Energetische Anforderungsprofile kontinuierlicher Belastungen ..	31
2.2.3 Energetische Anforderungsprofile intermittierender und hochintensiv-anaerober Belastungen	38
2.2.3.1 Bedeutung der Phosphokreatin Resynthese	45
2.2.3.2 Leistungsdiagnostische Aspekte intermittierender Belastungen	48
2.2.3.3 Leistungsdiagnostische Aspekte hochintensiv-anaerober Belastungen	53
2.2.4 Mögliche Einflussfaktoren auf energetische Anforderungen.....	58
2.2.4.1 Einfluss der inter-effort recovery ability.....	58
2.2.4.2 Einfluss der Trainingsspezialisierung	61
2.2.4.3 Einfluss unterschiedlicher Protokolle	63
2.2.4.4 Einfluss der Lokomotionsform	65



2.3 Zusammenfassung der Forschungsdefizite.....	67
2.4 Forschungshypothesen	69
3 METHODEN & STATISTIK.....	73
3.1 Methodisches Vorgehen	73
3.2 PCr-LA-O₂.....	74
3.2.1 Kontinuierliches Modell	74
3.2.2 Intermittierendes Modell	76
3.3 Testreihe Intermittent Fitness Test.....	78
3.3.1 Test-Retest Reliabilität der PCr-LA-O ₂	79
3.3.2 30-15 _{IFT} - intermittierend vs. kontinuierlich.....	79
3.3.3 30-15 _{IFT} - Einfluss der Trainingsspezialisierung	80
3.4 Testreihe YYIR1 vs. YYIR2	80
3.5 Testreihe hochintensiv-anaerobe Belastungen.....	81
3.6 Statistik.....	82
4 ERGEBNISSE.....	85
4.1 Reliabilität physiologischer und metabolischer Parameter der PCr-LA-O₂.....	85
4.2 30-15_{IFT} vs. 30-15_{IFT}-CONT	90
4.3 30-15_{IFT} Energetik bei Ausdauer- und Teamsportlern.....	92
4.4 YYIR1 vs. 2 - Energetik unterschiedlicher Protokolle	94
4.5 CJ30 vs. WAnT – Energetik und Lokomotionsform	98



5	DISKUSSION	101
5.1	Reliabilität der PCr-LA-O₂.....	101
5.2	Bedeutung der inter-effort recovery ability	109
5.3	Unterschiede zwischen Team- und Ausdauersportlern	113
5.4	Energetische Reaktion auf unterschiedliche Protokolle.....	117
5.5	Relevanz der Lokomotionsform	121
5.6	Wesentliche Einflussfaktoren auf das energetische Anforderungsprofil	126
5.7	Ableitungen für die Sportpraxis.....	134
5.8	Limitationen	138
6	AUSBLICK.....	141
7	ZUSAMMENFASSUNG	145
	VERZEICHNISSE.....	CXLV
	Literatur	CXLVI
	Abbildungsverzeichnis	CLXVIII
	Tabellenverzeichnis	CLXXI
	Anhang	CLXXII
	Beispiel Einverständniserklärung	CLXXII
	Beispiel Checkliste für Datenerhebung	CLXXIV
	Beispiel EPOC nach 30-15 _{IFT}	CLXXVI
	ERKLÄRUNG ZU DRUCKRECHTEN	CLXXVII



URHEBERSCHAFTSERKLÄRUNG CLXXVIII



Abkürzungsverzeichnis

30-15 _{IFT}	30-15 Intermittent-Fitness Test
ΔBLC	Differenz aus Ruhe- und Spitzenlaktat
AA	amino acids (Aminosäuren)
Acetyl-CoA	Acetyl-Coenzym A
ADP	Adenosindiphosphat
AMP	Adenosinmonophosphat
ATP	Adenosintriphosphat
BEST	Basketball-Exercise-Simulation Test
BLC	Blutlaktat
CHO	carbohydrate (Kohlenhydrate)
CJ30	Bosco continuous 30s jumping Test (30sek Bosco Sprungtest)
CK	Kreatinkinase
CODS	change-of-direction speed (Fähigkeit zu schnellen Richtungswechseln)
EA	endurance athletes (Ausdauersportler)
EPOC	excess postexercise oxygen consumption (erhöhte Nachbelastungssauerstoffaufnahme)
FFA	free fatty acids (freie Fettsäuren)
G1P	Glukose-1-Phosphat
G6P	Glukose-6-Phosphat



GPS	Global positioning system
H ⁺	Wasserstoff
HCO ₃ ⁻	Hydrogencarbonat
O ₂	Sauerstoff
kg	Kilogramm
LDH	Laktatdehydrogenase
MCT	Monocarboxylat Transporter
mmol	Millimol (tausendstel Mol)
mmol·kg ⁻¹	Millimol pro Kilogramm
mmol·kg wmm ⁻¹	Millimol pro Kilogramm Feuchtmuskel- masse
MP	mean power (Durchschnittsleistung)
MPC	mitochondrial pyruvate carriers
PCr	Kreatinphosphat
PDH	Pyruvatdehydrogenase
PFK	Phosphofruktokinase
Pi	organisches Phosphat
P-MR-Spektroskopie	Phosphor Magnetresonanz- spektroskopie
PO	power output (erbrachte Leistung)
PP	peak power (Maximalleistung)
Pyruvat	Brenztraubensäure
P _{tot}	total power (Gesamtleistung)
RCP	respiratory compensation point



	(zweite ventilatorische Schwelle)
RQ	respiratorischer Quotient
RSA	repeated sprint ability (wiederholte Sprintfähigkeit)
SSC	stretch-shortening cycle (Dehnungsverkürzungszyklus)
$T_{1/2}$	Halbwertszeit
TEM	typical error of measurement (typischer Messfehler)
TMA	time-motion analysis
TSA	team sport athletes (Mannschaftssportler)
v_{IFT}	30-15 _{IFT} end velocity (letzte erfolgreiche Geschwindigkeit im 30-15 _{IFT})
WAnT	Wingate-Anaerobic Test
wmm	wet muscle mass (Feuchtmuskelmasse)
W_{tot}	metabolic energy (metabolische Energie)
YYIR1	Yo-Yo Intermittent Recovery Test 1
YYIR2	Yo-Yo Intermittent Recovery Test 2





1 Einleitung und Problemstellung

Die vorliegende Forschungsarbeit soll relevante Erkenntnisse zum Energiestoffwechsel der menschlichen Skelettmuskulatur bei intermittierenden und hochintensiv-anaeroben Belastungen liefern.

Der Energiestoffwechsel der menschlichen Skelettmuskulatur ist ein gut untersuchter Forschungsbereich, weshalb zu den theoretischen Grundlagen der Funktionsweise der Energiebereitstellungswege und deren Interaktion fundierte Erkenntnisse vorliegen (Baker, McCormick, & Robergs, 2010; Brooks, 2018; Di Prampero, 1981; Di Prampero & Margaria, 1968; Ferretti, 2015; Gaitanos, Williams, Boobis, & Brooks, 1993; Gastin, 2001). Daher gibt es für viele Sportarten mit kontinuierlicher Belastung (bspw. 1500m Lauf, 200m Kayak, usw.) genaue Angaben zu den aeroben und anaeroben Anteilen an der Energiebereitstellung für diese Leistungen (Di Prampero, Atchou, Brückner, & Moia, 1986; Gastin, 2001; Li, Niessen, Chen, & Hartmann, 2017). Unter den quasi steady-state Bedingungen kontinuierlicher Belastungen kann auf Grundlage der Sauerstoffaufnahme die benötigte aerobe Energiemenge leicht berechnet werden (Di Prampero et al., 1986; Maud & Foster, 2006). Der anaerobe Anteil kann aus der Extrapolation dieser Werte (Medbø, 1996; Noordhof, De Koning, & Foster, 2010), oder unter Vernachlässigung des anaerob-alaktaziden Anteils aus den Blutlaktatwerten berechnet werden (Di Prampero et al., 1986). Allerdings haben viele Sportarten, vor allem aber Teamsportarten, ein intermittierendes Anforderungsprofil (Abdelkrim, Castagna, Jabri, Battikh, El Fazaa, & El Ati, 2010; Bangsbo, Nørregaard, & Thorsoe, 1991; Gray & Jenkins, 2010; Krustrup & Mohr, 2015; Póvoas, Seabra, Ascensão, Magalhães, Soares, & Rebelo, 2012). Das heißt, die Aktivitäten sind immer wieder von kurzen Pausen unterbrochen. Außerdem kann die Intensität der einzelnen Aktivitäten stark schwanken (Krustrup & Mohr, 2015; Scanlan, Dascombe, & Reaburn, 2011). Aufgrund der damit verbundenen Be- und Entschleunigungen



kommt es folglich auch zu einem fluktuierenden Energiebedarf (Zamparo, Bolomini, Nardello, & Beato, 2015). Dieser Energiebedarf ist momentan nicht direkt messbar, weshalb für verschiedene intermittierende Belastungen aktuell keine konkreten Aussagen bezüglich der exakten Beteiligung der Energiebereitstellungswege möglich ist. Das liegt erstens an den komplexen Interaktionen der Energiesysteme untereinander bei intermittierenden und hochintensiv-anaeroben Belastungen und zweitens an den technischen Schwierigkeiten bezüglich der Erhebung und Auswertung geeigneter Biomarker. Während der Beitrag des aeroben Systems über Sauerstoffwerte vergleichsweise unkompliziert gemessen und berechnet werden kann (Maud & Foster, 2006; Steinacker, 2015), ist dies für das anaerob-laktazide PCr-System und das anaerob-laktazide System nicht der Fall. So können Phosphate im Skelettmuskel, die für das PCr-System relevant sind, nur vergleichsweise aufwändig im Magnetresonanzverfahren dargestellt und gemessen werden, wodurch Feldtests ausgeschlossen sind (Naimon, Walczyk, Babb, Khagai, Che, Alon, Regatte, Brown, & Parasoglou, 2017). Blutlaktatwerte können schnell und einfach von geschultem Personal erhoben und ausgewertet werden und geben Auskunft über die Beteiligung des anaerob-laktaziden Systems. Jedoch ist das Blutlaktat nur ein indirekter Parameter, da die eigentliche Laktatproduktion im Zytosol stattfindet. Folglich kann der Blutlaktatwert auch von anderen Faktoren als nur der Belastungsintensität beeinflusst werden (Wahl, Bloch, & Mester, 2009).

Der defizitäre Wissensstand zur Energetik intermittierender und hochintensiv-anaerober Belastungen ist aus trainingswissenschaftlicher Sicht problematisch. Um Athleten möglichst effektiv trainieren zu können sollte bekannt sein wie stark die einzelnen physiologischen Systeme bei einer Belastung beansprucht werden (Hottenrott, Hoos, Stoll, & Blazek, 2013). Folglich ergeben sich auch Probleme in der Leistungsdiagnostik. Diese hat im Sport die Aufgabe Athleten sportartspezifisch zu testen, um aus den Ergebnissen Trainingsempfehlungen abzuleiten (Hottenrott et al., 2013; Maud & Foster, 2006). Um diese Aufgabe zu erfüllen müssen die Sportler möglichst



spezifisch getestet werden und die Leistungstests müssen die verschiedenen Testgütekriterien wie bspw. Validität und Reliabilität bestmöglich erfüllen. Zwar sind die energetischen Anforderungen intermittierender und hochintensiv-anaerober Belastungen in der Regel unklar, jedoch gibt es basierend auf den Bewegungsprofilen gut standardisierte und erforschte Leistungstests zur Diagnostik der intermittierenden Ausdauer und der anaeroben Leistungsfähigkeit (Bangsbo, Iaia, & Krstrup, 2008; Buchheit, 2010; Inbar, Bar-Or, & Skinner, 1996; Sands, McNeal, Ochi, Urbanek, Jemni, & Stone, 2004). Die am besten evaluierten und am häufigsten angewendeten Tests sind dabei im intermittierenden Bereich der 30-15 Intermittent Fitness Test (30-15_{IFT}) (Buchheit, 2005), die Yo-Yo Intermittent Recovery Tests 1 und 2 (YYIR1, YYIR2) (Krustrup, Mohr, Amstrup, Rysgaard, Johansen, Steensberg, Pedersen, & Bangsbo, 2003; Krstrup, Mohr, Nybo, Jensen, Nielsen, & Bangsbo, 2006) und im anaeroben Bereich der Wingate Anaerobic Test (WAnT) (Bar-Or, Dotan, & Inbar, 1977) und der 30s Continuous-Jumping Test (CJ30) (Bosco, Luhtanen, & Komi, 1983). Während der YYIR1 ursprünglich für den Einsatz im Fußball und der 30-15_{IFT} für den Einsatz im Handball gedacht waren, werden beide Tests ebenso wie der YYIR2 mittlerweile scheinbar beliebig austauschbar in diversen Sportarten eingesetzt, ohne dass abschließend geklärt ist, welcher Test für welche Sportart am besten geeignet ist (Buchheit & Rabbani, 2014; Schmitz, Pfeifer, Kreitz, Borowski, Faldum, & Brand, 2018). Bei den anaeroben Tests ist der WAnT zwar sehr gut erforscht, allerdings ist der Test, der auf einem Radergometer stattfindet, aus motorischer Sicht nur für wenige Sportarten geeignet. Der als Alternative entwickelte Sprungtest CJ30 wird zwar häufig verwendet, wurde aber von Dal Pupo, Gheller, Dias, Rodacki, Moro, und Santos (2014) als unzureichend untersucht bezeichnet. Unter anderem ist bisher unklar wie stark anaerob der Test ist, da die absoluten Blutlaktatwerte (BLC) deutlich niedriger als beim WAnT sind (Sands et al., 2004). Um diese Wissenslücke zu verkleinern und theoretisch fundierte Entscheidungen für Diagnostik und Training zu treffen wäre es äußerst hilfreich, die energetischen



Anforderungen intermittierender und hochintensiver Belastungen sowie der entsprechenden Testverfahren zu kennen. Dafür müssten sogenannte energetische Anforderungsprofile dieser Belastungen erstellt und analysiert werden. Diese können mit der Dreikomponentenmethode (PCr-LA-O₂) berechnet werden. Dabei wird die aerobe Energie über das O₂ Äquivalent berechnet, die anaerob-alkalazide Energie über den schnellen Anteil der VO₂ nach der Belastung und die anaerob-laktazide wird über das ΔLaktat berechnet (Beneke & Meyer, 1997; Beneke, Pollmann, Bleif, Leithäuser, & Hutler, 2002). Die theoretischen Grundlagen für die PCr-LA-O₂ stammen aus den 60er,70er und 80er Jahren (Di Prampero et al., 1986; Di Prampero, Cerretelli, & Piiper, 1970; Di Prampero & Margaria, 1968, 1969; Hultman, Bergström, & Anderson, 1967; Knuttgen, 1970; Roberts & Morton, 1978). Angewendet wurde die Methode zunächst vereinfacht (Zweikomponentenmethode) von Di Prampero et al. (1986) und in ihrer aktuellen Form als Dreikomponentenmethode von Beneke und Meyer (1997) und Beneke et al. (2002). Unter der Leitung von Prof. Dr. Beneke wurde die Methode weiter entwickelt und ermöglicht nun auch die Berechnung der Energieanteile bei intermittierenden Belastungen (Davis, Leithäuser, & Beneke, 2014; Latzel, Hoos, Stier, Kaufmann, Fresz, Reim, & Beneke, 2018). Daher könnte mit dieser Methode theoretisch auch die Energetik in verschiedenen Spielsituationen bestimmt werden, was aber in der Praxis auf Grund der einzusetzenden Messtechnik vor allem in Teamsportarten mit Körperkontakt zwischen den Spielern nicht möglich ist (Latzel et al., 2018).

Konsequenterweise wäre es sinnvoll zumindest wesentliche Einflussfaktoren auf die energetischen Anforderungen intermittierender und hochintensiv-anaerober Belastungen zu kennen. Dadurch könnten bessere Rückschlüsse auf die Beanspruchung der Energiesysteme bei diesen Belastungen gezogen werden. Die Untersuchung möglicher Einflussfaktoren ist mit Hilfe der standardisierten Testprotokolle der bereits genannten intermittierenden und anaeroben Tests gut möglich, da die einzelnen Protokolle jeweils durch ver-



schiedene Belastungsnormative wie bspw. Belastungsdauer, Belastungsdichte, Pausendauer, Ausführung oder Intensitätsverlauf ihre speziellen Anforderungen erhalten. Des Weiteren kann die PCr-LA-O₂ Methode bei diesen Tests in einer echten Anwendungssituation und gleichzeitig unter laborähnlichen Bedingungen eingesetzt werden. Zusätzlich besteht so die Möglichkeit die energetischen Anforderungsprofile für die jeweiligen Tests zu erstellen. Diese Ergebnisse würden zu einem besseren Verständnis der energetischen Anforderungen von intermittierenden und hochintensiv-anaeroben Belastungen in diversen Sportarten führen sowie einer besseren theoretischen Grundlage für die Auswahl intermittierender und hochintensiv-anaerober Testverfahren.

Aufgrund der Tatsache, dass die PCr-LA-O₂ Methode bisher noch nicht hinsichtlich ihrer Reliabilität untersucht worden ist, soll in diesem Forschungsprojekt zunächst die Reliabilität der PCr-LA-O₂ und ihrer Variante für intermittierende Belastungen (PCr-LA-O_{2int}) bestimmt werden. Anschließend sollen in vier weiteren Teilstudien mit Hilfe der standardisierten Testprotokolle des 30-15_{IFT}, seiner kontinuierlichen Version, des YYIR1 und 2 sowie des WAnT und CJ30 gezielt mögliche einzelne Einflussfaktoren auf die energetischen Anforderungen untersucht werden. Aus diesen Teilstudien ergibt sich auch das energetische Profil des jeweiligen Tests. Aus den Analysen dieser Profile sollen abschließend, übergeordnet die wesentlichen Einflüsse auf energetische Anforderungen intermittierender und hochintensiv-anaerober Belastungen abgeleitet werden.