



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Eine kritische Auseinandersetzung über die
physiologische Validität und Reliabilität der
submaximalen Laktat-Leistungsparameter. Ein
systematischer Review. “

verfasst von / submitted by

Moritz Gelosky

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree
of

Master of Science (MSc)

Wien, 2021 / Vienna 2021

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

UA 066 826

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Sportwissenschaft UG2002

Betreut von / Supervisor:

Dr. Christoph Triska, BSc MSc

Zusammenfassung

Die Messung der Laktatkonzentration im Blut avancierte in den vergangenen 50 Jahren zu einem der beliebtesten Ansätze, um die aktuelle Leistungsfähigkeit zu erfassen. Das Ergebnis dieses im Vergleich zur Spiroergometrie kostengünstigen Verfahrens bildet unter progressiver Belastung stets die Laktatleistungskurve. Zur Auswertung stehen mittlerweile über 40 Methoden zur Verfügung, die jeweils das Identifizieren einer physiologisch relevanten Schwellenintensität erleichtern sollen. Der Ansatz, ebendiese Schwellen anhand von fixierten Blutlaktatkonzentrationen zu eruieren, wurde bereits mehrfach kritisiert und scheint nicht mehr dem Anspruch wissenschaftlicher Forschung gerecht zu werden.

Die vorliegende systematische Übersichtsarbeit widmet sich daher den individualisierten Methoden der Schwellenidentifikation, allen voran deren Reliabilität und Validität. Die Herangehensweisen könnten hierbei oft unterschiedlicher nicht sein, zusätzlich erschwert eine uneinheitliche, gar widersprüchliche Nomenklatur das Verständnis.

Mithilfe der Prisma-Kriterien wurden die in den Online-Datenbanken "PubMed" und "Web of Science" 672 gefundenen Studien auf 24 qualitativ hochwertige Veröffentlichungen der letzten 30 Jahre reduziert, die fast allen Konzepten eine sehr hohe Reproduzierbarkeit, jedoch unterschiedlich hohe Aussagekraft hinsichtlich Leistungsprognose und Abgleich mit anderen Leistungsparametern zuschreiben. Der unterschiedlichen Bekanntheit geschuldet, liegen für manche Konzepte viele Validierungsstudien vor, während für andere in der Praxis etablierte Methoden nie wirklich geklärt wurde, ob tatsächlich eine abgrenzende Intensität dargestellt wird.

Der Bereich der Laktatleistungsdiagnostik stellt ein beliebtes Forschungsfeld dar, den inkludierten Studien steht eine Vielzahl ähnlicher Veröffentlichungen gegenüber. Aufgrund der Vielzahl an Konzepten sowie der verschiedenen Methoden der Validierung ergibt sich eine nicht enden wollende Matrix an möglichen Studiendesigns. Der Vergleich von Laktatkonzepten mit der Leistung über diverse Distanzen muss noch stärker untersucht werden, künftige Studien sollten vor allem bei den Stufenleistungstest zur Ermittlung der Schwellen zu einem Konsens gelangen.

Schlagwörter

Laktat, Laktatschwelle, Ausdauersport, Reliabilität, Validität, Leistung, Stufenleistungstest, MLSS

Abstract

Measuring blood lactate during progressive load increase represents an effective way to measure one's performance level. However, controversy arose how on to interpret the blood lactate curve, which displays the product of performance diagnostic. Finding a threshold by visual appraisal can often be subjective, so more than 40 methods to standardize the search have been developed. Fixed blood concentrations have previously been shown to poorly reflect individual performance differences and hence should not be used any more.

The present systematic review focuses on individualized methods of defining a threshold of intensity. Different authors use the same name for different thresholds, most often "lactate threshold", which hinders the understanding.

Online Databases "PubMed" and "Web of science" were searched for relevant studies. By applying inclusion criteria and orientating on the prisma-guidelines, 24 from the 672 originally found studies were included in the review. Quality assessment was performed with the help of the PEDro scale. The results revealed that most lactate concepts show very high reliability. Considering validity, conflicting results were found. Some concepts correlate well to MLSS, while others do not. For some of the concepts, there are hardly any studies investigating validity, even though they are used in practise.

The search for the best marker, representing an often called "anaerobic threshold" is far from over. Some markers need to be further investigated, especially in comparison to performance in competitions of different distances. Future studies should also focus on a consistent way of Graded Exercise Tests to determine thresholds.

Keywords

Lactate, lactate threshold, endurance sports, reliability, validity, performance, GXT, MLSS

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	6
1 Einleitung.....	7
1.1 Begriffsbestimmungen.....	7
1.1.1 Reliabilität.....	7
1.1.2 Validität.....	8
1.1.3 Objektivität.....	9
1.2 Laktatleistungsdiagnostik	10
1.2.1 Grundlagen des Muskelstoffwechsels.....	10
1.2.2 Laktatdynamik im progressiven Belastungsverlauf	10
1.2.3 Laktat – aktueller Forschungsstand	12
1.3 Trainingszonen.....	12
2 Möglichkeiten der Intensitätsvorgaben.....	15
2.1 Maximale Parameter	15
2.1.1 $\dot{V}O_{2max}$	15
2.1.2 Herzfrequenz.....	16
2.1.3 Maximale Aerobe Geschwindigkeit (MAS).....	16
2.1.4 Maximale Leistung.....	17
2.2 Submaximale Parameter.....	17
2.2.1 Critical Power – CP.....	18
2.2.2 Delta.....	19
2.3 Schwellenkonzepte	19
2.3.1 Geschichte	19
2.3.2 Nomenklatur	20
2.4 Einflussgrößen auf den Messparameter Blutlaktatkonzentration	22
2.4.1 Stufendauer.....	22
2.4.2 Ernährungsstatus	23
2.4.3 Abnahmestelle.....	23

2.5	Methoden der Schwellenbestimmung.....	23
2.5.1	Lactate Threshold.....	24
2.5.2	D _{max}	24
2.5.3	D _{mod}	25
2.5.4	IAT- Individuelle anaerobe Schwelle.....	26
2.5.5	Knickpunkt.....	27
2.5.6	Fixe Blutlaktatkonzentrationen.....	27
2.5.7	LT+.....	28
2.5.8	Maximales Laktat Steady-State.....	28
2.6	Problemstellung.....	29
2.7	Forschungslücke.....	30
3	Methodik.....	32
3.1	Studienauswahl.....	32
3.2	PEDro.....	33
3.3	Erfassung der Reliabilität.....	34
3.4	Erfassung der Validität.....	34
4	Ergebnisse.....	36
4.1	PRISMA Flussdiagramm.....	36
4.2	PEDRO.....	39
4.3	Stufenleistungstests.....	40
4.3.1	Laufsportstudien.....	41
4.3.2	Fahrradstudien.....	45
4.4	Reliabilität.....	49
4.5	Validität.....	54
4.5.1	MLSS.....	55
4.5.2	Leistung.....	62
5	Diskussion.....	67
5.1	Zusammenfassung Reliabilität.....	67

5.1.1	LT	67
5.1.2	IAT Dickhuth / LT +1,5 mmol	67
5.1.3	D_{max}	68
5.1.4	IAT nach Stegmann	68
5.1.5	Laktatknickpunkte	69
5.2	Zusammenfassung Validität - MLSS	71
5.2.1	LTP1	71
5.2.2	LT +1,5 / IAT Dickhuth	71
5.2.3	D_{max}	71
5.2.4	IAT nach Stegmann	72
5.2.5	IAT Simon	73
5.2.6	D_{mod}	73
5.3	Laktatparameter und Leistung	75
5.3.1	D_{max}	75
5.3.2	LTP1	76
5.3.3	IAT	77
5.4	Zusammenfassung von Laktatkonzepten und Leistung	77
5.5	Limitationen	78
5.6	Fazit	78
	Literaturverzeichnis	80
	Abbildungsverzeichnis	99
	Tabellenverzeichnis	100

Danksagung

An dieser Stelle würde ich gerne einigen Personen in meinem näheren Umfeld meine Dankbarkeit aussprechen. An erster Stelle sind meine Eltern Andrea & Martin sowie Martin & Manuela zu nennen, die es mir von jungem Alter an ermöglicht haben, meine sportlichen Ziele und Interessen zu verfolgen, und mir stets den Freiraum gewährten, die Studien- und Berufslaufbahn nach eigenem Ermessen zu gestalten. Meine Geschwister Annika und David standen mir, ebenso wie meine gesamte erweiterte Familie, stets unterstützend zur Seite. Neben meiner Freundin Carola Riebenbauer möchte ich allen voran meiner Tante Isabella danken.

Besonderer Dank gilt außerdem all meinen Studienkolleg*innen, die ich in den letzten 9 Jahren kennen lernen durfte. Hilfsbereitschaft und Freundlichkeit kamen mir von unzähligen Personen entgegen, eine Aufzählung aller "Schmelz-Freund*innen" würde wohl den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Mit meinem Betreuer Dr. Christoph Triska, BSc MSc verbinden mich insgesamt drei Masterarbeiten. Zwei empirische Arbeiten fielen der Covid-19 Pandemie zum Opfer. Auf die Idee für die schlussendliche Arbeit reagierte Dr. Triska mit ehrlichem Enthusiasmus. Für all die Videokonferenzen und weitere Hilfestellungen bin ich äußerst dankbar, die Arbeit läge ohne seine Hilfe nicht in diesem Umfang vor.

1 Einleitung

Egal ob Leistungssport, der Bereich öffentlicher Gesundheit oder klinische Rehabilitation: Für all diese Bereiche gilt, dass körperliche Betätigung weitgehende gesundheitliche Vorteile mit sich bringt (Warburton et al., 2006). Die Frage nach der optimalen Steuerung und Vorgabe der Belastung zählt daher zu den wichtigsten Fragen der modernen Sportwissenschaft. Obgleich eine langfristige Unter- sowie Überforderung einer trainierenden Person in allen Lebenslagen, unabhängig von Alter und Gesundheit, zu vermeiden ist, spielt die richtige Trainingssteuerung wohl im Bereich des professionellen Leistungssports die entscheidendste Rolle. Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Prozess der Leistungssteigerung entwickelten sich rasch. Auf Basis der Belastungsnormative Dauer, Häufigkeit, Dichte, Ausführung, Intensität und des Umfangs des Trainings konnten Trainer*innen und Ärzt*innen präzise Vorgaben der Belastung für Trainierende und Patient*innen erstellen (Hottenrott et al., 2020). Der weitaus komplexeste Bereich ist hierbei jener der Belastungsintensität (Jamnick et al., 2020), der Bereich, der die entscheidendste Rolle für die Trainingsanpassung spielen dürfte und daher anderen Belastungsnormativen überzuordnen ist (Hofmann et al., 2017).

1.1 Begriffsbestimmungen

Die in dieser Arbeit prägenden Begriffe Reliabilität und Validität werden zur Erleichterung des Verständnisses im Folgenden knapp vorgestellt. Als Vertreter wissenschaftlicher Gütekriterien steht den zwei Kategorien zusätzlich die Objektivität zur Seite, die ebenfalls knapp erläutert wird.

1.1.1 Reliabilität

Unter der Reliabilität eines Tests versteht man die Genauigkeit der Messung eines ausgewählten Messparameters, ungeachtet dessen, ob der Test die Messung des Merkmals tatsächlich beansprucht (Jansen, 2012). Reliable Ergebnisse sind bei wiederholter Messung an derselben Versuchsperson nahezu ident (Jansen, 2012). Des Weiteren sollten reliable Ergebnisse frei von Zufallsfehlern sein (Heesen, 2013). Im konkreten Fall des Sports beschreibt Reliabilität die Beständigkeit der erbrachten Leistung bei Wiederholung desselben Tests (Hopkins et al., 2001).

Mängel in der Reliabilität haben nach Hohmann et al. (2007) im Sport drei Quellen: unzureichende instrumentelle Konsistenz, unzureichende Merkmalskonstanz sowie unzureichende Bedingungskonstanz. Die instrumentelle Konsistenz betrifft die messenden Geräte. In den Studien dieses Reviews wurden verschiedene Methoden der Blutabnahme sowie der Analyse angewandt. Die Messgenauigkeit der jeweiligen Geräte hat dabei ebenso Einfluss wie die darauffolgende Bewertung durch die Wissenschaftler*innen. Die Merkmalskonstanz hingegen beschreibt die Fähigkeit der Sportler*innen, bei wiederholten Versuchen idente Ergebnisse zu produzieren. Diese steigt mit dem Können der Athlet*innen, Abweichungen treten vorrangig in koordinativ anspruchsvollen Sportarten auf. Die Bedingungskonstanz schlussendlich umfasst äußere Einflüsse, die auf die Ergebnisse einwirken (Hohmann et al., 2007).

Koo et al. (2016) differenzieren Reliabilität in die drei Teilbereiche Interrater-, Intrarater-, sowie Test-Retest-Reliabilität. Während sich die Interrater-Reliabilität Variationen zwischen mehreren Untersuchenden bei derselben Gruppe von Proband*innen ansieht, kommt es bei der Intrarater-Reliabilität auf die Messgenauigkeit der Rater*innen bei mehreren Messdurchgängen an. Die Test-Retest-Reliabilität beschreibt die Fähigkeit von Instrumenten und Messmethoden, bei denselben Proband*innen unter möglichst identen Bedingungen zu gleichen Ergebnissen zu gelangen. Die letztgenannte Form spielt in dieser Arbeit die größte Rolle.

Das Maß an Reliabilität wird in den meisten Studien anhand des Test-Retest-Korrelationskoeffizienten (r) angegeben (Hopkins et al., 2001). Im Optimalfall sollte zwischen Test und Retest der Versuchsleiter ausgetauscht werden. Trainingseffekte können jedoch nie ausgeschlossen werden und auch die Frage nach dem Abstand zwischen den Tests ist nicht unwesentlich (Hohmann et al., 2007).

1.1.2 Validität

Die Validität beschreibt die Genauigkeit eines Tests, ein bestimmtes vorab festgelegtes Merkmal auch tatsächlich zu beschreiben (Heale et al., 2015). Man spricht daher auch von der *Gültigkeit* (Hohmann et al., 2007), die sich auf den Sachverhalt bezieht, der gemessen werden soll. Statistisch ergibt sich die Validität aus der Relation des Testergebnisses zu einem vorher festgelegten Kriterium, das für die jeweilige Messung Gültigkeit beansprucht (Hohmann et al., 2007). Hohe kriterienbezogene Validität kann dementsprechend als Prädiktor für sportliche Leistungen dienen (Hohmann et al., 2007).

Die Validität kann als das wichtigste der drei Gütekriterien bezeichnet werden (Jansen, 2012). Ist ein Test noch so objektiv und reliabel, wird er zu Trugschlüssen führen, wenn er nicht das misst, was gemessen werden soll (Hofmann et al., 2017). Wichtige Kriterien der Validität sind nach Heesen (2013) die "Qualität und Größe der zu untersuchenden Stichprobe und auch das Messverfahren".

Um ein Beispiel aus der Sportpraxis zu nennen, scheint zur Ermittlung der 60 min Zeitfahrleistung von Radsportler*innen ein intermittierendes Sprintprotokoll am Laufband nicht sonderlich zielführend, selbst wenn die Ergebnisse bei aufeinanderfolgenden Messungen hoch reliabel ausfallen. Zur Validierung von Laktat-Konzepten nennen Faude et al. (2009) den Abgleich mit aktuellen Wettkampfleistungen (Übereinstimmungsvalidität) sowie die Beurteilung der Prognosegenauigkeit für zukünftige Leistungen (Vorhersagevalidität) als Gold-Standards.

1.1.3 Objektivität

Sind Ergebnisse einer wissenschaftlichen Untersuchung weitestgehend unabhängig von der durchführenden Person, kann man sie als objektiv bezeichnen. Die Objektivität differenziert dabei sowohl die Bereiche der Durchführung und der Auswertung sowie der Interpretation. Verschiedene Versuchsleiter*innen sollten bei denselben Proband*innen demnach zu identischen Ergebnissen gelangen (Jansen, 2012).

1.2 Laktatleistungsdiagnostik

Um die in dieser Arbeit präsentierten Laktatparameter nachvollziehen zu können, bedarf es eines theoretischen Fundaments, wie Laktat im Körper entsteht und welche Rolle es bei der Ermittlung des aktuellen Leistungsniveaus spielt. Der Zusammenhang von Laktat und Ermüdung stellt nach wie vor ein viel debattiertes Forschungsfeld dar. Neue Erkenntnisse führten den Paradigmenwechsel des Laktats vom metabolischen Endprodukt zum Energieträger und Signalmolekül herbei (Hall et al., 2016).

1.2.1 Grundlagen des Muskelstoffwechsels

Seit der Entdeckung von Milchsäure durch Scheele 1780 (Robergs et al., 2004) avancierte die Messgröße Blutlaktatkonzentration (BLK) zu einer der meist untersuchten und vor allem kontroversiellsten Methoden der Sportwissenschaft (Ferguson et al., 2018). Laktat, das Anion der Milchsäure (Flake et al., 2018), entsteht im menschlichen Körper bei der Glykogenolyse, dem Abbau von Zuckermolekülen (Brooks, 1986). Der oxidative Energiestoffwechsel, bei dem durch die Verwendung der Substrate Glukose, Aminosäuren sowie freie Fettsäuren unter Einsatz von Sauerstoff neben CO_2 und H_2O auch ATP entsteht, ist gegenüber der anaeroben Glykolyse durch eine geringere Energieflussrate gekennzeichnet (Röcker, 2010). Bei Letztgenannter entstehen durch die Aufspaltung des Glukosemoleküls zwei Moleküle Pyruvat (Röcker, 2010). Pyruvat kann im sogenannten Citrat-Zyklus oxidativ verwertet werden (Müller-Esterl, 2018). Übersteigt die Intensität jedoch die oxidative Kapazität, wird Pyruvat zu Laktat umgesetzt (Röcker, 2010). Lange galt der Glaube, erhöhte Laktatwerte wären durch ein defizitäres Angebot an Sauerstoff bedingt (Hall et al., 2016). Mithilfe von Tracer-Studien konnte jedoch mehrfach bewiesen werden, dass die Laktatproduktion ein laufender, auch in Ruhe stattfindender Prozess ist (Brooks, 1986). Die Konzentration von Laktat im Blut gibt Auskunft über die Inanspruchnahme anaerober Prozesse und erlaubt Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit (Röcker, 2010).

1.2.2 Laktatdynamik im progressiven Belastungsverlauf

Auf niedrigen Belastungsstufen wird das im arbeitenden Muskel entstehende Laktat entweder in der produzierenden Muskelzelle selbst oder über den intrazellulären Shuttle (Brooks, 1986; Hofmann et al., 2017) zu anderen, oxidativ leistungsfähigeren Muskelzellen

transportiert. Dort wird das Laktat in den Krebs-Zyklus eingespeist und oxidativ verwertet. Da all diese Vorgänge auf intramuskulärer Ebene ablaufen, gelangt kein zusätzliches Laktat in den Blutkreislauf.

Ab einer gewissen Intensität kann das in den Muskelzellen anfallende Laktat nicht mehr hinreichend vor Ort oxidiert werden. Durch die Zelle-zu-Zelle Shuttle gelangt das überschüssige Laktat zu den verwertenden Organen Herz, Leber und weiteren (Hofmann et al., 2017). Es wird dadurch im Blut erstmals eine erhöhte Laktatkonzentration messbar. Dieses markante Steigen wird als erster lactate turn point (LTP1) bezeichnet. Liegt die gewählte Intensität nicht zu hoch, wird sich ein Gleichgewicht (*Steady-State*) einstellen, solange der zweite lactate turn point (LTP2) nicht überschritten wird (Binder et al., 2008).

Intensitäten über dem LTP2 sind systemisch nicht mehr auszugleichen (Binder et al., 2008). Obwohl alle laktatoxidierenden Organe an ihrer Leistungsgrenze arbeiten, übersteigt das anfallende Laktat das Eliminierbare. Die Blutlaktatkonzentration steigt auf maximale Werte und die Belastung muss aufgrund einer "nicht mehr kompensierten Azidose" abgebrochen werden (Hofmann et al., 2017). Dies geschieht nach Billat et al. (2003) da die Pyruvat-Produktion die Laktat-Eliminationsrate übersteigt. Belastungsabbrüche oberhalb des LTP2 wurden jedoch auch ohne kontinuierliches Fallen des pH-Wertes sowie anderer physiologischer Messwerte beobachtet (Baron et al., 2008). Die genauen Gründe des Belastungsabbruchs scheinen demnach nach wie vor nicht geklärt (Hall et al., 2016).

Der Abfall des pH-Wertes unter $\text{pH} = 7,35$, auch „Azidose“ genannt (Burger et al., 2019), wurde bereits mit einer Verschlechterung der kontraktile Kraft, mit Ermüdung und Muskelkater in Verbindung gebracht (Hall et al., 2016). Dass die Laktatproduktion für den Abfall des pH-Wertes verantwortlich ist, darf jedoch nicht als Fakt angenommen werden (Robergs et al., 2004). Vielmehr dürfte der gesteigerte Abbau von Adenosintriphosphat (ATP) zur Akkumulation von H^+ Protonen führen, was wiederum den pH-Wert fallen lässt (Kemp et al., 2005). Die Produktion von Laktat hingegen dürfte Protonen konsumieren. Aus diesem Grund verlangsamt die Laktatproduktion die Azidose (Robergs et al., 2004). Die negative Interpretation der Azidose muss nach Hall et al. (2016) ebenfalls überdacht werden, geht sie möglicherweise doch mit erhöhter Sauerstoffentnahme von Hämoglobin sowie ventilatorischer Stimulation einher.

Aktueller Stand des Wissens ist ein dreiphasiger Verlauf des Kennwerts Blutlaktatkonzentration (Skinner et al. 1980), wodurch sich zwei Schwellen ergeben (Hofmann et al., 2017; Binder et al., 2008). Auch diesbezüglich herrscht jedoch kein allgemeingültiger Konsens. Pires et al. (2011) legen den Gebrauch eines

Einschwellenkonzepts mit nur einer Schwelle „VT“ für den Ventilationsverlauf nahe, für Carey et al. (2010) und Binder et al. (2008) ist er durch zwei Umstellpunkte besser gekennzeichnet. Kritik am klassischen Zugang gab es auch bezüglich der Messgröße Blutlaktat. Dennis et al. (1992) sehen einen kontinuierlichen Verlauf während progressiver Belastung. Das tatsächliche Existieren der zweiten Laktatschwelle LTP2, im Englischen oft *anaerobic threshold* genannt, ist nach wie vor nicht geklärt (Brooks, 2021; Rossiter, 2021).

1.2.3 Laktat – aktueller Forschungsstand

Wenn man den ganzen Körper betrachtet, scheint Laktat drei wichtige Funktionen zu erfüllen (Brooks, 2018): Zum einen kann arterielles Laktat vom Gehirn (van Hall et al., 2009), dem Herzen (Bergman et al., 2009) und von der Muskulatur (Bergman et al., 1999) oxidiert werden und daher als Energiequelle dienen. Zweitens ist Laktat der wichtigste Vorläufer der Glukoneogenese (Emhoff et al., 2013). Schlussendlich erfüllt Laktat als Signalmolekül hormonähnliche Effekte (Brooks, 2018).

1.3 Trainingszonen

Ungeachtet der gewählten Methode besteht eines der Ziele der Trainingswissenschaft darin, sich bewegenden Personen Intensitätsbereiche zur Verfügung zu stellen, die spezifische Anpassungsprozesse des Körpers nach sich ziehen (Schnabel et al., 2011). Da das exakte Einhalten eines fixen Prozentsatzes in der Praxis oft nicht leicht realisierbar ist, wurden von diversen Forscher*innen breitere Bereiche von Intensitätsvorgaben angewandt.

Analog zur Shuttle-Theorie von Brooks (1986) bestehen Modelle, die sich durch metabolische sowie ventilatorische Schwellen ergeben. „Zone 1, 2 & 3“ (Seiler et al., 2009; Hofmann et al., 2017) referieren demnach den Bereich vor der ersten Schwelle, einem Übergangsbereich zwischen den Schwellen sowie einem Maximalen über der zweiten Schwelle. Dem ebenfalls dreiphasigen Modell „moderate - heavy - severe“ liegen verschiedene Definitionslagen zugrunde. Die Bereiche bilden sich nach Black et al. (2017) und Jones et al. (2010) durch den Gas Exchange Threshold „GET“, der oft synonym mit der ersten ventilatorischen Schwelle genannt wird, sowie die Critical Power „CP“, nach Colosio et al. (2020) durch die beiden ventilatorischen Schwellen, nach Iannetta et al. (2020) durch den LTP1 und die CP (Abbildung 1).

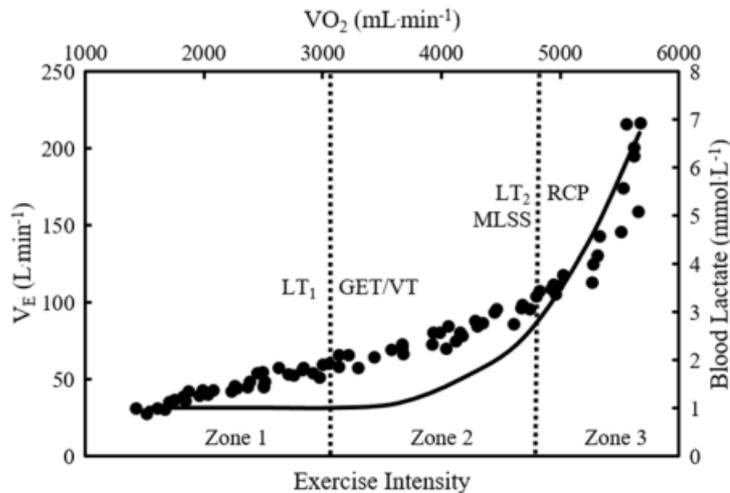


Abb. 1: Möglichkeiten der Bildung von Trainingszonen (Jamnick et al., 2020).

Whipp et al. (1994) grenzen die Bereiche moderat und intensiv anhand des $\dot{V}O_2$ Slow-Component-Phänomens der Sauerstoffaufnahme sowie der Laktatkinetik während konstanter Belastungen ab. Moderate Dauerbelastungen führen demnach zu einem knapp 3-minütigen Anstieg der Sauerstoffaufnahme (Barstow et al., 1994), gefolgt von einem Steady-State. Laktat wird in der Muskelzelle eliminiert und scheint dadurch im Blut nicht über dem Ruhewert auf (Abbildung 2).

Intensive (Heavy) Belastungen rufen trotz konstanter Belastung ein stetiges Steigen der $\dot{V}O_2$ mit verspätetem Einstellen des Steady-States nach sich. Dieses Steigen, das meist zwischen 100 und 200 s beginnt (Barstow et al., 1994), beschreibt den Mehrbedarf an O_2 über dem zu erwartenden Wert (Jamnick et al., 2020) und verzögert das Erreichen der stabilen Sauerstoffaufnahme um 10 bis 20 min. Es entsteht ein sogenanntes „delayed Steady-State“ (Burnley et al., 2007). Blutlaktatkonzentrationen liegen über dem Ruhewert, pendeln sich jedoch ebenfalls auf stabile Werte ein.

Der Bereich der harten („severe“) Belastungen ist weder auf Seiten der Sauerstoffaufnahme noch auf jener der Blutlaktatkonzentrationen durch das Einstellen eines Steady-States gekennzeichnet, die Sauerstoffaufnahme erreicht eventuell ihr Maximum (Jamnick et al., 2020).

Liegt die gewählte Belastung so hoch, dass die $\dot{V}O_{2max}$ nicht vor Beendigung der Bewegung erreicht werden kann, wird vereinzelt der Terminus „extreme“, bezeichnend für eine zusätzliche 4.Stufe, erwähnt. (Hill et al., 2002; Wilkerson et al., 2004)

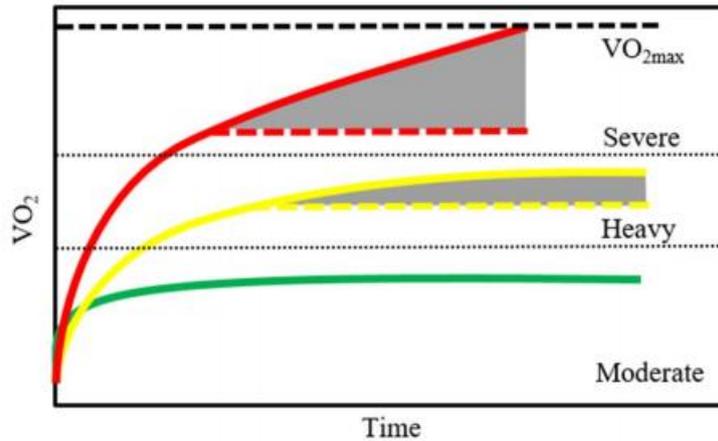


Abb. 2: Bildung der Zonen anhand des Verhaltens der Sauerstoffaufnahme (bearbeitet nach Jamnick et al., 2020).

Für die Prognose von Wettkampfleistungen scheint der Übergang intensiver zu harter Belastung der relevanteste zu sein (Poole et al., 2021). Die Laufgeschwindigkeit über die Marathondistanz (42,2km) wurde im engen Bereich um den MLSS (Hering et al., 2018), sowie knapp unterhalb des CS (Poole et al., 2021) und damit im oberen Bereich der schweren Belastung angegeben. Die restlichen olympischen Laufdistanzen finden sich demnach allesamt im harten Belastungsbereich wieder (Poole et al., 2021).

Neben dem klassischen Zugang mit drei Intensitätsbereichen haben sich auch welche mit vier (Binder et al., 2008) oder fünf (Bourdon, 2013) entwickelt.

Während die Kenntnis des GET sowie des LTP1 als Trennlinie moderater und schwerer Belastung demnach nur für Bereiche des Ultra-Ausdauersports prädiktiv scheint, hat deren Kenntnis vor allem in den Bereichen der Trainingssteuerung sowie der Rehabilitation ihre Berechtigung (Poole et al., 2021). Verschiedene Krankheitsbilder können nicht mit derselben Bewegungsintervention behandelt werden, je nach Art der Erkrankung werden bestimmte Trainingsbereiche empfohlen (Pedersen et al., 2015). Wenn Bewegung als Behandlungsmethode eingesetzt werden soll, ist die genaue Kenntnis der Übergänge daher von großer Bedeutung, das relative Prozentkonzept scheint weniger gut geeignet zu sein (Pymer et al., 2020).

2 Möglichkeiten der Intensitätsvorgaben

Um in Studien interindividuell ähnliche Beanspruchungen oder im Trainingsprozess gezielte Auslenkungen aus der Homöostase zu erreichen, gibt es unzählige Möglichkeiten, die Intensität der Belastung zu definieren. Die einzelnen Methoden unterscheiden sich hierbei einerseits in ihrer Komplexität, andererseits in ihrer physiologischen Aussagekraft. Im Folgenden werden die gängigsten Methoden hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile aufgelistet.

2.1 Maximale Parameter

Bei maximalen Parametern wird der höchste erreichte Wert herangezogen. Hierfür sind Leistungstests bis zur Ausbelastung sowie eine hohe Motivation der Proband*innen notwendig.

2.1.1 $\dot{V}O_{2\max}$

Als Prädiktor für sportliche Leistungen im Ausdauerbereich hat die maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2\max}$) vielen Autoren nach den Gold Standard inne (Tran, 2018). Trainingsvorgaben bieten sich traditionellerweise als Prozentsatz jener dar (Mann et al., 2013). Problematisch bei der Trainingssteuerung über einen Prozentsatz der $\dot{V}O_{2\max}$ sind jedoch interindividuelle Unterschiede in der Beanspruchung zu nennen (Jamnick et al., 2020; Scharhag-Rosenberger et al., 2009). Mann et al. (2013) merken diesbezüglich an, dass im Prozentsatz der $\dot{V}O_{2\max}$ vorgegebene Intensitäten keinen Rückschluss auf metabolische Schwellen geben können. So tritt die erste ventilatorische Schwelle (VT1) bei gesunden Nicht-Sportlern zwischen 50-60 %, bei Spitzensportlern auch über 75% der $\dot{V}O_{2\max}$ auf (Pennington et al., 2015). Capellá et al. (2018) berichten von 51,7% für Turner*innen sowie 65,0% für Leichtathlet*innen und legen damit eine zusätzliche Variabilität zwischen verschiedenen Sportarten dar. Lansley et al. (2011) schreiben ebenfalls von einem Spektrum zwischen 40-80 % und resümieren damit, dass eine reine Steuerung der Belastung über die $\dot{V}O_{2\max}$ zu höchst unterschiedlichen Beanspruchungen führen würde. Ein weiterer Nachteil bei der Ermittlung der $\dot{V}O_{2\max}$ ist die absolute Ausbelastung der zu testenden Person. Dies bedingt die volle Motivation jener, außerdem stellt diese Herangehensweise vor allem für kranke Patient*innen eine mögliche Gefahr dar (Hollmann, 2001).

2.1.2 Herzfrequenz

Die maximale Herzfrequenz ist ebenfalls nur durch maximale Ausbelastung zu ermitteln (Hollmann, 2001). Obwohl die Messung durch sehr hohe Test-Retest-Reliabilität gekennzeichnet ist (Jamnick et al., 2020), zeigen sich ähnliche Probleme wie bei Belastungsvorgaben anhand der $\dot{V}O_{2\max}$. Katch et. al (1978) überprüften als eine der ersten die Validität des relativen Prozentkonzepts. Während Intensitätsvorgaben von 60 & 70 % HF_{\max} zu Belastungen unter der VT1 führten, lagen bei 80% HF_{\max} 17 Probanden über, 14 jedoch unter der VT1. Die daraus resultierende Diskrepanz führe demnach langfristig nicht nur zu unterschiedlichen kardiorespiratorischen Anpassungen, sondern auch zu irreführenden Konklusionen in Trainingsstudien, die gleiche Prozentsätze als Belastung vorgeben.

2.1.3 Maximale Aerobe Geschwindigkeit (MAS)

Die „maximal aerobic speed“ (MAS) liegt verschiedenen Interpretationen zugrunde. Während einige Publikationen in ihr die in einem Stufenleistungstest höchste erreichte Geschwindigkeit sehen (Carretero-Navarro et al., 2019; Nikolaidis, 2015; Schamne et al., 2019), interpretieren andere sie (Berthoin et al., 1995; Los Arcos et al., 2019) als niedrigste Geschwindigkeit, bei der die $\dot{V}O_{2\max}$ auftritt. Da die Sauerstoffaufnahme auch bei weiterer Steigerung der Geschwindigkeit abflacht, können diese beiden Interpretationen zum Teil deutliche Unterschiede hervorrufen. Der Moment des Abflachens ist im englischen Sprachgebrauch als „levelling off“ bekannt (McConnel, 1988). Erste Erwähnung fand das Konzept des Maximal Aerobic Speed 1986 (Di Prampero et al., 1986). Lacour et al. (1991) beschrieben sie als Geschwindigkeit, bei der erstmals die $\dot{V}O_{2\max}$ auftritt, was bis heute die genaueste Bestimmung darstellt. MAS wird im Optimalfall durch einen Stufenleistungstest ermittelt, Feldtests wie der Université de Montréal Track Test (UM-TT) können jedoch auch valide Ergebnisse liefern (Bellenger et al., 2015). Die Zeit bis zur Erschöpfung an der MAS liegt meist zwischen 2 bis 10 min (Billat et al., 1995) und zeigt in verschiedenen Studien einen negativen Zusammenhang mit der $\dot{V}O_{2\max}$, da Probanden mit niedrigerer $\dot{V}O_{2\max}$ länger an der MAS laufen konnten (Billat et al., 1995; Renoux et al., 2000).

Die maximale aerobe Leistung, “maximal aerobic power” (MAP), wird in einigen Studien synonym mit der maximalen Sauerstoffaufnahme $\dot{V}O_{2\max}$ genannt (Green et al. 1992) und entweder als höchster Leistungsoutput eines Stufenleistungstests (Atkinson et al., 2003)

oder anhand von Regressionsgeraden von Maximalleistungen über gewisse Dauern (Capelli et al., 2016; Pinot et al., 2014) ermittelt. Die MAP korreliert mit der Leistung in Zeitfahren (Balmer et al., 2000) und zeigt ebenfalls einen negativen Zusammenhang mit der Höhe der $\dot{V}O_{2max}$ für die Zeit, die an der MAP gefahren werden kann (Pinot et al., 2014). Die Abhängigkeit vom Protokoll, allen voran bei Varianten des Stufenleistungstests, bei dem der $\dot{V}O_{2max}$ mehrere Werte der MAP zugeordnet werden können (Pinot et al., 2014), darf an dieser Stelle als Kritikpunkt genannt werden.

2.1.4 Maximale Leistung

Die höchste Leistung am Ende eines Stufenleistungstests wird in verschiedenen Studien unter den Begriffen Maximale Arbeitsgeschwindigkeit, *Maximum Work Rate*, und höchster Leistungsoutput, *Peak Power Output PPO* sowie W_{max} , synonym verwendet. Zumeist wird jener Wert anerkannt, der zumindest 30 s durchgehalten werden konnte (Hill et al., 2008; Ochmann et al., 2013). Andere Studien definierten den Wert als Mittel der letzten 2-3 min (Bentley et al., 2001), sowie 5 min (McNaughton et al., 2006). Die maximale Leistung ist stark vom Protokoll anhängig, kürzere Stufen führen zu höheren maximalen Leistungswerten. Ein empfohlenes Protokoll zur standardisierten Ermittlung wäre dementsprechend zielführend, scheint in der Praxis jedoch nicht vorhanden zu sein (Jamnick et al., 2020). Wird der Wert nicht in mechanischer Leistung, wie am Rad- und Ruderergometer üblich, sondern als Geschwindigkeit angegeben, so sind *Peak Treadmill Speed* bzw. die V_{max} die entsprechenden Begriffe.

2.2 Submaximale Parameter

Da die Vorgabe der Intensität anhand eines Prozentsatzes maximaler Kennwerte zu höchst unterschiedlichen Beanspruchungen zu führen scheint, haben sich im Laufe der Jahrzehnte alternative Methoden der Belastungssteuerung entwickelt. Submaximale Werte repräsentieren meist eine Intensität, die Zonen voneinander abgrenzen soll, wobei die Parameter ein- & ausgeatmete Luft, Blutlaktatkonzentration sowie die ‚Entleerung‘ der anaeroben Kapazität als Messmethoden herangezogen werden können (Jamnick et al., 2020).

2.2.2 Delta

Lansley et al. (2011) legen aufgrund interindividueller Unterschiede der Beanspruchung bei prozentueller Belastungsvorgabe den Gebrauch des Delta (Δ)-Konzepts nahe. Es berücksichtigt sowohl die erste Schwelle (LTP1 / VT1) als auch die $\dot{V}O_{2\max}$, der Bereich dazwischen dient als neue Basis der Belastungssteuerung. Delta 40 referenzieren demnach 40% des Bereichs zwischen VT1 oder LTP1 und $\dot{V}O_{2\max}$. Studien zu diesem Konzept wurden bereits Mitte der 1980er Jahre durchgeführt (Casaburi et al., 1987; Roston et al., 1987). Die Bestimmung des Ausgangspunkts erfolgt in der Praxis sowohl aus der Spiroergometrie (Clark et al., 2019; Zuccarelli et al., 2018) als auch aus der Laktatleistungsdiagnostik (Carter et al., 2000; Carter et al., 2002).

Die kritische Auseinandersetzung mit den aktuell verfügbaren Methoden zur Intensitätsvorgabe war bereits Forschungsfeld einiger Reviews (Mann et al., 2013; Jamnick et al., 2020; Iannetta, 2020). Ihnen gemein ist die Feststellung, dass ein fixierter Prozentsatz eines Maximalwerts als Intensitätsvorgabe nicht mehr zeitgemäß scheint. Vom Gebrauch wird daher abgeraten (Iannetta, 2020). Egger et al. (2016) stützen sich auf die Annahme, dass das relative Prozensystem meist aus Gründen der Einfachheit dennoch gewählt wird.

2.3 Schwellenkonzepte

Während Werte wie die Herzfrequenz und die Sauerstoffaufnahme unter steigender Belastung einen meist annähernd linearen Verlauf nehmen, gibt es Parameter, deren Verlauf durch markante Umstellpunkte gekennzeichnet sind (Binder et al., 2008). Der Glaube an die physiologische Relevanz dieser Punkte veranlasst Forscher*innen seit über 50 Jahren, Methoden zu deren Lokalisation zu entwickeln.

2.3.1 Geschichte

Während spiroergometrische Verfahren ab etwa 1900 die Grundlage des heutigen Wissens bildeten, dauerte es bis Mitte der 1950er Jahre, ehe die Forschergruppe um Hollmann Alternativen für die ausbelastende Ermittlung der $\dot{V}O_{2\max}$ suchte. Um 1955 dauerte die Bestimmung von Laktat, von dem sich Hollmann neue Erkenntnisse bezüglich submaximalem Leistungsverhalten erhoffte, noch über drei Stunden (Hollmann, 2001). Die Messung erfolgte nach der Barker-Summerson-Methode, wobei die Oxidation von Laktat

zu Acetaldehyd in Schwefelsäure eine farbmetrische Klassifizierung erlaubte (Russell, 1944). Erste Laktatleistungskurven aus Stufenleistungstests erinnerten stark an Ventilationskurven, bei 60 - 70% der Maximalleistung war ein Knick, identisch mit jenem der Ventilationskurve, zu erkennen. Blutabnahmen, die arteriell in der Armbeuge stattfanden, gingen jedoch mit einem hohen Hämatom- und Arterienobstruktionsrisiko einher, wodurch sich Hollmann wieder der Spirometrie zuwandte (Hollmann, 2001). Ab 1963 waren Blutabnahmen an der Fingerspitze sowie eine enzymatische Auswertung möglich. Hollmann erkannte, dass der Milchsäurespiegel ab Herzfrequenzen jenseits von 130 rasant ansteigt, eine Erkenntnis, zu der bereits Balke et. al 1957 gelangt waren (Hollmann, 1963). Eine laufende Kontrolle des Milchsäuregehalts war im klinischen Betrieb - auch aufgrund der fehlenden Genauigkeit der Fingerspitzen-Abnahmen - noch immer nicht möglich (Hollmann, 1963). Es war schlussendlich 1973 Mader, der die Entnahme am Ohrläppchen einführte.

2.3.2 Nomenklatur

Ende der 1950er Jahre waren es in Europa vor allem Hollmann sowie Wassermann und McIlroy in Amerika, die erstmals Umstellpunkte benannten. Der gängigste Begriff „Schwelle“ geht auf den englischen Begriff „Threshold“ von Wassermann et al. (1964) zurück. Die im deutschen Sprachgebrauch lange üblichen, bis heute im Volksmund gängigen Bezeichnungen „aerobe Schwelle“ und „anaerobe Schwelle“ wurden als Reaktion auf Wassermann und McIlroy von Hollmann eingeführt (Hollmann, 2001). Verwirrungen waren mit dieser Betitelung fast vorprogrammiert, bezeichnete doch die „anaerobic Threshold“ von Wassermann und McIlroy den ersten LTP1 – und damit die „aerobe Schwelle“. „Anaerobic threshold“ wird daher oft für LT1 & LT2 verwendet (Binder et al., 2008). Die Bezeichnung „Lactate Threshold“- LT bedarf ebenfalls differenzierter Betrachtung, beschreibt sie doch in vielen Fällen den ersten Umstellpunkt (Ahrend, 2018; Hauser et al., 2014), in anderen Quellen jedoch den zweiten (Hering et al., 2018; Czuba et al., 2009). Bezüglich der Benennung der metabolischen Schwellen besteht länderübergreifend kein Konsens (Svedahl et al., 2003).

Tab. 1: Nomenklatur von Schwellenkonzepten

Name	Autor et al. (Jahr)
Lactate Threshold	Czuba (2009); Weltman (1990); Hering (2018); Pallares (2016); Cerezuela-Espejo (2018); Nicholson (2001)
IAT	Urhausen (1993); McLellan (1993); Hauser (2014); Ahrend (2018)
Aerobic Threshold	Nemoto (1980)
Performance Threshold	Amann (2006)
2nd Lactate Turnpoint	Hoefelmann (2015)
Anaerobic Threshold	Oliveira (2012); Zhou (1997); Solberg (2005)
Individual Anaerobic Threshold -IAnT	Jakobsson (2019)
2nd Lactate Threshold Point	Chalmers (2015)

IAT = individual anaerobic threshold

Die in Tabelle 1 illustrierten Benennungsmöglichkeiten legen dar, wie sehr einzelne Begriffe streuen können. Nicht in dieser Aufzählung enthaltene Forscher*innen verwendeten ihre Laktatparameterbegriffe stets in der Mehrzahl. So sprechen etwa Van Schuylenbergh et al. (2004) von *anaerobic thresholds*, Hecksteden et al. (2016) von *lactate thresholds*, Papadopoulos et al. (2006) von *lactate parameters*, Hauser et al. (2014) von *lactate threshold parameters*. Die Problematik mit verschiedenen Definitionen zu gleichen Namensgebungen ist daher schon bekannt.

Die Bestimmung der Schwellen erfolgt in der Praxis durch Stufenleistungstests im Labor. Hierbei werden zumeist kontinuierliche Mehrstufentests herangezogen, bei denen einer bestimmten Startintensität (zumeist in Watt am Fahrradergometer bzw. in km/h am Laufband angegeben) zeitlich stabile Erhöhungen der Belastung folgen (Hofmann et al., 2017). Da diese Tests Geld und Zeit kosten, sollten die Ergebnisse im Idealfall möglichst reliabel sein, einen standardisierten Zugang hinsichtlich Länge der Inkremente sowie deren Steigerungshöhe gibt es jedoch nicht (Jamnick et al., 2018; Bentley et al., 2007).

2.4 Einflussgrößen auf den Messparameter Blutlaktatkonzentration

Die Konzentration von Laktat im Blut ist unter anderem durch folgende Faktoren beeinflussbar.

2.4.1 Stufendauer

Die Stufendauern in den in dieser Arbeit untersuchten Studien reichten von 30 s bis 6 min, die Belastungssteigerungen von 25 bis 50 Watt. Während die Dauer zur Ermittlung der $\dot{V}O_{2\max}$ meist im Rahmen von 8 - 12 min (Poole et al., 2017) angegeben wird, herrscht bezüglich der Bestimmung von Umstellpunkten weniger Konsens. Hofmann et al. (2017) legen eine Gesamtdauer von 12 - 15 min nahe. Um sich stabilisierende Laktatkonzentrationen zu gewährleisten, werden Stufendauern von 8 min (Foxdal et al., 1990), 3-6 min (Bentley et al., 2007) sowie 6 - 10 min (Amann et al., 2004) genannt. Bei kürzeren Stufen würde sich eine Erhöhung der Blutlaktatkonzentration daher erst in der nächsten Stufe bemerkbar machen, wodurch sich die Frage ergab, ob Schwellen der ermessenen Stufe oder der vorangegangenen zugeschrieben werden sollten (Baldari et al., 2000). Diese Problematik ergibt sich bei der Ermittlung von ventilatorischen Schwellen nicht (Bentley et al., 2007; Amann et al., 2004).

2.4.2 Ernährungsstatus

Kohlenhydratreiche Kost führt zu höheren Laktatkonzentrationen, sowohl in Ruhe als auch unter Belastung (Russell et al., 2014; Yoshida, 1984). Die Bestimmung der Umstellpunkte LTP1 und LTP2 anhand der Laktatleistungskurve bleibt zwar unverändert (Hofmann, et al., 2017), jene anhand von fixierten Laktatkonzentrationen, u.a. der "4mMol-Schwelle", im englischen Sprachgebrauch *onset of blood lactate accumulation* (OBLA) genannt, würde jedoch deutlich verfrüht auftreten und die Leistung an diesem Punkt unterschätzen. (Yoshida, 1984). Invers dazu bedingt eine kohlenhydratarme Kost niedrigere absolute Werte, wodurch eine Beurteilung der Schwellen anhand von fixierten Konzentrationen ebenfalls irreführende Ergebnisse nach sich zieht (Hofmann et al., 2017; Faude, et al., 2009).

2.4.3 Abnahmestelle

Laktatkonzentrationen unterscheiden sich zwischen arteriellem, venösem sowie kapillarem Blut, ebenso wie zwischen Blutplasma und Erythrozyten (Foxdal et al., 1990; Pfitzinger et al., 1998). Die Laktatkonzentration in venösem Blut scheint im Vergleich zu arteriellem mit einer Verzögerung von 90 s zu steigen (Yeh et al., 1983). Konträr dazu fanden Dassonville et al. (1998) keinen Unterschied zwischen venösem Blut und kapillarem Blut aus dem Ohr bei Fahrrad- und Laufbandergometrien. Da die Unterschiede jedoch von der gewählten Ergometrie abhängen und die Arme aufgrund ihrer Involvierung in die Bewegung oft nicht als Abnahmeort zur Verfügung stehen, legen Dassonville et al. (1998) die Abnahme am Ohr nahe. Ein Vergleich absoluter Werte zwischen verschiedenen Abnahmestellen scheint nicht zielführend zu sein, ergeben Blutproben aus dem Ohrläppchen doch niedrigere BLK als jene von der Fingerspitze (Faude et al., 2009). Laktatkonzentrationen im Schweiß können ein Vielfaches von jenem im Blut annehmen (Morales et al., 2020) und sind daher in Blutproben unbedingt zu vermeiden.

2.5 Methoden der Schwellenbestimmung

Die rein visuelle Findung von Schwellen auf Laktatleistungskurven kann subjektiv sehr unterschiedlich ausfallen (Bailly et al., 2014). Um diese Nachteile zu umgehen, haben sich verschiedenste Methoden entwickelt, die Schwellenfindung zu standardisieren (Bentley et

al., 2007). Wie in Tabelle 1 erwähnt, gibt es unzählige Begriffe, um Schwellen zu bezeichnen. Neben der semantischen Diversität bestehen zusätzliche Unterschiede in der methodologischen Herangehensweise. Svedahl et al. (2003) heben hervor, dass die den Konzepten zugrundeliegenden Definitionen oftmals von den operativen Definitionen abweichen. So werden von den in diesem Review inkludierten Studien etwa dem Begriff „lactate threshold“ verschiedenste Herangehensweisen zugeschrieben. Ein entscheidender Punkt, aufgrund dessen nach wie vor Unklarheit herrscht, ist daher die unangemessene Bezeichnung sowie die Uneinigkeit bezüglich der genauen Definition.

Die genaue Anzahl an Methoden ist nicht bekannt, Faude et al. (2009) berichten von 25, Jamnick et al. (2020) von zumindest 30, Hofmann et al. (2017) gar von über 40. Die häufigsten Methoden werden daher im Folgenden vorgestellt.

2.5.1 Lactate Threshold

Obwohl der Begriff „Lactate Threshold“ vielfältig verwendet wird, beschreibt er doch zumeist den LTP1, das erste markante Ansteigen der Blutlaktatkonzentration im Belastungsverlauf. Faria et al. (2005) sehen den LTP1 als diejenige Intensität, die eine Blutlaktatkonzentration von 1 mmol/L über dem Ruhewert hervorruft. Jamnick et al. (2020), Hofmann et al. (2017), Brooks (1986) interpretieren den LT als den Beginn des Anstiegs über dem Basislevel. Für Cerezuela-Espejo et al. (2018) und Weltman et al. (1990) beschreibt er die höchste Intensität, die ohne Anstieg der Blutlaktatkonzentration über dem Basislevel auskommt. Der LTP1 als geringstes Laktat/Leistungsäquivalent (Dickhuth et al., 1999; Hauser et al., 2014) bedingt operativ ebenfalls den Beginn des Laktatanstieges (Dickhuth et al., 1999). Der LTP1 beschreibt damit oft einen „klaren physiologischen Schwellenmoment“ (Röcker, 2010), die folgenden Konzepte sind hingegen empirische Modelle. Ein alternatives Konzept wurde von Nicholson et al. (2001) angewandt: Die Intensität vor zwei aufeinanderfolgenden Erhöhungen der Blutlaktatkonzentration um min. 1 mmol/L kennzeichnete den LTP1.

2.5.2 D_{max}

Der Punkt der Blutlaktatkurve, der den größten Abstand zu einer zwischen Anfangs- und Endpunkt der Kurve gelegten Gerade hat, wird als D_{max} bezeichnet (Abbildung 4) (Cheng et al., 1992). Bei dem D_{max}-Konzept handelt es sich um ein Ein-Schwellenkonzept, der ermittelte Punkt tritt im Vergleich zu anderen Konzepten meist früher auf. Die Wahl der

Anfangsbelastung sowie allen voran der Grad an Ausbelastung des Probanden / der Probandin haben maßgeblichen Einfluss auf die Position von D_{max} (Faude et al. 2009).

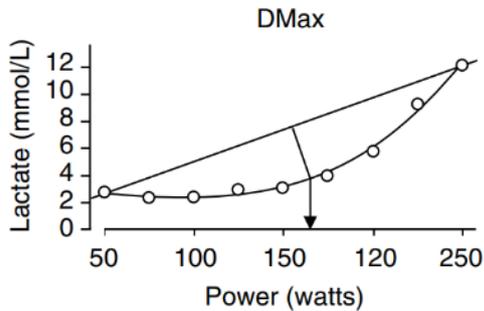


Abb. 4: D_{max} (Bentley et al., 2007) bearbeitet.

2.5.3 D_{mod}

Bei dem D_{mod} -Konzept handelt es sich um eine an Cheng (1992) angelehnte Variante der Schwellenfindung durch maximale Distanzmessung (Abbildung 5). Bishop et al. (1998) wählten als Startpunkt der Kurve jedoch die "LT", die ihrer Auffassung nach die Intensität darstellt, ab der Plasmlaktatkonzentrationen in einem Stufenleistungstest über das Ruhelevel hinaus steigen. In der das Konzept beschreibenden Grafik fügten Bishop et al. (1998) zusätzlich die Notiz ein, dass der Anstieg zumindest 0,4 mmol/L von der vorherigen Messung betragen muss. Der Startpunkt ist bei den meisten Studien jener Messwert, dem erstmals eine Erhöhung der Blutlaktatkonzentration von 0,4 mmol/L folgt (Fabre et al., 2010; Heuberger et al., 2018; Ploszcycza et al., 2020). D_{mod} resultiert daher in höheren Werten als D_{max} .

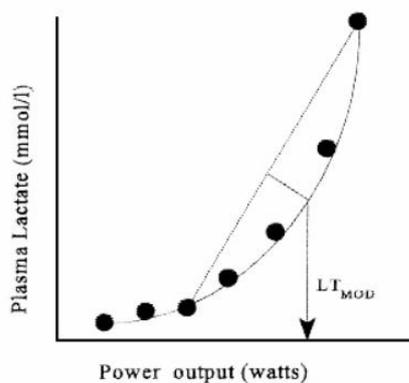


Abb. 5: D_{mod} (Bishop et al., 1998).

2.5.4 IAT- Individuelle anaerobe Schwelle

Anders als andere Konzepte beinhaltet die Schwellenfindung nach IAT (*individual anaerobic threshold*)- Methodik nicht nur Blutabnahmen während der Belastung, sondern auch in der Erholungsphase. Der Punkt der Kurve, der in der Erholungsphase eine exakt gleich hohe Blutlaktatkonzentration wie jene zu Belastungsabbruch darstellt, dient als Ausgangspunkt für eine Tangentenlegung zur Belastungskurve. Jener Punkt, in dem die Gerade die Kurve tangiert, wurde als IAT festgelegt (Stegmann et al.,1981). Abbildung 6 illustriert diese Definition auf verständliche Weise (Urhausen et al., 1993).

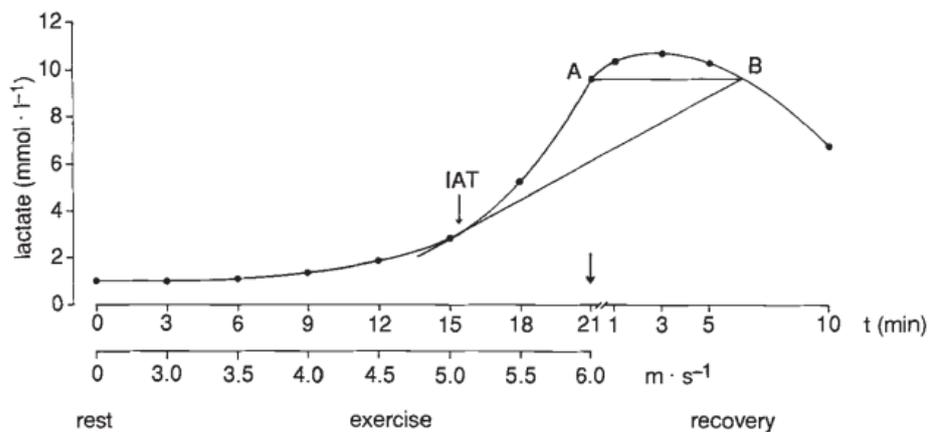


Abb. 6: IAT nach Stegmann (Urhausen et al., 1993).

A= Belastungsabbruch, B= Zeitpunkt bei dem die „Erholungs“-Laktatkonzentration den Wert jener des Belastungsabbruchs annimmt, IAT= Treffpunkt der Gerade mit der Kurve (Urhausen et al., 1993).

Stegmann et al. (1981) gelten als Begründer dieser Herangehensweise sowie der Namensgebung. Der Begriff IAT gleicht jedoch einem Sammelsurium verschiedener Definitionen. Oftmals wird der Begriff IAT in unterschiedlichen Studien synonym verwendet. Die in diesem Review bezeichneten Varianten ergeben sich wie folgt: (Faude et al.,2009; Baldari et al., 2000)

IAT (nach Dickhuth et al.)	Minimales Laktatäquivalent + 1,5 mmol/L
IAT (nach Simon et al.)	45° Tangente zur Blutlaktatkurve
IAT (nach Baldari et al.)	Zweiter Anstieg der BLK über 0,5mmol/L vom vorherigen Wert, wobei der 2. Anstieg größer (oder gleich) als der erste ausfallen muss.

IAT (nach Berg et al.)

Schnittpunkt der Tangente des min.
Laktatäquivalents, und der linearen Funktion der
letzten 90sek des GXT.

Hoefelman et al. (2015) berichten in ihrer Methodik von der Verwendung der Methode von Berg et al., die operativ jedoch mit jener von Dickhuth et al. vergleichbar ist. Eine genaue Beleuchtung der Schwellenfindung ist daher stets unabdingbar.

2.5.5 Knickpunkt

Markante Knickpunkte auf der Blutlaktatkurve können als Schwellenereignis interpretiert werden und zur Abgrenzung von Intensitätsbereichen dienen (Binder et al., 2008). Forscher*innen, die die Blutlaktatkonzentration im Belastungsverlauf als kontinuierlich wachsend interpretieren (Dennis et al., 1992), werden folglich zu keinem Knickpunkt gelangen und auf alternative Konzepte zur Auswertung ausweichen. Ein einzelner Knickpunkt wird als Leistung, ab der die BLK monoton mit steigender Leistung wächst (Morton et al., 2012), sowie durch visuelle Inspektion des Laktat-Leistung-Graphen (Pfitzinger et al., 1998) ermittelt. Obwohl Konzepte mit zwei Schwellen in der Literatur überwiegen, definiert lediglich ein marginaler Anteil an Studien den zweiten Knickpunkt, LTP2, anhand visueller Inspektion (Aunola et al., 1992). Ein möglicher Grund hierfür könnten interindividuelle Unterschiede in den Fähigkeiten der auswertenden Personen sein.

2.5.6 Fixe Blutlaktatkonzentrationen

Auf die Problematik mit fixierten Blutlaktatkonzentrationen wurde bereits in einigen Studien eingegangen (Oliveira et al., 2012; Zhou et al., 1997). Neben den nicht außer Acht zu lassenden interindividuellen Unterschieden der Blutlaktatkonzentrationen des LTP2 bei anderen Methoden haben vor allem die gewählte Sportart sowie der Anteil an involvierter Muskelmasse einen gesonderten Einfluss auf die Höhe der Laktatkonzentration der entsprechenden Schwelle (Czuba et al., 2009; Jakobsson et al., 2019). Athlet*innen, die durch genetische Faktoren sowie eine hohe Fähigkeit an Laktatelimination gekennzeichnet sind, können in Extremfällen BLK von 4mmol/L nicht erreichen (Jakobsson et al., 2019; Poole et al., 2021). Fixe Blutlaktatkonzentrationen sind jedoch simpel und objektiv zu

messen, unzählige Forscher*innen ermitteln Schwellen daher nach wie vor mithilfe dieses Konzepts. Studien, die ihre Laktatschwellen rein aus fixen Kenngrößen bezogen, wurden dennoch aus diesem Review exkludiert.

2.5.7 LT+

Ein Mischkonzept aus Kurveneigenschaft und fixen Blutlaktatkonzentrationen stellen LT+ Konzepte dar. Die LT als eindeutiger physiologischer Schwellenwert (Röcker, 2010) wird um fixe Größen von +0,5 mmol/L (Cerezuela-Espejo et al., 2018; Pallarés et al., 2016) bis +3 mmol/L (Cerezuela-Espejo et al., 2018) erweitert. Ähnliche Ansätze verbinden die Erweiterungen nicht mit dem LT, sondern mit dem Basislevel (Solberg et al., 2005).

Neben den bereits genannten Methoden existieren noch etliche weitere Konzepte der Schwellenidentifikation. Logarithmische Transformationen gestalten die Verlaufskurven hierbei linearer (Beaver et al., 1986), wodurch die optische Lokalisation des Umstellpunkts leichter fällt. Log-Transformationen scheinen die Datenvariabilität zu verringern, in der Praxis ist dies jedoch oft nicht der Fall (Feng et al., 2014). Schwellen, die sich anhand von log-Transformationen definierten (Bentley et al., 2001), wurden daher nicht inkludiert.

2.5.8 Maximales Laktat Steady-State

Das maximale Laktat Steady-State (MLSS) beschreibt diejenige Intensität bzw. BLK, die ohne eine kontinuierliche Blutlaktat-Anhäufung über längere Dauer aufrechterhalten werden kann (Billat et al., 2003). Die Ermittlung des MLSS erfolgt üblicherweise aus einer Serie von vier bis fünf 30-minütigen Dauerbelastungen an verschiedenen Tagen, wobei die Intensität zwischen den einzelnen Durchgängen kontinuierlich steigt (Jones et al., 2019). Steigt die Blutlaktatkonzentration zwischen der 10. und 30. Belastungsminute um weniger als 1 mmol/L, spricht man von einem Steady-State Zustand. Als verifiziert gilt ein MLSS zumeist, wenn im letzten Durchgang eine Intensität gewählt wird, bei der keine Laktat-Homöostase mehr eintritt (Beneke, 1995). Das heutige Konzept des MLSS scheint auf Margaria et al. Mitte der 1960er Jahre zurückzugehen (Billat et al., 2003), Garcia-Tabar et al. (2019) berichten, dass Wang 1936 bereits von einem Punkt sprach, der dem heutigen Verständnis des MLSS stark ähnelt. Alternative Methoden, die reliable und valide Ergebnisse in weniger als einer Stunde liefern, wurden u.a. von Hering et al. (2018) sowie Yaeger et al. (2018) vorgestellt.

Die Erueierung der Reliabilität von MLSS Messungen ist mit einem enormen Zeitaufwand verbunden, die Leistung an diesem Punkt wurde jedoch mit 0,7 % (Batschelet et al., 2004) sowie 3% CV (Hauser et al., 2013) als sehr reliabel angegeben.

2.6 Problemstellung

Mann et al. (2013) attestieren Trainingsvorgaben anhand von Schwellen eine höhere interindividuelle Vergleichbarkeit als jenen von maximalen Parametern. Dies betrifft vor allem die Bereiche der Dauer bis zur Ausbelastung während kontinuierlicher Belastungen sowie geringerer Streuung in den Anpassungsreaktionen nach Trainingsinterventionen. (Mann et al., 2013). Im Vergleich zu den Maximalparametern $\dot{V}O_{2max}$ und HF_{max} dürften Schwellenmessungen jedoch eine höhere Variation zwischen einzelnen Tagen aufweisen. Ihrer Auffassung nach können jedoch weder LTP1 noch LTP2 einer einzelnen Blutlaktatkurve ohne Verifikation als wahre Schwellenwerte angenommen werden. Diese würde zumindest 2 aufeinanderfolgende Besuche mit mehreren Blutmessungen bedingen. Blutlaktatkonzentrationen am gemessenen LTP1 dürften dabei im Retest nicht von der Baseline abweichen, während sie am LTP2 erhöht, dennoch stabil und eventuell am Ende der Belastung sinkend ausfallen.

Für Svedahl et al. (2003) stellt der LTP2 („anaerobic threshold“) eine Grenzintensität dar. Darunter ist die Belastung als mild zu bezeichnen, um den LTP2 als moderat, sowie darüber als intensiv. Um diese Intensität exakt zu beschreiben, liegen mehrere Methoden vor. Jedoch sind diese nur dann nützlich, wenn sie reproduzierbar, akkurat und objektiv sind. Zeitaufwand, Kosten und Invasivität stellen wichtige Nebenkriterien dar. Der beste Prädiktor des LTP 2 ist ihrer Meinung nach der MLSS. Vorsicht ist bei der Menge an verschiedenen Benennungen und Definitionen von Konzepten geboten. Einen Test zu haben, der die Intensität des LTP2 gut einschätzt, ist trotz methodologischer Unterschiede für die Trainingswissenschaft sehr wertvoll (Svedahl et al., 2003).

Faude et al. (2009) sprechen Laktatkonzepten im Vergleich zur $\dot{V}O_{2max}$ eine höhere Fähigkeit, Ausdauerfähigkeit bei homogenen Athlet*innen vorherzusagen, zu. Der Vergleich von Konzepten mit kürzlich erbrachten Wettkampfleistungen sowie die Vorhersage der Leistung anhand des Konzepts stellen den Autoren nach den Gold-Standard der Validierung eines Konzepts dar. MLSS kann hierbei als Repräsentant der Leistung dienen, eine enge Beziehung von LT-Konzepten zum MLSS spricht demnach für hohe Validität. Tendenziell dürften längere Ausdauerbewerbe im Vergleich zu

Kurzdistanzen stärker mit diversen Konzepten korrelieren. Hinsichtlich MLSS wurde von Faude et al. (2009) allen voran die IAT nach Stegmann als gut einschätzend und somit valide hervorgehoben.

Nach Jamnick et al. (2020) kann die erste Laktatschwelle den Bereich zwischen moderater und schwerer Belastung evidenzbasiert abgrenzen. Bezüglich der zweiten Schwelle, als Schnittlinie zwischen schwerer und harter Belastung, herrscht weniger Klarheit, wobei die Abhängigkeit vom Stufenprotokoll hierbei den größten Kritikpunkt darstellt (Jamnick et al., 2020). Für den LTP1 scheint die visuelle Schwellenfindung nicht reliabel. Trotz unvollständiger Datenlage sagen auch Jamnick et al. (2020) Intensitätsvorgaben anhand des LTP1 homogenere Beanspruchungen als jene von $\dot{V}O_{2\max}$ nach. Für den LTP2 scheinen D_{\max} sowie D_{mod} stabile Methoden zu sein.

2.7 Forschungslücke

Bezüglich des Bereichs des "aerob-anaeroben Übergangs" bleiben einige offene Fragen. Studien, die Schwellenkonzepte mit MLSS vergleichen, weisen oft methodologische Unterschiede und widersprüchliche Ergebnisse auf. Faude et al. (2009) forderten daher mehr Studien, die LT Konzepte mit MLSS nach klassischer Herangehensweise mit mehreren konstanten Dauerbelastungen, allen voran auch in Sportarten abseits des Rad- und Laufsports, untersuchen. Diese Forderung ist übereinstimmend mit jener von Svedahl et al. (2003). Da die meisten der von Faude et al. (2009) untersuchten Studien Korrelationen anhand von linearen Regressionen und daher relativ angaben, wurden Studien gefordert, die absolute Variabilität anhand der Limits der Übereinstimmung (LoA) von Bland und Altman erfassen. Hinsichtlich der Reliabilität halten Faude et al. (2009) fest, dass viele in der Praxis angewandte Konzepte noch nicht ausreichend bestätigt sind. Für Jamnick et al. (2020) scheint die Bestätigung der Validität anhand eines einzelnen Korrelationskoeffizienten nicht ausreichend, sie sollte sich eher aus einer Kombination statistischer Prozeduren oder durch den Gebrauch von *a priori*-Kriterien, die meist von Forscher*innen vorab als sportsspezifische Limits definiert werden, ergeben. Zusätzlich sollte die Validität ihrer Meinung nach nicht anhand eines anderen submaximalen Markers, sondern durch belastungsinduzierte Auslenkungen von Messparametern bestimmt werden. Bentley et al. (2007) gehen davon aus, dass es keinen "besten" LT-Marker gibt, vielmehr scheint eine Auswahl an Markern nützlicher zu sein als ein Einzelner.

Die präsentierten Möglichkeiten der Schwellenidentifikation unterschieden sich zum Teil erheblich voneinander. Jamnick et al. (2018) untermauern die methodische Vielfalt anhand Abbildung 7 mit 14 möglichen Schwellen auf derselben Blutlaktatkurve.

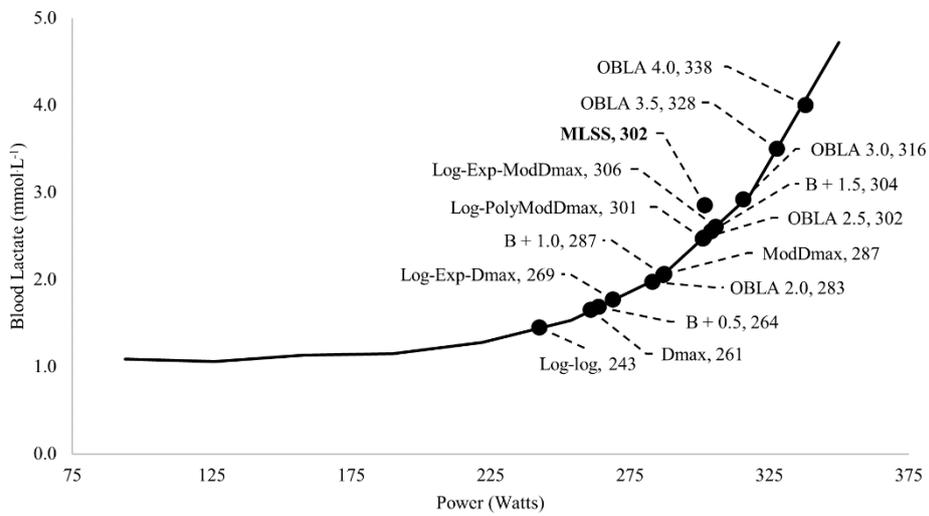


Abb. 7: mögliche Schwellen auf derselben Laktatleistungskurve (Jamnick et al., 2018).

3 Methodik

Die Wahl der Untersuchungsmethode fiel auf den systematischen Review. Dieser hat gegenüber narrativen Literaturarbeiten die Vorteile höherer Breite, empirischer Evidenz sowie Transparenz und Replizierbarkeit (Mallett et al., 2012).

Am 22.10.2020 erfolgte die Suche in der Online-Datenbank Pubmed anhand der folgenden Suchkriterien

((Reliability OR Validity)

AND

(LT2 OR "lactate turn point" OR LMT OR "anaerobic threshold" OR LTP1 OR OBLA OR AnT OR LT OR "lactate threshold") AND Lactate NOT disease NOT device) OR ((Reliability OR Validity) AND (RCP OR GET OR VE/VCO2 OR VE/VO2 OR "aerobic threshold" OR "anaerobic threshold") AND („Gas Exchange" OR „Respiratory Gases") NOT disease NOT device)

Dieser "Search-String", der keine redundanten Inhalte aufweist, erzielte 334 Suchergebnisse, von denen 23 Reviews exkludiert wurden.

Am 03.11.2020 wurden 338 weitere mit dem auf der Datenbank Web of Science angewandten, identen Suchstring gefundene Studien, hinzugefügt. Abstract und Titel aller Studien wurden in das Online Reviewing Programm "Covidence" eingespielt. Die Anzahl der zu bearbeitenden Studien verringerte sich nach dem Ausschluss von 111 Duplikaten auf 538.

3.1 Studienauswahl

Vor dem ersten Durchgang der 538 Studien wurden folgende Inklusionskriterien festgelegt:

1. Das Proband*innenkollektiv musste gesund sein, klinische Studien mit erkrankten Proband*innen wurden ausgeschlossen.
2. Studien, die die Reliabilität von einzelnen Laktat-Messgeräten untersuchten, wurden exkludiert.
3. Die Studien mussten in englischer oder deutscher Sprache verfasst sein.
4. Kinder und Jugendliche (unter 18 Jahren), sowie Personen über 40 Jahre werden ausgeschlossen.

5. Der Review konzentriert sich auf ein sportliches Kollektiv. Dies wurde, wenn angegeben, anhand der jeweiligen Mittelwerte der relativen $\dot{V}O_{2\max}$ ermittelt. Für Frauen galt hierbei eine Untergrenze von 45ml/min/kg, für Männer 55ml/min/kg. Beide Werte entsprechen mehr als der 95% Perzentile (Rapp et al., 2018). Fehlte die Angabe der maximalen Sauerstoffaufnahme, wurde über die Inklusion anhand anderer Leistungswerte entschieden.
6. Studien, deren Proband*innen sich in Räumen mit beabsichtigt geringerem Sauerstoffgehalt (Hypoxie) oder zu hohem (Hyperoxie) bewegten, wurden von dem Review ausgeschlossen.
7. Schwellenkonzepte, die fixe Blutlaktatkonzentrationen anwandten, wurden ebenfalls exkludiert.
8. Diplomarbeiten und andere Hochschulschriften wurden ausgeschlossen
9. Eingeschlossen wurden nur folgende Sportarten: Laufsport, Radsport, Schwimmsport, Langlaufen, Inline-Skating sowie Triathlon
10. Ausgeschlossen wurden Publikationen im Bereich des Kraftsports

3.2 PEDro

Um die inkludierten Studien hinsichtlich ihrer Qualität beurteilen zu können wurde die Physiotherapy Evidence Database – PEDro angewandt. Die ursprünglichen elf Kriterien wurden für diesen Review auf die folgenden Fünf reduziert:

1. Die Einschlusskriterien wurden spezifiziert (1)
2. Alle Untersucher*innen, die zumindest ein zentrales Outcome gemessen haben, waren geblindet (7)
3. Von zumindest 85% der Proband*innen wurde mindestens ein zentrales Outcome gemessen (8)
4. Für mindestens ein zentrales Outcome wurden die Ergebnisse statistischer Gruppenvergleiche berichtet (10)
5. Die Studie berichtet sowohl Punkt- als auch Streuungsmaße für zumindest ein zentrales Outcome (11)

Die nicht enthaltenen Kategorien handeln von für die Studien dieses Reviews irrelevanten Blindungsmethoden, Gruppenvergleichen sowie nicht vorhandenen Interventionen.

3.3 Erfassung der Reliabilität

Reliabilitätsangaben zwischen verschiedenen Studien zu vergleichen, kann aufgrund verschiedener Messparameter sowie statistischer Verfahren schwierig sein (Hopkins et al., 2001). Grundsätzlich gibt es bei nahezu jeder Messung eine Schwankung von Tag zu Tag. Diese resultiert unter anderem aus den Faktoren biologischer Variation sowie der Fehleranfälligkeit der messenden Geräte (Mann et al., 2013). Der Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) ist in den Studien dieses Reviews das meistgewählte statistische Verfahren und vergleicht jeweils Ergebnisse innerhalb eines Datensatzes anstatt zwei voneinander unabhängiger. Das Cronbach'sche Alpha entstammt der Psychometrie und stellt ein Maß für die interne Konsistenz zwischen mehreren Messungen dar (Bujang et al., 2018). Alle Korrelationskoeffizienten der inkludierten Studien werden von 0 bis 1 angegeben. Hofmann et al. (2017) legen einen Korrelationskoeffizienten von $>0,8$ als ausreichend fest, für Hohmann et al. (2007) scheinen zumindest 0,7 für Forschungszwecke zu genügen, auch wenn Werte über 0,9 wünschenswert seien. Der Test-Retest Korrelationskoeffizient (r) ist jedoch fehleranfällig bei heterogenen Gruppen und daher für Vergleiche zwischen Studien nicht geeignet (Hopkins et al., 2001). Eine zusätzlich gewählte Untersuchungsmethode, um Studien mit Proband*innen verschieden hoher Leistung zu vergleichen, ist daher der Variationskoeffizient (CV). Er repräsentiert den Messfehler als Prozentsatz des gemessenen Mittelwerts (Mann et al., 2013) und wurde, wenn nicht in den Studien direkt angegeben, nach den vier Methoden von Hopkins et al. (2001) berechnet. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein niedriger CV für hohe Reliabilität spricht und dadurch in weiterer Folge auch Grundvoraussetzung für eine hohe Validität ist (Hopkins et al., 2001).

3.4 Erfassung der Validität

Die Zusammenfassung zweier Untersuchungsparameter in einem Streudiagramm erlaubt eine erste visuelle Untersuchung und stellt den ersten Schritt der Untersuchung von Zusammenhängen dar (Akoglu, 2018; Schober et al., 2018). Aus statistischer Sicht beschreiben Korrelationskoeffizienten die Stärke und Richtung der Beziehung voneinander unabhängiger Variablen (Schober et al., 2018). Der am häufigsten angewandte

Korrelationskoeffizient ist die "Produkt-Moment-Korrelation" von Pearson (Saccenti et al., 2020). Ähnlich wie der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman, der anders als jener von Pearson statt totalen Werten Rangwerte nutzt, wird die Stärke des Zusammenhangs dimensionslos von 0 bis +1, sowie 0 bis -1 angegeben (Schober et al., 2018). 0 beschreibt dabei keinen, 1 einen perfekten Zusammenhang, welcher in naturwissenschaftlicher Forschung aufgrund biologischer Variabilität jedoch sehr untypisch ist (Schober et al., 2018).

Die Namensgebung der Stärken dazwischen variiert zwischen Untersuchern oftmals, wodurch eine einheitliche Benennung von Stärken gefordert wurde (Akoglu, 2018). Für diese Arbeit wurde die Nomenklatur von Chan (2003) angewandt (Tabelle 2).

Tab. 2: Nomenklatur von Korrelationsstärken

Stärke	Übersetzung
>0,8	sehr stark
0,6 - 0,8	mäßig stark
0,3 - 0,59	mittelmäßig
< 0,3	schwach
0	keine

(mod. nach Chan, 2003)

Korrelationskoeffizienten können jedoch oft irreführend sein, sie beschreiben lediglich den Zusammenhang und nicht die absolute Übereinstimmung (Giavarina, 2015). Diese ist beim Bland-Altman Plot besser ersichtlich, der Fokus liegt hierbei stärker auf den Differenzen zwischen zwei untersuchenden Methoden. Falls Studien neben dem Korrelationskoeffizienten zusätzliche Angaben machten, wurden diese in den Ergebnissen berücksichtigt.

Statistische Signifikanzniveaus (p) beschreiben die Wahrscheinlichkeit, mit der die gefundenen Stärken zufällig auftreten (Akoglu, 2018). Sie können bei hoher Proband*innenanzahl statistisch signifikante Werte annehmen, selbst wenn die gemessenen Korrelationskoeffizienten gering ausfallen (Chan, 2003; Schober et al., 2018). Sie spielen daher in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle.

4 Ergebnisse

4.1 PRISMA Flussdiagramm

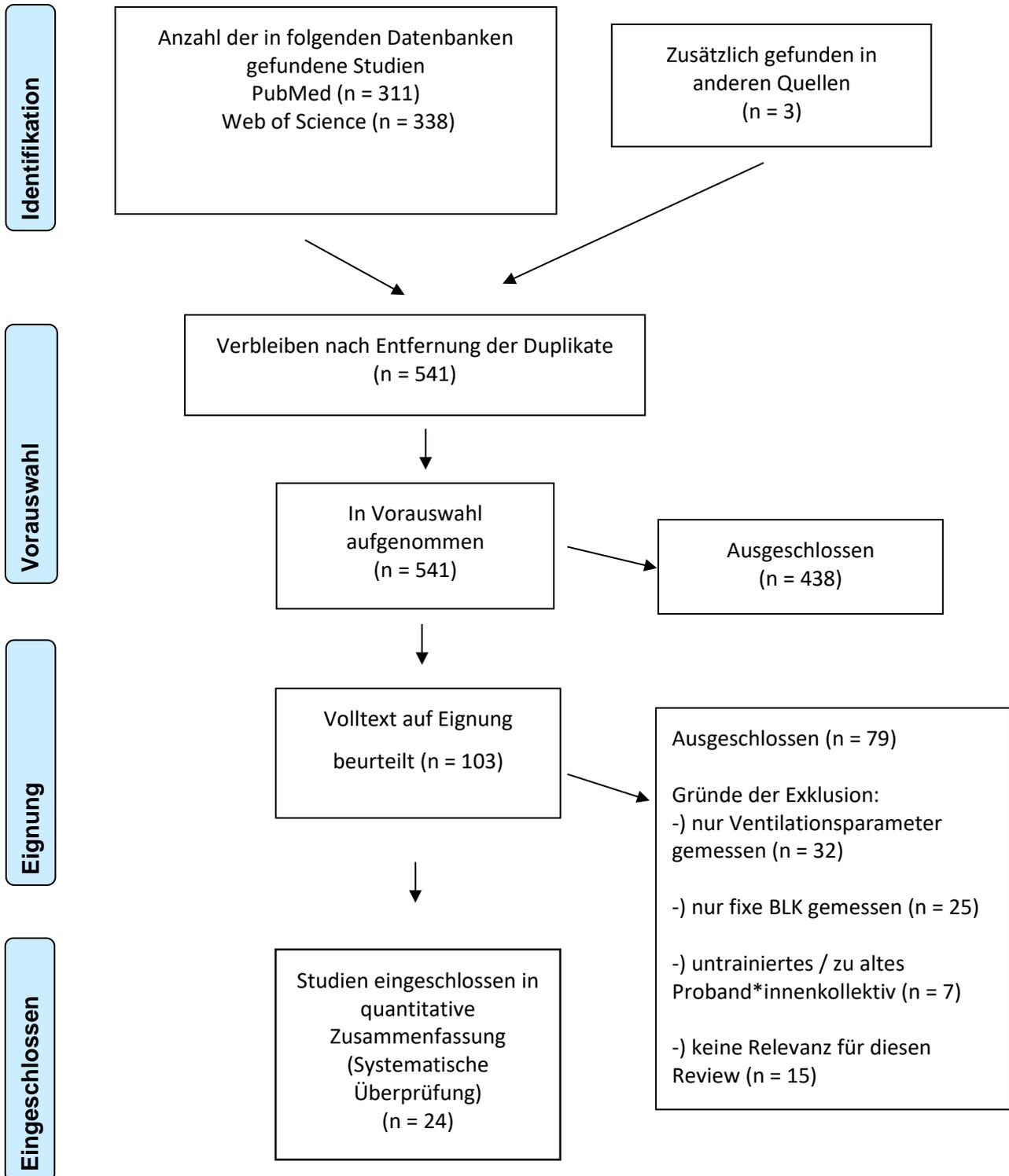


Abb. 8: Prisma Flow-Diagramm ,übersetzt und angepasst nach Moher et al., (2009)

Nach diesen Ein- und Ausschlusskriterien reduzierte sich die Zahl der potenziell geeigneten Studien auf 46.

Im ersten Volltext Durchgang wurden 14 Studien ausgeschlossen. Sechs Studien wandten als Schwellenkonzept nur fixierte Blutlaktatkonzentrationen an, bei einer Publikation handelte es sich um eine Diplomarbeit (Hoogeveen, 1999), Ein untrainiertes (Spendier, 2020) sowie älteres Proband*innenkollektiv (Forsyth et al., 2017) gab ebenso Grund zum Ausschluss wie ein unpassendes Studiendesign (Ahrend et al., 2018; Schneeweiss et al., 2019).

Um den Überblick zu behalten, wurden alle geeigneten Publikationen in ein Excel-Sheet extrahiert. Dieses umfasste neben Hauptautor*in und Publikationsjahr vor allem das Forschungsgebiet, das angewandte Schwellenkonzept sowie die Sportart, die die Proband*innen ausübten. Da die Laktatleistungsdiagnostik eine sehr hohe Relevanz für den Ausdauersport innehat, wurden von der ersten Inklusionsrunde an allen voran zyklisch dynamische Sportarten ausgewählt. Die Affinität zwischen Kraftsport und Laktatkonzepten fällt deutlich geringer aus, das Forschungsinteresse scheint in niedrigerem Ausmaß zu bestehen. So konnte nur eine einzige Publikation dem Metier des Kraftsports zugewiesen werden (Spendier et al., 2020).

Die Ergebnistabellen geben einen Überblick über die wichtigsten gewonnenen Inhalte. Den beiden Haupttabellen Reliabilität und Validität sind die jeweiligen Tabellen der Stufenleistungstest vorgelagert. Diese geben Aufschluss darüber, wie die präsentierten Laktatkonzepte eruiert wurden.

Nach den in der Methodik beschriebenen Volltextanalysen wurden schlussendlich 24 Studien eingeschlossen. Davon widmen sich zwölf dem Bereich der Validität sowie sieben der Reliabilität. Fünf Studien bearbeiteten beide Felder gleichzeitig. Insgesamt umfassen alle Studien ein Gesamtkollektiv von 842 Proband*innen, davon 724 Männer sowie 120 Frauen. Mehr als die Hälfte aller Proband*innen (427) konzentriert sich auf eine Studie (Röcker et al., 1998). Mediandaten ergeben durchschnittlich 14 Teilnehmer*innen pro Studie. Alle 24 Studien hatten männliche Probanden, 6 davon zusätzlich weibliche. Bei drei Studien (Dickhuth et al., 1999; Hauser et al., 2014; Morton et al., 2012; Mugele et al., 2018) konnten die Proband*innen keiner Sportart zugeordnet werden. Da sie als gesund und sportlich aktiv beschrieben wurden, stand angesichts der hohen erbrachten Leistungswerte einer Inklusion nichts im Wege. Während die Sportarten Inlineskating (Hecksteden et al.,

2015) und Langlaufen (Jakobsson et al., 2019) nur einmal vertreten waren, stellten 11 Studien mit Radsportler*innen sowie 9 Studien mit Läufer*innen die Mehrheit dar. Bei 5 der 9 Laufstudien sowie bei einer der 11 Radstudien (Zhou et al., 1997) waren ebenfalls Triathleten involviert. Probanden aus 3 verschiedenen Sportarten (Radsport, Triathlon & Rudern) waren bei nur einer Studie vorhanden (Urhausen et al., 1993).

19 der 24 Studien gaben für ihr Proband*innenkollektiv die Werte der maximalen Sauerstoffaufnahme $\dot{V}O_{2max}$ an. Die Mittelwerte reichten bei den Männern von 56,8 ml/min/kg bei gesunden, nicht näher definierten sportlichen Personen (Dickhuth et al., 1999) bis 75,4 ml/min/kg bei professionellen Straßenradsportlern (Van Schuylenberg et al., 2004). Die höchsten Sauerstoffaufnahmewerte wurden bei den Frauen mit 57,8 ml/min/kg bei Czuba et al. (2009), die niedrigsten mit 47,6 ml/min/kg bei Nicholson et al. (2001) gefunden. Die restlichen Studien gaben Angaben über die erreichte Leistung (Morton et al., 2012) sowie maximale Laufgeschwindigkeit im Stufenleistungstest (Coen et al., 2001; Röcker et al., 1998). Waren keine dieser Daten vorhanden, konnte anhand der Proband*innenbeschreibung (Hecksteden et al., 2015; Jakobsson et al., 2019) auf eine hohe Leistungsfähigkeit geschlossen werden.

Um aufgrund der Ergebnisse einen Rückschluss auf eine entsprechende Populationsgruppe ziehen zu können, wurden die Werte aller inkludierten Proband*innen gemittelt. Diese gaben Aufschluss darüber, dass es sich um sportlich trainierte, normalgewichtige Personen am Ende des dritten Lebensjahrzehnts handelt.

4.2 PEDRO

Tab. 3: PEDro

Autor et al.	PEDro-Score
Amann	3
Bentley	3
Cerezuela- Espejo	4
Coen	4
Czuba	3
Dickhuth	3
Hauser	3
Hecksteden	3
Heuberger	5
Hoefelmann	4
Jakobsson	3
McLellan	3
McNaughton	3
Morton	4
Nicholson	3
Pallares	3
Papadopoulos	4
Pfizinger	5
Ploszczyca	3
Röcker	3
Urhausen	3
Van Schuylenbergh	3
Weltman	4
Zhou	3

Die Studien von Heuberger et al. (2018) und Pfizinger et al. (1998) wiesen mit 5 von 5 Punkten die höchste Qualität hinsichtlich des Studiendesigns auf. Einige weitere Studien blindeten entweder die auswertenden Personen oder gaben explizit die Ein- und Ausschlusskriterien bekannt. Die letzten 3 Punkte wurden schlussendlich von allen Studien erfüllt.

4.3 Stufenleistungstests

Die vorliegenden Studien wurden in die zwei Tabellen Laufsport und Radsport gegliedert. Die Beschreibung der Stufenleistungstest im Inline-Skating- und Langlaufsport ist extra angeführt.

4.3.1 Laufsportstudien

Tab. 4: Stufenleistungstests Laufsport

Autor et al. (Jahr)	Startintensität (m/s)	Stufendauer (min)	Inkrement (m/s)	Abnahmestelle	Abnahmeintervall -Pausendauer	Steigung Laufband
Cerezuela- Espejo, 2018	V_{\max} - 3,6 m/s	1	0,27 m/s	Kap ^d . Finger	nach jeder 2. Stufe - ohne Pause	1%
Coen, 2001	m 3,61 m/s w 3,05 m/s	3	0,55 m/s	Kap. Ohr	Nach jeder Stufe - 15-25s Pause	Laufbahn
Dickhuth, 1999	1,67 m / s	3	0,55 m / s	Kap. Ohr	Nach jeder Stufe - 30 s Pause	1,5%
Nicholson, 2001	$V_{10 \text{ km}^b}$ - 0,55 m / s	5	0,27 m/s	Kap. Ohr	Nach jeder Stufe - 60 s Pause	n.a.
Papadopoulos, 2006	$V_{10 \text{ km}^b}$ - 1,11 m / s	4	0,27 m/s	Vene Arm	Letzte 30 s jeder Stufe - n.a.	+2% alle 2 min nach 5. Stufe ^c

Pfitzinger, 1998	60% $\dot{V}O_{2\max}$	5	6% $\dot{V}O_2$	Kap. Finger	Nach jeder Stufe - 60 s Pause	n.a.
Röcker, 1998	1,66 m/s ^a 2,22 m/s	3	0,55 m/s	Vollblut	Nach jeder Stufe - n.a.	2%
Urhausen, 1993	2,5 m/s	3	0,50 m/s	Kap. Ohr	Nach jeder Stufe - 20 s Pause	1,5%
Weltman, 1990	2,5 m/s	3	0,16 m/s	Vene Hand	Nach jeder Stufe - n.a.	n.a

^a Startgeschwindigkeit von Höhe der Bestleistungen abhängig; ^b V10km = Geschwindigkeit der 10km Bestleistung ; ^c nach der 4.Stufe wurde die 10km-Geschwindigkeit erreicht, nach der 5.Stufe wurde die Geschwindigkeit nicht weiter erhöht, die Steigung des Laufbandes jedoch alle 2min um 2% gesteigert; ^d Kap. = Kapillare

Die Stufendauern der Laufbandstudien reichten von einer Minute (Cerezuela-Espejo et al., 2018) bis fünf Minuten (Pfitzinger et al., 1998; Nicholson et al., 2001). Cerezuela-Espejo et al. (2018) begründen diese Entscheidung mit der Tatsache, dass längere Stufenleistungstest das Erreichen der in ihrer Studie mitgetesteten MAS ermüdungsbedingt verhindern würden, während 60-sekündige Stufen für die Detektion der ventilatorischen und metabolischen Umstellpunkte ebenso reliabel sind.

Als Abnahmestelle dienten vier Mal die Ohren zur Entnahme kapillären Blutes, drei Mal die Finger sowie jeweils einmal die Vene des Handrückens (Weltman et al., 1990) sowie die Vene der Armbeuge (Papadopoulos et al., 2006). Der Forderung von Dassonville et al., (1998) zur Abnahme am Ohr wurde bei den Laufstudien daher nur teilweise nachgegangen. Eine Studie verwendete Vollblut für ihre Analysen, genauere Angaben zum Abnahmeort wurden nicht gemacht (Röcker et al., 1998).

Bezüglich der Startgeschwindigkeit haben sich verschiedenste Konzepte entwickelt. Startgeschwindigkeit und Inkrement in Kilometern pro Stunde wurden nur von Coen et al. (2001), die als einzige die Laufbahn statt dem Laufband wählten, sowie Dickhuth et al. (1999) und Röcker et al. (1998) angegeben. Urhausen et al. (1993) starteten mit 2,5 m/s (9km/h), steigerten um 0,5 m/s (1,8 km/h). Weltman et al. (1990) starteten ebenfalls mit 9 km/h, gaben dies jedoch in 150m / min an. Pfitzinger et al. (1998) gaben Startintensität und Steigerung in einem Prozentsatz der $\dot{V}O_{2max}$ vor, Papadopoulos et al. (2006) ließen 4 Stufen, beginnend mit einer um 4 km/h geringeren Geschwindigkeit als die 10km Laufgeschwindigkeit, bei einem Inkrement von einem Kilometer pro Stunde laufen, ehe die Steigung des Laufbandes ab der 5.Stufe alle zwei Minuten um 2% stieg. Ähnlich die Startvorgabe von 13 km/h weniger der Maximalgeschwindigkeit eines vorausgegangenes Stufenleistungstest (Cerezuela-Espejo et al., 2018). Um den direkten Vergleich anschaulicher zu machen, wurden in der Tabelle alle Geschwindigkeitsangaben in m/s umgerechnet.

Unterschiede wurden zudem in den Steigungswinkeln der Laufbänder gefunden. Während Pfitzinger et al. (1998), Weltman et al. (1990) sowie Nicholson et al. (2001) für die den Stufenleistungstest vorgelagerten $\dot{V}O_{2max}$ -Tests progressive Erhöhungen der Laufbandsteigung wählten, gaben sie für die eigentlichen Tests zur Schwellenermittlung keine Angaben zur Steigung des Laufbandes. Die höchste durchgängige Steigung wurde mit 2% bei Röcker et al. (1998) angewandt. Den Autoren nach dürfte diese Steigung die höchste Übereinstimmung mit der Geschwindigkeit auf der Laufbahn hervorrufen. Jones et al. (1996) legten hingegen dar, dass ein Steigungswinkel von 1% nahezu identer

Sauerstoffaufnahmen wie ebenes Laufen auf der Straße bedarf. Laufbänder ohne Winkelerhöhung können den Sauerstoffbedarf für dieselbe Laufgeschwindigkeit im Feld aufgrund des fehlenden Luftwiderstandes daher minimal unterschätzen. Für die Bestimmung von Laktatschwellen dürfte es, bei identem Stufenprotokoll, keinen Unterschied zwischen Laufbahn und Laufband geben (Mugele et al., 2018).

4.3.2 Fahrradstudien

Tab. 5: Stufenleistungstests Radsport

Autor et al. (Jahr)	Startintensität (Watt)	Stufendauer (min)	Inkrement (Watt)	Abnahmestelle ^d	Abnahmeintervall	Trittfrequenz (U / min)
Amann, 2004	100 W	3	50 W	Kap. Finger	Am Ende jeder Stufe	70 - 120
Bentley, 2001	50% $\dot{V}O_{2\max}$	3	5% $\dot{V}O_2$	Kap. Ohr	Letzte 30 s jeder Stufe	beliebig
Czuba, 2009	m = 40 W w = 30 W	3	m = 40 W w = 30 W	Kapillare	Beginn und Ende jeder Stufe	n.a.
Hauser, 2014	40 W	4	40 W	Kap. Ohr	Letzte 30 s jeder Stufe	80 - 90
Hoefelmann, 2015	100 W	3	30 W	Kap. Ohr	Letzte 30 s jeder Stufe	n.a.
McLellan, 1993	60 W ^a 90 W	4	30 W	Kap. Ohr	Letzte 30 s jeder Stufe	n.a.
McNaughton, 20006	150 - 200 W ^b	3 5	25 W 25 W	Kap. Ohr	Letzte 15 s jeder Stufe	n.a.
Morton, 2012	50 W	3	50 W	Vollblut Finger	Letzte 30 s jeder Stufe	beliebig, konstant
Pallares, 2016	50 W	1	25 W	Kap. Finger	Nach jeder 2. Stufe	80 - 85

Ploszcycza, 2020	40 W	3	40 W	Kap. Finger	Am Ende jeder Stufe	75 - 85
Urhausen, 1993	100 W	3	50 W	Kap. Ohr	n.a.	n.a.
Van Schuylenbergh, 2004	100 W	6	60% KG ^c	Kap. Ohr	Am Ende jeder Stufe	beliebig, konstant
Zhou, 1997	150 W	3	25	Vene	Letzte 30 s jeder Stufe	beliebig

^a Startinkrement von Höhe der $\dot{V}O_2$ max abhängig; ^b Startinkrement von Körpergewicht und Fitnesslevel abhängig; ^c 60% des Körpergewichts – Steigerung in Watt; ^d Kap. = Kapillare

Ähnlich wie bei den Laufbandstudien erstreckt sich die Spanne der Stufendauern von einer (Pallarés et al., 2016) bis 6 min (Van Schuylenbergh et al., 2004). Ebenfalls bei Van Schuylenbergh et al. (2004) wurden 30 s Inkremente angewandt, für diesen Review wurde jedoch nur die Gruppe mit 6 min Inkrementen berücksichtigt. Die niedrigsten Startintensitäten wurden mit 30 W für Frauen, sowie 40 W für Männer bei Czuba et al., (2009) sowie Hauser et al. (2014) gefunden. Die höchste Anfangsbelastung wurde mit 150 W angesetzt (Zhou et al., 1997).

Die Belastungssteigerungen bewegten sich im Rahmen von 25 W (Pallares et al., 2016; Zhou et al., 1997) bis 50 W (Amann et al., 2004; Morton et al., 2012; Urhausen et al., 1993). Bei Van Schuylenbergh et al. (2004) entsprechen 60% des Körpergewichts im Schnitt 40 W, dieses Kollektiv ist neben jenem von Bentley et al. (2001) das Einzige, das interindividuell unterschiedlich hohe Inkremente ausführte. Bentley et al. (2001) gaben "ungefähr" 5% der $\dot{V}O_{2\max}$ als Steigerung an.

Anders als bei den Laufbandstudien zeichnete sich bei der Abnahmestelle sowie den Abnahmezeitpunkten bei den Fahrradergometerstudien ein kongruenteres Bild ab. Durch Katheterlegung gewonnenes venöses Blut (Zhou et al., 1997) sowie die Vollblutentnahme am Finger (Morton et al., 2012) stellten diesbezüglich die Ausnahme dar. Die restlichen Studien verwendeten kapillares Blut für ihre Analysen. Amann et al. (2006) sowie Ploszczyca et al. (2020) entnahmen dieses am Finger, sonst überwiegen Abnahmen am Ohrläppchen. Einzig Czuba et al. (2009) gaben keine genaue Information zur Entnahmestelle.

Da die Trittfrequenz einen Einfluss auf die Höhe der metabolischen Schwellen haben kann (Woolford et al., 1999), wurden die Instruktionen der Studienleiter*innen auch diesbezüglich erfasst. Amann et al. (2004) gaben einen recht breiten Rahmen von 70-120 U/Min vor, konträr dazu mussten die Probanden der Studien von Pallares et al. (2016) sowie Ploszczyca et al. (2020) ihre Kadenz zwischen 80 und 85 U/min respektive 75 und 85 U/min halten. Probanden von Van Schuylenbergh et al. (2004) sowie Morton et al. (2012) konnten frei wählen, die restlichen Studien machten diesbezüglich keine Angaben.

Da das Fahrradergometer sowie das Laufband oft nicht ausreichend sind, um spezifische Muskelgruppen anderer Sportarten zu repräsentieren, haben sich mit der Zeit Alternativen für Stufenleistungstests entwickelt (Hofmann et al., 2017). Spezielle Laufbandgrößen von 2,5 x 3,5 m wurden dabei für Langlaufen angewandt (Jakobsson et al., 2019). Die Inline-

Skater*innen der Studie von Hecksteden et al. (2015) fuhren auf einer 300 m langen Asphaltbahn. Während Jakobsson et al. (2019) neben einer Stufendauer von 5 min und 5 bis 6 Stufen keine Intensitätsangaben machten, starteten die Inlineskater*innen mit einer akustisch gesteuerten Geschwindigkeit von 24 km/h, der alle 3 Minuten eine Erhöhung von 2 km/h folgte (Hecksteden et al., 2015).

Die Blutabnahme erfolgte einmal am Ohr (Hecksteden et al., 2015), bei Jakobsson et al. (2019) am Finger. Die Entnahme des kapillaren Blutes bedingte zwischen jeder Stufe eine Pause von einer Minute.

4.4 Reliabilität

Tab. 6: Ergebnisse Reliabilität

Autor et al. (Jahr)	Population	Zeit	Parameter	Resultate	Ergebnisse			
	Anzahl (n), Geschlecht Alter (J) Mittelwert ± SD	Körpergröße (cm) Mittelwert ± SD	Körpergewicht (kg) Mittelwert ± SD	Ausgeübte Sportart + VO ₂ - _{max}	Messzeit- punkte, Abstand zwischen Messungen	Untersuchte Laktat- parameter	Korrelations- koeffizient (r) Variations- koeffizient (CV %)	Hauptergebnisse der Studie
Cerezuela- Espejo et al. (2018)	22, M 25,9 ± 8,0	174,8 ± 5,8	68,2 ± 6,1	Läufer & Triathleten, 68,6 ± 4,2 ml/min/kg	2, 2 Tage	D _{max} LT LT +1,5	0,98 ^b / 2,12 % 0,96 ^b / 1,99 % 0,94 ^b / 3,08 %	1 min Protokoll mit individualisierter Startintensität hoch reliabel.
Coen et al. (2001)	20, M 28,0 ± 6,0 5, W 25,0 ± 3,0	180,0 ± 5,0 166,0 ± 4,0	72,0 ± 6,0 53,0 ± 3,0	Läufer- & Triathlet*innen n.a.	2, 4 Tage	IAT Stegmann	0,98 ^d / 1,10 %	IAT nach Stegmann hoch reliabel & resistent gegen GXT-Änderungen.
Dickhuth et al. (1999)	11, M 25,4 ± 4,2	182,8 ± 6,0	74,7 ± 7,5	Gesunde, 56,8 ± 9,1 ml/min/kg	2, 7 Tage	IAT Dickhuth LT	0,97 ^a / 2,63 % 0,90 ^a / 5,29 %	IAT nach Dickhuth reliabler als LTP1, besser trainierte zeigen weniger Abweichung zwischen beiden Versuchen.

Heuberger et al. (2018)	24, M 33,8 ± n.a.	186,0 ± 6,7	76,9 ± 8,9	Radsportler, 56,0 ± 4,1 ml/min/kg	5, 14 Tage	LT IAT Dickhuth D _{max} D _{mod}	0,91 ^c / 5,70 % 0,97 ^c / 3,60 % 0,96 ^c / 3,40 % 0,96 ^c / 3,60 %	D _{max} , D _{mod} und IAT nach Dickhuth hoch reliabel
Hoefelmann et al. (2015)	28, M 30,2 ± 10,1	177,3 ± 4,7	72,0 ± 7,4	Radsportler, 64,0 ± 6,5 ml/min/kg	2, 7 Tage	ILT Berg (BL +1,5 mmol /L)	0,94 ^b / 2,88 %	Hohe Reliabilität von BL + 1,5 mmol/L bei Radsportlern.
McLellan et al. (1993)	11, M 25,7 ± 4,1	177,0 ± 5,0	71,5 ± 8,2	Radsportler, 57,8 ± 6,9 ml/min/kg	2, 5 Tage	IAT Stegmann	0,98 ^a / 2,51 %	Protokoll liefert reliable Einschätzung des IAT nach Stegmann.
Morton et al. (2012)	11, M 26,6 ± 4,9	178,5 ± 8,0	n.a.	Gesunde, n.a.	6, 2-4 Tage	D _{max} Visueller LT	0,90 ^b / 3,80% 0,65 ^b / 51,60 %	Von 7 untersuchten Parametern nur D _{max} reproduzierbar.
Pallares et al. (2016)	14, M 26,7 ± 8,2	173,7 ± 4,2	70,3 ± 4,9	Radsportler, 62,1 ± 4,6 ml/min/kg	2, 2-5 Tage	LT LT + 1,5 D _{max}	0,85 ^b / 3,70 % 0,88 ^b / 3,40 % 0,57 ^b / 10,30 %	LT & LT +1,5 hoch reliabel, D _{max} unrelibelste Methode.
Pfizinger et al. (1998)	12, M 29,2 ± 7,0	179,8 ± 6,4	70,2 ± 6,1	Läufer & Triathleten, 64,5 ± 5,1 ml/min/kg	3, 2 Tage	BL + 1,0 Visueller LT	0,97 ^b / 1,60 % 0,99 ^b / 1,30 %	Baseline + 1 mmol / L und Knickpunkt beide hoch reliabel.

Weltman et al. (1990)	11, M 25,7 ± 4,1	177,0 ± 5,0	71,5 ± 8,2	Läufer, 70,8 ± 6,2 ml/min/kg	2, >7 Tage	LT	0,89 ^a / 3,00 %	LT hoch reliabel bei kontinuierlichem 3 min Laufprotokoll
Zhou et al. (1997)	10, M 27,2 ± 8,2	175,2 ± 7,5	69,1 ± 8,3	Radsportler & Triathleten, 64,0 ± 1,7 ml/min/kg	2, 28 Tage	D _{max}	0,90 ^b / 3,19 %	D _{max} immer feststellbar und hoch reliabel.

^a Pearson Produktkorrelationskoeffizient, ^b Intraklassen Korrelationskoeffizient, ^c cronbach alpha, ^d Koeffizient unbekannt

Cerezuela-Espejo et al. (2018) untersuchten die Reliabilität von 8 Laktatparametern, wovon mit der LT, LT + 1,5 sowie D_{max} drei in diesen Review aufgenommen wurden. Insgesamt 22 Laufsportler und Triathleten absolvierten zwei durch 48 h getrennte individualisierte GXT. Die Autoren attestieren dem Protokoll mit MAS-13km/h Startgeschwindigkeit eine hohe Reliabilität für die Parameter LT ($r = 0,98$; $CV = 1,99\%$), LT +1,5 ($r = 0,96$; $CV = 3,08\%$) sowie D_{max} ($r = 0,94$; $CV = 2,12\%$)

Die durch maximal 4 Tage getrennten Stufenleistungstest wurden von Coen et al. (2001) auf einer 162,5 m langen Hallenlaufbahn abgehalten. Die 25 Proband*innen ($m = 20$, $w = 5$) absolvierten den Reliabilitätsteil der Studie. Die Laufgeschwindigkeit am IAT nach Stegman ergab im Retest den identen Wert, während Herzfrequenz und Laktatkonzentration im Vergleich zum Eingangstest deutlich geringer ausfielen. Die Ermittlung des IAT ist nach Coen et al. (2001) hoch objektiv, reliabel und resistent gegen Vorbelastung, Verlängerung der Stufendauer auf 5 Minuten sowie einen geringeren Grad der Ausbelastung. Einzig die Verringerung des Inkrements auf 1 anstelle von 2 km/h führe zu einer erhöhten Geschwindigkeit am IAT (Coen et al., 2001).

Ein zu Coen et al. (2001) sehr ähnliches Stufenprotokoll wandten Dickhuth et al. (1999) an. 11 Probanden führten jenes, im Abstand von 7 Tagen, zwei Mal am Laufband aus. Die Geschwindigkeit am IAT nach Dickhuth war hoch reliabel ($ICC r = 0,97$; $CV = 2,63\%$). Eine interessante Erkenntnis war hierbei, dass Probanden*innen mit höherer Leistungskapazität weniger Abweichung zwischen den Tests zeigten (Dickhuth et al., 1999). Die Reliabilität am LT ($ICC = 0,90$; $CV = 5,29\%$) wurde ebenfalls überprüft und wies eine geringere Reproduzierbarkeit als der IAT auf (Dickhuth et al., 1999).

Mit 5 Stufenleistungstests innerhalb von mindestens 8 Wochen stellte die Studie von Heuburger et al. (2018) den größten Zeitaufwand für die 24 inkludierten Probanden dar. Die Parameter LT1, IAT nach Dickhuth, D_{max} sowie D_{mod} wurden am Fahrradergometer auf ihre Reproduzierbarkeit überprüft. Der LT1 war hierbei durch den höchsten Variationskoeffizienten ($CV = 5,70\%$) gekennzeichnet. D_{mod} ($CV = 4,3\%$) und der IAT nach Dickhuth ($CV = 3,6\%$) schienen nach 5 Stufenleistungstests reliabler als der LT1 zu sein. Der reproduzierbarste aller inkludierten Marker war jedoch D_{max} ($CV = 3,4\%$). Dieser lag, gemittelt über alle 109 GXTs, interessanterweise unterhalb des LT1 (280 W vs. 282 W).

Der von Hoefelmann et al. (2015) "Individual Lactate Turnpoint - ILT" bezeichnete Punkt ergibt sich durch die Addition von 1,5 mmol/L zur geringsten Blutlaktatkonzentration. Die Leistung an diesem Punkt ist bei 28 ausdauertrainierten Radsportlern zwischen den beiden

Stufenleistungstests nahezu ident und hoch reliabel (ICC $r=0,94$; CV = 2,8%) (Hoefelmann et al., 2015). Die Laktatkonzentration war im 2. Durchgang jedoch signifikant höher.

Die Überprüfung der Reliabilität des IAT nach Stegman war Ziel der Studie von McLellan et al. (1993). Das Protokoll sah zwei maximale Stufenleistungstests mit aktiver Erholung bei 60 Watt am Fahrradergometer vor. Dies liefert nach McLellan et al. (1993) eine reliable Einschätzung des IAT (ICC $r=0,98$; CV = 2,51 %). Bei der Ermittlung des IAT gab darüber hinaus keine Unterschiede zwischen kapillarem Ohrläppchen- und venösem Handblut.

Die Tatsache, dass viele Reliabilitätsstudien zumeist nur mit 2 Messzeitpunkten arbeiten, veranlasste Morton et al. (2012) zur Messung der Reproduzierbarkeit von Leistung bei 7 Laktatparametern unter ernährungs-, vorbelastungs- sowie tageszeitstandardisierten Rahmenbedingungen bis zu 7x pro Proband. 2 dieser Parameter, D_{max} sowie die visuelle Turnpoint-Inspektion, waren für diesen Review relevant. Abgesehen von D_{max} (ICC $r=0,90$; CV = 3,8 %) zeigten alle gemessenen Parameter zum Teil enorme Variabilität (Morton et al., 2012). Allen voran ist die visuelle Inspektion, die den Punkt, bei dem die Blutlaktatkonzentration monoton mit steigender Leistung wächst, demnach höchst fehleranfällig (ICC $r=0,65$; CV = 51,6%)

Pallares et al. (2016) erfassten gesamt 14 ventilations- und laktatbasierte Parameter bei trainierten Radsportlern. Zwei idente GXT, getrennt durch 2 bis 5 Tage, sollten u.a. Aufschluss über die Reliabilität von D_{max} , LT sowie LT +1,5 geben. Während LT (höchste Leistung ohne Anstieg der BLK über Baseline) sowie LT +1,5 intraindividuell hoch reliabel waren, raten Pallares et al. (2016) aufgrund des mit 10,3% höchsten Variationskoeffizienten aller untersuchten Methoden von der Verwendung der D_{max} -Methode ab, wenn andere Indizes verfügbar sind.

Die Reliabilität von Laktat-Schwellenmessungen sowie die Anzahl benötigter Durchgänge, um ein gewisses Level an Reliabilität zu erreichen, waren Forschungsziel von Pfitzinger et al. (1998). Das Protokoll am Laufband sorgte für hoch reliable Ergebnisse für BL + 1mmol/L (ICC $r=0,97$; CV = 1,60 %) sowie die durch 3 Forscher unabhängig festgestellte visuelle Schwellenbestimmung (ICC $r=0,99$; CV = 1,30 %). Einzig der Parameter 1 mmol/L über Ausgangswert sorgte für streuende Ergebnisse. Aufgrund der Variabilität der Ruhelaktatwerte wird daher vom Gebrauch dieses Parameters abgeraten (Pfitzinger et al., 1998).

Die älteste der inkludierten Studien stammt von Weltman et al. (1990). Als wenig Information bezüglich der Reliabilität des LT (höchste Geschwindigkeit ohne Anstieg der

BLK über dem Ausgangswert) vorhanden war, absolvierten 15 männliche Läufer zwei durch mindestens 7 Tage getrennte, kontinuierliche Stufenleistungstests am Laufband. Zur Ermittlung der Reliabilität des 3-min Protokolls wurden neben dem LT noch drei fixe Blutlaktatkonzentrationen herangezogen. Diese erzielten durchwegs höhere Korrelationskoeffizienten, die Reliabilität des LT (ICC $r = 0,89$; CV = 3,00%) fiel jedoch ebenfalls hoch aus.

Mit 4 Wochen lag die Zeit zwischen den beiden Stufenleistungstests am Fahrradergometer bei Zhou et al. (1997) deutlich über den anderen Studien. 10 trainierte männliche Radsportler und Triathleten dienten als Probandenkollektiv. Anders als bei den übrigen Studien wurde der Punkt, bei dem D_{max} auftritt nicht in Geschwindigkeit, sondern in Belastungszeit angegeben. Die Leistung kann jedoch anhand der Dauer zur Erreichung der Schwelle abgeleitet werden (Hopkins et al., 2001). Die Reliabilität der D_{max} -Methode fiel hoch aus (ICC $r = 0,90$; CV = 3,19%), jene der fixen 4mmol/L Schwelle deutlich geringer (Zhou et al., 1997).

4.5 Validität

Studien, die die Validität eines Laktatparameters messen, bestehen aus mehreren Phasen. Während ein Stufenleistungstest für die Ermittlung der gewählten Schwelle unabdingbar ist, bedarf es in weiterer Folge, den Marker mit der Leistung in einem bestimmten Test zu vergleichen. Diese Tests können sich entweder als simulierte Wettkämpfe (Heuberger et al., 2018) oder als maximale Leistung in einem Dauertest darstellen. Tests im Labor haben hierbei jedoch den Vorteil der Standardisierung und sind daher als aussagekräftiger einzuschätzen (Faude et al., 2009). Über die Jahrzehnte haben sich in der Trainingswissenschaft zudem auch Marker entwickelt, denen ein leistungsprädiktiver Charakter nachgesagt wird. Eben diese Parameter können daher zur Validierung herangezogen werden. Der mit Abstand am häufigsten eingesetzte "Vergleichsmarker" ist hierbei der MLSS, welcher jedoch in letzter Zeit in Kritik geraten ist, da er die maximale Homöostase zu unterschätzen scheint (Jones et al., 2019).

4.5.1 MLSS

Tab. 7: Ergebnisse Validität – MLSS

Autor et al. (Jahr)	Population	MLSS	Parameter	Resultate	Ergebnisse			
	Anzahl (n), Geschlecht und Alter (J) Mittelwert ± SD	Körpergröße (cm) Mittelwert ± SD	Körpergewicht (kg) Mittelwert ± SD	Proband*innen, Ausgeübte Sportart + VO _{2max}	Anzahl GXT, Anzahl und Abstand der MLSS- Durchgänge	Vergleichs- parameter	r / Differenz zu MLSS	Hauptergebnisse der Studie
Cerezuela- Espejo et al. (2018)	19, M 25,9 ± 8,0	174,8 ± 5,8	68,2 ± 6,1	Läufer & Triathleten, 68,6 ± 4,2 ml/min/kg	2 GXT 2-3 MLSS 2 Tage	D _{max} LT LT +1,5	0,94 ^b / + 0,6 ± 0,8 km/h 0,82 ^b / - 1,8 ± 1,3 km/h 0,85 ^b / + 0,8 ± 1,2 km/h	LT + 1,0 mmol / L schätzt MLSS im Laufsport am besten ein.
Czuba et al. (2009)	10, M n.a.	183,5 ± 4,4	73,2 ± 4,1	Radsportler, M = 69,6 ± 6,2 ml/min/kg	1 GXT 2-3 MLSS 2 Tage	D _{max}	0,97 ^c / - 4 W	D _{max} kann das MLSS im Radsport sehr gut einschätzen.
	10, W n.a.	167,0 ± 5,7	56,0 ± 4,8	W = 57,8 ± 4,0 ml/min/kg				
Hauser et al. (2014)	57, M 25,2 ± 4,5	179,4 ± 6,7	74,6 ± 7,4	Gesunde, 59,2 ± 7,8 ml/min/kg	1 GXT 2-8 MLSS 2 Tage	IAT Stegmann IAT Dickhtuth	0,83 ^d / + 12,4 ± 24,6 W 0,88 ^d / - 37,4 ± 26,4 W	Keine der Methoden kann das MLSS gut einschätzen, große interindividuelle Unterschiede.

Hecksteden et al. (2016)	12, M; 4, W ^a 30,0 ± 10,0	177,0 ± 7,0	70,0 ± 8,0	Inline-skater*innen, n.a.	1 GXT 2-5 MLSS 2 Tage	IAT Stegmann	0,86 ^d / - 0,3 ± 1,3 km/h	IAT nach Stegmann kann das MLSS relativ gut einschätzen, große interindividuelle Unterschiede.
Jakobsson et al. (2019)	6, M 28,7 ± 0,1 2, W 24,5 ± 0,5	181,0 ± 6,9 174,0 ± 4,0	76,3 ± 4,7 66,7 ± 3,0	Langläufer*innen, n.a.	1 GXT 4-5 MLSS 2 Tage	IAT Simon (45°)	0,95 ^d / -0,3 ± 1,3 km/h	IAT nach Simon unterschätzt das MLSS im Langlaufsport knapp, große interindividuelle Unterschiede.
McLellan et al. (1993)	11, M 25,7 ± 4,1	177,0 ± 5,0	71,5 ± 8,2	Radsportler, 57,8 ± 6,9 ml/min/kg	2 GXT 3 MLSS 5 Tage	IAT Stegmann	n.a.	IAT nach Stegmann schätzt das MLSS im Radsport für die meisten Proband*innen gut ein, führt aber oft zu Überschätzungen.
Pallares et al. (2016)	14, M 26,7 ± 8,2	173,7 ± 4,2	70,3 ± 4,9	Radsportler, 62,1 ± 4,6 ml/min/kg	2 GXT 3-5 MLSS 2-5 Tage	LT LT + 1,5 D _{max}	0,76 ^b / - 41,6 ± 22,4 W 0,81 ^b / + 32,1 ± 22,0 W 0,56 ^b / + 1,8 ± 38,1 W	LT + 0,5 mmol/L schätzt MLSS im Radsport am besten ein, große interindividuelle Unterschiede bei D _{max} .
Płoszczyca et al. (2020)	14, M 25,9 ± 3,2	181,7 ± 4,4	72,3 ± 5,3	Radsportler, 71,3 ± 3,5 ml/min/kg	1 GXT 2-3 MLSS 2 Tage	D _{max} D _{mod} IAT Stegman	0,93 ^c / - 1,7 ± 3,9 W 0,80 ^c / + 31,7 ± 18,5 W 0,93 ^c / - 4,3 ± 7,9 W	D _{max} schätzt MLSS mit geringen interindividuelle Abweichungen am besten ein.

Urhausen et al. (1993)	16, M 24,6 ± 5,6	182,0 ± 7,0	74,2 ± 7,9	Radsportler, Triathleten & Ruderer. 60,2 ± 5,0 ml/min/kg	1 GXT 5 MLSS > 5 Tage	IAT Stegmann	n.a.	IAT nach Stegmann schätzt MLSS gut ein.
Urhausen et al. (1993)	14, M 28,0 ± 5,1	179,0 ± 8,0	67,7 ± 7,9	Läufer & Triathleten, 64,9 ± 3,8 ml/min/kg	1 GXT 5 MLSS > 5 Tage	IAT Stegmann	n.a.	IAT nach Stegmann schätzt MLSS gut ein.
Van Schuylenbergh et al. (2004)	21, M 21,0 ± 0,4	183,0 ± 1,0	70,8 ± 1,4	Radsportler, 75,4 ± 1,9 ml/min/kg	1 GXT 2-3 MLSS 3 Tage	D _{mod}	0,89 ^d / - 23,0 ± n.a. W	D _{mod} unterschätzt das MLSS um 7%, MLSS kann nicht anhand eines Stufenleistungstest erfasst werden.

^a Werte gemittelt für beide Geschlechter angegeben; ^b ICC Intraklassen Korrelationskoeffizient; ^c Spearman Rangkorrelationskoeffizient; ^d Pearson Produktkorrelationskoeffizient.

Die Abgleichgenauigkeit zwischen ventilations- sowie laktatbezogenen Leistungsparametern im Laufsport war eines der Hauptziele von Cerezuela-Espejo et al. (2018). Die drei inkludierten Marker LT, LT+1,5 sowie D_{max} wurden jedoch zusätzlich mit dem MLSS verglichen. Während der LT den MLSS deutlich unterschätzt (1,8 km/h), liegen LT +1,5 sowie D_{max} (0,8 km/h bzw. 0,6 km/h) knapp über der Laufgeschwindigkeit, die theoretisch über einen längeren Zeitraum ohne exponentielle Laktatakkumulation im Blut aufrechterhalten werden kann. Mit dem MLSS dürfte demnach eine Intensität von LT +1,0 den größten Zusammenhang haben ($r = 0,74$)

20 trainierte Radsportler*innen ($m = 10$, $w = 10$) bildeten das Kollektiv der Studie von Czuba et al. (2009). Nach einem Stufenleistungstest folgten mehrere 30 min konstante Belastungen. Der jeweils erste Durchgang startete mit jener Intensität, die nach Methodik von Cheng et al. (1992) als D_{max} ermittelt wurde. Stieg die BLK in den letzten 20 Minuten um weniger als 1 mmol/L, wurde die Intensität im 48 h darauffolgenden Durchgang um 15 W für Frauen sowie 20 W für Männer erhöht. Die gefundenen Resultate indizieren einen nahezu kompletten Zusammenhang ($r = 0,97$) von Leistung an der D_{max} -Schwelle sowie am MLSS (Czuba et al., 2009). Weiters korrelierten Leistung am MLSS sowie Maximalleistung im Stufenleistungstest ($r = 0,96$) wodurch Czuba et al. (2009) das MLSS als "exzellenten" Marker aerober Fitness bezeichneten.

LT +1,5 (Abbildung 9) sowie der IAT nach Stegmann (Abbildung 10) wurden bei 57 männlichen Probanden am Fahrradergometer von Hauser et al. (2014) mit dem MLSS verglichen. Die Anzahl der für die Ermittlung des MLSS notwendigen 30-min-Durchgänge streute mit zwei bis acht im Vergleich zu anderen Studien stark. Während der IAT (236 ± 47 W), dessen Ermittlung bei 6 Probanden durch den schnellen BLK-Abfall nach Belastungsabbruch nicht möglich war, das MLSS (221 ± 43 W) knapp überschätzte ($p = 0,04$), lag LT +1,5 mmol/L deutlich darunter (184 ± 54 W; $p = 0,001$). Die geringen Mittelwertsunterschiede sowie die sehr hohen Korrelationskoeffizienten stehen den teils enormen individuellen Abweichungen, die Hauser et al. (2014) anhand von Bland-Altman-Plots veranschaulichten, gegenüber. Eben jene individuellen Differenzunterschiede, im konkreten Falle von LT +1,5, wo 10 Probanden ihre Schwelle innerhalb von 10 W um den MLSS hatten, während 5 andere mehr als 80 W entfernt lagen, veranlassten Hauser et al. (2014), weder den IAT noch LT +1,5 als valide Methoden zur Ermittlung des MLSS zu bezeichnen. Als Grund für die Abweichungen wurde unter anderem die vom Originalprotokoll (Stegmann et al., 1981) abweichende Inkrementhöhe des GXT genannt (Hauser et al., 2014).

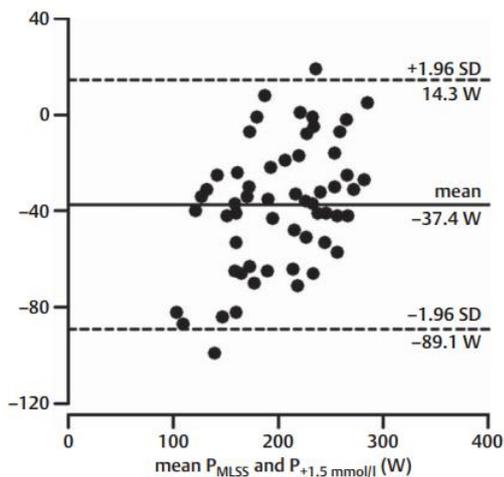


Abb. 9: Streuung von LT +1,5 (Hauser et al., 2014)

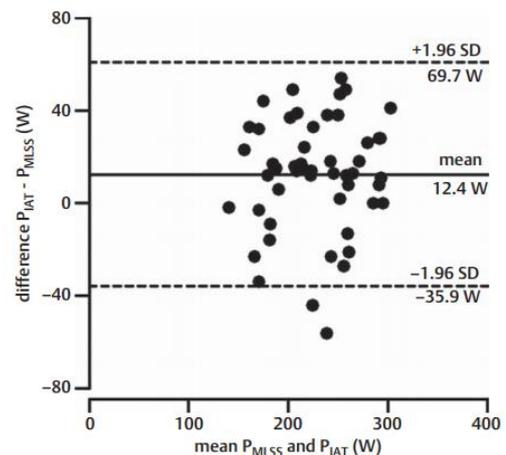


Abb. 10: Streuung von IAT nach Stegmann (Hauser et al., 2014)

Die einzige Studie mit Inlineskater*innen ($m = 12$, $w = 4$) stammt von Hecksteden et al. (2015). Der IAT nach Stegmann diente als Laktatparameter, die Ermittlung erfolgte durch Stufendauern von 3 min analog zum Original (Stegmann et al., 1981). Die Geschwindigkeit war am IAT nur unwesentlich unter jener am MLSS (29,2 km/h bzw. 29,5 km/h). Der Korrelationskoeffizient nach Pearson fiel ebenfalls hoch aus ($r = 0,86$). Die individuelle Variabilität in den Höhen der Differenzen zeigte sich jedoch im Bland-Altman-Plot. 5 Proband*innen bewegten sich hierbei außerhalb des von den Autor*innen definierten Bereiches der disziplinspezifischen Relevanz von 1 km/h (Hecksteden et al., 2015).

Bei der Skilanglauftechnik "Doppelschub" wird der Vorschub ausschließlich vom Oberkörper generiert, die Beinmuskulatur dient der Stabilität (Jakobsson et al., 2019). Das Messen des MLSS bei dieser Spezialtechnik sowie der Abgleich jener mit dem IAT waren die beiden Ziele der Studie von Jakobsson et al. (2019). Die Methode nach Simon, die den IAT als 45° Tangente zur Blutlaktatkurve definiert, wurde als Parameter gewählt. Das sehr kleine Kollektiv von 6 (in den Ergebnissen 8) männlichen Skilangläufern sorgte für geringere Geschwindigkeiten am IAT (20,6 km/h) im Vergleich zu jener am MLSS (21,4 km/h). Die BLK am MLSS lag mit 6,7 mmol/L sehr hoch, die Geschwindigkeit an der ebenfalls untersuchten fixen 4 mmol/L-Schwelle lag dementsprechend deutlich darunter. Die sehr starke Korrelation ($r = 0,95$) zwischen Geschwindigkeit am MLSS und am IAT wurde von Jakobsson et al. (2019) kritisch betrachtet, die Unterschätzung durch den IAT sei zu groß, um sich bloß auf Korrelationskoeffizienten zu verlassen (Jakobsson et al., 2019).

Der IAT nach Stegmann war der gewählte Laktatparameter bei der Fahrradergometerstudie von McLellan et al. (1993). Obgleich der Begriff MLSS nicht Teil dieser Studie war, bestand die Forschungshypothese darin: Wenn die IAT tatsächlich eine Schwelle repräsentieren sollte, sollten die 11 männlichen Probanden an der IAT ein Laktatgleichgewicht halten, während bei Intensitäten knapp darüber (+5% $\dot{V}O_2$) kein Steady-State eintreten würde (McLellan et al, 1993). Die durchschnittliche Leistung der durch zwei Stufenleistungstests ermittelten IAT galt es für 45 Minuten, ohne Erreichen einer Rektaltemperatur von 39° C, durchzuhalten. Nur 4 der 11 Probanden schafften zumindest 30 Minuten an der IAT. Die folgenden beiden Durchgänge wurden individualisiert mit Intensitäten $\pm 5\% \dot{V}O_2$ (1.) sowie $\pm 2,5$ bzw. 7,5 % (2.) $\dot{V}O_2$ unter sowie über dem IAT durchgeführt, bis jeder Proband sein persönliches Steady-State erreichte. 8 der 11 Probanden hatten ihren MLSS innerhalb von 2,5% $\dot{V}O_2$ um den IAT. 2 Probanden jedoch erreichten nicht einmal im 3. Durchgang, bei IAT -7,5% $\dot{V}O_2$, ihr Steady State. McLellan et al. (1993) resümieren daher, dass die IAT in den meisten Fällen eine valide Einschätzung des MLSS erlaubt, in gut 15% aller Fälle ist die Differenz zwischen IAT und MLSS jedoch inakzeptabel.

Die aktuellste der inkludierten Studien stammt von Płoszczyca et al. (2020). Zwölf professionelle männliche Radsportler absolvierten einen 3-min-Stufenleistungstest sowie mehrere MLSS - Ermittlungsdurchgänge. Drei der sechs angewandten Schwellenmethoden (D_{max} , D_{mod} & IAT nach Stegmann) wurden inkludiert. D_{max} unterschätzte das MLSS hierbei um lediglich 1,7 W und zeigte eine sehr starke Korrelation ($r = 0,93$). Ähnlich valide Ergebnisse lieferte die IAT, mit einer Unterschätzung von 4,3 W und einer ebenfalls sehr starken Korrelation. Ähnlich wie bei vorigen Studien konnte die IAT jedoch nur bei 7 von 12, und damit nur bei etwas mehr als der Hälfte des Kollektivs, ermittelt werden. D_{mod} überschätzte den MLSS um 31,7 W und kann laut den Autor*innen daher das MLSS nicht richtig einschätzen.

Das Eintreten eines Steady States um die IAT nach Stegman wurde von Urhausen et al. (1993) sowohl bei 16 männlichen Radsportlern als auch bei 14 männlichen Laufsportlern und Triathleten untersucht. Nach jeweils einem Stufenleistungstest wurden vier 30-minütige Dauerbelastungen bei 85, 95, 100 sowie 105% des IAT absolviert. Keiner der 16 Radsportler musste die Belastungen bei 85-100 % IAT vorzeitig abbrechen, bei lediglich einem stellte sich kein Steady-State ein. Während 105% des IAT gab es zwei vorzeitige Abbrüche, während sich mit neun Athleten bei mehr als der Hälfte auch in dieser Stufe ein Laktat-Gleichgewicht einstellte. Ein sehr ähnliches Bild bot sich bei den Laufsportlern und Triathleten. Anders als die Radsportler mussten diese zwar 45-minütige Dauerbelastungen

absolvieren, trotzdem musste nur ein Proband vorzeitig bei 100% IAT abbrechen, bei zwei Probanden stellte sich kein Steady-State ein. Während des 105%-IAT-Durchgangs gab es fünf vorzeitige Belastungsabbrüche, dennoch stellte sich bei sechs Probanden auch in dieser Stufe ein Gleichgewicht ein. Die IAT erlaubt damit eine valide Einschätzung des MLSS, auch wenn diese nicht exakt die Intensität darstellt, die von allen Probanden ohne exzessive Akkumulation von Laktat im Blut aufrechterhalten werden kann.

21 männliche Profiradsportler absolvierten bei Van Schuylenbergh et al. (2004) Stufendauern von 6 min für die Ermittlung eines adaptierten D_{max} . Der Startpunkt der Geraden bei der niedrigsten Blutlaktatkonzentration entspricht einer Mischform aus D_{max} und D_{mod} . Das MLSS wurde innerhalb von 2 - 3 Durchgängen eruiert. Im Vergleich mit dem MLSS lagen die Schwellenwerte im Schnitt um 7% niedriger (309 ± 6 W bzw. 286 ± 6 W). Die Korrelation der Werte fiel stark aus ($r^2 = 0,72$), die Leistung am MLSS kann dennoch nicht durch einen einzigen 35-40-min-GXT ermittelt werden. 11 der Probanden absolvierten zusätzlich ein GXT-Protokoll mit einer Stufendauer von 30 s und geringeren Inkrementen. Die Vorhersage des MLSS schien bei den kurzen Stufen ungenauer auszufallen, trotz hoher Korrelationswerten resümieren Van Schuylenbergh et al. (2004), dass die Ermittlung nicht präzise genug ausfiel, um daraus valide Trainingsangaben ableiten zu können.

4.5.2 Leistung

Tab. 8: Ergebnisse Validität – Leistung

Autor et al. (Jahr)	Population		Körpergröße (cm)	Körpergewicht (kg)	Proband*innen, Ausgeübte Sportart + VO ₂ max	Distanz Sportart, Länge / Dauer der Vergleichs- Distanz	Parameter Vergleichs- parameter	Resultate r / Differenz zu Distanzleistung Mittelwert ± SD	Ergebnisse Hauptergebnisse der Studie
Amann et al. (2004)	15, 31,5 ± 8,5	M	175,1 ± 5,2	70,2 ± 8,2	Radsportler, 68,6 ± 4,2 ml/min/kg	R ^a , 40 km	IAT Stegmann	0,52 ^d / - 14 ± n.a. W	IAT-Parameter ungeeignet für die Prognose von Wettkampfleistungen.
Bentley et al. (2001)	9, 32,0 ± 3,0	M	185,5 ± 3,3	77,3 ± 4,8	Radsportler, 62,7 ± 4,8 ml/min/kg	R, 20 min R, 90 min	D _{max} D _{max}	0,45 ^d / - 42 ± n.a.. W 0,77 ^d / - 2 ± n.a. W	
McNaughton et al. (2006)	11, 25,0 ± 5,0	M	180,0 ± 5,0	n.a.	Radsportler, 62,0 ± 8,0 ml/min/kg	R, 30 min R, 30 min	D _{max} ^c 3 min D _{max} 5 min LT 3 min LT 5 min	0,89 ^d / - 21 ± n.a.. W 0,91 ^d / - 27 ± n.a.. W 0,88 ^d / - 54 ± n.a.. W 0,86 ^d / - 63 ± n.a.. W	D _{max} und LT unterschätzen 30 min Zeitfahrleistung im Radsport.
Nicholson et al. (2001)	12, 25,2 ± 8,4	M	179,6 ± 5,3	77,1 ± 7,8	Läufer*innen, M = 59,4 ± 8,0 ml/min/kg	L ^b , 10 km	D _{max}	0,86 ^d / ≤ +0,1 km/h	D _{max} schätzt 10km Laufgeschwindigkeit sehr gut ein, und kann 30-40 min aufrechterhalten werden.
	11, 21,2 ± 4,0	W	165,9 ± 5,9	59,3 ± 5,6	W = 47,6 ± 3,3 ml/min/kg	L, 10 km	LT	0,78 ^d / ≤ - 0,01 km/h	

Papadopoulos et al. (2006)	13,	M	179,8 ± 4,1	70,5 ± 6,3	Läufer, 65,3 ± 3,7 ml/min/kg	L, 10 km	D _{max}	0,84 ^d / +0,2 ± 0,6 km/h	D _{max} sehr gut für 10 km Laufleistung geeignet, nicht jedoch für 21,1 km, große interindividuelle Unterschiede.
	30,9 ± 8,0		L, 21,1 km	D _{max}		0,78 ^d / +1,3 ± 0,8 km/h			
			L, 10 km	LT		0,74 ^d / -1,7 ± 0,9 km/h			
			L, 21,1 km	LT		0,69 ^d / -0,5 ± 1,0 km/h			
Röcker et al. (1998)	339, M		178,3 ± 6,2	69,3 ± 7,2	Läufer*innen, n.a.	L, 1,5 - 42	LT	0,73 ^e < r < 0,81	IAT nach Dickhuth sehr gut für Prognose von Wettkampfleistungen oberhalb von 5 km im Laufsport geeignet.
	32,4 ± 10,0					IAT Dickhuth	0,88 ^e < r < 0,93		
	88, W		164,5 ± 5,1	55,0 ± 6,2		n.a.			
	33,2 ± 10,6								

a: R= Radfahren; b: L=Laufen; c: 2 Protokolle wurden verglichen: 3min Stufen & 5min Stufen; d: Pearson Produktkorrelationskoeffizient, e: Korrelationskoeffizient unbekannt

Sechs der inkludierten Studien verglichen ausgewählte Laktatparameter mit der erbrachten Leistung/Distanz in einer vorgegebenen Zeit sowie der Zeit zur Absolvierung einer bestimmten Distanz.

Amann et al. (2004) verglichen Laktatparameter mit der Leistung in einem 40 km - Zeitfahren. Ein Stufenleistungstest diente zur Ermittlung der Schwellen IAT nach Stegmann und IAT nach Baldari. Die Durchschnittsleistung während des 40 km - Zeitfahrens am Fahrradergometer lag mit 282 ± 25 W sowohl über der IAT nach Stegmann (268 ± 40 W) als auch jener nach Baldari (247 ± 30 W). IAT Stegmann und Leistung auf 40 km korrelierten mittelmäßig ($r = 0,52$), IAT Baldari mäßig stark ($r = 0,72$). Die Fähigkeit, die Leistung bei einem 40 km - Zeitfahren anhand der genannten IAT-Schwellen vorherzusagen, wird von den Autoren daher nur moderat eingeschätzt.

Neun ausdauertrainierte Radsportler absolvierten bei Bentley et al. (2001) neben einem Rampentest zur Ermittlung der $\dot{V}O_{2\max}$ auch einen Stufenleistungstest, um D_{\max} zu bestimmen. Stufenleistungstest sowie 20 min und 90 min Zeitfahren erfolgten in randomisierter Reihenfolge. Die Leistung am D_{\max} (282 ± 24 W) lag dabei sowohl unter der Durchschnittsleistung des 20 min (324 ± 17 W) als auch des 90 min (284 ± 9 W) Zeitfahrens. Während die Leistungen zwischen 20 min und 90 min mäßig stark korrelierten ($r = 0,66$), bestand zwischen 20 min TT und D_{\max} ein mittelmäßiger Zusammenhang ($r = 0,45$). In Verbindung mit dem 90 min TT fiel die Korrelation von D_{\max} mäßig stark ($r = 0,77$) und dadurch deutlich höher aus. Dementsprechend resümieren Bentley et al. (2001), dass D_{\max} als Prädiktor für Leistungen über ein 90 min Zeitfahren, nicht jedoch über ein 20 min Zeitfahren dienen könnte.

Die aus zwei verschiedenen Stufenleistungstests (drei und fünf min Stufendauer) gewonnenen Parameter LTP1 und D_{\max} wurden bei McNaughton et al. (2006) auf ihren Zusammenhang mit einem 30 min Zeitfahren geprüft. Elf männliche Radsportler regionalen bis nationalen Levels leisteten während des 30 min Zeitfahrens im Schnitt 284 ± 42 W. Weder im 3 min Protokoll (230 ± 35 W bzw. 263 ± 44 W) noch im 5 min Protokoll (221 ± 31 W bzw. 257 ± 32 W) kamen die ermittelten Schwellen für LT bzw. D_{\max} nahe an die Zeitfahrleistung heran. Die Korrelationskoeffizienten fielen dennoch für beide Marker, in beiden Protokollen sehr stark aus ($0,86 < r < 0,91$).

Die Laufleistung auf 10 km wurde von Nicholson et al. (2001) mit dem LT1 sowie D_{\max} verglichen. Anders als bei den meisten Studien begannen die 30 Proband*innen ($m = 19$; $w = 11$) mit zwei 10 km Läufen auf einer 400 m Bahn, ehe 3 Wochen nach dem zweiten 10 km Lauf ein Stufenleistungstest am Laufband folgte. Der LT1 wurde hierbei als jene

Laufgeschwindigkeit festgelegt, die 2 aufeinanderfolgende Erhöhungen der BLK um 1 mmol/L zur Folge hatte. D_{max} wurde nach der Methode nach Cheng et al. (1992) definiert. Die Laufgeschwindigkeit über 10 km (11,7 km/h) lag bei den Frauen knapp unterhalb der Schwellen LT (12,1 km/h) sowie D_{max} (11,9 km/h). Konträr dazu lag die 10 km Laufgeschwindigkeit (14,7 km/h) bei den Männern oberhalb jener von LT (14,4 km/h) sowie D_{max} (14,6 km/h). Sehr starke Korrelation ($r = 0,84$) herrschte zwischen 10 km Laufgeschwindigkeit und D_{max} bei den Frauen, mäßig starke ($r = 0,78$) bei den Männern. Mittelmäßig fiel der Zusammenhang im Vergleich mit dem LT ($r = 0,52$) bei den Frauen, mäßig stark ($r = 0,73$) bei den Männern aus. Auf die Gesamtpopulation betrachtet hing damit die D_{max} -Schwelle am stärksten mit der Geschwindigkeit eines 10 km Laufes zusammen ($r = 0,86$), und dürfte demnach eine Intensität beschreiben, die 30 bis 40 min durchgehalten werden kann. Die in dieser Studie angewandte LT1-Methode dürfte hingegen nicht geeignet sein, um akkurate Trainingsvorgaben zu erlauben.

Sieben Laktatparameter, von denen mit dem LT sowie D_{max} zwei in diesen Review inkludiert wurden, verglichen Papadopoulos et al. (2006) bei 13 ausdauertrainierten Läufern mit der Laufleistung über 10 sowie 21,1 km auf dem Laufband. Die Laufgeschwindigkeiten über 10 km ($16,6 \pm 1,1$ km/h) und 21,1 km ($15,5 \pm 1,2$ km/h) lagen innerhalb von 8% der jeweiligen persönlichen Bestzeiten und korrelierten mit allen 7 Laktatparametern zumindest mäßig stark ($r > 0,59$). Die Geschwindigkeit am LT ($14,9 \pm 1,3$ km/h) unterschätzte sowohl jene von 10 km ($-1,7 \pm 0,9$ km/h) als auch von 21 km ($-0,5 \pm 1,0$ km/h). D_{max} ($16,8 \pm 1,1$ km/h) hingegen überschätzte beide, lag jedoch deutlich näher an jener von 10 km ($+0,2 \pm 0,6$ km/h) als an der Laufgeschwindigkeit über einen Halbmarathon ($+1,3 \pm 0,8$ km/h). Auf alle 7 Laktatparameter gerechnet hatten nur 6 bzw. 2 der 13 Probanden die geringste Abweichung der Laufgeschwindigkeit zwischen D_{max} und 10 bzw. 21,1 km. Die größten Korrelationen zeigten sich bei 10 km ($r = 0,84$) und 21,1 km ($r = 0,78$) dennoch bei der von Cheng et al. (1992) präsentierten Schwelle. Keiner der 13 Probanden hatte die geringsten Abweichungen zu den Geschwindigkeiten für beide Laufdistanzen bei derselben Schwelle.

Mit 427 stellte die Studie von Röcker et al. (1998) das mit Abstand größte Proband*innenkollektiv auf. Die Ergebnisse eines Stufenleistungstests am Laufband wurden mit den durch Befragung der Proband*innen ermittelten Bestzeiten auf verschiedenen Laufdistanzen verglichen. Als gewählter Schwellenparameter fungierten der LT als geringstes Äquivalent von Laktatkonzentration zu Leistung sowie der IAT nach Dickhuth. Die Mitteldistanz 1500 m sowie die Langdistanzen 5 km und 10 km, Halbmarathon und Marathon dienten als Vergleichsbasis. Während der LT nur mäßig stark

mit den Laufgeschwindigkeiten von 1500 m bis 21,1 km ($0,73 < r < 0,79$) korrelierte, bestand der größte Zusammenhang mit der Laufgeschwindigkeit der Marathondistanz ($r = 0,81$). Die IAT hingegen korrelierte mit allen Lauflängen signifikant, die Korrelationskoeffizienten stiegen mit jeder Lauflänge, von ($r = 0,88$) über 1500 m auf ($r = 0,93$) über die Marathondistanz. Da LT und IAT gemittelt über beide Geschlechter angegeben wurden und nicht alle Proband*innen Laufzeiten über die jeweiligen Distanzen angeben konnten, hat ein direkter Vergleich der Laufgeschwindigkeiten an dieser Stelle wenig Aussagekraft.

5 Diskussion

5.1 Zusammenfassung Reliabilität

Die vorliegenden Ergebnisse attestieren den meisten Laktatparametern eine hohe Reliabilität. Referenzwerte für „gute“ oder „schlechte“ Reliabilität sind in der Literatur rar, oftmals werden willkürliche Limits gewählt (Atkinson et al., 1998). Hopkins et al. (2001) fassen jedoch zusammen, dass ein möglichst niedriger CV Zeichen einer guten Reliabilität ist.

5.1.1 LT

Die Reproduzierbarkeit des LTP1 wurde von 5 Studien untersucht und mit 1,99 – 5,70 % CV angegeben. 3 Forscher*innengruppen definierten den LTP1 hierbei als höchste Geschwindigkeit / Leistung, die ohne Anstieg der BLK auskam, (Cerezuela-Espejo et al., 2018; Pallarés et al., 2016; Weltman et al., 1990), jeweils eine als niedrigstes Verhältnis von Laktat zu Leistung (Dickhuth et al., 1999) sowie als ersten Punkt, der einen markanten Anstieg der BLK über dem Ruhelevel bedingt (Heuberger et al., 2018). Operativ scheinen diese 3 Methoden nur minimal voneinander abzuweichen, wodurch eine direkte Vergleichbarkeit durchaus zulässig erscheint. Der LTP1 stellt demnach eine reliable Möglichkeit dar, moderate und harte Belastungen voneinander abzugrenzen.

5.1.2 IAT Dickhuth / LT +1,5 mmol

Die IAT nach Dickhuth, als solcher tituiert (Dickhuth et al., 1999; Heuberger et al., 2018), sowie gleichwertig als LT + 1,5 bezeichnet (Cerezuela-Espejo et al., 2018; Pallarés et al., 2016) wurde in allen 4 Untersuchungen in einem sehr engen Rahmen von 2,63 – 3,60 % CV angegeben. Die Wahl von +1,5 mmol entstand empirisch und ist nicht physiologisch begründet (Dickhuth et al., 1999). Dickhuth et al. (1999) fügten weiters an, dass die Reliabilität mit höherer Leistungsfähigkeit steigt. Werden die 1,5 mmol/L nicht zum LTP1 sondern zur niedrigsten BLK hinzugefügt, wurde ebenfalls von niedrigen Variationskoeffizienten von 2,8 % (Hoefelmann et al., 2015) sowie 3,0 % bei einer Addition von 1,0 mmol/L (Pfitzinger et al., 1998) berichtet. Beide Studien standardisierten hierbei jedoch die Ernährung vor allen Tests, was den Einfluss auf den Ruhelaktatwert minimieren sollte. Da Blutlaktatkonzentrationen in Ruhe deutlich stärker als unter Belastung (Pfitzinger

et al, 1998) sowie interindividuell variieren (Binder et al., 2008), würden diese Werte bei nicht-standardisierter Ernährung wohl deutlich stärker streuen.

5.1.3 D_{max}

Aufgrund der Tatsache, dass auf jeder Blutlaktatkurve objektiv eine eindeutige Schwelle gefunden werden kann (Zhou et al., 1997), gehört der Marker D_{max} (Cheng et al., 1992) zu den am häufigsten untersuchten Methoden. 6 der inkludierten Studien schlossen ihn daher in ihre Reliabilitätsanalysen ein. Obwohl der Marker keinerlei physiologische Grundlage hat und demnach ein willkürlicher Punkt der Kurve als Schwelle definiert wird, zeigt ein Großteil der Untersuchungen sehr hohe Reproduzierbarkeiten. Abgesehen von Pallares et al. (2016) wurden Variationskoeffizienten von 2,12 - 3,80 % angegeben. Der größte Kritikpunkt bleibt jedoch die Abhängigkeit von der Höhe des Ausgangs- sowie des Endpunkts (Faude et al., 2009). Zhou et al. (1997) forderten daher eine Standardisierung der Methode, die u.a. von Chalmers et al. (2015) präsentiert wurde. Mithilfe dieser konnten CV-Werte von 1,6 % beobachtet werden. Ungeachtet der tatsächlichen Validität ist der D_{max} damit einer der reliabelsten Marker.

5.1.4 IAT nach Stegmann

Der IAT nach Stegmann wurde von Coen et al. (2001) sowie McLellan et al. (1993) auf seine Reproduzierbarkeit überprüft. Die im Vergleich zu anderen Parametern eher aufwendige Ermittlung der Schwelle geht mit dem niedrigsten aller zusammengefassten Variationskoeffizienten von 1,10% bei Coen et al. (2001), sowie 2,51 % bei McLellan et al. (1993) einher. Urhausen et al. (1993) halten außerdem fest, dass für die Bestimmung der Schwelle zumindest eine BLK von 6 mmol/L gegeben sein muss. Sinkt die BLK in der Nachbelastungsphase zu schnell ab, kann keine Schwelle festgestellt werden. Dies wurde bei 10 % aller Probanden von Hauser et al. (2014) sowie 50% bei Ploszczyca et al. (2020) beobachtet, die jedoch erst 3 min nach Belastungsende die erste Erholungsblutprobe nahmen.

5.1.5 Laktatknickpunkte

Obwohl die Identifikation der LTPs anhand des visuellen Erkennens der Knickpunkte auf der Laktatleistungskurve in Lehrbüchern (Bourdon, 2013; Hofmann et al., 2017) eine weit verbreitete Methode darstellt, spielt sie in den gefundenen Studien eine untergeordnete Rolle. Lediglich 2 Studien involvierten diese Möglichkeit in ihre Untersuchung, wobei die Ergebnisse nicht unterschiedlicher sein könnten. Bei Pfitzinger et al. (1998) war der von 3 unabhängigen Forscher*innen gefundene Knickpunkt mit den höchsten Korrelationskoeffizienten ($r > 0,99$) und niedrigsten Variationskoeffizienten ($CV = 1,3\%$) aller untersuchten Methoden gekennzeichnet, während Morton et al. (2012) für ihren "visual lactate turnpoint" einen CV-Bereich von 15,5 - 167,2 % angaben. Eine Erklärung für diese massiven Unterschiede konnte anhand der Volltextanalyse nicht gefunden werden, die Fähigkeit der auswertenden Personen dürfte jedoch diesbezüglich eine entscheidende Rolle spielen. Dass unterschiedliche Forscher*innen auf derselben Kurve verschiedene Schwellenpunkte definieren, wurde bereits von Gladden et al. (1985) festgestellt. Coen et al. (2001) berichten von bis zu 10 % Unterschied zwischen erfahrenen und unerfahrenen Untersuchern, jedoch wurden auch zwischen Expert*innen Abweichungen in der visuellen Ermittlung des LTP2 beobachtet (Bailly et al., 2014).

4 der inkludierten Studien untersuchten neben der Reliabilität von Laktatparametern auch jene der beiden ventilatorischen Schwellen. Bei Pallarés et al. (2016) waren VT1 und VT2 mit 3,5 sowie 2,1 % CV überwiegend reliabler als die inkludierten LT-Marker (3,4 - 10,3 %), wobei sich die Definition der Ventilationsschwellen anhand mehrerer Kriterien ergab. Ein ähnliches Bild ergab sich bei Cerezuela-Espejo et al. (2018), die für VT1 und VT2 CV-Werte von 2,08 und 1,92% angaben, die inkludierten Laktatparameter lagen mit 1,99 - 3,08 % jedoch nicht weit dahinter. Konträr zu diesen beiden Studien stellten Zhou et al. (1997) fest, dass der D_{max} mit 3,2 % CV reliabler als VT1 (7,8%) sowie VT2 (4,2%) ausfiel. Diese Werte stimmen mit vorherigen Studien überein, wobei der VT1 weniger reproduzierbar zu sein scheint als der VT2 (Weston et al., 2001).

Abgesehen von den beiden negativen Ausreißern befinden sich die gefundenen Werte im selben Bereich, wie sie zuvor von Mann et al. (2013) sowie Hopkins et al. (2001) genannt wurden. Die Reliabilität von $\dot{V}O_{2max}$ -Messungen wurde von Mann et al. (2013) mit 1,9 - 4,7% CV und damit in einem ähnlichen Bereich wie die LT-Marker dieses Reviews angegeben. Einzig Messungen der maximalen Herzfrequenz dürften mit CV-Werten von 1,0 - 3,2 % (Mann et al., 2013) reliabler sein als Laktatmessungen.

Mehr als 85 % der untersuchten Parameter dieser Arbeit bewegten sich im Rahmen von $CV\% = 1,10 - 3,80\%$. Ungeachtet der physiologischen Aussagekraft scheinen die diversen Möglichkeiten der Schwellenfindung demnach hoch reliabel.

Anhand der gewonnenen Ergebnisse auf die allgemeingültige Reliabilität der jeweiligen Parameter zu schließen, ist aufgrund der ihnen zugrundeliegenden Stufenleistungstests nur eingeschränkt möglich. Keine der Studien wies ein exakt gleiches Protokoll auf. Die Gültigkeit ist demnach nur für die jeweils angegebenen Daten zu verstehen. Längere Stufendauern führen tendenziell zu niedrigeren Schwellenwerten (Bourdon et al., 2018; Gavin et al., 2014; Jamnick et al., 2018; McNaughton et al., 2006) (Abbildung 11). So berichten Jamnick et al. (2018) von einem Unterschied von 30 W bei der Ermittlung von D_{max} und D_{mod} bei einem drei- bzw. zehnmütigen Stufenprotokoll. Noch größere Unterschiede wurden von Bourdon et al. (2018) gefunden, der LTP1 dürfte jedoch resistenter gegen variierende Stufendauern sein. Heck et al. (2008) berichten für den IAT nach Stegmann ein inverses Verhalten, scheint die Höhe des Parameters doch mit niedrigerem Belastungsanstieg zu steigen. Resümierend kann festgehalten werden, dass die Stufendauer einen massiven Einfluss auf die erreichte Maximalleistung sowie den LTP2 hat. Der Gefahr des fälschlichen Erkennens eines nicht vorhandenen Trainingseffekts muss man sich demnach stets bewusst sein (Jamnick et al., 2020)

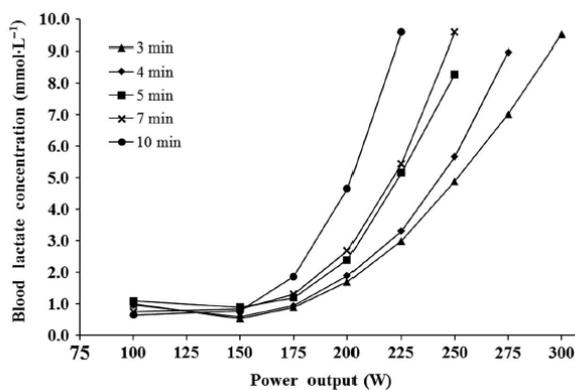


Abb. 11: Auswirkungen unterschiedlicher Stufendauern (Bourdon et al., 2018).

5.2 Zusammenfassung Validität - MLSS

Laktatparameter mit dem MLSS zu vergleichen, stellt nach wie vor einen beliebten Ansatz der Validierung dar. Nachfolgend werden die gängigsten Konzepte kritisch zusammengefasst und mit bereits bestehender Literatur abgeglichen.

5.2.1 LTP1

Im Vergleich mit dem MLSS wurden für den für den LTP1 Korrelationskoeffizienten von $r = 0,82$ (Cerezuela-Espejo et al., 2018) sowie $r = 0,76$ (Pallarés et al., 2016) gefunden. Die relative Übereinstimmung scheint demnach sehr stark und mäßig stark auszufallen, absolut unterschätzt der LTP1 den MLSS jedoch um 1,8 km/h (Cerezuela-Espejo et al., 2018) sowie über 41 W (Pallarés et al., 2016) und ist trotz hoher r-Werte für die Vorhersage des MLSS ungeeignet.

5.2.2 LT +1,5 / IAT Dickhuth

Mit $r = 0,81$ (Pallarés et al., 2016), $r = 0,85$ (Cerezuela-Espejo et al., 2018) sowie $r = 0,88$ (Hauser et al., 2014) wurden zwischen LT +1,5mmol und MLSS ausschließlich sehr starke Korrelationen gefunden. Während Pallarés et al. (2016) und Cerezuela-Espejo et al. (2018) von deutlichen Überschätzungen des LT +1,5mmol gegenüber des MLSS von 32,1 W sowie 0,8 km/h berichten, lag die Schwelle bei Hauser et al. (2014) 37,4 W unter dem MLSS. Ein Grund für diese Mittelwerts-Unterschiede könnten die verschiedenen Definitionen des LT sein, der präsentierte Bland-Altman-Plot von Hauser et al. (2014) offenbarte zudem massive interindividuelle Unterschiede in der Differenz von MLSS und LT +1,5. Hauser et al. (2014) resümieren, dass dieser Marker für die Vorhersage des MLSS ungeeignet ist. Da die Erweiterung des LT mit einer fixen Größe nicht mehr dem Anspruch individueller Diagnostik entspricht sollte der LT +1,5 daher nicht mehr angewandt werden (Hofmann et al., 2017)

5.2.3 D_{max}

4 der inkludierten Studien glichen den Marker D_{max} mit dem MLSS ab. Pallarés et al. (2016) fanden hierbei nur eine mittelmäßige Korrelation ($r = 0,56$), die sonstigen Studien jedoch ausschließlich sehr starke ($0,93 < r < 0,97$). Obwohl dem D_{max} - Konzept kein physiologisch begründetes Fundament zugrunde liegt, koinzidieren die Werte mit dem MLSS.

Unterschätzungen von $1,7 \pm 3,9$ W (Płoszczyca et al., 2020), 3,0 W für Frauen sowie 6,7 W für Männer (Czuba et al., 2009), sowie Überschätzungen von $1,8 \pm 38,1$ W (Pallarés et al., 2016) und $0,6 \pm 0,8$ km/h (Cerezuela-Espejo et al., 2018) fielen deutlich geringer aus als jene anderer Parameter. Czuba et al. (2009) attestieren dem D_{\max} fast perfekte Korrelation mit dem MLSS und die Fähigkeit, diesen genau vorherzusagen, ähnlich resümieren auch Płoszczyca et al. (2020). Der D_{\max} -Marker dürfte in vielen Fällen mit dem MLSS zusammenfallen, niedrige interindividuelle Abweichungen und absolute Übereinstimmungen sprechen in einigen Studien dafür. Ähnliche Ergebnisse wurden bereits von Arratibel-Imaz et al. (2016) und Oliveira et al. (2012) berichtet, während Jamnick et al. (2018), Zwingmann et al. (2019) dem Marker wiederum keine hohe Validität für die Vorhersage des MLSS zusprechen. Die vorliegenden Ergebnisse sind demnach widersprüchlich, durch die hohe Anfälligkeit des D_{\max} auf diverse Adaptionen des Stufenleistungstests sollten die ermittelten Werte daher nie unreflektiert als Stellvertreter des MLSS herangezogen werden.

5.2.4 IAT nach Stegmann

Auch zwischen dem IAT nach Stegmann und dem MLSS waren die inkludierten Korrelationen ausschließlich sehr stark ($0,83 < r < 0,93$). Als „Diffusions-Eliminations-Modell“ (Stegmann et al., 1981) am aktuellen Stand des Wissens über Laktatdynamik orientiert, sollte diese Methode den Autoren nach dem MLSS entsprechen. McLellan et al. (1993) halten jedoch fest, dass 15% aller Untersuchungen mit einer ungültigen Bestimmung des MLSS IAT nach Stegmann einhergehen. Dies dürfte jedoch nicht damit zusammenhängen, ob in der Erholungsphase passive Ruhe wie bei Coen et al. (2001) oder gemäßigte Belastung von 30 W wie bei McLellan et al. (1993) gewählt wird. Am Fahrradergometer wurden Überschätzungen des MLSS von $12,4 \pm 24,6$ W (Hauser et al., 2014) sowie Unterschätzungen von $4,3 \pm 7,9$ W (Płoszczyca et al., 2020) gefunden. Die höheren interindividuellen Abweichungen dürften mit der Leistungsheterogenität des Probandenkollektivs zusammenhängen (Płoszczyca et al., 2020). Keine Korrelationskoeffizienten und absolute Abweichungen wurden von Urhausen et al. (1993) angegeben. Da sich bei 100% des IAT bei 15 von 16 Probanden ein Steady-State einstellte, welches noch bei 9 Probanden auch bei 105% vorhanden war, dürfte der IAT auch hier das MLSS knapp unterschätzen. Mit 12 von 14 bei 100% des IAT sowie 6 bei 105% des IAT wurden am Laufband ähnliche Werte gefunden (Urhausen et al., 1993). Nahezu idente Werte wurden bei Inlineskater*innen zwischen MLSS (29,5 km/h) sowie IAT (29,2 km/h)

von Hecksteden et al. (2015) beobachtet. Da 5 der 16 Proband*innen die *a priori* definierten disziplinspezifisch relevanten Abweichungen von 1 km/h zum Teil deutlich überschritten, war auch hier eine hohe interindividuelle Komponente gegeben. Diese wurde in allen inkludierten Studien beobachtet, dennoch resümierten die Autor*innen damit, dass der IAT nach Stegmann eine akzeptable Einschätzung des MLSS ermöglicht. Dies erfolgt in Übereinstimmung mit vorherigen Studien (Monteiro De Barros et al., 2016), während Beneke et al. (1995) bei Ruderern deutliche Überschätzungen des MLSS durch die IAT beobachteten.

5.2.5 IAT Simon

Die Ermittlung des IAT nach Simon et al. (1981), als Anstiegswinkel der Blutlaktatkurve von 45° definiert, ist weitgehend frei von subjektiven Fehlerquellen (Jakobsson et al., 2019). Die Schwelle soll den aeroben und aerob-anaeroben Belastungsbereich abgrenzen und berücksichtigt dabei auch interindividuelle Unterschiede (Dörr, 2010). Dennoch liegen kaum Untersuchungen der Validität über dieses Konzept vor. Heitkamp et al. (1991) beobachteten eine deutliche Unterschätzung der Marathongeschwindigkeit bei trainierten Läufern. Trotz sehr starker Korrelation ($r = 0,95$) unterschätzte der IAT nach Simon auch bei Langläufern das MLSS. Interindividuelle Unterschiede, inklusive einer deutlichen Überschätzung wurden auch hier beobachtet. Die Möglichkeit, aufgrund zu langsamen Kurvenanstiegs keine Schwelle finden zu können, stellt ein weiteres Problem dar (Jakobsson et al., 2019).

5.2.6 D_{mod}

Für D_{mod} nach Bishop (1998) scheinen im Zusammenhang mit dem MLSS widersprüchliche Ergebnisse vorzuliegen. Płoszczyca et al. (2020) zeigten, dass der D_{mod} bei trainierten Radsportlern das MLSS deutlich ($31,7 \pm 25,7$ W) überschätzt. Bei gleicher Stufendauer konnte von Jamnick et al. (2018) eine Überschätzung von 13,2 W beobachtet werden. Diese Differenz sinkt bei gemischt stark trainierten Populationen auf 6 ± 14 W ab (Wahl et al., 2017). Ein Mittelwertunterschied von lediglich 1 W wurde schlussendlich von Zwingmann et al. (2019) gefunden, trotz hoher interindividueller Abweichungen kann der D_{mod} den Autor*innen nach das MLSS gut einschätzen. Da der Startpunkt der Gerade bei Van Schuylenbergh et al. (2004) als niedrigster Punkt der Blutlaktatkurve gewählt wurde, kann die Unterschätzung des MLSS um 5 W nur schwer bewertet werden. Diese Herangehensweise stellt einen Mittelweg der originalen Konzepte von Cheng et al. (1992)

und Bishop et al. (1998) dar, und resultiert dadurch in Werten zwischen den beiden (Zwingmann et al., 2019). Die Abhängigkeit von der Stufendauer beeinträchtigt das D_{mod} jedoch ähnlich wie das D_{max} -Konzept (Jamnick et al., 2018). Auch die willkürlich gewählte erste Erhöhung der Blutlaktatkonzentration von 0,4 mmol/L missachtet interindividuelle Unterschiede in der Laktatdynamik (Płoszczyca et al., 2020) sowie den Fakt, dass der LT1 bei niedrigeren Inkrementen mit dieser Methode verspätet auftreten könnte (Zwingmann et al., 2019).

Die Studien zur Validität, die den MLSS als Vergleichsparameter anwandten, präsentierten ihre Ergebnisse mithilfe verschiedenster statistischer Verfahren. Während der ICC sowie die Korrelationskoeffizienten nach Spearman und nach Pearson ohnehin nicht miteinander vergleichbar sind (Schober et al., 2018), gibt es hinsichtlich deren statistischer Ansätze einige Kritikpunkte. So erfassen sie die relative anstatt der absoluten Übereinstimmung (Faude et al., 2009). Der Korrelationskoeffizient r gibt demnach die Stärke des Zusammenhangs zwischen zwei Variablen, nicht jedoch die Übereinstimmung jener an (Bland et al., 2010). Des Weiteren sind Korrelationen wesentlich vom Bereich der untersuchten Werte abhängig (Faude et al., 2009). Ist dieser weit, werden Korrelationen höher ausfallen (Bland et al., 2010). Den Zusammenhang zweier Parameter einzig aufgrund ihres Korrelationskoeffizienten zu beurteilen ist für die Validierung von Laktatkonzepten nicht mehr zeitgemäß, das unreflektierte Übernehmen jenes wurde bereits des Öfteren kritisiert (Jakobsson et al., 2019)

Laktatkonzepte anhand des MLSS zu validieren ist, wie präsentiert, eine fest etablierte Methode. Frei von Kritik ist jedoch auch dieser Ansatz nicht. So berichten Hauser et al. (2014) sowie Urhausen et al. (1993) von eventuellen Trainingseffekten während der zeitaufwändigen Ermittlung des MLSS. Dieser Effekt könnte vor allem bei weniger trainierten Proband*innen auftreten (Jones et al., 2019). Eine weitere Fehlerquelle ist in der methodischen Herangehensweise des Konzepts verankert. Als MLSS wird demnach jene Leistung definiert, die als Letzte ohne kontinuierliche Akkumulation von Laktat im Blut absolviert wurde. Erhöhungen zwischen den Durchgängen von 20 W (Czuba et al., 2009; Płoszczyca et al., 2020) oder 1 km/h (Hecksteden et al., 2015) könnten demnach das tatsächliche MLSS deutlich unterschätzen. Per Definition ist demnach das gewählte MLSS unvermeidbar unter dem tatsächlichen (Jones et al., 2019). Geringere Erhöhungen liefern dementsprechend genauere Ergebnisse und sind nicht zwingend mit einer höheren Anzahl an Durchgängen verbunden (Garcia-Tabar et al., 2019).

5.3 Laktatparameter und Leistung

Laktatkonzepte mit der erbrachten Leistung über vorgegebene Distanzen oder Dauern zu vergleichen, kann ebenfalls einen Ansatz darstellen, mehr über die Vorhersage von Wettkampfleistungen sowie die Kontrolle des Trainingsprozesses zu verstehen (Hall et al., 2016).

Als Prädiktor für Leistungen im Spitzensport erscheint die $\dot{V}O_{2\max}$ nicht mehr zeitgemäß (Svedahl et al., 2003). Submaximalen Laktatkonzepten wurde in der Vergangenheit bereits vermehrt eine höhere Fähigkeit zugesprochen, Leistungsunterschiede zu erklären, selbst wenn $\dot{V}O_{2\max}$ ähnlich hoch waren (Faude et al., 2009; Hall et al., 2016). Diese Ansicht darf jedoch noch nicht als verifiziert angesehen werden, einige Studien sagen nach wie vor der $\dot{V}O_{2\max}$ die höchste Vorhersagekraft nach (Lanferdini et al., 2020; McLaughlin et al., 2010)

5.3.1 D_{\max}

Als recht niedrig auftretende Schwelle liegt daher die Annahme nahe, dass längere Distanzen zu höheren Korrelationen mit dem Konzept führen könnten. Die gefundenen Ergebnisse sind diesbezüglich jedoch widersprüchlich. So fanden Bentley et al. (2001) bei 90 min Zeitfahren geringere absolute Abweichungen und höhere Korrelationskoeffizienten ($r = 0,77$) als bei 20 min ($r = 0,45$). Papadopoulos et al. (2006) im Laufsport hingegen fanden bei 10 km eine gute Einschätzung der Laufgeschwindigkeit (mittlere Abweichung $0,2 \pm 0,6$ km/h) und eine sehr starke Korrelation ($r = 0,84$), bei 21,1 km jedoch eine deutliche Überschätzung (mittlere Abweichung $1,3 \pm 0,8$ km/h) und geringere Korrelation ($r = 0,78$). Obwohl die Vorgabe der Belastung in min bzw. km nicht ident ist, sind die absoluten Zeiten dennoch ähnlich. Eine aktuellere Studie von Borszcz et al. (2018) gibt für 5-, 10-, sowie 60-min Zeitfahren am Fahrrad stetig steigende Zusammenhänge ($0,58 < r < 0,75$) sowie geringer werdende absolute Abweichungen zwischen D_{\max} und der Leistung an und bekräftigt damit Bentley et al. (2001). Die restlichen Studien verglichen den Marker jeweils nur mit einer Distanz. Nicholson et al. (2001) fanden zwischen D_{\max} und 10 km Laufleistung einen sehr starken Zusammenhang ($r = 0,86$) und minimale Abweichung ($< 0,1$ km/h) der jeweiligen Geschwindigkeiten. Bei einer etwas kürzeren Belastung von 30 min wurden bei Radsportlern (McNaughton et al., 2006) ähnliche Zusammenhänge ($r = 0,89$) jedoch deutlichere Unterschätzungen, ähnlich jenen von Bentley et al. (2001), gefunden. Die Ergebnisse der Laufstudien stimmen mit jenen von Forsyth et al. (2017) (5km, $r = 0,92$), Machado et al. (2011) (10km, $r = 0,98$) sowie der Meta-Analyse von Faude et al. (2009) überein. Die hohen Zusammenhänge gingen jeweils mit geringen absoluten

Abweichungen, sowie, wie von Machado et al. (2011) anhand des Bland-Altman-Plots präsentiert, auch mit niedrigen interindividuellen Unterschieden einher. Nicholson et al. (2001) resümieren, dass die Intensität von D_{max} für 30-40 min aufrechterhalten werden kann und daher am stärksten mit Distanzen um 10 km korreliert. Im Radsport hingegen scheint D_{max} tendenziell mit längeren Dauern zu korrelieren, und zeigt zwischen 45 und 90 min die höchsten absoluten Übereinstimmungen. Für Belastungen unter 30 min dürfte D_{max} trotz durchaus hoher Korrelationskoeffizienten die Leistung unterschätzen. Für D_{mod} liegen deutlich weniger Studien vor, es wurde jedoch gezeigt, dass der Marker die 30 min Zeitfahrleistung trotz eines sehr starken Korrelationskoeffizienten ($r = 0,84$) deutlich überschätzt (Bishop et al., 1998).

5.3.2 LTP1

Der LTP1 scheint moderate und intensive Belastungen voneinander abzugrenzen, dies wurde jedoch noch nicht direkt untersucht (Jamnick et al., 2020). Da die meisten olympischen Ausdauerdistanzen um bzw. oberhalb der CS/CP (Poole et al., 2021) sowie im intensiven Belastungsbereich (Faude et al., 2009) angesiedelt sind, liegt der Verdacht nahe, dass der LTP1 weniger stark mit Leistungen unter 90 min korrelieren würde. Ein Problem bei den vorliegenden Studien ist die unterschiedliche Definition des LTP1. Während McNaughton et al. (2006) und Papadopoulos et al. (2006), trotz unterschiedlicher Techniken, jeweils den ersten exponentiellen Anstieg der BLK suchten, ist die Herangehensweise von Nicholson et al. (2001), den LTP1 als jenen Punkt, dem zwei aufeinanderfolgende Erhöhungen der BLK um jeweils 1 mmol/L folgen, zu definieren, mit Limitationen verbunden. So führt diese Methode zu deutlich höheren Werten am LTP1, bei Nicholson et al. (2001) übersteigen sie gar jene des D_{max} . Die nahezu idente Laufgeschwindigkeit des LTP1 mit jener über 10 km weicht deutlich von anderen Studien ab. So belief sich die Differenz bei Papadopoulos et al. (2006) auf 1,7 km/h, selbst die Laufgeschwindigkeit über 21,1 km lag noch 0,5 km/h über dem LTP1. Vergleichbare Werte legten auch McNaughton et al. (2006) im Radsport vor. Hier lag die Leistung am LTP1 über 50 W unterhalb der 30 min Zeitfahrleistung. Auch die Korrelationskoeffizienten fielen im Vergleich zu den anderen untersuchten Laktatkonzepten der jeweiligen Studien zum Teil deutlich niedriger aus. Nicholson et al. (2001) resümieren damit, dass der LTP1 eher als Diagnosetool zur Erfassung der aeroben Leistungsfähigkeit als zur Trainingssteuerung geeignet ist. Relevanz dürfte der LTP1 jedoch im Ultra-Ausdauersport besitzen. Intensitäten oberhalb des LTP1 gehen mit einer gesteigerten Glykolyse-Rate einher, der Verbrauch an

Kohlenhydraten führt zwangsläufig zu einer Limitierung der Ausdauerleistung (Poole et al., 2021).

5.3.3 IAT

Zu der Vielzahl an verschiedenen IAT-Modellen stehen wenige Studien zur Verfügung. Amann et al. (2004) attestieren der IAT nach Baldari ($r = 0,72$) und der IAT nach Stegmann ($r = 0,52$) nur moderate Fähigkeit hinsichtlich der Vorhersage von 40 km Zeitfahrleistungen. Die IAT nach Dickhuth scheint sehr stark mit Distanzen zwischen 5 und 42 km ($0,91 < r < 0,93$) zu korrelieren, diese Daten basieren jedoch auf angegebenen anstatt gemessenen Daten (Röcker et al., 1998). Während diverse IAT-Modelle anhand des MLSS bereits validiert sind, braucht es für die Einschätzung der Ergebnisse noch deutlich mehr Studien, die IAT-Modelle mit der erbrachten Leistung über diverse Distanzen vergleichen.

5.4 Zusammenfassung von Laktatkonzepten und Leistung

Um die Leistung in Ausdauerdisziplinen vorherzusagen, wurden oft Laktatkonzepte als Möglichkeit genannt (Faude et al., 2009). Frühere Studien konzentrierten sich hierbei oft auf Modelle mit fixierten Blutlaktatkonzentrationen (Heck et al., 1985; Yoshida et al., 1990). Von den individualisierten Methoden scheint D_{max} am besten untersucht, der Leistungen oberhalb von 30 min gut einschätzen kann. Der LTP1 korreliert weniger stark mit den üblichen Lauf – und Raddistanzen, dies wurde bereits von Faude et al. (2009) festgehalten. Im Ultraausdauersport und zur Trainingsplanung hat er dennoch seine Berechtigung.

Die Problematik der komplexen Auswertung stellt sich bei den Parametern maximale Leistung (peak power output- PPO) und maximale Geschwindigkeit (V_{max}) im Stufenleistungstest nicht. Die Reliabilität wurde vielfach untersucht und mit Variationskoeffizienten unterhalb von 3 % angegeben (Hopkins et al., 2001), wobei diese Werte auf idente GXT-Protokolle beschränkt sind (Jamnick et al., 2020). Im Laufsport schien die V_{max} stärker mit der Geschwindigkeit über 5.000 m ($r = 0,89$) als der LTP1 ($r = 0,73$) zu korrelieren, wenngleich andere Laktatparameter wohl zu höheren Korrelationskoeffizienten geführt hätten (Stratton et al., 2009). Auch im Radsport wurden für den PPO im Vergleich zu Laktatparametern deutlich höhere Korrelationen gefunden (Bentley et al., 2001; Borszcz et al., 2018). PPO und V_{max} scheinen Leistung über diverse Distanzen in hohem Maße voraussagen zu können, sind jedoch in noch höherem Maße

vom Stufenprotokoll abhängig als Laktatparameter (Jamnick et al., 2018), mit möglichen Unterschieden jenseits von 100 W (Adami et al., 2013). Über interindividuelle Unterschiede beim Einsatz der V_{\max} und PPO als Trainingsvorgabe ist wenig bekannt (Jamnick et al., 2020).

5.5 Limitationen

Schwellenwerte wurden in dieser Arbeit stets an eine Leistung oder an eine Geschwindigkeit gekoppelt. Diverse Studien gaben die gewählten Parameter zusätzlich auch als Herzfrequenz und als Prozentsatz der $\dot{V}O_{2\max}$ an. Diese Werte wurden nicht berücksichtigt. Auf die Angaben der laktatmessenden Geräte wurde ebenfalls nicht eingegangen. Messunterschiede zwischen Geräten verschiedener Hersteller wurden zwar geringer als die biologische Variation angegeben (Bonaventura et al., 2015), jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass Abweichungen zwischen Studien auch von den verwendeten Geräten stammen. Eine weitere potenzielle Fehlerquelle stellen die auswertenden Personen dar. Die in einigen Studien angegebenen Ernährungsprotokolle vor dem Stufenleistungstests wurden ebenfalls nicht gewertet.

5.6 Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass nach wie vor keine einzelne Methode als die angemessenste erachtet werden kann. Vielmehr bedarf es, den Laktatmarker an die Zielsetzung der Studie sowie den relevanten Intensitätsbereich anzupassen. Die Vielzahl an Methoden und Schwellenbenennungen wurde in nahezu jeder Studie kritisiert. Die gängige Bezeichnung „lactate threshold“ wird oft unreflektiert als Synonym für den LTP1 sowie den LTP2 verwendet (Bourdon et al., 2013). Oft ergibt sich erst in der Volltext-Analyse, welcher Parameter genau mit „lactate threshold“ gemeint ist. Es wird daher vorgeschlagen, den Laktatparameter bereits im Titel direkt beim Namen zu nennen. Der Vielzahl an Methoden liegen in der Praxis zusätzlich voneinander abweichende Stufenleistungstests zugrunde. Keine der 24 inkludierten Studien wandte hierbei dasselbe Protokoll an, streng genommen handelt es sich demnach in jedem einzelnen Fall um eigenständige Schwellen, die nicht mit namensgleichen Schwellen anderer Ermittlungsweise verglichen werden dürften, allen voran, wenn bereits vermehrt auf die zum Teil enorme Abhängigkeit der Schwellenhöhe vom Protokoll hingewiesen wurde. Diesbezüglich wurde daher vorgeschlagen, Laktatparameter ausschließlich nach dem

Originalprotokoll zu ermitteln (Hecksteden et al., 2015). Obwohl die Forschung zur Laktatleistungsdiagnostik bereits über 50 Jahre zurückreicht, scheint das theoretische Fundament keineswegs gefestigt. Die genauen Gründe des Belastungsabbruchs oberhalb des LTP2 sowie dessen tatsächliche Existenz sind nach wie vor nicht geklärt.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die gängigsten Laktatkonzepte bei aufeinanderfolgenden, identen Stufenleistungstests hoch reliabel sind. Eine perfekte Einschätzung des MLSS kann keinem der Konzepte nachgesagt werden, abhängig vom Protokoll und der Sportart scheinen D_{max} und die IAT nach Stegmann zumindest eine relativ genaue Schätzung zu ermöglichen, wodurch die Dauer zur Ermittlung des tatsächlichen MLSS deutlich verkürzt werden kann. Um fundierte Aussagen über den Zusammenhang von Laktatkonzepten mit Leistung in Wettkämpfen treffen zu können, bedarf es noch mehr Studien.

Die Laktatleistungsdiagnostik stellt nach wie vor einen beliebten Ansatz dar, das aktuelle Fitnessniveau zu ermitteln, um darauf aufbauend Trainingsmodalitäten abzuleiten. Kostenfragen und logistischer Aufwand sind jedoch kritisch in Betracht zu ziehen, wodurch sich in jüngerer Vergangenheit günstigere, nicht invasive Konzepte wie die CP/CS in den Vordergrund drängten.

Die Geschichte von Sport und Laktat ist von Missverständnissen, falschen Annahmen und unzähligen Theorien geprägt. Widersprüchliche Verwendungen von Begrifflichkeiten legten zusätzlich Steine in den Weg. Jedoch könnte just die oftmals kritisierte Uneinigkeit zu gesteigertem Forschungsinteresse beitragen. Wie Rossiter (2021) es treffend zusammenfasste :

„Kontreverse entfacht die Flammen des wissenschaftlichen Fortschritts.“

Literaturverzeichnis

- Adami, A., Sivieri, A., Moia, C., Perini, R., & Ferretti, G. (2013). Effects of step duration in incremental ramp protocols on peak power and maximal oxygen consumption. *Eur J Appl Physiol*, *113*, 2653. <https://doi.org/10.1007/s00421-013-2705-9>
- Ahrend, M. D., Schneeweiss, P., Martus, P., Niess, A. M., & Krauss, I. (2018). Predictive ability of a comprehensive incremental test in mountain bike marathon. *BMJ Open Sport Exerc Med*, *4*(1), e000293. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2017-000293>
- Akoglu, H. (2018). User's guide to correlation coefficients. *Turk J Emerg Med*, *18*(3), 91-93. <https://doi.org/10.1016/j.tjem.2018.08.001>
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2004.00424.x>
- Amann, M., Subudhi, A. W., Walker, J., Eisenman, P., Shultz, B., & Foster, C. (2004). An evaluation of the predictive validity and reliability of ventilatory threshold. *Med Sci Sports Exerc*, *36*(10), 1716-1722. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000142305.18543.34>
- Arratibel-Imaz, I., Calleja-Gonzalez, J., Emparanza, J. I., Terrados, N., Mjaanes, J. M., & Ostojic, S. M. (2016). Lack of concordance amongst measurements of individual anaerobic threshold and maximal lactate steady state on a cycle ergometer. *Physician Sportsmed.*, *44*(1), 34-45. <https://doi.org/10.1080/00913847.2016.1122501>
- Atkinson, G., & Nevill, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports medicine*, *26*(4), 217-238.
- 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. <https://doi.org/10.1080/0264041031000102097>
- Aunola, S., & Rusko, H. (1992). Does anaerobic threshold correlate with maximal lactate steady-state? *J. Sports Sci.*, *10*(4), 309-323. <https://doi.org/10.1080/02640419208729931>
- Bailly, L. (2014). Identifying anaerobic lactate threshold by visual inspection: A study of validity and reliability.

- 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. <https://doi.org/10.1097/00005768-200010000-00022>
- Balmer, J., Richard 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*, 1490. <https://doi.org/10.1097/00005768-200008000-00018>
- 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*, 533. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2007.040444>
- Barstow, T. J., & Barstow, T. J. (1994). Characterization of $\dot{V}O_2$ kinetics during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc*, *26*, 1334.
- Batschelet, A., Zimmermann, C., Schmid, K., Boutellier, U., & Knöpfli-Lenzin, C. (2004). Reproduzierbarkeit des maximalen laktat-steady-states. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, *52*, 156.
- Beaver, W. L., Wasserman, K., & Whipp, B. J. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* (1985), *60*(6), 2020-2027. <https://doi.org/10.1152/jappl.1986.60.6.2020>
- Bellenger, C. R., Fuller, J. T., Nelson, M. J., Hartland, M., Buckley, J. D., & Debenedictis, T. A. (2015). Predicting maximal aerobic speed through set distance time-trials. *Eur J Appl Physiol*, *115*, 2598. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3233-6>
- Beneke, R. (1995). Anaerobic threshold, individual anaerobic threshold, and maximal lactate steady state in rowing. *Med Sci Sports Exerc*, *27*(6), 863-867.
- 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*, 2081. <https://doi.org/10.1097/00005768-200112000-00016>
- Bentley, D. J., Newell, J., & Bishop, D. (2007). Incremental Exercise Test Design and Analysis: Implications for Performance Diagnostics in Endurance Athletes. *Sports Med*, *37*, 586. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737070-00002>
- Bergman, B. C., Tsvetkova, T., Lowes, B., & Wolfel, E. E. (2009). Myocardial glucose and lactate metabolism during rest and atrial pacing in humans. *J Physiol*, *587*(Pt 9), 2087-2099. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2008.168286>

- Bergman, B. C., Wolfel, E. E., Butterfield, G. E., Lopaschuk, G. D., Casazza, G. A., Horning, M. A., & Brooks, G. A. (1999). Active muscle and whole body lactate kinetics after endurance training in men. *J Appl Physiol (1985)*, *87*(5), 1684-1696. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.5.1684>
- Berthoin, S., Mantéca, F., Gerbeaux, M., & Lensele-Corbeil, G. (1995). Effect of a 12-week training programme on Maximal Aerobic Speed (MAS) and running time to exhaustion at 100% of MAS for students aged 14 to 17 years. *J Sports Med Phys Fitness*, *35*(4), 251-256.
- 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. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333060-00003>
- Billat, V., Renoux, J., Pinoteau, J., Petit, B., & Koralsztein, J. (1995). Times to exhaustion at 90,100 and 105% of velocity at $\dot{V}O_2$ max (Maximal aerobic speed) and critical speed in elite longdistance runners. *Archives of physiology and biochemistry*, *103*(2), 129-135.
- Binder, R. K., Wonisch, M., Corra, U., Cohen-Solal, A., Vanhees, L., Saner, H., & Schmid, J.-P. (2008). Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil*, *15*, 734. <https://doi.org/10.1097/HJR.0b013e328304fed4>
- Bishop, D., Jenkins, D. G., & Mackinnon, L. T. (1998). The relationship between plasma lactate parameters, WPeak and 1-h cycling performance in women. *Med Sci Sports Exerc*, *30*, 1275. <https://doi.org/10.1097/00005768-199808000-00014>
- Black, M. I., Jones, A. M., Blackwell, J. R., Bailey, S. J., Wylie, L. J., McDonagh, S. T. J., . . . Vanhatalo, A. (2017). Muscle metabolic and neuromuscular determinants of fatigue during cycling in different exercise intensity domains. *J Appl Physiol (1985)*, *122*, 459. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00942.2016>
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (2010). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *International journal of nursing studies*, *47*, 936. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2009.10.001>

- Bonaventura, J. M., Sharpe, K., Knight, E., Fuller, K. L., Tanner, R. K., & Gore, C. J. (2015). Reliability and Accuracy of Six Hand-Held Blood Lactate Analysers. *J Sports Sci Med*, *14*, 214.
- Borszcz, F. K., Tramontin, A. F., de Souza, K. M., Carminatti, L. J., & Costa, V. P. (2018). Physiological Correlations With Short, Medium, and Long Cycling Time-Trial Performance. *Res Q Exerc Sport*, *89*, 125. <https://doi.org/10.1080/02701367.2017.1411578>
- Bourdon, P. C., Woolford, S. M., & Buckley, J. D. (2018). Effects of varying the step duration on the determination of lactate thresholds in elite rowers. *Int J Sports Physiol Perform*, *13*, 693. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0258>
- Brooks, G. A. (1986). The lactate shuttle during exercise and recovery. *Med Sci Sports Exerc*, *18*(3), 360-368. <https://doi.org/10.1249/00005768-198606000-00019>
- Brooks, G. A. (2018). The Science and Translation of Lactate Shuttle Theory. *Cell Metab*, *27*, 785. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2018.03.008>
- Bujang, M. A., Omar, E. D., & Baharum, N. A. (2018). A Review on Sample Size Determination for Cronbach's Alpha Test: A Simple Guide for Researchers. *The Malaysian journal of medical sciences: MJMS*, *25*(6), 85–99. <https://doi.org/10.21315/mjms2018.25.6.9>
- Burger, M., & Schaller, D. J. (2019). Physiology, Acidosis, Metabolic. StatPearls [Internet].
- Burnley, M., & Jones, A. M. (2007). Oxygen uptake kinetics as a determinant of sports performance. *European journal of sport science*, *7*, 79. <https://doi.org/10.1080/17461390701456148>
- Calvo, F., Chicharro, J. L., Bandrés, F., Lucía, A., Pérez, M., Alvarez, J., Mojares, L. L., Vaquero, A. F., & Legido, J. C. (1997). Anaerobic threshold determination with analysis of salivary amylase. *Can J Appl Physiol*, *22*(6), 553-561. <https://doi.org/10.1139/h97-035>
- Candotti, C. T., Loss, J. F., Melo Mde, O., La Torre, M., Pasini, M., Dutra, L. A., de Oliveira, J. L., & de Oliveira, L. P. (2008). Comparing the lactate and EMG thresholds of recreational cyclists during incremental pedaling exercise. *Can J Physiol Pharmacol*, *86*(5), 272-278. <https://doi.org/10.1139/y08-020>

- Capellá, I. L., Peinado, P. J. B., Moro, M. I. B., Revenga, J. B., Esteves, N. K., & Montero, F. J. C. (2018). Determining the ventilatory inter-threshold area in individuals with different endurance capacities. *Apunts. Medicina de l'Esport*, *53*(199), 91-97.
- Capelli, C., Rittveger, J., Bruseghini, P., Calabria, E., & Tam, E. (2016). Maximal aerobic power and anaerobic capacity in cycling across the age spectrum in male master athletes. *Eur J Appl Physiol*, *116*, 1410. <https://doi.org/10.1007/s00421-016-3396-9>
- Carey, D. G., Pliego, G. J., & Rohwer, J. L. (2010). THE VENTILATORY RESPONSE TO INCREMENTAL EXERCISE: IS IT ONE OR TWO BREAKPOINTS? *J. Strength Cond. Res.*, *24*(10), 2840-2845. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181e2734a>
- Carretero-Navarro, G., Márquez, G., Cherubini, D., & Taube, W. (2019). Effect of different loading conditions on running mechanics at different velocities. *Eur J Sport Sci*, *19*, 602. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1537378>
- Carter, H., Jones, A. M., Barstow, T. J., Burnley, M., Williams, C. A., & Doust, J. H. (2000). Oxygen uptake kinetics in treadmill running and cycle ergometry: a comparison. *J Appl Physiol* (1985), *89*(3), 899-907. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.89.3.899>
- Carter, H., Pringle, J. S., Jones, A. M., & Doust, J. H. (2002). Oxygen uptake kinetics during treadmill running across exercise intensity domains. *Eur J Appl Physiol*, *86*, 354. <https://doi.org/10.1007/s00421-001-0556-2>
- Casaburi, R., Storer, T. W., Ben-Dov, I., & Wasserman, K. (1987). Effect of endurance training on possible determinants of $\dot{V}O_2$ during heavy exercise. *J Appl Physiol* (1985), *62*(1), 199-207. <https://doi.org/10.1152/jappl.1987.62.1.199>
- Cerezuela-Espejo, V., Courel-Ibáñez, J., Morán-Navarro, R., Martínez-Cava, A., & Pallarés, J. G. (2018). The Relationship Between Lactate and Ventilatory Thresholds in Runners: Validity and Reliability of Exercise Test Performance Parameters. *Front Physiol*, *9*, 1320. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01320>
- Chalmers, S., Esterman, A., Eston, R., & Norton, K. (2015). Standardization of the Dmax method for calculating the second lactate threshold. *Int J Sports Physiol Perform*, *10*(7), 921-926. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0537>
- Chan, Y. H. (2003). Biostatistics 104: correlational analysis. *Singapore Med J*, *44*(12), 614-619.

- 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. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021309>
- Chicharro, J. L., Calvo, F., Alvarez, J., Vaquero, A. F., Bandrés, F., & Legido, J. C. (1995). Anaerobic threshold in children: determination from saliva analysis in field tests. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *70*(6), 541-544. <https://doi.org/10.1007/BF00634384>
- Chicharro, J. L., Legido, J. C., Alvarez, J., Serratos, L., Bandres, F., & Gamella, C. (1994). Saliva electrolytes as a useful tool for anaerobic threshold determination. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *68*(3), 214-218. <https://doi.org/10.1007/BF00376769>
- Clark, C. C. T., & Draper, S. B. (2019). A detailed comparison of oxygen uptake kinetics at a range of exercise intensities. *Motriz: rev. educ. fis*, *25*. <https://doi.org/10.1590/s1980-6574201900010010>
- 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. <https://doi.org/10.1055/s-2001-11332>
- Colosio, A. L., Caen, K., Bourgois, J. G., Boone, J., & Pogliaghi, S. (2020). Bioenergetics of the $\dot{V}O_2$ slow component between exercise intensity domains. *Pflügers Archiv*, *472*, 1456. <https://doi.org/10.1007/s00424-020-02437-7>
- Cunha, F. A., Montenegro, R. A., Midgley, A. W., Vasconcellos, F., Soares, P. P., & Farinatti, P. (2014). Influence of exercise modality on agreement between gas exchange and heart rate variability thresholds. *Braz J Med Biol Res*, *47*(8), 706-714. <https://doi.org/10.1590/1414-431x20143713>
- Czuba, M., Zajac, A., Cholewa, J., Poprzecki, S., Waskiewicz, Z., & Mikolajec, K. (2009). Lactate Threshold (D-Max Method) and Maximal Lactate Steady-State in Cyclists. *J Hum. Kinet.*, *21*, 49-56. <https://doi.org/10.2478/v10078-09-0006-5>
- Dassonville, J., Beillot, J., Lessard, Y., Jan, J., André, A. M., Le Pourcelet, C., Rochcongar, P., & Carré, F. (1998). Blood lactate concentrations during exercise: effect of sampling site and exercise mode. *J Sports Med Phys Fitness*, *38*(1), 39-46.
- Denadai, B. S., Gomide, E. B., & Greco, C. C. (2005). The relationship between onset of blood lactate accumulation, critical velocity, and maximal lactate steady state in soccer players. *J Strength Cond Res*, *19*(2), 364-368. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2005\)19\[364:TRBOOB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2005)19[364:TRBOOB]2.0.CO;2)

- Dennis, S. C., Noakes, T. D., & Bosch, A. N. (1992). Ventilation and blood lactate increase exponentially during incremental exercise. *Journal of Sports Sciences*, *10*(5), 437-449.
- Di Prampero, P., Atchou, G., Brückner, J.-C., & Moia, C. (1986). The energetics of endurance running. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, *55*(3), 259-266.
- Dickhuth, H.-H., Yin, L., Niess, A., Röcker, 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*(02), 122-127.
- Dörr, C. (2010). Untersuchung der Validität verschiedener Laktatschwellenkonzepte an Ausdauersportlern. Unveröffentlichte Dissertation, Gießen: Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Egger, F., Meyer, T., & Hecksteden, A. (2016). Interindividual Variation in the Relationship of Different Intensity Markers-A Challenge for Targeted Training Prescriptions. *PLoS One*, *11*(10), e0165010. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165010>
- Emhoff, C. A., Messonnier, L. A., Horning, M. A., Fattor, J. A., Carlson, T. J., & Brooks, G. A. (2013). Gluconeogenesis and hepatic glycogenolysis during exercise at the lactate threshold. *J Appl Physiol* (1985), *114*(3), 297-306. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01202.2012>
- Fabre, N., Balestreri, F., Pellegrini, B., & Schena, F. (2010). The modified Dmax method is reliable to predict the second ventilatory threshold in elite cross-country skiers. *J Strength Cond Res*, *24*(6), 1546-1552. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181dc450a>
- Fabre, N., Mouro, L., Zerbini, L., Pellegrini, B., Bortolan, L., & Schena, F. (2013). A novel approach for lactate threshold assessment based on rating of perceived exertion. *Int J Sports Physiol Perform*, *8*, 270. <https://doi.org/10.1123/ijsp.8.3.263>
- Faria, E. W., Parker, D. L., & Faria, I. E. (2005). The Science of Cycling: Physiology and Training - Part 1. *Sports Med*, *35*, 312. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535040-00002>
- Faude, O., Kindermann, W., & Meyer, T. (2009). Lactate Threshold Concepts: How Valid are They? *Sports Med*, *39*, 490. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939060-00003>

- Feng, C., Wang, H., Lu, N., Chen, T., He, H., Lu, Y., & Tu, X. M. (2014). Log-transformation and its implications for data analysis. *Shanghai Arch Psychiatry*, *26*(2), 105-109. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0829.2014.02.009>
- Ferguson, B. S., Rogatzki, M. J., Goodwin, M. L., Kane, D. A., Rightmire, Z., & Gladden, L. B. (2018). Lactate metabolism: historical context, prior misinterpretations, and current understanding. *Eur J Appl Physiol*, *118*, 728. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3795-6>
- Flake, F., Dönitz, S., & Raichle, G. (2018). *Mensch Körper Krankheit für den Rettungsdienst*. Elsevier Health Sciences.
- Forsyth, J., Burt, D., Ridley, F., & Mann, C. (2017). Using lactate threshold to predict 5-km treadmill running performance in veteran athletes. *Biol Sport*, *34*(3), 233-237. <https://doi.org/10.5114/biolSport.2017.65999>
- Foxdal, P., Sjödin, 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. <https://doi.org/10.1007/BF00357603>
- Garcia-Tabar, I., & Gorostiaga, E. M. (2019). Considerations regarding Maximal Lactate Steady State determination before redefining the gold-standard. *Physiol Rep*, *7*, n/a. <https://doi.org/10.14814/phy2.14293>
- Gavin, J. P., Willems, M. E. T., & Myers, S. D. (2014). Reproducibility of lactate markers during 4 and 8 min stage incremental running: A pilot study. *J. Sci. Med. Sport*, *17*(6), 635-639. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.08.006>
- Giavarina, D. (2015). Understanding Bland Altman analysis. *Biochem Med (Zagreb)*, *25*, 151. <https://doi.org/10.11613/BM.2015.015>
- Gladden, L. B., Yates, J., Stremel, R. W., & Stamford, B. A. (1985). Gas exchange and lactate anaerobic thresholds: inter-and intraevaluator agreement. *Journal of Applied Physiology*, *58*(6), 2082-2089.
- Green, H. J., & Patla, A. E. (1992). Maximal aerobic power: neuromuscular and metabolic considerations. *Med Sci Sports Exerc*, *24*(1), 38-46.
- Hall, M. M. M. D., Rajasekaran, S. M. D., Thomsen, T. W. M. D., & Peterson, A. R. M. D. (2016). Lactate: Friend or Foe. *PM R*, *8*, S15. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2015.10.018>

- 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. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1353176>
- Hauser, T., Bartsch, D., Baumgärtel, L., & Schulz, H. (2013). Reliability of Maximal Lactate-Steady-State. *Int J Sports Med*, *34*, 199. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1321719>
- Heale, R., & Twycross, A. (2015). Validity and reliability in quantitative studies. *Evidence-based nursing*, *18*(3), 66-67.
- Heck, H., & Beneke, R. (2008). 30 Years of Lactate Thresholds - what remains to be done? *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, *59*, 302.
- Heck, H., Mader, A., Hess, G., Mücke, S., Müller, R., & Hollmann, W. (1985). Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *Int J Sports Med*, *6*(3), 117-130. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1025824>
- Hecksteden, A., Heinze, T., Faude, O., Kindermann, W., & Meyer, T. (2015). Validity of Lactate Thresholds in Inline Speed Skating. *J Strength Cond Res*, *29*(9), 2497-2502. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31828a485c>
- Heesen, B. (2013). *Wissenschaftliches Arbeiten : Methodenwissen für das Bachelor-, Master- und Promotionsstudium* (2., überarb. und aktual. Aufl.. ed.). Springer Gabler.
- Heitkamp, H.-C., Scheib, K., & Schmid, K. (1991). Treadmill performance, anaerobic threshold and marathon running speed. In *Advances in Ergometry* (pp. 248-253). Springer.
- Hering, G. O., Hennig, E. M., Riehle, H. J., & Stepan, J. (2018). A Lactate Kinetics Method for Assessing the Maximal Lactate Steady State Workload. *Front Physiol*, *9*, 310. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00310>
- Heuberger, J., Gal, P., Stuurman, F. E., Keizer, W., Miranda, Y. M., & Cohen, A. F. (2018). Repeatability and predictive value of lactate threshold concepts in endurance sports. *PLoS One*, *13*(11), 16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206846>
- Hill, D. W., Poole, D. C., & Smith, J. C. (2002). The relationship between power and the time to achieve .VO(2max). *Med Sci Sports Exerc*, *34*, 714.
- Hill, K., Jenkins, S. C., Cecins, N., Philippe, D. L., Hillman, D. R., & Eastwood, P. R. (2008). Estimating maximum work rate during incremental cycle ergometry testing from six-

minute walk distance in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 89(9), 1782-1787.

- Hoefelmann, C. P., Diefenthaler, F., Costa, V. P., De Lucas, R. D., Shambrook, P., & Guglielmo, L. G. A. (2015). Test-retest reliability of second lactate turnpoint using two different criteria in competitive cyclists. *Eur. J. Sport Sci.*, 15(4), 265-270. <https://doi.org/10.1080/17461391.2014.944874>
- Hofmann, P., Müller, A., & Tschakert, G. (2017). *Gütekriterien, Protokolle und Spezial-Ergometrien zur Belastungsuntersuchung. In Kompendium der Sportmedizin* (pp. 71-92). Springer.
- Hohmann, A., Lames, M., & Letzelter, M. (2007). *Einführung in die Trainingswissenschaft* (4., überarb. und erw. Aufl. ed.). Limpert.
- Hollmann, W. (1963). *Höchst-und Dauerleistungsfähigkeit des Sportlers: spiroergometrische Beurteilung und Untersuchungsergebnisse von männlichen und weiblichen Personen des 1. bis 8. Lebensjahrzehnts*. Barth.
- Hollmann, W. (2001). 42 years ago—development of the concepts of ventilatory and lactate threshold. *Sports Medicine*, 31(5), 315-320.
- Hoogeveen, A. R., Schep, G., & Hoogsteen, J. (1999). The ventilatory threshold, heart rate, and endurance performance: Relationships in elite cyclists. *Int. J. Sports Med.*, 20(2), 114-117. <https://doi.org/10.1055/s-2007-971103>
- Hopkins, W. G., Schabort, E. J., & Hawley, J. A. (2001). Reliability of Power in Physical Performance Tests. *Sports Med*, 31, 234. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131030-00005>
- Hottenrott, K., & Neumann, G. (2020). *Trainingswissenschaft : ein Lehrbuch in 14 Lektionen* (4. Auflage. ed.). Meyer & Meyer Verlag.
- Iannetta, D., Inglis, E. C., Mattu, A. T., Fontana, F. Y., Pogliaghi, S., Keir, D. A., & Murias, J. M. (2020). A Critical Evaluation of Current Methods for Exercise Prescription in Women and Men. *Med Sci Sports Exerc*, 52, 473. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002147>
- Jakobsson, J., & Malm, C. (2019). Maximal Lactate Steady State and Lactate Thresholds in the Cross-Country Skiing Sub-Technique Double Poling. *Int J Exerc Sci*, 12(2), 57-68.

- Jamnick, N. A., Botella, J., Pyne, D. B., & Bishop, D. J. (2018). Manipulating graded exercise test variables affects the validity of the lactate threshold and (\dot{V}) over $\dot{V}O_{2peak}$. *PLoS One*, *13*(7), 21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199794>
- Jamnick, N. A., Pettitt, R. W., Granata, C., Pyne, D. B., & Bishop, D. J. (2020). An Examination and Critique of Current Methods to Determine Exercise Intensity. *Sports Med*, *50*, 1756. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01322-8>
- Jansen, C. T. (2012). *Wissenschaftliche Gütekriterien bei sportmotorischen Tests: Reliabilität, Validität und Zusammenhangsmerkmale ausgewählter leistungsdiagnostischer Verfahren*. Diplomica Verlag.
- Jones, A. M., Burnley, M., Black, M. I., Poole, D. C., & Vanhatalo, A. (2019). The maximal metabolic steady state: redefining the 'gold standard'. *Physiol Rep*, *7*, n/a. <https://doi.org/10.14814/phy2.14098>
- Jones, A. M., Vanhatalo, A., Burnley, M., Morton, R. H., & Poole, D. C. (2010). Critical Power: Implications for Determination of $\dot{V}O_{2max}$ and Exercise Tolerance. *Medicine and science in sports and exercise*, *42*, 1890.
- Kang, S. K., Kim, J., Kwon, M., & Eom, H. (2014). Objectivity and validity of EMG method in estimating anaerobic threshold. *Int J Sports Med*, *35*(9), 737-742. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1361182>
- Katch, V., Weltman, A., Sady, S., & Freedson, P. (1978). Validity of the relative percent concept for equating training intensity. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *39*(4), 219-227. <https://doi.org/10.1007/BF00421445>
- Kemp, G., Böning, D., Strobel, G., Beneke, R., Maassen, N., Robergs, R. A., . . . Parker, D. (2005). Lactate accumulation, proton buffering, and pH change in ischemically exercising muscle. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, *289*, R910. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00641.2004>
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *J Chiropr Med*, *15*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- Lacour, J., Padilla-Magunacelaya, S., Chatard, J., Arsac, L., & Barthelemy, J. (1991). Assessment of running velocity at maximal oxygen uptake. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, *62*(2), 77-82.

- Lanferdini, F. J., Silva, E. S., Machado, E., Fischer, G., & Peyré-Tartaruga, L. A. (2020). Physiological Predictors of Maximal Incremental Running Performance. *Front Physiol*, *11*, 979. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00979>
- Lansley, K., Dimenna, F., Bailey, S., & Jones, A. (2011). A 'new' method to normalise exercise intensity. *International journal of sports medicine*, *32*(07), 535-541.
- Los Arcos, A., Vázquez, J. S., Villagra, F., Martín, J., Lerga, J., Sánchez, F., Bertó, J., & Zulueta, J. J. (2019). Assessment of the maximal aerobic speed in young elite soccer players: Université de Montréal Track Test (UM-TT) vs. treadmill test. *Science & sports*, *34*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2019.03.010>
- Lucía, A., Sánchez, 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. <https://doi.org/10.1136/bjism.33.3.178>
- Machado, F. A., de Moraes, S. M. F., Peserico, C. S., Mezzaroba, P. V., & Higino, W. P. (2011). The Dmax is Highly Related to Performance in Middle-Aged Females. *Int J Sports Med*, *32*, 676. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1275671>
- Mallett, R., Hagen-Zanker, J., Slater, R., & Duvendack, M. (2012). The benefits and challenges of using systematic reviews in international development research. *Journal of development effectiveness*, *4*, 455. <https://doi.org/10.1080/19439342.2012.711342>
- Mann, T., Lamberts, R. P., & Lambert, M. I. (2013). Methods of Prescribing Relative Exercise Intensity: Physiological and Practical Considerations. *Sports Med*, *43*, 625. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0045-x>
- McConnell, T. R. (1988). Practical considerations in the testing of $\dot{V}O_2$ max in runners. *Sports Med*, *5*(1), 57-68. <https://doi.org/10.2165/00007256-198805010-00005>
- McLaughlin, J. E., Howley, E. T., Bassett, D. R., Thompson, D. L., & Fitzhugh, E. C. (2010). Test of the classic model for predicting endurance running performance. *Med Sci Sports Exerc*, *42*(5), 991-997. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181c0669d>
- 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. <https://doi.org/10.1007/BF00376655>

- 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.
- Mercer, T. H. (2001). Reproducibility of blood lactate-anchored ratings of perceived exertion. *Eur J Appl Physiol*, *85*(5), 496-499. <https://doi.org/10.1007/s004210100477>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *BMJ*, *339*. <https://doi.org/10.1136/bmj.b2535>
- Monteiro De Barros, C. L., Mendes, T. T., De Avila Castro Fleury Mortimer, L., Passos Ramos, G., & Silami Garcia, E. (2016). Individual anaerobic threshold estimates maximal lactate steady state in temperate and hot climate. *J. Sports Med. Phys. Fit.*, *56*(1-2), 27-33.
- Morales, J. B., Jordan, S. L., Moore, A. D., Ocnaschek, L. M., Kolp, K., Syed, B. U., & Mohammed, Z. (2020). Relationship of Blood Lactate and Sweat Lactate on Exercise Intensity. *International Journal of Exercise Science: Conference Proceedings*,
- Morton, R. H., Stannard, S. R., & Kay, B. (2012). Low reproducibility of many lactate markers during incremental cycle exercise. *Br. J. Sports Med.*, *46*(1), 64-69. <https://doi.org/10.1136/bjism.2010.076380>
- Mourot, L., Fabre, N., Savoldelli, A., & Schena, F. (2014). Second ventilatory threshold from heart-rate variability: valid when the upper body is involved? *Int J Sports Physiol Perform*, *9*(4), 695-701. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0286>
- Mugele, H., Plummer, A., Baritello, O., Towe, M., Brecht, P., & Mayer, F. (2018). Accuracy of training recommendations based on a treadmill multistage incremental exercise test. *PLoS One*, *13*(10), e0204696. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204696>
- Müller-Esterl, W. (2018) *Biochemie: Eine Einführung für Mediziner und Naturwissenschaftler - Unter Mitarbeit von Ulrich Brandt, Oliver Anderka, Stefan Kerscher, Stefan Kieß und Katrin Ridinger* (3. Aufl. 2018 ed.). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54851-6>
- Muniz-Pumares, D., Karsten, B., Triska, C., & Glaister, M. (2019). Methodological Approaches and Related Challenges Associated With the Determination of Critical Power and Curvature Constant. *J Strength Cond Res*, *33*, 596. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002977>

- 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. <https://doi.org/10.1097/00005768-200102000-00026>
- Nikolaidis, P. T. (2015). Can maximal aerobic running speed be predicted from submaximal cycle ergometry in soccer players? The effects of age, anthropometry and positional roles. *Adv Biomed Res*, 4, 226. <https://doi.org/10.4103/2277-9175.166649>
- Ochmann, U., Kotschy-Lang, N., Raab, W., Kellberger, J., Nowak, D., & Joerres, R. A. (2013). Is an Individual Prediction of Maximal Work Rate by 6-Minute Walk Distance and Further Measurements Reliable in Male Patients with Different Lung Diseases? *Respiration*. <https://doi.org/10.1159/000345859>
- Oliveira, M. F., Caputo, F., Lucas, R. D., Denadai, B. S., & Greco, C. C. (2012). Physiological and stroke parameters to assess aerobic capacity in swimming. *Int J Sports Physiol Perform*, 7(3), 218-223. <https://doi.org/10.1123/ijsp.7.3.218>
- Pallarés, J. G., Morán-Navarro, R., Ortega, J. F., Fernández-Elías, V. E., & Mora-Rodríguez, R. (2016). Validity and Reliability of Ventilatory and Blood Lactate Thresholds in Well-Trained Cyclists. *PLoS One*, 11(9), e0163389. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163389>
- Papadopoulos, C., Doyle, J. A., & LaBudde, B. D. (2006). Relationship between running velocity of 2 distances and various lactate parameters. *Int J Sports Physiol Perform*, 1(3), 270-283. <https://doi.org/10.1123/ijsp.1.3.270>
- Pedersen, B. K., & Saltin, B. (2015). Exercise as medicine – evidence for prescribing exercise as therapy in 26 different chronic diseases. *Scand J Med Sci Sports*, 25, 72. <https://doi.org/10.1111/sms.12581>
- Pennington, C., & Kinesiology, M. (2015). The exercise effect on the anaerobic threshold in response to graded exercise. *International Journal of Health Sciences*, 3(1), 225-234.
- Pfitzinger, P., & Freedson, P. S. (1998). The reliability of lactate measurements during exercise. *Int J Sports Med*, 19(5), 349-357. <https://doi.org/10.1055/s-2007-971929>
- Pinot, J., & Grappe, F. (2014). Determination of Maximal Aerobic Power from the Record Power Profile to improve cycling training. *Journal of Science and Cycling*, 3(1), 26-32.
- Pires, F. O., Hammond, J., Lima-Silva, A. E., Bertuzzi, R. C., & Kiss, M. A. (2011). Ventilation behavior during upper-body incremental exercise. *J Strength Cond Res*, 25(1), 225-230. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181b2b895>

- Płoszczyca, K., Jazic, D., Piotrowicz, Z., Chalimoniuk, M., Langfort, J., & Czuba, M. (2020). Comparison of maximal lactate steady state with anaerobic threshold determined by various methods based on graded exercise test with 3-minute stages in elite cyclists. *BMC sports science, medicine & rehabilitation*, 12, 70. <https://doi.org/10.1186/s13102-020-00219-3>
- Poole, D. C., & Jones, A. M. (2017). Measurement of the maximum oxygen uptake $\dot{V}O_{2max}$: $\dot{V}O_{2peak}$ is no longer acceptable. *Journal of applied physiology*, 122(4), 997-1002.
- Poole, D. C., Rossiter, H. B., Brooks, G. A., & Gladden, L. B. (2021). The anaerobic threshold: 50+ years of controversy. *J Physiol*, 599, 767. <https://doi.org/10.1113/JP279963>
- Pymer, S., Nichols, S., Prosser, J., Birkett, S., Carroll, S., & Ingle, L. (2020). Does exercise prescription based on estimated heart rate training zones exceed the ventilatory anaerobic threshold in patients with coronary heart disease undergoing usual-care cardiovascular rehabilitation? A United Kingdom perspective. *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil*, 27, 589. <https://doi.org/10.1177/2047487319852711>
- Rapp, D., Scharhag, J., Wagenpfeil, S., & Scholl, J. (2018). Reference values for peak oxygen uptake: cross-sectional analysis of cycle ergometry-based cardiopulmonary exercise tests of 10 090 adult German volunteers from the Prevention First Registry. *BMJ open*, 8(3), e018697.
- Renoux, J. C., Petit, B., Billat, V., & Koralsztein, J. P. (2000). Calculation of times to exhaustion at 100 and 120% maximal aerobic speed. *Ergonomics*, 43(2), 160-166. <https://doi.org/10.1080/001401300184530>
- Robergs, R. A., Ghiasvand, F., & Parker, D. (2004). Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 287(3), R502-516. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00114.2004>
- Röcker, K. (2010). 6.3 *Leistungsdiagnostische Verfahren*. *Sportmedizin für Ärzte: Lehrbuch auf der Grundlage des Weiterbildungssystems der Deutschen Gesellschaft für Sportmedizin und Prävention (DGSP); mit 109 Tabellen*, 65.
- 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(10), 1552-1557. <https://doi.org/10.1097/00005768-199810000-00014>

- Rossiter, H. B. (2021). The " Anaerobic Threshold" Concept Is Valid in Physiology and Medicine. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 53(5), 1089-1092.
- Roston, W. L., Whipp, B. J., Davis, J. A., Cunningham, D. A., Effros, R. M., & Wasserman, K. (1987). Oxygen uptake kinetics and lactate concentration during exercise in humans. *Am Rev Respir Dis*, 135(5), 1080-1084. <https://doi.org/10.1164/arrd.1987.135.5.1080>
- Russell, J. A. (1944). Interference with the colorimetric determination of lactic acid (Barker-Summerson method) by nitrate and nitrite ions. *Journal of Biological Chemistry*, 156, 463-465.
- Russell, M., Benton, D., & Kingsley, M. (2014). Carbohydrate ingestion before and during soccer match play and blood glucose and lactate concentrations. *J Athl Train*, 49(4), 447-453. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-49.3.12>
- Saccenti, E., Hendriks, M., & Smilde, A. K. (2020). Corruption of the Pearson correlation coefficient by measurement error and its estimation, bias, and correction under different error models. *Sci Rep*, 10(1), 438. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57247-4>
- Santos, G. A. D., Numata-Filho, E. S., Rosa, T. D. S., Passos Neves, R. V., Simões, H. G., & Moreira, S. R. (2020). Anaerobic Threshold Determination in Cycle Ergometer From Rating of Perceived Exertion. *J Strength Cond Res*. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003627>
- Schamne, J. C., Ferreira Junior, A., Araújo, A. C. d., Lima-Silva, A. E., Bertuzzi, R. C. d. M., & Okuno, N. M. (2019). Cardiac autonomic responses during and after a single session of aerobic exercise with and without blood flow restriction. *Motriz: rev. educ. fis*, 25. <https://doi.org/10.1590/s1980-6574201900030015>
- Scharhag-Rosenberger, F., Meyer, T., Gäßler, N., Faude, O., & Kindermann, W. (2009). Exercise at given percentages of $\dot{V}O_2\max$: Heterogeneous metabolic responses between individuals. *J Sci Med Sport*, 13, 79. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2008.12.626>
- Schnabel, G., & Barth, B. (2011). *Trainingslehre - Trainingswissenschaft : Leistung - Training - Wettkampf (2., aktualisierte Aufl.. ed.)*. Meyer & Meyer.
- Schneeweiss, P., Schellhorn, P., Haigis, D., Niess, A., Martus, P., & Krauss, I. (2019). Predictive Ability of a Laboratory Performance Test in Mountain Bike Cross-country

Olympic Athletes. *Int J Sports Med*, 40(6), 397-403. <https://doi.org/10.1055/a-0858-9900>

Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000002864>

Seiler, S., & Tønnessen, E. (2009). Intervals, thresholds, and long slow distance : the role of intensity and duration in endurance training. *Sportscience*, 13, 53.

Skinner, J. S., McLellan, T. M., & McLellan, T. H. (1980). The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Res Q Exerc Sport*, 51(1), 234-248. <https://doi.org/10.1080/02701367.1980.10609285>

Solberg, G., Robstad, B., Skjønsberg, O. H., & Borchsenius, F. (2005). Respiratory gas exchange indices for estimating the anaerobic threshold. *J Sports Sci Med*, 4(1), 29-36.

Spendier, F., Müller, A., Korinek, M., & Hofmann, P. (2020). Intensity Thresholds and Maximal Lactate Steady State in Small Muscle Group Exercise. *Sports (Basel)*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/sports8060077>

Stegmann, H., Kindermann, W., & Schnabel, A. (1981). Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. *International journal of sports medicine*, 2(03), 160-165.

Stratton, E., O'Brien, B. J., Harvey, J., Blitvich, J., McNicol, A. J., Janissen, D., Paton, C., & Knez, W. (2009). Treadmill Velocity Best Predicts 5000-m Run Performance. *Int J Sports Med*, 30, 45. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1038761> Barstow, T. J., & Barstow, T. J. (1994). Characterization of $\dot{V}O_2$ kinetics during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 26, 1334.

Svedahl, K., & MacIntosh, B. R. (2003). Anaerobic Threshold: The Concept and Methods of Measurement. *Revue canadienne de physiologie appliquée*, 28, 323. <https://doi.org/10.1139/h03-023>

Tikkanen, O., Hu, M., Vilavuo, T., Tolvanen, P., Cheng, S., & Finni, T. (2012). Ventilatory threshold during incremental running can be estimated using EMG shorts. *Physiol Meas*, 33(4), 603-614. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/33/4/603>

Tran, D. (2018). Cardiopulmonary Exercise Testing. *Methods Mol Biol*, 1735, 285-295. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7614-0_18

- Triska, C., Karsten, B., Beedie, C., Koller-Zeisler, B., Nimmerichter, A., & Tschan, H. (2018). Different durations within the method of best practice affect the parameters of the speed-duration relationship. *Eur J Sport Sci*, *18*, 340. <https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1418025>
- 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. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021157>
- van Hall, G., Strømstad, M., Rasmussen, P., Jans, O., Zaar, M., Gam, C., Quistorff, B., Secher, N. H., & Nielsen, H. B. (2009). Blood lactate is an important energy source for the human brain. *J Cereb Blood Flow Metab*, *29*(6), 1121-1129. <https://doi.org/10.1038/jcbfm.2009.35>
- 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. <https://doi.org/10.1055/s-2004-819942>
- Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M. (2007). Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. *Med Sci Sports Exerc*, *39*(3), 548-555. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e31802dd3e6>
- Wahl, P., Manunzio, C., Vogt, F., Strütt, S., Volmary, P., Bloch, W., & Mester, J. (2017). Accuracy of a Modified Lactate Minimum Test and Reverse Lactate Threshold Test to Determine Maximal Lactate Steady State. *J Strength Cond Res*, *31*(12), 3489-3496. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001770>
- Warburton, D. E. R., Nicol, C. W., & Bredin, S. S. D. (2006). Health benefits of physical activity: The evidence. *CMAJ*, *174*, 809. <https://doi.org/10.1503/cmaj.051351>
- Weltman, A., Snead, D., Stein, P., Seip, R., Schurrer, R., Rutt, R., & Weltman, J. (1990). Reliability and validity of a continuous incremental treadmill protocol for the determination of lactate threshold, fixed blood lactate concentrations, and $\dot{V}O_{2max}$. *Int J Sports Med*, *11*(1), 26-32. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1024757>
- Whipp, B. J., & Whipp, B. J. (1994). The slow component of O₂ uptake kinetics during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc*, *26*, 1326. <https://doi.org/10.1249/00005768-199411000-00005>

- Wilkerson, D. P., Koppo, K., Barstow, T. J., & Jones, A. M. (2004). Effect of work rate on the functional 'gain' of Phase II pulmonary O₂ uptake response to exercise. *Respir Physiol Neurobiol*, *142*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2004.06.001>
- Woolford, S. M., Withers, R. T., Craig, N. P., Bourdon, P. C., Stanef, T., & McKenzie, I. (1999). Effect of pedal cadence on the accumulated oxygen deficit, maximal aerobic power and blood lactate transition thresholds of high-performance junior endurance cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *80*(4), 285-291. <https://doi.org/10.1007/s004210050594>
- Yaeger, D., Murphy, K., Winger, J., & Stavrianeas, S. (2018). A Two-test Protocol for the Precise Determination of the Maximal Lactate Steady State. *Int J Exerc Sci*, *11*, 695.
- 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. <https://doi.org/10.1152/jappl.1983.55.4.1178>
- 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. <https://doi.org/10.1007/BF00776590>
- 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. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, *60*(4), 249-253.
- 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. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/18/2/005>
- Zuccarelli, L., Porcelli, S., Rasica, L., Marzorati, M., & Grassi, B. (2018). Comparison between slow components of HR and VO₂ kinetics: Functional significance. *Medicine and science in sports and exercise*, *50*, 1657. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001612>
- Zwingmann, L., Strütt, S., Martin, A., Volmary, P., Bloch, W., & Wahl, P. (2019). Modifications of the Dmax method in comparison to the maximal lactate steady state in young male athletes. *Phys Sportsmed*, *47*(2), 174-181. <https://doi.org/10.1080/00913847.2018.1546103>

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Möglichkeiten der Bildung von Trainingszonen (Jamnick et al., 2020).	13
Abb. 2: Bildung der Zonen anhand des Verhaltens der Sauerstoffaufnahme (bearbeitet nach Jamnick et al., 2020).....	14
Abb. 3: Critical Power/Velocity (Jones et al., 2010).....	18
Abb. 4: D _{max} (Bentley et al., 2007) bearbeitet.....	25
Abb. 5: D _{mod} (Bishop et al., 1998).	25
Abb. 6: IAT nach Stegmann (Urhausen et al., 1993).....	26
Abb. 7: mögliche Schwellen auf derselben Laktatleistungskurve (Jamnick et al., 2018)...	31
Abb. 8: Prisma Flow-Diagramm (übersetzt und angepasst nach Moher et al., (2009)	36
Abb. 9: Streuung von LT +1,5 (Hauser et al., 2014).....	59
Abb. 10: Streuung von IAT nach Stegmann (Hauser et al., 2014).....	59
Abb. 11: Auswirkungen unterschiedlicher Stufendauern (Bourdon et al., 2018).	70

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Nomenklatur von Schwellenkonzepten	21
Tab. 2: Nomenklatur von Korrelationsstärken	35
Tab. 3: PEDro	39
Tab. 4: Stufenleistungstests Laufsport	41
Tab. 5: Stufenleistungstests Radsport	45
Tab. 6: Ergebnisse Reliabilität	49
Tab. 7: Ergebnisse Validität – MLSS.....	55
Tab. 8: Ergebnisse Validität – Leistung.....	62