

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Unterschiede in der Bestimmung der anaeroben Schwelle im Leistungssport:
Dmax, modifizierte Dmax und Dickhuth-Methode im Vergleich

verfasst von | submitted by

Roman Eichhorn BSc

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien | Vienna, 2025

Studienkennzahl lt. Studienblatt |
Degree programme code as it appears on the
student record sheet:

UA 066 826

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree pro-
gramme as it appears on the student record
sheet:

Masterstudium Sportwissenschaft

Betreut von | Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Jürgen Scharhag

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	4
Abkürzungsverzeichnis.....	5
Zusammenfassung (Deutsch).....	6
Abstract (English).....	7
1 Einleitung	8
1.1 Definition und Bedeutung der Leistungsdiagnostik.....	9
1.2 Laktatdiagnostik & die Relevanz der anaeroben Schwelle	9
1.3 Methoden zur Bestimmung der anaeroben Schwelle	11
1.3.1 Individuelle anaerobe Schwelle nach Dickhuth et al. (1988)	14
1.3.2 Dmax-Methode nach Cheng et al. (1992)	15
1.3.3 Modifizierte Dmax-Methode nach Bishop et al. (1998).....	16
1.4 Problematik der Auswahl des „richtigen“ Schwellenkonzepts	16
1.5 Ziel dieser Masterarbeit.....	17
2 Methoden	18
2.1 SportsLegend-Studie	18
2.2 Studiendesign dieser Masterarbeit.....	19
2.2.1 Labortestungen	19
2.2.2 Ergometer	21
2.3 Studienteilnehmer*innen	23
2.4 Statistik	24
2.5 Untersuchte Parameter	25
3 Ergebnisse	26
3.1 Vergleich der EAS mit den Schwellenkonzepten am Radergometer	26
3.2 Vergleich der EAS mit den Schwellenkonzepten am Laufband	28
3.3 Vergleich der EAS mit den Schwellenkonzepten am Ruder-ergometer	30
3.4 Vergleich der Schwellenkonzepte untereinander	31
4 Diskussion.....	35
4.1 Vergleich der Schwellenmethoden mit der EAS	35
4.1.1 Fahrradergometer.....	35
4.1.2 Laufband	37
4.1.3 Ruderergometer	38
4.2 Vergleich der Schwellenmethoden untereinander	39
4.2.1 Radergometer	39
4.2.2 Laufband	40
4.2.3 Ruderergometer	41
4.3 Limitationen	42

4.4 Schlussfolgerungen	43
Tabellenverzeichnis.....	44
Abbildungsverzeichnis.....	45
Literaturverzeichnis	46

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit entstand im Rahmen meines Studiums der Sportwissenschaft und stellt den Abschluss einer intensiven und lehrreichen Zeit dar. In diesem Zusammenhang möchte ich all jenen danken, die mich auf diesen Weg begleitet und unterstützt haben.

Ich bedanke mich bei Univ.-Prof. Dr. Jürgen Scharhag für seine umfangreiche Betreuung, zahlreichen Anregungen und konstruktive Rückmeldungen während der gesamten Entstehung dieser Arbeit, sowie die Möglichkeit die Studie am „Österreichischen Institut für Sportmedizin“ (ÖISM) durchzuführen. Ebenso danke ich David Nader, MSc. Für seine wertvolle Unterstützung und seine hilfreichen Ratschläge, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ein Dankeschön gilt weiters den Mitarbeiter*innen des ÖISM, insbesondere Wolfgang Reith und Gabi Maier, für die Unterstützung während meiner Arbeit am ÖISM.

Mein tiefster Dank gilt meiner Familie. Meiner Schwester und insbesondere meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht und mich in jeder Hinsicht unterstützt haben. In liebevoller Erinnerung danke ich meinem Vater, der mich stets ermutigt und sportlich, wie auch beruflich stark geprägt hat.

Vielen Dank!

Abkürzungsverzeichnis

BMI	Body Mass Index
EAS	Expertendefinierte anaerobe Schwelle
EKG	Elektrokardiogramm
IAS	Individuelle anaerobe Schwelle
KFA	Körperfettanteil
LLK	Laktat-Leistungskurve
LoA	Limits of Agreement
LT1	Aerobe Schwelle
LT2	Anaerobe Schwelle
MLSS	Maximales Laktat Steady State
ÖISM	Österreichisches Institut für Sportmedizin
SportsLegend	Sportliche Leistungsfähigkeit und Gesundheit

Zusammenfassung (Deutsch)

Hintergrund: Die präzise Bestimmung der anaeroben Schwelle ist essenziell für eine gezielte Trainingssteuerung im Ausdauerleistungssport. Dabei existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Schwellenkonzepte, die sich methodisch und in ihrer praktischen Anwendbarkeit teils deutlich unterscheiden. Die Auswahl eines geeigneten Verfahrens stellt für Sportwissenschaftler*innen eine zentrale Herausforderung dar.

Ziel: Ziel dieser Masterarbeit ist es, im Rahmen der SportsLegend-Studie am Österreichischen Institut für Sportmedizin (ÖISM) die Übereinstimmung dreier etablierter Verfahren zur Bestimmung der anaeroben Schwelle – der Dmax-Methode, der modifizierten Dmax-Methode sowie der individuellen anaeroben Schwelle nach Dickhuth et al. – mit einer expertendefinierten Referenzschwelle (EAS) zu untersuchen. Darüber hinaus wurde die methodische Vergleichbarkeit der Schwellenkonzepte untereinander analysiert.

Methoden: Insgesamt wurden 32 leistungsaktive Athlet*innen (20 Männer, 12 Frauen; 23 ± 5 Jahre) in die Auswertung eingeschlossen. Die Auswertung umfasste paarweise t-Tests, Pearson-Korrelationen sowie Bland-Altman-Analysen zur methodischen Übereinstimmung. Zusätzlich wurden die mittleren Differenzen und Prozentabweichungen der Verfahren berechnet und in Vergleichsmatrizen dargestellt.

Ergebnisse: Die IAS wich auf allen Ergometern signifikant von der EAS ab (Rad: $n = 12$, $p < 0,001$; Laufband: $n = 10$, $p = 0,002$; Ruder: $n = 10$, $p = 0,001$) und zeigte die geringsten Korrelationen zur EAS ($r = 0,87\text{--}0,94$). Die Dmax-Methode unterschätzte die EAS ebenfalls signifikant (Rad: $n = 12$, $p = 0,006$; Laufband: $n = 10$, $p = 0,01$; Ruder: $n = 10$, $p = 0,002$) bei sehr hohen Korrelationen ($r = 0,95\text{--}0,98$). Die modifizierte Dmax-Methode unterschied sich am Rad- ($n = 12$, $p = 0,067$) und Ruderergometer ($n = 10$, $p = 0,45$) nicht signifikant von der EAS, zeigte jedoch am Laufband eine signifikante Überschätzung ($n = 10$, $p = 0,002$). Es zeigten sich erneut sehr hohe Korrelationen mit Werten zwischen $r = 0,96$ und $0,98$.

Schlussfolgerungen: Die modifizierte Dmax-Methode zeigte die größte Übereinstimmung mit der expertendefinierten anaeroben Schwelle und erwies sich als besonders praxistauglich. Obwohl die Dmax-Methode die EAS signifikant unterschätzte, lagen die Abweichungen gering und die Korrelationen sehr hoch, sodass auch diese Methode eine Alternative darstellt. Die Wahl des Schwellenmodells sollte dennoch unter Berücksichtigung der Belastungsform, der Zielsetzung der Diagnostik und der spezifischen Anforderungen der Sportart erfolgen.

Abstract (English)

Background: Accurate determination of the anaerobic threshold is essential for targeted training control in endurance sports. Various threshold concepts exist, differing methodologically and in practical applicability. Choosing an appropriate method represents a key challenge for sports scientists.

Objective: The aim of this master's thesis within the SportsLegend study at the Austrian Institute of Sports Medicine (ÖISM) is to examine the agreement of three established methods for determining the anaerobic threshold—the Dmax method, the modified Dmax method, and the individual anaerobic threshold according to Dickhuth et al.—with an expert-defined reference threshold (EAS). Additionally, the methodological comparability of these threshold concepts was analyzed.

Methods: A total of 32 active athletes (20 men, 12 women; 23 ± 5 years) were included in the analysis. Paired t-tests, Pearson correlations, and Bland-Altman analyses were performed to assess methodological agreement. Furthermore, mean differences and percentage deviations of the methods were calculated and presented in comparison matrices.

Results: The IAS differed significantly from the EAS on all ergometers (cycling: $n = 12$, $p < 0.001$; treadmill: $n = 10$, $p = 0.002$; rowing: $n = 10$, $p = 0.001$) and showed the lowest correlations with the EAS ($r = 0.87$ – 0.94). The Dmax method also significantly underestimated the EAS (cycling: $n = 12$, $p = 0.006$; treadmill: $n = 10$, $p = 0.01$; rowing: $n = 10$, $p = 0.002$) but exhibited very high correlations ($r = 0.95$ – 0.98). The modified Dmax method did not differ significantly from the EAS on the cycling ($n = 12$, $p = 0.067$) and rowing ergometers ($n = 10$, $p = 0.45$), but showed a significant overestimation on the treadmill ($n = 10$, $p = 0.002$). The correlations were consistently very high here as well, ranging from $r = 0.96$ to 0.98 .

Conclusions: The modified Dmax method demonstrated the highest agreement with the expert-defined anaerobic threshold and proved to be especially practical. Although the Dmax method significantly underestimated the EAS, the deviations were small and correlations very high, so this method also represents a viable alternative. The choice of threshold model should, however, consider the type of exercise, diagnostic objective, and specific sport requirements.

1 Einleitung

Leistungsdiagnostik ist ein zentraler Bestandteil der Sportwissenschaft und Trainingssteuerung. Sie umfasst eine Vielzahl an Methoden zur Bestimmung physiologischer Kenngrößen, um den aktuellen Leistungszustand von Athlet*innen zu erfassen, Trainingsprozesse individuell zu optimieren und Überlastungen sowie Verletzungen vorzubeugen (Hofmann et al., 2017; Weichenberger et al., 2023). Eine fundierte Diagnostik ist insbesondere im Hochleistungssport unverzichtbar, findet aber zunehmend auch im ambitionierten Breitensport Anwendung. Die Leistungsdiagnostik kann dabei sowohl zur Überprüfung der Wirksamkeit von Trainingsinterventionen, als auch zur langfristigen Leistungsentwicklung eingesetzt werden (Hottenrott et al., 2022; Röcker et al., 2010).

Der Einsatz leistungsdiagnostischer Verfahren ermöglicht es, die individuellen Stärken und Schwächen von Athlet*innen präzise zu identifizieren. Auf dieser Basis können Trainingspläne optimiert und gezielt an die Bedürfnisse des/der jeweiligen Sportler*in angepasst werden (Ferrauti, 2020; Hottenrott et al., 2022; Weineck, 2019). Während im Freizeit- und Gesundheitssport vor allem eine allgemeine Erfassung der Fitness und Belastbarkeit im Vordergrund steht, verfolgt die Diagnostik im Hochleistungssport das Ziel, kleinste physiologische Unterschiede festzustellen, um Trainingsreize bestmöglich zu steuern. Eine effektive Diagnostik trägt dazu bei, Trainingsintensitäten objektiv festzulegen, Ermüdungserscheinungen frühzeitig zu erkennen und die sportliche Entwicklung langfristig zu fördern (Hottenrott et al., 2022). In der Rehabilitation und in der Prävention spielt sie ebenso eine zentrale Rolle. Durch eine gezielte Analyse der physiologischen Leistungsparameter lassen sich individuelle Risikofaktoren identifizieren, die eine gezielte Intervention ermöglichen. Insbesondere in der Sportmedizin hat sich die Leistungsdiagnostik als wichtiges Instrument zur Einschätzung der gesundheitlichen Belastbarkeit etabliert (Röcker et al., 2010).

Das Österreichische Institut für Sportmedizin (ÖISM) in Wien ist eine führende Einrichtung für sportmedizinische Diagnostik und Betreuung. Neben allgemeinen sportmedizinischen Untersuchungen werden dort leistungsdiagnostische Tests für Sportler*innen aus unterschiedlichen Disziplinen durchgeführt. Die präzise Erfassung der anaeroben Schwelle spielt dabei eine zentrale Rolle, da sie eine Grundlage für die sportmedizinische Beratung und die individuelle Trainingssteuerung bildet. Durch den Einsatz moderner Messverfahren, wie etwa der Laktatdiagnostik, wird eine detaillierte Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Athleten*innen ermöglicht. Diese Analysen sind essenziell für die Entwicklung maßgeschneiderter Trainingspläne, die sowohl den aktuellen Fitnesszustand als auch die spezifischen Zielsetzungen der Sportler*innen berücksichtigen.

1.1 Definition und Bedeutung der Leistungsdiagnostik

Leistungsdiagnostik bezeichnet den Prozess der objektiven Erfassung und Analyse physiologischer Parameter, welche für die sportliche Leistungsfähigkeit relevant sind. Ziel ist es, objektive Messwerte zu generieren, die als Grundlage für die Belastungs- und Trainingssteuerung dienen (Hottenrott & Seidel, 2017; Pape et al., 2019; Röcker, 2022; Weineck, 2019). Eine differenzierte Diagnostik ist essenziell, um individuelle Anpassungen an Trainingsbelastungen vornehmen zu können und gezielte Interventionen zur Leistungssteigerung zu entwickeln (Ferrauti, 2020; Hottenrott & Seidel, 2017; Weineck, 2019). Ein wesentliches Merkmal der Leistungsdiagnostik ist ihre Interdisziplinarität. Sie vereint Erkenntnisse aus der Sportwissenschaft, der Trainingslehre, der Medizin und der Biomechanik, um eine möglichst umfassende Analyse der individuellen Leistungsfähigkeit zu ermöglichen. Dabei werden sowohl kardiovaskuläre und metabolische als auch muskuläre und koordinative Aspekte betrachtet. Die erhobenen Daten liefern wertvolle Informationen über den aktuellen Trainingszustand, die individuelle Belastbarkeit und die langfristige Leistungsentwicklung von Sportler*innen (Güllich & Krüger, 2022; Hottenrott & Seidel, 2017). In der metabolisch-physiologischen Leistungsdiagnostik werden verschiedene Methoden zur objektiven Messung und Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit angewendet. Die Basismethode stellt hierbei die Ergometrie dar (Röcker et al., 2010). Welche Art der Ergometrie (Rad-, Laufband-, Ruderergometrie, etc.) dabei zum Einsatz kommt, hängt unter anderem von den spezifischen Anforderungen der jeweiligen Sportart ab, welche der/die Athlet*in betreibt. Zusätzlich zur Ergometrie werden häufig weitere Parameter simultan erfasst. Eine zentrale Methode ist die Spiroergometrie, die eine präzise Analyse der Sauerstoffaufnahme und des Energieverbrauchs unter Belastung ermöglicht. Ergänzend dazu erfolgt oft eine Herzfrequenzanalyse, um das kardiovaskuläre Ansprechverhalten zu bewerten. Besonders bedeutsam im diagnostischen Prozess ist die Laktatdiagnostik, da sie wertvolle Einblicke in die individuelle Stoffwechselreaktion auf körperliche Belastung liefert und somit Rückschlüsse auf die metabolische Belastung während körperlicher Anstrengung möglich sind (Heck et al., 2022; Pape et al., 2019; Röcker, 2008; Röcker et al., 2010).

1.2 Laktatdiagnostik & die Relevanz der anaeroben Schwelle

Die Laktatkonzentration im kapillären Blut dient, wie zuvor erwähnt, in der Leistungsdiagnostik als wichtiger Parameter zur Bestimmung der metabolischen Belastung während einer definierten körperlichen Belastung (Röcker, 2008). Dabei spielen die aerobe und anaerobe Schwelle eine zentrale Rolle, da sie die wesentlichen Übergangspunkte zwischen unterschiedlichen Stoffwechselprozessen markieren. Der menschliche Energie-

stoffwechsel stützt sich auf aerobe und anaerobe Prozesse, die in Abhängigkeit von der Belastungsintensität variieren (Hofmann et al., 2017; Jamnick et al., 2020; Poole et al., 2021). Unter niedriger bis moderater Belastung erfolgt die Energiegewinnung überwiegend aerob, wobei Kohlenhydrate und Fette als Hauptsubstrate genutzt werden. Mit steigender Intensität nimmt der anaerobe Stoffwechselanteil zu, wodurch vermehrt Laktat gebildet wird (Hofmann et al., 2017; Poole et al., 2021).

Die aerobe Schwelle (LT1) bezeichnet die Belastungsintensität, bei der erstmals ein leichter Anstieg der Laktatkonzentration über das Ruhe-Niveau hinaus messbar ist (Hofmann et al., 2017; Jamnick et al., 2020; Mann et al., 2013; Poole et al., 2021). Dies ist ein Indikator für eine verstärkte glykolytische Aktivität, jedoch befindet sich das System noch weitgehend im Gleichgewicht (Steady State) (Hofmann et al., 2017; Mann et al., 2013; Poole et al., 2021).

Die anaerobe Schwelle (LT2) stellt den Punkt dar, an dem die Laktatakkumulation deutlich zunimmt und ein Steady State nicht mehr aufrechterhalten werden kann. Sie markiert die maximale Belastungsintensität, bei der eine metabolische Homöostase besteht. Oberhalb dieser Schwelle übersteigt die Laktatproduktion die Eliminationskapazität, was zu einer progressiven Azidose führt (Hofmann et al., 2017; Mann et al., 2013; Poole et al., 2021).

Die Kenntnis der anaeroben Schwelle ermöglicht eine gezielte Steuerung des Trainings in verschiedenen Intensitätsbereichen, die auf individuellen Stoffwechselanpassungen basieren (Hofmann et al., 2017; Weichenberger et al., 2023). Im Grundlagenausdauerbereich, also im Bereich der ersten Laktatschwelle (LT1), steht die Verbesserung der aeroben Leistungsfähigkeit im Mittelpunkt. Dies wird durch eine erhöhte Mitochondrienzahl, eine gesteigerte Kapillardichte in der Muskulatur sowie eine optimierte Fettstoffwechselkapazität erreicht. Ein intensiveres Training an der zweiten Laktatschwelle (LT2) führt zu einem Anstieg der Laktatproduktion. Allerdings wird das entstehende Laktat nahezu in gleichem Maße abgebaut, sodass ein Gleichgewicht zwischen Produktion und Elimination besteht. Ziel dieses Trainings ist es, die Fähigkeit des Körpers zu verbessern, höhere Laktatkonzentrationen zu tolerieren, und gleichzeitig die Effizienz der glykolytischen Energiegewinnung zu steigern. Oberhalb der LT2 erfolgt die Energiebereitstellung fast ausschließlich anaerob. In diesem Bereich steigt die Laktatkonzentration trotz konstanter Belastung weiter an, was letztlich zur Muskelübersäuerung führt und die Leistungsfähigkeit begrenzt. Ein Training oberhalb der anaeroben Schwelle dient daher dazu, die Laktattoleranz weiter zu erhöhen und die maximale Leistungsfähigkeit zu verbessern (Casado et al., 2023; Weichenberger et al., 2023).

Eine präzise Bestimmung dieses Wertes ermöglicht eine gezielte Trainingssteuerung, da sich an ihr individuelle Belastungsintensitäten und Wettkampfstrategien ausrichten lassen (Weineck, 2019). Die Wahl der Methode zur Bestimmung der anaeroben Schwelle kann dabei einen erheblichen Einfluss auf die Trainingssteuerung haben, da unterschiedliche Verfahren zu abweichenden Ergebnissen führen können (Faude et al., 2009; Jamnick et al., 2020).

1.3 Methoden zur Bestimmung der anaeroben Schwelle

Seit der erstmaligen Nennung des Begriffs der anaeroben Schwelle durch Wasserman et al. im Jahr 1964 hat die wissenschaftliche Forschung eine Vielzahl an Methoden und Konzepten zur Bestimmung der anaeroben Laktatschwelle hervorgebracht. Zahlreiche Forschungsgruppen haben seither intensiv daran gearbeitet, die physiologischen Mechanismen dahinter besser zu verstehen und die diagnostische Genauigkeit weiter zu verfeinern (Heck et al., 2022; Poole et al., 2021). Tabelle 1 bietet eine detaillierte Übersicht über laktatbasierte Schwellenkonzepte in Anlehnung an Heck et al. (2022).

Tab. 1 Übersicht über laktatbasierte Schwellenkonzepte

Autoren	Jahr	Bezeichnung	Bestimmungsmethode
Hollmann et al.	1961	nicht-linearer Anstieg der Laktatkonzentration	Punkt des optimalen Wirkungsgrades der der Atmung (PoW)
Wasserman et al.	1964	erster Anstieg über der Basalkonzentration	anaerobic threshold (AT) lactate threshold (LT)
Davis et al.	1976	Initialer Anstieg der Blutlaktatkonzentration über dem Ruheniveau	lactate threshold (LT)
Mader et al.	1976	aerob-anaerobe Schwelle	Laufgeschwindigkeit bei 4 mmol/l Laktat
Davis et al.	1976	anaerobic threshold	Abrupter Anstieg des Laktats im venösen Blut
Kindermann et al.	1978	aerobe Schwelle anaerobe Schwelle aerob-anaerober Übergang	Laufgeschwindigkeit bei ≈ 2 mmol/l Laufgeschwindigkeit bei ≈ 4 mmol/l Geschwindigkeitsbereich zwischen 2-4 mmol/l
Keul et al.	1979	Individuelle anaerobe Schwelle	Laufgeschwindigkeit bei einem Tangentenwinkel von $51^{\circ}34'$ ($\tan \alpha$
Simon et al.	1981		

			$= 1,26 \text{ [mmol/l]} / \text{[km/h]}$ Laufgeschwindigkeit bei einem Tangentenwinkel von 45° ($\tan \alpha = 1 \text{ [mmol/l]} / \text{[km/h]}$)
Farrell et al.	1979	onset of plasma lactate accumulation (OPLA)	Anstieg des Plasmalaktats über den Ruhewert
Davis & Gass	1979 und 1981	anaerobic threshold (AT1 & AT2)	AT1 = Leistung beim ersten Anstieg der Laktatleistungskurve (LLK) AT 2 = Leistung beim Wiederanstieg der LLK nach Vorbelastung
Berg et al.	1980	minimales Laktatäquivalent	Quotient aus Laktat und relativer Sauerstoffaufnahme
Ivy et al.	1980	lactate threshold	Belastung beim Beginn des Laktatanstiegs
Sjodin & Jakobs	1981	onset of blood lactate accumulation (OBLA)	Identisch mit der Mader-Methode: Leistung bei 4 mmol/l Laktat
Pessenhofer et al.	1981	individuell aerob-anaerober Übergang	Minimum einer quadratischen Funktion der LLK
Stegmann & Kindermann	1981	individuelle anaerobe Schwelle (iaS)	Tangente an die LLK
LaFontaine et al.	1981	maximal steady state (MMS)	MMS = Laufbandgeschwindigkeit bei 2,2 mmol/l venösem Blutlaktat
Bunc et al.	1982	individual anaerobic threshold	Schnittpunkt der Winkelhalbierenden mit der LLK
Heck et al.	1982 1985	maximales Laktatgleichgewicht maximales Laktat-Steady-State	Höchste Leistung bei 25- bzw. 30-minütiger Dauerbelastung, bei der das Laktat in den letzten 20min um nicht mehr als 1 mmol/l ansteigt
Davis et al.	1983	anaerobic threshold (AT), lactate turnpoint (LTP)	AT = Leistung beim ersten Anstieg der LLK LTP = Leistung beim zweiten Anstieg der LLK
Coyle et al.	1983	lactate threshold (LT)	$\dot{V}O_2$ bei Laktatanstieg von 1 mmol/l

			über Baseline während des Stufen- tests
Beaver et al.	1985	lactate threshold (LT)	LT = Schnittpunkt von 2 Regressi- onsgeraden einer Log(Laktat)- Log($\dot{V}O_2$)-Beziehung
Mader & Heck	1986	Crossing Point	Bestimmung des maximalen Laktat- Steady-State durch Messung der $\dot{V}O_{2max}$ und der maximalen Laktat- bildungsrate sowie Berechnung des Crossing Point über die Energie- stoffwechselgleichung nach Mader (1984)
Simon	1986	individuelle anaerobe	Leistung bei Laktat = aerobe Schwelle + 1,5 mmol/l
Dickhuth et al.	1988	Schwelle	Leistung bei Laktat = Basislaktat + 1,5 mmol/l
Gries et al. Tegtbur et al.	1989	Laktatsenke	Leistung am tiefsten Punkt einer LLK nach einer kurzzeitigen Maxi- malbelastung gefolgt von einer Pause mit anschließendem Stufen- test
Cheng et al.	1992	Dmax-Methode	Größter senkrechter Abstand zwi- schen LLK und der Geraden zwi- schen erstem Belastungslaktatwert & Endlaktatwert
Hille & Geiger	1993	Punkt der maximalen Krümmung der LLK (PmK)	PmK = Leistung bei größter Krüm- mung der LLK
Borch et al.	1993	maximal steady-state (MSSW)	MSSW = Belastung bei 3 mmol/l bzw. bei 0,086 mmol/l/min Laktat in einer exponentiellen Laktat- Geschwindigkeit-Beziehung
Bishop et al.	1998	modifizierte Dmax-Methode	Größter senkrechter Abstand zwi- schen LLK und der Geraden zwi- schen tiefstem Punkt der LLK (Ba- sislaktat) und dem Endlaktatwert
Baldari & Guidetti	2000	individual anaerobic	Anstieg des Laktats >0,5 mmol/l von

		threshold (IAT)	einer Stufe zur nächstfolgenden
Dotan	2012	reverse lactate threshold (RLT)	Stufentest bis oberhalb des max-Lass gefolgt von abnehmenden Belastungsstufen; die Leistung beim höchsten Punkt der Laktatkurve ist die RLT
Wahl et al.	2017	mod. Laktat-Minimum-Test (= Laktatsenke)	Leistung am tiefsten Punkt einer LLK nach einer kurzzeitigen Maximalbelastung gefolgt von einer Pause mit anschließendem Stufentest
Wahl et al.	2017	mod. reverse lactate threshold (mRLT)	Stufentest bis oberhalb des max-Lass gefolgt abnehmenden Belastungsstufen; die Leistung beim höchsten Punkt der Laktatkurve ist die mRLT

Quelle: mod. n. Heck et al., 2022, S. 209-210

Am ÖISM kommen zur Bestimmung der LT2 die Methode nach Dickhuth et al. (1988) sowie die Dmax-Methode nach Cheng et al. (1992) und deren modifizierte Variante nach Bishop et al. (1998) zum Einsatz. Bei der Radergometrie erfolgt die Bestimmung der LT2 in einer abgewandelten Form des ursprünglichen Konzepts nach Dickhuth et al. (1988). Wie bei Röcker et al. (2010) beschrieben, wird anstelle eines Anstiegs von +1,5 mmol/l die anaerobe Schwelle bei +1,0 mmol/l festgelegt. Diese Verfahren haben sich in der sportwissenschaftlichen Diagnostik bewährt und stehen daher im Fokus der vorliegenden Arbeit.

1.3.1 Individuelle anaerobe Schwelle nach Dickhuth et al. (1988)

Die Methode zur Bestimmung der aerob-anaeroben Schwelle nach Dickhuth et al. (1988) basiert auf der Annahme, dass der Schwellenwert in einem festen Abstand zum minimalen Laktatäquivalent liegt, welches in der Regel dem Basislaktatwert entspricht. Dabei wird berücksichtigt, dass dieser Wert dynamisch auf Veränderungen der Basislaktatkonzentration reagiert. In ihrer ursprünglichen Untersuchung definierten Dickhuth et al. die „Individuelle anaerobe Schwelle“ (IAS), indem sie die Laktatkonzentration am Punkt des minimalen Laktatäquivalents als Referenz nahmen und eine Schwellenzone festlegten: Die Obergrenze wurde mit einem Anstieg um 1,5 mmol/l und die Untergrenze mit einem Anstieg um 1,0 mmol/l über dem Basislaktat bestimmt (Dickhuth et al., 1988; Heck et al.,

2022). Abbildung 1 veranschaulicht die Bestimmung der IAS anhand der 1,5-mmol/l-Methode nach Dickhuth et al. (1988).

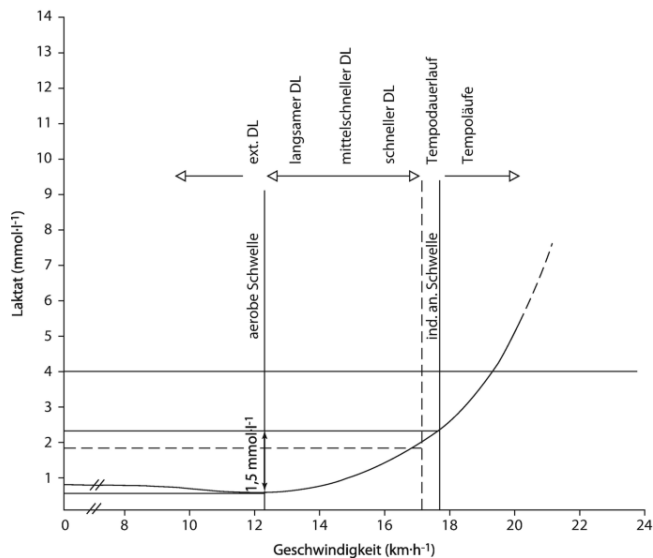


Abb. 1: Bestimmung der IAS nach Dickhuth et al. (1988)

1.3.2 Dmax-Methode nach Cheng et al. (1992)

Die Bestimmung der anaeroben Schwelle nach der Dmax-Methode von Cheng et al. (1992) basiert auf einer mathematischen Analyse der Laktat-Leistungskurve (LLK), bei der der Schwellenpunkt als jener Bereich mit der maximalen Krümmung zwischen zwei definierten Referenzpunkten identifiziert wird. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, wird dazu zunächst eine lineare Referenzlinie konstruiert, welche die erste Belastungslaktatkonzentration mit der höchsten Laktatkonzentration verbindet. Der Schwellenwert ergibt sich schließlich als jener Punkt auf der interpolierten Laktatkurve, der den größten senkrechten Abstand zu dieser Referenzlinie aufweist.

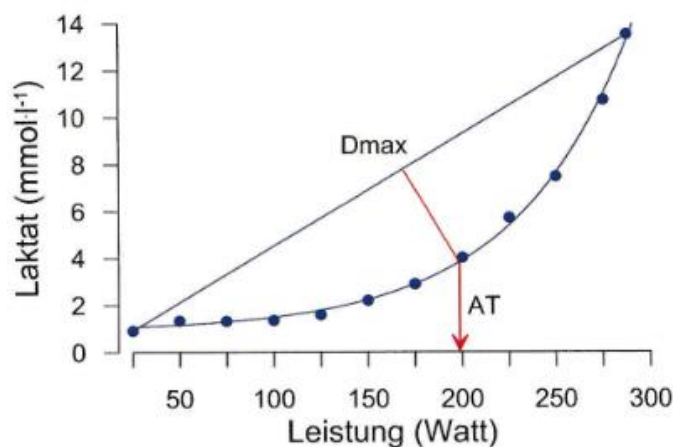


Abb. 2: Bestimmung der anaeroben Schwelle nach Cheng et al. (1992)

1.3.3 Modifizierte Dmax-Methode nach Bishop et al. (1998)

Die modifizierte Dmax-Methode nach Bishop et al. (1998) basiert, wie die ursprüngliche Dmax-Methode nach Cheng et al. (1992), auf der mathematischen Analyse der Laktat-Leistungskurve zur Bestimmung der anaeroben Laktatschwelle. Der wesentliche Unterschied besteht jedoch in der Wahl des Ausgangspunkts für die Referenzlinie. Während die klassische Dmax-Methode die erste Laktatkonzentration des LLK heranzieht, nutzt die modifizierte Variante den ersten Belastungswert, bei dem die Laktatkonzentration gegenüber dem vorherigen Wert um mindestens 0,4 mmol/l ansteigt.

1.4 Problematik der Auswahl des „richtigen“ Schwellenkonzepts

Die Bestimmung der Laktatschwelle (LT2) gestaltet sich aufgrund der Vielzahl an Konzepten und der Schwierigkeit, das „richtige“ Modell auszuwählen, als komplex. Wie bereits in Kapitel 1.3 erläutert, existieren verschiedene Ansätze, darunter die klassische 4 mmol/l-Schwelle, mathematische Laktatmodelle und die subjektive, visuelle Bestimmung. Innerhalb der mathematischen Modelle gibt es wiederum zahlreiche Varianten, die auf unterschiedlichen Annahmen und Berechnungsmethoden basieren, wie etwa lineare Regressionen oder Exponentialfunktionen. Jedes dieser Konzepte beruht auf spezifischen Definitionen und Annahmen, was zu einer unscharfen Abgrenzung und einer gewissen Unsicherheit führt, welches Modell die physiologische Realität am besten widerspiegelt.

Ein wesentlicher Faktor bei der Wahl des Schwellenmodells ist der Einfluss des Testprotokolls und der Anstiegsgeschwindigkeit der Belastung. Verschiedene Belastungsprotokolle und unterschiedliche Anstiegswegungen können zu abweichenden Ergebnissen führen (Faude et al., 2009; Heck & Beneke, 2008; Jamnick et al., 2020). So sind etwa die Dmax- und modifizierte Dmax-Methode abhängig von der Stufendauer und der Startintensität (Jamnick et al., 2020). Bei der Auswahl des geeigneten Schwellenkonzepts muss zudem beachtet werden, dass die Ergebnisse in hohem Maße von den spezifischen Vorgehensweisen abhängen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Sportartspezifität. Jede Sportart stellt unterschiedliche Anforderungen an das Energieversorgungssystem, was dazu führt, dass Laktatreaktionen je nach Sportart variieren. Schwellenkonzepte werden oft für eine spezifische Sportart, wie Radfahren, Rudern, Laufen oder Schwimmen, entwickelt. Wird ein solches Modell auf eine andere Sportart angewendet, ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse fraglich. Zudem spielt die Probandenspezifität eine entscheidende Rolle. Viele Studien zur LT2-Bestimmung wurden an bestimmten Probandengruppen, wie gut trainierten Ausdauersportler*innen, Leistungssportler*innen oder auch Student*innen, durchgeführt. Daher sollten bei der Anwendung der Konzepte auch personenspezifische Faktoren wie Alter, Geschlecht und Leistungsniveau berücksichtigt werden. Die Validität der

Schwellenkonzepte ist häufig nur innerhalb der spezifischen Probandengruppen gegeben, für die sie entwickelt wurden. Für eine breitere Anwendbarkeit auf unterschiedliche Athlet*innen muss dieser Aspekt in der Auswahl des Modells berücksichtigt werden (Heck et al., 2022; Jamnick et al., 2020). Zuletzt spielt auch die Testökonomie eine wichtige Rolle. Einige Modelle erfordern eine vollständige Ausbelastung oder sogar mehrere Nachbelastungslaktatmessungen, was den zeitlichen Aufwand erhöht und die Praktikabilität des Tests einschränken kann. Daher ist es entscheidend, ein Modell zu wählen, das sowohl in Bezug auf Genauigkeit als auch auf die praktischen Anforderungen im Sportalltag geeignet ist (Heck et al., 2022).

1.5 Ziel dieser Masterarbeit

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Unterschiede in der Bestimmung der anaeroben Schwelle mithilfe der D_{max} , der modifizierten D_{max} und der Dickhuth-Methode zu untersuchen und miteinander, sowie mit einer individuellen Bestimmung der LT_2 , zu vergleichen. Unter Berücksichtigung der dargestellten Problematik soll im Rahmen der Laktat-Leistungsdiagnostik am ÖISM das geeignetste dieser Schwellenkonzepte für unterschiedliche Ergometer-Typen (Rad, Laufband, Ruder) ermittelt werden. Dabei wird besonders darauf geachtet, wie sich die Testökonomie, die Einflussnahme durch Testprotokolle und die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Sportart auf die Bestimmung der anaeroben Schwelle auswirken. Ziel ist es, ein für jede Ergometer-Art optimales und praxistaugliches Konzept zu identifizieren, das eine präzise und verlässliche Bestimmung der anaeroben Schwelle ermöglicht.

2 Methoden

2.1 SportsLegend-Studie

Die SportsLegend-Studie (Sportliche Leistungsfähigkeit und Gesundheit) stellt ein langfristig angelegtes Forschungsprojekt des Österreichischen Instituts für Sportmedizin dar, das auf die systematische Erhebung und Archivierung anthropometrischer-, medizinischer- und leistungsdiagnostischer Parameter abzielt. Die Datenerhebung erfolgt an einer primär sportlich aktiven und gesundheitlich unauffälligen Population. Ziel dieser Erfassung ist der Aufbau einer umfangreichen Datenbasis, welche die Grundlage für verschiedenartige wissenschaftliche Fragestellungen im Rahmen von Querschnitts- und Längsschnittanalysen bildet. Die Teilnahme an der Studie erfolgt ausschließlich nach schriftlicher Einwilligungserklärung der Proband*innen, und ein positives Ethikvotum für die Durchführung liegt vor.

Die Datenbank liegt in Form einer Microsoft Excel-Datei vor und ist ausschließlich auf zwei geschützten institutsinternen Computern gespeichert. Der Zugriff darauf ist nur befugtem Personal möglich. Zur Wahrung der datenschutzrechtlichen Bestimmungen erfolgt die Datenverarbeitung in pseudonymisierter Form, sodass keine Rückschlüsse auf die Identität der teilnehmenden Personen möglich sind. Die Datenbank umfasst eine Vielzahl relevanter Variablen, die sowohl anthropometrische Informationen als auch medizinische und leistungsphysiologische Parameter enthalten. Zu den erfassten Merkmalen zählen unter anderem Alter, Geschlecht, Körpergröße, Körpergewicht, Body Mass Index (BMI), Körperfettanteil (KFA), Sportart und individuelles Leistungsniveau. Darüber hinaus sind Ruheparameter wie Herzfrequenz, Blutdruck, Ergebnisse aus dem Ruhe-Elektrokardiogramm (EKG) sowie Messwerte aus der Lungenfunktion dokumentiert. Ergänzt werden diese durch biochemische Laborwerte und belastungsbezogene Daten aus leistungsdiagnostischen Tests, insbesondere Laktatkonzentrationen und erreichte maximale Leistungen, differenziert nach Testgerät (Fahrradergometer, Laufband oder Ruderergometer).

Da einzelne Sportler*innen im Laufe mehrerer Jahre wiederholt untersucht wurden, enthält die Datenbank zum Teil mehrfache Datensätze derselben Personen mit unterschiedlichen Erhebungszeitpunkten. Die Datenbank wird kontinuierlich erweitert und stellt eine zentrale Grundlage für verschiedene wissenschaftliche Fragestellungen im Bereich der Sportmedizin und Leistungsphysiologie dar. Für die vorliegende Arbeit wurden ausschließlich jene Datensätze berücksichtigt, die vollständige und valide Informationen zur Laktatleistungsdiagnostik auf einem der drei eingesetzten Ergometer-Typen enthalten.

Bis zum Zeitpunkt der aktuellen Erhebung konnten bereits Datensätze von insgesamt 943 Sportler*innen generiert und in die Datenbank integriert werden. Die Untersuchungen wurden vollständig am ÖISM durchgeführt, variieren jedoch in Umfang und Inhalt in Abhängigkeit von der jeweils zugrunde liegenden diagnostischen Fragestellung. So unterscheiden sich beispielsweise die erhobenen Parameter im Rahmen einer sportärztlichen Tauglichkeitsuntersuchung von jenen einer umfassenden leistungsdiagnostischen Testung.

Für die vorliegende Masterarbeit wurden ausgewählte leistungsdiagnostische Datensätze aus dieser laufenden Studie herangezogen und einer gezielten Analyse im Hinblick auf die Fragestellung der Arbeit unterzogen.

2.2 Studiendesign dieser Masterarbeit

Datenschutz

Im Zuge dieser Masterarbeit werden medizinische und personenbezogene Daten verwendet, die im Rahmen der SportsLegend-Studie am ÖISM erhoben wurden. Vor der Aufnahme in die Studien-Datenbank erfolgt eine Pseudonymisierung der Teilnehmer*innen, wobei jeder Person eine individuelle Kennnummer zugewiesen wird. Diese Maßnahme wird mittels Microsoft Excel umgesetzt und stellt sicher, dass über die Datenbank selbst keine Rückschlüsse auf die Identität der jeweiligen Person möglich sind. Die pseudonymisierte Datenbank sowie die Zuordnungstabelle mit den Originalkennungen befinden sich auf einem gesicherten Rechner innerhalb des ÖISM. Der Zugang zu diesem Rechner ist passwortgeschützt und räumlich durch einen verschlossenen Bereich zusätzlich abgesichert. Nur autorisierte Mitarbeiter*innen haben Zugriff auf die Daten, wobei sie sich im Vorfeld durch Unterzeichnung einer Vertraulichkeitserklärung zur Wahrung des Datenschutzes verpflichten. Die Teilnahme an der SportsLegend-Studie setzt eine schriftliche Einwilligungserklärung der Proband*innen voraus, die vor Beginn der jeweiligen Untersuchung am ÖISM eingeholt wird. Durch die konsequente Umsetzung der Pseudonymisierung ist es im Rahmen dieser Masterarbeit nicht möglich, einzelne Personen zu identifizieren. Die datenschutzrechtlichen Anforderungen an den Umgang mit sensiblen Gesundheitsdaten werden damit vollumfänglich erfüllt.

2.2.1 Labortestungen

Vor jeder ergometrischen Belastungsuntersuchung wurde eine umfassende sportmedizinische Eingangsuntersuchung am ÖISM durchgeführt. Diese diente in erster Linie der gesundheitlichen Absicherung der teilnehmenden Sportler*innen sowie der Feststellung möglicher Kontraindikationen für eine Belastungstestung.

Ein zentrales Element der medizinischen Untersuchung war die strukturierte Anamnese. Diese umfasste die Eigenanamnese, die Sport- und Trainingsanamnese sowie die Familienanamnese. Im Rahmen der Eigenanamnese wurde erhoben, ob akute oder chronische Erkrankungen vorlagen, die eine Teilnahme an der Ergometrie ausschließen würden. In Fällen mit medizinisch relevanten Vorerkrankungen wurde auf die Durchführung der Belastungstests verzichtet. Die Sportanamnese diente der Erfassung der aktuellen sportlichen Aktivität. Ergänzend wurde im Rahmen der Trainingsanamnese gezielt nach krankheits- oder verletzungsbedingten Unterbrechungen in der sportlichen Betätigung gefragt. Die Familienanamnese wiederum umfasste Informationen zu kardiovaskulären Erkrankungen sowie zu chronischen oder genetisch bedingten Erkrankungen innerhalb der Familie, um potenzielle Risiken frühzeitig zu erkennen.

Ergänzend zur Anamnese erfolgte eine standardisierte klinische Untersuchung. Im Rahmen der Untersuchung wurden grundlegende anthropometrische Daten erfasst. Darunter Körpergröße, Körpergewicht sowie der berechnete BMI und der Körperfettanteil. Der Körperfettanteil wurde durch die Hautfaltenmessung nach der 10-Punkt-Methode von Pařízková (1961) ermittelt. Zudem wurde eine körperliche Untersuchung mittels Inspektion, Palpation, Perkussion und Auskultation durchgeführt. Der Blutdruck wurde in Ruhe an beiden Armen gemessen, um etwaige Differenzen zu dokumentieren. Zudem wurde eine orientierende orthopädische und neurologische Untersuchung durchgeführt, um muskuläre Dysbalancen, Einschränkungen im Bewegungsapparat oder neurologische Auffälligkeiten auszuschließen. Zur Beurteilung der kardialen Ruhefunktion wurde bei allen Proband*innen ein Ruhe-EKG aufgezeichnet. Zusätzlich erfolgte ein Lungenfunktionstest mittels Spirometrie, bei der insbesondere das Lungenvolumen und die maximale Atemstromstärke gemessen wurden. Eine ergänzende Blutabnahme diente der laborchemischen Kontrolle relevanter Gesundheitsparameter.

Vor Beginn der eigentlichen Ergometrie erhielten die Sportler*innen eine kurze Gewöhnungsphase, um sich mit dem jeweiligen Testgerät vertraut zu machen. Die Auswahl des Ergometertyps (Fahrrad-, Laufband- oder Ruderergometer) erfolgte sportartspezifisch. Im Falle von Triathlet*innen bestand die Möglichkeit, je nach individueller Schwerpunktsetzung oder Trainingsstand, zwischen Fahrrad- und Laufbandergometrie zu wählen.

Die Belastungstests wurden unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Während der Ergometrie befanden sich ausschließlich der/die getestete Athlet*in sowie ein Sportwissenschaftler im Testraum, der für die Dauer der Untersuchung geschlossen blieb. Die Raumtemperatur wurde konstant zwischen 20 und 22 °C gehalten, um vergleichbare Testbedingungen sicherzustellen. Die Erhebung der Blutlaktatkonzentrationen erfolgte am Ende jeder Belastungsstufe sowie unmittelbar nach Abbruch der Ergometrie. Zeitgleich

wurde während des gesamten Belastungsverlaufs ein EKG aufgezeichnet, um die kardiovaskuläre Belastbarkeit und das Herzrhythmusverhalten kontinuierlich zu überwachen.

Die Durchführung der Tests erfolgte mit Hilfe der Software custo diagnostic der Firma custo med GmbH. Während den Ergometrien wurden unterschiedliche Protokolle verwendet, die jeweils auf das spezifische Gerät abgestimmt waren. Beim Radfahren startete die Belastung bei 60–100W, mit Inkrementen von 20W bzw. 30W und einer Stufendauer von 3 Minuten. Das Laufbandprotokoll begann bei einer Geschwindigkeit von 8km/h mit einem Inkrement von 2km/h pro Stufe. Die Neigung blieb dabei konstant auf 0% eingestellt, was einer ebenen Lauffläche entspricht. Die Stufendauer betrug 3 Minuten. Für das Rudergehärt kamen zwei Standardprotokolle zum Einsatz, wobei die Umstellung aufgrund externer Vorgaben des Ruderverbandes erfolgte. Das erste Protokoll begann mit einer Belastung von 60W, die in 30W-Schritten alle 3 Minuten gesteigert wurde, während das zweite Protokoll mit 100W startete und die Belastung alle 4 Minuten um 40W erhöht wurde.

Die Blutlaktatmessung erfolgte mittels einer 20 Mykroliter Kapillarprobe am hyperämisierten (Finalgon-Salbe) Ohrläppchen. Zur Auswertung der Laktatproben wurde das Messgerät Biosen S-Line des Unternehmens EKF-diagnostic GmbH eingesetzt. Die Auswertung der Laktatwerte erfolgte anschließend mit der Software Ergonizer 5.16.4. Mittels der Software Ergonizer konnte die LT2 durch verschiedene Schwellenkonzepte bestimmt werden. Zusätzlich wurde die anaerobe Schwelle individuell von zwei Sportwissenschaftlern des ÖISM bestimmt, die über mehrjährige Erfahrung in der Durchführung und Auswertung von Laktatleistungsdiagnostiken verfügen.

2.2.2 Ergometer

Fahrradergometer

Abbildung 3 zeigt das verwendete Fahrradergometer. Das Lode Excalibur Sport ist ein stationäres Fahrradergometer, das speziell für präzise Leistungsdiagnostiken konzipiert wurde. Es ermöglicht eine exakte Widerstandsregelung über ein elektromagnetisch gesteuertes System, das in 1-Watt-Schritten genau justierbar ist. Der Widerstandsbereich reicht von 8 bis 2500W, und das Gerät kann eine maximale Belastung von 180kg tragen. Es misst die Trittfrequenz, die bis zu 180 Umdrehungen pro Minute betragen kann, und

ermöglicht somit die Durchführung von Tests mit einer hohen Präzision.



Abb. 3: Lode Excalibur Sport Fahrradergometer (Medical Expo, 2025)

Laufbandergometer

Das h/p/cosmos Pulsar 3P Laufband ist ein hochpräzises Gerät für die Durchführung von ergometrischen Tests und sportmedizinischen Diagnostiken. Es bietet einen Geschwindigkeitsbereich von 0,1 bis 40km/h und einen Steigungsbereich von -25% bis +25%, der in 0,1%-Schritten verstellbar ist. Mit einer maximalen Belastbarkeit von 200kg und einer Motorleistung von 4,3kW bei Dauerbetrieb ist es besonders stabil und leistungsfähig. Abbildung 4 veranschaulicht das Gerät mit einer Laufbandfläche von 190cm x 65cm, was eine komfortable Nutzung ermöglicht. Zur Sicherheit verfügt das Gerät über einen Not-Aus-Schalter und eine automatische Stopp-Funktion bei Fehlauflösung. Das h/p/cosmos Pulsar 3P wird hauptsächlich für Ausdauerdiagnostik, Laktatmessungen und VO₂max-Tests genutzt.



Abb. 4: h/p/cosmos pulsar 3p Laufbandergometer (h/p/cosmos, 2025)

Ruderergometer

Für die Ruder-Athlet*innen kam das in Abbildung 5 gezeigte RP3-Ruderergometer (Model S / RP3 Rowing) zum Einsatz. Dieses Gerät, das von der International Rowing Federation unterstützt wird, stellt einen modernen Rudersimulator dar, der mittlerweile weltweit von Athlet*innen aufgrund seiner fortschrittlichen, dynamischen Technologie genutzt wird. Das Ergometersystem weist eine Länge von 2,5m und eine Breite von 0,5m auf, mit einer Sitzhöhe von 0,48m. Der Kettenantrieb ist in einem stabilen Gehäuse untergebracht. Das Gerät ist aus Edelstahl gefertigt, was eine hohe Belastbarkeit ermöglicht. Es kann ein Maximalgewicht von über vier Tonnen tragen. Das Gesamtgewicht des Geräts beträgt 20kg.



Abb. 5: RP3 Rowing Ruderergometer (RP3 Rowing, 2025)

2.3 Studienteilnehmer*innen

Die Studie umfasste insgesamt 32 Leistungssportler*innen, davon 12 Frauen und 20 Männer, die allesamt eine leistungsdiagnostische Untersuchung am ÖISM absolvierten. Der Begriff Leistungssportler*in wurde in Anlehnung an die Beiträge von Araújo & Scharhag (2016), McKinney et al. (2019) und Scharhag (2018) definiert. Die Klassifizierung basierte auf drei Kriterien: einem Alter zwischen 18 und 35 Jahren, einem wöchentlichen Trainingsumfang von mindestens zehn Stunden und der regelmäßigen Teilnahme an nationalen oder internationalen Wettkämpfen. Der Erhebungszeitraum der Daten erstreckte sich von Januar 2023 bis April 2025. Die Athlet*innen kamen aus verschiedenen Sportarten, darunter Rudern, Segeln, Handball, Fußball, Mountainbiking, Laufen, Triathlon und Leichtathletik. Bei den weiblichen Athletinnen lag die Körpergröße zwischen 159 und 182 cm, das Körpergewicht zwischen 52 und 83 kg und das Alter zwischen 18 und 29 Jahren. Der Body-Mass-Index variierte zwischen 19 und 25 kg·m⁻². Die Trainingsumfänge lagen zwischen 10,5 und 35 Stunden pro Woche. Die männlichen Teilnehmer wiesen eine Körpergröße von 172 bis 191 cm auf, ein Gewicht zwischen 61 und 93 kg und ein Alter von 18 bis 35 Jahren. Ihr BMI lag zwischen 19 und 27 kg·m⁻². Die Trainingsumfänge betrugen bei den Männern 10 bis 35 Stunden pro Woche. Die anthropometrischen Daten inklusive des

Trainingsumfangs der Studienteilnehmenden sind, getrennt nach der durchgeführten Ergometrie, in Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2: Beschreibung der Studienteilnehmer*innen

Fahrradergometer		
	männlich (n=8)	weiblich (n=4)
Größe [cm]	179.0 ± 5.0 [180.0; 7.0]	165.0 ± 7.0 [164.0; 8.0]
Gewicht [kg]	78.5 ± 6.0 [80.0; 7.0]	58.5 ± 7.5 [56.5; 5.0]
BMI [kg·m ⁻²]	24.3 ± 1.3 [24.3; 1.0]	21.3 ± 1.9 [22.0; 1.3]
Alter [Jahren]	24.0 ± 5.0 [22.0; 5.0]	23.0 ± 5.0 [22.0; 4.0]
Trainingsumfang [h]	17.6 ± 8.4 [15.5; 9.1]	19.9 ± 10.8 [16.8; 10.9]
Laufbandergometer		
	männlich (n=9)	weiblich (n=1)
Größe [cm]	184.0 ± 5.0 [186.0; 7.0]	165.0
Gewicht [kg]	78.0 ± 9.0 [78.0; 4.5]	64.0
BMI [kg·m ⁻²]	23.0 ± 2.2 [23.6; 3.0]	23.51
Alter [Jahren]	22.0 ± 4.0 [19.0; 6.0]	26.0
Trainingsumfang [h]	13.8 ± 2.5 [14.0; 3.8]	11.0
Ruderergometer		
	männlich (n=3)	weiblich (n=7)
Größe [cm]	182.0 ± 6.0 [184.0; 6.0]	174.0 ± 6.0 [175.0; 7.0]
Gewicht [kg]	78.0 ± 4.0 [80.0; 3.5]	70.5 ± 8.0 [72.5; 9.5]
BMI [kg·m ⁻²]	23.6 ± 0.6 [23.9; 0.5]	23.2 ± 1.3 [23.6; 1.4]
Alter [Jahren]	25.0 ± 9.0 [20.0; 8.0]	21.0 ± 1.0 [21.0; 2.0]
Trainingsumfang [h]	18.0 ± 7.2 [20.0; 7.0]	19.7 ± 6.4 [20.0; 10.0]

Daten werden als Mittelwerte ± Standardabweichung [Median; Interquartilsabstand] dargestellt. BMI, Body-Mass-Index

2.4 Statistik

Die erhobenen Daten wurden zunächst in Microsoft Excel erfasst und anschließend mit IBM SPSS Statistics Version 29 weiterverarbeitet und analysiert. Zur Beschreibung der Stichprobe wurden deskriptive Kennwerte berechnet, insbesondere Mittelwerte und Standardabweichungen. Die Ergebnisse werden in der Form Mittelwert ± Standardabweichung dargestellt, um Lage- und Streuungsmaße abzubilden. Zur Bewertung der Abweichungen der verschiedenen Schwellenbestimmungsmethoden im Vergleich zur expertendefinierten anaeroben Schwelle (EAS) und zum Vergleich untereinander wurden die Differenzen der Mittelwerte sowie die prozentualen Abweichungen inklusive der jeweiligen Standardabweichungen ermittelt. Die Prüfung der Normalverteilung der Variablen erfolgte mittels Shapiro-Wilk-Test unter Verwendung eines Signifikanzniveaus von $p > 0,05$ als Kriterium für Normalverteilung. Für den statistischen Vergleich der Mittelwerte zwischen den jeweiligen Schwellenbestimmungsmethoden und der EAS wurden paarweise t-Tests für ver-

bundene Stichproben durchgeführt. Ein Signifikanzniveau von $p < 0,05$ wurde als statistisch signifikant gewertet. Zur Untersuchung linearer Zusammenhänge zwischen den Parametern, insbesondere im Vergleich zur EAS, wurde die Pearson-Korrelationsanalyse eingesetzt. Darüber hinaus wurde eine Übersichtsmatrix mit den Mittelwerten der Differenzen und deren Standardabweichungen erstellt, um die Vergleichbarkeit und Abweichungen der verschiedenen Methoden untereinander transparent darzustellen.

Zur grafischen Beurteilung der Übereinstimmung zwischen den Schwellenbestimmungsmethoden und der EAS wurden Bland-Altman-Diagramme verwendet. Diese Visualisierungen sollen eine differenzierte Analyse systematischer Abweichungen sowie der Streuung der Messwerte ermöglichen.

2.5 Untersuchte Parameter

Die leistungsphysiologischen und sportmedizinischen Parameter, welche in dieser Studie untersucht wurden, sind:

Blutlaktatkonzentration bzw. die anaerobe Schwelle nach Bishop et al. (1998), Cheng et al. (1992) und Dickhuth et al. (1988), sowie die individuelle Bestimmung der LT2 nach zwei erfahrenen Sportwissenschaftlern des Österreichischen Instituts für Sportmedizin.

3 Ergebnisse

3.1 Vergleich der EAS mit den Schwellenkonzepten am Radergometer

Die Ergebnisse der Leistungsdiagnostik am Radergometer sind in Tabelle 3 dargestellt. Die EAS betrug im Mittel 209 Watt bei einer Standardabweichung von 45 Watt. Die mittels der Methode nach Dickhuth et al. (1988) ermittelte IAS lag mit durchschnittlich 169 ± 48 Watt signifikant unter der EAS ($p < 0,001$). Die durchschnittliche Differenz zur EAS betrug 40 ± 17 Watt, entsprechend einem relativen Unterschied von 22 ± 11 %. Die Übereinstimmung mit der EAS war durch eine sehr hohe Korrelation gekennzeichnet ($r = 0,94$). Bei dem in Abbildung 6A dargestellten Bland-Altman-Plot zeigt sich eine gleichmäßige Streuung der Differenzen um die mittlere Differenz, ohne erkennbares Muster einer zunehmenden Streuung bei höheren Mittelwerten. Es bestehen keine Hinweise auf systematische Skedastizität. Die Dmax-Methode nach Cheng et al. (1992) ergab einen Mittelwert von 199 ± 39 Watt und wich damit signifikant von der EAS ab ($p = 0,006$). Die durchschnittliche Abweichung betrug 9 ± 9 Watt, was einem relativen Unterschied von 4 ± 4 % entspricht. Die Korrelation mit der EAS war ebenfalls sehr hoch ($r = 0,98$). Die Bland-Altman-Darstellung in Abbildung 6B zeigt eine enge Streuung der Differenzen um die mittlere Differenz mit einer leichten Tendenz zu größerer Streuung bei niedrigeren Mittelwerten. Die modifizierte Dmax-Methode nach Bishop et al. (1998) führte zu einer mittleren Schwelle von 214 ± 45 Watt. Im Vergleich zur EAS war die Differenz mit -5 ± 9 Watt nicht signifikant ($p = 0,067$), was auf eine gute Übereinstimmung hinweist. Der relative Unterschied betrug -2 ± 4 %, mit einer ebenfalls sehr hohen Korrelation ($r = 0,98$). Im Bland-Altman-Plot in Abbildung 6C liegt die Mehrzahl der Messpunkte in enger Streuung um die mittlere Differenz, wobei eine leichte negative Tendenz bei höheren Mittelwerten erkennbar ist, jedoch ohne ausgeprägte Skedastizität.

Tab. 3: Vergleich der EAS mit anderen Schwellenkonzepten am Radergometer (n = 12)

	MW $\pm$ SD [W]	t-Test p	MW _{Diff} $\pm$ SD [W]	% Diff $\pm$ SD	r _p
EAS	209 $\pm$ 45	-	-	-	-
IAS Dickhuth et al.	169 $\pm$ 48	< 0,001	40 $\pm$ 17	22 $\pm$ 11	0,94
Dmax Cheng et al.	199 $\pm$ 39	0,006	9 $\pm$ 9	4 $\pm$ 4	0,98
Dmax mod. Bishop et al.	214 $\pm$ 45	0,067	- 5 $\pm$ 9	- 2 $\pm$ 4	0,98

MW Mittelwert, SD Standardabweichung, MW_{Diff} Mittelwert der Differenzen, % Diff Prozentuale Differenz, r_p Pearsons Korrelationskoeffizient

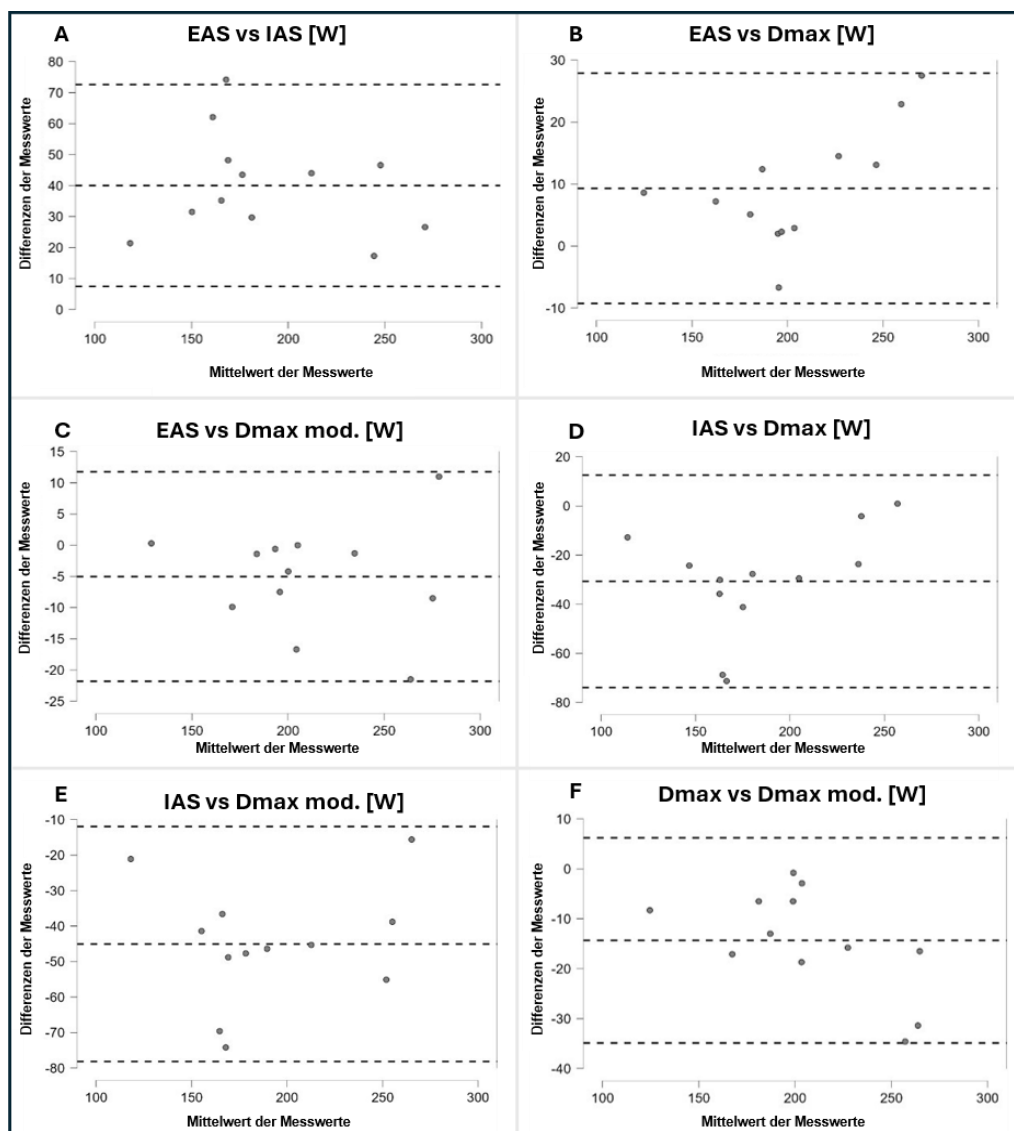


Abb. 6: Bland-Altman Plots Vergleich der Schwellenkonzepte am Radergometer

3.2 Vergleich der EAS mit den Schwellenkonzepten am Laufband

Die Ergebnisse der Leistungsdiagnostik am Laufband sind in Tabelle 4 dargestellt. Auf dem Laufband lag der Mittelwert der EAS bei $14,2 \pm 0,8$ km/h. Die IAS betrug im Vergleich dazu $13,6 \pm 0,8$ km/h und wich signifikant von der EAS ab ($p = 0,002$). Die mittlere Differenz belief sich auf $0,6 \pm 0,4$ km/h, was einem relativen Unterschied von 4 ± 3 % entspricht. Die Übereinstimmung der beiden Methoden war trotz signifikanter Abweichung als hoch einzustufen ($r = 0,87$). Die Ergebnisse des Bland-Altman-Plots in Abbildung 7A zeigen eine überwiegend homogene Streuung der Differenzen um die mittlere Abweichung, wobei sich keine systematische Über- oder Unterschätzung über den Wertebereich erkennen ließ. Die Dmax-Methode nach Cheng et al. ergab eine durchschnittliche Laufgeschwindigkeit von $13,9 \pm 0,9$ km/h. Der Unterschied zur EAS war statistisch nicht signifikant ($p = 0,1$). Die mittlere Differenz zur EAS lag bei $0,3 \pm 0,3$ km/h, was einem relativen Unterschied von 2 ± 2 % entspricht. Es bestand eine sehr hohe Übereinstimmung mit der EAS ($r = 0,95$). Auch der zugehörige Bland-Altman-Plot, siehe Abbildung 7B, zeigt eine enge Streuung der Differenzen um den Mittelwert. Die modifizierte Dmax-Methode nach Bishop et al. führte mit $14,6 \pm 1,0$ km/h zur höchsten ermittelten Schwelle auf dem Laufband. Gegenüber der EAS resultierte eine signifikante Überschätzung ($p = 0,002$). Die mittlere Differenz betrug $-0,4 \pm 0,3$ km/h, was einem relativen Unterschied von -3 ± 2 % entspricht. Die Übereinstimmung mit der EAS war dennoch sehr hoch ($r = 0,96$).

Tab. 4: Vergleich der EAS mit anderen Schwellenkonzepten am Laufband (n = 10)

	MW $\pm$ SD [km/h]	t-Test p	MW _{Diff} $\pm$ SD [km/h]	% Diff $\pm$ SD	r _p
EAS	14,2 $\pm$ 0,8	-	-	-	-
IAS Dickhuth et al.	13,6 $\pm$ 0,8	0,002	0,6 $\pm$ 0,4	4,0 $\pm$ 3,0	0,87
Dmax Cheng et al.	13,9 $\pm$ 0,9	0,01	0,3 $\pm$ 0,3	2,0 $\pm$ 2,0	0,95
Dmax mod. Bishop et al.	14,6 $\pm$ 1,0	0,002	- 0,4 $\pm$ 0,3	- 3,0 $\pm$ 2,0	0,96

MW Mittelwert, SD Standardabweichung, MW_{Diff} Mittelwert der Differenzen, % Diff Prozentuale Differenz, r_p Pearsons Korrelationskoeffizient

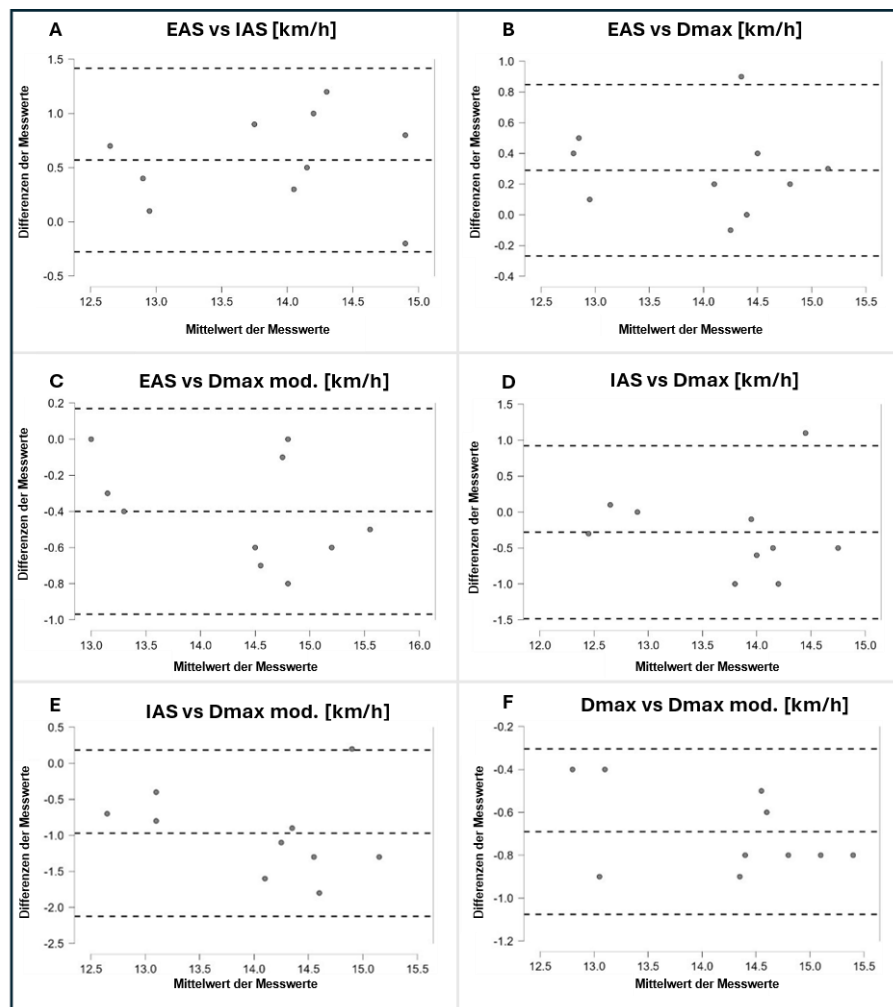


Abb. 7: Bland-Altman-Plots Vergleich der Schwellenkonzepte am Laufband

3.3 Vergleich der EAS mit den Schwellenkonzepten am Ruderergometer

Die Ergebnisse der Leistungsdiagnostik am Ruderergometer sind in Tabelle 5 dargestellt. Für das Ruderergometer ergab die EAS einen Mittelwert von 217 ± 36 Watt. Die individuelle anaerobe Schwelle nach Dickhuth et al. lag im Mittel bei 199 ± 32 Watt und wich damit signifikant von der EAS ab ($p = 0,001$). Die durchschnittliche Differenz betrug 18 ± 12 Watt, was einem relativen Unterschied von 9 ± 6 % entspricht. Trotz dieser signifikanten Unterschätzung war die Korrelation zur EAS sehr hoch ($r = 0,94$). Im zugehörigen Bland-Altman-Plot, in Abbildung 8A, zeigten sich die Differenzen weitgehend symmetrisch verteilt. Die Dmax-Methode nach Cheng et al. ergab mit 204 ± 30 Watt ebenfalls signifikant niedrigere Schwellenwerte im Vergleich zur EAS ($p = 0,002$). Die durchschnittliche Abweichung betrug 12 ± 9 Watt, entsprechend 6 ± 3 % unterhalb der EAS. Die Korrelation war sehr hoch ($r = 0,98$). Die Differenzen verteilten sich im Bland-Altman-Plot, wie in Abbildung 8B zu sehen, gleichmäßig um die mittlere Abweichung. Die modifizierte Dmax-Methode nach Bishop et al. lieferte mit 224 ± 50 Watt die höchsten Werte. Der Unterschied zur EAS war statistisch nicht signifikant ($p = 0,339$). Die mittlere Differenz betrug -8 ± 25 Watt, was einem relativen Unterschied von -3 ± 8 % entspricht. Die Korrelation zur EAS fiel etwas geringer aus als bei den anderen Methoden ($r = 0,88$). Der in Abbildung 8C zugehörige Bland-Altman-Plot wies eine deutlich größere Streuung auf. Einzelne Werte lagen außerhalb der Grenzen der Übereinstimmung, was auf eine geringere methodische Stabilität hindeutet.

Tab. 5: Vergleich der EAS mit anderen Schwellenkonzepten am Ruderergometer ($n = 10$)

	MW $\pm$ SD [W]	t-Test p	MW _{Diff} $\pm$ SD [W]	% Diff $\pm$ SD	r_p
EAS	217 ± 36	-	-	-	-
IAS Dickhuth et al.	199 ± 32	0,001	18 ± 12	9 ± 6	0,94
Dmax Cheng et al.	204 ± 30	0,002	12 ± 9	6 ± 3	0,98
Dmax mod. Bishop et al.	224 ± 50	0,339	-8 ± 25	-3 ± 8	0,88

MW Mittelwert, SD Standardabweichung, MW_{Diff} Mittelwert der Differenzen, % Diff Prozentuale Differenz, r_p Pearsons Korrelationskoeffizient

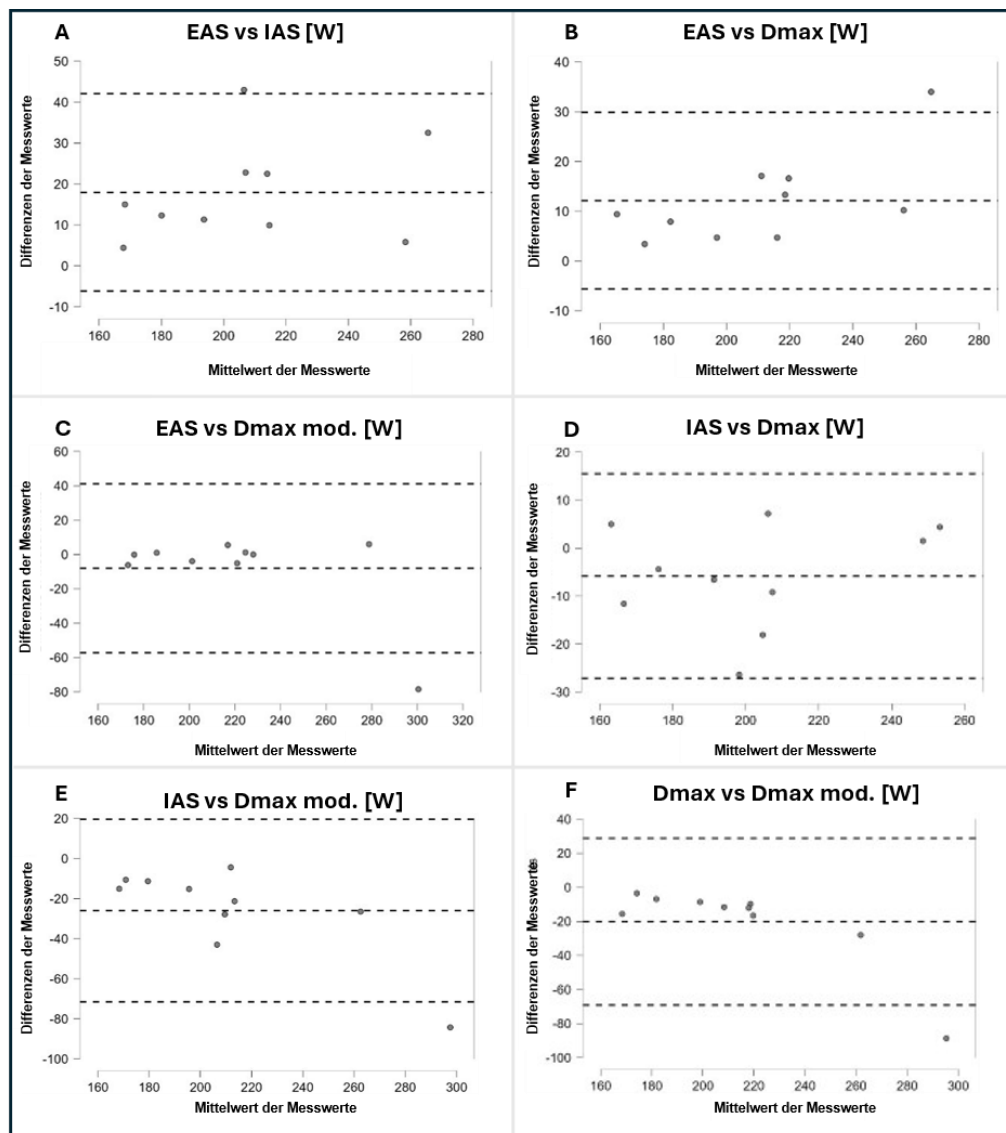


Abb. 8: Bland-Altman-Plots Vergleich der Schwellenkonzepte am Ruderergometer

3.4 Vergleich der Schwellenkonzepte untereinander

Zur ergänzenden Analyse wurden die mittleren Differenzen der Schwellenkonzepte untereinander in Form von Vergleichsmatrizen dargestellt. Die Daten wurden getrennt nach Ergometer-Typ (Rad, Laufband, Ruder) erfasst.

Die Analyse der Differenzmatrix der Schwellenkonzepte in Tabelle 6 am Ruderergometer zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Methoden. Wie bereits im Abschnitt zuvor dargestellt ergab sich zwischen der EAS und der IAS nach Dickhuth et al. (1988) eine mittlere Differenz von 40 ± 17 Watt. Der Vergleich zwischen der EAS und der Dmax-Methode nach Cheng et al. (1992) zeigte eine mittlere Differenz von 9 ± 9 Watt. Zwischen der EAS und der modifizierten Dmax-Methode nach Bishop et al. (1998) betrug die Differenz -5 ± 9 Watt. Im direkten Vergleich zwischen der IAS und der Dmax-Methode zeigte sich eine

Differenz von -31 ± 22 Watt. Die Differenz zwischen der IAS und der modifizierten Dmax-Methode lag bei -45 ± 17 Watt. Der Vergleich zwischen der Dmax- und der modifizierten Dmax-Methode ergab eine mittlere Differenz von -14 ± 10 Watt. Die Matrix ist symmetrisch aufgebaut. Daher ergibt sich im Umkehrschluss für die jeweils umgekehrte Vergleichsrichtung der identische Absolutwert mit umgekehrtem Vorzeichen. So entspricht beispielsweise die Differenz von 5 ± 9 Watt zwischen der Dmax mod. und der EAS exakt dem negierten Wert der Differenz von -5 ± 9 Watt zwischen der EAS und der Dmax mod. Die Bland-Altman-Analyse in Abbildung 6 bestätigte diese Ergebnisse. Für die Gegenüberstellung von IAS und Dmax zeigte sich ein Bias von -31 Watt bei mittleren Werten im Bereich um 180 Watt, wobei die Verteilung der Abweichungen gleichmäßig um die Mittelwertlinie streute, ohne Hinweis auf eine systematische Verzerrung. Der Vergleich von IAS und modifizierten Dmax ergab eine systematisch größere Abweichung mit einem Bias von -45 Watt, ebenfalls ohne relevante Skedastizität. Die Differenzen zwischen Dmax und mod. Dmax verteilten sich mit einem Bias von -14 Watt moderat um die Mittelwertlinie, wobei sich auch hier keine nennenswerte Zunahme der Streuung in Abhängigkeit der Leistungswerte zeigte.

Tab. 6: Vergleichsmatrix der mittleren Differenzen $\pm$ Standardabweichung in Watt zwischen den Schwellenkonzepten am **Radergometer** (n = 12)

	EAS	IAS Dickhuth et al.	Dmax Cheng et al.	Dmax mod Bishop et al.
EAS	-	40 ± 17	9 ± 9	$- 5 \pm 9$
IAS Dickhuth et al.	$- 40 \pm 17$	-	$- 31 \pm 22$	$- 45 \pm 17$
Dmax Cheng et al.	$- 9 \pm 9$	31 ± 22	-	$- 14 \pm 10$
Dmax mod. Bishop et al.	5 ± 9	45 ± 17	14 ± 10	-

Die Differenzmatrix der Schwellenkonzepte auf dem Laufband sind in Tabelle 7 aufgelistet. Die Matrix zeigt im Vergleich der EAS mit der IAS eine mittlere Differenz von $0,6 \pm 0,4$ km/h. Zwischen der EAS und der Dmax-Methode lag die Differenz bei $0,3 \pm 0,3$ km/h. Die Abweichung zur modifizierten Dmax-Methode betrug $-0,4 \pm 0,3$ km/h. Die Differenz zwischen der IAS und der Dmax-Methode belief sich auf $-0,3 \pm 0,6$ km/h. Im Vergleich zwischen IAS und der modifizierten Dmax-Methode lag die Differenz bei $-1,0 \pm 0,6$ km/h. Zwischen der Dmax- und der modifizierten Dmax-Methode ergab sich eine mittlere Differenz von $-0,7 \pm 0,2$ km/h. Die Differenzen innerhalb der Matrix folgen der erwartbaren Symmetrie. Der Richtungswechsel im Vergleich spiegelt sich jeweils im Vorzeichen wider, während die Beträge identisch bleiben. So entspricht etwa die Differenz von $0,4 \pm 0,3$

km/h zwischen Dmax mod. und EAS dem negierten Wert des Vergleichs EAS zu Dmax mod. mit $-0,4 \pm 0,3$ km/h. Die größte mittlere Differenz in der Matrix wurde zwischen der IAS und der modifizierten Dmax-Methode beobachtet. Die geringste Abweichung zeigte sich zwischen EAS und Dmax. Die Bland-Altman-Plots der Methodenvergleiche in Abbildung 7 zeigten in allen Fällen eine gleichmäßige Streuung der Abweichungen über den Bereich der Mittelwerte hinweg. Für den Vergleich zwischen IAS und Dmax lag der Bias bei $-0,3$ km/h ohne Hinweis auf systematische Tendenzen oder Skedastizität. Zwischen IAS und mod. Dmax war ein minimal größerer Bias von -1 km/h erkennbar, wobei die Abweichungen ebenfalls homogen verteilt waren. Der Methodenvergleich Dmax vs. mod. Dmax ergab mit $-0,7$ km/h den geringsten Bias innerhalb dieser Konstellation. Die geringe absolute Streubreite aller Differenzwerte unterstreicht die enge Übereinstimmung der Methoden auf dem Laufband.

Tab. 7: Vergleichsmatrix der mittleren Differenzen $\pm$ Standardabweichung in km/h zwischen den Schwellenkonzepten am Laufband (n = 10)

	EAS	IAS Dickhuth et al.	Dmax Cheng et al.	Dmax mod Bishop et al.
EAS	-	$0,6 \pm 0,4$	$0,3 \pm 0,3$	$- 0,4 \pm 0,3$
IAS Dickhuth et al.	$- 0,6 \pm 0,4$	-	$- 0,3 \pm 0,6$	$- 1,0 \pm 0,6$
Dmax Cheng et al.	$- 0,3 \pm 0,3$	$0,3 \pm 0,6$	-	$- 0,7 \pm 0,2$
Dmax mod. Bishop et al.	$0,4 \pm 0,3$	$1,0 \pm 0,6$	$0,7 \pm 0,2$	-

Tabelle 8 beinhaltet die Differenzmatrix der Schwellenkonzepte für den Ruderergometer. Sie zeigt im Vergleich der EAS zur IAS eine mittlere Differenz von 18 ± 12 Watt. Die Abweichung zwischen der EAS und der Dmax-Methode betrug 12 ± 9 Watt. Zwischen der EAS und der modifizierten Dmax-Methode lag die mittlere Differenz bei -8 ± 25 Watt. Zwischen der IAS und der Dmax-Methode zeigte sich eine Differenz von -6 ± 11 Watt. Der Vergleich zwischen der IAS und der modifizierten Dmax-Methode ergab eine Differenz von -26 ± 23 Watt. Zwischen der Dmax- und der modifizierten Dmax-Methode wurde eine mittlere Differenz von -20 ± 25 Watt festgestellt. Die größte mittlere Differenz innerhalb der Matrix ergab sich zwischen der IAS und der modifizierten Dmax-Methode mit 26 ± 23 Watt. Die geringste Abweichung bestand zwischen der IAS und der Dmax-Methode mit 6 ± 11 Watt. Die Differenzen zwischen EAS und Dmax sowie zwischen EAS und IAS lagen bei 12 ± 9 Watt beziehungsweise 18 ± 12 Watt. Die Differenz zwischen Dmax und der modifizierten Dmax betrug 20 ± 25 Watt. Die entsprechenden Bland-Altman-Plots in Abbildung 8 zeigten im Vergleich zwischen IAS und Dmax eine gleichmäßige Streuung mit

einem moderaten Bias von -6 Watt. Der Vergleich IAS versus mod. Dmax wies den größten Bias mit -26 Watt auf, wobei sich die Streuung über den gesamten Bereich der Mittelwerte erstreckte, ohne systematische Verzerrung. Die Differenzen zwischen Dmax und mod. Dmax lagen bei einem Bias von -20 Watt. Auch hier verteilten sich die Werte gleichmäßig um die Mittelwertlinie. Eine zunehmende Streuung in Abhängigkeit von der mittleren Leistungsfähigkeit war nicht erkennbar.

Tab. 8: Vergleichsmatrix der mittleren Differenzen $\pm$ Standardabweichung in Watt zwischen den Schwellenkonzepten am **Ruderergometer** (n = 10)

	EAS	IAS Dickhuth et al.	Dmax Cheng et al.	Dmax mod Bishop et al.
EAS	-	18 $\pm$ 12	12 $\pm$ 9	- 8 $\pm$ 25
IAS Dickhuth et al.	- 18 $\pm$ 12	-	- 6 $\pm$ 11	- 26 $\pm$ 23
Dmax Cheng et al.	- 12 $\pm$ 9	6 $\pm$ 11	-	- 20 $\pm$ 25
Dmax mod. Bishop et al.	8 $\pm$ 25	26 $\pm$ 23	20 $\pm$ 25	-

4 Diskussion

In der vorliegenden Masterarbeit wurden drei etablierte Verfahren zur Bestimmung der anaeroben Schwelle auf Basis der Blutlaktatkonzentration systematisch untersucht und miteinander verglichen. Dabei standen die individuelle anaerobe Schwelle nach Dickhuth et al. (1988), die klassische Dmax Methode nach Cheng et al. (1992) sowie die modifizierte Dmax Methode nach Bishop et al. (1998) im Fokus. Diese Methoden wurden jeweils in Bezug zur expertendefinierten anaeroben Schwelle gesetzt, die als praxisnahe Referenzgröße diente. Die Analyse erfolgte getrennt für die Belastungsformen Fahrradergometer, Laufband und Ruderergometer, um sportartspezifische Unterschiede in der Aussagekraft und Anwendbarkeit der einzelnen Schwellenmethoden angemessen zu berücksichtigen. Ziel war es, die methodische Übereinstimmung der untersuchten Konzepte mit der EAS zu bestimmen und daraus fundierte Empfehlungen für den Einsatz in der leistungsdiagnostischen Praxis abzuleiten.

4.1 Vergleich der Schwellenmethoden mit der EAS

4.1.1 Fahrradergometer

Am Fahrradergometer zeigte die IAS-Methode eine mittlere Abweichung zur EAS von 40 ± 17 W, während die Dmax-Methode eine Differenz von -9 ± 9 W und die modifizierte Dmax-Methode die geringste Abweichung von -5 ± 9 W aufwies. Die Korrelationskoeffizienten der jeweiligen Verfahren zur EAS lagen bei $r = 0,94$ (IAS), $r = 0,98$ (Dmax) und $r = 0,98$ (mod. Dmax), was insbesondere für die beiden Dmax-Varianten eine sehr hohe Übereinstimmung mit der expertendefinierten anaeroben Schwelle belegt. Diese Ergebnisse bestätigen den hohen methodischen Standard der klassischen und modifizierten Dmax-Methode im Vergleich zur semi-standardisierten IAS, die sich durch die größte mittlere Abweichung und Streuung sowie die niedrigste Korrelation auszeichnet. Die IAS-Methode basiert bei der Radergometrie auf einer standardisierten Erhöhung des Laktatwertes um $+1,0$ mmol/l über der Basislaktatkonzentration. Diese fixe Differenzregel kann bei Populationen mit häufig flachen Laktatkurven, wie etwa Leistungssportler*innen (Jamnick et al., 2020; Llodio et al., 2024), zu einer konservativen Schwellenbestimmung führen. Das bedeutet, die anaerobe Schwelle wird tendenziell zu niedrig angesetzt und somit die tatsächliche Ausdauerleistungsfähigkeit im Vergleich zum maximalen Laktat-Steady-State (MLSS) unterschätzt. In sicherheitsrelevanten Situationen, wie etwa im Rahmen einer Rehabilitation, ist diese konservative Intensitätssteuerung aufgrund der geringeren Belastung und des minimierten Überlastungsrisikos als potenziell vorteilhaft anzusehen,

wohingegen sie im Hochleistungssport zu suboptimalen Trainingseffekten führen kann (Faude et al., 2009; Płoszczyca et al., 2020).

Die Bland-Altman-Analysen in Abbildung 6 zeigten überwiegend homoskedastische Verteilungen, was eine konstante Differenz zwischen den Methoden im gesamten Leistungsspektrum nahelegt. Die Stichprobe bestand ausschließlich aus gut trainierten Leistungssportler*innen mit einem Trainingsumfang von ≥ 10 Stunden pro Woche, weshalb die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weniger trainierte Populationen mit Vorsicht erfolgen sollte. Die vergleichsweise konstante Streuung sowohl der klassischen als auch der modifizierten Dmax-Methode unterstützt deren Verlässlichkeit über verschiedene Leistungsniveaus hinweg. Die modifizierte Dmax-Methode beinhaltet einen zusätzlichen Glättungsschritt, bei dem nicht der erste Laktatwert, sondern der Punkt verwendet wird, an dem die Laktatkonzentration erstmals um mehr als 0,4 mmol/l ansteigt. Anschließend wird der Punkt bestimmt, an dem die geglättete Kurve den größten Abstand zur Verbindungslinie zwischen Anfangs- und Endpunkt aufweist. Dies kann insbesondere bei flachen oder unregelmäßigen Laktatverläufen, dazu beitragen systematische Fehler zu reduzieren (Chalmers et al., 2015; Llodio et al., 2024; Wahl et al., 2017). Diese vorgenommene Modifikation stellt einen möglichen Einflussfaktor dar, weshalb die modifizierte Dmax-Methode im Vergleich zur EAS den geringsten Bias aufwies. Die verbesserte Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der modifizierten Dmax wurde bereits in mehreren Arbeiten bestätigt und ist insbesondere für die Trainingssteuerung im Leistungssport von hoher Relevanz (Hauser et al., 2013; Van Schuylenbergh et al., 2004; Wahl et al., 2018).

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden durch aktuelle Studien, die ebenfalls auf die zentrale Bedeutung einer methodisch fundierten Schwellenbestimmung hinweisen, untermauert. So zeigen Jamnick et al. (2018, 2020), dass sowohl die Auswahl des Schwellenverfahrens als auch die Gestaltung des Stufenprotokolls, insbesondere hinsichtlich Stufendauer und Belastungssinkrement, entscheidenden Einfluss auf die Validität und Genauigkeit der ermittelten Schwellenwerte nehmen. In Übereinstimmung mit den hier gewonnenen Ergebnissen berichten Llodio et al. (2024), dass die modifizierte Dmax-Methode im Vergleich zu traditionellen Verfahren konsistent engere Übereinstimmungen mit dem MLSS aufweist.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die modifizierte Dmax-Methode am Fahrradergometer in dieser Untersuchung die höchste Validität bei der Bestimmung der anaeroben Schwelle im Vergleich zur EAS aufweist und somit besonders für die Trainingssteuerung im Hochleistungssport geeignet ist. Die IAS-Methode kann trotz ihrer einfacheren Anwendbarkeit in der Praxis bei Leistungssportler*innen mit spezifischen Stoffwechseleigen-

schaften methodische Limitationen aufweisen, die zu einer konservativen Schwellenbestimmung führen.

4.1.2 Laufband

Analog zur Auswertung am Fahrradergometer zeigte sich auch bei der Laufbandergometrie eine deutlich stärkere Übereinstimmung der Dmax-basierten Verfahren mit der experimentell definierten anaeroben Schwelle im Vergleich zur IAS-Methode.

Die Methode nach Dickhuth et al. wich im Mittel um $0,6 \pm 0,4$ km/h von der EAS ab. Der Unterschied war statistisch signifikant ($p = 0,002$) und betrug relativ 4 %. Die Korrelation zur EAS lag bei $r = 0,87$ und war damit im Vergleich zu den Dmax-Verfahren am geringsten. Im Bland-Altman-Plot, siehe Abbildung 7A, zeigte sich ein deutlich positiver Bias, was auf eine systematische Unterschätzung der EAS durch die IAS hinweist. Dieser Befund stimmt mit den Ergebnissen am Fahrradergometer überein und entspricht auch der Tendenz bereits vorhandener Studien. So berichten Wahl et al. (2018) ebenfalls von einer deutlichen Unterschätzung der individuellen anaeroben Schwelle durch die IAS im Laufen und führen dies auf die standardisierte Laktatdifferenzformel zurück, die interindividuelle Unterschiede im Laktatverhalten nicht ausreichend abbildet. Die klassische Dmax-Methode zeigte eine mittlere Abweichung von $0,3 \pm 0,3$ km/h zur EAS, was einem statistisch nicht signifikanten Unterschied entspricht ($p = 0,1$). Die Korrelation zur EAS war mit $r = 0,95$ hoch. In der Bland-Altman-Grafik in Abbildung 7B zeigte sich, trotz eines Ausreißers, ein geringer Bias mit enger Streuung, was die gute methodische Übereinstimmung belegt. Auch Carter & Newhouse (2019), welche die Dmax-Methode in einer laufbandspezifischen Auswertung untersuchten, berichteten von einer geringen systematischen Abweichung und hoher Reliabilität der Methode. Diese Ergebnisse stützen die Beobachtung der vorliegenden Untersuchung. Die modifizierte Dmax-Methode zeigte eine mittlere Abweichung von $-0,4 \pm 0,3$ km/h zur EAS, was einem leichten negativen Bias entspricht. Der Unterschied war statistisch signifikant ($p = 0,002$), die Korrelation zur EAS lag bei $r = 0,96$. In der Bland-Altman-Darstellung in Abbildung 7C war die Abweichung konsistent und gleichmäßig verteilt. Auch Chalmers et al. (2015) beschrieben in ihrer Untersuchung am Laufband, dass die modifizierte Dmax-Methode zwar eine etwas aggressivere aber dennoch eine valide Näherung an die ventilatorisch bestimmte Schwelle darstellt.

Insgesamt zeigten sich die absoluten Abweichungen der Schwellenmethoden zur EAS auf dem Laufband deutlich geringer als beim Radergometer. Während dort beispielsweise die IAS im Mittel um 40 Watt von der EAS abwich, lagen die mittleren Differenzen im Laufen unter 1 km/h. Diese geringeren Abweichungen erscheinen nachvollziehbar, da auch die absoluten Belastungswerte auf dem Laufband niedriger ausfallen – typischerweise zwi-

schen 13 -14 km/h gegenüber 169 - 214 Watt auf dem Rad. Vor diesem Hintergrund entspricht eine Differenz von 0,6 km/h bereits etwa 5 % der Gesamtgeschwindigkeit und ist damit durchaus methodisch bedeutsam. Zusammenfassend bestätigen die vorliegenden Ergebnisse auch auf dem Laufband die höhere methodische Nähe der Dmax-basierten Verfahren zur expertendefinierten anaeroben Schwelle. Während die IAS-Methode die EAS systematisch unterschätzte und die größte Differenz aufwies.

4.1.3 Ruderergometer

Die Analyse der Laktatdiagnostik am Ruderergometer zeigte deutliche Unterschiede in der Übereinstimmung der drei Schwellenmethoden mit der individuell bestimmten EAS. Dabei unterscheiden sich die Methoden nicht nur hinsichtlich ihrer mittleren Differenz zur EAS, sondern auch in Bezug auf die Streuung, sowie die Korrelation.

Die modifizierte Dmax-Methode wies mit -8 ± 25 W (bzw. -3 ± 8 %) die geringste mittlere Differenz zur EAS auf. Demnach lässt sich darauf schließen, dass die Schwelle im Mittel etwas über der EAS ansetzt. Der zugehörige Bland-Altman-Plot in Abbildung 8C zeigt eine insgesamt enge Streuung der Werte um den Mittelwert, was auf eine gute methodische Übereinstimmung hinweist. Allerdings tritt ein deutlicher Ausreißer auf, der die Limits of Agreement (LoA) deutlich verschiebt. Dieser Ausreißer beeinflusst auch die Korrelation zur EAS ($r = 0,88$), die zwar hoch, aber im Vergleich zu den anderen Methoden reduziert ausfällt. Dies verdeutlicht, dass trotz des geringen mittleren Bias individuelle Fehleinschätzungen möglich sind, die bei der Trainingssteuerung berücksichtigt werden sollten.

Die klassische Dmax-Methode zeigte im Mittel eine Differenz von 12 ± 9 W (bzw. 6 ± 3 %) zur EAS, was auf eine systematische Unterschätzung der Schwelle hinweist. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen von Zwingmann et al. (2019), die im Rahmen einer Validierungsstudie an Rad- und Laufbandprotokollen zeigten, dass die klassische Dmax-Methode die MLSS signifikant unterschätzt. Auch wenn die Studie nicht mit Ruderern durchgeführt wurde, fanden die Autoren keine signifikanten Unterschiede in der Genauigkeit der Dmax-Methode zwischen den beiden getesteten Ergometer-Typen. Dies spricht dafür, dass die beobachtete systematische Abweichung eher auf die methodische Konstruktion als auf disziplinspezifische metabolische Unterschiede zurückzuführen ist. Camargo Alves et al. (2016) zeigten in ihrer Studie zur Laufbandergometrie, dass die Dmax-Methode insbesondere bei flach verlaufenden Laktatprofilen mit moderatem Endanstieg zu einer niedrigeren Schwellenlage führen kann, während höhere Maximalwerte zu einer höheren Schwelle führen. Die Autoren führen dies auf die rein geometrische Konstruktion der Methode zurück. Der maximale Abstand zur Verbindungslinie zwischen Start- und Endpunkt wird bei geringer Laktatakkumulation im höheren Belastungsbereich

häufig früher erreicht, wodurch der Schnittpunkt systematisch vor dem tatsächlichen Schwellenwert liegt.

Die Dickhuth-Methode ergab eine mittlere Differenz von $+18 \pm 12$ W (bzw. $+9 \pm 6$ %) zur EAS und liegt damit im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren am weitesten von der individuellen Schwelle entfernt. Dies lässt darauf schließen, dass auch diese Methode die EAS unterschätzt, allerdings in deutlich ausgeprägterem Maß als die Dmax-Methode. Die Korrelation zur EAS beträgt $r = 0,94$, was auf einen hohen Zusammenhang hindeutet. Dennoch bleibt festzuhalten, dass die Dickhuth-Methode die EAS systematisch niedriger ansetzt, was insbesondere bei höhertrainierten Ruderathlet*innen zu einer Unterschätzung der tatsächlichen leistungslimitierenden Schwelle führen kann. Eine ähnliche Tendenz wurde auch von Arratibel-Imaz et al. (2016) festgestellt. In ihrer Validierungsstudie am Fahrradergometer zeigten die Autoren, dass die individuelle anaerobe Schwelle nach Dickhuth et al. zwar eine hohe Übereinstimmung mit der maximalen Laktat-Steady-State-Leistung aufwies, diese aber im Mittel dennoch leicht unterschätzte.

Insgesamt zeigt sich, dass bei Ruderathlet*innen keine der untersuchten Methoden die EAS vollständig exakt trifft. Die modifizierte Dmax-Methode bildet die EAS im Mittel zwar am besten ab, ist aber potenziell anfällig für Ausreißer. Die Dmax-Methode zeigt sehr konstante Resultate, unterschätzt die EAS jedoch signifikant. Die Dickhuth-Methode liegt am weitesten von der EAS entfernt und sollte daher im Rudertest nur mit Vorsicht eingesetzt werden.

4.2 Vergleich der Schwellenmethoden untereinander

Die Differenzenanalyse der Schwellenmethoden nach Dickhuth et al. (IAS), Cheng et al. (Dmax) und Bishop et al. (mod. Dmax) zeigte ergometerspezifische Unterschiede sowohl in Bezug auf die absolute und relative Abweichung als auch auf die Streuung und Korrelation der Methoden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Methodenvergleiche getrennt nach Ergometer-Typ dargestellt und diskutiert.

4.2.1 Radergometer

Beim Radergometer zeigten sich insbesondere zwischen der IAS und den beiden Dmax-basierten Verfahren große Abweichungen. So betrug die mittlere Differenz zwischen IAS und mod. Dmax 45 ± 17 W, während zwischen IAS und klassischer Dmax eine Differenz von 31 ± 22 W bestand. Dies unterstreicht die bereits in der Literatur dokumentierte Tendenz der IAS zur frühzeitigen Schwellenlokalisierung (Płoszczyca et al., 2020). Im Vergleich dazu fiel die Differenz zwischen Dmax und mod. Dmax mit 14 ± 10 W deutlich geringer aus. Der zugehörige Bland-Altman-Plot in Abbildung 6F weist auf eine relativ sym-

metrische Verteilung ohne deutliche systematische Tendenz auf, wenngleich ein leichter Trend zur Überschätzung bei höheren Intensitäten beobachtbar ist. Dieses Verhalten könnte auf die geometrisch anders gelagerte Berechnungsweise der mod. Dmax zurückzuführen sein, bei der nicht mehr die erste Belastungslaktatkonzentration, sondern der erste Laktatanstieg über 0,4 mmol/l als Referenzpunkt dient (Cheng et al., 1992; Bishop et al., 1998). Zusammenfassend zeigte sich, dass sich Dmax und modifizierte Dmax methodisch ähnlicher sind als beide Varianten im Vergleich zur IAS. Dies wird durch die Studie von Bishop et al. (1998) gestützt, die eine starke Korrelation zwischen diesen beiden geometrischen Schwellenmethoden feststellten und darauf hinweisen, dass die Gemeinsamkeiten dieser Methoden auf ihre enge methodische Beziehung zurückzuführen sind.

4.2.2 Laufband

Beim Laufbandergometertest zeigten sich insgesamt geringere absolute Differenzen zwischen den Schwellenmethoden als beim Radergometer, was auf die unterschiedliche Einheit der Belastungsparameter zurückzuführen ist. Die mittlere Differenz zwischen der klassischen Dmax-Methode und der IAS betrug lediglich $0,3 \pm 0,6$ km/h. Die hohe Standardabweichung ist auf einen einzelnen Ausreißer zurückzuführen, der die Streuung der Werte erhöht. Im Vergleich dazu lag die Differenz zwischen Dmax und modifizierter Dmax bei $0,7 \pm 0,2$ km/h und zeigte eine deutlich geringere Variabilität. Trotz der näheren Mittelwerte von Dmax und IAS weisen die Bland-Altman-Plots, siehe Abbildung 7, und die zugehörigen Limits of Agreement eine deutlich engere Streuung bei Dmax und modifizierter Dmax auf, was wiederum auf eine hohe methodische Übereinstimmung zwischen diesen beiden Verfahren hinweist. Außerdem fällt beim Vergleich von IAS und Dmax ein Ausreißer auf, der die Übereinstimmung beeinträchtigt. Mögliche Ursachen für den vergleichsweise geringen Mittelwertunterschied zwischen der klassischen Dmax-Methode und der IAS liegen im Einfluss des Belastungsprotokolls, insbesondere bezüglich Startgeschwindigkeit, Inkrementgröße und Stufendauer, auf die Bestimmung der anaeroben Schwelle (Hauser et al., 2013; Heck et al., 2022). Darüber hinaus beeinflussen die charakteristischen Eigenschaften der Laktat-Leistungskurve, insbesondere deren Steilheit und Verlauf, maßgeblich die Schwellenbestimmung. Die modifizierte Dmax-Methode reagiert robuster auf mehrere niedrige Laktatwerte zu Beginn des Tests, was häufig zu einer systematischen Überschätzung der anaeroben Schwelle führt. Im Gegensatz dazu tendieren die klassische Dmax-Methode sowie die IAS, insbesondere bei flacheren Laktatkurven, durch die Linksverschiebung zu einer leichten Unterschätzung der Schwellenwerte (Chalmers et al., 2015).

4.2.3 Ruderergometer

Im direkten Vergleich der drei Schwellenmethoden zeigten sich am Ruderergometer teils deutliche Unterschiede in den ermittelten Schwellenleistungen. Die größte Abweichung bestand zwischen der IAS und der modifizierten Dmax-Methode mit durchschnittlich 26 ± 23 W. Auch zwischen der klassischen Dmax und der modifizierten Dmax wurde eine Differenz von 20 ± 25 W beobachtet. Deutlich geringer fiel hingegen der Unterschied zwischen der Dmax- und der Dickhuth-Methode mit 6 ± 11 W aus. Die beobachtete Nähe der Schwellenwerte zwischen der Dmax- und der IAS steht im Einklang mit den Ergebnissen von Arratibel-Imaz et al. (2016), die im Kontext der Radergometrie eine vergleichbare Übereinstimmung beider Verfahren feststellen konnten. In ihrer Untersuchung unterschieden sich die Schwellenleistungen nach der IAS und der Dmax nur geringfügig, ohne dass von den Autoren methodische Ursachen hierfür genannt wurden. Es ist daher möglich, dass sich beide Verfahren unter bestimmten Voraussetzungen, etwa bei gleichmäßig ansteigenden Laktatkurven, in der ermittelten Schwellenleistung annähern, ohne dass dies auf eine tatsächliche rechnerische oder konzeptionelle Ähnlichkeit schließen lässt. Aussagen über die Systematik dieser Beobachtung lassen sich auf Grundlage der derzeitigen Studienlage jedoch nicht sicher treffen.

Die deutlich größere Abweichung der modifizierten Dmax-Methode zu den beiden anderen Verfahren spiegelt sich nicht nur in der mittleren Differenz, sondern auch in der Streuung der individuellen Werte wieder. Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln dargestellt, beeinflusst insbesondere die Wahl der Referenzpunkte, also des ersten signifikanten Laktatanstiegs und des maximalen Laktatwertes, die Lage des Schwellenpunkts bei der modifizierten Dmax-Methode maßgeblich. Da bereits im Vergleich zur EAS ersichtlich wurde, dass die modifizierte Dmax die Schwelle im Mittel überschätzt, während die Dmax-Methode und die IAS sie tendenziell unterschätzen, ist die im Methodenvergleich festgestellte größere Abweichung der modifizierten Dmax wenig überraschend. Auch hier ist die zugrunde liegende Berechnungsweise eine mögliche Erklärung.

Insgesamt verdeutlicht der Vergleich der Verfahren, dass die Auswahl der Schwellenmethode einen relevanten Einfluss auf das Ergebnis der Leistungsdiagnostik hat. Differenzen von über 20 W zwischen einzelnen Verfahren wurden in dieser Untersuchung mehrfach beobachtet. Diese Unterschiede sind im Kontext der Trainingssteuerung nicht unerheblich, da sie je nach Methode zu unterschiedlichen Intensitätsvorgaben führen können. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, innerhalb eines Diagnostik- und Trainingskon-

zepts methodenkonform zu arbeiten und keine Schwellenwerte unterschiedlicher Verfahren unmittelbar miteinander zu vergleichen.

4.3 Limitationen

Die Aussagekraft der vorliegenden Untersuchung unterliegt mehreren Einschränkungen, die bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen sind. Ein wesentlicher Punkt betrifft die begrenzte Stichprobengröße. Mit zwölf vollständigen Datensätzen für das Fahrradergometer und jeweils zehn für das Laufband und das Ruderergometer ist die Fallzahl insgesamt gering. Dies reduziert die statistische Aussagekraft und erhöht die Anfälligkeit für Ausreißer. Darüber hinaus erfolgte die gesamte Datenerhebung an gut trainierten Leistungssportler*innen, die einen Trainingsumfang von mindestens 10 Stunden pro Woche aufwiesen. Eine Übertragung der beobachteten methodischen Übereinstimmungen und Abweichungen auf andere Populationen, etwa im Breiten- oder Gesundheitssport, ist nur eingeschränkt möglich, da in diesen Kollektiven möglicherweise veränderte Laktatkinetiken und physiologische Belastungsreaktionen auftreten. Hinzu kommt, dass die teilnehmenden Athlet*innen unterschiedlichen Sportarten entstammen – etwa dem Radsport, Triathlon, Rudern oder Laufsport – wodurch sich individuelle Unterschiede in der Trainingsanpassung und der Laktatbildungsrate ergeben können. Diese sportartspezifische Heterogenität stellt einen weiteren potenziellen Einflussfaktor auf die Positionierung der Schwellenwerte dar.

Als methodischer Referenzwert diente in dieser Arbeit die expertendefinierte anaerobe Schwelle (EAS), die von erfahrenen Sportwissenschaftlern des ÖISM auf Grundlage der individuellen Laktatverläufe und ihrer sportpraktischen Erfahrung festgelegt wurde. Auch wenn diese Vorgehensweise in der Praxis bewährt und etabliert ist, bleibt sie in ihrer methodischen Festlegung nicht standardisiert. Eine objektivere Bewertung der Schwellenmethoden wäre im Sinne einer methodischen Validierung durch einen direkten Vergleich mit dem maximalen Laktat-Steady-State (MLSS), das in der Literatur als physiologischer Referenzwert für die Bestimmung der individuellen Ausdauerleistungsfähigkeit gilt, wünschenswert gewesen.

Eine weitere Einschränkung betrifft die Protokollgestaltung innerhalb einzelner Ergometer-Typen. Während am Laufband bei allen Proband*innen ein identisches Stufenprotokoll mit gleichen Belastungsincrementen und Stufendauern verwendet wurde, kamen beim Fahrradergometer mehrere unterschiedliche Protokollvarianten mit variierender Startleistung und Inkrementhöhe zum Einsatz. Beim Ruderergometer wurden im Laufe der Untersuchungen ebenfalls zwei verschiedene Protokolle verwendet, die sich sowohl hinsichtlich der Startbelastung als auch der Stufendauer und Inkrementgröße unterschieden. Solche

Unterschiede können die Laktatkinetik beeinflussen und damit auch die Positionierung der Schwellenmethoden verändern.

4.4 Schlussfolgerungen

Diese Arbeit untersuchte drei etablierte laktatbasierte Verfahren zur Bestimmung der anaeroben Schwelle im direkten Vergleich zueinander sowie im Abgleich mit einer individuell gesetzten, expertendefinierten anaeroben Schwelle (EAS). Die Analyse erfolgte getrennt nach Fahrradergometer, Laufband und Ruderergometer. Ziel war es, ein möglichst genaues, praxistaugliches und für den sportartspezifischen Einsatz am ÖISM geeignetes Schwellenkonzept zu identifizieren.

Die modifizierte Dmax-Methode zeigte in allen drei Settings die größte Übereinstimmung mit der EAS und kann als zuverlässigstes Verfahren im Rahmen der durchgeführten Diagnostiken gelten. Auch die klassische Dmax-Methode erwies sich als methodisch robust und lag in ihren Ergebnissen durchweg nahe an der EAS. Die IAS hingegen setzte die Schwelle systematisch niedriger an und unterschätzte dadurch in allen drei Belastungsformen tendenziell die tatsächliche Ausdauerleistungsfähigkeit. Im praktischen Einsatz erscheint die modifizierte Dmax-Methode damit als bevorzugte Option zur Schwellenbestimmung, insbesondere bei leistungssportlich orientierter Belastungssteuerung. Die klassische Dmax-Methode kann als solide Alternative gelten. Die IAS bietet sich bei vorsichtiger Anwendung für konservativ ausgerichtete Belastungsempfehlungen an, sollte jedoch mit methodischer Zurückhaltung eingesetzt werden.

Künftige Untersuchungen sollten die Schwellenmethoden im direkten Vergleich mit dem maximalen Laktat-Steady-State bewerten, um ihre physiologische Gültigkeit weiter zu präzisieren. Darüber hinaus wäre es sinnvoll, den Einfluss unterschiedlicher Protokollparameter systematisch zu untersuchen. Schließlich sollten vergleichbare Analysen auch in weniger trainierten oder klinischen Populationen erfolgen, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf breitere Zielgruppen abzusichern.

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Übersicht über laktatbasierte Schwellenkonzepte.....	11
Tab. 2: Beschreibung der Studienteilnehmer*innen.....	24
Tab. 3: Vergleich der EAS mit anderen Schwellenkonzepten am Radergometer (n = 12)	27
Tab. 4: Vergleich der EAS mit anderen Schwellenkonzepten am Laufband (n = 10)	29
Tab. 5: Vergleich der EAS mit anderen Schwellenkonzepten am Ruderergometer (n = 10)	30
Tab. 6: Vergleichsmatrix der mittleren Differenzen $\pm$ Standardabweichung in Watt zwischen den Schwellenkonzepten am Radergometer (n = 12).....	32
Tab. 7: Vergleichsmatrix der mittleren Differenzen $\pm$ Standardabweichung in km/h zwischen den Schwellenkonzepten am Laufband (n = 10).....	33
Tab. 8: Vergleichsmatrix der mittleren Differenzen $\pm$ Standardabweichung in Watt zwischen den Schwellenkonzepten am Ruderergometer (n = 10).....	34

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Bestimmung der IAS nach Dickhuth et al. (1988)	15
Abb. 2: Bestimmung der anaeroben Schwelle nach Cheng et al. (1992)	15
Abb. 3: Lode Excalibur Sport Fahrradergometer (Medical Expo, 2025)	22
Abb. 4: h/p/cosmos puslar 3p Laufbandergometer (h/p/cosmos, 2025)	22
Abb. 5: RP3 Rowing Ruderergometer (RP3 Rowing, 2025).....	23
Abb. 6: Bland-Altman Plots Vergleich der Schwellenkonzepte am Radergometer	27
Abb. 7: Bland-Altman-Plots Vergleich der Schwellenkonzepte am Laufband	29
Abb. 8: Bland-Altman-Plots Vergleich der Schwellenkonzepte am Ruderergometer	31

Literaturverzeichnis

- Araújo, C. G. S., & Scharhag, J. (2016). Athlete: A working definition for medical and health sciences research. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(1), 4–7. <https://doi.org/10.1111/sms.12632>
- Arratibel-Imaz, I., Calleja-González, 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. *The Physician and Sportsmedicine*, 44(1), 34–45. <https://doi.org/10.1080/00913847.2016.1122501>
- Bishop, D., Jenkins, D. G., & Mackinnon, L. T. (1998). The relationship between plasma lactate parameters, Wpeak and 1-h cycling performance in women. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 30(8), 1270–1275. <https://doi.org/10.1097/00005768-199808000-00014>
- Camargo Alves, J. C., Segabinazi Peserico, C., Nogueira, G. A., & Machado, F. A. (2016). The influence of the regression model and final speed criteria on the reliability of lactate threshold determined by the Dmax method in endurance-trained runners. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 41(10), 1039–1044. <https://doi.org/10.1139/apnm-2016-0075>
- Carter, S. L., & Newhouse, I. (2019). Agreement among Six Methods of Predicting the Anaerobic Lactate Threshold in Elite Cross-Country Skiers. *International Journal of Exercise Science*, 12(2), 155–172. <https://doi.org/10.70252/ezjd8660>
- Casado, A., Foster, C., Bakken, M., & Tjelta, L. I. (2023). Does Lactate-Guided Threshold Interval Training within a High-Volume Low-Intensity Approach Represent the “Next Step” in the Evolution of Distance Running Training? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph20053782>

- Chalmers, S., Esterman, A., Eston, R., & Norton, K. (2015). Standardization of the Dmax Method for Calculating the Second Lactate Threshold. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(7), 921–926.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0537>
- 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. *International Journal of Sports Medicine*, 13(7), 518–522. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021309>
- Dickhuth, H.-H., Wolfarth, B., Hildebrand, D., Rokitzki, L., Huonker, M., & Keul, J. (1988). Jahreszyklische Schwankungen der Ausdauerleistungsfähigkeit von hochtrainierten Mittelstreckenläufern. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 39 (9), 346–353.
- Faude, O., Kindermann, W., & Meyer, T. (2009). Lactate Threshold Concepts: How Valid are They? *Sports Medicine*, 39(6), 469–490. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939060-00003>
- Ferrauti, A. (Hrsg.). (2020). *Trainingswissenschaft für die Sportpraxis: Lehrbuch für Studium, Ausbildung und Unterricht im Sport*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58227-5>
- Güllich, A., & Krüger, M. (Hrsg.). (2022). *Sport: Das Lehrbuch für das Sportstudium*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-64695-3>
- Hauser, T., Adam, J., & Schulz, H. (2013). Comparison of Selected Lactate Threshold Parameters with Maximal Lactate Steady State in Cycling. *International Journal of Sports Medicine*, 35(06), 517–521. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1353176>
- Heck, H., Bartmus, U., & Grabow, V. (2022). *Laktat. Stoffwechselgrundlagen, Leistungsdiagnostik, Trainingssteuerung*. Springer.
- Heck, H., & Beneke, R. (2008). 30 Jahre Laktatschwellen—Was bleibt zu tun? *Deutsche Zeitschrift für sportmedizin*, 59(12), 297–302.
- Hofmann, P., Wonisch, M., & Pokan, R. (2017). Laktat-Leistungsdiagnostik: Durchführung und Interpretation. In M. Wonisch, P. Hofmann, H. Förster, H. Hörtnagl, E. Ledl-

- Kurkowski, & R. Pokan (Hrsg.), *Kompendium der Sportmedizin* (S. 189–242). Springer Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-211-99716-1_14
- Hottenrott, K., Hoos, O., Stoll, O., & Blazek, I. (2022). Sportmotorische Fähigkeiten und sportliche Leistungen – Trainingswissenschaft. In M. Krüger (Hrsg.), *Sport: Das Lehrbuch für das Sportstudium*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-64695-3>
- Hottenrott, K., & Seidel, I. (Hrsg.). (2017). *Handbuch Trainingswissenschaft—Trainingslehre*. Hofmann.
- h/p/cosmos. (2025, April). *H/p/comsos pulsar 3p*. <https://www.hpcosmos.com/de/produkte/laufbaender/pulsar-3p>
- 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 V'O₂peak. *PLOS ONE*, 13(7), e0199794. <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 Medicine*, 50(10), 1729–1756. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01322-8>
- Llodio, I., Yanci, J., Usandizaga, M., Larrea, A., Iturricastillo, A., Cámara, J., & Granados, C. (2024). Repeatability and Validity of Different Methods to Determine the Anaerobic Threshold Through the Maximal Multistage Test in Male Cyclists and Triathletes. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 10(1), 9. <https://doi.org/10.3390/jfmk10010009>
- Mann, T., Lamberts, R. P., & Lambert, M. I. (2013). Methods of Prescribing Relative Exercise Intensity: Physiological and Practical Considerations. *Sports Medicine*, 43(7), 613–625. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0045-x>
- McKinney, J., Velghe, J., Fee, J., Isserow, S., & Drezner, J. A. (2019). Defining Athletes and Exercisers. *The American Journal of Cardiology*, 123(3), 532–535. <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2018.11.001>

Medical Expo. (2025, April). *Lode Excalibur Sport*.

<https://www.medicalexpo.com/prod/lode/product-69134-537791.html>

Pape, H.-C., Kurtz, A., & Silbernagl, S. (Hrsg.). (2019). *Physiologie* (9. vollständig überarbeitete Auflage). Thieme.

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 and Rehabilitation*, 12(1), 70. <https://doi.org/10.1186/s13102-020-00219-3>

Poole, D. C., Rossiter, H. B., Brooks, G. A., & Gladden, L. B. (2021). The anaerobic threshold: 50+ years of controversy. *The Journal of Physiology*, 599(3), 737–767.

Röcker, K. (2008). Streit um des Kaisers Bart: Welche Laktatschwelle ist die beste? *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 59, 280–281.

Röcker, K. (2022). Sportmedizinische Anwendung: Laktat- und Leistungsdiagnostik. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Bewegung, Training, Leistung und Gesundheit: Handbuch Sport und Sportwissenschaft* (S. 641–667). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53410-6>

Röcker, K., Prettin, S., Pottgiesser, T., Schumacher, Y. O., & Dickhuth, H. H. (2010). Metabolische Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung in der Sportmedizin. *Sport- und Präventivmedizin*, 40(1), 6–12. <https://doi.org/10.1007/s12534-010-0079-x>

RP3 Rowing. (2025, April). *RP3 Ruderergometer*. <https://rp3rowing.ch/rowing-simulator/>

Scharhag, J. (2018). Kardiale Schädigung durch Leistungssport? *Cardio News*, 21, 17.

Van Schuylenbergh, R., Vanden Eynde, B., & Hespel, P. (2004). Correlations Between Lactate and Ventilatory Thresholds and the Maximal Lactate Steady State in Elite Cyclists. *International Journal of Sports Medicine*, 25(6), 403–408. <https://doi.org/10.1055/s-2004-819942>

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. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(12), 3489–3496.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001770>
- Wahl, P., Zwingmann, L., Manunzio, C., Wolf, J., & Bloch, W. (2018). Higher Accuracy of the Lactate Minimum Test Compared to Established Threshold Concepts to Determine Maximal Lactate Steady State in Running. *International Journal of Sports Medicine*, 39(07), 541–548. <https://doi.org/10.1055/s-0044-102131>
- Weichenberger, M., Esefeld, K., & Müller, S. (2023). Kardiopulmonale Leistungsdiagnostik beim Spitzensportler. *Herzschrittmachertherapie + Elektrophysiologie*, 34(1), 19–25. <https://doi.org/10.1007/s00399-022-00916-1>
- Weineck, J. (2019). *Optimales Training. Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder- und Jugendtraining* (17. Aufl.). Spitta.
- 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. *The Physician and Sportsmedicine*, 47(2), 174–181.
<https://doi.org/10.1080/00913847.2018.1546103>