

Technische Universität München
Fakultät für Sport- und Gesundheitswissenschaften
Lehrstuhl für Trainingswissenschaft und Sportinformatik

**Diagnostik der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit im
Schwimmsport –
Historischer Längsschnittvergleich, Methodenvergleich
und Validierung**

Christine Hoffmann

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Sport- und
Gesundheitswissenschaften der Technischen Universität München zur
Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Philosophie (Dr. phil.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Filip Mess
Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr. Martin Lames
2. Prof. Dr. Andreas Hohmann

Die Dissertation wurde am 07.11.2019 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die Fakultät für Sport- und
Gesundheitswissenschaften am 28.02.2020 angenommen.

Christine Hoffmann (2020)

Diagnostik der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit im Schwimmsport –
Historischer Längsschnittvergleich, Methodenvergleich und Validierung
Dissertation, Sport und Gesundheitswissenschaften, TU München

Inhalt

1. Einleitung und Problemstellung	6
2. Forschungsstand	11
2.1. Leistungsstruktur im Schwimmsport.....	11
2.1.1. Leistungsstrukturmodelle	11
2.1.2. Aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit als ein Hauptfaktor der Leistungsfähigkeit im Schwimmen.....	22
2.2. Physiologie der Laktatdiagnostik.....	25
2.2.1. Chemische Zusammenhänge und Hintergrundwissen zum Laktatmetabolismus	25
2.2.2. Historische Entwicklung und Terminologie der Schwellenkonzepte....	28
2.2.3. Die Bedeutung des maximalen Laktat-Steady-State (MLSS)	38
2.2.4. Aktuelle Erkenntnisse zum Laktatstoffwechsel	40
2.3. Diagnostik der Ausdauerleistungsfähigkeit im Schwimmen	45
2.3.1. Aktuell angewandte Stufentests im Schwimmen.....	46
2.3.2. Einflussfaktoren auf die LLK und deren Kenngrößen.....	55
2.3.3. Interpretation der LLK	60
2.3.4. Das Modell der Critical Swimming Speed	65
2.3.5. Beziehung zwischen Laktatschwellen, Hf, VO_{2max} , MLSS und CS.....	71
2.3.6. Ableitung von Belastungszonen.....	80
2.3.7. Weitere Testmethoden.....	91
2.4. Fragestellung der Dissertation	94
3. Entwicklung der Ausdauerleistungsfähigkeit deutscher Spitzenschwimmer über drei Jahrzehnte.....	96
3.1. Problemstellung	96
3.2. Ablauf Pansoldtest	96
3.3. Datenerhebung und Stichprobe	97
3.4. Statistik.....	99

3.5.	Ergebnisse	99
3.5.1.	Vergleich der Geschlechter.....	99
3.5.2.	Vergleich zwischen 100-m-, 200-m- und 400-m-Schwimmern.....	100
3.5.3.	Verhältnis der Parameter zueinander	103
3.5.4.	Leistungsentwicklung im Längsschnittvergleich.....	104
3.6.	Diskussion.....	117
3.6.1.	Geschlechts- und streckenspezifische Unterschiede.....	117
3.6.2.	Längsschnittvergleich	120
3.7.	Schlussfolgerungen.....	122
4.	Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung der Dauerbelastungsgrenze	124
4.1.	Stichprobe	126
4.2.	Design und Methodik der Testdurchführung	127
4.2.1.	Ablauf des Stufentests	127
4.2.2.	Auswertung des Stufentests	128
4.2.3.	Berechnung der einzelnen Kategorien der CS.....	131
4.2.4.	Validierung der CS im Dauertest.....	132
4.2.5.	Vergleich der AnS aus dem Stufentest mit der CS ₂₀₀₋₁₅₀₀ und der CS ₁₀₀₋₈₀₀	133
4.2.6.	Ablauf des Dauertests zur Validierung der AnS aus dem 7 × 200 m Stufentest.....	134
4.3.	Statistik.....	134
4.4.	Ergebnisse	138
4.4.1.	Ergebnisse des Vergleichs der Schwellenkonzepte.....	138
4.4.2.	Vergleich der einzelnen Kategorien der CS untereinander.....	142
4.4.3.	Vergleich der CS _{Zacca} mit der CS ₁₀₀₋₈₀₀ und der CS ₂₀₀₋₁₅₀₀	146
4.4.4.	Validierungsversuch der CS ₁₀₀₋₄₀₀ im Dauertest	147

4.4.5.	Vergleich der Geschwindigkeit an der AnS aus dem Stufentest mit der CS ₂₀₀₋₁₅₀₀ und der CS ₁₀₀₋₈₀₀	149
4.4.6.	Ergebnisse Dauertest zur Validierung der AnS.....	155
5.	Diskussion	158
5.1.	Vergleich der Schwellenkonzepte im Stufentest	158
5.2.	Vergleich der Kategorien der CS.....	159
5.3.	Validierung der CS ₁₀₀₋₄₀₀ im Dauertest	161
5.4.	Berechnung der ASC	163
5.5.	Vergleich der Geschwindigkeit an der AnS aus dem Stufentest mit der CS ₂₀₀₋₁₅₀₀ und der CS ₁₀₀₋₈₀₀	164
5.6.	Validierung der AnS aus dem Stufentest im Dauertest	164
5.7.	Bezug zu den Trainingszonen.....	167
6.	Praktische Empfehlung und Schlussfolgerungen	170
7.	Zusammenfassung	173
8.	Danksagung	177
9.	Abbildungsverzeichnis.....	178
10.	Tabellenverzeichnis.....	183
11.	Abkürzungsverzeichnis.....	186
12.	Literaturverzeichnis	188
13.	Anhang	202

1. Einleitung und Problemstellung

In den letzten Jahren stand der deutsche Schwimmsport immer wieder massiv in der Kritik. Seit dem Zusammenführen der beiden deutschen Schwimmverbände aus Ost und West im Jahr 1990 verringerten sich die Erfolge bei Olympischen Spielen und Weltmeisterschaften stetig. Konnten die beiden separaten Schwimmverbände im Jahr 1988 noch zusammengezählt 29 Medaillen im Schwimmen gewinnen, sank die Zahl im Jahr 1992 bereits auf elf. Als 2012 im Beckenschwimmen keine einzige Medaille mehr gewonnen werden konnte und nur noch ein Freiwasserschwimmer das Ansehen rettete, gab es heftige Kritik von allen Seiten. 2016 erreichte der Deutsche Schwimmverband (DSV) den absoluten Tiefpunkt mit keiner einzigen Medaille bei den Olympischen Spielen in Rio. Auch bei den Medaillengewinnen bei Weltmeisterschaften ist der gleiche Abwärtstrend zu erkennen (Abbildung 1).



Abbildung 1: Anzahl der durch deutsche Schwimmer gewonnenen Medaillen bei Olympischen Spielen (schwarz) und Weltmeisterschaften (grau) zwischen 1988 und 2017. Die gestrichelte Linie zeigt den Zeitpunkt der Vereinigung der beiden Verbände Ost (DSSV) und West (DSV) an.

In den ersten Jahren nach der Wiedervereinigung beeinträchtigten gegenseitige Skepsis und Vorbehalte der beiden deutschen Schwimmverbände, die vorher unterschiedlichen gesellschaftspolitischen Systemen angehörten, die Diskussion zwischen den Landesschwimmverbänden der sogenannten alten und neuen Bundesländer. Der Westen behauptete, das systematische Doping der DDR würde nun nicht mehr wirken, der Osten rechtfertigte sich, die Rahmenbedingungen seien so viel schlechter geworden. In der Folge setzte eine erregte Debatte um die Gründe für die Misere ein.

Als mögliche Ursachen für den nachlassenden Erfolg im Schwimmsport wurden genannt:

- Demografische Entwicklung: Es gibt immer weniger Kinder und damit wird die Gesamtmenge, aus der für den Leistungssport ausgewählt werden kann, kleiner;
- Die Konkurrenz aus anderen Sportarten ist groß: Trendsportarten sind beliebter als ein regelmäßiges, ausdauerndes, umfangreiches und leistungsorientiertes Training in einer traditionellen Sportart;
- Immer mehr Bäder schließen: Die Nutzungsmöglichkeiten für Vereine werden geringer und kostenaufwendiger;
- Auch wenn Schwimmen ein kostengünstiger Sport ist, die finanzielle Belastung für das Equipment wird höher;
- Motivationale Schwierigkeiten unter den jugendlichen Schwimmern und damit verbunden eine zu hohe Dropout-Quote nach dem Juniorenalter;
- Der Leistungsdruck aus der Schule nimmt zu (z.B. „G8“) und die Doppelbelastung durch schulische und sportliche Anforderungen wächst;
- Zunehmender Migrationshintergrund unter den Jugendlichen: Zu- und Einwanderer können oft nicht schwimmen, islamische Mädchen dürfen häufig nicht schwimmen;
- Kritische Trainersituation: Die Schwimmtrainer sind nicht so hoch qualifiziert wie in den USA, Australien oder früher in der DDR und müssen für sehr wenig Geld sehr umfangreiche Arbeit leisten;
- Es gibt keine systematische Talentsichtung und –förderung wie sie in China oder der DDR erfolgt (e);

- Zu wenig Anerkennung in der Gesellschaft bei sportlichen Erfolgen: Selbst ein Olympiasieg hat nicht den Stellenwert, wie er ihn z.B. in China oder den USA hat;
- Die konditionelle Ausbildung der deutschen Schwimmer ist mangelhaft.

In den letzten Jahren versuchte Bundestrainer Henning Lambertz mit seinem Nachwuchs-Perspektivteam (Lambertz, 2014) und anschließend mit einem völlig neuen Krafttrainingskonzept (Fuhrmann et al., 2017) neuen Schwung in den DSV zu bringen. Die konstruktiven Innovationen umfassten Hanteltraining ab dem Alter von acht Jahren, HIT-Training als neuen Trend im Wasser oder Rückbesinnung auf umfangreiches Ausdauertraining mit mindestens 9–12 Stunden Training pro Woche für 9- bis 10-jährige Kinder (Lambertz, 2014).

Dies löste zum Teil heftige Diskussionen unter den Trainern und Sportwissenschaftlern aus. Dabei trafen immer wieder zwei kontroverse Standpunkte aufeinander:

Die Basis der Grundlagenausdauer der deutschen Schwimmer ist sehr schlecht ausgebildet. Die Trainer sollen sich – insbesondere im Nachwuchsbereich – wieder auf ein umfangorientiertes Training zurückbesinnen. Um dies umzusetzen, müssen Eliteschulen genutzt werden.



Die athletischen Voraussetzungen der deutschen Schwimmer liegen im internationalen Vergleich weit unter dem Niveau der Weltelite. Da die Rahmenbedingungen (Schule, Bäder, ...) ungünstig sind, muss intensiver im Wasser trainiert werden und es muss mehr Krafttraining an Land durchgeführt werden.

Die angestrebten Ziele dieser zwei konträren Standpunkte lassen sich nicht gleichzeitig umsetzen, da im Spitzenbereich eine Verbesserung der aeroben Grundlagenausdauer mit einer Verschlechterung der Kraftleistungen und umgekehrt

einhergehen (Wiedner, 2002). Allerdings basieren die beiden Standpunkte nicht auf wissenschaftlich fundierten Erkenntnissen, sondern eher auf der subjektiven Erfahrung von Trainern.

Wissenschaftliche Erkenntnisse zu dieser Thematik können die gespeicherten Daten der zentralen Leistungsdiagnostik liefern. Alle Kaderathleten des DSV sind verpflichtet, regelmäßig an einer komplexen Leistungsdiagnostik (KLD) an einem von drei Olympiastützpunkten (OSP) teilzunehmen. Die Ergebnisdaten dieser Tests werden zentral in einer Datenbank gesammelt und vom Bundestrainerteam ausgewertet. 2015 ergab sich die Möglichkeit, auf diese Daten zuzugreifen. Dadurch eröffnete sich eine hervorragende Gelegenheit für eine Langzeitstudie. Besonders der schon in der DDR durchgeführte und bis heute gleichbleibend standardisierte Ausdauerstest eignet sich für eine Längsschnittuntersuchung. Der umfassende Pool an Testergebnissen lässt eine Analyse der Entwicklung der Ausdauerleistungsfähigkeit deutscher Spitzenschwimmer über mehrere Jahrzehnte zu und kann aufzeigen, welche Leistungsvoraussetzungen in den unterschiedlichen Disziplinen für Spitzenleistungen notwendig sind.

Trotz des hohen Niveaus an Standardisierung und des großen Erfahrungsschatzes mit dem angewandten Stufentest, stößt die vorgegebene Testform immer wieder auf Kritik. Besonders die Interpretation der Laktatleistungskurve anhand von Schwellenkonzepten wird zunehmend skeptisch betrachtet (Vgl. Kapitel 2.2.4. „Aktuelle Erkenntnisse zum Laktatstoffwechsel“).

Nach der Flut der Entwicklung von Schwellenkonzepten in den 1970er und 1980er Jahren, gibt es seit dem Ende des 20. Jahrhunderts neue Erkenntnisse zur Verwertung von Laktat im Körper. Galt Laktat ursprünglich als Abfallprodukt der Energiebereitstellungskette, so weiß man heute, dass es als energielieferndes Substrat wieder in den Stoffwechsel zurückgeführt wird. Neue wissenschaftliche Auffassungen brauchen einige Zeit, um sich zu etablieren. Selbst in manchen wissenschaftlichen Vorträgen werden die inzwischen belegten Erkenntnisse bezüglich der Verwertung von Laktat noch nicht berücksichtigt.

Die Anwendung von Schwellenkonzepten muss daher unter den neuen Aspekten kritisch betrachtet werden. Keines der entwickelten Schwellenkonzepte konnte sich als wissenschaftlicher Standard etablieren. Als Goldstandard zur Ermittlung der

Ausdauerleistungsfähigkeit hat sich die sehr aufwendige Messung des maximalen Laktat-Steady-States (MLSS) durchgesetzt. Nach wie vor werden die ökonomischeren Stufentests in der Praxis zur Abschätzung dieser Dauerleistungsgrenze eingesetzt. Viele Studien belegen Zusammenhänge zwischen MLSS und Laktatschwellen (vgl. Kapitel 2.3.5. „Beziehung zwischen Laktatschwellen, $\dot{V}O_2$ max, MLSS und CS“), aber stimmen die Werte auch überein oder korrelieren sie nur?

Als alternative und nicht-invasive Methode zur Bestimmung der Dauerleistungsgrenze wurde das Modell der „Critical Swimming Speed“ entwickelt. Auch hier konnten Zusammenhänge zu anderen Bestimmungsmethoden aufgezeigt werden, aber in den seltensten Fällen weisen die Studien die Übereinstimmung der Messverfahren nach. Handelt es sich bei der mit dieser Methode berechneten Geschwindigkeit um die Dauerbelastungsgrenze?

Diese eben aufgeworfenen Fragen stellen aktuelle Fragen der Leistungsdiagnostik im Schwimmen dar. In dieser Studie werden sie einer konkreten Untersuchung mit wissenschaftlichen Methoden zugeführt. Es soll zum einen geklärt werden, ob die Vermutung, die Ausdauerleistung deutscher Schwimmer hätte sich in den letzten Jahrzehnten stark verschlechtert, wissenschaftlich belegt werden kann. Zum anderen sollen die neuesten Erkenntnisse zum Laktatstoffwechsel in die Interpretation von Stufentests einfließen. Geeignete Testabläufe zur Ermittlung der aeroben Ausdauer werden diskutiert und Auswertungsmethoden verglichen. Dazu sollen praktische Empfehlungen für die Anwendung von Stufentests entwickelt und alternative Möglichkeiten aufgezeigt werden.

2. Forschungsstand

2.1. Leistungsstruktur im Schwimmsport

Um die sportliche Leistungsfähigkeit eines Athleten zu bestimmen oder zu verbessern, ist es notwendig die sportartspezifischen Leistungsanforderungen zu kennen. Leistungsstrukturmodelle versuchen die einzelnen Komponenten der sportlichen Leistungsfähigkeit und deren Wechselbeziehung in der jeweiligen Sportart zu identifizieren (Hohmann, Lames & Letzelter, 2010). Dabei wird zunächst ein Modell entwickelt, bei dem alle Elemente einzelnen Erklärungsebenen zugeordnet und hierarchisiert werden. Die Elemente werden hinsichtlich der Bedeutung für die sportliche Leistung eingeordnet und anschließend die interne Ordnung durch Quantifizierung der Beziehungen zwischen den Elementen ermittelt (Hohmann et al., 2010). Aus der Leistungsstruktur und den Gesetzmäßigkeiten ihrer Entwicklung leiten sich Ziele und Inhalte sportlichen Trainings ab.

2.1.1. Leistungsstrukturmodelle

Für den Schwimmsport gibt es bisher kein einheitliches Leistungsstrukturmodell, nur Modelle mit groben Übersichten zu den Leistungsvoraussetzungen (Pfeiffer, 1988; Pyne & Sharp, 2014; Rudolph, 2014, 2015; Wiedner & Köthe, 2000) oder Angaben zu Leistungsstrukturen einzelner Teilbereiche, wie z.B. Start oder Wenden (Graumnitz, Küchler & Lachmann, 2009, 2010). Die Problematik im Schwimmsport liegt in der Vielfalt der insgesamt 32 verschiedenen olympischen Disziplinen mit einer Wettkampfdauer für Beckenschwimmer von ca. 20 s bis hin zu 15 min mit sehr unterschiedlichen physiologischen Anforderungen. Nicht nur die Streckenlänge, sondern auch die Schwimmart, das Geschlecht, Körperbaumerkmale und das Alter bringen sehr heterogene Anforderungsprofile bezüglich der zeitlichen Belastung und der Inanspruchnahme der biologischen Systeme mit sich (Pansold & Zinner, 1994; Rudolph, 2015). Die vielfältigen Beziehungen der leistungsbestimmenden und leistungsbeeinflussenden Elemente werden in Strukturmodellen dargestellt, aber die leistungsstrukturellen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Faktoren erweisen sich als sehr komplex (Wiedner & Köthe, 2000) und scheinen ein Grund für die Schwierigkeiten in der Differenzierung im Trainingsprozess zu sein (Pfeiffer, 1988).

Das bisher umfassendste Modell der Leistungsstruktur findet sich im Standardwerk der DDR „Sportschwimmen“ (Schramm, 1987) (Abb. 2).



Abbildung 2: Modell der Leistungsstruktur im Sportschwimmen – Grundvorstellung. Quelle: Schramm (1987, S. 176)

Das Modell versucht eine allgemeingültige disziplinübergreifende Grundvorstellung der Leistungsvoraussetzungen zu geben. Die personellen Faktoren stehen im Mittelpunkt, bestimmte eng miteinander verbundene Faktoren sind durch Leistungsbereiche oder Oberbegriffe zusammengefasst. Die sportlichen Fähigkeiten und Eigenschaften des Sportlers sind, je nach Einflusstärke, als unterschiedlich große

Kreise dargestellt und eingebettet in die Persönlichkeitsmerkmale. Äußere relevante Einflüsse sind am Rand als externe Faktoren aufgeführt.

Als wesentliche Leistungsfaktoren für das Schwimmen gelten in diesem Modell:

- Moralische, psychische und intellektuelle Persönlichkeitseigenschaften:
Dazu gehören Selbstvertrauen, Mobilisationsfähigkeit, Willensanspannung und taktische Fähigkeiten. Sie sind in der Abbildung als übergeordnete Faktorendargestellt.
- Konditionelle Fähigkeiten:
Im Wesentlichen betreffen diese alle Ausprägungsformen der Ausdauer, die maximale Schnelligkeit, die Schnellkraft und die Maximalkraft.
- Koordinative Fähigkeiten und technische Fertigkeiten:
Als der wichtigste komplexe Leistungsfaktor aus diesem Bereich wird das Wassergefühl genannt. Neben den schwimmtechnischen Fertigkeiten gelten einzelne koordinative Fähigkeiten, wie die Differenzierungsfähigkeit, Kopplungsfähigkeit, Rhythmisierungsfähigkeit und Reaktionsfähigkeit, als leistungsbestimmend.
- Konstitutionelle Merkmale:
Die hydrodynamische Gleitfähigkeit und die Fähigkeit effektiven Vortrieb zu erzeugen werden maßgeblich durch verschiedene Körperbaumerkmale beeinflusst. Besonders gewichtig sind die Körpergröße, Körperform und Körperdichte.
- Beweglichkeit und Entspannungsfähigkeit:
Im Leistungsschwimmen ist die Beweglichkeit im Schultergelenk und den Sprunggelenken von großer Bedeutung. Die Entspannungsfähigkeit wirkt sich ebenfalls auf die Beweglichkeit aus.
- Äußere Bedingungen:
Das Klima, die Wettkampfstätte, sowie Zuschauer machen die Wettkampfatmosphäre aus und beeinflussen die Leistung des Schwimmers.
- Komplexe Leitbilder:
Die technischen Leitbilder und der Plan der Renngestaltung nehmen in diesem Modell einen kleinen Stellenwert ein.

Die Beziehung einiger Leistungsfaktoren als Voraussetzung für die 100 und 200 m Wettkampfleistung der Männer hat Schramm (1987) nach den Angaben von Platonow (1974), Schramm (1960) und Zaciorskij und Safarjan (1972) mit Hilfe von Korrelationskoeffizienten dargestellt (Abbildung 3). Die Grundlagenausdauer und die wettkampfspezifische Ausdauer nehmen trotz der kurzen Wettkampfdistanzen mit 0,80 und 0,74 den gewichtigsten Stellenwert ein. Zur methodischen Vorgehensweise bei der Ermittlung der Werte werden im Buch keine Angaben gemacht.

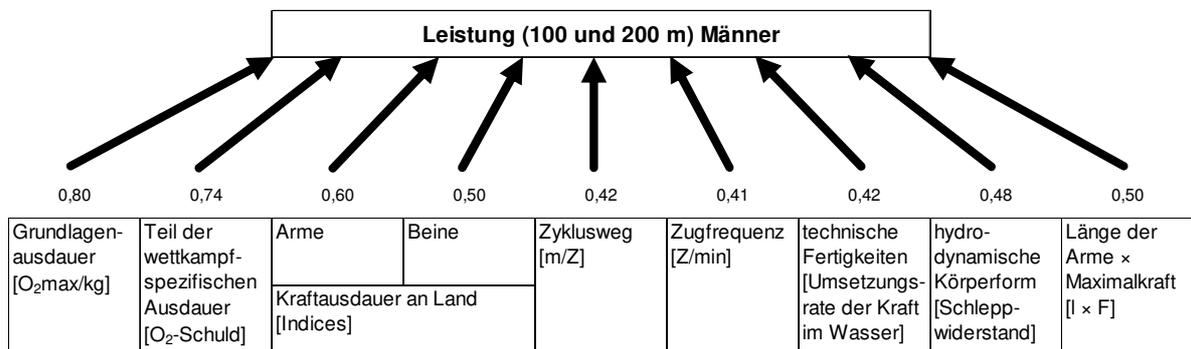


Abbildung 3: Korrelative Beziehung ausgewählter Leistungsfaktoren zur Wettkampfleistung. Quelle: nach Schramm (1987, S. 180)

Pfeiffer (1988) beschreibt das Vorgehen, wie aus der ermittelten Leistungsstruktur Anforderungen an das Training abzuleiten sind. Ausgehend von den Erkenntnissen zur Leistungsstruktur sollen die Trainingsstrukturen so verändert werden, dass die Sportler den künftigen Wettkampfanforderungen gerecht werden können und Spitzenplatzierungen erreichen.

Weitere Ansätze von Leistungsstrukturmodellen finden sich z.B. bei Wiedner und Köthe (2000): Auf der Grundlage der Eignungsuntersuchungen des sächsischen Schwimmverbandes an 1245 Mädchen und Jungen im Alter von 8 bis 12 Jahren, ermitteln die Autoren anhand einer Faktorenanalyse die Leistungsvoraussetzungen für die Wettkampfleistung im Schwimmen. Die Eignungsuntersuchung besteht aus jeweils elf Kontrollübungen an Land und im Wasser, sowie sechs weiteren Variablen zu den körperlichen Voraussetzungen und dem Trainingsstand. Dabei identifizieren Wiedner und Köthe (2000) Faktoren wie Schwimmtechnik, Schnelligkeit, Rumpfkraft, Beweglichkeit und Körperbau. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass sich die

Gewichtung einzelner leistungsvoraussetzender Elemente im Laufe des langfristigen Leistungsaufbaus ändert und unterschiedliche Wertigkeiten zwischen den Geschlechtern und Disziplinen auftreten.

Der Modellansatz von Leopold (2000b) macht deutlich, dass die sportliche Leistung im Schwimmen in erster Linie durch den Vortrieb bestimmt wird und dieser durch konditionelle und koordinative Fähigkeiten. Diese Sichtweise stimmt mit Maglischo (2003) überein, der der Meinung ist, dass es im Schwimmsport in erster Linie darum geht, Vortrieb zu erzeugen und Wasserwiderstand zu vermeiden. Neben den konditionellen und koordinativen Fähigkeiten nimmt die Konstitution direkt Einfluss auf den Vortrieb. Leopold (2000b) schreibt „Die Leistung des Schwimmers wird durch den Vortrieb im Einzelzyklus pro Zeiteinheit und durch seine oftmalige, durch die Streckenlänge begrenzte, Wiederholbarkeit bestimmt.“ In dieser Äußerung kommt die große Bedeutung der Qualität der Schwimmtechnik und – je nach Streckenlänge – der Ausdauer in Form der Wiederholbarkeit deutlich zum Ausdruck.

Die Beziehung von Teilergebnissen aus der komplexen Leistungsdiagnostik und deren Einfluss auf die Wettkampfleistung belegt Rudolph (2014) mit Korrelationsergebnissen (Abbildung 4). Dass eine hohe Sprungkraft mit einer kurzen Startzeit zusammenhängt, wird mit einem Korrelationskoeffizienten von $-0,75$ belegt. Die Maximalkraft der Arme und die Kraftausdauer werden beide am Seilzugergometer ermittelt und korrelieren mit $0,80$. Außerdem gibt es einen großen Zusammenhang zwischen der Maximalkraft der Arme und der Leistung am Schwimmwiderstandsgerät (SWG) ($0,93$). Dieses Widerstandsgerät misst, wieviel Kraft der Schwimmer in seiner Schwimmtechnik ins Wasser bringt. Durch die Gewichtung der Messergebnisse können übergreifende Zusammenhänge der sportlichen Leistung erkannt werden. Leider erfolgen weder Angaben zur untersuchten Stichprobe, noch ist definiert, um welche Wettkampfleistung (Sprint, Langstrecke, Schwimmlage) es sich handelt. In diesem Zusammenhang räumt der Autor Mängel in der Verarbeitung der Informationen aus der zwanzigjährigen Leistungsdiagnostik an den deutschen Kaderathleten ein. Die sehr hohen Korrelationskoeffizienten zwischen Wettkampfleistung, der 25 m Sprintleistung und des Starts sowie im Gegenzug der geringe Zusammenhang zwischen Wettkampfleistung und Kraftausdauer deuten auf eine

Kurzstrecke hin. Bei Langstreckenwettkämpfen gäbe es mit Sicherheit eine andere Gewichtung.

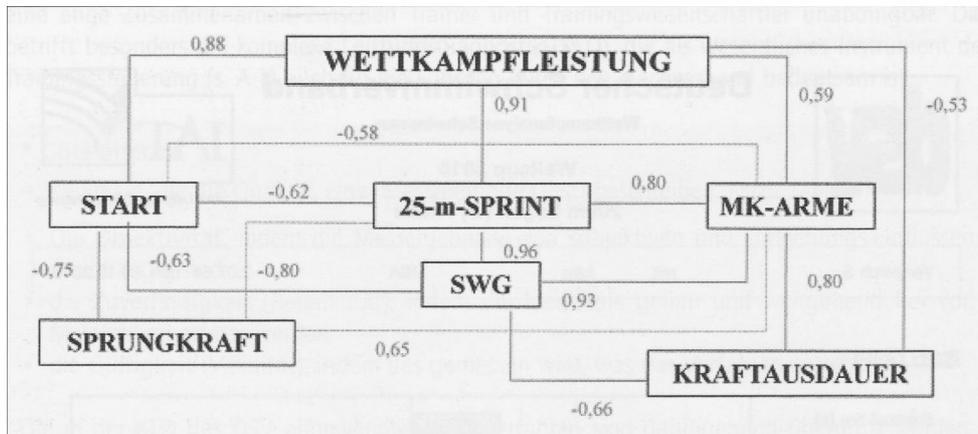


Abbildung 4: Korrelative Beziehung von Teilergebnissen aus der KLD.
Quelle: Rudolph (2014, S. 84)

Einen nicht-empirischen Modellansatz mit einer Unterteilung in Teilleistungen findet sich in der Nachwuchskonzeption Schwimmen des DSV (2015) (vgl. Tabelle 1). Die Gesamtleistung untergliedert sich in die reine Schwimmleistung, den Start und die Wenden. Die zugrundeliegenden konditionellen Fähigkeiten sowie Eigenschaften der Handlungsregulation und der Konstitution sind aufgeführt.

Tabelle 1: Modellansatz der Leistungsstruktur im Schwimmen am Beispiel eines 100m-Wettkampfes.

Quelle: Rudolph (2015, S. 9); in Anlehnung an Grundlach, 1980

Vollzugsebene	Start	Schwimmen (Angehen)	Wende	Schwimmen (Endspurt)	Anschlag
Bewegungsregulation (Technikleitbild / Koordination)	<i>azyklisch</i> - Schrittstart - Greifstart - Delfinbewegung	<i>zyklisch</i> - Kraul - Brust - Schmetterling - Rücken	<i>azyklisch</i> - Kippwende - Rollwende - Delfinbewegung	<i>zyklisch</i> - Kraul - Brust - Schmetterling - Rücken	<i>azyklisch</i> - einarmig - beidarmig
Konditionelle Basis (S = Schnelligkeit)	Schnellkraft Reaktions-S. Aktions-S. Schnelligkeit	Schnelligkeitsausdauer Kraftausdauer	Schnellkraft Reaktions-S. Aktions-S. Schnelligkeit	Stehvermögen (WK Ausdauer)	Reaktions-S. Aktions-S.
	Wettkampfspezifische Ausdauer				
	Grundlagenausdauer				
Handlungsregulation	← Willensstoßkraft			Willensspannkraft →	
	Leistungsbereitschaft / Taktik / Erfahrung				
Konstitution	Körperbau / Beweglichkeit / Belastbarkeit				

Mit einer völlig anderen Herangehensweise entwickelten Cserépy, Bissig und Gröbli (2014) ein Strukturmodell für die Schwimmtechniken. Sie bestimmten die vier Kernelemente des Schwimmens: Atmen, Schweben, Antreiben und Gleiten.

Diese Elemente beschreiben alle wesentlichen Funktionen, die zum Schwimmen benötigt werden. Das Beherrschen der Kernelemente ermöglicht die Fortbewegung im Wasser, ihre Funktionen basieren auf den physikalischen Eigenschaften des Wassers – dem Widerstand und dem Auftrieb. Die Kernelemente stehen untereinander in enger Wechselbeziehung.

Dieses Modell wurde ursprünglich für den Anfängerschwimmunterricht entwickelt, ist aber auch für die Technikverbesserung im Hochleistungsbereich nutzbar. Maßgebliche Trainingsziele sind die Verbesserung der Antriebstechnik, die Anpassung der Atmung oder die Optimierung der Gleitposition.

Trotz der vielen unterschiedlichen Herangehensweisen und Einteilungen, finden sich grundlegende Leistungsvoraussetzungen immer wieder (Wiedner & Köthe, 2000):

- Allgemeine anthropometrische und athletische Leistungsvoraussetzungen:
Insbesondere Körperbau und Körpermasseverteilung;
- Schwimmspezifisch-konditionelle Leistungsvoraussetzungen:
Ausdauer, Schnelligkeit, Kraft und Beweglichkeit;
- Schwimmtechnische Leistungsvoraussetzungen:
Koordinative Fertigkeiten, gutes Wassergefühl und eine individuell optimale Umsetzung der Schwimmtechnik.

Für den Bereich der anthropometrischen Voraussetzungen ist zunächst der *Körperbau* von Bedeutung. Die Gestalt von Schwimmern ist athletisch: schlank und groß (Fröhner, 2002). Die Körperhöhe ist für alle Schwimmer entscheidend. Daneben ist die Armspanne das entscheidende Kriterium für Sprinter. Die Armspanne ist der einzige signifikante Unterschied zwischen Sprintern und Langstreckenschwimmern (Fröhner, 2002; Klentrou & Montpetit, 1991). Grundsätzlich scheint eine größere Armspanne als Körperhöhe von Vorteil. Michael Phelps z.B. hat bei einer Größe von 193 cm eine Armspanne von 201 cm. Auch seine enorme Fußlänge von 35 cm ist von Vorteil.

Eine günstige Wasserlage hängt von der *Masseverteilung* im Körper und dem spezifischen Körpergewicht ab. Bei Personen mit einer guten Wasserlage befinden sich der Körperschwerpunkt, an dem die Schwerkraft ansetzt, und der Volumenzentrum, an dem die entgegen gerichtete Auftriebskraft ansetzt, nahe beieinander. Ist das nicht der Fall, entsteht ein Drehmoment im Körper, das die Beine nach unten sinken lässt und somit für mehr Wasserwiderstand sorgt. Das spezifische Körpergewicht liegt bei den meisten Menschen im eingeatmeten Zustand zwischen 0,967 und 0,989 g/cm³ und im ausgeatmeten Zustand zwischen 1,013 und 1,057 g/cm³. Das spezifische Gewicht von Wasser beträgt bei 26° 0,997 g/cm³ (Ochwat & Mayer, 2007). Je nach spezifischem Gewicht und Einatmungszustand befinden sich mehr oder weniger Prozent des Körpers über Wasser. Personen die höher im Wasser liegen, erzeugen weniger Wasserwiderstand.

Unter den *konditionellen Leistungsvoraussetzungen* findet sich in allen Modellen die *Ausdauer*, insbesondere die Grundlagenausdauer, als eine der wichtigsten Komponenten. Die meisten Wissenschaftler sind sich einig, dass Schwimmen grundsätzlich eine Ausdauersportart ist und dass die Grundlagenausdauer (GLA) eine wesentliche Leistungsvoraussetzung für die Wettkampfleistung ist (Dekerle & Pelayo, 2011; Maglischo, 2003; Rodriguez & Mader, 2011; Rudolph, 2006). Je nach Disziplin und Streckenlänge ist die spezifische Wettkampfausdauer unterschiedlich ausgeprägt. Der Sprinter braucht ein anderes Stehvermögen als der Langstreckenschwimmer.

Je kürzer die Wettkampfstrecke, desto mehr nimmt der Einfluss der *Schnelligkeit* zu. Für den Start ist die Reaktionsschnelligkeit ausschlaggebend, ansonsten die zyklische Aktionsschnelligkeit und im Wendenbereich eine azyklische Schnelligkeit.

Schwimmen ist eine Ausdauersportart mit hoher *Kraft*komponente. Wie hoch der Kraftanteil ist, hängt von der Streckenlänge ab. Größte Meinungsverschiedenheit herrscht darüber, welches Krafttraining und wie viel Krafttraining ein Schwimmer braucht (Muniz-Pardos et al., 2019). Einig sind sich die Wissenschaftler (Fuhrmann et al., 2017; Muniz-Pardos et al., 2019) hingegen darüber, dass Schwimmer ein präventives Krafttraining zur Vermeidung von degenerativen Sportschäden ableisten müssen und ein spezielles Krafttraining zur Verbesserung der Wettkampf-

leistung sinnvoll ist. Für den Start und die Wenden ist eine hohe Maximalkraft der Beinmuskulatur notwendig, für eine hohe maximale Schwimmgeschwindigkeit eine hohe Maximalkraft der Arme und für die Ökonomisierung der Antriebsbewegung eine hohe schwimmspezifische Kraftausdauer. Am Ende ist allerdings nicht die reine maximale Kraft entscheidend, sondern wie viel seiner Kraft der Schwimmer ins Wasser bringt. In den letzten Jahren sah der DSV besonders bei dem Thema „Kraft“ eine große Diskrepanz zwischen der trainingsmethodischen Ausrichtung des DSV und den internationalen Entwicklungen (Fuhrmann et al., 2017). Da der Aspekt der Kraft nicht Thema dieser Studie ist, wird an dieser Stelle auf konkrete Kraftleistungswerte verzichtet. Aber schon allein der optische Vergleich von zwei aktuellen Weltmeistern (WM 2019 in Gwangju) bezüglich ihrer Muskelmasse zeigt die Unterschiede deutlich auf: Weltmeister über 50 m und 100 m Brust Adam Peaty, der eine hohe Maximalkraft für eine hohe maximale Schwimmgeschwindigkeit braucht, weist ausgeprägte Muskelmasse auf. Im Gegensatz dazu der Langstreckenschwimmer Florian Wellbrock, Weltmeister über 1500m Freistil und 10 km Freiwasserschwimmen, der eine hohe Kraftausdauer benötigt und eher schlanke Muskeln hat.



Abbildung 5: Vergleich der Muskelmorphologie zwischen den beiden Weltmeistern 2019 Adam Peaty über 50 und 100 m Brust und Florian Wellbrock über 1500 m Freistil und 10 km Freiwasserschwimmen.

Quellen: Swimexpert.ch und Süddeutsche Zeitung

Im Bereich der *Beweglichkeit* werden meist das Schultergelenk und die Fußgelenke hervorgehoben, aber auch eine gute allgemeine Beweglichkeit scheint von Bedeutung (Wilke & Madsen, 2015). Die Beweglichkeit begrenzt den Bewegungsspielraum, den die Gelenke für die Technikumsetzung freigeben. Nur bei einem

Mindestmaß an Beweglichkeit kann ein Schwimmer die Technik ungehindert und ohne zusätzlichen Energieaufwand umsetzen. Nur eine extrem gute Beweglichkeit im Schultergelenk ermöglicht das Einnehmen einer optimalen Gleitposition im Wasser, bei der der Kopf unterhalb der Arme gehalten wird und diese sich in Verlängerung der Wirbelsäule befinden. Eine hohe Beweglichkeit in den Sprunggelenken ermöglicht einen Peitschenschlag, der dem Vortrieb von Flossen ähnelt. Aufgrund der hohen Beweglichkeit in den Knien und Sprunggelenken kann Michael Phelps eine um ca. 5 cm größere Amplitude im Beinschlag erreichen als vergleichbare andere Schwimmer, was den Antrieb deutlich steigert (ARTE Dokumentation, 2008).

Die *schwimmtechnischen Leistungsvoraussetzungen* basieren auf einem guten Wassergefühl, einer optimalen Vortriebserzeugung und der Minimierung des Wasserwiderstandes.

Grundlage der technischen Fertigkeiten sind die *koordinativen Fähigkeiten*. Im Schwimmsport sind Folgende besonders gefragt (Cserépy et al., 2014):

- Rhythmisierungsfähigkeit: Gliederung und Akzentuierung der Gesamtbewegung, Beibehalten eines gleichmäßigen Rhythmus;
- Gleichgewichtsfähigkeit: Beibehalten einer stabilen Körperlage sowohl in der Schwimmbewegung als auch beim Start;
- Orientierungsfähigkeit: Räumliche und zeitliche Abstimmung von Bewegungen wie z.B. bei der Rollwende;
- Differenzierungsfähigkeit: Räumlich-zeitlich-dynamische Gestaltung von Teilbewegungen, wie es beim Anschwimmen zur Wende notwendig ist;
- Reaktionsfähigkeit: Schnellstmögliche Einleitung einer Bewegung auf ein Signal hin, z.B. beim Startsignal schnellstmöglich mit der Startbewegung beginnen;
- Kopplungsfähigkeit: Das fließende Verbinden von Teilbewegungen oder das Übertragen von Bewegungsimpulsen, wie es beim Delphinschwimmen notwendig ist, um mit dem Beinschlag die Schultern aus dem Wasser zu hebeln.

Die *Technik*ausführung orientiert sich am aktuellen Technikleitbild, wobei dies sich immer wieder ändert, nicht zwangsläufig einheitlich ist und zudem individuelle Freiheiten zugestanden werden. So ist z.B. nicht eindeutig belegt, ob es bei der Kraultechnik geschickter ist, den Arm über Wasser gestreckt oder gebeugt nach vorne zu bringen. Bei einem gebeugten Arm in der Schwungphase kann der Trizeps entspannen, was vor allem auf der Langstrecke von Vorteil ist, in den Kurzstrecken hingegen werden die Arme so schnell wie möglich gestreckt nach vorne gebracht. Einig sind sich viele Wissenschaftler, dass eine gute Technik grundsätzlich mit einer großen Zuglänge zusammenhängt (Alberty et al., 2008), es aber ein optimales Verhältnis zwischen Zugfrequenz und Zuglänge gibt.

Immer wieder gibt es Äußerungen, das *Wassergefühl* wäre die entscheidende Größe und würde den Unterschied zwischen guten Schwimmern und Spitzenschwimmern ausmachen. Eine einheitliche Definition, die von Wissenschaftlern und Praktiker anerkannt wäre, gibt es nicht. Einigkeit besteht nur darüber, dass es sich um ein Bewegungsgefühl handelt (Pfeifer, 1991). Messen lässt sich dieses Gefühl nicht. Franziska von Almsick versuchte es in einem Interview so zu beschreiben: *„Ich kann das Wasser anfassen, ich kann es wegdrücken. Das können eben nicht alle. Leider kann ich es nicht besser erklären.“* (Spiegel ONLINE, 2000)

Das Wassergefühl scheint, obwohl kaum greifbar, in der Reihe der sportmotorischen Fähigkeiten, die ein Schwimmer für Spitzenleistungen aufweisen muss, einen sehr wichtigen Stellenwert einzunehmen.

Daneben haben Persönlichkeitsmerkmale, Rahmenbedingungen, das soziale Umfeld und äußere Faktoren, wie das Klima oder die Sportstätten wesentlichen Einfluss auf die komplexe Leistung.

Auf niedrigem Leistungsniveau gibt es umfangreiche Kompensationsmöglichkeiten zwischen einzelnen Leistungsfaktoren, im Hochleistungsbereich dagegen ist die Ausprägung und die Relation der einzelnen Faktoren und deren Zusammenspiel von entscheidender Bedeutung (Schramm, 1987). Bei Leistungsschwimmern führt die isolierte Verbesserung einzelner Fähigkeiten nicht zwangsläufig zu besseren Wettkampfleistungen. Die relative Maximierung einzelner Funktionssysteme ist nicht so entscheidend wie die Optimierung des Zusammenspiels aller Systeme (Pfeiffer,

1988). Dies alles macht eine differenzierte und komplexe Betrachtung der Schwimmleistung unabdingbar.

2.1.2. Aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit als ein Hauptfaktor der Leistungsfähigkeit im Schwimmen

Aerobe Ausdauer ist definiert als die Fähigkeit, einen hohen Anteil der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) über eine lange Zeit aufrechtzuerhalten (Bosquet, Leger & Legros, 2002). Die VO_{2max} repräsentiert das maximale Transportvermögen von Sauerstoff aus der Atemluft in die Arbeitsmuskulatur. Sie ist das Maß für die Sauerstoff-Zufuhr (Atmung), den Sauerstoff-Transport (Herz-Kreislauf-System) und die Sauerstoff-Verwertung in der Muskelzelle. Die VO_{2max} wird häufig als das „Bruttokriterium“ für die allgemeine Ausdauerleistungsfähigkeit bezeichnet. Sie ist „die größte Menge Sauerstoff, die vom Organismus aufgenommen und verwertet werden kann“ (Bassett & Howley, 2000).

Je mehr Sauerstoff vom Organismus aufgenommen und verwertet werden kann, umso besser ist die Ausdauerleistungsfähigkeit. Dabei handelt es sich also um eine Ausdauerleistung auf aerober Stoffwechselform, d.h. oxidativer Verbrennung unter Sauerstoffbeteiligung von Glykogen und Fettsäuren zu Wasser und Kohlendioxid. Die VO_{2max} stellt die obere Grenze der aeroben Kapazität dar. Am Ende entscheidet allerdings der Ausnutzungsgrad über die praktische Umsetzung der Leistung (Wilke & Madsen, 2015). So kann ein Athlet mit einer niedrigeren VO_{2max} , der 90% davon über einen längeren Zeitraum ausschöpfen kann, durchaus imstande sein, seinen Kontrahenten mit höherer VO_{2max} zu besiegen, der einen niedrigeren prozentualen Anteil ausschöpft.

Eine Messung der VO_{2max} konnte bisher nur über eine Atemgasmaske erfolgen, die im Schwimmsport einen störenden Einfluss auf die Technik hat. Inzwischen wurden Schnorchel mit Ventilsystem für solche Messungen entwickelt, die die Schwimmtechnik weniger stören (Jeanne Dekerle & Pelayo, 2011).

Die VO_{2max} eines gesunden, untrainierten 30-jährigen Mannes beträgt etwa 40–45 ml/min/kg, Hochleistungsschwimmer erreichen VO_{2max} -Werte von 75 ml/kg/min und Schwimmerinnen bis zu 65 ml/kg/min (Wilke & Madsen, 2015).

Die aerobe Ausdauer oder auch GLA ist einer der Hauptfaktoren, die die schwimmerische Leistung erklärt. Sie ermöglicht langanhaltende Belastungen bei hoher Ermüdungsresistenz und eine schnelle Erholungsfähigkeit. Aber nicht nur für die Langstrecken, sondern auch für die Kurzstrecken ist die aerobe Ausdauer eine wichtige Grundlage. Eine gut ausgeprägte Grundlagenausdauer ist selbst für Sprinter notwendig, um das Gesamtpensum des notwendigen Trainings zu tolerieren. Hinzu kommt, dass eine ausgeprägte GLA erst das erfolgreiche Absolvieren von mehreren idealen Wettkampfstarts an einem Tag ermöglicht (Rudolph, 2006).

In allen olympischen Distanzen zwischen 50 m und 1500 m wird die Energie aus einer Kombination dreier verschiedener Energiespeicher bereitgestellt: die Kreatinphosphat (KP)-speicher, die anaerobe Glykolyse und die aerobe Energiebereitstellung aus Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen. Aus den Angaben verschiedener Autoren entstand eine Übersicht, welchen relativen Anteil die drei Energiesysteme bei den unterschiedlichen Streckenlängen einnehmen (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Angenommener relativer Anteil der drei Energiesysteme beim Schwimmen. Quelle: Übersetzt aus Rodriguez und Mader (2011, S. 232)

Streckenlänge	KP in %	Anaerobe Glykolyse in %	Aerobe Energiebereitstellung in %
50 m	15–80	2–80	2–26
100 m	5–28	15–65	5–54
200 m	2–30	25–65	5–65
400 m	0–20	10–55	25–83
800 m	0–5	25–30	65–83
1500 m	0–10	15–20	78–90

In dieser Tabelle variieren die Angaben der Autoren für die 200 m Strecken zwischen 2–30% Phosphatumsatz, 25–65% Glykolyse und 5–65% aerober Anteil. Die große Variationsbreite zeigt die Uneinigkeit unter den Wissenschaftlern. Dekerle und Pelayo (2011) vermuten, dass der aerobe Anteil am gesamten Energieumsatz über alle olympischen Distanzen höher ist als bisher angenommen.

Die Bestimmung der aeroben Leistungsfähigkeit ist demzufolge ein Hauptanliegen der Leistungsdiagnostik im Schwimmen. Das diagnostizierte GLA-Niveau spiegelt die Anpassung des Organismus auf energetischer, konditioneller und neuromuskulärer Ebene bei submaximalen Leistungen wider (Neumann & Schüler, 1994).

2.2. Physiologie der Laktatdiagnostik

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Laktatdiagnostik als Indikator der metabolischen Beanspruchung des Organismus während definierter körperlicher Belastung als Standard der sportwissenschaftlichen Leistungsdiagnostik etabliert (Clasing, Weicker & Böning, 1994; Foxdal, Sjödin, Sjödin & Östman, 1994; Heck & Beneke, 2008; Kindermann, 2004; Olbrecht, 2011). Auch im Schwimmsport macht die Laktatdiagnostik einen erheblichen Teil der Ausdauer-Leistungsdiagnostik aus. Der folgende Abschnitt erläutert ausführlich die physiologischen Grundlagen, die für die praktische Anwendung relevant sind, ohne dabei einen Anspruch auf medizinische Vollständigkeit zu legen. Auf Basis der wichtigsten chemischen Zusammenhänge wird die Entwicklung von Schwellenkonzepten erläutert. Der historische Prozess führte zu einer uneinheitlichen und zum Teil verwirrenden Terminologie. Ein allgemeiner Überblick soll Übereinstimmungen und Differenzen aufklären. Das maximale Laktat-Steady-State hat als einzige Schwelle eine wissenschaftlich anerkannte Bestimmungsmethode und wird daher gesondert betrachtet. Der abschließende Abschnitt fasst die aktuellen Erkenntnisse zum Laktatstoffwechsel zusammen.

Neben der Erhebung von Herzfrequenz und Laktatkonzentrationen, gibt die Bestimmung von Blutgasen, Metaboliten und des Säure-Basen-Haushaltes im Blut ebenso Einblicke in das Verhalten von Herz, Kreislauf, Atmung und Stoffwechsel bei aeroben Ausdauerbelastungen. Aufgrund der einfachen und unkomplizierten Handhabung der Messgeräte, konnte sich die Bestimmung der Laktatkonzentration während submaximaler Belastung als Instrument zur Leistungsdiagnostik durchsetzen.

2.2.1. Chemische Zusammenhänge und Hintergrundwissen zum Laktatmetabolismus

Bei jeder Art von körperlicher Betätigung muss der Körper chemische Energie in mechanische Energie umwandeln. Die Energieträger aus der Nahrung bestehen aus drei chemischen Grundstoffen: Kohlenhydrate, Fette und Proteine. Diese wiederum müssen zerlegt und in Adenosintriphosphat (ATP) umgewandelt werden, da dies der

einziges Stoff ist, der direkt genutzt werden kann, um Muskelkontraktionen zu erzeugen.

Zur Resynthese von ATP stehen dem menschlichen Körper drei Mechanismen zur Verfügung (Rodriguez & Mader, 2011):

- die anaerobe, alaktazide Spaltung von Kreatinphosphat,
- die anaerobe Glykolyse,
- die aerobe Verbrennung von Kohlenhydraten und Fettsäuren, in Extremsituationen auch von Proteinen.

Bei der anaeroben Glykolyse wird Glucose in Milchsäure (Pyruvat) ohne Verwendung von Sauerstoff gespalten:



Die Milchsäure selbst kommt im Organismus praktisch nicht vor, sondern zerfällt unter physiologischen Bedingungen direkt zu Laktat (La^-) und Wasserstoffionen (H^+ -Ionen) (Horn & Moc, 2012):



Im deutschsprachigen Raum wird Milchsäure und Laktat häufig synonym eingesetzt, während im englischen Sprachraum zwischen «lactic acid», der Milchsäure, und «lactate», dem eigentlichen Laktat unterschieden wird. Laktat ist keine Säure, sondern chemisch gesehen das Salz der Milchsäure. Eine Säure gibt Protonen (positiv geladene Wasserstoffteilchen) ab, Laktat hingegen kann Protonen aufnehmen.

Diese anaerobe Form der Energiebereitstellung kommt vor allem bei intensiven Belastungen zum Einsatz. Mit steigender Belastungsintensität steigt die Konzentration an La^- und demzufolge auch die Konzentration an H^+ -Ionen im Blut. Dies führt zu einer Übersäuerung (Azidose) des Blutes und der pH-Wert sinkt. Unter Ruhebedingungen beträgt der pH-Wert ca. 7,4. Hochintensive Belastungen können den pH-Wert auf unter 7,0 senken.

Um die Azidose zu verhindern, können einige Organe, vor allem Leber, Herz, Gehirn und Muskulatur, Laktat zu Pyruvat oxidieren und damit aus dem Organismus entfernen (Horn & Moc, 2012).

Des Weiteren stehen dem Körper verschiedene Puffersysteme zur Verfügung. Der wichtigste Puffer ist das Bikarbonat (HCO_3^-). Enthält das Blut zu viele Protonen, ist es also zu sauer, bindet das Bikarbonat ein Proton und wird zur Kohlensäure. Diese zerfällt zu Wasser (H_2O) und Kohlenstoffdioxid (CO_2), welches über die Atmungskette abgeatmet wird.



Neueste Erkenntnisse zeigen, dass schon in Ruhe Laktat produziert wird.

Der Ruhewert liegt zwischen 0,5 und 2 mmol/l (Dekerle & Pelayo, 2011), Maximalwerte unter Belastung bei bis zu 24 mmol/l, wobei Männer höhere Werte als Frauen erreichen (Rudolph, 2014). Die Gesamtmasse der arbeitenden Muskulatur beeinflusst die Nettoproduktion des Laktats. Je größer die eingesetzte Muskelmasse, desto höher ist am Belastungsende die Laktatkonzentration. So werden z.B. beim Schwimmen nur mit den Armen geringere maximale Laktatkonzentrationen erreicht als in der Gesamttechnik (Wilke & Madsen, 2015). Die Muskelfaserstruktur hat ebenfalls einen Einfluss auf die Menge des gebildeten Laktats: Je höher der Anteil der FT-Fasern, desto höher fallen die Laktatwerte aus (Rossetto, 2007).

Laktat entsteht im Muskel, gemessen wird die La^- -Konzentration aber im Normalfall im Kapillarblut. Welche Systeme den Laktataustausch zwischen Muskelfaser und Blut bestimmen, ist bis heute unklar (Rossetto, 2007). Unbestritten hingegen ist, dass es eine Weile dauert, bis die erhöhte La^- -Konzentration im Blut nachweisbar ist. Die maximale La^- -Konzentration wird meist erst 7–9 min nach Belastungsende erreicht. Je intensiver die Belastung war, desto länger dauert es, bis der Maximalwert erreicht wird (Wilke & Madsen, 2015). Daher hat der Zeitpunkt der Messung einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis und davon abgeleitete Aussagen und Wertungen über Belastungszustände und -verträglichkeit.

Wie lange es dauert, bis die La^- -Konzentration wieder auf den Ruhewert zurückkehrt, hängt in erster Linie von der Gesamtmenge des angehäuften La^- , dem Bewegungsverhalten in der Nachbelastungszeit und der Ausprägung der aeroben

Kapazität ab (Wilke & Madsen, 2015). Ein lockeres Ausschwimmen kann also wesentlich zum La^- -Abbau und damit zur Erholung beitragen.

2.2.2. Historische Entwicklung und Terminologie der Schwellenkonzepte

Bei steigender Belastung steigt der Laktatspiegel im Körper an. Dieses Phänomen kann anhand einer Laktatleistungskurve (LLK) dargestellt werden. Auf Basis dieser LLK haben Wissenschaftler seit den 1970er Jahren weltweit eine Unmenge an unterschiedlichen Schwellenkonzepten entwickelt. Trotz der jahrelangen Forschung auf dem Gebiet der Laktatdiagnostik, herrscht immer noch Uneinigkeit in der Erklärung des Phänomens und den Bestimmungsmethoden (Bourdon, 2000). Die verschiedenen physiologischen Begründungsansätze für diese „Schwellenphänomene“ differieren zwischen den einzelnen Laktatschwellenmodellen zum Teil erheblich. Zunächst gingen die Wissenschaftler davon aus, dass Laktat aufgrund von O_2 -Mangel entsteht. Im Kapitel 2.2.4. „Aktuelle Erkenntnisse zum Laktatverhalten“ sehen wir, dass diese Ansicht inzwischen überholt ist. Aufgrund der Erkenntnis einer möglichen Rückführung des Laktats in den Energieumsatz, werden die Schwellentheorien heute eher kritisch betrachtet.

2.2.2.1. Terminologie der Schwellen

Ein großes Problem der Laktatschwellenkonzepte ist die uneinheitliche Terminologie. Teilweise werden gleiche Bezeichnungen für unterschiedliche Phänomene, oder umgekehrt, unterschiedliche Bezeichnungen für das gleiche Phänomen benutzt. Zum Beispiel definierten Wasserman und Mcilroy (1964) den ersten Anstieg des Laktats über das Ruhenniveau als anaerobe Schwelle (AnS), wohingegen Kindermann, Simon und Keul (1979) das gleiche Geschehen als aerobe Schwelle bezeichnen. Zudem gibt es den Begriff der aeroben Schwelle nur im deutschsprachigen Raum, im Englischen wird hierfür meist „lactate threshold“ verwendet (Bourdon, 2000).

Unter den Verfechtern der Schwellentheorien besteht Einigkeit darüber, dass es **zwei markante Knickpunkte** im Verlauf der LLK gibt (Bourdon, 2000; Faude, Kindermann & Meyer, 2009; Vogt et al., 2005):

1. Punkt: Erster Anstieg über das Ruhenniveau bei ca. 2 mmol/l. Dieser Punkt ist die obere Grenze einer fast vollständig aeroben Energiebereitstellung. Ab

jetzt steigt das Laktat an und der Körper versucht die Übersäuerung abzupuffern. Dabei entsteht vermehrt CO_2 , das Atemminutenvolumen und das Sauerstoffäquivalent (Atemminutenvolumen / O_2 -Aufnahme) steigen an. Unterhalb dieser Intensität ist eine Belastung von mehreren Stunden möglich.

Häufige Bezeichnungen für dieses Phänomen: aerobe Schwelle, lactate threshold (LT), Lactate turnpoint 1 (LTP1), LT1, Ventilatorische Schwelle 1 (VT1), ursprünglich auch anaerobic threshold.

2. Punkt: Übergang von einem flachen Anstieg zu einem starken bzw. exponentiellen Anstieg der LLK. Dies entspricht dem Übergang von oxidativer / aerober Energiebereitstellung zur teilweisen anaeroben Energiebereitstellung bei konstanter Dauerbelastung und gleichzeitig der höchstmöglichen Intensität, bei der sich die Laktatproduktion und Laktatelimination gerade noch im Gleichgewicht befinden (meist zwischen 2,5 und 5,5 mmol/l). Die Übersäuerung durch H^+ -Ionen kann jetzt nicht mehr durch die Atmung kompensiert werden, es kommt zu einem exponentiellen Anstieg des Laktats. Das Atemminutenvolumen steigt überproportional zur CO_2 -Abgabe an, dementsprechend steigt das Kohlendioxidäquivalent (Atemminutenvolumen / CO_2 -Abgabe).

In der Literatur existieren folgende Bezeichnungen: Maximales Laktat-Steady-State (maxLass oder MLSS), individuelle anaerobe Schwelle (IAnS), Lactate turnpoint 2 (LTP2), Ventilatorische Schwelle 2 (VT2), RCP respiratory compensation point.

Im Intensitätsbereich zwischen diesen beiden Knickpunkten ist eine längere Dauerbelastung im physiologischen Steady-State-Zustand möglich. Dieser Bereich wird oft als aerob-anaerober Übergang bezeichnet.

2.2.2.2. Bestimmungsmethoden der Schwellen

Zur Bestimmung oder Berechnung der beiden Knickpunkte gibt es zahlreiche Vorschläge. Eine Übersicht über die wichtigsten Schwellenkonzepte findet sich in Tabelle 3.

Tabelle 3: Historische Übersicht über die Entwicklung der aeroben und anaeroben Schwellenkonzepte

Aerobe Schwellen bzw. lactate threshold (LT)		
Autor (Jahr)	Bezeichnung der Laktatschwelle	Definition der Laktatschwelle
Davis, Vodak, Wilmore, Vodak und Kurtz (1976)	LT	Initialer Anstieg der Blutlaktatkonzentration über das Ruhenniveau.
Kindermann et al. (1979)	Aerobic threshold	Fixe 2-mmol/l-Schwelle.
Farrell, Wilmore, Coyle, Billing und Costill (1979)	Onset of Plasma Lactate Accumulation (OPLA)	Anstieg des Plasmalaktats um 1,0 mmol/l über den Ruhewert.
Pessenhofer, Schwabergger und Schmid (1980)	Individuell anaerober Übergang	Beginn der kontinuierlichen Zunahme der Netto-Laktatbildungsgeschwindigkeit im Blutkompartiment .
Ivy, Withers, van Handel, Elger und Costill (1980)	LT	Belastung vor dem Knickpunkt in der LLK bei progressiver Belastung.
Skinner und McLellan (1980)	Aerobic threshold (AT)	Erster Anstieg der Laktatkonzentration (fixe Laktatkonzentration bei 2 mmol/l).
Hughson und Green (1982)	LT	Anstieg des Blutlaktats um 0,5 mmol/l oberhalb der Ruhekonzentration.
Coyle, Coggan, Hemmert und Walters (1984)	LT	Nichtlinearer Anstieg von mindestens 1 mmol/l.
Beaver, Wasserman und Whipp (1985)	Lactate threshold (LT) (aerob)	Knickpunkt in der Kurve der logarithmisch transformierten Blutlaktatwerte und der logarithmisch transformierten VO_2 -Werte.
Coyle, Coggan, Hemmert, Lowe und Walters (1985)	Lactate threshold	Belastung, bei der die Laktatkonzentration 1.0 mmol/l über der „Baseline“ (lineare Verbindung der Laktatwerte bei 40, 50 und 60 % VO_{2max}) beträgt.
Brooks (1985)	LT	Abrupter oder unverhältnismäßig hoher, nichtlinearer Anstieg der Blutlaktatkonzentration.
Yoshida, Chida, Ichioka und Suda (1987)	LT	1 mmol/l oberhalb der Ruhelaktatkonzentration.
Computerprogram ADAPT (2019)	Lactate threshold	Anstieg des Blutlaktats um 0,4 mmol/l über den Basiswert.

Anaerobe Schwellen (AnS) bzw. anaerobic threshold (AT)		
Autor (Jahr)	Bezeichnung der Laktatschwelle	Definition der Laktatschwelle
Hollmann (1961)	Punkt des optimalen Wirkungsgrades der Atmung (PoW)	Nichtlinearer Anstieg der Laktatkonzentration.
Wasserman und Mcilroy (1964)	Anaerobic threshold (AT)	Erster Anstieg über der Basalkonzentration.
Mader A., Liesen H., Heck H., Philippi H., Rost R., Schürch P., Hollmann W (1976)	Aerob-anaerobe Schwelle (aaS)	Fixe 4,0-mmol/l-Schwelle.
Keul J., Simon G., Berg A., Dickhuth H.-H., Goertler I., Kübel R (1979)	Individuelle anaerobe Schwelle IAS	Belastung, bei der die Krümmung der LLK einem Tangentenanstieg von $\tan \alpha = 1.26 \text{ mmol/l/km/h}$ (Tangentenwinkel von $51^\circ 34'$) entspricht.
Kindermann et al. (1979)	Anaerobic threshold	Steiler Teil des exponentiellen Anstiegs der Laktatkonzentration, bei ca. 4 mmol/l.
Skinner und McLellan (1980)	Anaerobic threshold (AnT)	Zweiter Anstieg der Laktatkonzentration (fixe Laktatkonzentration bei 4 mmol/l).
LaFontaine, Londeree und Spath (1981)	MSS	Fixe Laktatkonzentration bei 2,2 mmol/l.
Simon, Berg, Dickhuth, Simon-Alt und Keul (1981)	Individuelle anaerobe Schwelle	Punkt der LLK, der einem Tangentenanstieg von $\tan \alpha = 1$ (Tangentenwinkel von 45°) entspricht.
Sjodin und Jacobs (1981)	Onset of Blood Lactate Accumulation (OBLA)	Belastung, bei der das Laktat beginnt exponentiell anzusteigen; identisch mit der „aerob-anaeroben Schwelle“ nach Mader et al. Bei einer fixen Laktatkonzentration von 4,0 mmol/l.
Stegmann, Kindermann und Schnabel (1981)	Individuelle anaerobe Schwelle (iaS)	Belastung, bei der die maximale Eliminationsrate und die Diffusionsrate des Laktats im Gleichgewicht stehen. Zur Ermittlung werden in der Nachbelastungsphase weitere Laktatwerte bestimmt. Vom Zeitpunkt des Erreichens des Endbelastungswerts auf der Erholungskurve wird eine Tangente an die LLK gelegt. Der Berührungspunkt ist die iaS.
Simon, Thiesmann, Clasing und Frohberger (1983)	Individuelle anaerobe Schwelle (IAnS)	Laktatkonzentration von 1,5 mmol/l oberhalb der aeroben Schwelle (= des ersten Laktatanstiegs).
Heck et al. (1985)	4-mmol-Schwelle	Fixe Laktatkonzentration bei 4,0 mmol/l.
Griess, Tegtbur, Braumann, Maassen und Busse (1989)	Laktat-senkenmodell	3-phasiges Belastungsprotokoll: kurzdauernde hochintensive Initialbelastung mit anschließender mehrminütiger Pause, dann stufenförmig ansteigende Belastung. Belastung am tiefsten Punkt entspricht der Dauerleistungsgrenze.
Dickhuth et al. (1991)	Individuelle anaerobe Schwelle (IAS)	Laktatkonzentration um 1,5 mmol/l oberhalb des minimalen Laktatäquivalents (= Basislaktatkonzentration).

Cheng et al. (1992)	Dmax	Punkt auf der LLK mit der maximalen Distanz zu einer Geraden, die den ersten und letzten Messwert verbindet.
Computerprogram ADAPT (2019)	Anaerobic threshold	Modifizierte Dmax-Methode, jedoch als Startpunkt die LT anstatt der ersten Belastung.
Bishop, Jenkins und Mackinnon (1998)	Dmaxmod	Punkt auf der LLK mit der maximalen Distanz zu einer Geraden, die den Messwert an der LT und den letzten Messwert verbindet.
Machado, Almeida, Morais, Fernandes und Vilas-Boas (2006)	Anaerobe Schwelle	Durch die einzelnen Laktatpunkte wird im unteren Bereich eine lineare Linie gelegt und im oberen Bereich eine exponentielle. Dabei besteht die lineare Kurve aus Punkt 1 bis k und die exponentielle aus Punkt k+1 bis n. Der Schnittpunkt der beiden Linien ist die IAS, wobei dieser Schnittpunkt zwischen k und k+1 liegen muss.

Zunächst wird zwischen fixen und individuellen Schwellen unterschieden.

Fixe Schwellen basieren auf Mittelwerten verschiedener Studien. Eine individuelle Schwellenbestimmung erfolgt entweder anhand einer visuellen Auswertung der LLK oder anhand mathematischer Modelle. Die optische Auswertung der LLK ist häufig sehr ungenau (Faude et al., 2009) und selbst bei den mathematischen Modellen ist es oftmals die Aufgabe des Testauswerters, einen Startpunkt für die Berechnung festzulegen. Alle individuellen Vorgehensweisen bieten den Vorteil, dass die physiologischen Besonderheiten des Individuums berücksichtigt werden.

Im Folgenden werden einige ausgewählte Laktatschwellenkonzepte ausführlicher dargestellt. Die Zusammenstellung erfolgte unter Berücksichtigung der aktuellen Relevanz und Anwendung in der leistungsdiagnostischen Praxis.

Fixe Laktatschwellen

Die aerobe 2 mmol/l-Schwelle resultiert aus der oberen Grenze des Ruheniveaus der meisten Personen.

In zahlreichen Messungen zeigte sich, dass die Dauerbelastungsgrenze meist bei ca. 4 mmol/l lag (Heck & Beneke, 2008). Im englischsprachigen Raum wird diese Schwelle als „Onset of lactate accumulation“ (OBLA) bezeichnet (Faude et al., 2009). Allerdings streuen die Werte zum Teil beträchtlich um mehrere mmol/l (Heck & Roskopf, 1994). Fixe Schwellen sind stark von der Ernährung und dem Trainingszustand bzw. Erholungszustand abhängig (Bourdon, 2000). Ist eine LLK aufgrund von leeren Glykogenspeichern nach unten verschoben, verschiebt sich die

ermittelte Schwellengeschwindigkeit zum Teil beträchtlich. Individuelle Schwellenbestimmungsmethoden sind nicht so anfällig für dieses Phänomen, da sich die Form der Kurve kaum ändert (Schmidt, Lim, Haaker & Simon, 1993). Trotzdem sind fixe Schwellen geeignet, um unterschiedliche Schwimmer miteinander zu vergleichen und den langfristigen Verlauf des Trainingszustandes eines Schwimmers zu dokumentieren. Im Gegensatz zu den meisten anderen Laktatschwellenmodellen gilt die 4-mmol-Schwelle als relativ gut validiert (Dörr, 2010).

Tangentenmodelle

Mit den Tangentenmodellen von Keul, Simon, Berg, Dickhuth, Goertler, Kübel (1979) und Simon et al. (1981) sollte die größte Änderung der Steigung der LLK gefunden werden. Physiologisch grenzt dieser Punkt den Autoren zufolge den aeroben Belastungsbereich vom aerob-anaeroben Übergangsbereich ab. Die Validität der Tangentenmodelle wurde nur empirisch begründet (Dörr, 2010).

Individuelle Anaerobe Schwelle (IAnS)

Das Modell nach Stegmann et al. (1981) basiert auf der Annahme, dass die Laktatkinetik, während und nach einer stufenförmig gesteigerten Belastung, auf Diffusionsprozessen und gleichzeitig ablaufenden Eliminationsvorgängen beruht. Die IAnS ist die Belastung, an der die maximale Eliminationsrate und die Diffusionsrate des Laktats im Gleichgewicht stehen. Die Bestimmung der IAnS erfordert ein computergestütztes Berechnungsverfahren, welches die während der Belastungs- und Erholungsphase erhobenen Laktatwerte polynomisch fittet. Vom Zeitpunkt des Erreichens des Endbelastungswerts auf der Erholungskurve wird eine Tangente an die LLK angelegt, der Berührungspunkt zeigt die Laktatschwelle an. Das Modell ist eines von Wenigen, die in der Vergangenheit umfassend validiert wurden (Dörr, 2010).

+1.5-mmol/l-Methode

Die Bestimmung der IAnS nach Simon et al. (1983) basiert auf Untersuchungen an Schwimmern. Zur Basislaktatkonzentration an der aeroben Schwelle wird der Wert von 1,5 mmol/l addiert. Einerseits gründet die Berechnung, ähnlich wie bei den fixen Schwellen, auf einem feststehenden Wert, der aus Mittelwerten abgeleitet wurde,

andererseits variiert das Niveau der aeroben Schwelle aufgrund verschiedener Faktoren (Geschlecht, Glykogenbeladung der Arbeitsmuskulatur, Muskelfaser-Verteilung, Stress) interindividuell stark. Insofern erfolgt die Bestimmung der Laktatschwelle unter Berücksichtigung der individuellen Gegebenheiten. Anders als das Tangentenverfahren, beruht die Simon-Schwelle zumindest teilweise auf physiologischen Grundlagen.

Laktatsenkenmodell

Das Modell von Griess et al. (1989) besteht aus einem 3-phasigen Belastungsprotokoll: Eine kurze hochintensive Belastung führt zu einer metabolischen Azidose mit entsprechend hohen Laktatkonzentrationen. Nach einer mehrminütigen Pause folgt eine stufenförmig ansteigende Belastung mit hohem Eingangslaktatniveau. Im ersten Teil dieser Belastung übersteigen die Prozesse der Laktatelimination die der Laktatproduktion, sodass die Laktatkonzentration auf den ersten Belastungsstufen mit niedriger Intensität zunächst abfällt. Sobald die Laktatneubildung die –elimination mit zunehmender Belastungsintensität wieder übertrifft, steigt die LLK wieder an. Der tiefste Punkt der parabelförmig verlaufenden LLK zeigt die „Laktatsenke“ und damit die Dauerbelastungsgrenze an.

D_{\max} -Methode

Cheng et al. (1992) definierte die Laktatschwelle als den Punkt auf der LLK, der den größten Abstand zu der Verbindung zwischen erstem und letztem Messwert aufweist. Bei der modifizierten D_{\max} -Methode von Bishop et al. (1998) wird statt dem ersten Messwert die aerobe Schwelle als Ausgangspunkt der Verbindungsgeraden genommen.

Log-log-Methode

Mit Hilfe der „log-log“-Methode von Beaver et al. (1985) soll das Problem einer ungenauen visuellen Auswertung behoben werden. Durch die logarithmische Transformation der Intensitätswerte begründet sich eine exponentielle Kurve; bei logarithmischer Transformation beider Achsen entsteht laut Beaver et al. (1985) eine 2-segmentelle lineare Regressionsgerade mit einem flachen und einem steilen Teil, bei der die aerobe Schwelle deutlicher ersichtlicher ist. Trotzdem muss dieser Knickpunkt noch optisch bestimmt werden.

Zusammenfassend bemängelt Dörr (2010) eine, trotz der enormen Zahl an Publikationen, nur unvollständige und sehr lückenhafte Datenlage zur Validität der verschiedenen Modelle.

Bei einem Vergleich der verschiedenen Auswertungsmethoden an Langstreckenläufern und Triathleten ermittelte Dörr (2010) folgende Geschwindigkeits-, Laktat- und Herzfrequenzwerte für die anaerobe Schwelle (Tab. 4):

Tabelle 4: Statistische Kennwerte (Mittelwert mit Standardabweichung) der Laufgeschwindigkeit, sowie der Laktatkonzentration und Herzfrequenz an der durch die sieben verschiedenen Modelle ermittelten Laktatschwelle.

Quelle: Dörr (2010, S. 60)

Schwellenmodell		v [km/h]	Laktat [mmol/l]	Hf [1/min]
+1,5 mmol/l	Dickhuth et al. (1991)	15.34 ± 0.88	2.24 ± 0.28	164.5 ± 10.9
IAnS	Stegmann/Kindermann (1981)	15.25 ± 0.80	2.23 ± 0.56	163.4 ± 11.4
45°-Tangente	Simon et al. (1981)	15.51 ± 0.92	2.44 ± 0.41	163.1 ± 10.7
D _{max}	Cheng et al. (1992)	14.78 ± 0.76	1.85 ± 0.52	159.9 ± 11.9
D _{maxmod}	Bishop et al. (1998)	15.75 ± 0.93	2.75 ± 0.60	166.5 ± 11.9
4-mmol/l	Mader et al. (1976)	15.84 ± 1.04	4.00	174.1 ± 9.7
Laktatsenke	Griess et al. (1989)	14.61 ± 0.31	3.54 ± 2.19	164.4 ± 11.7

Der Autor fand die größte Übereinstimmung mit dem MLSS bei der +1,5-mmol-Methode (ICC = 0,926) und der IAnS-Methode (ICC = 0,922). Das geringste Maß an Übereinstimmung mit dem MLSS zeigte das Laktatsenkenmodell (ICC = 0,353). Im Gegensatz dazu fanden Heck und Rosskopf (1994) für die +1,5-mmol-Methode signifikant niedrigere Schwellenwerte als das MLSS. Außerdem sehen sie eine Abhängigkeit zum Leistungsniveau des Sportlers: In der Regel liegt die Schwelle mit zunehmender Leistungsfähigkeit bei niedrigeren Laktatwerten. Auf dieser grundlegenden Annahme basieren die Interpretationen zu einer Veränderung der LLK im Laufe sportlichen Trainings.

2.2.2.3. Vergleich zu den ventilatorischen Schwellen

Die Spiroergometrie (Ergometrie mit Atemgasanalyse) ermöglicht die Bestimmung der ventilatorischen Schwellen. Physiologisch kennzeichnen sowohl die Laktatschwellen als auch die ventilatorischen Schwellen den Beginn und das Ende des aerob-anaeroben Übergangs und befinden sich an der gleichen Stelle (vgl. Abb. 6).

Während die Laktatschwellen metabolische Veränderungen anzeigen, beschreiben die ventilatorischen Schwellen VT1 und VT2 die respiratorische Antwort auf diese metabolischen Änderungen.

Das Atemminutenvolumen (VE) und die Kohlendioxidabgabe (VCO₂) steigen zunächst linear mit zunehmender Belastung an. Steigt die Blutlaktatkonzentration zum ersten Mal an (aerobe Schwelle), versucht der Organismus der daraus resultierenden Übersäuerung durch eine Bikarbonat-Pufferung entgegen zu wirken. Dabei entsteht vermehrt CO₂, welches abgeatmet wird und zu einem Anstieg in der VCO₂-Kurve führt. Als Reaktion darauf steigt das Atemminutenvolumen proportional zur VCO₂ an, um den arteriellen Partialdruck des CO₂ zu regulieren. Demzufolge steigt das Atemäquivalent (VE / VO₂) an. Die VT1 belegt also die infolge des Laktatanstiegs und der Laktatpufferung notwendige Steigerung der Ventilation und eine erhöhte CO₂-Abgabe im Verhältnis zur O₂-Aufnahme.

Mit Überschreiten des Laktat-Steady-States bei weiterem Belastungsanstieg und dem Auftreten einer metabolischen Azidose, resultiert an der VT2 eine überproportionale Steigerung der Ventilation (Westhoff et al., 2013). Die Übersäuerung kann nicht mehr durch die Atmung kompensiert werden. Das Atemminutenvolumen steigt überproportional zur VCO₂ an und somit auch das Kohlendioxidäquivalent.

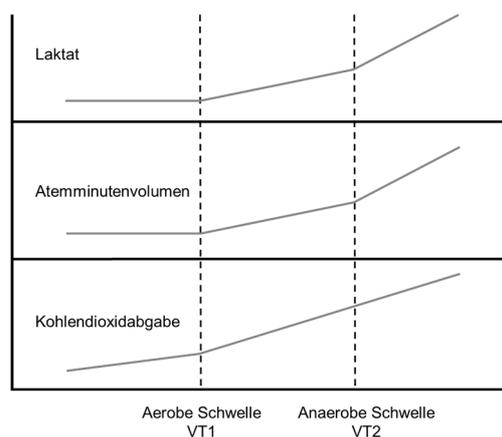


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laktatdiagnostik und ventilatorischen Messgrößen bezüglich der physiologischen Schwellen.

Quelle: Österreichisches Institut für Sportmedizin (2019)

Die beiden ventilatorischen Schwellen sind wie folgt definiert (Espada et al., 2015):

VT1: Erster Knick des VE, Anstieg von VE / VO₂ und ein erster Anstieg des prozentualen O₂-Anteils in der Ausatemluft.

VT2: Zweiter Knick von VE, Anstieg von VE / VCO₂ und erster Abfall von CO₂ in der Ausatemluft. Häufig wird VT2 mit RCP (Metabolic respiratory compensation point: Verhältnis von ausgeatmetem CO₂ zu VO₂) gleichgesetzt. Dieser respiratorische Kompensationspunkt liegt aber laut Kindermann (2004) nicht genau bei der anaeroben Schwelle.

Für den Schwimmsport konnten Espada et al. (2015) nachweisen, dass sich die Geschwindigkeit am MLSS nicht signifikant von der Geschwindigkeit an der VT2 unterscheidet. Die ventilatorischen Schwellen haben sich allerdings nicht als praktikabel für Routineuntersuchungen erwiesen, da eine Atemgasmaske notwendig ist (Dekerle & Pelayo, 2011).

Allen Schwellenkonzepten ist gemein, dass sie die Dauerbelastungsgrenze indirekt mittels eines stufenförmigen Belastungsverfahrens ermitteln wollen (Faude et al., 2009; Heck & Roskopf, 1994). Letztendlich hat aber die Jahrzehnte lange Diskussion über die Validität und den Nutzen von Schwellenkonzepten für das Training nur zu dem Ergebnis geführt, dass alle Schwellenbestimmungen hauptsächlich von der Methodik abhängen und keine einzige einen Standard für die Bestimmung der aeroben Ausdauerleistung darstellen könnte (Heck & Beneke, 2008). Mader (2015) kritisiert, dass aufgrund der mangelhaften experimentellen Untersuchungen und der möglichst schnellen Anwendung von Schwellenkonzepten in der Trainingssteuerung zu intensive Trainingsempfehlungen entstanden. Es wurde vermutet, dass nur möglichst hartes Training in der Nähe der IAnS zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit führt, mit fatalen Folgen für Mittel- und Langstreckensportler, da sie alle viel zu intensiv trainierten. Und auch Heck und Roskopf (1993) überlegten schon in den 1990er Jahren alle Schwellenkonzepte, die auf die Trainingssteuerung bezogen sind, aufzugeben.

Als Standardmessmethode für die aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit gilt heutzutage die Bestimmung des MLSS. Faude et al. (2009) kommen zu dem Schluss, dass scheinbar manche Laktatschwellen das MLSS abschätzen können.

2.2.3. Die Bedeutung des maximalen Laktat-Steady-State (MLSS)

Das MLSS ist definiert als die höchstmögliche Intensität, die über einen längeren Zeitraum ohne Anstieg des Laktatpegels aufrechterhalten werden kann (Beneke, 2003; Heck et al., 1985). Bei dieser Intensität stehen die beiden Prozesse der Laktatproduktion und -elimination bzw. -verwertung gerade noch im Gleichgewicht. Das MLSS basiert auf einer physiologisch-metabolischen Grundlage, bei der bei konstanter submaximaler Belastungsintensität über einen längeren Zeitraum ein, über das basale niedrige Niveau hinausgehender erhöhter, aber noch stabiler, Laktat Spiegel beobachtet werden kann (Billat, Sirvent, Py, Koralsztein & Mercier, 2003).

Die Erläuterungen zum physiologischen Begründungsansatz der verschiedenen Laktatschwellenkonzepte geben an, dass alle Konzepte prinzipiell genau diesen metabolischen Zustand bestimmen wollen. Daher wird das MLSS häufig mit der AnS gleichgesetzt (Faude et al., 2009). Beim MLSS handelt es sich nicht um ein eigenständiges Schwellenkonzept, sondern ein theoretisches Konstrukt mit metabolisch-physiologischen Grundlagen (Dörr, 2010).

Das MLSS entspricht einem physiologischen Steady-State, allerdings befinden sich nicht alle Parameter im Gleichgewichtszustand: Laktat Spiegel, O₂-Aufnahme, O₂-Sättigung, CO₂-Abgabe, respiratorischer Quotient, Bikarbonat-Konzentration, Hämatokrit-Wert und Hämoglobin-Konzentration befinden sich bei einer Dauerbelastung am MLSS im Steady-State, aber die Atemfrequenz, die Herzfrequenz (Hf) und der pH-Wert steigen während einer solchen Belastung signifikant an (Baron et al., 2003; Baron et al., 2008). Die Intensität des MLSS scheint einer partiellen Homöostase zu entsprechen.

Zur Bestimmung des MLSS existieren inzwischen mindestens 14 verschiedene Vorgehensweisen (Beneke, 2003). Grundsätzlich soll anhand mehrerer Dauerbelastungen herausgefunden werden, bei welcher Intensität die Laktatkonzentration über längere Zeit nicht ansteigt. Da 92% des Laktatanstiegs in den ersten 10 min erfolgt (Beneke, 2003), ist die Laktatkonzentration ab der 10. min für die Auswertung

entscheidend. Die Untersuchungen werden auf dem Laufband, dem Fahrradergometer, dem Ruderergometer oder im Wasser durchgeführt. Die Belastungsdauer der einzelnen Testdurchgänge variiert zwischen 10 und 30 min und der maximal zulässige Anstieg der Laktatkonzentration schwankt zwischen 0,02 und 0,1 mmol/l/min.

Letztendlich wurde international als wissenschaftlicher Standard folgende Definition für das MLSS anerkannt (Beneke, 2003; Czuba et al., 2009; Faude et al., 2009):

Bei einer 30-minütigen Dauerbelastung steigt die Laktatkonzentration zwischen der 10. und 30. Minute um weniger als 1 mmol/l an.

Für die Ermittlung sind mehrere Messungen über mindestens 30 min an aufeinanderfolgenden Tagen in abgestufter Intensität notwendig (Genaue Testbeschreibung siehe Kapitel 2.3.7. „Weitere Testmethoden“). Um diesen zeitaufwendigen und umständlichen Testablauf zu vermeiden, versuchen Wissenschaftler das MLSS indirekt über einen Stufentest unter Verwendung von Schwellenkonzepten zu bestimmen. Zur Validierung der Schwellenkonzepte dient wiederum in vielen Untersuchungen die oben genannte Messmethode des MLSS. Das Niveau des MLSS ist individuell sehr unterschiedlich und variiert zwischen 2–10 mmol/l (Faude et al., 2009). Die Werte hängen zudem von der Belastungs- bzw. Bewegungsform ab. Heck und Roskopf (1994) fanden mittlere Laktatwerte für Laufbandbelastungen von $4,02 \pm 0,7$ mmol/l und für Fahrradbelastungen von $4,3 \pm 1,1$ mmol/l mit einer enormen Streubreite zwischen 2,3 und 6,8 mmol/l. Für den Schwimmsport wurden von Dekerle und Pelayo (2011) Werte zwischen 2,8 und 3,3 mmol/l ermittelt. Bei hoch trainierten Sportlern (85–90% VO_{2max}) scheint das MLSS höher zu liegen als bei durchschnittlich Trainierten (70–80% VO_{2max}) (Dekerle & Pelayo, 2011).

Als anerkannte Dauerbelastungsgrenze hat das MLSS eine zentrale Bedeutung für die Trainingssteuerung. Ein Training mit der Intensität des MLSS führt zu einem Anstieg des aeroben Metabolismus in der Muskelzelle und ist besonders geeignet um die aerobe Leistungsfähigkeit zu verbessern (Faude et al., 2009).

Belastungsintensitäten oberhalb des MLSS führen zu einer stetigen Laktatakkumulation im Blut, die ursprünglich als Ursache für die periphere Ermüdung angesehen wurde und zum Leistungsabbruch zwingt. Welche Faktoren letztendlich zum Abbruch der Leistung führen, ist wissenschaftlich noch nicht belegt. Scheinbar ist der Leistungsabbruch nicht auf ein Versagen eines einzelnen physiologischen Systems zurückzuführen. Neuere Untersuchungen erklären das Phänomen mit einer übergeordneten Steuer- und Regulierungsinstanz, wonach afferente Informationen aus peripheren Systemen zur Aufrechterhaltung einer homöostatischen Kontrolle verarbeitet werden und leistungsbegrenzend wirken (Baron et al., 2008). Ein zusätzlicher Aspekt könnte die vermehrte Ausschüttung von Stresshormonen bei Intensitäten oberhalb des MLSS sein (Faude et al., 2009). Ein Training im Bereich des MLSS birgt noch kein Risiko eines Übertrainings (Baron et al., 2003).

Ist das MLSS eines Athleten bekannt, können Belastungszonen für Ausdauertraining abgeleitet werden (Faude et al., 2009). Siehe Kapitel 2.3.6. "Ableitung von Belastungszonen". Allerdings sollte auch bedacht werden, dass es noch keine Studien gibt, die die Variabilität und Reproduzierbarkeit des MLSS untersucht haben (Faude et al., 2009).

2.2.4. Aktuelle Erkenntnisse zum Laktatstoffwechsel

Seit Anfang des 19. Jahrhunderts beschäftigen sich Wissenschaftler mit dem Parameter Laktat und seinen Auswirkungen. Damals wurde Laktat als Stoffwechselendprodukt angesehen, welches entsteht, wenn nicht genügend Sauerstoff für die Muskelarbeit zur Verfügung steht und als Hauptfaktor der muskulären Ermüdung galt (Faude et al., 2009; Gladden, 2004; Wahl, Bloch & Mester, 2009). Die Anreicherung von Laktat im Blut während körperlicher Belastung wurde auf eine unzureichende O₂-Versorgung der arbeitenden Muskulatur zurückgeführt (Wahl et al., 2009).

Seit dem Ende des 20. Jahrhunderts konnten verbesserte Untersuchungsmethoden neue Erkenntnisse zum Laktatverhalten liefern, die die Bewertung der Laktatschwellen grundlegend änderten.

2.2.4.1. Laktat als Energiequelle

Die erste neue maßgebliche Erkenntnis ist, dass Laktat kein Endprodukt ist, sondern ein wichtiges Zwischenprodukt des Stoffwechsels und als Energiequelle oxidativ weiterverwertet wird (Brooks, Brooks & Brooks, 2008; Maassen, Schneider, 2011). Während körperlicher Belastung bauen Gehirn, Herz, Leber und insbesondere die Muskulatur Laktat ab (Maassen, N., Schneider, G., 2011). Oxidative Fasern wechseln schon bei niedrigen Laktatkonzentrationen (1–2 mmol/l) von einer netto Laktatabgabe zu einer netto Laktataufnahme (Wahl et al., 2009). Für das Herz und das Gehirn stellt Laktat bereits in Ruhe eine wichtige Energiequelle dar. Unter Belastung steigt für das Gehirn der Anteil der Energiegewinnung aus Laktat auf ein Vielfaches an. Bei körperlicher Beanspruchung werden ca. 83% des gebildeten Laktats der oxidativen Energiebereitstellung zugeführt (Gladden, 2008b). Diese chemische Reaktion, bei der Leber, Nieren und Muskulatur unter Energieeinsatz aus Stoffwechselprodukten wie dem Laktat, Glukose zur Energieversorgung des Körpers gewinnen, nennt man „Glukoneogenese“ oder Zuckerneubildung (Brooks et al., 2008). Dabei läuft die entgegengesetzt chemische Reaktion wie bei der Zerlegung von Glukose über Pyruvat in Laktat ab. Je höher die O₂-Aufnahme, desto mehr Laktat wird während der Belastung verbrannt. Diese verbrannte Menge wird für die Energiebereitstellung genutzt, hat aber keinen Anteil an der gemessenen Laktatkonzentration während oder nach einer Belastung. Der gemessene Laktatspiegel im Blut reflektiert nur teilweise den anaeroben Anteil am Gesamtenergieumsatz, da das Laktat weiterverwertet wird (Olbrecht, 2011). Ein Laktatanstieg ist messbar, wenn die Milchsäureproduktion den Bedarf übersteigt und ist nicht zwingend das Ergebnis von O₂-Mangel (Wahl et al., 2009).

Laktat ist also das Ergebnis des einen Weges der Energiebereitstellung und gleichzeitig Substrat für einen anderen Weg. Laktat konkurriert demnach mit Glukose als Kohlenhydratquelle, die für andere Gewebe gespart werden kann.

2.2.4.2. Aerobe und anaerobe Energiegewinnung laufen gleichzeitig nebeneinander ab

Im Gegensatz zu den ursprünglichen schematischen Einteilungen sind Forscher in den letzten Jahrzehnten zur Überzeugung gelangt, dass die aerobe und anaerobe Glykolyse ein fortlaufender und ineinandergreifender Prozess ist (Faude et al., 2009; Rudolph, 2014). Der Körper produziert laufend – auch in Ruhe – Laktat. Ursache

hierfür sind nicht der ursprünglich angenommene O₂-Mangel, sondern Enzyme und Hormone. Bei Belastung steigen sowohl Produktion als auch Abbau bzw. Verwertung (Brooks et al., 2008). Selbst bei niedrigen Belastungen wird Laktat produziert, umgekehrt kann auch bei Laktatwerten von 6 mmol/l noch Fett verstoffwechselt werden (Maassen, Schneider, 2011). Am MLSS beträgt der Anteil der anaerob-laktaziden Energiebereitstellung nur ca. 2%, d.h. auch Belastungen im Bereich des MLSS beanspruchen hauptsächlich die aerobe Energiebereitstellung (Wahl et al., 2009).

Aufgrund dieser gleichzeitig ablaufenden Prozesse stellen manche Wissenschaftler mittlerweile die Bezeichnungen „Knickpunkt“ und „Schwelle“ in der LLK in Frage (Oliver Faude et al., 2009). Der Begriff „Schwelle“ scheint unzutreffend, da es keine Grenze im Sinne eines scharfen Wechsels von aerober zu anaerober Energiebereitstellung gibt, wohl eher ein Zeitfenster, in dem die Laktatproduktion die -elimination und die Verwertungskapazität des Körpers übersteigt (Faude et al., 2009; Wahl et al., 2009).

Inzwischen wurde mehrfach betont, dass einzelne Punkte auf der LLK, z.B. 4 mmol/l, keine höhere Bedeutung für die Leistungsdiagnostik als andere haben (Beneke, 2003).

Die Laktat-Schwellen haben sich für die Trainingssteuerung als durchaus hilfreich erwiesen. Man sollte sich aufgrund der neuen Erkenntnisse nicht grundsätzlich von ihnen trennen, muss sie wohl aber anders deuten.

2.2.4.3. Laktat-Shuttle-Mechanismus

Laktat kann von den Zellen aufgenommen und zwischen Zellen, Organen und Geweben hin und her transportiert werden (Gladden, 2004; Olbrecht, 2011). Diese Laktat-Shuttle-Mechanismen sind bedeutend für die Verteilung des Energiesubstrats im Körper (Brooks et al., 2008). Laktat kann entweder am Bildungsort, in benachbarten Zellen oder in entfernten Zellen verstoffwechselt werden (Brooks, 2002).

2.2.4.4. Ermüdung

Ursprünglich wurde angenommen, dass die bei Belastung entstehende Milchsäure zur Azidose führt. Die Übersäuerung wird aber nicht durch das Laktat, sondern durch Protonen (H⁺-Ionen) verursacht. Das Laktat selbst kann daher nicht mehr als die

Hauptursache von Ermüdung angesehen werden. Im Gegenteil, laut Wahl et al. (2009) soll Laktat sogar einen positiven Einfluss auf die Leistung eines ermüdeten Muskels haben. Hinzu kommt, dass die Milchsäure das Schmerzempfinden positiv beeinflusst (Wahl et al., 2009).

2.2.4.5. Signalfunktion

Zusätzlich konnte nachgewiesen werden, dass Laktat eine steuernde und regulierende Signalfunktion bei der Gewebeanpassung hat (Gladden, 2008a). Die Laktatproduktion und -elimination ermöglichen, dass sich der Körper für gewisse Zeit an Belastungen anpassen kann und bedingen strukturelle und stoffwechselbezogene Anpassungen an körperliche Belastungen (Brooks et al., 2008). Allerdings sind intensive Belastungen notwendig, um Laktat als Signalmolekül verfügbar zu machen.

2.2.4.6. Bezug zwischen Laktatkonzentrationen und der Belastungsintensität

Die Belastungsintensität kann auch bei gleich hohen Laktatwerten unterschiedlich sein (Olbrecht, 2011). Niedrigere Laktatkonzentrationen von gut Ausdauertrainierten lassen sich vor allem durch eine bessere Verwertung des Blutlaktats und nicht durch eine niedrigere Laktatproduktion erklären (Rossetto, 2007; Wahl et al., 2009). Dabei spielt der Laktattransport eine entscheidende Rolle, der insbesondere bei Kurzzeitbelastungen leistungslimitierend zu sein scheint (Wahl et al., 2009). Auch wenn verschiedene Schwimmer den gleichen Laktatwert haben, können sie unterschiedlichen Belastungsintensitäten ausgesetzt sein und daher unterschiedliche Anpassungserscheinungen haben (Olbrecht, 2011). Der Laktatwert aus einer einzelnen Laktatprobe kann sehr viele unterschiedliche Ursachen haben. Trainingsbedingte Veränderungen der Laktatkonzentration sind das Ergebnis eines multifaktoriellen Geschehens. Daher müssen Tests im großen Zusammenhang mit weiteren Faktoren betrachtet und kritisch bewertet werden (Smith, Norris & Hogg, 2002).

2.2.4.7. Schlussfolgerung

Laktatproduktion ist Teil eines Mechanismus, der die Energiebereitstellung und Anpassungen reguliert (Wahl et al., 2009). Eine erhöhte Blutlaktatkonzentration lässt weder zwingend auf einen Sauerstoffmangel noch auf eine erhöhte Laktatproduktion schließen. Sie lässt keine präzise Auskunft über den Grad des anaeroben

Stoffwechsels in der arbeitenden Muskulatur zu (Maassen, N., Schneider, G., 2011; Olbrecht, 2011). Trotzdem lässt die individuelle Reproduzierbarkeit der Beziehung zwischen dem Niveau der Laktatkonzentration und der Leistung die Beurteilung von individuellen Veränderungen des Trainingszustandes zu (Maassen, Schneider, 2011). Ein umfangbetontes aerobes Ausdauertraining verbessert die Fähigkeit der Muskulatur Laktat zu verstoffwechseln (Gladden, 2000).

2.3. Diagnostik der Ausdauerleistungsfähigkeit im Schwimmen

Die Leistungsdiagnostik ist ein wesentlicher Bestandteil einer gezielten Trainingssteuerung. Um die sportliche Leistung zu analysieren und zu verbessern, werden weltweit standardisierte und sportartspezifische Diagnoseverfahren eingesetzt. Sie liefern wichtige Informationen zum Leistungsstand des Athleten sowie Grundlagen für eine wirkungsvolle Trainingssteuerung und sind daher zentrales Instrument zur Leistungsoptimierung. Aus den Ergebnissen der leistungsanalytischen Kontrollverfahren kann eine systematische individuelle Trainingsplanung und eine ständige und wirksame Steuerung und Regelung des sportlichen Trainingssystems gewährleistet werden. Bei einer wirkungsvollen Leistungsdiagnostik haben die Tests einen engen Bezug zur Leistungsstruktur im Schwimmen und berücksichtigen die Besonderheiten des Mediums Wasser (Rudolph, 2014).

Zu den zu überprüfenden Komponenten im Schwimmen gehören z.B. die Ausdauerleistung, die Kraftausdauerleistung der Arme, die Sprungkraft, die Beweglichkeit, sowie schwimmtechnische Fähigkeiten. Die einzelnen Teilkomponenten werden entsprechend der Wettkampfanforderung gewichtet und individuelle Besonderheiten berücksichtigt. Bei der Auswertung sollte immer die Komplexität des Zusammenspiels der einzelnen Leistungsparameter berücksichtigt werden. Die Erhebung von zahlreichen Leistungsparametern darf nicht zu isolierter Parameterinterpretation bei der Auswertung führen (Leopold, 2000a).

Um die aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit eines Athleten zu bestimmen, werden im Schwimmsport, wie auch in anderen zyklischen Sportarten, üblicher Weise Stufentests durchgeführt (Bourdon, 2000; Faude et al., 2009). Ziel solcher Tests ist es, den Verlauf der physiologischen Reaktionen des Körpers bezüglich einer ansteigenden körperlichen Belastung zu bestimmen. Hiermit können zum einen Aussagen über die aktuelle aerobe Leistungsfähigkeit und Trainingseffekte wie auch – bei Längsschnittstudien – über die langfristige Entwicklung eines Sportlers getroffen werden. Aus den Ergebnissen können Trainingsintensitäten abgeleitet und Leistungen vorhergesagt werden (Bourdon, 2000). Um die Besonderheiten des Mediums Wasser zu berücksichtigen und den Bezug zur Leistungsstruktur im Schwimmen herzustellen, sollte ein Stufentest unbedingt im Wasser und möglichst in der Hauptdisziplin durchgeführt werden (Pyne, Lee & Swanwick, 2001; Rudolph, 2014). Die Durchführung solcher Feldtests birgt einige Fehlerquellen, wie z.B. nicht

kontrollierbare Umgebungsbedingungen. Im Gegenzug bieten sie aber den großen Vorteil der Spezifität und der praktischen Signifikanz für den Athleten (Bourdon, 2000). Daher hat sich weltweit die Anwendung von Varianten von Stufentests im Wasser durchgesetzt. Die Analyse der aus einem Stufentest ermittelten LLK ist eine der wichtigsten Untersuchungsmethoden geworden, um die Ausdauerleistungsfähigkeit zu bestimmen (Faude et al., 2009).

Neben den standardisierten Untersuchungen wird nach Alternativen gesucht, die weniger aufwendig und nicht invasiv sind und damit für den Trainingsalltag tauglich. Eine simple Möglichkeit, die aerobe Ausdauer eines Athleten zu bestimmen, bietet das Modell der „Critical Swimming Speed“. Für die Berechnung sind lediglich die Bestzeiten eines Schwimmers über verschiedene Streckenlängen und ein einfaches Computerprogramm, wie z.B. Excel, notwendig. Aus der Steigung der Regressionsgeraden des Zeit-Distanz-Diagramms wird die Grenzgeschwindigkeit ermittelt. Eine Beschreibung des Vorgehens findet sich in Kapitel 2.3.4.2. „Berechnung der CS“. Selbstverständlich können bei dieser Methode zusätzlich physiologische Parameter, wie Herzfrequenz oder Laktat, erhoben werden.

Im DSV wird die Leistungsdiagnostik für alle Kaderathleten zentral an drei OSP durchgeführt. Zwei Mal pro Jahr müssen alle förderungswürdigen Schwimmer des DSV an der komplexen Leistungsdiagnostik teilnehmen. Neben einer videobasierten Analyse der Schwimmtechnik, einer Start- und Wendenanalyse, sowie Kraft- und Sprungkraftmessungen und Beweglichkeitstests, ist ein zentraler Test die Überprüfung der Ausdauerleistung in Form eines Stufentests. Dieser sogenannte „Pansoldtest“ wurde schon zu Zeiten der ehemaligen DDR eingesetzt und findet heute noch in der gleichen Form Anwendung. Aufgrund der standardisierten Testform über eine sehr lange Zeit und der daraus resultierenden ausgesprochen umfangreichen Datenmenge ergibt sich eine einzigartige Ausgangssituation, die dieser Studie als Grundlage für einen Längsschnittvergleich dient.

2.3.1. Aktuell angewandte Stufentests im Schwimmen

Im Schwimmsport gibt es eine große Anzahl verschiedener Testprotokolle für Stufentests mit unterschiedlicher Stufendauer, Pausenlänge und Intensitäts-

steigerung. All dies hat Einfluss auf die Ergebniswerte und muss bei einem Vergleich berücksichtigt werden.

Die in der schwimmspezifischen Leistungsdiagnostik angewandten Testprotokolle ähneln sich weltweit. Beispielsweise

- USA (Maglischo, 2003) 8 × 200 m oder 5 × 300 m;
- Australien (Pyne, Maw & Goldsmith, 2000) 7 × 200 m;
- DSV (Pansold & Zinner, 1994) 8 × 100 / 200 m oder
5 × 400 m;
- DSV West bis 1990 (Simon et al., 1983) bis zu 7 × 300 m.

Die vielen verschiedenen Varianten im Testablauf leisten alle hilfreiche Dienste im Bereich der Diagnostik. Trotzdem müssen gewisse Vorgaben für den Testaufbau eingehalten werden, um valide Ergebnisse zu erzielen. Mehrere Autoren geben hierzu Empfehlungen:

- Die Einstiegsgeschwindigkeit muss niedriger als die Schwellengeschwindigkeit gewählt werden (Rudolph & Berbalk, 2000).
- Die ersten beiden Stufen sollen rein aerob absolviert werden (Simon et al., 1983).
- Die Stufendauer sollte 3 bis 5 min betragen (Simon et al., 1983). Eine Stufenlänge von 200 m ist eigentlich zu kurz, aber praktikabler für den Trainingsbetrieb (Fernandes, Sousa, Machado & Vilas-Boas, 2011; Pyne et al., 2000).
- Die Auswertung der LLK erfolgt, je nach Autor, über ein mathematisches Modell, über Berechnung der Geschwindigkeit an der 4mmol-Grenze oder der individuellen Bestimmung des ersten plötzlichen Anstiegs der Kurve.

Welche Bedingungen eingehalten werden müssen, damit Reliabilität und Validität einer solchen Testform gewahrt werden, findet sich bei Hopkins (2000).

2.3.1.1. Pansoldtest

Im DSV wird der sogenannte Pansoldtest standardisiert eingesetzt. Er wurde von Pansold (1985) entwickelt und wird seit mehr als 30 Jahren in der gleichen Form eingesetzt und ausgewertet. Alle Kaderathleten müssen ihn 2–3mal pro Jahr im Rahmen der KLD absolvieren.

Der Pansoldtest ist ein Stufentest im Wasser mit ansteigender Intensität, der in jeder Schwimmlage und über Distanzen von 100, 200 oder 400 m geschwommen werden kann. Die Auswahl der jeweiligen Testvariante des Stufentests hinsichtlich der Teilstreckenlängen richtet sich nach der Wettkampfdisziplin, auf die sich die Athleten spezialisiert haben. Damit ist der Test spezifisch auf die Schwimmarart und den Leistungsstand des Schwimmers zugeschnitten.

Der Ablauf für die 100- und 200-m-Strecken ist in Tabelle 5 dargestellt. Zunächst werden in der ersten Stufe drei Durchgänge mit 80% der Geschwindigkeit der bisher erzielten Bestleistung oder Bestzeit (BZ) über diese Distanzen aus der Vorsaison mit einer Pause von je einer Minute geschwommen. Nach einer Serienpause von drei Minuten in der zweiten Stufe zwei weitere Durchgänge mit 85%, dann je einmal 90%, usw. ansteigend bis zur letzten Stufe, die maximal und mit einem Start vom Block ausgeführt wird. Bei der Variante mit 400-m-Distanzen entfallen mehrere Durchgänge, wie der Tabelle 6 zu entnehmen ist.

Zu jeder Belastungsstufe werden alle Zwischenzeiten, die Bewegungsfrequenzen auf jeder Bahn, wie auch Hf- und Laktatwerte festgehalten.

Tabelle 5: Ablaufprotokoll Pansold-Test für die 100- und 200-m-Strecken nach Pansold und Zinner (1994)

Stufe	Anzahl der Strecken	Ziellaktat	% der BZ	Pause- dauer	Serien- pause	Zeitpunkt der Laktatmessung
1	3	2–3 mmol/l	80	1 min	3 min	sofort
2	2	3–4 mmol/l	85	1 min	3 min	sofort
3	1	4–6 mmol/l	90		5 min	nach der 1. min
4	1	6–8 mmol/l	95		20 min	nach der 3. min
5	1	max.	100			1., 4., 7., 10. min

Tabelle 6: Ablaufprotokoll Pansold-Test für die 400-m-Strecken nach Buck (2012)

Stufe	Anzahl der Strecken	Ziellaktat	Serienpause	Zeitpunkt der Laktatmessung
1	2	2–3 mmol/l	3 min	sofort
2	1	3–4 mmol/l	5 min	nach der 3. min
3	1	4–5 mmol/l	bis 30 min	nach der 3. min
4	1	max.		1., 3., 5., 10. min

Laut Testvorgaben sollen dabei die Intensitätsbereiche zwischen 2 und 8 mmol/l oder mehr durchlaufen werden. Die Zielstellung der vorgegebenen Belastungsintensitäten in den einzelnen Stufen ist Folgende (Buck, 2012):

1. Stufe: Überprüfung der Schwimmgeschwindigkeiten unter aeroben Stoffwechselbedingungen.
2. Stufe: Überprüfung der Schwimmgeschwindigkeiten unter Stoffwechselbedingungen im aerob/anaeroben Übergangsbereich.
3. Stufe: Überprüfung der Schwimmgeschwindigkeiten unter höheren aerob/anaeroben Stoffwechselbedingungen bzw. im anaeroben Stoffwechselbereich.
4. Stufe: Überprüfung der Schwimmgeschwindigkeiten unter anaeroben Stoffwechselbedingungen.
5. Stufe: Überprüfung der anaeroben Mobilisationsfähigkeit unter wettkampftypischer Geschwindigkeit und Bewegungsfrequenz.

Das Ergebnis der Testung sind zunächst fünf Messpunkte, die in ein Koordinatensystem eingetragen werden, bei dem auf der x-Achse die Zeit (\triangleq Belastungsintensität) und auf der y-Achse die Laktatkonzentration aufgetragen wird. Über die Messpunkte wird eine exponentielle Regressionskurve mit der Funktion $y = a * e^{bx}$ gelegt. In dieser Funktion entspricht y dem Laktatwert und x der Schwimmgeschwindigkeit. Regressionskurven, deren Passung kleiner als $R^2 = 0,95$ ist, werden nicht verwendet.

Die wichtigsten Kenngrößen der LLK sind (vgl. Abb. 7):

- v_{max} : Im Test erreichte maximale Schwimmgeschwindigkeit in m/s.
- L_{max} : Die maximale Laktatkonzentration im Blut (in mmol/l) ist Ausdruck der anaerob-laktaziden Energiebereitstellung (Rudolph & Berbalk, 2000).
- $v_{4,0}$: Der Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der 4-mmol-Linie, also die erwartete Schwimmgeschwindigkeit bei 4 mmol/l Laktat in m/s.
- $P_{4,0}$: Leistung bei einer Laktatkonzentration von 4 mmol/l in Prozent der Bestleistung als Niveau der aeroben Leistungsfähigkeit (Rudolph & Berbalk, 2000). Seit 1992 wird als Referenz die Bestleistung der letzten Saison verwendet.

P_{\max} : Leistung in der letzten Stufe in Prozent der Bestleistung als wichtige Kenngröße zur Prognose der Wettkampfleistung.

b_{LLK} : Der Koeffizient b der Funktion $y = a \cdot e^{bx}$ ist graphisch als Steigung der Funktion zu erkennen. Je steiler die Kurve hinten ansteigt, desto größer ist der Wert b_{LLK} .

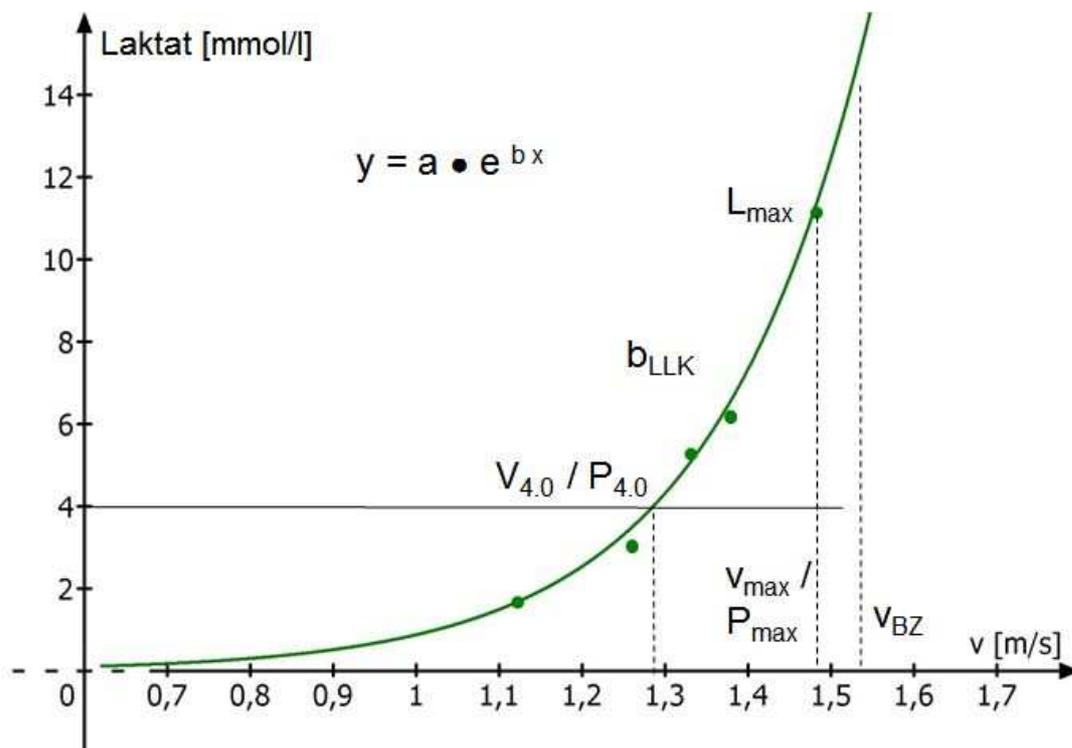


Abbildung 7: Darstellung der Kenngrößen der LLK bei der Auswertung des Pansoldtests.

Auf der Basis dieser Kenngrößen erfolgt die Ergebnisinterpretation (Buck, 2012):

- Beurteilung des Niveaus der Ökonomisierung und Maximierung der Energiebereitstellungsmechanismen,
- Einschätzung der Wirksamkeit vorangegangener Trainingsbelastungen,
- Möglichkeit der Geschwindigkeitsvorgabe für Teilbereiche des Ausdauertrainings,
- Möglichkeit der Voraussage einer erreichbaren Wettkampfleistung.

Die Gesamtheit der einzelnen Kenngrößen erlaubt eine komplexe Beurteilung der sportlichen Leistung.

Voraussetzung für valide Ergebnisse sind eine niedrige Einstiegsgeschwindigkeit und ein kontinuierlicher Anstieg der Schwimgeschwindigkeit. Wird die erste Stufe zu schnell geschwommen, gibt die LLK keine Aussage über die niedrigen aeroben Bereiche und der Schwimmer kann meist die weiteren Stufen nicht konstant steigern. Die LLK umfasst dann einen zu geringen Geschwindigkeitsbereich, der es erschwert, die Kurve zu interpretieren. Zur korrekten Ergebnisermittlung müssen außerdem methodische Abläufe, wie die exakte Pausendauer und eine präzise Laktatprobenentnahme, realisiert werden. Zudem müssen Testvorgaben bezüglich der Rahmenbedingungen eingehalten werden: die Vorbelastung der letzten beiden Trainingstage, der Tagesablauf und das Einschwimmprogramm sollten bei jedem Test nahezu übereinstimmend ablaufen und die Sportler sollen sich kohlenhydratreich ernähren. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss der Zeitpunkt im Jahreszyklus berücksichtigt werden.

Kritische Aspekte zum Pansoldtest

Bezüglich des Testablaufs ist anzumerken, dass zum einen die Belastungsdauer in den einzelnen Teststufen für eine valide Bestimmung der Dauerbelastungsgrenze zu kurz ist. Die Vorgaben aus der Literatur verlangen Belastungszeiten von mindestens 3–5 min pro Stufe (Bourdon, 2000; Dekerle & Pelayo, 2011). Beim Pansold-Test nimmt die Belastungsdauer je nach Leistungsstand von knapp 3 min auf teilweise unter 2 min ab. Zum anderen ist eine verhältnismäßig große Pausendauer von 3 min bis hin zu 20 min vor der letzten Stufe vorgegeben. Wie im Kapitel 2.3.2. „Einflussfaktoren auf die LLK und deren Kenngrößen“ erläutert wird, verschiebt all dies die Ergebniswerte so, dass die Schwellengeschwindigkeit eher überschätzt wird. Dieser Umstand muss bei Trainingsempfehlungen berücksichtigt werden und wird in der Praxis an den deutschen OSP auch so gehandhabt. Der Vorteil der kurzen Belastungsdauer und der langen Pausendauer liegt in der wettkampfspezifischeren Belastungsform und der guten Ausbelastung (Rudolph & Berbalk, 2000).

Die Auswertung des Pansoldtests basiert auf der 4-mmol-Schwelle. Wie im Kapitel 2.2. „Physiologie der Leistungsdiagnostik“ beschrieben, gibt es viele verschiedene Möglichkeiten eine LLK auszuwerten und die punktuelle Bewertung einzelner Laktatwerte wird zunehmend kritisch hinterfragt. Trotzdem muss gerade die

konsequente standardisierte Anwendung in der Methodik über mehrere Jahrzehnte als Vorteil für die Vergleichbarkeit angesehen werden.

2.3.1.2. 7 × 200 m Stufentest nach Pyne et al. (2000)

Dieser Test wird von der Australian Swimming Federation in der Leistungsdiagnostik verwendet (Zinner, Krueger, Wahl, Sperlich, Mester, 2011).

Die Schwimmer absolvieren 7 × 200 m in der Hauptlage mit einer Intensitätssteigerung von 5 s pro Stufe. Die Starts erfolgen mit Abstoß vom Beckenrand. Die ersten beiden Stufen sollen rein aerob geschwommen werden, die letzte Stufe maximal. In dieser letzten Belastungsstufe wird gewöhnlich, aufgrund des Starts von unten, eine Zeit von BZ + 5 s erreicht. Die Übersicht zum Ablauf ist in Tabelle 7 abgebildet.

Tabelle 7: Ablauf des 7 × 200 m Stufentests des Australischen Schwimmverbandes

Stufe	Zielzeit	angestrebter Laktatwert	Startabstand	Zeitpunkt der Herzfrequenz- und Laktatmessung
1	BZ + 35s	< 2mmol/l	5 min	sofort
2	BZ + 30s	< 2mmol/l	5 min	sofort
3	BZ + 25s	2-3 mmol/l	5 min	sofort
4	BZ + 20s	3-4 mmol/l	5 min	sofort
5	BZ + 15s	4-6 mmol/l	5 min	sofort
6	BZ + 10s	6-8 mmol/l	5 min	sofort
7	BZ + 5s	max.	5 min	1., 3. und 10. min

Die Auswertung des Tests erfolgt mithilfe der log-log-Methode nach Beaver et al. (1985). Die Achsen werden beide logarithmisch transformiert, anschließend eine lineare Regressionsgerade über die letzten 5 Messpunkte gelegt und dann der Schnittpunkt mit der 4-mmol-Grenze bestimmt (Beaver et al., 1985).

2.3.1.3. 7 × 200 m Stufentest nach Sweetenham und Atkinson (2003)

Einer der insgesamt 17 vorgeschlagenen „benchmark tests“ von Sweetenham und Atkinson (2003) ist ein 7 × 200 m Stufentest. Die Autoren schlagen zwei unterschiedliche Formen für jugendliche und erwachsene Schwimmer vor. Sie unterscheiden bei den Vorgaben zwischen den einzelnen Schwimmmarten und

Geschlechtern. Tabelle 8 zeigt die Version für männliche Nachwuchsschwimmer in der Kraultechnik. Besonderheit dieser Variante eines Stufentests ist das „gebrochene“ Schwimmen der letzten beiden Stufen. D.h. der Schwimmer bekommt eine zusätzliche Pause nach 100 m bzw. nach jeweils 50 m. Dadurch kann die Wettkampfgeschwindigkeit im Test erreicht werden. Der „Senior Test“ unterscheidet sich in erster Linie durch Vorgaben anhand der zu erreichenden Herzfrequenz anstatt Zeitvorgaben.

Tabelle 8: Testablauf Stufentest nach Sweetenham und Atkinson (2003) für männliche Nachwuchsschwimmer in Kraul

Stufe	Strecken	Zielzeit	Startabstand für die Teilstrecken	Startabstand
1	200 m	BZ + 24 s		5 min
2	200 m	BZ + 20 s		5 min
3	200 m	BZ + 16 s		5 min
4	200 m	BZ + 12 s		5 min
5	200 m	BZ + 8 s		5 min
6	2 x 100 m	BZ	01:40 min	5 min
7	4 x 50 m	Ziel BZ	0:50 min	5 min

2.3.1.4. Stufentest nach Maglisco (2003)

Die Athleten schwimmen 5 x 200 m mit einer Pause von 1–10 Minuten. Dabei soll die Schwimgeschwindigkeit in jeder Stufe um 5 s gesteigert werden und in der letzten Stufe die maximale Intensität erreicht werden.

Tabelle 9: Testablauf des Stufentests nach Maglisco (2003)

Stufe	Anzahl der Strecken	Strecken	Zielzeit	Pause	Zeitpunkt der Laktatmessung
1	2	200 m	BZ + 24-27 s	1 min	sofort
2	1	200 m	BZ + 16-18 s	5 min	sofort und nach der 3. min
3	1	200 m	BZ + 8-9 s	10 min	nach der 3., 5. und 7. min
4	1	200 m	max.		nach der 3., 5. und 7. min

2.3.1.5. Stufentest 5–7 × 300 m nach Simon und Thiesmann (1986)

Diese Testform galt als autorisierter leistungsdiagnostischer Test des DSV West bis zum Zeitpunkt der Wiedervereinigung. Die Athleten müssen mindestens fünf, maximal sieben ansteigende Belastungsstufen über jeweils 300 m schwimmen. Dabei gelten für die verschiedenen Schwimmlagen und Geschlechter unterschiedliche Zielzeiten: Kraul beginnt mit ♂ 4:30,0 bzw. ♀ 4:45,0 min, Brust mit ♂ 5:30,0 bzw. ♀ 5:45,0 min und Rücken mit ♂ 5:00,0 bzw. ♀ 5:15,0 min. Pro Stufe gilt eine Zeitverkürzung von 15 s und eine Pausendauer von jeweils 30 s. Ein Testabbruch ist auch nach 100 m möglich.

Tabelle 10: Ablauf des Stufentests nach Simon und Thiesmann (1986)

Stufe	Dauer	Zielzeit	Pause	Zeitpunkt der Laktatmessung
1	300 m	04:30,0 min	30 s	sofort
2	300 m	04:15,0 min	30 s	sofort
3	300 m	04:00,0 min	30 s	sofort
4	300 m	03:45,0 min	30 s	sofort
5	300 m	03:30,0 min	30 s	sofort
6	300 m	03:15,0 min	30 s	sofort
7	300 m	03:00,0 min		sofort, 3. min

Bei der Auswertung der LLK wird die Schwellengeschwindigkeit mit Addition von 1,5 mmol/l oberhalb der aeroben Schwelle, also des ersten Anstiegs der individuell unterschiedlich hohen Ausgangslaktatwerte, ermittelt.

2.3.1.6. Stufentest nach Fernandes et al. (2011) / Machado et al. (2006)

Von diesem Stufentest gibt es drei Varianten mit jeweils 7 × 200, 300 oder 400 m. Die Schwimmgeschwindigkeit wird in jeder Form um 0,05 m/s pro Stufe gesteigert, wobei die letzte Stufe die 400-m-BZ als Zielzeit hat.

Zur Auswertung benutzen die Autoren den Vorschlag von Machado et al. (2006) zur Bestimmung der IAnS. Hierbei handelt es sich um eine kombiniert lineare und exponentielle Analyse: Durch die einzelnen Laktatpunkte (Anzahl = n) wird mittels der Methode der kleinsten Quadrate im unteren Teil eine lineare Linie gelegt und im oberen Bereich eine exponentielle. Die lineare Kurve besteht aus Punkt 1 bis k und

die exponentielle aus Punkt $k+1$ bis n . Dabei liegt k zwischen 2 und $n-2$. Der Schnittpunkt der beiden Linien ist die IAnS. Dieser Schnittpunkt muss zwischen k und $k+1$ liegen. Problematisch scheint, dass bei 6 Messpunkten – wie im erwähnten Artikel – bei einer Unterteilung in eine lineare und exponentielle Funktion ein Teil nur aus zwei Messpunkten gebildet wird und sich somit auf eine Interpolation reduziert. Zudem ist bedenklich, dass Holroyd und Swanwick (1993) ein ähnliches Modell zur Bestimmung der aeroben Schwelle benutzen.

2.3.1.7. Stufentests im Schwimmkanal

Am OSP Hamburg wird derzeit ein Ausdauerstest im Kanal getestet. Pro Stufe von je 3 min steigt die Geschwindigkeit um 0,1 m/s. Die Startgeschwindigkeit wird so berechnet, dass die Athleten insgesamt ca. fünf Stufen absolvieren können. Nach jeder Stufe werden die Herzfrequenz und die Laktatkonzentration gemessen. Wakayoshi, Ikuta et al. (1992) steigern nach einer Startgeschwindigkeit von 0,75 m/s um 0,05 m/s in jeder Minute. Der Vorteil einer Testung im Strömungskanal ist die mögliche Ergänzung einer Atemgasanalyse und zusätzliche Informationen über die Unterwasserkameras.

2.3.2. Einflussfaktoren auf die LLK und deren Kenngrößen

Der Testablauf wie auch die Mess- und Auswertungsmethoden können den Verlauf der LLK wesentlich beeinflussen (Faude et al., 2009). Schon kleine Veränderungen oder Fehler wandeln die Ergebnisse eines Stufentests ab.

2.3.2.1. Messmethoden

Grundsätzlich können Laktatproben an verschiedenen Körperstellen entnommen werden. Am Ohrläppchen handelt es sich um arterielles Blut, welches um 1–3 mmol/l höhere Laktatwerte ergibt als venöses Blut, das z.B. am Finger entnommen wird (Robergs et al., 1990). Das muskuläre Laktat und das Blutlaktat hängen zwar eng zusammen, allerdings wird das Muskellaktat im Blut erst später wiedergespiegelt (Bourdon, 2000). Ebenso können das Analysegerät oder der Aufbewahrungsort und die Aufbewahrungsdauer das Ergebnis beeinflussen (Bourdon, 2000).

2.3.2.2. *Beteiligte Muskulatur*

Der Anteil der eingesetzten Muskelmasse beeinflusst den Laktatspiegel im Blut: je mehr Muskelmasse ein Sportler hat, desto höher sind seine Laktatwerte (Maassen, N., Schneider, G., 2011). Außerdem bilden die schnell zuckenden FT-Fasern mehr Laktat als die langsam zuckenden ST-Fasern, die vor allem bei Ausdauersportlern dominieren (Maglisco, 2003). Neueste Erkenntnisse zeigen, dass die oxidativen ST-Fasern bei Blutlaktatkonzentrationen von ca. 1–2 mmol/l von einer Nettolaktat-abgabe zu einer Nettolaktataufnahme wechseln, die glykolytischen FT-Fasern hingegen erst ab 3–4 mmol/l. Mit steigender Intensität werden mehr Muskelfasern rekrutiert und es erfolgt eine Verschiebung in Richtung FT-Fasern (Maassen, N., Schneider, G., 2011). All dies begründet die allgemein höheren Laktatwerte von Sprintern.

2.3.2.3. *Stufendauer*

Für die Ausdauerdiagnostik werden Belastungszeiten von mindestens 3–5 min pro Stufe empfohlen (Bourdon, 2000; Dekerle & Pelayo, 2011). Die Regulationsmechanismen im Körper benötigen eine gewisse Zeitspanne, bis sie sich auf ein Steady-State einpendeln. Nur bei längerer Belastung pendeln sich auch \dot{V}_{O_2} und \dot{V}_{Hf} auf ein Steady-State ein. Bourdon (2000) verlangt Belastungszeiten von 5–7 min, um ein Steady-State zu erreichen. Laut Wahl et al. (2009) dauert es aufgrund des Monocarboxylat-Transporters ca. 8 min bis sich ein Laktat-Steady-State einstellt. Wird die Belastungsdauer zu kurz gewählt, sind die gemessenen Laktatwerte niedriger, als sie beim Dauertest in dieser Schwimmgeschwindigkeit auftreten würden. Dies entspricht einer Rechtsverschiebung der LLK. Die entsprechende Interpretation würde zu einer Überschätzung des MLSS führen. Je länger die Teststrecke, desto eher kann das physiologische Steady-State abgelesen werden und desto niedriger wird die Schwellengeschwindigkeit geschätzt (Bourdon, 2000). Aus wissenschaftlicher Sicht macht ein Test, der die aerobe Kapazität bestimmen soll, erst ab 300 m Schwimmdistanz mit Belastungszeiten von über 3 min Sinn. Allerdings kann die Zielstellung des Tests auch eine andere sein: Gerade für Sprinter ist es wichtig, die Bedingungen und Anforderungen der Wettkampfgeschwindigkeit zu berücksichtigen. In diesem Fall scheint die Testvariante über 200 m ein geeigneter Kompromiss zwischen Belastungsdauer und wettkampfspezifischem

Anforderungsprofil zu sein (Fernandes et al., 2011; Greco, Oliveira, Caputo, Denadai & Dekerle, 2013; Pyne et al., 2000).

2.3.2.4. *Stufenanzahl*

Aus mathematischer Sicht gilt: Je größer die Anzahl der Messpunkte, desto zuverlässiger die Berechnung der Regressionsfunktion. Bei der Laufband- oder Fahrradergometrie wird häufig über bis zu 10 Stufen gesteigert, im Schwimmen sind die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen der Anfangsgeschwindigkeit und der maximalen Schwimmgeschwindigkeit deutlich geringer. Dadurch ist zum einen die Anzahl der Stufen begrenzt, zum anderen ist die LLK flacher und empfindlicher gegen kleine Veränderungen (Greco et al., 2013). Die geringe Stufenzahl führt zu einem ungünstigen Verhältnis von Parametern und Messpunkten. Eine Verschiebung der gesamten LLK um ein paar Prozent nach oben oder unten, würde den wahren Wert der Leistung grundlegend über- bzw. unterschätzen (Dekerle & Pelayo, 2011).

Würden die Intensitätsänderungen zwischen den Stufen geringer gewählt werden, so wären die Differenzen zwischen den Zielzeiten so klein, dass es dem Schwimmer kaum noch möglich wäre, die geforderten Zielzeiten zu treffen. Mehrere Testprotokolle zeigen, dass sieben ansteigende Stufen gut umsetzbar sind und ausreichen (Bourdon, 2000; Pyne et al., 2000).

Um die Auswirkung von einzelnen fehlerhaften Messwerten auf das Ergebnis zu bestimmen, wird an dieser Stelle eine Sensitivitätsanalyse bereitgestellt.

Die einzelnen Messwerte für die Laktatkonzentration werden jeweils um 5 bzw. 10 % nach oben oder nach unten verändert. Eine solche Abweichung kann z.B. durch Fehler des Messgeräts oder durch nicht korrektes Befüllen der Kapillare bei der Blutabnahme entstehen. Der Hersteller des Laktatmessgerätes Biosen gibt beispielsweise eine Unpräzision in der Messgenauigkeit von $\leq 1,5$ % und eine Stabilität von 3 % an.

An zwei Beispielkurven aus den vorliegenden Messreihen mit einmal fünf Messpunkten und das andere Mal sieben Messpunkten wird die Konsequenz für die 4-mmol-Schwellengeschwindigkeit demonstriert. Die detaillierte Aufstellung der einzelnen Werte findet sich im Anhang in Tabelle 32. Das prinzipielle Vorgehen verdeutlicht Abbildung 8.

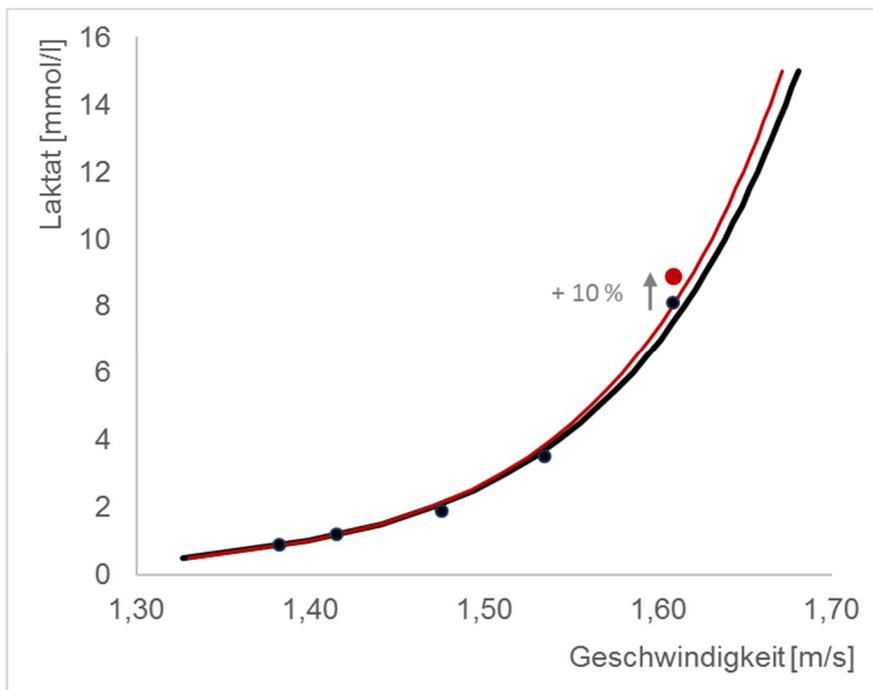


Abbildung 8: Vorgehen bei der Sensitivitätsanalyse. Eine Veränderung eines Messpunktes um 10 % nach oben verursacht eine Änderung der Parameter der Regressionskurve a und b und der resultierenden Schwellengeschwindigkeit.

Es zeigt sich, dass die Kurve mit sieben Messpunkten sowohl bei einer Veränderung um 5 % als auch um 10 % relativ stabil ist. Die Veränderung der Schwellengeschwindigkeit beträgt selbst bei 10 % Variation nicht mehr als drei zehntel Sekunden auf 100 m. Etwas anfälliger ist die Kurve mit fünf Messpunkten. Hier wirkt sich eine Variation um 5 % in Höhe von zwei Zehntel und eine Variation um 10 % in Höhe von vier zehntel Sekunden pro 100 m aus.

2.3.2.5. Pausendauer

Einen weiteren Einflussfaktor auf die LLK stellt die Pausendauer zwischen den Stufen dar. Grundsätzlich sollte sie so gering wie möglich gehalten werden. Um die Schwellengeschwindigkeit nicht zu überschätzen, darf laut Bourdon (2000) nicht mehr als eine Minute pausiert werden. Bei längeren Pausen wird die Schwellenintensität zu hoch geschätzt.

Beim Schwimmen muss der Sportler zur Laktatmessung das Wasser verlassen, damit die Blutproben nicht durch herablaufendes Wasser verfälscht werden. Aus diesem Grund sind Pausen unter einer Minute kaum umsetzbar. Im Schwimmsport

werden die Pausen in vielen Testvorgaben als Startabstand definiert, sodass sich die Pausendauer im Laufe des Tests aufgrund der gesteigerten Schwimgeschwindigkeit verlängert. In mehreren üblichen Testversionen sind Startabstände von ca. 5 min bei einer Belastungsdauer von ca. 2:00 – 2:30 min vorgegeben (Pyne et al., 2000; Sweetenham & Atkinson, 2003), was eine Pausendauer von 2:30 – 3:00 min zur Folge hat.

Beim Pansold-Testprotokoll beträgt die letzte Pause vor der Ausbelastungsstufe 20 min. Würde diese wesentlich reduziert werden, hätte dies Auswirkungen auf den Parameter P_{max} . Der Athlet würde aufgrund der Ermüdung nicht nahe genug an seine Bestleistung herankommen und das Kriterium der maximalen Schwimgeschwindigkeit im Wettkampf für die Ausbelastung nicht erfüllen können. Außerdem könnte eine deutlich verkürzte Pausendauer den maximalen Laktatwert beeinflussen, da bei 20 min Pause der Laktatabbau im Körper erheblich ist.

2.3.2.6. Steigerung der Intensität

Für eine zuverlässige Auswertung der LLK ist die kontinuierliche Steigerung der Geschwindigkeit von Bedeutung. Das Wichtigste ist zunächst, den richtigen Einstieg zu finden. Die ersten beiden Messpunkte sollten idealerweise im aeroben Bereich, also bei ca. 2 mmol/l oder niedriger liegen, um im weiteren Verlauf einen deutlichen Anstieg in der LLK erkennen zu können. Nur so ist gewährleistet, dass die Schwimmer in den folgenden Stufen die Geschwindigkeit kontinuierlich steigern können. Da alle Schwellenkonzepte eine Abhängigkeit vom Testprotokoll zeigen (Dörr, 2010), ist auch die Intensitätsdifferenz zwischen den einzelnen Stufen ausschlaggebend. Üblicherweise wird um ca. 5 s / 200 m oder 0,05 m/s pro Stufe gesteigert. Eine geringere Intensitätssteigerung ist in der Praxis schwierig umsetzbar.

Das Einhalten der Zielzeiten in den einzelnen Intensitätsstufen ist entscheidend, um den Übergang von der rein aeroben in die zunehmend anaerobe Energiebereitstellung zu ermitteln. Die Testleiter müssen den Athleten dementsprechend realistische Zielzeiten vorgeben.

2.3.2.7. Standardisierte Rahmenbedingungen

Für die Aussagekraft des Tests sind standardisierte Rahmenbedingungen äußerst wichtig. Eine der Grundvoraussetzungen für eine valide Testaussage sind gefüllte

Glykogenspeicher (Bourdon, 2000). Der Athlet soll sich mit entsprechender Nahrungsaufnahme auf den Test vorbereiten und darf mindestens einen Tag vor dem Test kein intensives Training mehr absolvieren. Entleerte Glykogenspeicher führen zu einer Absenkung bzw. einer Rechtsverschiebung der LLK (Bourdon, 2000; Faude et al., 2009). Ebenso verursacht Koffein eine Veränderung der Ergebnisse. Demzufolge ist es wichtig, dass der Trainer den Termin zur Testdurchführung entsprechend in die Jahresplanung aufnimmt und auf günstige Rahmenbedingungen, wie z.B. die rechtzeitige Anreise und kohlenhydratreiche Mahlzeiten im Vorfeld, Wert legt.

Außerdem haben Umgebungsfaktoren wie die Wassertemperatur, die Bahnlänge, Außentemperatur und Höhe einen Einfluss auf die Testaussage. Auch innere Faktoren, wie z.B. die Motivation, wirken sich auf die Validität und Reliabilität der Ergebnisse aus.

Trotz der kritischen Punkte eines Feldtests, hat dieser den Vorteil der Spezifität und der praktischen Signifikanz für den Athleten (Bourdon, 2000; Rudolph, 2014).

2.3.2.8. Auswertung der Ergebniswerte

Dass das Verfahren zur Kurvenberechnung und die Methode der Schwellenbestimmung das Ergebnis beeinflusst, wurde im Kapitel 2.2.2.2. „Bestimmungsmethoden der Schwellen“ dargelegt. Bisher wurde noch keine allgemein anerkannte Vorgehensweise definiert. Einigkeit herrscht nur darüber, dass die LLK eine quantitative Auswertung der Ausdauerleistungsfähigkeit ermöglicht (Faude et al., 2009).

Für welches Testprotokoll sich ein Testleiter entscheidet ist meist lediglich eine Frage der Bequemlichkeit oder der Logistik. Sind die Randbedingungen vergleichbar, ist auch die Laktatkonzentration, die sich bei einer konstanten Leistung einstellt, intraindividuell sehr gut reproduzierbar (Maassen, Schneider, 2011) und eine Veränderung des Trainingszustandes kann zuverlässig abgelesen werden.

2.3.3. Interpretation der LLK

Veränderungen der LLK können hilfreiche Informationen über Trainingsanpassungen geben. Viele Wissenschaftler (Bourdon, 2000; Heck & Beneke, 2008; Rudolph & Berbalk, 2000; Rudolph, 2014) sind sich einig, dass eine

ganzheitliche Betrachtung besonders wichtig ist: die Interpretationen müssen immer vor dem Hintergrund des individuellen Trainings und des persönlichen Gesundheitszustandes erfolgen. Zudem sollte der gesamte Kurvenverlauf betrachtet werden. Einzelne Punkte auf der LLK haben keine höhere Bedeutung als andere Punkte auf der LLK. Zunächst müssen die Rohdaten im Blick behalten werden und erst dann die Regressionskurve.

Die Interpretation der LLK ist noch diffiziler als die der Laktatkonzentration bei konstanter Dauerbelastung, da die Ursachen für einzelne Laktatwerte sehr komplex sind (Maassen, Schneider, 2011). Idealerweise werden immer mehrere Parameter erfasst und der Gesamtzusammenhang betrachtet (Maassen, Schneider, 2011; Rudolph, 2014).

Bei der Analyse der LLK sollte zunächst berücksichtigt werden, ob es sich um einen Schwimmer oder eine Schwimmerin, einen Sprinter oder Langstreckenschwimmer handelt und in welcher Schwimmlage der Test absolviert wurde. Zu den geschlechts- und distanzspezifischen Unterschieden der LLK siehe Kapitel 3.5.1. „Vergleich der Geschlechter“ und Kapitel 3.5.2. „Vergleich zwischen 100-m-, 200-m- und 400-m-Schwimmern“.

Typische Verschiebungen der LLK sind in den Abbildungen 9 bis 14 visualisiert. Die Ausgangskurve ist jeweils mit einer durchgezogenen schwarzen Linie, die Veränderung in gestrichelt rot dargestellt. Übliche Interpretationen der Veränderungen sind folgende (Bourdon, 2000; Faude et al., 2009; Rudolph, 2014):

- Eine Verschiebung der Kurve nach rechts und / oder nach unten ist ein Indiz für eine Verbesserung der aeroben Kapazität (Abb. 9). Der Athlet kann eine höhere Intensität bzw. Geschwindigkeit bei gleich hoher Laktatkonzentration leisten, oder hat bei gleicher Intensität geringere Laktatwerte. Ein gezieltes langfristiges Training sollte in jedem Fall zu solch einer Leistungsverbesserung führen. Schon allein eine Ökonomisierung der Schwimmtechnik führt dazu, dass der Schwimmer mit gleicher Anstrengung schneller schwimmen kann. Im fortgeschrittenen Leistungsniveau kann ein intensives Ausdauertraining diese Kurvenverschiebung bewirken.

- Im Gegensatz dazu gilt eine Verschiebung der LLK nach links und / oder nach oben als Anzeichen für eine Verschlechterung der aeroben Kapazität (Abb. 10). Der Athlet kann bei gleichen Laktatwerten nur eine geringere Leistung bringen oder zeigt höhere Laktatkonzentrationen bei gleicher Intensität. Meist ist dies auf ein nachlassendes Trainingspensum oder einen Trainingsausfall zurückzuführen.

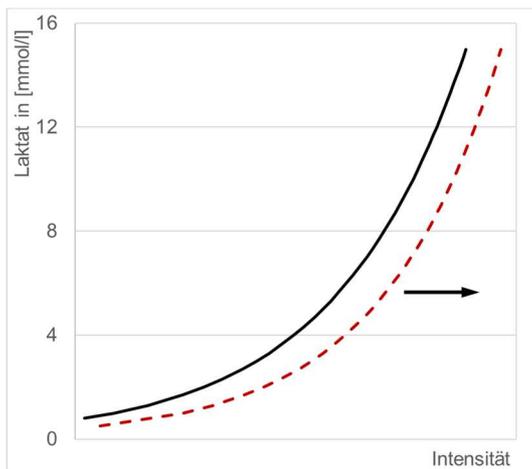


Abbildung 9: Rechtsverschiebung der LLK

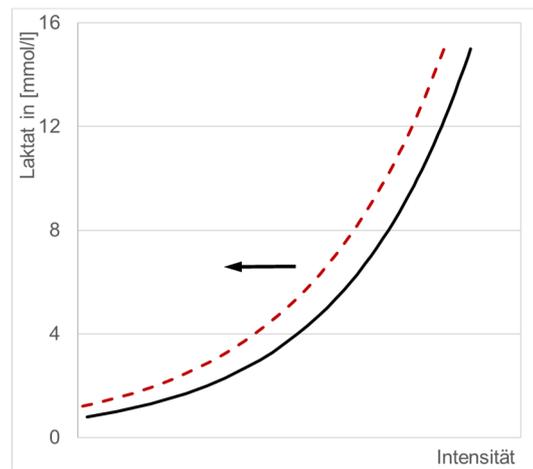


Abbildung 10: Linksverschiebung der LLK

- Verschiebungen nach rechts oder unten im unteren (aeroben) Bereich der LLK deuten auf eine verspätete Laktatproduktion aufgrund von verstärkter Fettverbrennung und gesteigerten aeroben Prozessen hin (Abb. 11). Sehr extensives Ausdauertraining kann diesen Effekt gezielt auslösen. Die gleiche Verschiebung kann aber auch auf intensives Training am Vortag des Tests oder schlechten Ernährungszustand zurückzuführen sein: Wenn die Glykogenspeicher leer sind, wird die LLK im ersten Teil nach unten gedrückt, gleichzeitig erreichen die maximalen Laktatkonzentrationen im oberen Bereich nicht so hohe Werte (Maassen, Schneider, 2011; Schmidt et al., 1993).

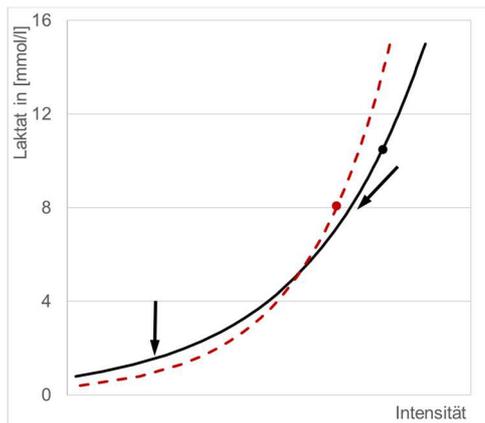


Abbildung 11: Abwärtsverschiebung im unteren Bereich der LLK

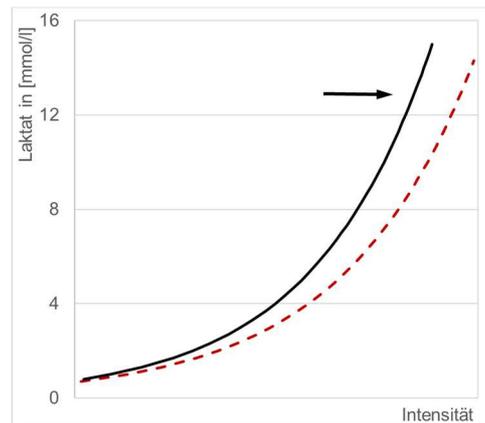


Abbildung 12: Abflachung der LLK

- Eine Verschiebung der LLK nach unten oder rechts im Bereich der anaeroben Schwelle oder eine Abflachung der LLK sind ein Hinweis auf eine Verbesserung der intensiven aeroben Ausdauer und eine Ökonomisierung der anaerob-laktaziden Energiebereitstellung (Abb. 12). Gleichzeitig nimmt die Leistung des glykolytischen Systems zu. Die Leistung im Bereich der anaeroben Schwelle, also bei ca. 4 mmol/l, steigt. Anzustreben ist solch eine Abflachung der LLK im Zyklus der Leistungsausprägung. Durch intensives Schnelligkeitsausdauertraining mit maximalen Belastungen von bis zu 30 s Dauer oder spezifisches Krafttraining kann dies erreicht werden.
- Abflachung der LLK mit gleichzeitiger Linksverschiebung im Bereich der aeroben Leistung entsteht durch eine Ökonomisierung der anaerob-laktaziden Energiebereitstellung (Abb. 13). Häufig tritt dies in Kombination mit einer Erhöhung des maximalen Laktatwerts auf. Gleichzeitig kommt es zu einer Verminderung der aeroben Leistungsfähigkeit. Die mögliche Intensität im Bereich der anaeroben Schwelle lässt nach. Diese kontroverse Beziehung zwischen aerober und anaerober Leistungsfähigkeit ist typisch und taucht besonders deutlich im Kurz- und Mittelzeitausdauerbereich auf.
- Ein Anstieg der maximalen Laktatwerte zeigt eine Verbesserung der anaeroben Kapazität und damit eine verbesserte Mobilisationsfähigkeit bei maximalen Intensitäten an (Abb. 14). Der Athlet toleriert höhere Laktatkonzentrationen. Insbesondere wenn der Athlet intensive Belastungen ohne eine gute Grundlagenausdauer trainiert, kann es zu einem Anstieg der maximalen

Laktatkonzentrationen ohne gleichzeitige Verschiebung der LLK kommen. Dies sollte kein langfristiges Ziel im Leistungsaufbau sein.

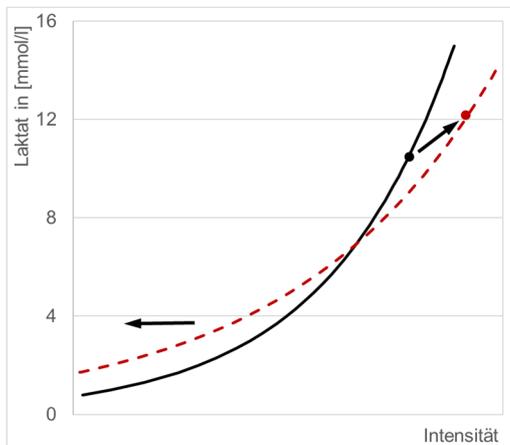


Abbildung 13: Abflachung mit Linksverschiebung

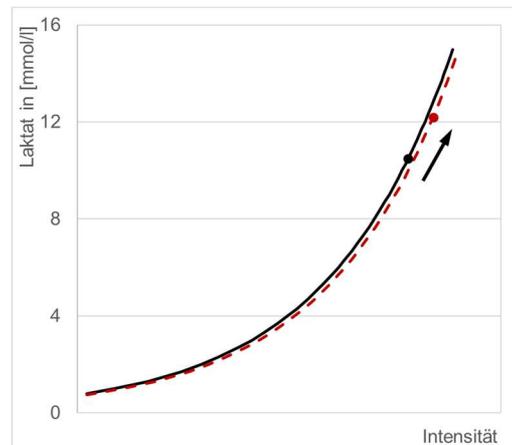


Abbildung 14: Anstieg der maximalen Laktatwerte

In der Trainingslehre des Schwimmens haben sich folgende Auffassungen zur anzustrebenden Entwicklung bzw. Erfahrungswissen zur Interpretation der LLK herausgebildet: Im langfristigen Leistungsaufbau sollte im Grundlagentraining zunächst eine komplette Rechtsverschiebung der LLK angestrebt werden. Erst im Anschlusstraining kann mit entsprechender Trainingszyklisierung eine gezielte Verschiebung der LLK angestrebt werden. Im vorbereitenden Saisonzyklus verschiebt sich die LLK idealerweise zunächst nach rechts, hier werden die Grundlagen für die Formzuspitzung in der Wettkampfphase gelegt. In der formzuspitzenden Trainingsphase hingegen wird eine Erhöhung der anaeroben Mobilisation mit Steigerung der maximalen Laktatwerte angestrebt.

Eine Zeitverbesserung durch Steigerung der anaeroben Kapazität ist deutlich geringer als durch eine Steigerung der aeroben Kapazität. Sie lässt sich über eine individuell unterschiedliche Grenze hinaus erfahrungsgemäß nicht mehr verbessern (Wilke & Madsen, 2015).

Eine Verbesserung im anaeroben Bereich hat häufig eine Verschlechterung im aeroben Bereich zur Folge (Simon & Thiesmann, 1986; Wilke & Madsen, 2015). Für den Leistungsschwimmer muss demzufolge ein Optimum der aeroben Kapazität gefunden werden, auf das er die für seine Disziplin erforderliche optimale anaerobe

Kapazität aufbaut. Je nach Streckenlänge und persönlichen Voraussetzungen muss ein individuelles Verhältnis für jeden Athleten gefunden werden.

Neben der subjektiven Betrachtung der Veränderungen der LLK kann die Verwendung von weiteren objektiven und statistischen Methoden wie der linearen Regressionsanalyse der kleinsten Quadrate und post hoc Tests zum Einsatz kommen (Bourdon, 2000). Allerdings sollten diese nicht von einer subjektiven Interpretation abhalten, da sie lediglich dazu dienen, die Interpretation der Daten zu unterstützen. Objektive Methoden sind immer sehr stringent und berücksichtigen die individuelle Anlage der Daten nicht. Eine ganzheitliche Betrachtung der Daten und zugehörigen Hintergrundinformationen wird immer die sinnvollsten Ergebnisse liefern.

Insgesamt bieten besonders Längsschnittuntersuchungen eine hohe Aussagekraft über Änderungen des Leistungszustandes (Maasen, Schneider 2011).

2.3.4. Das Modell der Critical Swimming Speed

2.3.4.1. Historische Entwicklung des Modells

Ursprünglich wurde das Konzept der „Critical Power“ (W_{crit}) von Monod und Scherrer (1965) für isolierte lokale Muskelarbeit vorgeschlagen. Moritani, Nagata, deVries und Muro (1981) erweiterten dieses Modell auf eine Ganzkörperarbeit auf einem Fahrradergometer. Sie bestimmten W_{crit} als die Intensität, die theoretisch ohne Ermüdung aufrechterhalten werden kann. Ähnlich dem MLSS und der AnS, sollte auch dies eine Grenze sein, bei der zwischen Laktatproduktion und -elimination gerade noch ein Gleichgewicht herrscht. Außerdem fanden die Autoren einen engen Zusammenhang zwischen der ermittelten kritischen Leistung und der anaeroben Schwellenleistung. Wakayoshi, Yoshida et al. (1992) haben das Modell in den Schwimmsport übertragen. Sie definierten die Critical Swimming Speed (CS) als Geschwindigkeit, die theoretisch unendlich lang, ohne Erschöpfung beibehalten werden kann. Bei Intensitäten unterhalb der CS pendeln sich sowohl La^- wie auch VO_2 in einem Steady-State ein. Oberhalb hingegen übersteigt die Laktatproduktion die Laktatelimination bzw. -verwertung. Die Laktatkonzentration im Blut, H^+ -Ionen und VO_2 steigen an und Ermüdung tritt ein. Mit der CS soll also der gleiche physiologische Zustand ermittelt werden, wie bei der Bestimmung des MLSS oder

der anaeroben Schwelle. Die Herangehensweise und Bestimmungsmethode beruhen aber auf einem rein mathematischen Modell.

2.3.4.2. Berechnung der CS

Zur Bestimmung der CS werden mehrere Bestzeiten über verschiedene Streckenlängen in einer Schwimmlage benötigt. Diese können aus den aktuellen Wettkampfbestzeiten abgelesen oder in einem separaten Test ermittelt werden. Allerdings muss für alle herangezogenen Zeiten ein einheitliches Vorgehen gewählt werden. Die Werte kennzeichnen Punkte in einem Diagramm. Dabei werden die Zeiten auf der x-Achse und die Streckenlängen auf der y-Achse aufgetragen. Über diese Punkte wird eine Regressionsgerade gelegt (siehe Abb. 15).

Ausgehend von der physikalischen Formel zur Berechnung der Geschwindigkeit

$$v = s/t$$

mit v = Geschwindigkeit, s = Streckenlänge und t = Zeit

und der Gleichung einer Regressionsgeraden

$$s = a + b * t$$

mit s = Streckenlänge, a = y-Achsenabschnitt, b = Steigung und t = Zeit

entsteht durch Ersetzen von s und Umformulieren die Gleichung

$$v = a/t + b.$$

Wenn nun angenommen wird, dass die Intensität theoretisch unendlich lang aufrechterhalten werden könnte, die Zeit also gegen unendlich tendieren soll ($t \rightarrow \infty$), tendiert a/t gegen Null. Damit nähert sich v der Steigung b der Regressionslinie an:

$$v_{krit} = b.$$

Folglich wird CS definiert als die Steigung der linearen Regressionsgeraden zwischen den geschwommenen Distanzen und den zugehörigen Bestzeiten.

Grafisch ist der Zusammenhang in Abbildung 15 dargestellt. Für das vorliegende Beispiel sind die Distanzen und zugehörigen Bestzeiten aus der Tabelle 11 abzulesen. In der ermittelten Formel für die Regressionsgerade entspricht der Wert 1,49 der CS, also 1,49 m/s. Der y-Achsenabschnitt beträgt in diesem Fall 24,5 m.

Tabelle 11. Verwendete Beispieldaten zur Berechnung der CS und ASC für die Abb. 15.

Distanz	Zeit	Zeit in s
50	00:24,00	24,0
100	00:53,10	53,1
200	01:55,58	115,6
400	04:07,11	247,1
800	08:31,87	511,9
1500	16:34,00	994,0
CS	=STEIGUNG (A3:A8;C3:C8)	1,49
ASC	=ACHSENABSCHNITT (A3:A8;C3:C8)	24,47

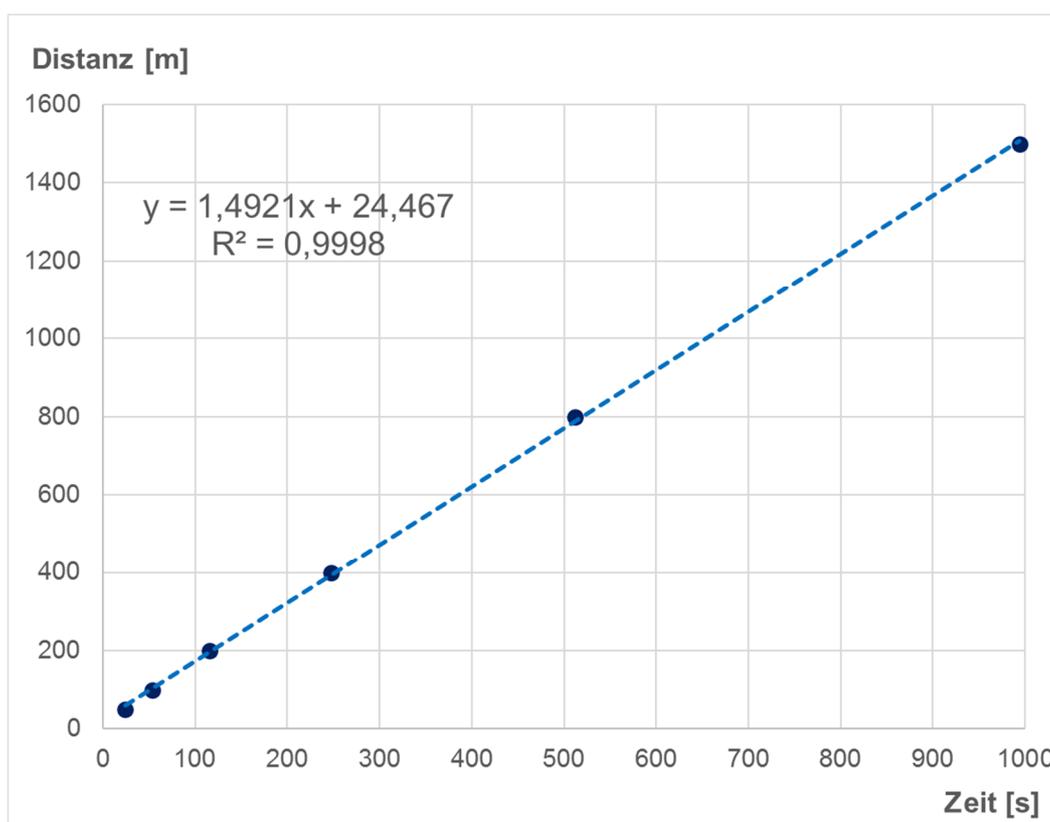


Abbildung 15: Zeit-Distanz-Diagramm zur Berechnung der CS aus den Beispieldaten aus Tabelle 11. Die berechnete Steigung beträgt in diesem Fall $b = 1,49$ m/s und der y-Achsenabschnitt $a = 24,5$ m.

Dieser y-Achsenabschnitt a wird von MacLaren und Coulson (1999) und Dekerle und Pelayo (2011) als „Anaerobic Swimming Capacity“ (ASC in Meter) definiert. Diese Kenngröße soll ein Maß für die anaerobe Leistungsfähigkeit des Schwimmers sein und mit dem Leistungsvermögen bei hochintensiver Belastung zusammenhängen. Der Wert entspricht der Entfernung, die der Schwimmer rein anaerob zurücklegen kann: Bei der untersuchten Stichprobe liegt der Wert bei $14,80 \pm 2,23$ m oder entsprechend $5,50 \pm 1,27$ s (Dekerle, Sidney, Hespel & Pelayo, 2002). Kohji Wakayoshi et al. (1993) hingegen fanden einen mittleren Wert für a von $23,3 \pm 1,72$ m. Demzufolge kann der Schwimmer seine maximale Schwimmgeschwindigkeit nicht länger als diese bestimmte Strecke beibehalten. Allerdings gibt es hierzu noch keine fundierten Belege. Billat, Koralsztein und Morton (1999) bezeichnet diesen y-Achsenabschnitt sportartübergreifend als „anaerobic maximal capacity“.

Die oben genannte Gleichung der Regressionsgeraden kann dementsprechend auch wie folgt ausgedrückt werden:

$$s = ASC + CS * t$$

Die Autoren dieses Modells behaupten, dass alle Datenpunkte auf einer geraden Linie liegen und ermitteln einen Bestimmungskoeffizienten für die Regressionslinien von $R^2 > 0,998$. Sie zeigen, dass die aus zwei Schwimmstrecken berechneten CS fast der Schwimmgeschwindigkeit am MLSS entspricht (Kohji Wakayoshi et al., 1993).

Bezüglich der Anzahl der Strecken und der Streckenlängen, die in die Berechnung einfließen müssen, besteht keine Einigkeit. Die Vorschläge variieren zwischen 50 m und 1500 m in allen möglichen Kombinationen (Dekerle et al., 2002; Fernandes & Vilas-Boas, 1999; Wright & Smith, 1994). Schon 1966 fand Ettema (1966) heraus, dass die Beziehung der Weltrekorde im Schwimmen und der zugehörigen Streckenlänge im Bereich zwischen 4 min und 30 min Belastungsdauer geradlinig verläuft.

Di Prampero (1999) und Billat et al. (1999) veröffentlichten unabhängig voneinander drei grundlegende Voraussetzungen, die für eine valide Anwendung des Modells zu berücksichtigen sind:

- Erstens müssen die Belastungszeiten für alle Einzelstrecken jeweils so gewählt werden, dass die Glykogenspeicher vollständig aufgebraucht werden.
- Zweitens muss die VO_{2max} bei jeder Strecke erreicht werden und im weiteren Verlauf der Belastung zu 100 % aufrechterhalten werden. Der Körper braucht ca. 10–30 s bis die maximale aerobe Leistung und damit die VO_{2max} erreicht wird. Erst ab ca. 3 min Gesamtbelastung spielt diese Verzögerung keine Rolle mehr.
- Drittens muss der Energieverbrauch während den einzelnen Belastungen jeweils konstant bleiben.

Basierend auf diesen Voraussetzungen erwähnen Dekerle et al. (2005) und Costa et al. (2009), dass Belastungszeiten zwischen 2 min und 15–20 min in die Berechnung mit einfließen müssen, um eine Dauerbelastungsgrenze valide ermitteln zu können. Bei einer Belastungsdauer von unter 1–2 min scheint zum einen vor allem der Start eine zu große Rolle zu spielen und zum anderen werden die Glykogenspeicher nicht vollständig ausgenutzt, um einen sinnvollen Beitrag zur Berechnung zu bringen. Bei der Verwendung von zu kurzen Strecken (50 und 100 m) wird die CS über- und ASC unterschätzt (Wright B. & Smith, 1994; Zacca, Fernandes, Pyne & Castro, 2016). Ab einer Belastungsdauer von über 20 min fällt die Kurve wieder ab, was durch die Entleerung der Glykogenspeicher und den notwendigen Übergang zur Fettverbrennung erklärt wird (Billat et al., 1999).

Mehrere Autorenguppen (Costa et al., 2009; MacLaren & Coulson, 1999; Toubekis, Tsami & Tokmakidis, 2006; Wright & Smith, 1994) stellten Berechnungen aus unterschiedlichen Streckenlängen an: Je länger die Strecken sind, die zur Berechnung verwendet werden, desto langsamer ist die CS und umgekehrt. Mindestens 800 m, besser 1500 m, sollten mit einbezogen werden. Eine Integration der 50 m Strecke würde die Validität verfälschen.

Daneben gibt es Versuche die CS aus einer einzelnen Messung abzuleiten (Kohji Wakayoshi et al., 1993; Wright & Smith, 1994; Zacca et al., 2016). Ein Vorschlag von Wakayoshi et al. (1993) ist, die CS aus der 400-m-Zeit zu berechnen. Mit der Begründung, dass der y-Achsenabschnitt im Mittel 23,3 m beträgt, berechnen sie $CS = (400 - 23,3)/t_{400}$. R. Zacca et al. (2016) berechnet die CS mit der Formel $CS =$

$0,92 \times v_{400}$. In einer anderen Studie (Wright & Smith, 1994) wird die Berechnung aus der 1200-m-Zeit bevorzugt: $CS = 1,017 \times t_{1200} - 0,39$. Um aber die Reliabilität der Berechnung sicherzustellen, sollten mindestens drei Strecken herangezogen werden (Dekerle, 2006; Dekerle, Brickley, Alberty & Pelayo, 2010; Zacca et al., 2016).

2.3.4.3. *Validität des Modells und die praktische Anwendung*

In mehreren Studien wurden Vergleiche zwischen der CS und dem MLSS, der 4-mmol-Schwelle und der anaeroben Schwelle oder einem 30-min-Test angestellt, um die Validität des Modells zu belegen (Dekerle et al., 2002; Fernandes & Vilas-Boas, 1999; Wakayoshi et al., 1993). Häufig konnten hohe Korrelationen gefunden werden (Dekerle, 2006), in einigen Fällen aber auch statistisch signifikante Unterschiede (Dekerle et al., 2005). Beim Vergleich der Geschwindigkeit am MLSS und der CS konnten die Autoren zwar einen Korrelationskoeffizienten $r = 0,87$ feststellen, die Mittelwerte differierten aber mit $1,24 \pm 0,10$ m/s und $1,31 \pm 0,15$ m/s statistisch signifikant. Ein Blad-Altman-Plot zeigte zu große individuelle Differenzen der beiden Variablen auf. Leider gibt es nur sehr wenig Untersuchungen, die die individuellen Messwertunterschiede berichten (Dekerle et al., 2005; Rodriguez, Moreno & Keskinen, 2003), was aber für eine methodisch korrekte Auswertung notwendig wäre.

Dekerle et al. (2002) untersuchte den Zusammenhang zwischen der CS und biomechanischen Parametern wie der Zuglänge bzw. der Zugfrequenz. Die Zuglänge bleibt an der CS stabil. Die kritische Zugfrequenz lag bei der gleichen Frequenz wie sie beim 30-min-Tests geschwommen wurde. Folglich sei die kritische Zugfrequenz ebenfalls ein Indikator für die aerobe Trainingsbelastung.

Costa et al. (2009) konnte zeigen, dass die Berechnung der CS aus den Wettkampfzeiten möglich ist und sogar der Bestimmung mit separaten Tests vorzuziehen ist. Wakayoshi und Yoshida et al. (1992) fand nur geringe Unterschied zwischen Messungen im Pool und Messungen im Schwimmkanal.

MacLaren und Coulson (1999) konnten belegen, dass ein Grundlagenausdauertraining die CS verbessern kann und gleichzeitig den y-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden verringert. Auch Billat et al. (1999) meinen, dass sich die

beiden Werte der Funktion a und b konträr zueinander verhalten. Wer die Steigung b der Funktion, also die aerobe Leistungsfähigkeit, verbessert, kann nicht gleichzeitig den y-Achsenabschnitt a, die anaerobe Kapazität, steigern.

Entgegen der ursprünglichen Annahme, die CS könne theoretisch beliebig lang aufrechterhalten werden, konnten Dekerle et al. (2010) zeigen, dass Schwimmer die Intensität nur ca. 20–40 min beibehalten konnten. Sowohl $\dot{V}O_2$ wie auch La^- stiegen stetig an, während beide Parameter stabil blieben, wenn die Geschwindigkeit um 5% unter die CS gesenkt wurde.

2.3.5. Beziehung zwischen Laktatschwellen, Hf, $\dot{V}O_{2max}$, MLSS und CS

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln verschiedene Bezugsgrößen zur Diagnostik der Ausdauerleistungsfähigkeit vorgestellt wurden, sollen nun die physiologischen Parameter und ihre Lage zueinander geordnet werden. Die Schwellen werden mit Messwerten belegt und dementsprechend in einer Übersicht eingeordnet.

Bei jeglichem Vergleich unterschiedlicher Schwellen oder physiologischer Parameter ist es zwingend notwendig, die Messmethoden zu beachten. In einigen Fällen werden z.B. die 4-mmol-Schwelle anhand eines 7 × 200 m Stufentests ermittelt, manchmal mittels eines 5 × 200 m Stufentests (Wakayoshi, Yoshida et al., 1992) oder auch mit einem 2 × 400 m Stufentest mit einer linearen Verbindung beider Messpunkte (Olbrecht, Madsen, Mader, Liesen & Hollmann, 1985). Daher sind die zugehörigen Geschwindigkeits- oder Laktatwerte nicht direkt vergleichbar. Bei der Bestimmung der CS müssen die einbezogenen Strecken bekannt sein, da dies erheblich Einfluss auf die berechnete Geschwindigkeit hat. In der Studie von Costa et al. (2009) liegt z.B. die $CS_{50-1500}$ unter der 4-mmol-Schwelle und die CS_{50-200} oberhalb dieser. Des Weiteren sind das Leistungsniveau der Stichprobe und die Stichprobengröße ausschlaggebend für eine Interpretation.

Aus diesem Grund kommt es vor, dass manche Autoren (Greco et al., 2013; Rodriguez et al., 2003) die CS höher einstufen als das MLSS oder die 4-mmol-Schwelle, hingegen Wakayoshi et al. (1993) keine Unterschiede zwischen der CS und dem MLSS sehen, beide aber schneller als die 4-mmol-Schwelle einstufen.

Beim Vergleich verschiedener Schwellen ist die Angabe von Korrelationen von geringer Bedeutung, vielmehr ist die Übereinstimmung von zwei Schwellenwerten wichtiger. Korrelationen können zwar die relative Reliabilität von zwei Messmethoden bestimmen, aber keine systematische Verschiebung oder absolute Übereinstimmung erfassen.

2.3.5.1. Die Beziehung zwischen Herzfrequenz und Laktat

Um im Trainingsalltag die Belastungsintensität festzustellen, ist neben der Zeit pro Strecke die Herzfrequenz die gebräuchlichste Größe. Mit steigender Belastung steigt die Herzfrequenz zunächst linear an. Im oberen Belastungsbereich flacht sie ab, allerdings ist dieser Knickpunkt nicht immer gut zu erkennen (Hottenrott & Neumann, 2008). Wie auch bei den Laktatkonzentrationen kann anhand der Höhe der Herzfrequenz auf die Belastungsintensität geschlossen werden. Der Zusammenhang wird in Abbildung 16 deutlich.

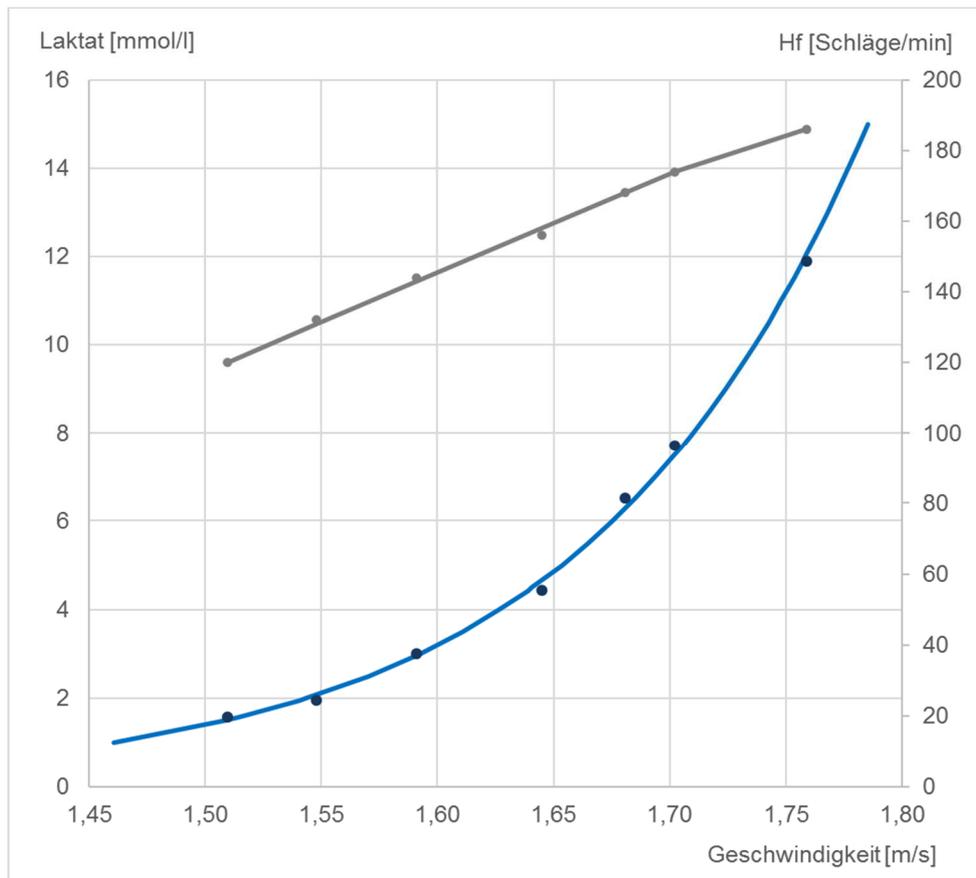


Abbildung 16: Verhältnis von Laktatkonzentration (blaue Messpunkte und Linie) und Herzfrequenz (graue Messpunkte und Linie) an einer Beispielkurve aus einem 7 × 200 m Stufentest.

Das Verhältnis zwischen Herzfrequenz und Laktatwerten streut individuell sehr stark. In der Abbildung 17 ist dieses Verhältnis für acht Kaderschwimmerinnen dargestellt. Dieses Verhältnis scheint aber für die Einzelpersonen sehr stabil zu sein, sodass die beiden Größen Rückschlüssen auf die jeweils andere zulassen (Rudolph, 2014).

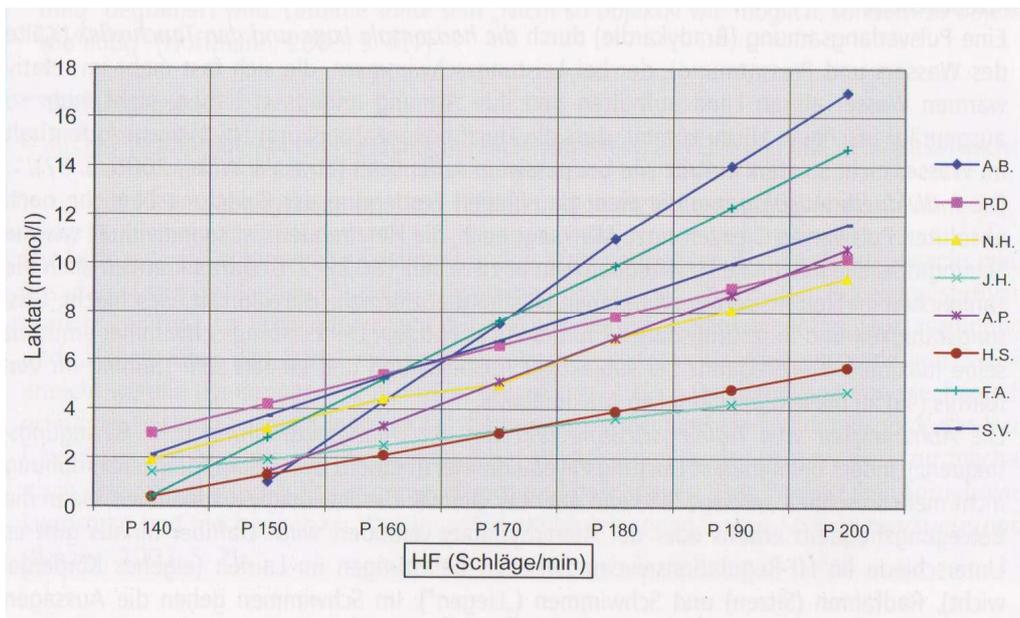


Abbildung 17: Verhältnis von Herzfrequenz und Laktat bei Kaderschwimmerinnen über 100 m F.

Quelle: Rudolph (2014, S. 86)

Aus dem Laktatverhalten kann bei verschiedenen Schwimmgeschwindigkeiten annähernd auf die metabolische Beanspruchung geschlossen werden, bei der Herzfrequenz geht das nicht (Rudolph, 2014).

Zu berücksichtigen ist, dass die Herzfrequenz im Wasser etwas niedriger ist als an Land: Der hydrostatische Druck führt zu einer Erhöhung des zentralen Venendrucks, wohingegen der arterielle Druck konstant bleibt. Insgesamt führt dies zu einer Abnahme des peripheren Widerstands und einer Blutvolumenverschiebung in Richtung Herz. Das Schlagvolumen des Herzens steigt an. Folglich kann das gleiche Herzminutenvolumen mit geringerer Herzfrequenz gefördert werden (Schwan, 2010). Simon et al. (1983) führen die horizontale Position im Wasser, den erhöhten Außendruck und die geringere Umgebungstemperatur als Gründe für eine kürzere Kreislaufzeit und damit niedrigere Herzfrequenz an. Zur Differenz der Herzfrequenz zwischen Land und Wasser gibt es Angaben von 5–15 Schlägen pro min. Ob der Effekt allerdings bei aktiver Bewegung im Wasser genauso groß ist, ist nicht belegt (Schwan, 2010).

Die individuelle maximale Herzfrequenz (Hf_{max}) streut erheblich, meist zwischen 180 und 220 Schlägen / min. Sie ist abhängig vom Alter, Geschlecht, genetischen

Anlagen, Gesundheitszustand und der Schwimmdisziplin (Sweetenham & Atkinson, 2003). Jeder Schwimmer sollte seine Hf_{max} kennen. Für Belastungsvorgaben sollte, wie bei den Laktatwerten von pauschalen Angaben abgesehen werden. Besser ist eine prozentuale Angabe der Hf_{max} .

Gemessen wird die Herzfrequenz idealerweise mit einem Brustgurt, der bei der praktischen Anwendung im Wasser aber häufig verrutscht und so eine relativ hohe Fehlerquote aufweist. Die Messung an der Halsschlagader ist unter Zeitdruck allerdings auch nicht fehlerfrei. Für den Trainingsalltag ist die Herzfrequenz zwar die am einfachsten zu erhebende physiologische Größe, aber aufgrund der hohen Fehleranfälligkeit begrenzt aussagekräftig (Rudolph, 2014).

2.3.5.2. *MLSS und Laktatschwellen*

Sehr viele Studien, die die Beziehung zwischen der Ausdauerleistung und der Laktatschwelle bzw. dem MLSS untersuchten, konnten einen hohen Zusammenhang nachweisen. Demnach führt eine Verbesserung der Ausdauer auch zu einer Erhöhung der Schwellengeschwindigkeit. Allerdings liegen sehr große Streuungen vor, wie sich die Schwelle und das MLSS zueinander verhalten (Faude et al., 2009).

Dekerle und Pelayo (2011) sind sich sicher, dass die Geschwindigkeit an der aeroben Schwelle niedriger ist als am MLSS. Trotzdem konnten Greco et al. (2013) zeigen, dass nur ein kleines Spektrum zwischen der aeroben Schwelle ($1,08 \pm 0,09$ m/s und $2,45 \pm 1,13$ mmol/l) und dem MLSS ($1,14 \pm 0,08$ m/s und $4,30 \pm 1,32$ mmol/l) liegt und daher die Abstufung zwischen den einzelnen Stufen im Stufentest so schwierig ist.

Die IAnS liegt bei Schwimmern erfahrungsgemäß bei einer Laktatkonzentration zwischen 2,5 und 5 mmol/l in Abhängigkeit von der Muskelfasermuskelzusammensetzung, vom Trainingszustand und vom Alter. Bei Langstreckenschwimmern liegt die IAnS bei ca. 2–3 mmol/l, bei Sprintern eher bei 4–5 mmol/l Laktat (Wilke & Madsen, 2015). Die Untersuchungen von Faude et al. (2008) zeigten, dass die IAnS im Durchschnitt bei ca. 4,2 mmol/l liegt.

Beim Vergleich der anaeroben Schwelle oder der 4-mmol-Schwelle mit dem MLSS zeigt sich in erster Linie eine Abhängigkeit von der Methodik. Bei einer Stufendauer

von 3 min liegt die AnS höher als das MLSS, nicht aber bei 5 min Stufendauer (Faude et al., 2009).

Olbrecht et al. (1985) fanden bei einem 30-min-Test durchschnittliche Laktatwerte von $4,01 \pm 0,75$ mmol/l und eine Geschwindigkeit von $1,361 \pm 0,057$ m/s, bei einem 60-min-Test dagegen $3,01 \pm 0,60$ mmol/l und $1,341 \pm 0,095$ m/s. Aufgrund dieser Ergebnisse schlagen sie vor, die 4-mmol-Schwellengeschwindigkeit aus der durchschnittlichen Schwimmgeschwindigkeit aus einem 30-min-Test zu berechnen: $v_{4,0} = 1,367 \times v_{30} - 0,509$. Dekerle und Pelayo (2011) hingegen sind der Meinung, dass die Schwimmgeschwindigkeit bei einem 30-min-Test eher der CS entspricht und berichten von Laktatwerten von $3,68 \pm 1,58$ mmol/l.

Espada et al. (2015) fanden keinen Unterschied zwischen der Geschwindigkeit am MLSS ($1,30 \pm 0,04$ m/s) und der VT2 ($1,31 \pm 0,08$ m/s). Von der maximalen aeroben Geschwindigkeit (Bestimmungsmethode siehe nächstes Kapitel 2.3.5.3. „Laktat und VO_{2max} “) ($1,45 \pm 0,05$ m/s), der VO_{2max} ($1,45 \pm 0,04$ m/s) und der VT1 ($1,20 \pm 0,05$ m/s) hingegen unterscheidet sich das MLSS signifikant.

In einer Untersuchung an Ruderern berichtet Bourdon (2000) von einer aeroben Schwelle bei $0,33$ – $1,47$ mmol/l mit einer Hf von 132 – 168 Schlägen/min, einer anaeroben Schwelle von $2,75$ – $4,77$ mmol/l und einer Hf von 158 – 190 Schlägen /min und der 4-mmol-Schwellen mit einer Hf von 163 – 189 Schlägen /min. Damit liegt die IAnS bei ähnlichen Werten wie die 4-mmol-Schwelle, die aerobe Schwelle hingegen deutlich darunter.

2.3.5.3. Laktat und VO_{2max}

Das MLSS liegt Billat et al. (2003) zufolge in einem Bereich von 65 – 85 % der VO_{2max} . Dekerle und Pelayo (2011) differenzieren anhand des Trainingsniveaus. Sie meinen, dass das MLSS von trainierten Athleten bei ca. 70 – 80 % und von hoch trainierten Athleten bei 85 – 90 % der VO_{2max} liegt.

Die Geschwindigkeit an der VO_{2max} ($v_{VO_{2max}}$) kann laut Espada et al. (2015) mit einem 400-m-Test bestimmt werden: Die mittlere 300-m-Geschwindigkeit, entspricht der $v_{VO_{2max}}$ und wird maximale aerobe Geschwindigkeit (MAV) genannt. Auch Zacca et al. (2019) berichten von einer hohen Korrelation zwischen der 400-m-

Geschwindigkeit (v_{400}) und der $v_{VO_{2max}}$ und konnten nachweisen, dass die physiologischen und biomechanischen Parameter übereinstimmen. Wohingegen Dekerle und Pelayo (2011) der Meinung sind, die MAV entspricht 92–96 % der v_{400} , Greco et al. (2013) aber zu dem Schluss kommen, dass nur 88 % der v_{400} über 30 min durchgehalten werden kann. Laut Zacca et al. (2019) entspricht die $v_{VO_{2max}}$ der 7. Stufe im Stufentest.

Laktat kann die Anpassung an Ausdauerleistungen besser anzeigen als die VO_{2max} . Während die VO_{2max} ab einem gewissen Punkt nicht mehr ansteigt, können die Laktatschwellen immer noch verbessert werden. Demzufolge scheint das Laktatverhalten der beste Index zu sein, um Vorgaben für ein optimales Training zu erstellen und Übertraining zu vermeiden (Bourdon, 2000).

2.3.5.4. *Das Verhältnis der CS zu anderen Schwellen*

Die CS liegt eng bei den Werten eines 30-min- oder eines 2000-m-Tests, aber höher als die Geschwindigkeit am MLSS (v_{MLSS}) und an der 4-mmol-Schwelle (Dekerle & Pelayo, 2011). Laut Hill und Rowell (1996) sind die AnS und die Critical power nicht synonym zu verwenden.

Zacca et al. (2016) kommt in seiner Studie zu dem Ergebnis, dass die CS bei ca. 92 % der v_{400} liegt und folgert daraus, dass die CS aus der 400-m-Zeit durch Multiplikation mit 0,92 berechnet werden kann.

Rodriguez et al. (2003) fand eine hohe Korrelation zwischen der CS und der Geschwindigkeit bei 4 mmol/l ($r = 0,935$), trotzdem unterscheiden sich die Mittelwerte statistisch signifikant ($1,386 \pm 0,10$ m/s und $1,335 \pm 0,09$ m/s). Außerdem korrelieren beide Geschwindigkeiten mit der Geschwindigkeit eines 400m-Tests ($r = 0,960$ und $0,899$; Mittelwert = $1,447 \pm 0,11$ m/s).

Wakayoshi und Yoshida et al. (1992) konnten zeigen, dass sich die im Schwimmkanal bestimmte CS ($1,543 \pm 0,018$ m/s) nicht von der im Becken bestimmten CS ($1,555 \pm 0,025$ m/s) unterscheidet. Sie liegt signifikant höher als die $v_{4,0}$ ($1,494 \pm 0,028$ m/s), aber niedriger als die v_{400} ($1,613 \pm 0,023$ m/s). In einer weiteren Untersuchung (Wakayoshi et al., 1993) kommen sie zum selben Ergebnis: v_{400} ($1,526 \pm 0,021$ m/s) ist signifikant höher als $CS_{200-400}$ ($1,437 \pm 0,024$) und höher als $v_{4,0}$ ($1,404 \pm 0,014$ m/s). Die Laktatwerte bei der CS liegen bei 3,2 mmol/l und

können über 3×400 m durchgehalten werden. Somit schlagen die Autoren vor, die CS würde dem MLSS entsprechen. Im Gegensatz dazu fanden Dekerle et al. (2005) heraus, dass die $CS_{100-500}$ ($1,31 \pm 0,15$ m/s) statistisch signifikant höher als das MLSS ($1,24 \pm 0,10$ m/s) liegt.

Die Abbildung 18 soll eine Übersicht über die berichteten Untersuchungen zu den verschiedenen physiologischen Grenzen und ihre Lage zueinander geben.

Bourdon (2000)	LT	<			iAnS	<	4-mmol						
Costa (2009)					CS ₅₀₋₁₅₀₀	<	4-mmol	<	CS ₅₀₋₂₀₀				
Dekerle (2005) Dekerle Pelayo (2011)			MLSS	=	v _{60min}	<	v _{30min}	=	CS ₂₀₀₋₄₀₀		MAV		
Espada (2015)	VT1	<	MLSS	=	VT2			<			MAV	=	VO _{2max}
Greco (2013)	LT	<	MLSS			<					v ₄₀₀		
Martin & Whyte (2000)	LT			<	CS ₁₀₀₋₁₅₀₀								
Olbrecht (1985)			v _{60min}	<	4-mmol	<	v _{30min}						
Rodriguez (2003)					4-mmol			<	CS	korr	MAV		
Wakayoshi (1992a)					4-mmol			<	CS _{Kanal} = CS _{Pool}	<	MAV	korr	VO _{2max}
Wakayoshi (1992b)					4-mmol			korr	CS _{Kanal}	korr	MAV		
Wakayoshi (1993)					4-mmol	<	MLSS	=	CS ₂₀₀₋₄₀₀	<	v ₄₀₀		
Zacca (2015)					CS ₂₀₀₋₁₅₀₀			92%			MAV		
Zacca (2019)											v ₄₀₀	korr	VO _{2max}

Abbildung 18: Einstufung der verschiedenen Schwellen im Schwimmen
zueinander aus den Angaben mehrerer Autoren

Zusammenfassend kann folgende Größeneinordnung festgehalten werden:

Die zitierten Autoren stimmen alle überein, dass die aerobe Schwelle unterhalb des MLSS liegt und die MAV die oberste Grenze der aeroben Geschwindigkeit darstellt. Bei der Einordnung der CS kommt es darauf an, aus welchen Strecken die Geschwindigkeit berechnet wurde. Laut der meisten Autoren liegt die CS, die aus kurzen Strecken ermittelt wurde, oberhalb des MLSS oder der 4-mmol-Schwelle, die CS, die aus Strecken inclusive der 1500 m berechnet wurde, unterhalb. An welcher Stelle das MLSS einzuordnen ist, ist uneinheitlich.

$$v_{LT} < CS_{\text{lang}} < \text{MLSS} - 4\text{-mmol-Schwelle} < CS_{\text{kurz}} < v_{400} = \text{MAV}$$

Diese kontroversen Ansichten und die neueren Erkenntnisse zum Laktatstoffwechsel untermauern den Eindruck, dass es sich nicht um scharfe Grenzen handelt und beide Energiesysteme – aerob und anaerob – zu jeder Zeit aktiv sind. Die gemessenen Laktatkonzentrationen hängen eher von der Laktatverwertbarkeit ab und sind daher kein Anzeichen für den Grad des anaeroben Stoffwechsels (siehe Kapitel 2.2.4. „Aktuelle Erkenntnisse zum Laktatstoffwechsel“). Bourdon (2000) fehlt es aktuell noch an einem wissenschaftlichen Konsens über die beste Art und Weise, die Blutlaktatkonzentrationen bei der Gestaltung und Modifikation von Trainingsprogrammen zu nutzen. Trotzdem scheint der individuelle Verlauf der LKK relativ stabil zu sein.

2.3.6. Ableitung von Belastungszonen

Ein gezieltes Ausdauertraining im Wasser sollte für jeden Athleten persönlich abgestimmt sein. Ein optimales Training zur Verbesserung der aeroben Ausdauer scheint im Bereich des MLSS zu liegen (Faude et al., 2009). Allerdings streuen die Werte für die Grenze enorm. Bourdon (2000) findet in seinem Review-Artikel eine Streuung von 1,3 bis 10,0 mmol/l für optimale Laktatkonzentrationen. Das macht deutlich, warum für die Ableitung von Trainingsbereichen ein individuelles Vorgehen unumgänglich ist. Anhand der persönlichen Bestzeiten, Herzfrequenz- oder Laktatwerte können individuelle Trainingsbereiche für die Schwimmer abgeleitet werden.

Grundsätzlich herrscht unter den Wissenschaftlern Einigkeit über die Klassifizierung von Trainingsintensitäten (Bourdon, 2000; Faude et al., 2008; Vogt et al., 2005). Die Einteilung der Bereiche basiert auf den Schwellentheorien (Bourdon, 2000; Rudolph, 2014). Allerdings variiert die Nomenklatur der Belastungsbereiche in den einzelnen Sportarten (Gore, 2000), aber auch innerhalb der Sportart Schwimmen. Alle vorgestellten Marker – Laktatschwellen, ventilatorische Schwellen, MLSS und CS – sind geeignet um die aerobe Ausdauer anzuzeigen, stellen aber verschiedene Einheiten innerhalb des Spektrums der Schwimmgeschwindigkeiten dar (Dekerle & Pelayo, 2011).

Eine Übersicht zu den verwendeten Begriffen bezüglich der Einteilung in Belastungszonen findet sich in Tabelle 12.

Grenzen	Swiss Olympic 2005				Bourdon 2000	Deckerle Pelayo 2011	Sweetenham 2003			Maglisco 2003	Wikle & Madsen 2015		
	Zone	Physiolog. Trainingszonen		Sportprakt. Trainingsbereiche	Bezeichnung	Domaine	Zone	Bezeichnung		Zone	Bezeichnung	Zone	Bezeichnung
	I	aerob	Grundlagenausdauer	Aktive Regeneration	Recovery		A1	Recovery work, low intensity	aerobic		Recovery	BZ 1	Kompensation
				Extensive Ausdauer	Extensive aerobic	Light-moderate	A2	Aerobic maintains		En1	Basic endurance	BZ 2	GLA I extensiv
Aerobe Schwelle													
	II	Aerob-anaerob Übergangsber.		Mittlere Ausdauer	Intensive aerobic	Heavy endurance	A3	Aerobic development				BZ 3	GLA I intens.
Anaerobe Schwelle					Intensive Ausdauer	Threshold Training							
	III	anaerob	Stehvermögen	Stehvermögen		Very heavy	2	Anaerobic threshold	anaerobic race pace	En2	Threshold endurance	BZ 4	GLA II
					3		High perform. endurance	En3		Overload endurance			
CS													
	IV	anaerob	Supra-maximaler Bereich	Supra-maximaler Bereich		Severe exercise	4	Lactate tolerance	anaerobic race pace	Sp1	Lactate tolerance	BZ 5	GLA II intensiv
					4		Peak lactate			Race pace	BZ 6	Wettkampfausdauer	
					4		Lactate production	Sp2		Lactate production	BZ 7	Schnelligkeitsausdauer	
VO _{2max}					VO _{2max} -Training								
				Anaerobic	Extreme exercise	5	High velocity overloads	sprint	Sp3	Power training	BZ 8	Schnelligkeit	

Tabelle 12: Übersichtstabelle zu den verwendeten Begriffen bezüglich der Einteilung von physiologischen Schwellen und Belastungszonen.

Eine erste grobe Übersicht über die Belastungszonen gibt die Fachgruppe Ausdauer der Swiss Olympic (Vogt et al., 2005). Sie schlägt eine sportartunabhängige Klassifizierung von Trainingsintensitätszonen anhand der physiologischen Schwellen vor. Dies hat den Vorteil, dass die Trainingszonen direkt von der Ausdauerdiagnostik ableitbar sind. Die beiden oben beschriebenen "Knickpunkte" der LLK trennen die Zonen voneinander ab. Den aeroben Bereich unterhalb der aeroben Schwelle bezeichnen sie als Zone I oder „Grundlagenausdauerbereich“. Zwischen aerober und anaerober Schwelle befindet sich die Zone II, der „aerob-anaerobe Übergang“, den anaeroben Bereich oberhalb der anaeroben Schwelle unterteilen sie noch einmal in Zone III „Stehvermögen“ und Zone IV, den „supramaximalen Bereich“. Die Zone I zeichnet sich durch eine vorherrschend aerobe Energiebereitstellung aus, in der es zu keinem messbaren Anstieg der Laktatkonzentration kommt. In der Zone II steigt die Laktatkonzentration zwar zunächst an, pendelt sich aber auf einem Steady-State ein. Der Kohlenhydratstoffwechsel spielt eine zunehmend wichtigere Rolle. In Zone III kommt es zu einem überproportionalen Anstieg der Laktatkonzentration mit einer zunehmenden Übersäuerung. Die Belastung muss über kurz oder lang abgebrochen werden. Die Intensität aus dem supramaximalen Bereich kann nur über wenige Sekunden oder Minuten aufrechterhalten werden. Für die Ausdauersportarten empfehlen die Autoren eine weitere Unterteilung in sportpraktische Trainingsbereiche. Der Grundlagenausdauerbereich wird zusätzlich in „aktive Regeneration“ und „extensive Ausdauer“ untergliedert. Außerdem wird die Klassifizierung um das intensive Ausdauertraining im Bereich der anaeroben Schwelle ergänzt.

Bourdon (2000) unterteilt in seiner ebenfalls sportartübergreifenden Betrachtung insgesamt sechs Trainingszonen:

Das Training unterhalb der aeroben Schwelle bei unter 2,0 mmol/l Laktat und unter 75 % der HF_{max} wird als „recovery“ oder wenig intensives aerobes Training bezeichnet. Zwischen der aeroben und der anaeroben Schwelle unterteilt der Autor in extensives (1,0–3,0 mmol/l und 75–84 % der HF_{max}) und intensives (1,5–4,0 mmol/l und 82–89 % der HF_{max}) aerobes Training. Training an der anaeroben Schwelle ist die nächste Kategorie mit Laktatwerten von 2,5–5,5 mmol und 89–93 % der HF_{max} . Oberhalb der anaeroben Schwelle unterscheidet er den Bereich „ VO_{2max} “

mit Laktatwerten von über 5 mmol/l und über 92 % der Hf_{max} und das anerobe Training in der maximalen Intensitätsstufe.

Eine andere Trennung innerhalb der intensiven Belastungszone verwenden Smith und Jones (2001) mit der kritische Leistung W_{crit} . Sie fanden im Rahmen von Laufbanduntersuchungen heraus, dass das MLSS nicht anhand der W_{crit} abgeschätzt werden kann, da hohe Abweichungen individueller Differenzen vom Mittelwert vorliegen. Daher definieren sie die „heavy domain“ als Zone in der das Laktatniveau zwar über Ruhewerte, aber während der Belastung nicht weiter ansteigt. Sie liegt über der aeroben Schwelle aber unter der W_{crit} . Die Autoren untergliedern die mittleren Zonen weder durch das MLSS noch mittels der anaeroben Schwelle. In der „very heavy domain“, oberhalb der W_{crit} , aber unterhalb der VO_{2max} , erreichen weder VO_2 noch Laktat ein Steady-State, sondern steigen während der Belastung kontinuierlich an.

Kindermann (2004) untergliedert die Trainingszonen ebenfalls anhand der LLK und definiert die Grenzen in prozentualem Anteil an der anaeroben Schwelle:

Der regenerative Trainingsbereich wird nach oben von der aeroben Schwelle begrenzt, darüber folgt das extensive Ausdauertraining GA I im Bereich von 70–90 % der anaeroben Schwelle. Intensives Ausdauertraining GA II liegt im Bereich von 90–100 % der anaeroben Schwelle, bei Laktatwerten von 3–5 mmol/l. Oberhalb der anaeroben Schwelle finden intensive Intervallprogramme statt.

Für den Schwimmsport leiten Dekerle und Pelayo (2011) aus der LLK „Swimming speed domains“ ab. In Abbildung 19 ist die Beziehung zwischen Schwellen und Trainingszonen grafisch dargestellt. Die niedrigste technisch noch sauber zu meisternde Schwimmgeschwindigkeit ist die „moderate exercise domain“ (Bildteil [A]). In dieser Geschwindigkeitsstufe pendeln sich sowohl La^- wie auch VO_2 auf einem stabilen Niveau ein. Zwischen der aeroben Schwelle (LT) und dem MLSS befindet sich die „heavy exercise domain“ (Bildteil [B]). Hier erreicht das La^- ein Steady-State, die VO_2 steigt an. Oberhalb des MLSS schließt sich die „very heavy exercise domain“ (Bildteil [C]) an und reicht bis zur CS. In diesem Trainingsbereich steigen sowohl La^- wie auch VO_2 während der Trainingsserie stetig an. Im Anschluss folgt die „severe exercise domain“ (Bildteil [D]) in der die VO_{2max} erreicht wird. Die

Intensitäten in der „extreme exercise domain“ (Bildteil [E]) sind so hoch, dass die Erschöpfung eintritt, bevor die VO_{2max} erreicht wird.

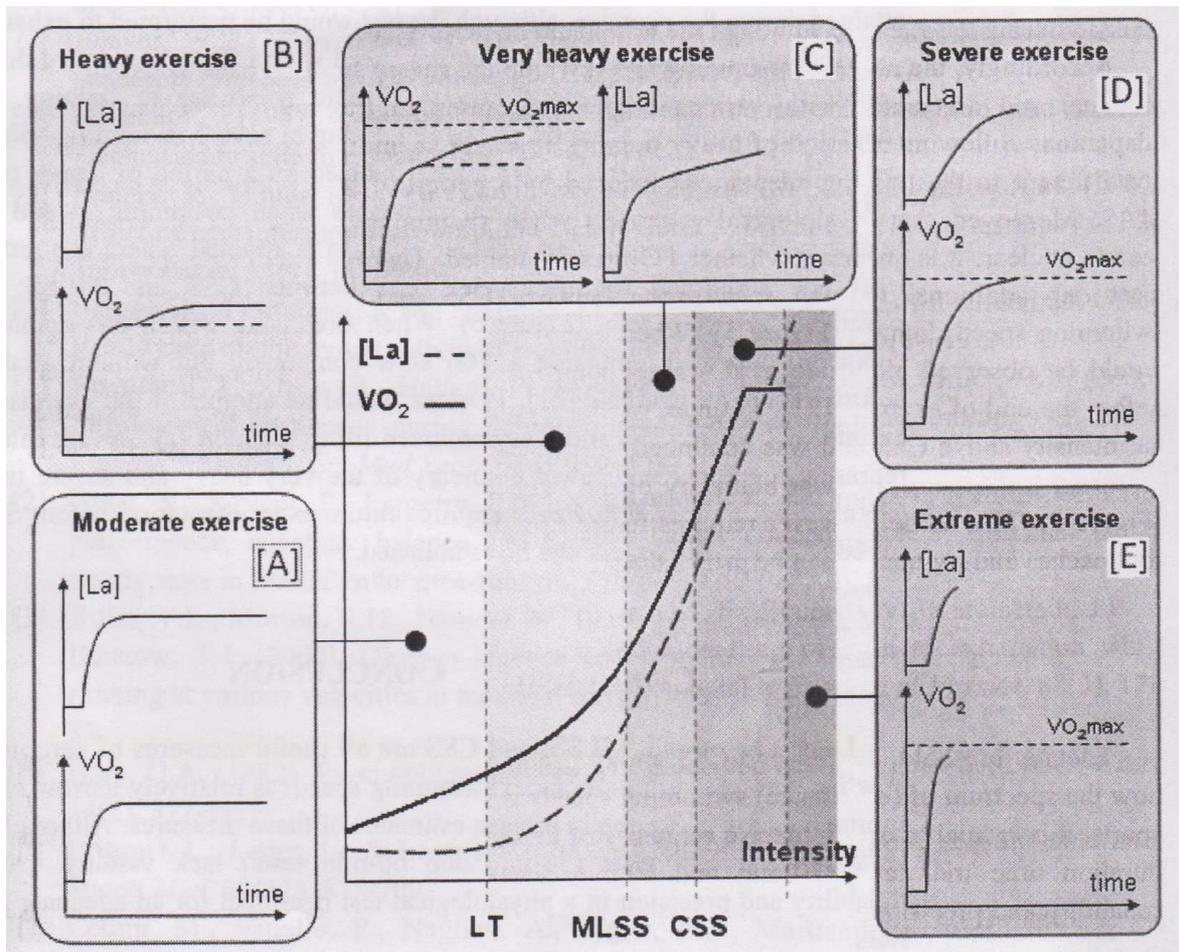


Abbildung 19: Beziehung zwischen den Schwellen der LLK und den Trainingszonen. Im mittleren Bereich Veränderung der La^- -Konzentration und der VO_2 während eines Stufentests im Schwimmen mit den Schwellen. Außen herum die einzelnen Trainingszonen mit Darstellung des La^- und VO_2 -Verhaltens. Quelle: Dekerle und Pelayo (2011, S. 291)

Espada et al. (2015) definieren die Belastungszonen anhand der ventilatorischen Schwellen und kommen zu einer ähnlichen Einteilung:

- Moderate-intensity exercise: schneller Anstieg der VO_2 auf ein Steady-State;
- Heavy exercise: langsamer Anstieg der VO_2 und ein verzögertes Steady-State;
- Severe exercise: Erreichen der VO_{2max} ;
- Extreme exercise: Ermüdung vor Erreichen der VO_{2max} .

In ihrer Untersuchung konnten sie zeigen, dass die VT2 an der gleichen Stelle wie das MLSS liegt und diese Geschwindigkeit der mittleren 300-m-Geschwindigkeit aus einem 400-m-Test entspricht (siehe Kapitel 2.3.7. „Weitere Testmethoden“).

Greco et al. (2013) kommen zu ähnlichen Ergebnissen, unterteilen aber nur in drei Zonen:

- „light and moderate“ bis zur aeroben Schwelle, die $\dot{V}O_2$ -Werte steigen nicht signifikant über die Ruhewerte;
- „heavy endurance“ bis zum MLSS;
- „severe exercise“ oberhalb des MLSS bis zur $\dot{V}O_{2max}$.

Für die praktische Anwendung der Belastungsbereiche haben mehrere internationale Experten aus dem Schwimmsport (Maglischo, 2003; Sweetenham & Atkinson, 2003; Wilke & Madsen, 2015), die auch als Trainer praktizieren, Einteilungen zu Trainings- oder Belastungszonen mit Angaben zu den jeweiligen Belastungsnormativa vorgeschlagen.

Die Angaben zur Trainingsintensität erfolgen in verschiedenen Formen:

Die Intensitätsangabe mithilfe der Herzfrequenz kann entweder direkt in Schlägen / min (bpm: beats per minute) oder besser in Anzahl der Schläge unterhalb der persönlichen Hf_{max} angegeben werden. Bei unterschiedlichen Hf_{max} einzelner Schwimmer verschieben sich die Trainingszonen zum Teil beträchtlich. Die Intensität in Form einer erwarteten Schwimmzeit wird entweder als prozentualer Anteil der Wettkampf- (WK)-Bestzeit oder als Berechnung aus der durchschnittlichen 100-m- Trainingszeit (100m TZ) angegeben. Die Bestzeit über 200 m geteilt durch 2 ergibt die 100m TZ. Eine Intensitätsangabe in Form von angestrebten Laktatwerten erfolgt in mmol/l oder als Angabe oberhalb oder unterhalb der IAnS. Auch eine Beschreibung in Form des Anstrengungsgrades Rating of perceived exertion (RPE) anhand der Borg-Skala (zwischen 6 und 20) ist möglich.

Trotz gewisser Unterschiede in einzelnen Belastungsparametern finden sich auch in diesem Bereich weltweit übereinstimmend sechs verschiedene Trainingsbereiche, die an gewisse Kriterien gebunden sind. Im maximalen Intensitätsbereich wird aber im Gegensatz zu der Unterteilung anhand der $\dot{V}O_{2max}$ nicht von der „extrem exercise“ mit maximaler physiologischer Beanspruchung gesprochen, sondern hier wird der

Sprintbereich beschrieben. Genaugenommen gehört diese Kategorie nicht zum Ausdauertraining, aber als Belastungsform ist sie im Wasser als fließender Übergang zum Schnelligkeitsausdauerbereich zu finden und wird von mehreren Autoren aufgeführt (Maglischo, 2003; Sweetenham & Atkinson, 2003; Wilke & Madsen, 2015). Die folgenden Angaben im Text zu den einzelnen Zonen sind von mehreren Autoren gemittelt. Exakte Angaben zu den einzelnen Autoren finden sich in der Tabelle 13.

2.3.6.1. Zone: Erholung, Kompensation, recovery

Alles was in der Praxis als „Lockerschwimmen“ bezeichnet wird, fällt in diesen Bereich. In erster Linie dient das Lockerschwimmen dem Laktatabbau nach intensiven anaeroben Belastungen. Der Umfang kann lediglich wenige Meter betragen oder bis zu mehrere tausend Meter.

Umfang: 50–1500 m, bis 30 min;
Pause: keine oder sehr kurz;
Intensität: Hf: < 120 bpm, Hf_{max} - (70–50),
75 % BZ, 100m TZ + 20 s,
Borg: 7–12.

2.3.6.2. Zone Grundlagenausdauer I, aerobic, basic endurance, light moderate, heavy endurance

In dieser Trainingszone wird mit Intensitäten unterhalb der aeroben Schwelle geschwommen, es kommt zu keiner Laktatanhäufung im Körper.

Umfang: 1000–4000 m, > 60 min;
Dauer: 800–2000 m; > 6 min;
Pause: 10–60 s;
Intensität: Hf: 120–150 bpm, Hf_{max} - (50–40),
70–85 % BZ, 100m TZ + (15–20) s,
Laktat: 2–3 mmol/l,
Borg: 12–14.

2.3.6.3. Zone intensive Grundlagenausdauer I, heavy endurance

In dieser Trainingszone wird mit Intensitäten zwischen der aeroben und der anaeroben Schwelle geschwommen, Laktat kann im Steady-State gehalten werden.

Ein Training in dieser Zone ist besonders geeignet um das MLSS zu verbessern (Wilke & Madsen, 2015).

Umfang: 1000–4000 m, > 60 min;
Dauer: 100–400 m;
Pause: 10–60 s;
Intensität: intensiv: Hf: 140–180 bpm, $Hf_{max} - (40-30)$,
75–85 % BZ, 100m TZ + (10–15) s,
Laktat: 3–4 mmol/l.

2.3.6.4. Zone anaerobe Grundlagenausdauer II, overload / high performance endurance, very heavy domain

Das Training in dieser Zone findet nahe an oder oberhalb der IAnS statt, die Laktatkonzentration im Körper steigt während der Trainingsserie an. Eine hohe Schwimmgeschwindigkeit, die nur für die Dauer der Trainingsserie durchgehalten werden kann, wird umgesetzt.

Die Schwimmgeschwindigkeit ist nahe der Critical Speed. Sie ist laut Sweetenham und Atkinson (2003) die Geschwindigkeit bei der im Stufentest das erste Mal die Hf_{max} bzw. die VO_{2max} erreicht wird. Ein Technikverlust ist ein Zeichen dafür, dass der Schwimmer oberhalb des geforderten Levels trainiert.

Umfang: 500–2000 m, 20–45 min;
Dauer: 400–2000 m;
Pause: 30 s bis 2 min;
Intensität: Hf: 150–180 bpm, $Hf_{max} - (10-30)$,
85 % BZ, 100m TZ + (7–10) s,
Laktat: 4–6 mmol/l,
Borg: 10–20.

2.3.6.5. Zone race pace, Training nahe der WK-Geschwindigkeit, severe exercise

In dieser Zone wird intensiv mit Wettkampfgeschwindigkeit und hoher Laktatproduktion trainiert. Die Streckenlänge hängt von der WK-Distanz ab.

Umfang: 300–1500 m, 10–30 min;
Dauer: 50–200 m, WK-Distanz gebrochen;
Pause: 5–20 s; Serienpause vollständig, mehrere min;
Intensität: Hf: 170–200 bpm, Hf_{max} - (0–20),
WK-Geschwindigkeit,
Laktat: > 7 mmol/l.

2.3.6.6. *Zone Sprint*

Mit maximaler Schwimmggeschwindigkeit werden Unterdistanzstrecken zurückgelegt, die Geschwindigkeit ist also höher als die Wettkampfgeschwindigkeit.

Umfang: bis 15 min;
Dauer: 15–25 m, Unterdistanz;
Pause: vollständig, mehrere min;
Intensität: Hf und Laktat sind unerheblich,
maximale Schwimmggeschwindigkeit.

Bourdon 2000		Sweetenham 2003			Maglischo 2003			Wikle & Madsen 2015			Laktat	
Bezeichnung	Intensitäten	Zone	Bezeichnung		Belastungsnormativa	Zone	Bezeichnung	Belastungsnormativa	Zone	Bezeichnung	Belastungsnormativa	
Recovery	l: < 75% Hfmax, < 2,0 mmol/l, Borg: easy	A1	recovery work, low intensity		U: 200–1500m D: 200–1500m P: 5–20s l: Hfmax - 70–50, 100mTZ +20s		recovery	U: mind. 10–20min D: beliebig P: keine oder kurz l: Hf 90–120 bpm, Borg 7–12	BZ 1	Kompensation	U: 5–30 min D: bis 800 P: keine l: < 75% BZ, Hf < 120, Hfmax - 20–70	Laktatabbau
Extensive aerobic	l: 75-84 % Hfmax, 1,0-3,0 mmol/l, Borg: comfortable	A2	aerobic maintains	aerobic	U: 200–1500m D: 200–1500m P: 10–20s l: Hfmax - 50–40, 100mTZ +15 bis 20s	En1	basic endurance	U: 1000–2000m, ca. 30min D: > 6 min P: 5–10 s bis 1 min l: > IAS, 1–3 mmol/l (Threshold training pace - 2–6s /100m) Hf 120–150 bpm, Hfmax - (30–60), Borg	BZ 2	Grundlagenausdauer I extensiv	U: > 60 min D: 800–4000 P: 10–60 s l: 70–85% BZ, Hf 120–160, Hfmax- 40–50, 2–3 mmol/l	< 2 mmol/l
Intensive aerobic	l: 82-89 % Hfmax, 1,5-4,0 mmol/l, Borg: uncomfortable	A3	aerobic development		U: 50–400m D: 50–400m P: 10–20s l: Hfmax - 40–30, 100mTZ + 10 bis 15s				BZ 3	Grundlagenausdauer I intens.	U: 30–60 min D: 200– P: 10–20s bis 1 min l: 75–80 % BZ, Hf 140–180, Hfmax - 30–40, 2,5–4 mmol/l	2–4 mmol/l
Threshold	l: 89-93 % Hfmax, 2,5-5,5 mmol/l, Borg: stressful	2	anaerobic threshold,		U: 50–400m D: 50–400m P: 10–20s l: Hfmax - 30–20, 100mTZ +7 bis 10s	En2	threshold endurance	U: 500–4000m D: > 2 min P: 5–10s bis 1 min l: 3–5 mmol, Hfmax - 10–20, Borg 15–16	BZ 4	Grundlagenausdauer II	U: 20–45 min D: 1000 P: 30–60s l: 85 % BZ, 4–6 mmol/l, Hf 150–180, Hfmax – 20–30	3–6 mmol/l
		3	high perform. endurance, crit. speed, lactate removal		U: 30min D: 50–400m P: Bel : Pause = 1,5 : 1 l: Hfmax - 10 bis 20, 100mTZ + 7 bis 10s	En3	overload endurance	U: 500–2000m D: bis 2000m P: 5–30s bis zu 2 min l: >IAS –(1–2s / 100m), Hfmax, Borg 18–20				
VO2max	l: > 92 % Hfmax, > 5,0 mmol/l, Borg: very stressful	4	lactate tolerance	anaerobic race pace	U: 50–200m, 3–8x100 D: 50–200m P: 2–5 min l: WK-Geschwindigkeit	Sp1	lactate tolerance	U: 300–1200m D: 100–200m P: 3–10min, 15s–2min l: >IAS	BZ 5	Grundlagenausdauer II intensiv	U: 10–30 min D: 800m gebrochen P: 1–8 min l: 85–95 % BZ, Hf 170–200, Hfmax- 10–20, > 6 mmol/l	6–10 mmol/l
		4	peak lactate		U: 100–400m, 3x4x50m, 4x100m P: 15 min		race pace	U: 200–1500m D: beliebig, 1/4 – 1/16 der WK–Strecke P: 10–30s bis 1min	BZ 6	Wettkampfausdauer	U: 3–15 min D: 50–200 gebrochen P: 10–20 s l: 100% vmax, Hfmax, > 8mmol/l	10–20 mmol/l
anaerobic	l: Hfmax, > 7,0 mmol/l, Borg: maximal	4	lactate production		U: 50–100m D: 50–100m P: l: WK-Geschwindigkeit	Sp2	lactate production	U: 300–600m D: 25–50m P: 1–3 (5) min l: nahe maximal	BZ 7	Schnelligkeitsausdauer	U: 10–20 min D: 25–200m P: 1–3 min l: 100–105 % v max Unterdist, Hf > 180, Hfmax - 0–10, > 7 mmol/l	10–20 mmol/l
		5	high velocity overloads	sprint	U: 12 Wdhl. D: 10–25m P: vollständig ausreichend l: max v	Sp3	power training	U: 50–300m, 3–6 Sätze D: 10–15m, 4–12 Wdhl. P: 45s–2min, 2–3min Serienpause l: maximale v	BZ 8	Schnelligkeit	U: bis 15 min D: 15–25 m P: bis 4 min l: 105–110 % vmax, bis 8 mmol/l	alaktazid, bis 5mmol/l

Tabelle 13: Übersicht zu den Trainingszonen im Schwimmen mit Angabe der Belastungsnormativa.

2.3.7. Weitere Testmethoden

2.3.7.1. *Test zur Bestimmung des MLSS nach Beneke (2003)*

Vor den eigentlichen Messungen zur Bestimmung des MLSS muss zunächst ein ansteigender Stufentest über 5–8 Stufen mit jeweils 3 min Belastungsdauer durchgeführt werden, um eine grobe Bestimmung der Belastungsintensität zu ermöglichen.

Der erste Dauertest über 30 min beginnt mit einer Intensität, die der Geschwindigkeit bei 3 mmol/l aus dem Stufentest entspricht. Alle 5 min misst der Testleiter die Laktatkonzentration. Im Normalfall stellt sich während der Belastung nach ca. 10 min ein Laktat-Steady-State ein. Ist dies der Fall, folgt an einem nächsten Tag ein weiterer Dauertest über 30 min mit einer 3–10 prozentigen Steigerung der Intensität. Die Intensität wird in den darauffolgenden Sitzungen so lange gesteigert, bis es zu einem Anstieg der Laktatkonzentration um mehr als 1 mmol/l in den letzten 20 min der Belastung kommt oder der Test aufgrund von Erschöpfung abgebrochen werden muss. Das MLSS ist die Geschwindigkeit, die gerade noch ohne La⁻-Anstieg durchgehalten werden konnte.

2.3.7.2. *60-min-Test*

Im Laufen und Radfahren wird das MLSS anhand eines 60-min-Tests abgeschätzt. Es wird vermutet, dass dies auch im Schwimmen möglich ist, allerdings ist die Validität und Reliabilität noch nicht nachgewiesen (Dekerle & Pelayo, 2011).

2.3.7.3. *3000-m-Test nach Olbrecht et al. (1985)*

Bei einer gleichmäßigen Schwimmgeschwindigkeit mit maximaler Anstrengung zeigt der Test die Energiebereitstellungsform und Laktatwerte an der 4-mmol-Schwellen (Olbrecht et al., 1985) oder an der individuellen anaeroben Schwelle an (Maglischo, 2003; Sweetenham & Atkinson, 2003). Der Test belegt die Veränderungen der aeroben Kapazität, weil die Energiebereitstellung vorwiegend aerob ist.

2.3.7.4. *2000-m-Test oder 30-min-Test*

Aus der kürzeren Form der oben genannten Tests können ebenfalls Aussagen zur aeroben Kapazität abgeleitet werden (Maglischo, 2003). Die Durchschnittsgeschwindigkeit liegt nur geringfügig über der des 3000-m-Tests (Maglischo, 2003) und überschätzt die Schwellengeschwindigkeit etwas. Laut Dekerle (2006)

entspricht die Geschwindigkeit, die beim 2000-m-Test (oder 30-min-Test) geschwommen werden kann, der CS.

2.3.7.5. 400-m-Test

Die erreichte Durchschnittsgeschwindigkeit ist ca. 3–4 s pro 100 m schneller als die CS (Sweetenham & Atkinson, 2003).

Espada et al. (2015) und Dekerle et al. (2005) definieren die MAV als Geschwindigkeit auf den mittleren 300 m (50–350 m) aus einem maximalen 400-m-Test und kommen zu dem Ergebnis, dass diese der Geschwindigkeit an der VO_{2max} entspricht, aber höher als das MLSS liegt.

2.3.7.6. 3 × 200 m snapshot test nach Sweetenham und Atkinson (2003)

Diese Kurzform eines Stufentests entspricht der 3., 4. und 5. Belastungsstufe aus dem 7 × 200 m Test. Sie dient der zusätzlichen und einfachen Überprüfung im Training. Mit sehr viel geringerem Aufwand (keine Laktatmessung, nur Hf-Messung) kann der Trainer den aktuellen Leistungsstand seines Athleten einstufen und evtl. Korrekturen in der Trainingsplanung vornehmen.

2.3.7.7. 2-Stufen-Test nach Olbrecht et al. (1985)

Bei diesem Test müssen zwei Stufen über 400 m Freistil mit einer Intensität von zuerst 85–90 % und dann 100 % der maximalen Leistung geschwommen werden. Dazwischen hat der Schwimmer 20 min Pause. Am Ende jedes Durchgangs werden in der 1., 3., 5. und 7. min Laktatkonzentrationen gemessen. Mittels einer linearen Geraden werden beide Messpunkte verbunden und die 4-mmol-Schwelle abgelesen. Je enger die beiden Geschwindigkeiten beieinanderliegen, desto genauer ist der Schätzwert, allerdings muss unbedingt ein Wert unter- und der andere Wert oberhalb der Schwelle liegen. Die Reliabilität dieses Tests wurde nie überprüft (Dekerle & Pelayo, 2011).

2.3.7.8. Cooper-Test im Wasser

Wie beim geläufigen Cooper-Test an Land sollen im Wasser in 12 min so viele Meter wie möglich zurückgelegt werden.

Die Testdurchführung ist sehr einfach, lässt sich ohne großen Materialaufwand durchführen und ist daher besonders für die Anwendung im Schulsportbereich

geeignet. In manchen Bundesländern ist der Cooper-Test Teil der Abiturprüfung im Schwimmen (Schmid & Mahnke, 2016).

2.3.7.9. Conconi-Test im Wasser

Der Conconi-Test, der als Feldtest für das Laufen entwickelt wurde, dient der Bestimmung der aeroben Schwelle. Der Test eignet sich zwar zur Steuerung der Belastungsintensität von Intervall- und Dauertrainingsprogrammen im Schwimmen, ist aber von der Genauigkeit dem Laktattest deutlich unterlegen. Der geringe Aufwand (ohne Blutabnahme) spricht für den Einsatz im Freizeitbereich (Bredel, 1991) und evtl. auch für den Freiwasserbereich.

2.3.7.10. Endurance Test-Sets

Sweetenham und Atkinson (2003) schlagen eine ganze Testbatterie vor, die über mehrere Wochen verteilt geschwommen wird: 40 × 100-m-Test, 30 × 100-m-Test, 24 × 100-m-Test, 18 × 100-m-Test, 2000- oder 3000-m-Test.

Auch Maglischo (2003) empfiehlt eine Testfolge von 4 × (15 × 200 m) mit einem Startabstand von 2:30 min über mehrere Wochen verteilt vor.

Es gibt demnach eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Ausdauerleistungsfähigkeit von Schwimmern zu bestimmen, von denen manche höheren wissenschaftlichen Ansprüchen genügen, andere dagegen im trainingspraktischen Alltag unkomplizierter einsetzbar sind. Welche Testmethode ausgewählt wird, hängt von der Fragestellung und der Umsetzbarkeit ab.

2.4. Fragestellung der Dissertation

Auf Grundlage der verschiedenen Möglichkeiten, die Ausdauerleistungsfähigkeit im Schwimmen zu bestimmen und der außergewöhnlich umfangreichen Datenlage aus dem standardisierten Ausdauer-test im DSV, soll in der vorliegenden Arbeit zwei zentralen Überlegungen nachgegangen werden: Zum einen soll die langfristige Entwicklung von Ausdauerparametern bei deutschen Schwimmern untersucht werden und zum anderen sollen verschiedenen Bestimmungsmethoden verglichen und auf ihre Validität überprüft werden.

Bezugnehmend auf die Vorwürfe, die deutschen Schwimmer würden immer mehr den Anschluss zur Weltspitze verlieren, und den beiden konträren Standpunkten unter den Schwimmexperten, soll zunächst die Frage geklärt werden, ob sich die Ausdauerleistungsfähigkeit der deutschen Schwimmer im langfristigen Vergleich in ihrem Niveau, über mehrere Jahrzehnte hinweg betrachtet, wirklich regressiv verhält bzw. stagniert. Dazu werden die Ergebnisse des etablierten Ausdauer-tests von drei Kohorten an deutschen Kaderathleten über mehrere Jahrzehnte verglichen.

Die disziplinspezifische Auswertung des Stufentests lässt Rückschlüsse auf unterschiedliche Leistungsvoraussetzungen zu. Anhand der aktuellen Kadermitglieder wird ein geschlechtsspezifischer Vergleich der Leistungsvoraussetzungen vorgenommen. Aus den bisherigen Erfahrungen und den physiologischen Grundlagen wird erwartet, dass Männer höhere maximale Laktatwerte erreichen als Frauen und Frauen eine höhere Grundlagenausdauer als Männer haben.

Für einen Vergleich der streckenspezifischen Leistungsvoraussetzungen liegen in den Schwimmlagen Brust und Rücken nur Testergebnisse der Distanzen über 100 und 200 m vor. In Freistil dient zusätzlich die 400-m-Distanz für den Vergleich zwischen Kurz-, Mittel- und Langstreckenschwimmern. Die allgemein bekannten trainingswissenschaftlichen Erkenntnisse lassen vermuten, dass Sprinter eine geringere Grundlagenausdauer als Mittel- und Langstreckenschwimmer aufweisen, im Gegensatz dazu aber höhere maximale Laktatwerte erreichen.

Im zweiten Teil der Studie soll geklärt werden, ob die Anwendung verschiedener Schwellenkonzepte im Stufentest zu übereinstimmenden Ergebnissen führt. Dazu werden verschiedene Bestimmungsmethoden der Dauerleistungsgrenze im Schwimmen auf ihre Validität überprüft. Vier verschiedene Berechnungsmethoden der anaeroben Laktatschwelle werden untereinander verglichen. Grundsätzlich muss davon ausgegangen werden, dass sich die vier ausgewählten Bestimmungsmethoden zur Ermittlung der anaeroben Schwelle im Stufentest nicht unterscheiden.

Als alternative Methode zur Bestimmung der Ausdauerleistungsfähigkeit wird das Modell der CS überprüft. Obwohl verschiedene Berechnungsformen existieren, basieren alle auf dem gleichen mathematischen Modell, daher ist zu erwarten, dass die verschiedenen Berechnungsarten der CS das gleiche Ergebnis ergeben.

In einer separaten Untersuchung wird eine Kategorie der CS im Dauertest auf Validität überprüft. Laut der zugrundeliegenden Theorien müsste die CS₁₀₀₋₄₀₀ im Dauertest über mindestens 1500 m durchgehalten werden können.

Die Ermittlung der Dauerbelastungsgrenze anhand der CS wird mit den aus dem Stufentest berechneten Schwellengeschwindigkeiten verglichen. Beide Grenzgengeschwindigkeiten dürften sich nicht unterscheiden.

Anschließend soll die ermittelte Schwellengeschwindigkeit aus den Stufentests im Dauertest validiert werden. Die ermittelte mittlere Geschwindigkeit sollte über 1500 m aufrechterhalten werden können.

3. Entwicklung der Ausdauerleistungsfähigkeit deutscher Spitzenschwimmer über drei Jahrzehnte

Bezugnehmend auf die Diskussionen, die Deutschen Schwimmer hätten eine schlechtere Grundlagenausdauer als in früheren Jahren, soll anhand einer Längsschnittstudie analysiert werden, wie sich die Ausdauerleistungsfähigkeit der deutschen Spitzenschwimmer im Laufe der Jahre verändert hat. Die Testergebnisse eines standardisierten Ausdauertests von drei Stichprobenkohorten aus verschiedenen Jahrzehnten liefern die Grundlage für diese Auswertung.

Teile diese Studie wurden bereits als Beitrag in der Deutschen Zeitschrift für Sportmedizin (Hoffmann & Lames, 2017) veröffentlicht.

3.1. Problemstellung

Seit mehr als 40 Jahren ist ein standardisierter Test zur Bestimmung der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit der Athleten im DSV etabliert. Nach dem Zusammenführen der beiden Deutschen Schwimmverbände Ost und West im Jahr 1990, einigten sich die Verantwortlichen darauf, den Pansoldtest, der bereits vorher im Osten Standard war, in der zentral durchgeführten Leistungsdiagnostik systematisch einzusetzen. Jedes DSV-Kadermitglied muss den Test regelmäßig 1–2 Mal pro Jahr an einem der drei legitimierten OSP absolvieren. Die erhobenen Daten werden zentral in einer Datenbank des DSV gespeichert und vom Bundestrainerteam ausgewertet. Es liegt also eine enorme Menge an Ergebnissen vor, die aufgrund der standardisierten Erhebung gut vergleichbar sind.

Ziel dieser Untersuchung ist zum einen, die geschlechts- und distanzspezifischen Unterschiede der wichtigsten Kenngrößen der LLK zu bestimmen. Zum anderen sollen die aus über vier Jahrzehnten vorliegenden Testergebnisse mit den Ergebnissen der aktuellen Kaderathleten im Längsschnitt verglichen werden.

3.2. Ablauf Pansoldtest

Der Testablauf mit allen Vorgaben bezüglich der Vorbereitung auf den Test, der Testabwicklung, sowie der Auswertungsmethodik und den zugehörigen Kenngrößen wurde bereits im Kapitel 2.3.1.1. „Pansoldtest“ beschrieben. Die Durchführung

erfolgte für alle Schwimmer an einem vom DSV nach zentralen Vorgaben instruierten OSP. Sämtliche Messdaten wurden von wissenschaftlichen Angestellten der OSP erhoben. Daher ist von einer hohen Zuverlässigkeit der Testdurchführung auszugehen.

3.3. Datenerhebung und Stichprobe

Die langfristige Analyse der Ausdauerleistungsfähigkeit der deutschen Schwimmer erfolgt auf Basis dreier Erhebungszeiträume (EZ 1–3). Für den ersten Erhebungszeitraum (EZ 1) dienen die Ergebnisse der beiden Publikationen von Pansold (1985) und Pansold und Zinner (1994) als Grundlage. Sie haben mehr als 4000 Stufentests von insgesamt 308 Schwimmern des ehemaligen DSSV Kaders von vor 1984 ausgewertet und die wettkampfdisziplinbezogenen Mittelwerte der Probanden veröffentlicht. Für den zweiten Erhebungszeitraum (EZ 2) bildet die Publikation von Rudolph und Berbalk (2000) die Datenbasis, bei der die Mittelwerte und Standardabweichungen der Ergebnisse von 1000 Stufentests der damaligen Schwimmer des DSV Kaders (A–C) zwischen 1992 und 1997 ausgewertet wurden. Die Ergebnisse der KLD-Untersuchungen aus 523 Stufentests von über 100 Schwimmern des aktuellen Nationalkaders zwischen 2012 und 2015 bilden den dritten Erhebungszeitraum (EZ 3). Die anthropometrischen Daten dieser Schwimmer sind in Tabelle 14 abzulesen.

Tabelle 14: Anthropometrische Daten der Stichprobe aus EZ 3 mit Mittelwert und Standardabweichung

	n	Alter [Jahre]	Größe [cm]	Gewicht [kg]	BMI [kg/m ²]
männlich	193	21,0 ± 3,9	191,4 ± 4,7	86,0 ± 6,4	23,5 ± 1,5
weiblich	194	17,9 ± 4,1	176,6 ± 6,6	64,3 ± 6,4	20,6 ± 1,6

Von allen drei Zeiträumen liegen disziplin- und geschlechtsbezogene Mittelwerte mit Standardabweichungen vor. Die Testdurchführung war für den gesamten Zeitraum standardisiert. Bei allen Athleten handelt es sich um Kaderathleten mit Verbandsförderung. Die einzelnen Stichproben repräsentieren jeweils die Elite des DSV.

Da es im aktuellen Kader kaum Schwimmer gibt, die den Test über die Schmetterlingstrecken oder über 400 m Lagen absolvieren, fließen in die Längsschnittstudie nur 12 Disziplinen ein, jeweils 100 m und 200 m im Freistil (F)-, Rücken (R)- und Brustschwimmen (B), differenziert nach Geschlecht.

Trotz der hohen Standards bezüglich der Testdurchführung, muss sowohl der Testaufbau wie auch der Vergleich der Stichproben aus den verschiedenen Jahrzehnten kritisch betrachtet werden. Die problematischen Aspekte zum Testaufbau wurden bereits im Kapitel 2.3.1.1. „Pansoldtest“ dargelegt. Beim langfristigen Vergleich muss bedacht werden, dass die Leistungsfähigkeit durch Doping beeinflusst worden sein könnte. Anabole Steroide verursachen beispielsweise nicht nur ein verstärktes Muskelwachstum, sondern erhöhen auch die Toleranz gegenüber extremen Trainingsumfängen und beschleunigen die Erholungsdauer. Da aber solche Doping-Vermutungen in hohem Maße spekulativ sind und auch keine Belege für eine Anwendung von Doping in einem oder mehreren Zeiträumen vorliegen, können in diesem Rahmen nur die dokumentierten Ergebnisse betrachtet werden. Des Weiteren könnten die Körperproportionen die sportliche Leistung beeinflussen. Da für die beiden Erhebungszeiträume EZ 1 und EZ 2 leider keine anthropometrischen Daten vorliegen, kann dieser Einfluss im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Ein weiterer problematischer Punkt ist, dass manche Schwimmer mehrmals in die Untersuchung eingehen, da es sich um eine regelmäßig wiederholte Testdurchführung handelt. Dies verletzt die Annahme einer unabhängigen Stichprobe. Für die beiden ersten Erhebungszeiträume kann dies nicht mehr korrigiert werden. Daher wird für den dritten Erhebungszeitraum die gleiche Methodik angewendet.

Die Analyse der distanzspezifischen und geschlechtsspezifischen Leistungsvoraussetzungen erfolgt anhand der Stichprobe des EZ 3. Für die Ermittlung der streckenspezifischen Unterschiede wurden, je nach Schwimmlage, die im Wettkampfprogramm vertretenen Streckenlängen herangezogen. Nur in der Freistildisziplin konnte neben den 100- und 200-m-Strecken auch die 400-m-Distanz ausgewertet werden.

3.4. Statistik

Die Mittelwerte der disziplin- und geschlechtsspezifischen Kenngrößen aus EZ 3 wurden mit t-Tests statistisch auf Signifikanz geprüft. Die Unterschiede zwischen Kurz-, Mittel- und Langstreckenschwimmern in der Freistildisziplin wurde mit einer 3-faktoriellen ANOVA (Varianzanalyse) auf Signifikanz überprüft. Den kombinierten Einfluss von Geschlecht und Streckenlänge zeigt das Ergebnis einer 2-faktoriellen ANOVA.

Der Längsschnittvergleich der drei EZ erfolgte mittels einer 3-faktoriellen ANOVA mit Bonferroni-Korrektur. Aufgrund einer Varianzinhomogenität wurde die Games-Howell-Korrektur angewendet. Die Parameter $P_{4.0}$, P_{max} und Bestzeit sind erst ab EZ 2 aufgeführt. Für diese Parameter wurde der Vergleich zwischen EZ 2 und EZ 3 mittels t-Test auf Signifikanz geprüft. Die Beziehung der einzelnen Parameter zueinander verdeutlicht Pearson's Korrelations Koeffizient r_p .

Das Signifikanzniveau wurde für alle Analysen auf $p = 0,05$ festgelegt.

3.5. Ergebnisse

3.5.1. Vergleich der Geschlechter

Für den geschlechtsspezifischen Vergleich wurden die Ergebnisse der 100-m- und 200-m-Stufentests der EZ 3 an 193 Männern und 194 Frauen herangezogen. Die Kenngrößen der LLK zeigen folgende geschlechtsspezifische Unterschiede auf:

- Männer erreichen signifikant höhere L_{max} -Werte als Frauen:
Männer: $11,7 \pm 2,9$ mmol/l,
Frauen: $9,4 \pm 2,3$ mmol/l ($t_{385} = 8,3$, $p < 0,001$, Hedges $g = 0,59$).
- Männer haben signifikant niedrigere b_{LLK} -Werte als Frauen:
Männer: $7,18 \pm 1,99$,
Frauen: $9,54 \pm 3,65$ ($t_{385} = -7,9$, $p < 0,001$, Hedges $g = -0,62$).
- Männer haben signifikant niedrigere $P_{4.0}$ -Werte als Frauen:
Männer: $84,3 \pm 4,4$ %,
Frauen: $87,2 \pm 3,9$ % ($t_{385} = -6,8$, $p < 0,001$, Hedges $g = -0,74$).

3.5.2. Vergleich zwischen 100-m-, 200-m- und 400-m-Schwimmern

L_{max} -Werte

100-m-Schwimmer erreichen höhere L_{max} -Werte als 200-m-Schwimmer:

100 m Männer (n = 33):	13,2 ± 3,0 mmol/l,
200 m Männer (n = 160):	11,4 ± 2,8 mmol/l ($t_{191} = 3,3$, $p = 0,001$, Hedges $g = -0,48$),
100 m Frauen (n = 50):	10,4 ± 2,2 mmol/l,
200 m Frauen (n = 144):	9,0 ± 2,1 mmol/l ($t_{192} = 4,7$, $p < 0,001$, Hedges $g = 0,40$).

Die zweifaktorielle ANOVA für den Vergleich der Freistilstrecken zeigt einen signifikanten Einfluss der Streckenlänge ($F = 457$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,36$) und des Geschlechts ($F = 59$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,17$) auf die L_{max} -Werte. Der Faktor Geschlecht / Strecke zeigt keinen signifikanten Einfluss ($F = 2,6$, $p = 0,08$). Siehe Abb. 20.

100 m F Männer (n = 33):	13,9 ± 2,5 mmol/l,
200 m F Männer (n = 160):	11,1 ± 2,9 mmol/l,
400 m F Männer (n = 52):	7,6 ± 2,1 mmol/l ($F = 46,3$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,37$);:
100 m F Frauen (n = 50):	10,5 ± 2,2 mmol/l,
200 m F Frauen (n = 144):	8,6 ± 2,0 mmol/l,
400 m F Frauen (n = 38):	6,1 ± 1,9 mmol/l ($F = 41,1$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,38$).

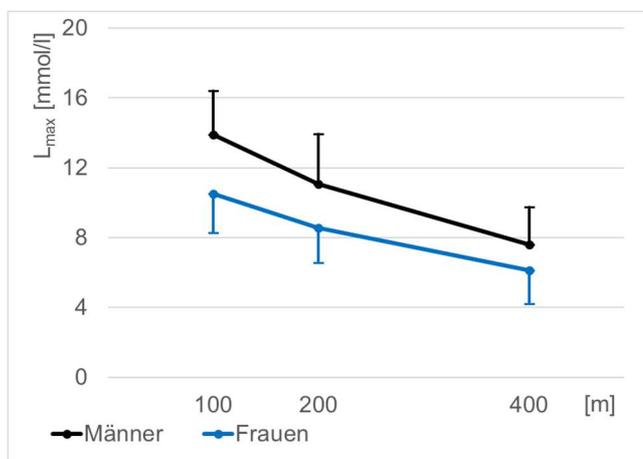


Abbildung 20: Strecken- und Geschlechtsspezifische Abhängigkeit der maximalen Laktatkonzentration L_{max} .

b_{LLK}-Werte

Für die 100-m-Distanzen werden signifikant niedrigere b_{LLK}-Werte als für die 200-m-Distanzen ermittelt:

100 m Männer (n = 33):	4,48 ± 1,04,
200 m Männer (n = 160):	7,75 ± 1,65
	(t ₁₉₁ = -14,6, p < 0,001, Hedges g = -0,90);
100 m Frauen (n = 50):	5,76 ± 1,58,
200 m Frauen (n = 144):	10,85 ± 3,22
	(t ₁₉₂ = -14,6, p < 0,001, Hedges g = -1,39).

Die zweifaktorielle ANOVA für den Vergleich der Freistilstrecken zeigt einen signifikanten Einfluss der Streckenlänge (F = 220, p < 0,001, $\eta^2 = 0,60$), des Geschlechts (F = 59, p < 0,001, $\eta^2 = 0,17$) und des Faktors Geschlecht / Strecke (F = 6,8, p = 0,001, $\eta^2 = 0,04$) auf die b_{LLK}-Werte. Siehe Abb. 21.

100 m F Männer (n = 33):	3,90 ± 1,00,
200 m F Männer (n = 160):	7,23 ± 1,34,
400 m F Männer (n = 52):	11,06 ± 2,84
	(F = 102,2, p < 0,001, $\eta^2 = 0,57$);
100 m F Frauen (n = 50):	4,93 ± 0,98,
200 m F Frauen (n = 144):	9,46 ± 2,79,
400 m F Frauen (n = 38):	15,06 ± 3,22
	(F = 130,8, p < 0,001, $\eta^2 = 0,66$).

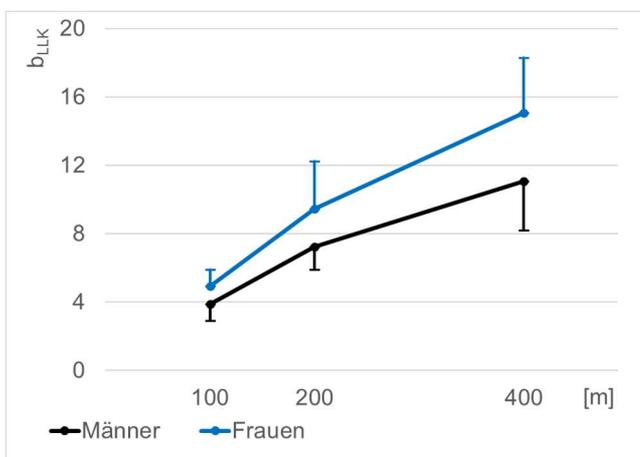


Abbildung 21: Strecken- und Geschlechtsspezifische Abhängigkeit von b_{LLK}.

P_{4,0}-Werte

100-m-Schwimmer erreichen signifikant niedrigere P_{4,0}-Werte als 200-m-Schwimmer:

100 m Männer (n = 33):	77,6 ± 3,1 %, (t ₁₉₁ = -13,5, p < 0,001, Hedges g = -2,08);
200 m Männer (n = 160):	85,6 ± 3,3 %
100 m Frauen (n = 50):	83,2 ± 3,6 %, (t ₁₉₂ = -9,4, p < 0,001, Hedges g = -1,45).
200 m Frauen (n = 144):	88,5 ± 2,9 %

Die zweifaktorielle ANOVA für den Vergleich der Freistilstrecken zeigt einen signifikanten Einfluss der Streckenlänge (F = 181, p < 0,001, $\eta^2 = 0,55$) und des Geschlechts (F = 91, p < 0,001, $\eta^2 = 0,24$) auf die b_{LLK}-Werte. Der kombinierte Faktor zeigt keinen signifikanten Einfluss (F = 2,6, p = 0,08). Siehe Abb. 22.

100 m F Männer (n = 33):	76,99 ± 3,59 %, (F = 89,5, p < 0,001, $\eta^2 = 0,53$);
200 m F Männer (n = 160):	85,57 ± 3,41 %
400 m F Männer (n = 52):	89,83 ± 3,12 %
100 m F Frauen (n = 50):	82,75 ± 3,44 %, (F = 100,7, p < 0,001, $\eta^2 = 0,55$).
200 m F Frauen (n = 144):	89,23 ± 2,94 %
400 m F Frauen (n = 38):	92,86 ± 2,61 %

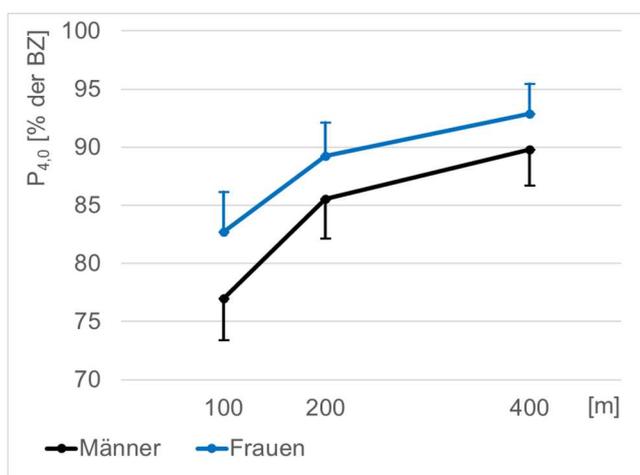


Abbildung 22: Strecken- und Geschlechtsspezifische Abhängigkeit von P_{4,0}.

3.5.3. Verhältnis der Parameter zueinander

Die Abbildungen 23 und 24 verdeutlichen das Verhältnis der einzelnen Kenngrößen zueinander: Zwischen $P_{4,0}$ und L_{max} besteht ein negativer linearer Zusammenhang mit $r_p(502) = -0,56$, $p < 0,001$, d.h. je höher die aerobe Kapazität, desto niedriger sind die maximal erreichten Laktatwerte. Hingegen besteht zwischen $P_{4,0}$ und b_{LLK} ein positiver exponentieller Zusammenhang. Da b_{LLK} in der Funktion im Exponenten steht, werden die Werte transformiert. Zwischen $P_{4,0}$ und $\ln(b_{LLK})$ besteht ein positiver linearer Zusammenhang mit $r_p(494) = 0,75$, $p < 0,001$: je höher die aerobe Kapazität, desto steiler der Anstieg der Kurve. Eine niedrigere Ausdauerleistungsfähigkeit geht also mit einem flacheren Kurvenverlauf und höheren maximalen Laktatwerten einher.

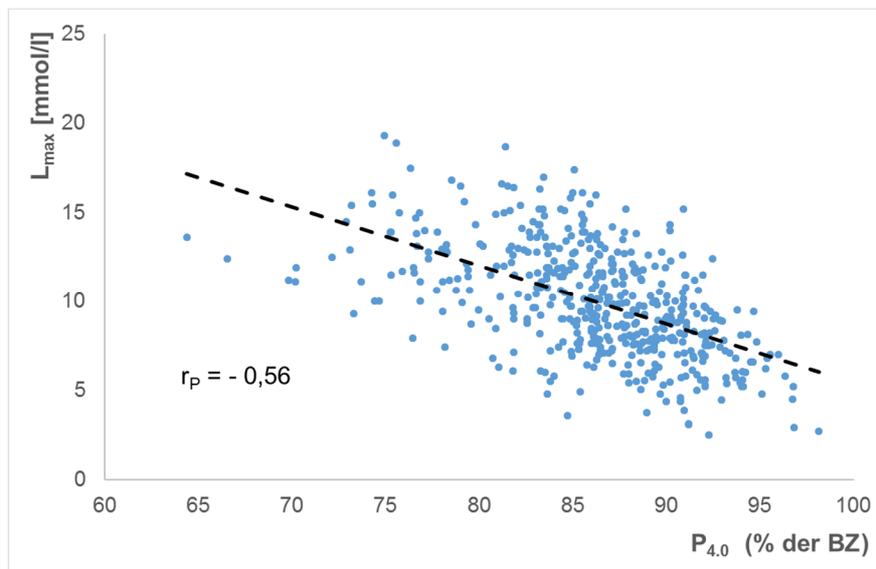


Abbildung 23: Das Verhältnis der Parameter L_{max} und $P_{4,0}$ zueinander.

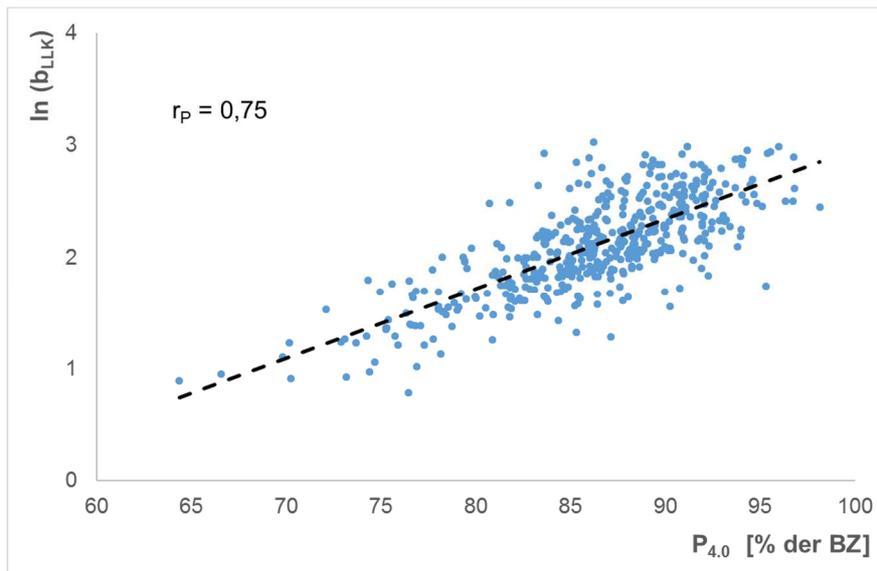


Abbildung 24: Das Verhältnis der Parameter b_{LLK} und $P_{4,0}$ zueinander.

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen den Parametern der LLK und der Wettkampfleistung zu finden, wurden für jeden Schwimmer die besten Wettkampfergebnisse innerhalb eines Monats vor bzw. nach der Leistungsdiagnostik herausgesucht. Bei Schwimmwettkämpfen werden die geschwommenen Zeiten anhand der FINA-Punktetabelle in Punktwerte umgerechnet. Diese Tabelle orientiert sich an den aktuellen Weltrekorden. Es konnte kein direkter Zusammenhang zwischen den Parametern der LLK und der Wettkampfleistung in Form von FINA-Punkten gefunden werden. Folgende Korrelationskoeffizienten wurden ermittelt:

Männer (n=252)	L_{max}	$r_p = 0,054$
	$P_{4,0}$	$r_p = -0,021$
	b_{LLK}	$r_p = 0,023$
Frauen (n=227)	L_{max}	$r_p = 0,096$
	$P_{4,0}$	$r_p = -0,019$
	b_{LLK}	$r_p = -0,037$

3.5.4. Leistungsentwicklung im Längsschnittvergleich

Beim Längsschnittvergleich über die drei Erhebungszeiträume zeigen sich einige deutliche Veränderungen der einzelnen Parameter der LLK. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich sowohl der untersuchte Zeitraum wie auch der

Stichprobenumfang maßgeblich unterscheiden. Der EZ 1 umfasst 12 Jahre, 2158 Stufentests konnten in diese Arbeit einbezogen werden. Im EZ 2 wurden Stufentests über 6 Jahre ausgewertet, 824 davon fließen in diese Untersuchung ein. Für den EZ 3 werden insgesamt 387 Tests aus 3 Jahren betrachtet.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Bestzeiten in den einzelnen Disziplinen liegen nur von den Kohorten EZ 2 und EZ 3 vor. Wie aus den deutschen Rekorden zu erwarten, wurden die Bestzeiten in allen Disziplinen von EZ 2 zu EZ 3 signifikant verbessert (siehe Tabelle 15). Nur bei 100 m R männlich konnte keine signifikante Verbesserung erzielt werden. Die größte Steigerung gab es über 200 m B der Männer von 2:25,8 auf 2:11,4 min. Die geringste Steigerung wurde bei 100 m F der Frauen erzielt mit einer Verbesserung im Mittel von nur 1,4 s.

Tabelle 15: Mittelwerte und Standardabweichungen der disziplinspezifischen Bestzeiten aus den beiden Erhebungszeiträumen EZ 2 und EZ 3 mit statistischer Auswertung.

BZ [min]	n		\bar{X} und SD		T-Test		
	EZ 2	EZ 3	EZ 2	EZ 3	t-Wert	p eins.	Hedges g
100 F m	118	15	00:52,7 00:02,0	00:50,2 00:00,9	$t_{131} = 8,43$	0,000	1,230
200 F m	157	94	01:54,8 00:02,1	01:51,6 00:04,2	$t_{249} = 6,89$	0,000	0,995
100 B m	74	14	01:04,7 00:01,9	01:01,1 00:02,2	$t_{86} = 5,73$	0,000	1,789
200 B m	58	19	02:25,8 00:06,3	02:11,4 00:03,5	$t_{75} = 12,49$	0,000	5,178
100 R m	55	4	00:58,1 00:01,6	00:57,8 00:00,6	$t_{57} = 0,81$	0,210	
200 R m	48	47	02:07,9 00:05,0	02:01,4 00:03,8	$t_{93} = 7,14$	0,000	2,151
100 F w	62	32	00:57,8 00:01,7	00:56,4 00:01,0	$t_{92} = 5,02$	0,000	0,583
200 F w	93	69	02:06,9 00:04,0	02:04,1 00:03,7	$t_{166} = 4,60$	0,000	0,902
100 B w	44	8	01:13,5 00:02,0	01:08,3 00:02,0	$t_{50} = 6,76$	0,000	2,886
200 B w	37	32	02:39,7 00:06,1	02:31,1 00:02,6	$t_{67} = 7,80$	0,000	2,954
100 R w	47	10	01:04,0 00:02,3	01:01,0 00:00,4	$t_{55} = 8,37$	0,000	1,574
200 R w	31	43	02:19,9 00:05,6	02:14,7 00:03,8	$t_{72} = 4,48$	0,000	1,684

In fast allen Disziplinen stieg die maximale Schwimmgeschwindigkeit im Test v_{\max} signifikant von EZ 1 zu EZ 3, z.B. in 100 m F männlich (rot durchgezogen): $1,69 \pm 0,16$ m/s auf $1,82 \pm 0,06$ m/s auf $1,85 \pm 0,04$ m/s ($F = 46,5$, $\eta^2 = 0,17$, $p < 0,05$) oder 200 m R weiblich (hellblau gestrichelt): $1,29 \pm 0,07$ m/s auf $1,36 \pm 0,05$ m/s auf $1,40 \pm 0,04$ m/s ($F = 57,6$, $\eta^2 = 0,43$, $p < 0,05$). Siehe Abbildung 25 und Tabelle 16.

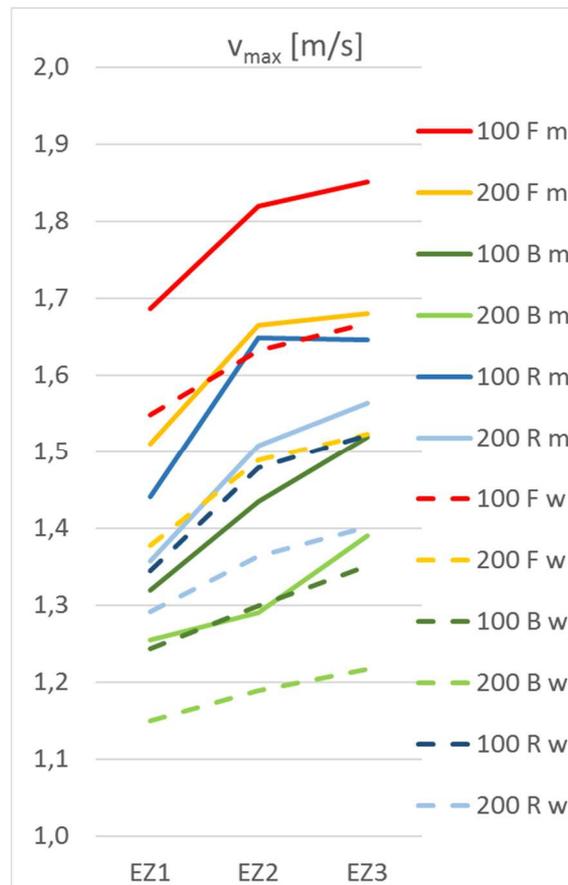


Abbildung 25: Entwicklung der v_{\max} in den einzelnen Disziplinen über die drei Erhebungszeiträume (EZ 1–3) jeweils für männlich als durchgezogene Linie und für weiblich als gestrichelte Linie dargestellt.

Tabelle 16: Mittelwerte und Standardabweichungen der v_{max} aus allen Disziplinen und Erhebungszeiträumen mit statistischer Auswertung.

v_{max} [m/s]	n			\bar{X} und SD			ANOVA		Games-Howell		
	EZ 1	EZ 2	EZ 3	EZ 1	EZ 2	EZ 3	F	p und η^2	EZ 1-2	EZ 1-3	EZ 2-3
100 F m	340	118	15	1,687 0,159	1,820 0,061	1,851 0,042	47,5	0,000 0,165	0,000	0,000	0,046
200 F m	725	157	94	1,511 0,139	1,665 0,053	1,680 0,085	164,0	0,000 0,239	0,000	0,000	0,236
100 B m	69	74	14	1,319 0,159	1,435 0,054	1,520 0,045	28,9	0,000 0,273	0,000	0,000	0,000
200 B m	110	58	19	1,255 0,086	1,290 0,041	1,390 0,070	28,1	0,000 0,234	0,002	0,000	0,000
100 R m	52	55	4	1,440 0,090	1,649 0,043	1,646 0,021	124,3	0,000 0,697	0,000	0,000	0,971
200 R m	58	48	47	1,357 0,009	1,508 0,052	1,563 0,039	467,7	0,000 0,858	0,000	0,000	0,000
100 F w	166	62	32	1,548 0,120	1,632 0,063	1,667 0,038	28,1	0,000 0,179	0,000	0,000	0,004
200 F w	411	93	69	1,377 0,124	1,489 0,079	1,523 0,046	80,8	0,000 0,212	0,000	0,000	0,002
100 B w	41	44	8	1,243 0,089	1,299 0,044	1,351 0,267	11,9	0,000 0,218	0,002	0,000	0,001
200 B w	66	37	32	1,150 0,064	1,188 0,037	1,217 0,036	23,5	0,000 0,227	0,001	0,000	0,006
100 R w	52	47	10	1,344 0,094	1,479 0,060	1,521 0,023	48,0	0,000 0,475	0,000	0,000	0,002
200 R w	68	31	43	1,291 0,068	1,363 0,046	1,402 0,041	57,6	0,000 0,434	0,000	0,000	0,001
alle männlich	1354	510	193	1,515 1,873	1,608 0,176	1,624 0,132		0,000 0,062	0,000	0,000	0,388
alle weiblich	804	314	194	1,378 0,156	1,441 0,151	1,462 0,146		0,000 0,051	0,000	0,000	0,273

Im Mittel über alle Disziplinen stieg der L_{\max} -Wert der Männer signifikant von $9,3 \pm 2,4$ mmol/l auf $10,9 \pm 2,7$ mmol/l und $11,7 \pm 2,9$ mmol/l ($F = 125,9$, $\eta^2 = 0,11$, $p < 0,05$). Ähnliches gilt für fast alle einzelnen Disziplinen, beispielsweise 200 m R männlich (hellblau durchgezogen): $8,7 \pm 1,7$ mmol/l auf $11,6 \pm 2,3$ mmol/l auf $12,8 \pm 2,7$ mmol/l ($F = 44,6$, $\eta^2 = 4,24$, $p < 0,05$).

Obwohl die L_{\max} -Mittelwerte der Frauen von $7,5 \pm 2,0$ mmol/l im EZ 1 auf $9,2 \pm 2,7$ mmol/l im EZ 2 und $9,4 \pm 2,3$ mmol/l im EZ 3 anstiegen, veränderten sich nur die Werte von EZ 1 auf EZ 2 signifikant. Ähnliche Ergebnisse wurden in den meisten Einzeldisziplinen der Frauen beobachtet. 200 m F der Frauen (gelb gestrichelt) stieg von EZ 1 $7,4 \pm 2,0$ mmol/l auf $8,5 \pm 2,6$ mmol/l in EZ 2 und kein weiterer signifikanter Anstieg auf $8,6 \pm 2,0$ mmol/l in EZ 3. Siehe Abbildung 26 und Tabelle 17.

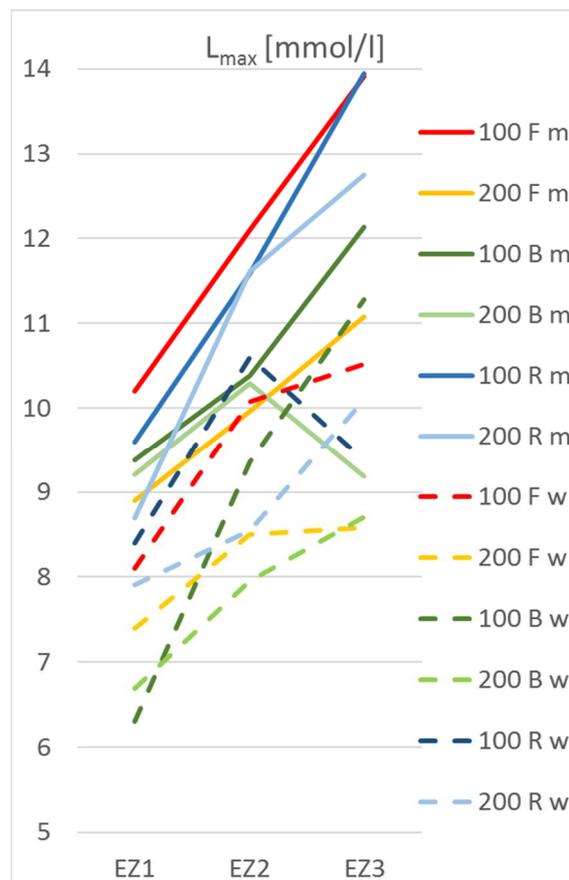


Abbildung 26: Entwicklung der L_{\max} in den einzelnen Disziplinen über die drei Erhebungszeiträume (EZ1–3) jeweils für männlich als durchgezogene Linie und für weiblich als gestrichelte Linie dargestellt.

Tabelle 17: Mittelwerte und Standardabweichungen der L_{max} aus allen Disziplinen und Erhebungszeiträumen mit statistischer Auswertung.

L_{max} [mmol/l]	n			\bar{X} und SD			ANOVA		Games-Howell		
	EZ 1	EZ 2	EZ 3	EZ 1	EZ 2	EZ 3	F	p und η^2	EZ 1-2	EZ 1-3	EZ 2-3
100 F m	340	118	15	10,20 2,70	12,10 2,84	13,91 2,52	30,9	0,000 0,117	0,000	0,000	0,046
200 F m	725	157	94	8,90 2,30	9,96 2,59	11,08 2,86	45,0	0,000 0,079	0,000	0,000	0,006
100 B m	69	74	14	9,38 1,71	10,39 2,58	12,14 3,70	8,7	0,000 0,104	0,017	0,040	0,238
200 B m	110	58	19	9,20 1,70	10,29 2,30	9,18 2,49	6,1	0,003 0,062	0,006	0,999	0,215
100 R m	52	55	4	9,60 1,30	11,58 2,53	13,95 0,86	18,5	0,000 0,255	0,000	0,001	0,007
200 R m	58	48	47	8,70 1,70	11,61 2,31	12,75 2,69	44,6	0,000 4,240	0,000	0,000	0,038
100 F w	166	62	32	8,10 2,00	10,08 2,48	10,52 2,23	29,4	0,000 0,188	0,000	0,000	0,660
200 F w	411	93	69	7,40 2,00	8,50 2,59	8,58 2,02	16,0	0,000 0,056	0,001	0,000	0,971
100 B w	41	44	8	6,30 1,60	9,36 2,09	11,28 1,75	36,5	0,000 0,475	0,000	0,000	0,045
200 B w	66	37	32	6,70 1,70	7,96 2,56	8,71 2,34	14,6	0,000 0,140	0,025	0,000	0,420
100 R w	52	47	10	8,40 1,70	10,60 2,75	9,37 2,11	11,8	0,000 0,182	0,000	0,388	0,285
200 R w	68	31	43	7,90 1,70	8,54 2,42	10,09 2,42	14,1	0,000 0,170	0,387	0,000	0,024
alle männlich	1354	510	193	9,29 2,36	10,88 2,72	11,66 2,94		0,000 0,109	0,000	0,000	0,005
alle weiblich	804	314	194	7,54 1,98	9,19 2,65	9,40 2,34		0,000 0,128	0,000	0,000	0,604

Der Parameter b_{LLK} verhält sich uneinheitlich über die verschiedenen Disziplinen (Abbildung 27 und Tabelle 18). In 200 m B männlich (hellgrün durchgezogen), 100 m R männlich (dunkelblau durchgezogen) und 100 m F weiblich (rot gestrichelt) zeigt sich ein stetiger Abfall, wohingegen der Wert bei 200 m F weiblich (gelb gestrichelt) und 200 m B weiblich (hellgrün gestrichelt) stetig zunimmt. Die anderen Disziplinen zeigen eine wechselhafte Tendenz.

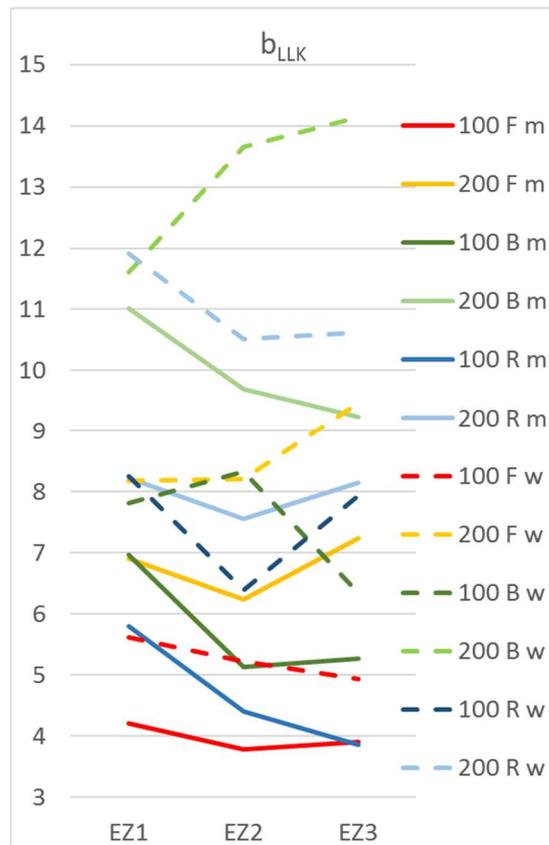


Abbildung 27: Entwicklung von b_{LLK} in den einzelnen Disziplinen über die drei Erhebungszeiträume (EZ 1–3) jeweils für männlich als durchgezogene Linie und für weiblich als gestrichelte Linie dargestellt.

Tabelle 18: Mittelwerte und Standardabweichungen der b_{LLK} aus allen Disziplinen und Erhebungszeiträumen mit statistischer Auswertung.

b_{LLK}	n			\bar{X} und SD			ANOVA		Games-Howell		
	EZ 1	EZ 2	EZ 3	EZ 1	EZ 2	EZ 3	F	p und η^2	EZ 1-2	EZ 1-3	EZ 2-3
100 F m	340	118	15	4,20	3,78	3,90	7,1	0,001	0,000	0,465	0,891
				1,16	0,83	0,95		0,029			
200 F m	725	157	94	6,90	6,24	7,23	11,4	0,000	0,000	0,083	0,000
				1,86	1,54	1,34		0,024			
100 B m	69	74	14	6,97	5,12	5,27	21,1	0,000	0,000	0,000	0,834
				2,28	1,23	0,77		0,214			
200 B m	110	58	19	11,02	9,70	9,24	6,4	0,002	0,002	0,020	0,718
				3,16	1,76	2,36		0,065			
100 R m	52	55	4	5,81	4,40	3,85	19,1	0,000	0,000	0,000	0,019
				1,40	1,10	0,21		0,261			
200 R m	58	48	47	8,23	7,56	8,15	2,0	0,128	0,163	0,976	0,101
				2,32	1,41	1,39		0,027			
100 F w	166	62	32	5,62	5,22	4,94	3,6	0,023	0,140	0,006	0,469
				1,58	1,33	0,98		0,029			
200 F w	411	93	69	8,17	8,21	9,46	4,6	0,001	0,990	0,002	0,006
				2,73	2,13	2,78		0,024			
100 B w	41	44	8	7,82	8,33	6,35	2,5	0,051	0,524	0,089	0,023
				1,99	2,30	1,55		0,064			
200 B w	66	37	32	11,61	13,65	14,14	10,3	0,000	0,003	0,002	0,752
				3,65	2,47	3,08		0,115			
100 R w	52	47	10	8,25	6,39	7,94	15,2	0,000	0,000	0,702	0,000
				2,03	1,41	0,85		0,223			
200 R w	68	31	43	11,91	10,51	10,62	3,7	0,017	0,039	0,034	0,977
				3,28	2,23	2,12		0,057			
alle männlich	1354	510	193	6,58	5,83	7,18		0,000	0,000	0,001	0,000
				2,60	2,25	1,99		0,025			
alle weiblich	804	314	194	8,23	8,23	9,54		0,000	1,000	0,000	0,000
				3,20	3,19	3,65		0,020			

$P_{4,0}$ sinkt in allen Disziplinen von EZ 2 zu EZ 3 signifikant, außer in 200 m F weiblich (gelb gestrichelt) und 100 m R weiblich (dunkelblau gestrichelt), obwohl die Schwimmgeschwindigkeit bei 4mmol/l $v_{4,0}$ in allen außer einer Disziplin zunimmt. In 200 m F männlich (gelb durchgezogen) sinkt der Wert für $P_{4,0}$ von 87,1 % auf 85,6 % ($t_{249} = 3,41$, Hedges $g = 0,453$, $p < 0,05$), $v_{4,0}$ stieg minimal von 1,51 m/s auf 1,53 m/s, aber nicht signifikant. Siehe Abbildung 28 und Tabelle 19 und 20.

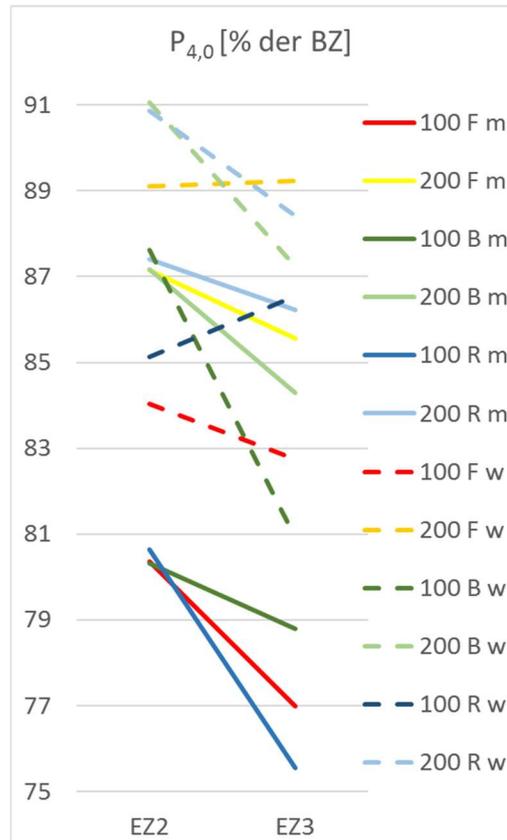


Abbildung 28: Entwicklung von $P_{4,0}$ in den einzelnen Disziplinen über die zwei Erhebungszeiträume (EZ 2–3) jeweils für männlich als durchgezogene Linie und für weiblich als gestrichelte Linie dargestellt.

Tabelle 19: Mittelwerte und Standardabweichungen der $v_{4,0}$ aus allen Disziplinen und allen Erhebungszeiträumen mit statistischer Auswertung.

$v_{4,0}$ [m/s]	n			\bar{X} und SD			ANOVA		Games-Howell		
	EZ 1	EZ 2	EZ 3	EZ 1	EZ 2	EZ 3	F	p und η^2	EZ 1-2	EZ 1-3	EZ 2-3
100 F m	340	118	15	1,449 0,123	1,523 0,100	1,535 0,072	20,4	0,000 0,079	0,000	0,001	0,848
200 F m	725	157	94	1,394 0,130	1,514 0,068	1,536 0,078	116,9	0,000 0,185	0,000	0,000	0,067
100 B m	69	74	14	1,176 0,150	1,244 0,071	1,292 0,061	10,0	0,000 0,112	0,003	0,000	0,042
200 B m	110	58	19	1,176 0,080	1,196 0,040	1,284 0,052	20,6	0,000 0,183	0,084	0,000	0,000
100 R m	52	55	4	1,272 0,093	1,392 0,109	1,307 0,039	19,2	0,000 0,262	0,000	0,367	0,023
200 R m	58	48	47	1,262 0,084	1,367 0,059	1,421 0,039	85,3	0,000 0,522	0,000	0,000	0,000
100 F w	166	62	32	1,406 0,126	1,447 0,072	1,468 0,057	6,6	0,002 0,047	0,007	0,000	0,285
200 F w	411	93	69	1,302 0,120	1,400 0,117	1,438 0,047	64,5	0,000 0,178	0,000	0,000	0,013
100 B w	41	44	8	1,183 0,069	1,193 0,038	1,188 0,041	0,3	0,711 0,008	0,723	0,999	0,839
200 B w	66	37	32	1,101 0,067	1,137 0,030	1,154 0,029	13,0	0,000 0,166	0,001	0,000	0,040
100 R w	52	47	10	1,248 0,090	1,335 0,077	1,420 0,026	25,9	0,000 0,328	0,000	0,000	0,000
200 R w	68	31	43	1,226 0,072	1,302 0,052	1,313 0,047	36,2	0,000 0,318	0,000	0,000	0,577
alle männlich	1354	510	193	1,369 0,151	1,414 0,148	1,460 0,116		0,000 0,040	0,000	0,000	0,000
alle weiblich	804	314	194	1,291 0,138	1,330 0,133	1,357 0,123		0,000 0,034	0,000	0,000	0,048

Tabelle 20: Mittelwerte und Standardabweichungen der $P_{4,0}$ aus allen Disziplinen und den Erhebungszeiträumen EZ 2 und EZ 3 mit statistischer Auswertung.

$P_{4,0}$ [%]	n		\bar{X} und SD		T-Test		
	EZ 2	EZ 3	EZ 2	EZ 3	t-Wert	p eins.	Hedges g
100 F m	118	15	80,37	76,99	$t_{131} = 3,24$	0,000	1,334
			5,16	3,59			
200 F m	157	94	87,14	85,57	$t_{249} = 3,41$	0,000	0,453
			3,74	3,41			
100 B m	74	14	80,31	78,80	$t_{86} = 1,81$	0,037	0,631
			4,51	2,43			
200 B m	58	19	87,16	84,29	$t_{75} = 3,40$	0,001	1,168
			4,15	2,80			
100 R m	55	4	80,63	75,56	$t_{57} = 4,36$	0,000	2,171
			5,23	1,83			
200 R m	48	47	87,42	86,22	$t_{93} = 1,80$	0,038	0,407
			3,35	3,02			
100 F w	62	32	84,04	82,75	$t_{92} = 1,68$	0,048	0,482
			3,58	3,44			
200 F w	93	69	89,10	89,23	$t_{166} = -0,23$		
			4,53	2,94			
100 B w	44	8	87,62	80,91	$t_{50} = 4,61$	0,000	3,124
			3,64	3,81			
200 B w	37	32	91,06	87,24	$t_{67} = 5,47$	0,000	1,475
			2,76	3,00			
100 R w	47	10	85,14	86,54	$t_{55} = -1,83$		
			3,70	1,72			
200 R w	31	43	90,87	88,41	$t_{72} = 7,57$	0,000	1,605
			2,83	2,31			

Aufgrund der fehlenden Standardabweichungen der Frauen in EZ 2 kann nur für 100 m und 200 m F männlich und 200 m B männlich ein signifikanter Abfall von P_{max} beobachtet werden (z.B. 200 m B männlich $t_{75} = 3,05$, Hedges $g = 1,21$, $p < 0,05$). Aber auch die meisten anderen Disziplinen zeigen einen Abfall der maximalen Testleistung bezogen auf die Bestzeit. Siehe Abbildung 29 und Tabelle 21.

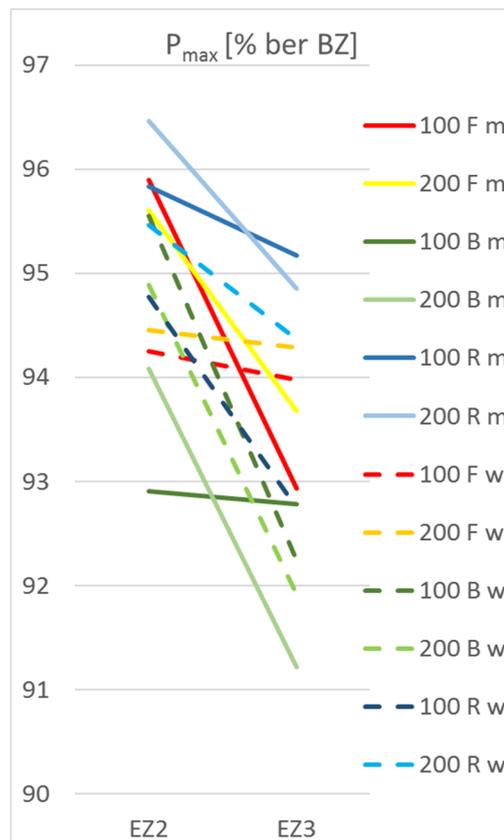


Abbildung 29: Entwicklung von P_{max} in den einzelnen Disziplinen über die zwei Erhebungszeiträume (EZ 2–3) jeweils für männlich als durchgezogene Linie und für weiblich als gestrichelte Linie dargestellt.

Tabelle 21: Mittelwerte und Standardabweichungen der P_{max} aus allen Disziplinen und den Erhebungszeiträumen EZ 2 und EZ 3 mit statistischer Auswertung.

P_{max} [%]	n		\bar{X} und SD		T-Test		
	EZ 2	EZ 3	EZ 2	EZ 3	t-Wert	p eins.	Hedges g
100 F m	118	15	95,90 3,18	92,93 2,38	$t_{131} = 4,36$	0,000	1,334
200 F m	157	94	95,60 3,04	93,68 3,47	$t_{249} = 4,44$	0,000	0,596
100 B m	74	14	92,91 3,67	92,79 3,27	$t_{86} = 0,13$	0,450	
200 B m	58	19	94,08 3,11	91,22 3,69	$t_{75} = 3,05$	0,001	1,212
100 R m	55	4	95,83 0,00	95,17 0,58	$t_{57} = 1,23$	0,111	
200 R m	48	47	96,46 0,00	94,85 2,13	$t_{93} = 2,80$	0,003	0,578
100 F w	62	32	94,25 0,00	93,98 2,23			
200 F w	93	69	94,45	94,29 2,72			
100 B w	44	8	95,55	92,25 1,72			
200 B w	37	32	94,89	91,91 2,59			
100 R w	47	10	94,77	92,75 1,84			
200 R w	31	43	95,46	94,37 2,26			

3.6. Diskussion

3.6.1. Geschlechts- und streckenspezifische Unterschiede

Alle diesbezüglich gefundenen Ergebnisse stimmen mit den Resultaten der Untersuchungen von Rudolph und Berbalk (2000) überein.

Die Ergebnisse des Vergleichs zwischen den Geschlechtern verdeutlichen die unterschiedlichen Voraussetzungen, die Frauen und Männer mitbringen. Die höheren $P_{4,0}$ -Werte der Frauen unterstreichen ihre bessere relative Ausdauerleistungsfähigkeit. Die signifikant höheren maximalen Laktatwerte und b_{LLK} -Werte der Männer belegen die bessere anaerobe Mobilisationsfähigkeit der Männer im Vergleich zu den Frauen. Beide Größen können auf deren höhere Muskelmasse und die höhere Maximalkraft zurückgeführt werden. Sowohl die Muskelmasse als auch die Muskelfaserzusammensetzung haben einen Einfluss auf die Menge des gebildeten Laktats. Siehe Kapitel 2.2.1. „Chemische Zusammenhänge und Hintergrundwissen zum Laktatmetabolismus“.

Sowohl die unterschiedlichen Werte von 100-m- und 200-m- bzw. 400-m-Schwimmern als auch die Korrelationen der Kenngrößen verdeutlichen die diversen physiologischen Leistungsvoraussetzungen in den einzelnen Disziplinen.

Die zunehmenden $P_{4,0}$ -Werte von den 100-m bis zu den 400-m-Distanzen belegen die zunehmende Bedeutung der aeroben Ausdauer auf den längeren Strecken. Die Steigerung von 77,0 % (100 m F) über 85,6 % (200 m F) auf 89,8 % (400 m F) bei den Männern ist eindeutig, die ebenfalls steigenden, insgesamt aber höheren, Werte der Frauen 82,8 % (100 m F) auf 89,2 % (200 m F) und 92,9 % (400 m F) zeigen die gleiche Tendenz und unterstreichen den oben diskutierten Geschlechterunterschied.

Die steigenden b_{LLK} -Werte über die zunehmende Streckenlänge (Männer: 3,9 (100 m) → 7,2 (200 m) → 11,1 (400 m)) und gleichzeitig abnehmenden L_{max} -Werte (Männer: 13,9 (100 m) → 11,1 (200 m) → 7,6 mmol/l (400 m)) dokumentieren die größere anaerobe Mobilisationsfähigkeit der Sprinter. Die, in dieser Untersuchung identifizierten Mittelwerte der L_{max} , decken sich mit den Veröffentlichungen von Wilke und Madsen (2015), die für 1-minütige Belastungen maximale Laktatwerte von 12–22 mmol/l, für 2-min 12–20 mmol/l und für 4-min 10–18 mmol/l angeben.

Die Korrelationen zwischen b_{LLK} , L_{max} und $P_{4,0}$ bestätigen, dass eine geringere aerobe Ausdauer mit höheren maximalen Laktatkonzentrationen und steileren Kurven einhergeht und umgekehrt.

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge ist in Abbildung 30 dargestellt, wie sich die unterschiedlichen Ausprägungen der Kenngrößen auf die Form der LLK auswirkt. Vier exemplarische Kurven der besten deutschen Brustschwimmer und –schwimmerinnen unterscheiden sich offenkundig im Verlauf.

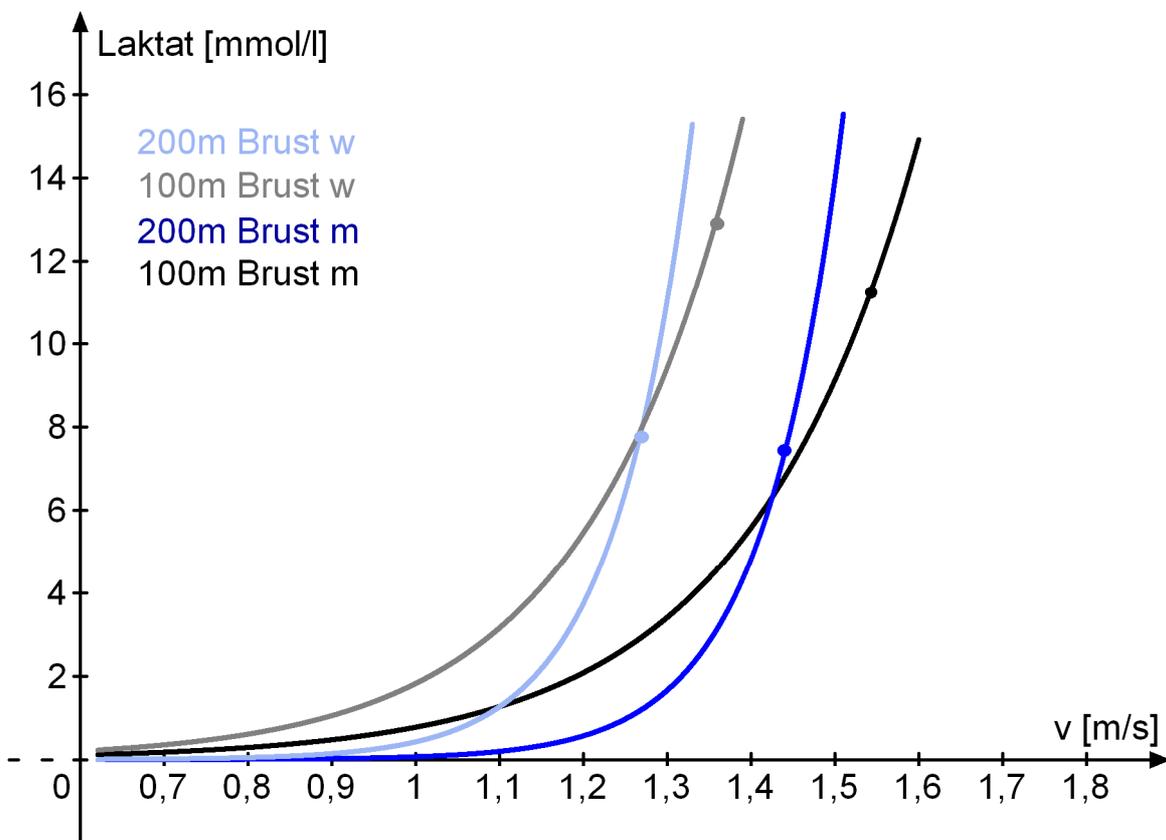


Abbildung 30: Vergleich der LLK jeweils eines 100-m- (schwarz), und 200-m- (dunkelblau) Brustschwimmers und einer 100-m-(grau), und 200-m-(hellblau) Brustschwimmerin. Genaue Angaben zu den Kenngrößen in Tab. 22.

Tabelle 22: Kenngrößen der Beispielkurven aus Abb. 30

Disziplin	BZ [min]	v _{BZ} [m/s]	a	b	P ₄ [% der BZ]	L _{max} [mmol/l]
100 B m	00:59,1	1,69	0,005672	4,92	78,9	11,3
200 B m	02:11,5	1,52	0,000002	10,64	90,9	7,7
100 B w	01:07,2	1,49	0,007701	5,47	77,3	12,8
200 B w	02:29,7	1,34	0,000009	10,83	90,3	7,8

Der 100-m-Schwimmer (schwarze Linie) hat eine Bestzeit von unter einer Minute auf 100 m Brust, was einer Geschwindigkeit von 1,69 m/s entspricht. Im Vergleich dazu liegt die Bestzeit des 200-m-Schwimmers (dunkelblau) bei 2:11,5 min auf 200 m Brust, was einer Geschwindigkeit von 1,52 m/s entspricht. Die Frauen erreichen geringere maximale Schwimmgeschwindigkeiten. Der b_{LLK} -Wert des 100-m-Schwimmers liegt mit 4,9 deutlich niedriger als beim 200-m-Schwimmer mit 10,6. Auch der $P_{4,0}$ -Wert ist niedriger (78,9 %) als beim 200-m-Schwimmer (90,9 %), wohingegen der maximale Laktatwert höher ist (11,3 zu 7,7). Die Kurven der Frauen zeigen einen ähnlichen Verlauf auf, nur mit geringeren Geschwindigkeitswerten. Das Verhältnis der Kenngrößen der deutschen Spitzenschwimmer spiegelt sich entsprechend in den berechneten Mittelwerten aller Kaderathleten wider.

Bei der Interpretation von b_{LLK} -Werten ist zu bedenken, dass diese sehr vom Zeitpunkt der Erhebung innerhalb der Jahresperiodisierung und dem damit verknüpften Leistungsaufbau abhängen. Im Verlauf des Jahres sollte zunächst im grundlegenden Mesozyklus für alle Schwimmer eine Rechtsverschiebung der LLK durch Grundlagenausdauertraining angestrebt werden. Im Normalfall werden hier hohe b_{LLK} -Werte erreicht. Im leistungsausprägenden Mesozyklus kurz vor einem Hauptwettkampf hingegen sollte im Zuge der Formzuspitzung die Steigung der Kurve abflachen (kleinere b_{LLK} -Werte) und die maximalen Laktatwerte ansteigen. Bei Langstreckenschwimmern liegt der Schwerpunkt auf einer Rechtsverschiebung der LLK, insbesondere im unteren Teil. Dagegen ist es bei Sprintern von besonderer Bedeutung, dass die LLK – ausgehend von einer guten Grundlagenausdauer – in der Phase der Spezialisierung eine Abflachung mit Ökonomisierung der anaerob-laktaziden Energiebereitstellung erfährt.

Da aus den rohen Datensätzen nicht ersichtlich ist, wann sich ein Schwimmer zum Zeitpunkt der KLD vor einem persönlichen Hauptwettkampf befand, konnte diesbezüglich keine Einordnung vorgenommen werden. Die uneinheitliche Tendenz der Kenngröße b_{LLK} über die drei Zeiträume ist also nicht verwunderlich. Bei der Interpretation der Mittelwerte ist dieser Umstand zu berücksichtigen.

Pansold und Zinner (1994) vermuteten, dass der Wert b_{LLK} von dem Niveau der Krafteigenschaften, der disziplinspezifischen Bewegungsstruktur und der Muskelfasertypenverteilung abhängt. Rudolph und Berbalk (2000) fanden dafür keine Bestätigung. Allerdings deuten die höheren Werte der Sprinter und Männer daraufhin, dass ein Zusammenhang zum Krafteinsatz und zur Zusammensetzung der Muskulatur vorhanden ist, auch wenn keine direkte Kausalität aus den Ergebnissen der Krafttests ableitbar ist.

3.6.2. Längsschnittvergleich

Die Ergebnisse aus dem Längsschnittvergleich über die Jahrzehnte zeigen eine deutliche Verschiebung der Kenngrößen des Pansold-Tests über den Untersuchungszeitraum.

Genauso wie sich die deutschen Rekorde verbessert haben, konnten die Bestzeiten der Schwimmer in allen Disziplinen gesteigert werden. Das zeigt sich auch in den schnelleren Schwimgeschwindigkeiten im Test. In allen Disziplinen, außer 100 m R männlich, ist die v_{max} signifikant gestiegen. Die Ausnahme 100 m R könnte durch die geringe Teilnehmerzahl ($n = 4$) im EZ 3 verursacht sein. Scheinbar gibt es derzeit kaum Schwimmer, die den Test in dieser Disziplin absolvieren. Die große Steigerung in 200 m B männlich ist nicht erstaunlich, da hier der deutsche Meister aktuell (2015) auch Weltmeister ist und so die Werte mit beeinflusst. Auch die geringste Steigerung im Bereich 100 m F weiblich kann anhand des Abstands zur Weltspitze erklärt werden. Im EZ 2 gab es zwei 100-m-Kraulerinnen, die im vorderen Bereich der Weltspitze mitschwimmen konnten, im EZ 3 keine.

Die Schwimgeschwindigkeit an der 4-mmol-Schwelle $v_{4,0}$ konnte ebenfalls in fast allen Disziplinen verbessert werden. Die Athleten schwimmen heute sowohl im maximalen wie auch im submaximalen Bereich höhere Geschwindigkeiten. Allerdings konnten die Bestzeiten mehr als die Schwimgeschwindigkeiten im Ausdauerbereich gesteigert werden. In 200 m F männlich wurde die Bestzeit im

Mittel von 1:54,8 auf 1:51,6 min um 3,19 s gesteigert werden, die Zeiten an der 4-mmol-Schwelle nur um 1,14 s. Der relative Wert $P_{4,0}$ hingegen ist in allen Disziplinen außer 200 m F weiblich und 100 m R weiblich signifikant gesunken. Über 200 m F männlich z.B. ist $P_{4,0}$ von 87,1 auf 85,6% gesunken, wohingegen $v_{4,0}$ minimal von 1,51 auf 1,53 m/s gestiegen ist. Das heißt, dass aktuell die Spanne zwischen der maximalen Schwimmgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit im Ausdauerbereich weiter auseinanderdriftet als früher. Der $P_{4,0}$ -Wert gilt als Größe der aeroben Ausdauer. Eine Verminderung dieses Wertes zeigt an, dass die heutigen Schwimmer auf eine geringere Grundlagenausdauer zurückgreifen können. Dies zeigt sich nicht nur in einem geringeren Stehvermögen, sondern könnte auch ein Grund für die mangelnde Fähigkeit der Deutschen Schwimmer sein, ihre Leistung über Vorlauf, Zwischenlauf und Finale konstant abzurufen.

Im Gegensatz dazu sind bei den Männern die L_{max} -Werte im Schnitt über alle Disziplinen signifikant von 9,29 auf 10,88 und 11,66 mmol/l gestiegen. Obwohl die Werte bei den Frauen im Mittel auch stiegen (7,54 auf 9,18 und 9,40 mmol/l), war der Anstieg nur zwischen EZ 1 und EZ 2 signifikant nachweisbar. Das wiederum deutet darauf hin, dass die Athleten ihre anaeroben Qualitäten verbessern konnten. Noch auffälliger wird diese Entwicklung, wenn berücksichtigt wird, dass die verbesserten Laktatbestimmungsmethoden heute eher minimal niedrigere Werte ergeben (Rudolph & Berbalk, 2000).

Im Wettkampf werden üblicherweise ca. 2–3 mmol/l höhere Laktatkonzentrationen erreicht als im Test. Die geringeren P_{max} -Werte deuten darauf hin, dass die heutigen Schwimmer im Test nicht mehr so nah an ihre Bestleistung heranschwimmen.

Die Ursachen für diese Verschiebungen sind sehr vielfältig. Auch wenn es kaum veröffentlichte Aufzeichnungen zu Trainingsplänen gibt, ist davon auszugehen, dass sich die Trainingsmethoden und -schwerpunkte in den letzten Jahrzehnten grundlegend verändert haben. Der Anteil des Krafttrainings wurde erhöht, wohingegen das Training der Grundlagenausdauer eher reduziert wurde (Rudolph, 2015). Die zu bewältigenden Trainingsumfänge in den 1970er und 1980er Jahren waren, zumindest in der DDR, deutlich höher und auch in den 1990er Jahren konnten Athleten aus der ehemaligen DDR noch von den hohen Trainingsumfängen in ihren jungen Jahren profitieren.

In diesem Zusammenhang könnte die Verabreichung von Doping in die Betrachtung und Interpretation einbezogen werden, denn beispielsweise haben Anabolika neben der Hypertrophiewirkung auch eine positive Auswirkung auf die Regeneration nach hohen Belastungen und könnten dadurch höhere Trainingsumfänge ermöglichen. Leider kann weder der Anteil noch die Zahl der Schwimmer aus sicherer Quelle belegt werden, die unter dem Einfluss von Doping standen und auch für die heutige Zeit gibt es keine gesicherten Angaben.

Die höheren Laktatwerte haben sicherlich ihre Ursache in den schnelleren Geschwindigkeiten, die aktuell von den Athleten umgesetzt werden. Aber auch die Einführung der Delphin-Kicks und die längeren Unterwasserphasen müssen in die Betrachtung einbezogen werden. Die Beinmuskulatur z.B. produziert aufgrund der höheren Muskelmasse deutlich mehr Laktat als die Armmuskulatur. Zudem führt eine höhere Muskelmasse des Körpers auch zu höheren Laktatwerten. Da die anthropometrischen Werte der ehemaligen Athleten fehlen, ist eine wissenschaftliche Überprüfung dieses Sachverhalts leider nicht möglich. Ein zusätzlicher Effekt von Krafttraining ist die frühere und höhere Aktivierung von schnell zuckenden FT-Fasern, die in erster Linie anaerob arbeiten und so zu einer vermehrten Bildung von Laktat führen als langsam zuckenden ST-Fasern, die vor allem bei Ausdauersportlern dominieren (Maglischo, 2003).

3.7. Schlussfolgerungen

Um aus den Ergebnissen dieser Teilstudie Empfehlungen für einzelne Schwimmer abzuleiten, muss zunächst betont werden, dass die Untersuchung auf der Auswertung von Mittelwerten basiert und nicht direkt auf das Individuum übertragbar ist. Die Variabilität von Individuen kann größer sein als die Variabilität über mehrere Jahre (Anderson, Hopkins, Roberts & Pyne, 2006). Um sinnvolle Trainingsempfehlungen ableiten zu können, müssen eine genaue Trainingsdokumentation und die persönlichen Voraussetzungen der einzelnen Athleten in die Überlegungen mit einbezogen werden.

Trotzdem können aus den Ergebnissen dieser Studie die notwendigen Leistungsvoraussetzungen untermauert werden: Männer und Sprinter weisen eine geringere Grundlagenausdauer auf als Frauen und Langstreckenschwimmer, erreichen aber höhere maximale Laktatwerte mit einem flacheren Kurvenverlauf in der LLK.

Außerdem können folgende allgemeine Tendenzen im deutschen Schwimmsport festgehalten werden: Die Spitzenleistungen konnten in Bezug auf die maximale Schwimmgeschwindigkeit und die maximalen Laktatwerte gesteigert werden, wohingegen sich die Grundlagenausdauer eher verschlechterte. Im Vergleich mit anderen Nationen stellt sich nun die Frage, ob die deutschen Schwimmer immer noch zu wenig Krafttraining machen oder ob die Sportler erfolgreicherer Nationen ihre Wettkämpfe mit einem höheren Grundlagenausdauerniveau bestreiten. Eine gut entwickelte Grundlagenausdauer ist die Basis für ein gutes Stehvermögen an Wettkampftagen. Wenn ein Schwimmer an einem Tag in mehreren Disziplinen Vor- und Endlauf bestreiten muss, ist eine ausgeprägte Grundlagenausdauer enorm wichtig. Andere Nationen demonstrieren immer wieder, dass mehrere exzellente Leistungen an einem Tag möglich sind. Die deutschen Schwimmer zeigen leider gerade bei Mehrfachstarts eher instabile Leistungen. Dementsprechend sollten sich die deutschen Trainer in Bezug auf die Ausprägung der Leistungsfaktoren stärker am Training der Grundlagenausdauer orientieren. Dabei ist der entscheidende Trainingsreiz für die Entwicklung der GLA der Trainingsumfang. Das GLA-Training erfolgt bei 75-85% der Wettkampfleistungsfähigkeit auf längeren Strecken (Neumann & Schüler, 1994, S. 28).

Ein großes Problem besteht darin, dass hohe Kraftwerte nicht mit einer überdurchschnittlichen aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit vereinbar sind (Wiedner, 2002). Wie oben bereits beschrieben, gehen hohe P_4 -Werte mit niedrigen maximalen Laktatwerten einher. Für Höchstleistungen sind nicht maximale Kraft- oder Ausdauerwerte anzustreben, sondern optimale Voraussetzungen in den jeweiligen Beanspruchungsformen.

Um den Anschluss zur Weltspitze wiederherzustellen, scheint die Hauptaufgabe im DSV zu sein, das optimale Verhältnis zwischen einer exzellenten Basis an Grundlagenausdauer mit hohen Maximalkraftwerten zu kombinieren und dabei individuelle Voraussetzungen nicht zu übersehen.

4. Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung der Dauerbelastungsgrenze

Trotz der kontinuierlichen und standardisierten Anwendung des Pansoldtests in der Leistungsdiagnostik des DSV, gibt es einige Kritikpunkte am Testablauf und der Auswertung. Viele Trainer und vor allem Wissenschaftler stehen dem Test heute eher kritisch gegenüber (siehe Kapitel 2.3.1.1. „Pansoldtest“ und dort „Kritische Aspekte zum Pansoldtest“). So wird z.B. seit einigen Jahren am OSP Hamburg eine alternative Testform für die aerobe Ausdauer mit längerer Belastungsdauer innerhalb der einzelnen Stufen im Schwimmkanal erprobt.

Mit der folgenden Untersuchung sollen alternative Möglichkeiten der Bestimmung der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit aufgezeigt und auf Validität getestet werden. Als Index für die Ausdauerleistungsfähigkeit gilt die Höhe der Dauerbelastungsgrenze. Je schneller ein Schwimmer bei einer nahezu konstanten Laktatkonzentration dauerhaft schwimmen kann, desto höher die aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit.

Alternativ zum im DSV angewandten Pansoldtest gibt es in anderen Ländern weitere Stufentests zur Ermittlung der aeroben Ausdauerleistung. Sie unterscheiden sich in der Stufenanzahl, Stufendauer, Pausenlänge und Auswertungsmethode. Trotzdem geben alle vor, die Ausdauerleistungsfähigkeit eines Athleten abzuschätzen und finden erfolgreich Anwendung in der Leistungsdiagnostik.

Alle im Schwimmsport verwendeten Testprotokolle zielen darauf ab, indirekt das MLSS bzw. die Dauerbelastungsgrenze zu ermitteln. Bisher konnte noch nicht wissenschaftlich nachgewiesen werden, welches Testprotokoll und welche Auswertungsmethode am besten geeignet ist, um die Dauerbelastungsgrenze zu ermitteln (Dekerle & Pelayo, 2011; Espada et al., 2015; Fernandes et al., 2011; Pyne et al., 2000; Zacca et al., 2019). Welcher Testablauf und welche Auswertungsmethode bzw. welches Schwellenkonzept angewandt wird, hängt eher von Präferenzen des Testleiters ab als von wissenschaftlichen Erkenntnissen. Leider gibt es kaum Untersuchungen, die die Validität der Methoden belegen, da diese nur in aufwendigen Tests mit mehreren Dauerbelastungen überprüft werden kann. Zudem basieren diese wenigen Studien häufig auf sehr geringen Teilnehmerzahlen,

wahrscheinlich aufgrund des hohen Aufwands bezüglich der direkten MLSS-Bestimmung. Außerdem berichten diese Studien lediglich von hohen Korrelationen zwischen Schwelle und MLSS (Cheng et al., 1992; Fernandes et al., 2011; Greco et al., 2013). Obwohl die berichteten Korrelationen und Regressionen die relative Reliabilität zweier Methoden belegen können, sind diese nicht in der Lage, eine systematische Verschiebung oder absolute Übereinstimmung zu erkennen (Faude et al., 2009). Daher besteht die Möglichkeit, dass die Schwellenkonzepte die Dauerbelastungsgrenze systematisch über- oder unterschätzen – mit problematischen Konsequenzen für die Trainingssteuerung.

Mit der folgenden Teilstudie sollen verschiedene Auswertungsmethoden auf ihre Übereinstimmung überprüft werden und der ermittelte Schätzwert für die Dauerbelastungsgrenze in der Praxis getestet werden. Auf der Grundlage eines 7 × 200 m Stufentests werden vier ausgewählte Methoden zur Bestimmung der anaeroben Schwelle und der zugehörigen Schwellengeschwindigkeit gegenübergestellt. Laut Definition müssten die Schwimmer in der Lage sein, die berechnete Schwellengeschwindigkeit über einen längeren Zeitraum durchzuhalten. Um dies zu überprüfen, müssen die Schwimmer im nächsten Teil der Untersuchung die ermittelte Schwellengeschwindigkeit im Dauertest umsetzen.

Als Alternative zu Stufentests mit der invasiven und aufwendigen Laktatmessung wurde das Konzept der „critical velocity“ entwickelt. Diese Methode eignet sich für den alltäglichen Trainingsbetrieb, ohne zusätzliche wissenschaftliche Hilfskräfte einsetzen zu müssen. Die unkomplizierte Anwendung an einem gewöhnlichen Computerprogramm, mit der Möglichkeit zur ständigen Aktualisierung, lässt sich von Trainern einfach in die praktische Trainingssteuerung einbauen. Die gegenwärtigen Bestzeiten der Schwimmer erlauben die Dauerbelastungsgrenze ständig zu aktualisieren. Da es keine eindeutigen Angaben zur Berechnungsart der kritischen Schwimmgeschwindigkeit gibt, werden zunächst die Berechnungen anhand von verschiedenen Streckenlängen verglichen. Dabei entstehen mehrere Kategorien der kritischen Schwimmgeschwindigkeit, die untereinander verglichen werden, aber anschließend auch der Bestimmung der AnS aus dem Stufentest gegenübergestellt werden. In einer Nebenstudie wird eine Kategorie der CS auf Validität im Dauertest überprüft.

4.1. Stichprobe

An dieser Untersuchung nahmen 54 jugendliche Leistungsschwimmer teil. Sie trainieren alle seit mindestens fünf Jahren regelmäßig 4–7-mal pro Woche im Wasser und zusätzlich mehrmals pro Woche an Land. Die Athleten nehmen an regionalen und nationalen Wettkämpfen teil. Die Stichprobe setzt sich aus 30 männlichen Schwimmern (Alter $15,3 \pm 2,78$ Jahre, Größe $177,9 \pm 9,1$ cm, Gewicht $66,8 \pm 12,2$ kg) mit einer mittleren persönlichen Bestzeit von $2:13,0 \pm 0:10,1$ min über 200 m F und 24 weiblichen Schwimmerinnen (Alter $14,6 \pm 2,0$ Jahre, Größe $168,7 \pm 5,4$ cm, Gewicht $55,1 \pm 5,0$ kg) mit einer mittleren Bestzeit von $2:20,4 \pm 0:06,4$ min über 200 m F zusammen.

Alle der Teilnehmer nahmen am Dauertest über 1500 m teil.

Alle Athleten und ihre Erziehungsberechtigten wurden über den Ablauf, die Vor- und Nachteile der Untersuchung aufgeklärt und gaben das schriftliche Einverständnis zur Testdurchführung. Der Testablauf war den Teilnehmern bekannt und war vorab im Training ohne Laktatmessung geprobt worden. Die Studie entspricht den Vorgaben von Helsinki und wurde von der Ethikkommission der TUM genehmigt.

In die Teilstudie zur Bestimmung der CS wurden nur die 39 der oben beschriebenen Schwimmer einbezogen, für die sämtliche aktuellen Wettkampfbestzeiten über 100, 200, 400, 800 und 1500 m vorlagen. Diese Teilstichprobe bestand aus 27 Schwimmern im Alter von $14,96 \pm 1,74$ Jahren, mit einer Größe von $177,5 \pm 8,9$ cm, einem Gewicht von $66,2 \pm 11,8$ kg und einer mittleren persönlichen Bestzeit über 200 m Freistil von $2:11,7 \pm 0:09,4$ min und 12 Schwimmerinnen im Alter von $15,2 \pm 2,6$ Jahren, einer Größe von $167,9 \pm 4,9$ cm, einem Gewicht von $53,9 \pm 5,0$ kg und einer mittleren persönlichen Bestzeit von $2:18,8 \pm 0:07,8$ min.

4.2. Design und Methodik der Testdurchführung

Alle Teilnehmer nahmen in der Vorbereitungsphase der Saison an einem 7 × 200 m Stufentest teil. Aus den ermittelten Laktat- und Geschwindigkeitswerten wurde anhand von vier verschiedenen Auswertungsmethoden die Schwellengeschwindigkeiten (AnS) bestimmt. Zum Vergleich wurden für jeden Schwimmer aus den aktuellen persönlichen Bestzeiten mehrere Kategorien der CS errechnet. Im Anschluss mussten die Athleten mit der mittleren Schwimmgeschwindigkeit aus den vier Bestimmungsmethoden der AnS einen Dauertest über 1500 m durchführen. Der zeitliche Abstand zwischen Stufentest und Dauertest betrug 15 ± 8 Tage.

4.2.1. Ablauf des Stufentests

Aufgrund der besten Übereinstimmung mit den allgemeingültigen Vorgaben für Stufentests, wurde das Testprotokoll von Pyne et al. (2000) für die Studie ausgewählt. Jeder Teilnehmer absolvierte einen Test mit sieben ansteigenden Belastungsstufen in der Kraultechnik. Kraul ist für die meisten Schwimmer die Hauptdisziplin. Die letzte Belastungsstufe sollte maximal geschwommen werden. Lediglich der Startabstand musste für schwächere Schwimmer angepasst werden. Alle Schwimmer mit einer BZ von unter 2:10 min starteten mit einem Startabstand von 5 min. Dabei wurden die Zielzeiten anhand der BZ jedes einzelnen Schwimmers berechnet: Die erste Stufe sollte in BZ + 35 s geschwommen werden, die folgenden jeweils 5 s schneller. Alle Schwimmer mit einer persönlichen BZ von über 2:10 min starteten auf 5:30 min, mit einer ersten Zielzeit von BZ + 49 s und einer Verringerung um jeweils 7 s pro Stufe.

In Stufe 1 bis 6 starteten die Schwimmer mit einem Abstoß vom Beckenrand, in der letzten Stufe mit einem Startsprung vom Block. Vor der letzten Stufe gab es eine zusätzliche Pause von 5 min. Der detaillierte Testablauf für die schnelleren Schwimmer ist in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Testablauf für den 7 × 200 m Stufentest für Schwimmer mit einer persönlichen BZ von unter 2:10 min.

Stufe	Zielzeit	Erwarteter Laktatwert	Startabstand	Zeitpunkt der Laktatprobenentnahme
1	BZ + 35 s	< 2 mmol/l	5 min	sofort
2	BZ + 30 s	< 2 mmol/l	5 min	sofort
3	BZ + 25 s	2–3 mmol/l	5 min	sofort
4	BZ + 20 s	3–4 mmol/l	5 min	sofort
5	BZ + 15 s	4–6 mmol/l	5 min	sofort
6	BZ + 10 s	6–8 mmol/l	5 min	sofort
7	BZ + 5 s	max.	10 min	1., 3., und 10. min

Der jeweilige Trainer stoppte für jede Stufe alle 50-m-Zwischenzeiten und die Endzeit und trug diese in eine Tabelle ein. Nach jedem Durchgang ermittelten die Schwimmer ihre Herzfrequenz durch Palpation an der Halsschlagader. Sofort danach kamen die Schwimmer aus dem Wasser und medizinisch ausgebildetes Personal entnahm eine 20- μ l-Probe von kapillarem Blut aus dem Ohrläppchen. Die Bestimmung der Laktatkonzentration wurde mit dem Biosen S-Line Analysegerät (EKF diagnostic, Barleben, GER) durchgeführt.

Alle Testteilnehmer wurden aufgefordert vor der Testdurchführung kein intensives Training zu absolvieren, sich kohlenhydratreich zu ernähren und mussten ein standardisiertes Aufwärmprogramm durchführen.

4.2.2. Auswertung des Stufentests

Zur Auswertung der LLK wurden vier verschiedene Schwellenkonzepte herangezogen:

- Die 4-mmol-Schwelle wie sie von Mader, Liesen, Heck, Philippi, Rost, Schürch, Hollmann (1976) vorgeschlagen wurde und im Pansoldtest verwendet wird: $\rightarrow V_{4,0}$
- Die individuelle Schwelle nach Simon et al. (1983) mit einer Berechnung von 1,5 mmol/l über dem Basislaktatwert an der aeroben Schwelle: $\rightarrow V_{+1,5}$
- Die D_{\max} -Methode nach Cheng et al. (1992): $\rightarrow VD_{\max}$

- Die original verwendete Berechnung von Pyne et al. (2000) mit der log-log-Methode nach Beaver et al. (1985): → **Vlog**

Zunächst wurden alle gestoppten Endzeiten in Geschwindigkeiten umgerechnet und zusammen mit den zugehörigen Laktatwerten als Messpunkte in ein Diagramm eingezeichnet. Anschließend wurde aus den sieben Messpunkten regressionsanalytisch die Exponentialfunktion $y = a * e^{bx}$ ermittelt.

- Zur Bestimmung der 4-mmol-Schwelle wird der Schnittpunkt bei 4 mmol/l gesucht und die entsprechende Schwimmgeschwindigkeit ermittelt.
- Die individuelle Schwelle nach Simon et al. (1983) wird durch Addition von 1,5 mmol/l zum Basislaktatwert vor dem ersten Anstieg berechnet.
- Bei der D_{max} -Methode wird zunächst der erste und letzte Messpunkt mit einer Geraden verbunden und anschließend der maximale Abstand zwischen dieser Geraden und der Regressionsfunktion bestimmt. An dieser Stelle kann die Schwellengeschwindigkeit abgelesen werden (vgl. Abbildung 31).

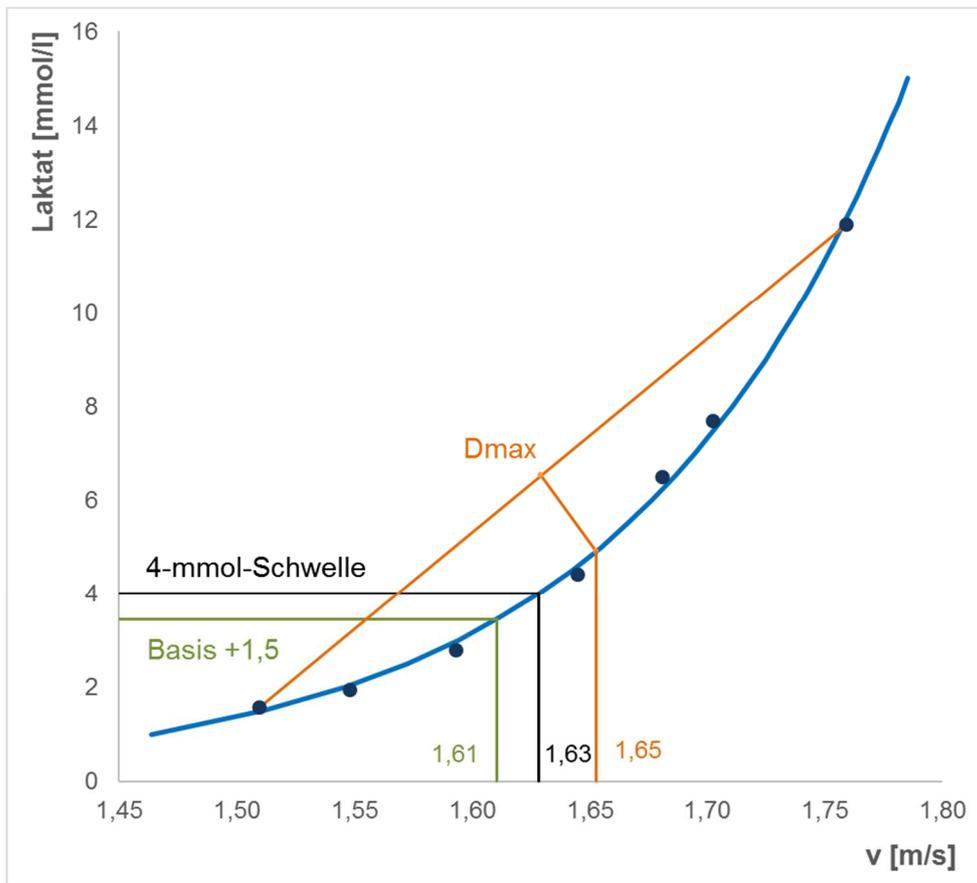


Abbildung 31: Darstellung der Ermittlung dreier der vier ausgewählten Methoden der Schwellenbestimmung an der LLK: die 4-mmol-Schwelle (schwarz), die +1,5-Methode (grün) und die D_{max} -Methode (orange). Die zugehörigen Geschwindigkeitswerte sind in der gleichen Farbe angezeigt.

Bei der log-log-Methode werden alle Messpunkte logarithmisch transformiert. Eine erste Regressionsgerade verbindet die beiden ersten Messpunkte aus dem rein aeroben Bereich, eine zweite Regressionsgerade wird durch die letzten fünf Messpunkte gelegt. Der Schnittpunkt der beiden Geraden zeigt die aerobe Schwelle an. Zur Bestimmung der anaeroben Schwelle wird der Schnittpunkt mit der 4-mmol/l Grenze ermittelt (vgl. Abbildung 32).

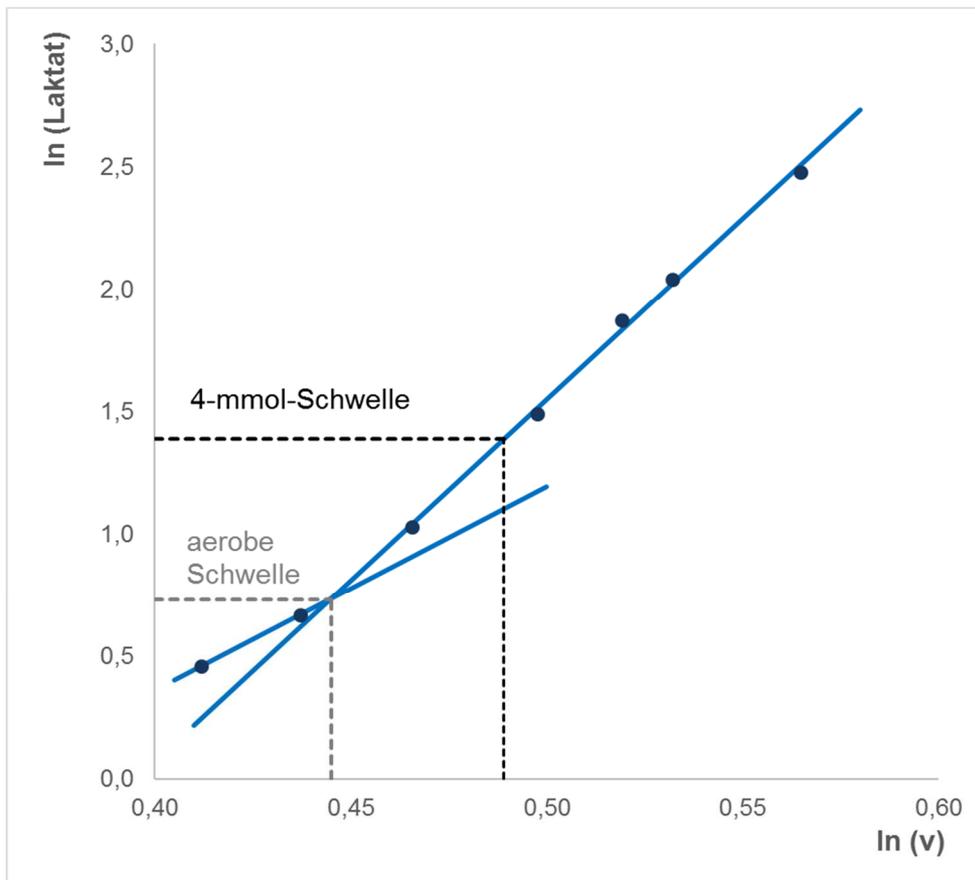


Abbildung 32: Darstellung der Ermittlung der Schwellenbestimmung mittels der log-log-Methode: sowohl die Laktat-, wie auch Geschwindigkeitswerte wurden logarithmiert. Eine Trendlinie verbindet die ersten beiden Messwerte aus dem aeroben Bereich, die zweite Trendlinie die folgenden fünf Messpunkte. Der Schnittpunkt bildet die aerobe Schwelle.

Alle Teilnehmer am Stufentest bekamen ein individuelles Ausgabeprotokoll mit den geschwommenen Zwischen- und Endzeiten, den Hf- und Laktatwerten sowie einer Abbildung der persönlichen LLK. Ein Beispielprotokoll findet sich im Anhang Abbildung 48.

4.2.3. Berechnung der einzelnen Kategorien der CS

Als weitere Möglichkeit zur Ermittlung einer Dauerbelastungsgrenze wird an einem Teil der gleichen Stichprobe die Bestimmungsform der CS getestet.

Da es in der Literatur uneinheitliche Vorschläge zur Einbeziehung verschiedener Streckenlängen gibt, sollen zunächst verschiedene Kombinationen zur Berechnung der CS miteinander verglichen werden. Im Kapitel 2.3.4.2. „Berechnung der CS“

konnten bereits die 50-m-Zeiten als für die Berechnung nicht valide ausgeschlossen werden und bleiben daher hier unberücksichtigt. Der Vergleich erfolgt zwischen unterschiedlichen Zusammenstellungen der 100-, 200-, 400-, 800- und 1500-m-Strecken. In einer weiteren Analyse werden die ermittelten Geschwindigkeiten mit der CS nach der Berechnungsformel von Zacca et al. (2016) anhand der 400-m-Bestzeit gegenübergestellt.

Zunächst wurden für jeden Schwimmer die persönlichen Bestzeiten in der Kraultechnik aus der offiziellen Datenbank des DSV abgefragt (vgl. <http://www.dsv.de/schwimmen/wettkampf-national/schwimmerabfrage/>).

Aus den Bestzeiten über 100, 200, 400, 800 und 1500 m wurden anhand der Steigung des Zeit-Distanz-Diagramms folgende Kategorien der CS und der ASC berechnet:

CS ₁₀₀₋₂₀₀ und ASC ₁₀₀₋₂₀₀ :	Berechnung aus den BZ über 100 und 200 m
CS ₁₀₀₋₄₀₀ und ASC ₁₀₀₋₄₀₀ :	Berechnung aus den BZ über 100, 200 und 400 m
CS ₁₀₀₋₈₀₀ und ASC ₁₀₀₋₈₀₀ :	Berechnung aus den BZ über 100, 200, 400 und 800 m
CS ₁₀₀₋₁₅₀₀ und ASC ₁₀₀₋₁₅₀₀ :	Berechnung aus den BZ über 100, 200, 400, 800 und 1500 m
CS ₂₀₀₋₄₀₀ und ASC ₂₀₀₋₄₀₀ :	Berechnung aus den BZ über 200 und 400 m
CS ₂₀₀₋₈₀₀ und ASC ₂₀₀₋₈₀₀ :	Berechnung aus den BZ über 200, 400 und 800 m
CS ₂₀₀₋₁₅₀₀ und ASC ₂₀₀₋₁₅₀₀ :	Berechnung aus den BZ über 200, 400, 800 und 1500 m

Zusätzlich wurde CS_{Zacca} entsprechend des Vorschlags von Zacca, Castro (2010) mit 92 % des maximalen 400-m-Tempos berechnet.

Alle Angaben erfolgen in m/s oder in der benötigten Zeit pro 200 m in Sekunden.

4.2.4. Validierung der CS im Dauertest

Im Rahmen einer von mir betreuten Zulassungsarbeit überprüfte Anna-Lena Maiberger (2018) an einer eigenen Stichprobe die CS im Dauertest. Es sollte

getestet werden, ob die für jede einzelne Person ermittelte $CS_{100-400}$ konstant geschwommen werden kann.

4.2.4.1. *Stichprobe*

An dem Validierungsversuch nahmen insgesamt 16 Schwimmer und Schwimmerinnen teil, davon zehn Männer (MW 19,3 Jahre) und sechs Frauen (MW 17,8 Jahre). Alle Athleten haben eine langjährige Trainings- und Wettkampferfahrung und nehmen an nationalen Wettkämpfen teil. Sie trainieren 6–8 Stunden pro Woche im Wasser, die meisten zusätzlich 2–3-mal pro Woche an Land. Alle Teilnehmer, bzw. deren Erziehungsberechtigten, gaben vor dem Testbeginn schriftlich ihre Zustimmung zur Testdurchführung incl. der Blutabnahmen.

4.2.4.2. *Berechnung der CS und Ablauf des Dauertests*

Die $CS_{100-400}$ wurde aus den Bestzeiten über 100, 200 und 400 m Freistil ermittelt. Diese Geschwindigkeit ergab eine individuelle 50-m-Durchgangszeit für jeden Schwimmer für den Dauertest.

Nach einem individuellen Einschwimmprogramm zwischen 1500 und 2500 m hatten die Teilnehmer eine Pause von 20–50 min. Kurz vor dem Start wurde den Athleten eine Laktatprobe entnommen. Die Schwimmer sollten ihre persönliche Geschwindigkeit im Dauertest über maximal 1500 m aufrechterhalten. Alle Teilnehmer schwammen in der Kraultechnik. Bei Unter- oder Überschreiten der Richtzeit bekamen die Schwimmer an jeder 50-m-Wende vom Beckenrand aus ein visuelles Zeichen. Dabei galt eine Abweichung von weniger als $\pm 0,5$ s als korrektes Tempo. Verfehlte ein Schwimmer die Tempovorgabe an drei Wenden nacheinander, musste er den Test abbrechen. Ansonsten erfolgte der Abbruch erst nach 1500 m. Sofort nach Ende des Tests ermittelten die Athleten ihre Herzfrequenz und eine weitere Laktatprobe wurde in der ersten und dritten Minute entnommen.

4.2.5. Vergleich der AnS aus dem Stufentest mit der $CS_{200-1500}$ und der $CS_{100-800}$

800

Um einen Eindruck zu bekommen, wie sich die beiden Grenzgeschwindigkeiten, zum einen aus einem Stufentest ermittelt und zum anderen aus dem CS-Modell, zueinander verhalten, erfolgte innerhalb der eigenen Stichprobe eine Gegenüberstellung der AnS und der CS.

Da keines der Schwellenkonzepte für einen Stufentest allgemein als Goldstandard zur Bestimmung der Ausdauerleistung anerkannt ist, wird der Mittelwert der vier berechneten Schwellengeschwindigkeiten (MW_{AnS}) als bester Schätzwert des realen Wertes angenommen. Dieser Mittelwert wird mit zwei ausgewählten Kategorien der CS verglichen werden. Da die Verwendung von Strecken zwischen 100 bzw. 200 m und 800 bzw. 1500 m aufgrund der Empfehlungen aus der Literatur (siehe Kapitel 2.3.4.2. „Berechnung der CS“) am sinnvollsten erscheint, werden die $CS_{100-800}$ und die $CS_{200-1500}$ für eine Gegenüberstellung mit dem Mittelwert der Ergebnisse aus dem Stufentest ausgewählt.

4.2.6. Ablauf des Dauertests zur Validierung der AnS aus dem 7 × 200 m Stufentest

Wie beim oben beschriebenen Validierungsversuch der CS, wurde auch die ermittelte mittlere Schwellengeschwindigkeit aus dem Stufentest im Dauertest auf ihre Validität überprüft werden.

Wie soeben begründet wurde der Mittelwert der vier Schwellenwerte des Stufentests als Geschwindigkeitsvorgabe für einen Dauertest festgelegt. Die Schwimmer sollten diese Geschwindigkeit so lange wie möglich durchhalten, maximal über 1500 m. An jeder 50-m-Wende bekamen die Schwimmer vom Beckenrand aus ein Zeichen, ob sie das richtige Tempo halten. Dabei galt eine Abweichung von weniger als $\pm 0,5$ s als korrektes Tempo. Wurde die Tempovorgabe drei Mal nacheinander verfehlt, wurde der Test abgebrochen. Nach Ende des Tests wurden sofort die Herzfrequenz gemessen und in der ersten und dritten Minute Laktatproben entnommen.

4.3. Statistik

Die einzelnen Schwellengeschwindigkeiten der vier Auswertungsmethoden, sowie alle Kategorien der CS werden als Mittelwert mit Standardabweichung dargestellt. Um den Unterschied zwischen den einzelnen Methoden zu bestimmen, wurde eine ANOVA mit Messwiederholung und einer Bonferroni-Korrektur angewendet.

Um zwei oder mehrere Messmethoden miteinander zu vergleichen, eignen sich die statistischen Verfahren der Konkordanz-, Korrelations- und Regressionsanalyse.

Im Gegensatz zum Korrelationskoeffizienten nach Pearson, der eine Angabe zur populationsbezogenen Gegebenheiten macht, sagt die Konkordanz etwas über die intraindividuellen Gegebenheiten aus (Looney & Hagan, 2015). Die Konkordanzanalyse beurteilt die Übereinstimmung von Messmethoden und von intraindividuellen Messergebnissen an denselben Personen. Wenn der reale Wert nicht bekannt ist, bzw. keine Referenzmessung zum Vergleich vorhanden ist, kann der reelle Wert mit diesem Verfahren abgeschätzt werden (Koch & Spörl, 2007).

Die Übereinstimmung der vier Schwellenkonzepte wurden mit Hilfe der Intraclass Korrelationskoeffizienten (ICC) mit den 95 % Konfidenzintervallen ermittelt. Diese Koeffizienten sind geeignet, um die Übereinstimmung beliebig vieler Beobachter (Anzahl k) zu überprüfen, wenn die Unterschiede zwischen den Methoden kleiner sind als der Unterschied der Mittelwerte. In diesem Fall wird das „Two-way mixed-effects model“ angewendet, da für alle Schwimmer alle vier Auswertungsmethoden ($k = 4$) benutzt werden, diese nicht zufällig zugeordnet wurden und nur diese von Interesse sind. Es wird auf absolute Übereinstimmung geprüft, die Mittelwertunterschiede bleiben als Fehlervarianz erhalten (absolute agreement).

Dabei gelten Bewertungen der ICC-Werte von

< 0,5	geringe Reliabilität,
0,5–0,75	moderate Reliabilität,
0,75–0,9	gute Reliabilität,
> 0,90	exzellente Reliabilität (Koo & Li, 2015).

Die intraindividuelle Übereinstimmung zweier einzelner Auswertungsmethoden wurde anhand der Konkordanz-Korrelationskoeffizienten r_{ccc} nach Lin (1989) ermittelt. Die Übereinstimmung anhand des Konkordanz-Korrelationskoeffizient r_{ccc} kann nach Koch und Spörl (2007) wie folgt bewertet werden:

<0,10	keine Übereinstimmung,
0,10–0,4	schwache Übereinstimmung,
0,41–0,6	deutliche Übereinstimmung,
0,61–0,8	starke Übereinstimmung,
0,81–1,0	fast vollständige Übereinstimmung.

Um einen Eindruck des Gesamtzusammenhangs zu bekommen, werden die Messpunkte in einer X–Y-Grafik mit einer orthogonalen Regressionsgeraden nach der Methode der kleinsten Quadrate verdeutlicht. Bei dieser Form der Regressionsgeraden erfolgt der Regressionsausgleich senkrecht zur resultierenden Geraden. Sie findet Anwendung, wenn die Messfehler in beiden Methoden identisch sind, der berechnete individuelle Mittelwert bildet den besten Schätzwert der Realität ab (Bland & Altman, 1986).

Der Vergleich zur 45°-Identitätsgerade zeigt einen möglichen Lokalisationsshift (bias, Parallelverschiebung von der Identitätsgeraden) und Skalenshift (Drehung der Kalibrierungsgeraden) an. Bei einer idealen Konkordanz würden alle Messwerte auf der Identitätsgeraden liegen, beide Methoden würden exakt das Gleiche messen.

Da keines der Schwellenkonzepte als Standard anerkannt ist und demzufolge der wahre Schwellenwert nicht bekannt ist, sollen zusätzlich Bland-Altman-Diagramme (Bland & Altman, 1986) mögliche systematische Skalenunterschiede (bias \bar{d}) und intraindividuelle Differenzen veranschaulichen. Dabei werden die intraindividuellen Mittelwerte gegen die Differenzen beider Messwerte aufgetragen. Die Grenzlinien im Abstand von ± 1.96 -mal der Standardabweichung (Limits of agreement) decken extreme Abweichungen auf und lassen eine Beurteilung der Varianzhomogenität zu. Innerhalb dieser Grenzen liegen 95% der Messwerte. Außerdem kann anhand dieser Grenzlinien entschieden werden, ob die beiden Messmethoden untereinander austauschbar wären. Für die Schwimmgeschwindigkeit könnte eine Abweichung von ca. 1 s pro 100 m als akzeptabel angesehen werden.

Der Verständlichkeit halber wurden in den Diagrammen und Koeffizienten jeweils die 200-m-Zeiten und nicht die Schwimmgeschwindigkeiten herangezogen.

Die Mittelwerte und Differenzen wurden mit dem Shapiro-Wilk Test auf Normalverteilung überprüft. Im Falle einer Sphärizität findet die Greenhouse-Geisser-Korrektur Anwendung. Als Signifikanzniveau wurde $p = 0,05$ festgelegt. Alle Berechnungen erfolgten mittels SPSS (IBM SPSS Statistics 23.0) oder Microsoft Excel 2016.

Der direkte Vergleich einzelner Kategorien der CS erfolgt ebenfalls anhand von Konkordanz-Korrelationskoeffizienten.

Der Unterschied zwischen den Mittelwerten einzelner Grenzgeschwindigkeiten wurde mittels t-Test auf Signifikanz überprüft. Die Einordnung der Effektstärke erfolgte entsprechend der Empfehlungen von Cohen (1988):

$|d| > 0,2$ kleiner Effekt,

$|d| > 0,5$ mittlerer Effekt,

$|d| > 0,8$ großer Effekt.

Die Darstellung der Ergebnisse aus den beiden Dauertests zur Validierung der CS₁₀₀₋₄₀₀ und der AnS erfolgt deskriptiv.

Anhand eines Dropout-Diagramms wird grafisch veranschaulicht, wann wie viele Teilnehmer aufgeben mussten und wie viele Schwimmer bis 1500 m durchgehalten haben. Die Differenz zwischen der vorgegebenen Schwimgeschwindigkeit und der tatsächlich erreichten mittleren Geschwindigkeit wird für jeden Schwimmer im Dropout-Diagramm angezeigt.

Der Unterschied zwischen den berechneten Laktatwerten an der Schwellengeschwindigkeit und den tatsächlichen Laktatwerten im Dauertest wurde mittels t-Test auf Signifikanz überprüft.

4.4. Ergebnisse

4.4.1. Ergebnisse des Vergleichs der Schwellenkonzepte

Folgende Mittelwerte der berechneten Schwellengeschwindigkeiten, ausgedrückt als Zeit pro 200 m, mit den zugehörigen Standardabweichungen sowie die zugehörigen Laktatkonzentrationen wurden im Stufentest an den 54 Schwimmern ermittelt:

t_{\log} :	$153,3 \pm 8,3$ s / 200 m,	4 mmol/l;
$t_{4.0}$:	$153,6 \pm 8,9$ s / 200 m,	4 mmol/l;
$t_{+1.5}$:	$155,0 \pm 7,9$ s / 200 m,	$3,76 \pm 0,92$ mmol/l;
$t_{D_{\max}}$:	$153,1 \pm 8,7$ s / 200 m,	$4,24 \pm 1,08$ mmol/l.

Alle Variablen sind normalverteilt. Es liegt keine Heteroskedastizität vor.

Die einfache Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Schwellen ($F = 5,2$, $p = 0.009$, $\eta^2 = 0,09$). Die Überprüfung auf Übereinstimmung der vier Auswertungsmethoden ergab einen ICC von 0,888 (95 % Konfidenzintervall: 0,837–0,928). Der paarweise Vergleich ergab für alle Konkordanz-Korrelationskoeffizienten $r_{\text{ccc}} > 0,82$ und $\text{ICC} > 0,84$. Alle orthogonalen Regressionsgeraden mit der Funktion $y = b * x + a$ haben eine Steigung b zwischen 0,87 und 1,12 und einen y-Achsenabschnitt a zwischen -20,1 und 22,0. Das bedeutet, dass alle Regressionsgeraden sehr nahe an der 45°-Identitätsgeraden mit der Funktion $y = x$, also $b = 1$ und $a = 0$, liegen.

Abbildung 33 zeigt den X–Y-Plot für den Vergleich von t_{\log} und $t_{+1.5}$. Die Funktion der orthogonalen Regressionsgeraden ist $y = 0,94 * x + 11,69$, und $r_{\text{ccc}} = 0,85$. Das zugehörige Bland-Altman-Diagramm in Abbildung 34 zeigt die Übereinstimmung der Messmethoden. Der bias \bar{d} von 1,74 und die 95 % limits of agreement $\pm 7,88$ s deuten auf einen systematischen Messfehler von ca. 1,7 s über 200 m, aber mit individuellen Abweichungen von fast 8 s auf 200 m.

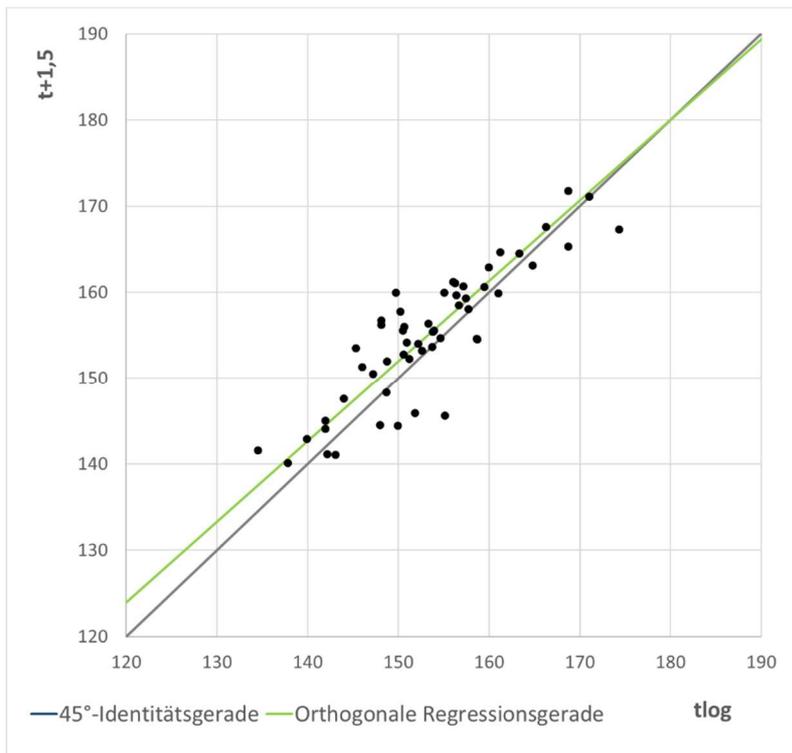


Abbildung 33: X–Y-Diagramm mit orthogonaler Regressionsgeraden für den Vergleich von t_{log} und $t_{+1,5}$ (grün) und der 45°-Identitätsgeraden (grau).

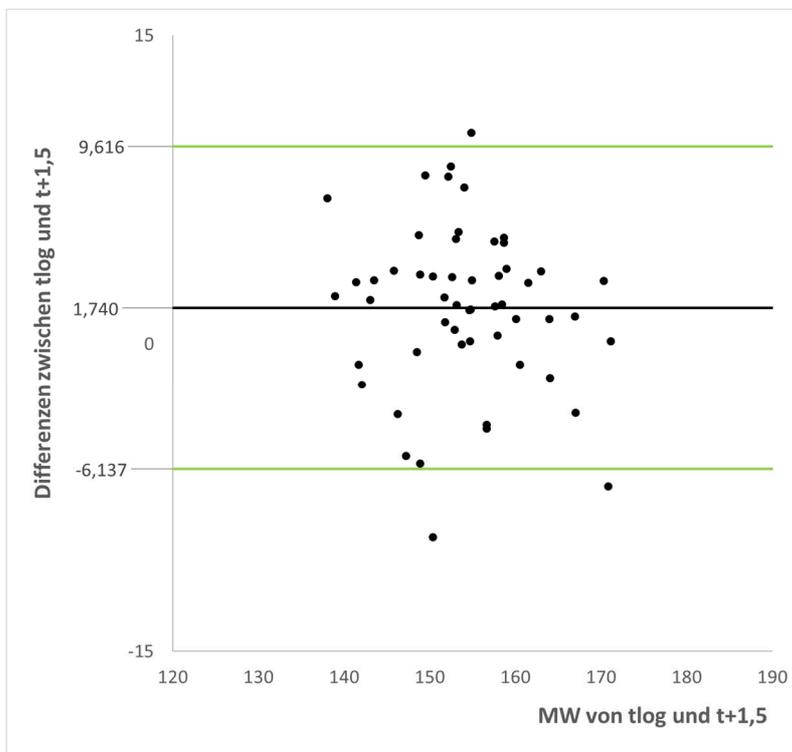


Abbildung 34: Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich von t_{log} und $t_{+1,5}$ mit einem bias \bar{d} von 1,74 s und 95 % limits of agreement von $\pm 7,88$ s (grün).

Ähnliche Ergebnisse ergaben auch die weiteren fünf Vergleiche, die in Tabelle 24 und den Abbildungen 35–39 dargestellt sind.

Tabelle 24: Ergebnisse aller paarweisen Vergleiche der Berechnungsmethoden mit Funktion der orthogonalen Regressionsgeraden, ICC, r_{ccc} , und $\text{bias } \bar{d}$ und 95% limits of agreement ($\pm 1,96 \text{ SD}$).

Verglichene Methoden	Orthogonale Regressionsgeraden	ICC	r_{ccc}	$\text{bias } \bar{d}$ [s] und 95% limits of agreement
t_{log} und $t_{+1,5}$	$y = 0,94x + 11,69$	0,877	0.846	$1,740 \pm 7,876$
t_{log} und $t_{4,0}$	$y = 0,94x + 9,22$	0,992	0,974	$-0,266 \pm 2,102$
t_{log} und t_{Dmax}	$y = 1,05x - 7,87$	0,880	0,868	$-0,204 \pm 8,175$
$t_{4,0}$ und $t_{+1,5}$	$y = 0,87x + 22,02$	0,845	0,822	$1,474 \pm 9,155$
$t_{4,0}$ und t_{Dmax}	$y = 0,98x + 3,20$	0,844	0,832	$-0,470 \pm 9,633$
t_{Dmax} und $t_{+1,5}$	$y = 1,12x - 20,67$	0,889	0,853	$-1,944 \pm 7,651$

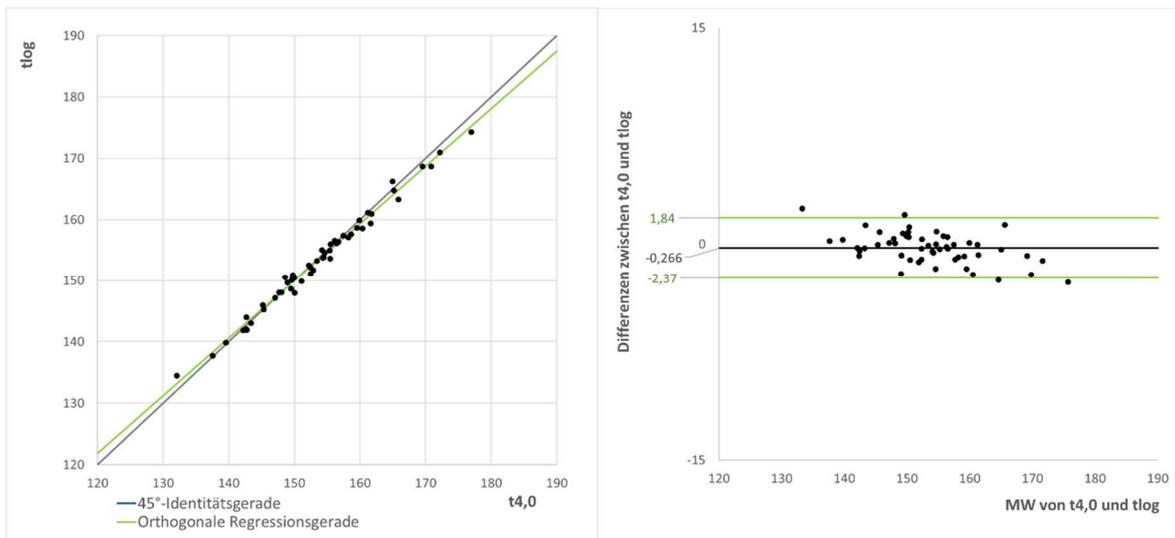


Abbildung 35: X–Y-Diagramm und Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich von $t_{4,0}$ und t_{log} .

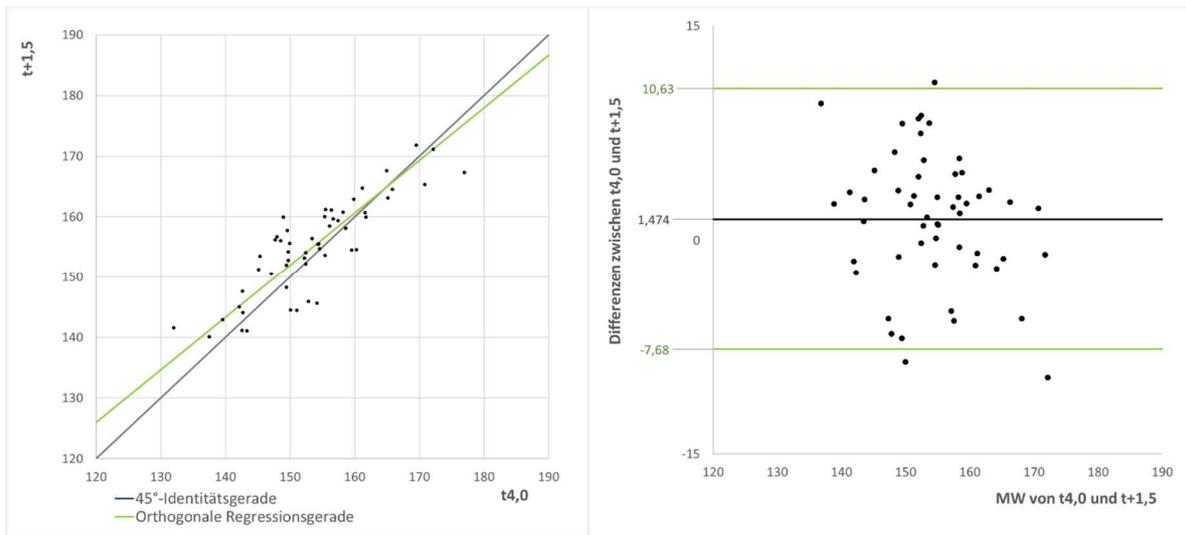


Abbildung 36: X-Y-Diagramm und Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich von $t_{4,0}$ und $t_{+1,5}$.

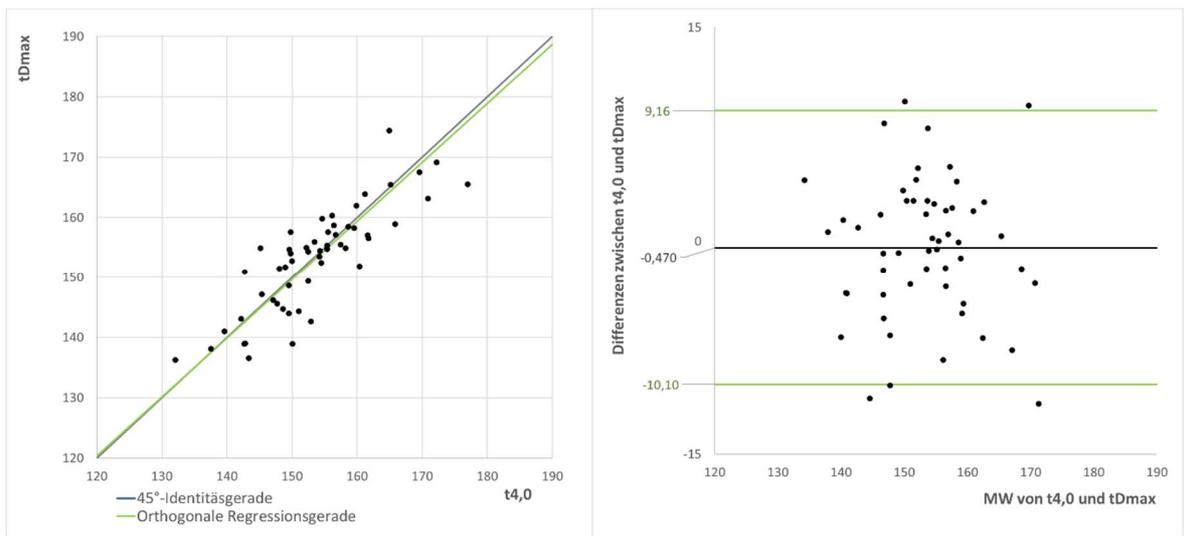


Abbildung 37: X-Y-Diagramm und Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich von $t_{4,0}$ und t_{Dmax} .

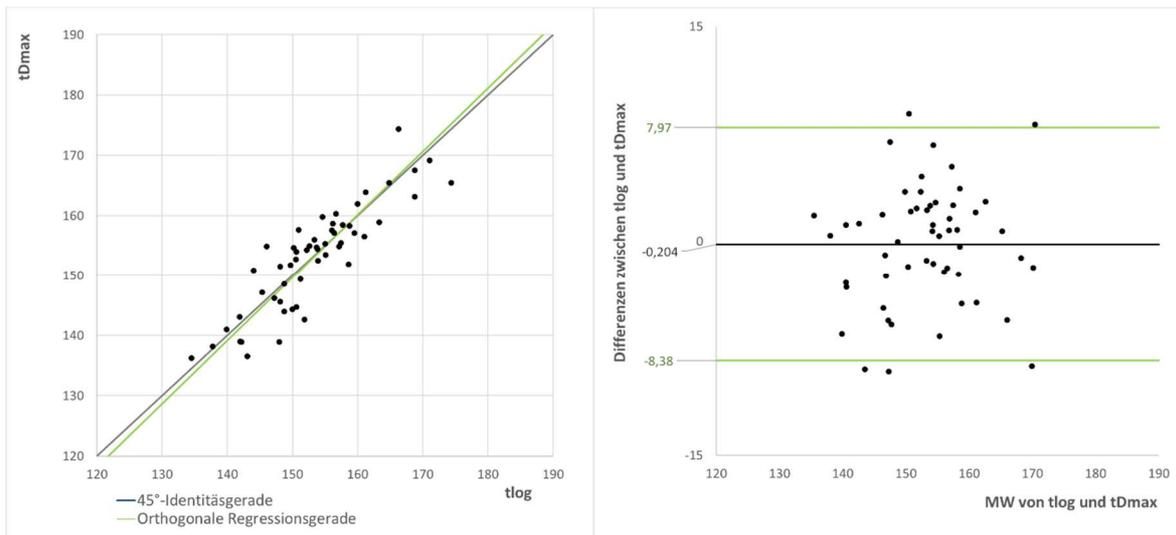


Abbildung 38: X–Y-Diagramm und Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich von t_{log} und t_{Dmax} .

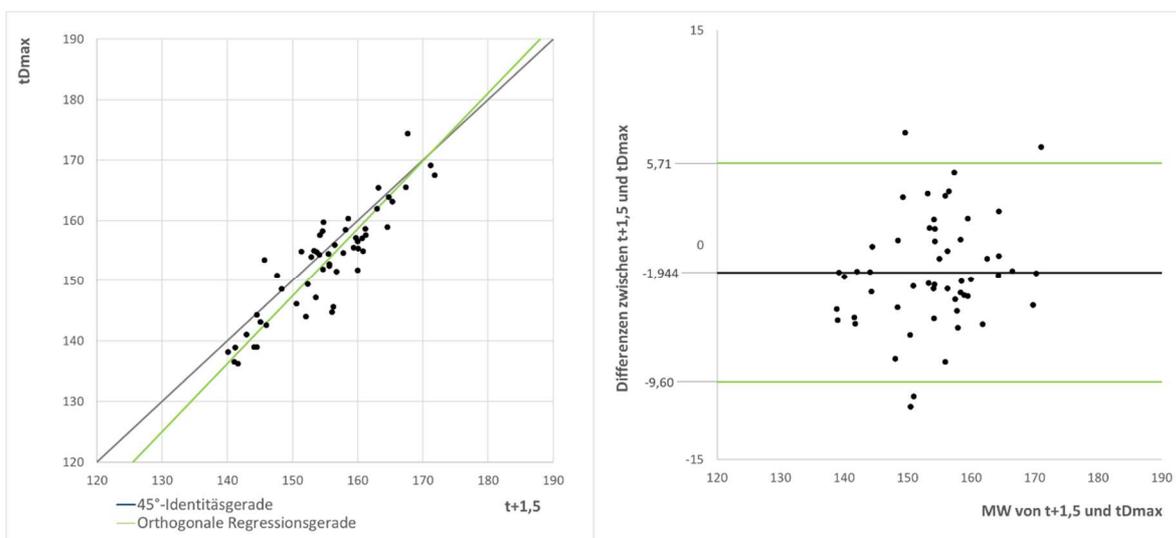


Abbildung 39: X–Y-Diagramm und Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich von $t_{+1,5}$ und t_{Dmax} .

4.4.2. Vergleich der einzelnen Kategorien der CS untereinander

Beim Vergleich der einzelnen Kategorien der CS bestätigt sich die Erfahrung der bereits veröffentlichten Untersuchungen zu diesem Thema: Je länger die Strecken, die zur Berechnung herangezogen werden, desto langsamer ist die berechnete CS. In der Tabelle 25 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der gesamten Stichprobe, sowie getrennt nach Geschlecht, für jede Kategorie zu entnehmen.

Tabelle 25: Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden der CS durch Einbeziehen unterschiedlicher Streckenlängen zwischen 100 und 1500 m und der Bestimmungsmethode nach Zacca (Mittelwert und Standardabweichung für alle Teilnehmer, nur Männer und nur Frauen in m/s).

v [m/s]	alle (n = 39)		Männer (n = 27)		Frauen (n = 12)	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD
CS ₁₀₀₋₂₀₀	1,376	± 0,113	1,394	± 0,119	1,336	± 0,093
CS ₁₀₀₋₄₀₀	1,319	± 0,099	1,336	± 0,097	1,281	± 0,096
CS ₁₀₀₋₈₀₀	1,284	± 0,105	1,286	± 0,113	1,279	± 0,089
CS ₁₀₀₋₁₅₀₀	1,264	± 0,107	1,276	± 0,101	1,237	± 0,120
CS ₂₀₀₋₄₀₀	1,305	± 0,108	1,319	± 0,108	1,275	± 0,109
CS ₂₀₀₋₈₀₀	1,273	± 0,108	1,272	± 0,117	1,275	± 0,090
CS ₂₀₀₋₁₅₀₀	1,258	± 0,110	1,271	± 0,103	1,231	± 0,125
CS _{Zacca}	1,280	± 0,088	1,298	± 0,086	1,239	± 0,081

Anhand der Mittelwerte aller Teilnehmer kann die folgende Reihenfolge für die Kategorien der CS erstellt werden (vgl. auch Abb. 40):

$$CS_{100-200} > CS_{100-400} > CS_{200-400} > CS_{100-800} > CS_{200-800} > CS_{100-1500} > CS_{200-1500}$$

Die Berechnung entsprechend der Empfehlungen von Zacca, Castro (2010) ergab einen Mittelwert von $1,280 \pm 0,088$ m/s. Dies entspricht in etwa dem Wert der CS₁₀₀₋₈₀₀.

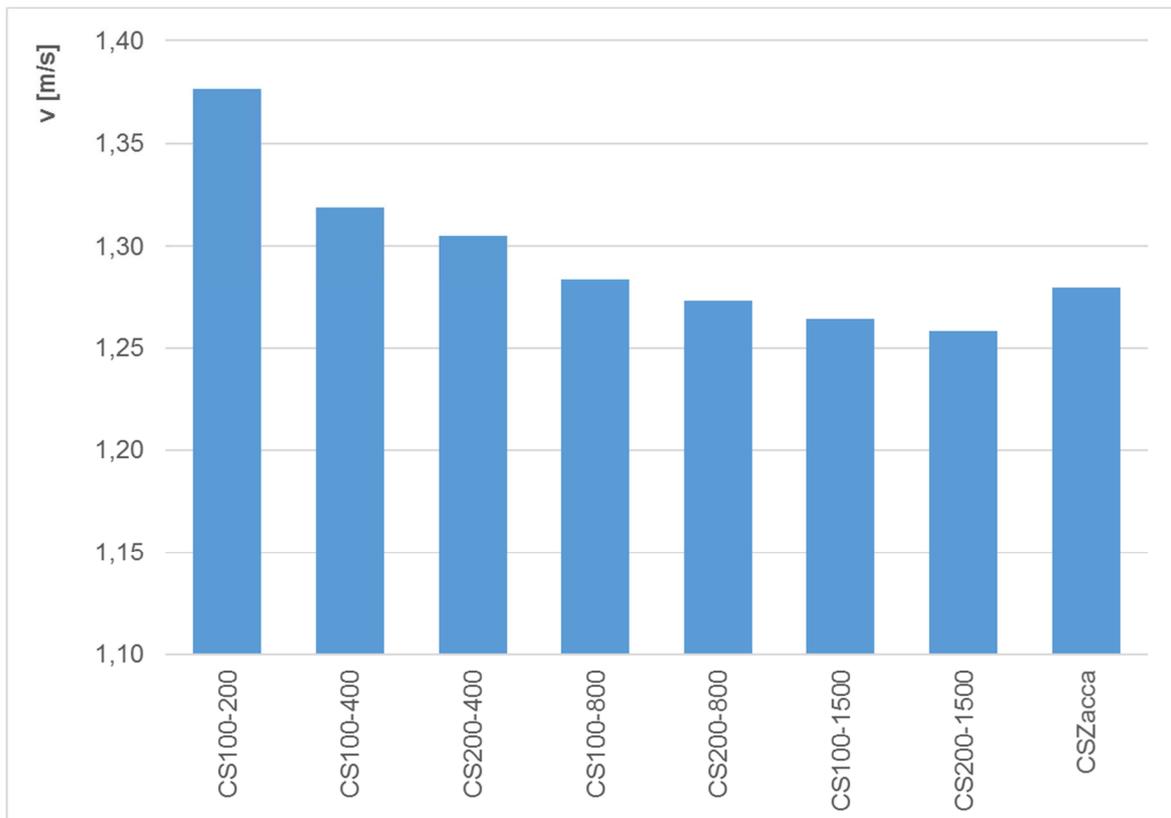


Abbildung 40: Mittelwerte der einzelnen Kategorien der CS

Die meisten Kategorien des CS unterscheiden sich statistisch signifikant voneinander. Nur zwischen einigen Langstrecken-Kategorien und zwischen CS₂₀₀₋₄₀₀ und CS₁₀₀₋₈₀₀, sowie CS₁₀₀₋₄₀₀ und CS₂₀₀₋₄₀₀ bestehen keine signifikanten Unterschiede. Die CS₁₀₀₋₂₀₀ unterscheidet sich signifikant von allen anderen Kategorien. Die CS_{Zacca} unterscheidet sich nur von den Kurzstrecken-Kategorien, zu den Kategorien, bei denen 800 oder 1500 m einbezogen werden, gibt es keinen signifikanten Unterschied. Die einzelnen Vergleiche sind in der Korrelationsmatrix in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: Korrelationsmatrix für die Vergleiche zwischen den verschiedenen Kategorien der CS. Grau markiert die signifikanten Unterschiede.

	CS ₂₀₀₋₁₅₀₀	CS ₁₀₀₋₁₅₀₀	CS ₂₀₀₋₈₀₀	CS ₁₀₀₋₈₀₀	CS ₂₀₀₋₄₀₀	CS ₁₀₀₋₄₀₀	CS ₁₀₀₋₂₀₀	CS _{Zacca}
CS ₂₀₀₋₁₅₀₀	1							
CS ₁₀₀₋₁₅₀₀	0,000	1						
CS ₂₀₀₋₈₀₀	1,000	1,000	1					
CS ₁₀₀₋₈₀₀	0,773	1,000	0,000	1				
CS ₂₀₀₋₄₀₀	0,004	0,009	0,011	0,167	1			
CS ₁₀₀₋₄₀₀	0,000	0,000	0,000	0,000	0,175	1		
CS ₁₀₀₋₂₀₀	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	1	
CS _{Zacca}	1,000	1,000	1,000	1,000	0,024	0,000	0,000	1

Neben den Kategorien der CS wurden auch diejenigen für die ASC bestimmt. Siehe Tabelle 27. Die Ergebnisse aller Teilnehmer schwanken zwischen $16,75 \pm 4,00$ m und $36,48 \pm 18,47$ m und betragen im Mittel $27,27 \pm 10,99$ m.

Tabelle 27: Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden der ASC durch Einbeziehen unterschiedlicher Streckenlängen zwischen 100 und 1500 m (Mittelwert und Standardabweichung für alle Teilnehmer, nur Männer und nur Frauen).

ASC [m]	alle (n = 39)		Männer (n = 27)		Frauen (n = 12)	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD
ASC ₂₀₀₋₁₅₀₀	36,48	± 18,47	36,47	± 16,28	36,50	± 23,50
ASC ₁₀₀₋₁₅₀₀	31,33	± 12,95	31,65	± 11,26	30,60	± 16,69
ASC ₂₀₀₋₈₀₀	32,07	± 14,19	36,31	± 14,23	22,54	± 8,57
ASC ₁₀₀₋₈₀₀	26,85	± 9,72	29,67	± 9,89	20,50	± 5,64
ASC ₂₀₀₋₄₀₀	25,97	± 11,50	26,21	± 12,71	25,41	± 8,64
ASC ₁₀₀₋₄₀₀	21,47	± 6,08	21,97	± 6,54	20,32	± 4,93
ASC ₁₀₀₋₂₀₀	16,75	± 4,00	17,45	± 4,10	15,17	± 3,42

Damit ergibt sich genau die entgegengesetzte Reihenfolge wie bei den entsprechenden Kategorien der CS.

ASC₂₀₀₋₁₅₀₀ > ASC₁₀₀₋₁₅₀₀

> ASC₂₀₀₋₈₀₀ > ASC₁₀₀₋₈₀₀ > ASC₂₀₀₋₄₀₀

> ASC₁₀₀₋₄₀₀ > ASC₁₀₀₋₂₀₀

4.4.3. Vergleich der CS_{Zacca} mit der $CS_{100-800}$ und der $CS_{200-1500}$

Die CS_{Zacca} , berechnet nach den Vorgaben von Zacca, Castro (2010) mit $v_{400} * 0,92$ ($156,93 \pm 10,74$ s / 200 m), und die $CS_{100-800}$ ($156,79 \pm 12,75$ s / 200 m) unterscheiden sich in den Mittelwerten nicht signifikant ($t_{76} = 0,05$, $p = 0,96$). Auch der Konkordanz-Korrelationskoeffizient gibt mit $r_{ccc} = 0,826$ eine fast vollständige Übereinstimmung an. Im X–Y-Diagramm (Abb. 41) ist zu erkennen, dass die beiden Geschwindigkeiten sehr gut übereinstimmen. Die orthogonale Regressionsgerade wird durch die Funktion $y = 0,82 * x + 28,66$ beschrieben. Aus dem Bland-Altman-Diagramm ergibt sich eine mittlere Abweichung der beiden Geschwindigkeiten von $0,14$ s pro 200 m, aber individuellen Abweichung von $\pm 13,08$ s / 200 m.

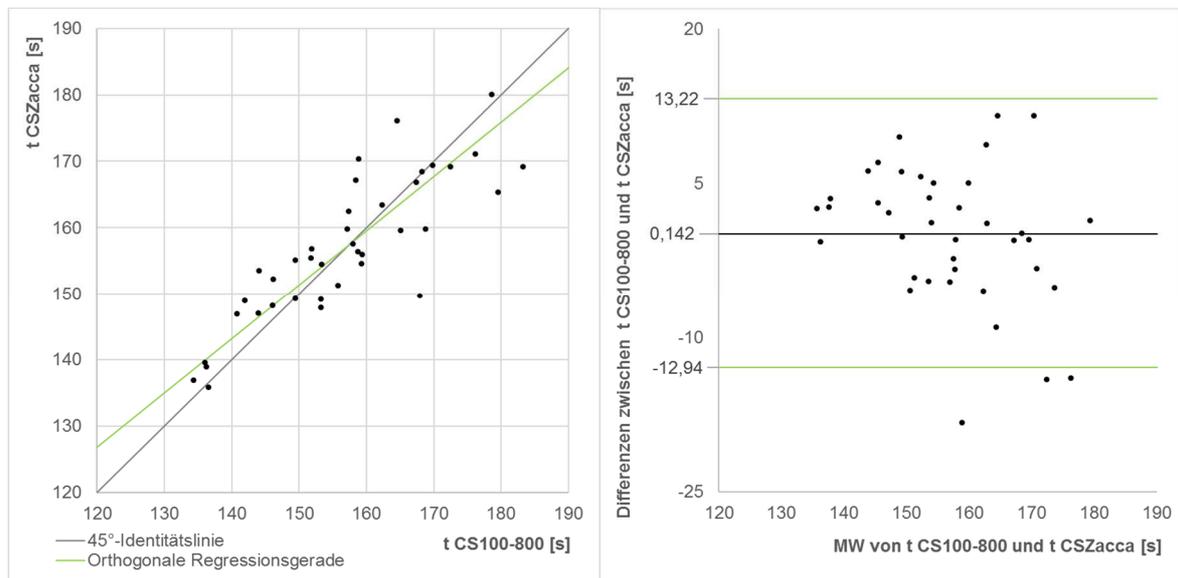


Abbildung 41: X–Y-Diagramm mit orthogonaler Regressionsgeraden für den Vergleich von $CS_{100-800}$ und CS_{Zacca} mit $y = 0,82x + 28,66$ (grün) und der 45°-Identitätsgeraden (grau) und zugehörigem Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich mit einem bias \bar{d} von $0,14$ s und 95 % limits of agreement von $\pm 13,08$ s (grün).

Die CS_{Zacca} unterscheidet sich im Mittel ebenfalls nicht signifikant von der langsamsten Geschwindigkeit, der $CS_{200-1500}$ ($t_{76} = -1,13$, $p = 0,26$). Mit $r_{ccc} = 0,711$ wird eine starke Übereinstimmung angezeigt.

4.4.4. Validierungsversuch der CS₁₀₀₋₄₀₀ im Dauertest

In der separaten Studie von Maiberger (2018) konnten von den insgesamt 16 Schwimmern nur sehr wenige die berechnete CS₁₀₀₋₄₀₀ im Dauertest durchhalten.

Die kritische Schwimmgeschwindigkeit der Teilnehmer lag zwischen 1,13 und 1,46 m/s. Der Mittelwert betrug $1,30 \pm 0,08$ m/s.

Nur insgesamt drei Teilnehmer (zwei männliche Athleten und eine weibliche Athletin) haben es geschafft, die 1500 m im vorgegebenen Tempo zu absolvieren. Sie machen 18,8 % der Stichprobe aus. Weitere sieben Schwimmer haben vor oder bei 1000 m abgebrochen. Die restlichen sechs Teilnehmer konnten nicht länger als 500 m mit der CS durchhalten. Im Durchschnitt wurde der Test bereits nach 750 m abgebrochen. Das ist die Hälfte der angedachten 1500-m-Marke (Vgl. Dropout-Diagramm in Abbildung 42).

Die Laktatkonzentrationen vor dem Start befanden sich zwischen 0,79 mmol/l und 1,87 mmol/l. Im Durchschnitt hatten die Athleten vor der Belastung eine Laktatkonzentration von $1,28 \pm 0,33$ mmol/l. Die Laktatwerte nach dem Dauertest variierten zwischen 5,68 mmol/l und 10,84 mmol/l, der Mittelwert lag bei $8,16 \pm 1,55$ mmol/l Laktat. Die Herzfrequenz erreichte im Mittel 188 ± 13 Schlägen pro Minute. Die Spannweite lag zwischen 162 und 210 Herzschlägen pro Minute (siehe Tabelle 28).

Tabelle 28: Ergebnisdaten der einzelnen Teilnehmer an der Studie zur Validierung der $CS_{100-400}$ im Dauertest mit Mittelwerten und Standardabweichung.

Tln.	$CS_{100-400}$ [m/s]	Laktatwert vor dem Test [mmol/l]	Zielzeit / 100 m [s]	Tatsächlich geschwom- mene Zeit / 100 m [s]	Differenz zw. Zielzeit und realer Zeit [s]	Geschwom- mene Strecke [m]	Hf nach dem Test [bpm]	Laktatwert nach dem Test [mmol/l]
A	1,320	1,02	75,4	76,2	0,8	1500	174	5,96
B	1,254	1,83	79,8	80,2	0,4	1500	174	6,78
C	1,127	1,12	88,8	88,2	-0,6	1500	198	5,68
D	1,237	1,43	80,8	81,6	0,8	1000	168	8,87
E	1,219	0,81	82,0	82,4	0,4	700	198	7,58
F	1,370	1,49	73,0	74,6	1,6	600	186	8,89
G	1,294	1,19	77,2	80,4	3,2	600	198	9,55
H	1,243	1,17	80,4	82,4	2,0	600	162	8,06
I	1,261	1,63	79,4	80,4	1,0	600	174	8,97
J	1,217	0,82	82,2	83,6	1,4	600	180	5,75
K	1,463	1,87	68,4	71,4	3,0	500	198	9,3
L	1,350	1,46	74,0	75,8	1,8	500	192	7,13
M	1,261	0,79	79,2	82,0	2,8	500	192	7,67
N	1,409	1,24	71,0	75,2	4,2	450	198	10,4
O	1,363	1,44	73,4	75,4	2,0	450	210	9,07
P	1,383	1,15	72,4	75,0	2,6	400	198	10,84
MW	1,298	1,28	77,3	79,1	1,7	750	188	8,16
SD	0,084	0,33	5,0	4,2	1,2	384	13	1,55

Da die Schwimmer auch bei einer Überschreitung der vorgegebenen Durchgangszeit von bis zu 0,5 s an der Wende ein positives Signal bekamen, war es möglich, dass sie bei jeder 50-m-Teilstrecke bis zu 0,4 s zu langsam geschwommen sind. Zusammen mit den zwei möglichen Überschreitungen der Zielzeit konnte eine langsamere Durchschnittsgeschwindigkeit entstehen. Die Differenz zwischen der vorgegebenen Zielzeit und der tatsächlich geschwommenen Zwischenzeit über jeweils 100 m wird durch die roten Balken in Abb. 42 dargestellt. Im Mittel lagen die Schwimmer um $1,7 \pm 1,2$ s / 100 m über der Zielzeit. Nur eine Person ist um 0,6 s / 100 m schneller als die angegebene Zielzeit geschwommen.

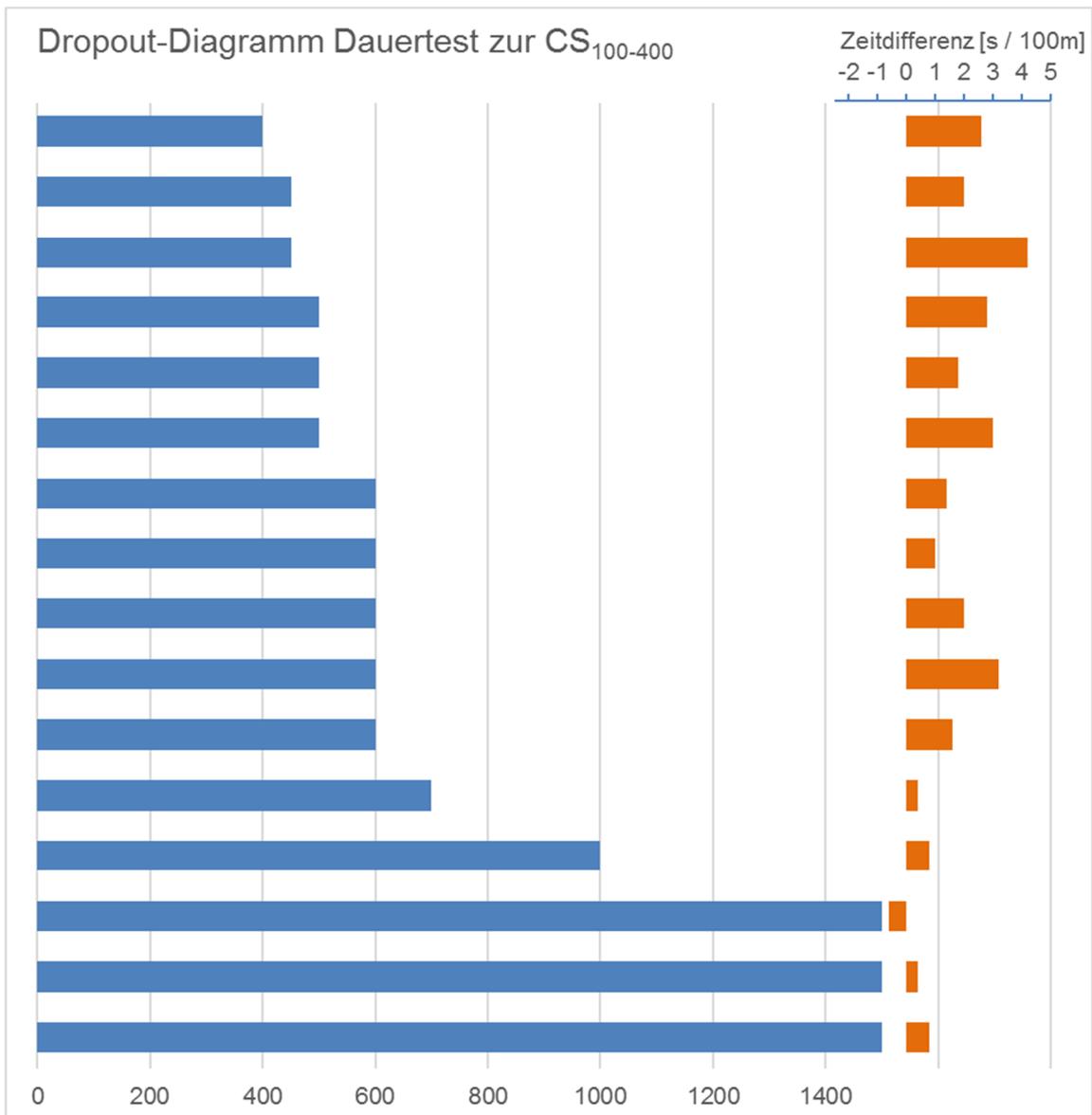


Abbildung 42: Dropout-Diagramm für den Dauertest zur Validierung der CS₁₀₀₋₄₀₀ mit Angabe der Distanz und der Zeitdifferenz zwischen vorgegebener Geschwindigkeit und tatsächlich geschwommener Zeit in s / 100 m.

4.4.5. Vergleich der Geschwindigkeit an der AnS aus dem Stufentest mit der CS₂₀₀₋₁₅₀₀ und der CS₁₀₀₋₈₀₀

Die CS₂₀₀₋₁₅₀₀ ($160,1 \pm 13,8$ s / 200 m) und die mittlere Geschwindigkeit an der anaeroben Schwelle, ermittelt aus den vier Schwellengeschwindigkeiten aus dem Stufentest ($151,3 \pm 6,9$ s / 200 m), unterscheiden sich signifikant ($t_{76} = 3,58$, $p =$

0,001) mit einer Effektstärke d von 0,81. Auch der r_{ccc} zeigt mit 0,62 lediglich eine moderate Reliabilität an.

Im X–Y-Diagramm (Abb. 43) ist zu erkennen, dass sich die beiden Geschwindigkeiten bzw. Zeiten pro 200 m besonders im Bereich der leistungsschwächeren Schwimmer unterscheiden. Dort driften die orthogonale Regressionsgerade ($y = 0,41 * x + 85,3$) und die 45°-Identitätsgerade besonders weit auseinander. Aus dem Bland-Altman-Diagramm ist abzulesen, dass die $CS_{200-1500}$ im Mittel um 8,82 s / 200 m langsamere Geschwindigkeiten angibt als die Schwellengeschwindigkeit mit einer individuellen Abweichung von $\pm 19,24$ s / 200 m.

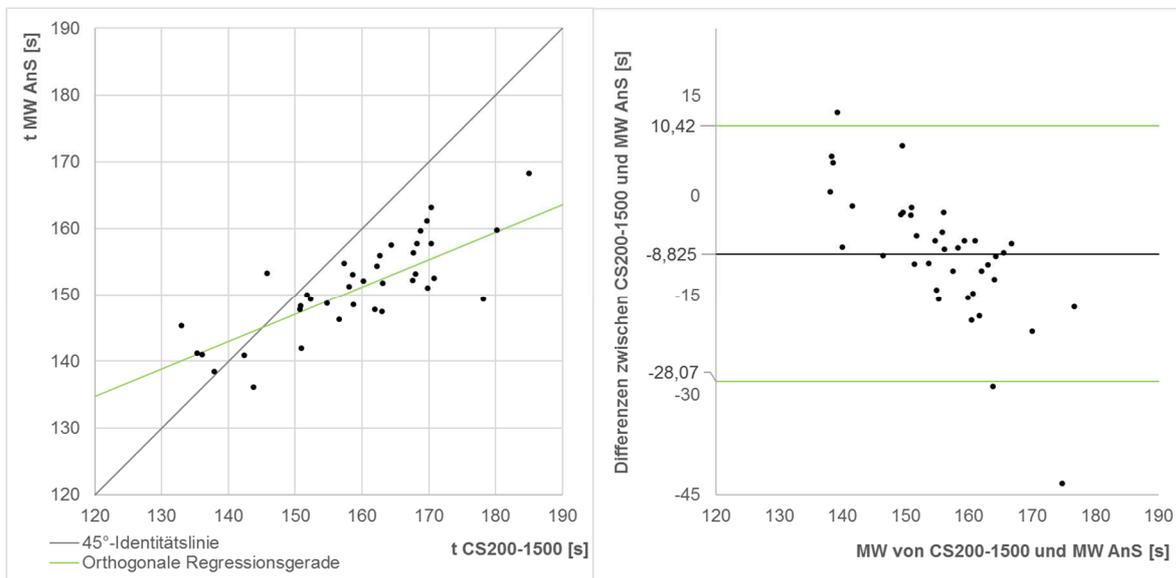


Abbildung 43: X–Y-Diagramm mit orthogonaler Regressionsgeraden für den Vergleich von t_{AnS} und $CS_{200-1500}$ mit $y = 0,41x + 85,3$ (grün) und der 45°-Identitätsgeraden (grau) und zugehörigem Bland-Altman-Diagramm mit einem bias \bar{d} von -8,82 s und 95 % limits of agreement von $\pm 19,24$ s (grün).

Ein sehr ähnliches Ergebnis zeigt sich für den Vergleich zwischen dem Mittelwert der Schwellengeschwindigkeiten aus dem Stufentest $v_{MW_{AnS}}$ und der $CS_{100-800}$.

Die $CS_{100-800}$ ($156,8 \pm 12,8$ s / 200 m) unterscheidet sich signifikant von der $v_{MW_{AnS}}$ ($t_{76} = 2,38$, $p = 0,020$), wenn auch mit einer geringeren Effektstärke d von 0,54. Auch der r_{ccc} zeigt mit 0,62 lediglich eine moderate Reliabilität an. Die orthogonale Regressionsgerade hat eine Funktion $y = 0,48 * x + 75,63$, das Bland-Altman-

Diagramm weist einen bias von -5,53 s pro 200 m mit 95 % limits of agreement von $\pm 15,91$ s auf.

Abschließend zeigt Tabelle 29 ein Gesamtüberblick über alle ermittelten Grenzggeschwindigkeiten aus dem Stufentest, dem Mittelwert dieser Schwellengeschwindigkeiten und allen einzelnen Kategorien der CS. Die Abbildung 44 zeigt diese Mittelwerte in Form eines Balkendiagramms. Folgende Reihenfolge auf der Basis der Mittelwerte ist auszumachen:

$$\begin{aligned}
 &CS_{100-200} > t_{Dmax} > t_{log} = t_{4,0} \\
 &> t_{MW_{AnS}} > CS_{100-400} > t_{+1,5} \\
 &> CS_{200-400} > CS_{100-800} > CS_{Zacca} \\
 &> CS_{200-800} > CS_{100-1500} > CS_{200-1500}
 \end{aligned}$$

Tabelle 29: Mittelwerte und Standardabweichungen aller bestimmten Grenzggeschwindigkeiten in m/s und umgerechnet als benötigte Zeit [s] pro 200 m.

n = 39	v [m/s]			t [s / 200 m]		
	MW		SD	MW		SD
CS ₁₀₀₋₂₀₀	1,376	±	0,113	146,246	±	11,723
CS ₁₀₀₋₄₀₀	1,319	±	0,099	152,494	±	11,446
CS ₁₀₀₋₈₀₀	1,283	±	0,106	156,792	±	12,753
CS ₁₀₀₋₁₅₀₀	1,264	±	0,107	159,292	±	13,236
CS ₂₀₀₋₄₀₀	1,305	±	0,108	154,312	±	13,041
CS ₂₀₀₋₈₀₀	1,272	±	0,110	158,204	±	13,535
CS ₂₀₀₋₁₅₀₀	1,258	±	0,110	160,086	±	13,777
CS _{Zacca}	1,280	±	0,088	156,934	±	10,744
v _{4,0}	1,329	±	0,066	150,895	±	7,380
v _{log}	1,329	±	0,061	150,777	±	6,914
v _{+1,5}	1,312	±	0,061	152,704	±	7,039
v _{Dmax}	1,331	±	0,072	150,668	±	8,191
MW _{AnS}	1,325	±	0,061	151,261	±	6,909

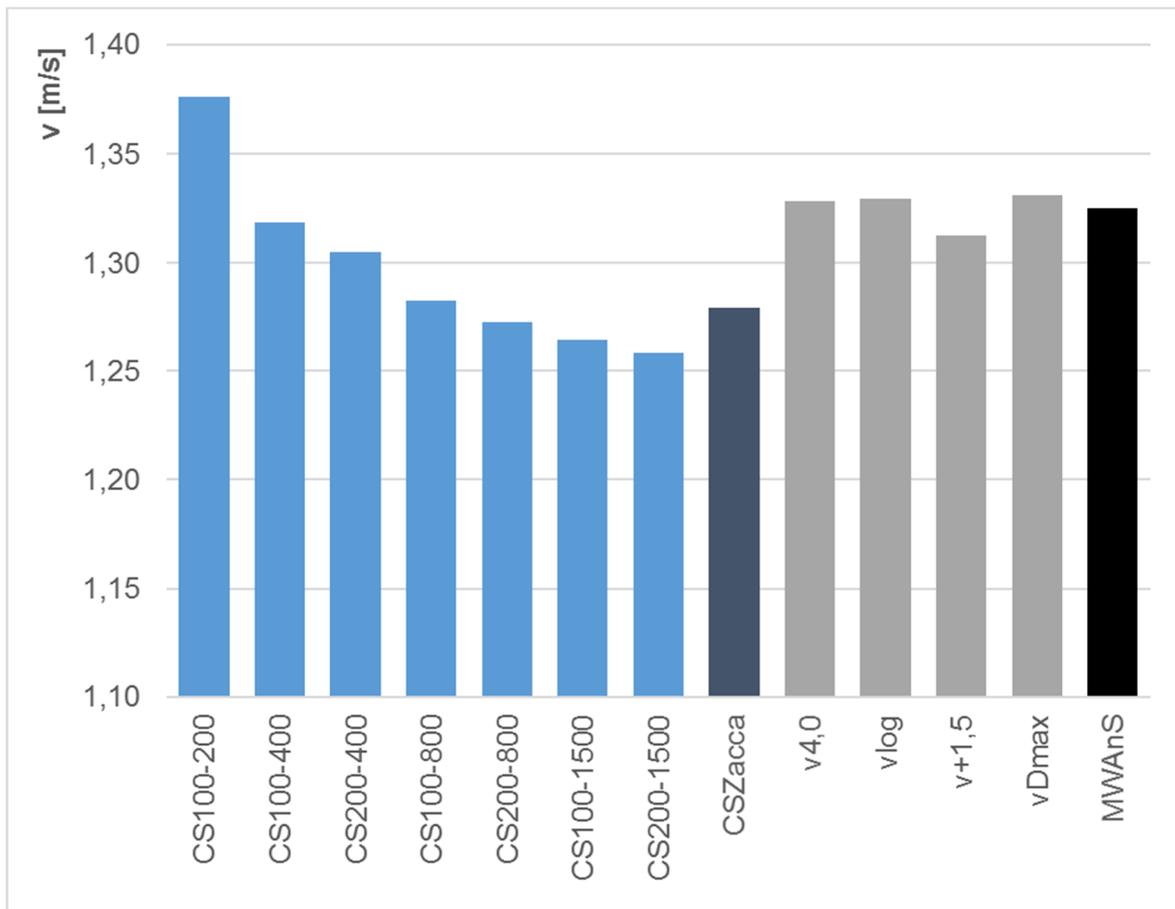


Abbildung 44: Grafische Darstellung der Mittelwerte aller ermittelten Grenzgengeschwindigkeiten in m/s. Die berechneten Kategorien der CS in blau, die CS_{Zacca} in dunkelblau, die Schwellengeschwindigkeiten aus dem Stufentest in grau und der Mittelwert dieser Schwellengeschwindigkeiten in schwarz.

Statistisch signifikante Unterschiede ergaben sich nur im Bereich der einzelnen Kategorien der CS. Die CS₁₀₀₋₂₀₀ unterscheidet sich von allen anderen Geschwindigkeiten signifikant, die CS₂₀₀₋₈₀₀ zeigt ebenfalls einen signifikanten Unterschied zu allen anderen, außer zur CS_{Zacca} und zur v_{+1,5}. Alle weiteren Signifikanzen lassen sich aus Tabelle 30 ablesen.

Tabelle 30: Korrelationsmatrix aller ermittelten Grenzgeschwindigkeiten. Grau markiert die signifikanten Unterschiede.

	CS ₂₀₀₋₁₅₀₀	CS ₁₀₀₋₁₅₀₀	CS ₂₀₀₋₈₀₀	CS ₁₀₀₋₈₀₀	CS ₂₀₀₋₄₀₀	CS ₁₀₀₋₄₀₀	CS ₁₀₀₋₂₀₀	CS _{Zacca}	t _{4,0}	t _{log}	t _{+1,5}	t _{Dmax}	MW _{AnS}
CS ₂₀₀₋₁₅₀₀	1												
CS ₁₀₀₋₁₅₀₀	,000	1											
CS ₂₀₀₋₈₀₀	1,000	1,000	1										
CS ₁₀₀₋₈₀₀	1,000	1,000	,000	1									
CS ₂₀₀₋₄₀₀	,011	,025	,030	,466	1								
CS ₁₀₀₋₄₀₀	,000	,000	,000	,001	,488	1							
CS ₁₀₀₋₂₀₀	,000	,000	,000	,000	,003	,001	1						
CS _{Zacca}	1,000	1,000	1,000	1,000	,066	,000	,000	1					
t _{4,0}	,001	,002	,003	,022	1,000	1,000	,277	,002	1				
t _{log}	,000	,001	,002	,014	1,000	1,000	,200	,000	1,000	1			
t _{+1,5}	,007	,015	,189	1,000	1,000	1,000	,001	,007	1,000	,663	1		
t _{Dmax}	,000	,000	,001	,004	1,000	1,000	,039	,000	1,000	1,000	,301	1	
MW _{AnS}	,000	,000	,003	,019	1,000	1,000	,031	,000	1,000	1,000	,243	1,000	1

Die Überprüfung auf Übereinstimmung aller gewählten Messmethoden anhand von Konkordanz-Korrelationskoeffizienten ergibt einen ICC von 0,671. Die Konkordanz-Korrelationskoeffizienten zwischen allen einzelnen Grenzgeschwindigkeiten sind der Tabelle 31 zu entnehmen.

Die Gegenüberstellung sämtlicher einzelner Messmethoden zeigt, dass die CS₁₀₀₋₂₀₀ mit keiner anderen Kategorie gut übereinstimmt. Kategorien der CS, die sich nur durch das Einbeziehen der 100-m-Strecke unterscheiden, z.B. CS₁₀₀₋₈₀₀ und CS₂₀₀₋₈₀₀, zeigen eine exzellente Reliabilität von über 0,9. Die gute bis exzellente Übereinstimmung zwischen den Schwellengeschwindigkeiten aus dem Stufentest wurde schon im Kapitel 4.4.1. „Ergebnisse des Vergleichs der Schwellenkonzepte“ dargestellt. Die etwas geringeren Geschwindigkeiten der v_{+1,5} zeigt sich in der lediglich guten Reliabilität zum Mittelwert der AnS. Alle anderen Schwellengeschwindigkeiten zeigen eine exzellente Reliabilität zum Mittelwert der AnS. Die anderen ermittelten Grenzgeschwindigkeiten weisen meist eine gute Übereinstimmung auf.

Tabelle 31: Matrix aller ICC-Konkordanz-Korrelationskoeffizienten für sämtliche bestimmten Grenzgeschwindigkeiten. Dabei zeigt die farbliche Markierung folgenden Grad der Übereinstimmung an:

< 0,5	geringe Reliabilität
0,5–0,75	moderate Reliabilität
0,75–0,9	gute Reliabilität
> 0,90	exzellente Reliabilität

ICC	CS ₂₀₀₋₁₅₀₀	CS ₁₀₀₋₁₅₀₀	CS ₂₀₀₋₈₀₀	CS ₁₀₀₋₈₀₀	CS ₂₀₀₋₄₀₀	CS ₁₀₀₋₄₀₀	CS ₁₀₀₋₂₀₀	CS _{Zacca}	V _{4,0}	V _{log}	V _{+1,5}	V _{Dmax}	MW _{AnS}
CS ₂₀₀₋₁₅₀₀	1												
CS ₁₀₀₋₁₅₀₀	0,997	1											
CS ₂₀₀₋₈₀₀	0,793	0,821	1										
CS ₁₀₀₋₈₀₀	0,795	0,828	0,992	1									
CS ₂₀₀₋₄₀₀	0,739	0,771	0,849	0,885	1								
CS ₁₀₀₋₄₀₀	0,695	0,734	0,795	0,853	0,952	1							
CS ₁₀₀₋₂₀₀	0,444	0,472	0,468	0,527	0,531	0,678	1						
CS _{Zacca}	0,785	0,819	0,829	0,870	0,875	0,897	0,571	1					
V _{4,0}	0,423	0,454	0,553	0,597	0,614	0,681	0,413	0,562	1				
V _{log}	0,439	0,471	0,547	0,596	0,626	0,706	0,447	0,590	0,992	1			
V _{+1,5}	0,534	0,569	0,570	0,629	0,670	0,763	0,511	0,742	0,845	0,877	1		
V _{Dmax}	0,576	0,610	0,585	0,648	0,712	0,831	0,631	0,709	0,844	0,880	0,889	1	
MW _{AnS}	0,508	0,543	0,582	0,639	0,681	0,780	0,518	0,678	0,938	0,966	0,893	0,913	1

4.4.6. Ergebnisse Dauertest zur Validierung der AnS

Die Ergebnisse des Dauertests zur Validierung der mittleren Schwellengeschwindigkeit aus dem Stufentest sind in Abbildung 45 optisch als Dropout-Diagramm dargestellt.

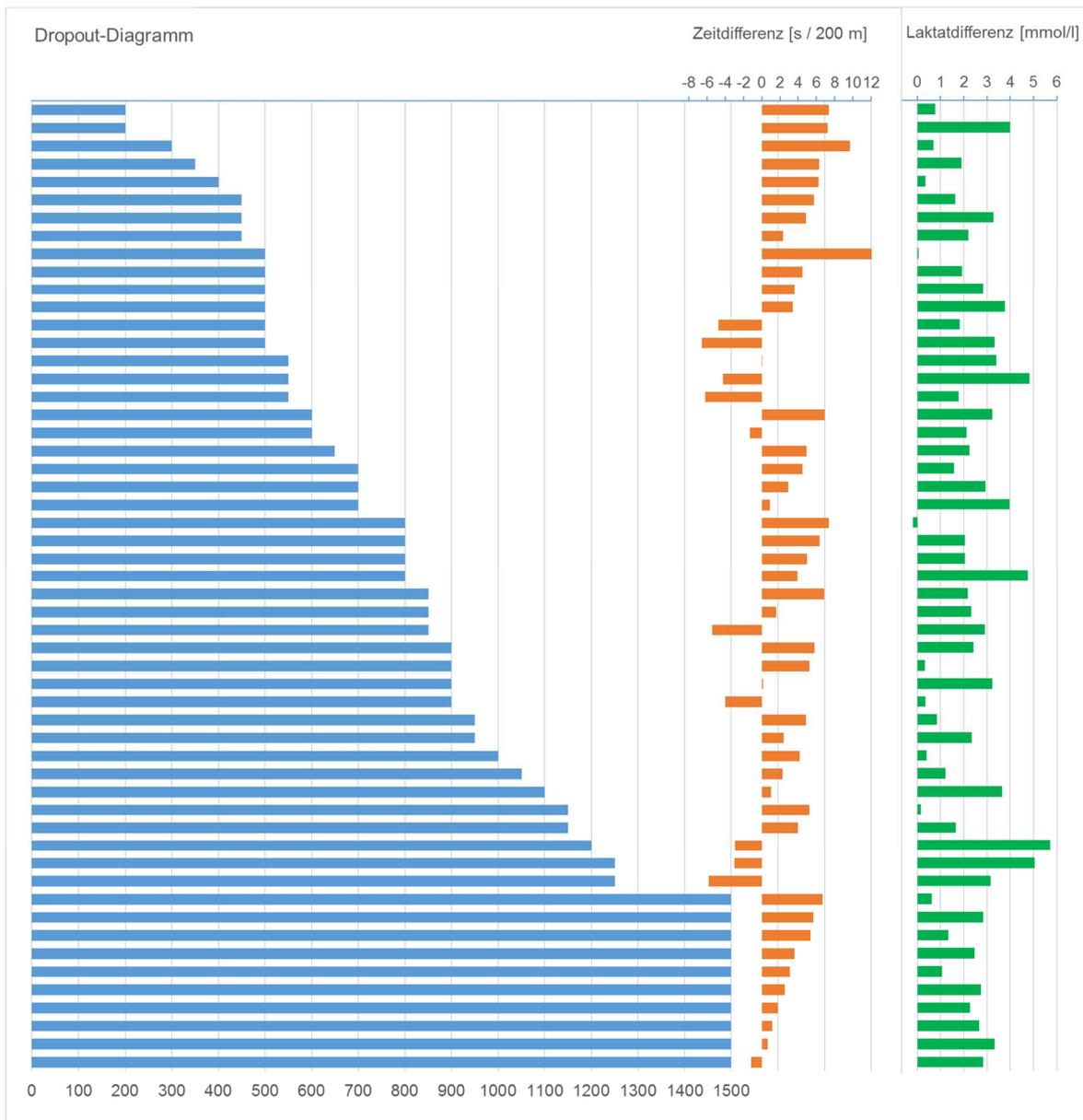


Abbildung 45: Geschwommene Distanz bis zum Abbruch im 1500-m-Dauertest (blau). Differenzen zwischen der vorgegebenen und reell im Dauertest geschwommenen Geschwindigkeit (orange) sowie Differenz zwischen den berechneten und den im Dauertest gemessenen Laktatkonzentrationen (grün).

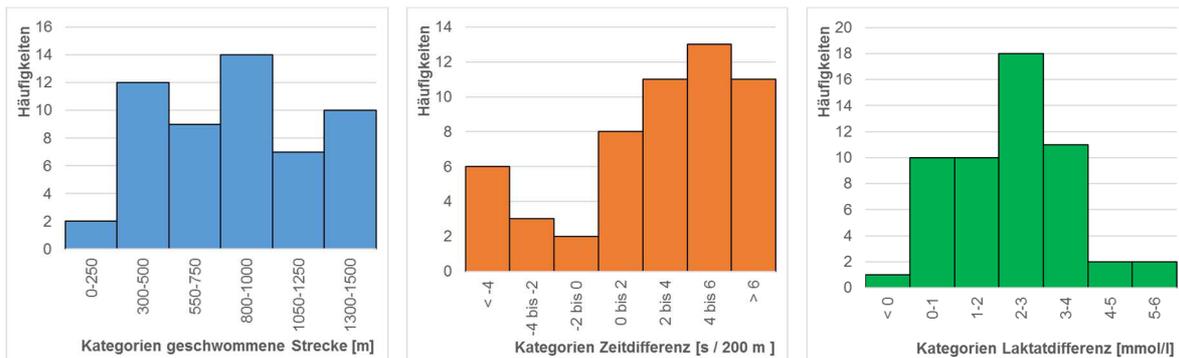


Abbildung 46: Histogramme für die Verteilungen im Dropout-Diagramm aus Abb. 45. Häufigkeit in Kategorien der geschwommenen Distanz bis zum Testabbruch, der Zeitdifferenz zur Sollzeit und der Laktatdifferenz zur vorab berechneten Laktatkonzentration.

Die Häufigkeitsverteilungen der Größen „geschwommene Distanz bis zum Abbruch“, der Zeitdifferenz zur Sollzeit und der Differenz zwischen berechneter und tatsächlich gemessener Laktatkonzentration werden in den Histogrammen der Abb. 46 visualisiert.

44 Athleten konnten den Dauertest nicht mit der vorgegebenen Geschwindigkeit durchhalten. Dies entspricht 81,5 % der Schwimmer. Nur zehn Athleten (18,5 %) konnten die Geschwindigkeit über die 1500 m aufrechterhalten, weitere acht Schwimmer haben zumindest 1000 m oder mehr durchgehalten.

Da die Schwimmer an der Wende ein positives Signal bekamen, auch wenn sie bis zu 0,5 s über der vorgegebenen Durchgangszeit lagen, war es möglich, dass sie bei jeder 50-m-Teilstrecke bis zu 0,4 s zu langsam geschwommen sind. Zusammen mit den zwei möglichen Überschreitungen der Zielzeit konnte eine langsamere Durchschnittsgeschwindigkeit entstehen. Die Differenz zwischen der vorgegebenen Zielzeit und der tatsächlich geschwommenen Durchschnittsgeschwindigkeit über jeweils 200 m wird durch die orangenen Balken dargestellt.

Nur fünf von den zehn Schwimmern, die 1500 m durchgehalten haben, waren um weniger als 1 s langsamer als die Durchschnittszeit auf 200 m, die anderen waren alle um mehr als 1,2 s langsamer. Auf der anderen Seite waren drei Schwimmer, die 1200 bzw. 1250 m durchgehalten haben, um 3 bzw. 6 s schneller als die vorgegebene Durchschnittsgeschwindigkeit. Hier wäre es denkbar, dass sie bei

einer geringfügig langsameren Schwimmgeschwindigkeit den Test über die volle Distanz durchgehalten hätten.

Im Durchschnitt lagen alle Teilnehmer um weniger als 3 s / 200 m über der vorgegebenen Schwimmgeschwindigkeit. Innerhalb des Tests schwankten die individuellen Zwischenzeiten im Mittel um weniger als ± 1 s.

Außer einem erreichten alle Schwimmer im Dauertest höhere Laktatwerte als vorhergesagt. Im Mittel lagen die erreichten Laktatkonzentrationen signifikant höher als die auf der Grundlage von den Schwellenkonzepten berechneten: berechnet $4,00 \pm 0,46$ mmol/l, im Dauertest gemessen $6,28 \pm 1,55$ mmol/l ($t_{106} = -10,4$, Cohens $d = 1,99$, $p < 0,001$). Die grünen Balken im Diagramm zeigen die Differenz zwischen beiden Werten.

Die nach dem Test gemessenen Herzfrequenzwerte lagen zwischen 138 und 222 Schlägen pro Minute mit einem Mittelwert von $174,9 \pm 17,7$ Schlägen pro Minute.

5. Diskussion

5.1. Vergleich der Schwellenkonzepte im Stufentest

Sowohl die Mittelwerte der vier verschiedenen Auswertungsmethoden des Stufentests log, 4,0, +1.5 und D_{max} , wie auch die Intraklassen-Korrelationskoeffizienten und auch die X–Y-Diagramme lassen auf eine gute Übereinstimmung der Methoden schließen. Keine Methode ermittelt durchgängig höhere oder niedrigere Schwellengeschwindigkeiten als die anderen. ICCs von über 0,8, wie sie in der Studie ermittelt wurden, werden nach Koo und Li (2015) als gute Konkordanz gewertet. Die mittleren Durchschnittsgeschwindigkeiten auf 200 m variieren zwischen den einzelnen Schwellenkonzepten nur um zehntel Sekunden bis zu 1,5 s pro 200 m, dies kann als akzeptable Variation angesehen werden. In der praktischen Ausführung ist es für einen Schwimmer kaum möglich, eine Zielzeit genauer zu treffen, was im Umkehrschluss wiederum bedeutet, dass sich die Auswertungsmethoden nicht grundlegend unterscheiden. Die besonders hohe Übereinstimmung der log-log- und 4,0-Methode sind darauf zurückzuführen, dass beide, trotz unterschiedlicher Herangehensweisen, auf die 4-mmol-Schwelle zugreifen.

Trotz der guten Übereinstimmung, lassen die einzelnen Skalenverschiebungen mit den 95-%-Grenzl意思ien für den paarweisen Vergleich der Methoden annehmen, dass die Abweichung zu groß ist, um eine Variable aus der anderen abschätzen zu können. Nach Bland und Altman (1986) gilt, dass die Methoden als austauschbar angesehen werden können, falls fast alle Werte im Konfidenzintervall liegen. Allerdings muss vorab festgelegt sein, welchen Bereich das Konfidenzintervall umschließen darf. Im Kapitel 4.3. „Statistik“ wurde festgelegt, dass Abweichungen von 1 s / 100 m akzeptabel wären. Individuelle Abweichungen von fast 10 s auf 200 m, wie sie im Bland-Altman-Diagramm auftauchen, sind für die praktische Anwendung inakzeptabel. Daher scheinen die Schwellenkonzepte keineswegs beliebig austauschbar.

Die große personenbezogene Variabilität kann ein Indiz für die starke Individualität der Laktatverwertung sein. Da das Laktat weiter als Energielieferant verwendet werden kann, zeigt die gemessene Laktatkonzentration nicht unbedingt eine erhöhte Laktatproduktion an. Ein wesentlicher Aspekt ist die Laktatverwertung. So kann ein Schwimmer mit einer besseren Laktatverwertung niedrigere Laktatkonzentrationen

liefern und trotzdem einer höheren Belastung ausgesetzt sein. Da die ausgewählten Schwellenmodelle nur teilweise die Höhe der Basislaktatkonzentration berücksichtigen, kommt es zu großen Schwankungen in den Ergebnissen für die Schwellengeschwindigkeiten. Diese beiden Aspekte führen zu der großen individuellen Streuung der Schwellenwerte. Die +1,5-Methode ist die einzige Auswertungsmethode, die den Schwellenwert anhand der Basislaktatkonzentration ermittelt. Sie zeigt im Mittel mit $154,6 \pm 7,8$ s / 200 m den langsamsten Wert für die Schwellengeschwindigkeit an.

5.2. Vergleich der Kategorien der CS

Die einzelnen Kategorien der CS unterscheiden sich fast alle signifikant in den Mittelwerten, nur innerhalb einiger Kategorien mit langen Strecken und zur CS_{Zacca} lassen sich keine signifikanten Unterschiede erkennen. Die daraus ermittelte Reihenfolge der Kategorien der CS zeigt, dass je länger die einbezogenen Streckenlängen, desto langsamer ist die berechnete CS. Bei jeder Kombination gilt, wenn eine längere Strecke hinzugenommen wird oder die kürzeste Strecke weggelassen wird, ist das Ergebnis langsamer.

Dies stimmt mit den Ergebnissen von Toubekis et al. (2006) überein, die für die Geschwindigkeiten $CS_{200-400}$ ($1,07 \pm 0,13$ m/s), $CS_{100-400}$ ($1,08 \pm 0,12$ m/s) und $CS_{100-200}$ ($1,09 \pm 0,12$ m/s) die gleiche Reihenfolge ermitteln. Auch Wright und Smith (1994) identifizierten die $CS_{50,200,600}$ mit $1,327 \pm 0,085$ m/s schneller als die zusätzlich aus der 1200-m-Zeit berechneten $CS_{50,200,600,1200}$ mit $1,308 \pm 0,062$ m/s. Das bedeutet, dass die berechnete CS sehr stark von den einbezogenen Strecken abhängt und dementsprechend nicht anzunehmen ist, dass alle Kategorien im gleichen Maß das MLSS wiedergeben können. Dekerle et al. (2005) und Costa et al. (2009) geben an, dass zur validen Berechnung der CS Belastungszeiten zwischen ca. 2 min und 15–20 min in die Berechnung einfließen müssen. Dies entspricht, je nach Leistungsstand der Schwimmer, der Berechnung aus den 100- oder 200-m-Zeiten bis einschließlich der 1500-m-Zeiten. Eine der Bedingungen, die bei der Anwendung des Modells zu berücksichtigen sind, ist, dass über die gesamte Streckenlänge die VO_{2max} zu 100 % aufrechterhalten werden muss. Die VO_{2max} wird aber erst nach 2–3 min erreicht. Di Prampero (1999) äußert, die Annahme, dass der Energieverbrauch unabhängig von der Geschwindigkeit als einigermaßen konstant angenommen

werden kann, gelte nur für Laufen, nicht für Fahrradfahren oder Schwimmen. Er meint, im Schwimmen müsse die Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Geschwindigkeit bekannt sein und in der Formel berücksichtigt werden. Diese Abhängigkeit ist aber nicht bekannt. Daher dürfen die kurzen Strecken nicht in die Berechnung einbezogen werden.

Selbst wenn die nach Zacca berechnete CS hohe Übereinstimmung mit der $CS_{100-800}$ oder der $CS_{200-1500}$ aufweist, scheint die Reliabilität der Messung nicht gewährleistet. Bei dem direkten Vergleich der beiden Messmethoden zeigt sich im Bland-Altman-Diagramm zwar lediglich ein sehr geringer Skalenshift von 0,14 s, aber individuelle Abweichungen von mehr als 13 s / 200. Wie bereits in Kapitel 2.3.4.2. „Berechnung der CS“ diskutiert, kann eine Berechnung auf der Basis einer einzigen Strecke nur ungenaue Ergebnisse erzielen. Bei vielen Schwimmern kommt es vor, dass sie bezüglich der FINA-Punkte eine bessere aktuelle 800-m-Wettkampfzeit haben als die aktuelle 400-m-Wettkampfzeit. Damit verfälschen sich die Ergebnisse.

Trotzdem scheint die 400-m-Zeit von den möglichen Streckenlängen die aerobe Ausdauerfähigkeit am besten wiederzugeben. Dies spiegelt sich in der Annahme von Zacca et al. (2019) und Espada et al. (2015) wider, dass die aus dem 400-m-Test ermittelte MAV der Geschwindigkeit an der VO_{2max} entspricht. Wie anfangs erwähnt, ist die VO_{2max} die Obergrenze der aeroben Kapazität. Die 400-m-Zeit ist demzufolge ein nützliches Indiz für die aerobe Leistungsfähigkeit, für eine valide Berechnung der Dauerbelastungsgrenze ist dennoch eine größere Anzahl von Strecken notwendig.

Mehrere Autoren geben an, die Punkte verschiedener Streckenlängen und der entsprechenden Zeiten würden auf einer geraden Linie liegen und liefern Korrelationskoeffizienten r^2 von über 0,998 (Rodriguez et al., 2003; C. G. Smith & Jones, 2001; Wakayoshi, Yoshida et al., 1992) . Ettema (1966) sprach bei seiner Analyse der Weltrekorde von einem linearen Zusammenhang zwischen der 4. und 30. min. Inzwischen äußern allerdings mehrere Autoren Zweifel am linearen Zusammenhang zwischen den Variablen (Billat et al., 1999; Dekerle et al., 2002; Ettema, 1966; Toubekis et al., 2006; Wright & Smith, 1994).

Diese berechtigten Zweifel führten zu einer Nebenstudie:

Die Bestzeiten von deutschen Kaderschwimmern über 50–1500 m wurden unter dem Aspekt eines linearen Zusammenhangs analysiert. Leider gibt es nicht viele Schwimmer, die innerhalb eines überschaubaren Zeitraums alle Streckenlängen zwischen 50 und 1500 m im Wettkampf absolvieren. Immerhin zehn Personen bestritten alle Freistildistanzen innerhalb eines Monats einmal. Die Überprüfung der Linearität des Zusammenhangs zeigt, dass zwar die Datenpunkte der Langstreckenschwimmer im Mittel nahezu auf einer geraden Linie liegen, bei Sprintern die Kurve aber nach rechts deutlich abfällt. Kurzstreckenschwimmer stehen die 200 m meist gerade noch auf hohem Niveau durch, ab 400 m fällt ihre Leistung aber im Vergleich zu den Langstreckenschwimmern deutlich ab. Der Vergleich von unterschiedlichen Regressionsmethoden zeigte, dass eine polynomische Regression mit der Formel $y = a * x^2 + b * x + c$ höhere Regressionskoeffizienten ergibt ($r^2 = 0,99995$) als bei einer linearen Regression nach $y = a * x + b$ ($r^2 = 0,99987$). Auch wenn sich dieser Unterschied erst in der vierten Stelle nach dem Komma zeigt. Dass alle Werte für „a“ aus der polynomischen Formel einen Wert kleiner als 0 haben (Mittelwert = - 0,000038), beweist, dass die Kurve leicht nach unten gekrümmt ist und somit nach rechts abfällt.

Für eine genauere Untersuchung wären zusätzliche Bestzeiten über 600, 1000 und 1200 m hilfreich. Dann könnte der Verlauf der Regressionskurve noch genauer abgeschätzt werden.

Dieser nichtlineare Zusammenhang erklärt die signifikant divergierenden Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden der CS und die abnehmende Höhe der Geschwindigkeit bei Einbezug längerer Strecken.

5.3. Validierung der CS₁₀₀₋₄₀₀ im Dauertest

Von den insgesamt 16 Teilnehmern am Validierungsversuch konnten nur drei Athleten den Dauertest über 1500 m in der vorgegebenen Geschwindigkeit durchhalten. Selbst diese Zahl muss mit Vorsicht betrachtet werden. Bei zwei der drei Schwimmer, die bis zum Ende schwammen, musste die kritische Geschwindigkeit auf der Grundlage einer in einem Trainingswettkampf nachgeholten 400-m-Zeit errechnet werden. Im Normalfall schwimmen die Sportler in

einem Trainingswettkampf etwas langsamer als im realen Wettkampf. Besonders die 400-m-Zeit hat Einfluss auf das Ergebnis der Berechnung. Wird auf eine langsamere 400-m-Zeit zurückgegriffen, wird die berechnete CS demzufolge eher langsamer sein als bei einer Berechnung anhand von Wettkampfzeiten. Werden nur diejenigen betrachtet, bei denen die CS-Zeiten ausschließlich aus Wettkämpfen stammen, so verringert sich die Zahl der Absolventen über 1500 m auf einen einzigen, was einen Anteil von 9,1 % ausmacht.

Auch, dass $\frac{3}{4}$ der Teilnehmer den Test bei weniger als der Hälfte der vorgesehenen Strecke abbrechen mussten zeigt, dass die ermittelte $CS_{100-400}$ für die untersuchten Schwimmer zu schnell war. Das MLSS wurde folglich überschätzt.

Die Herzfrequenz- und Laktatwerte nach der Belastung lassen ebenfalls darauf schließen, dass die Belastungsintensität über der Dauerbelastungsgrenze lag.

Die Herzfrequenzen lagen im Mittel bei 188 ± 13 Schlägen pro Minute. Aus den Angaben zu den einzelnen Belastungszonen im Schwimmen werden für ein Training im Bereich der anaeroben Schwelle oder des MLSS Pulswerte von ca. 150 Schlägen pro Minute angegeben. Insofern ist davon auszugehen, dass die Intensität für ausnahmslos alle Schwimmer oberhalb dieser Belastungsgrenze lag. Auch die nach dem Dauertest gemessenen Laktatkonzentrationen liegen mit $8,16 \pm 1,55$ mmol/l ausnahmslos über den durchschnittlichen 4 mmol/l im Bereich der AnS.

Bemerkenswert ist, dass sich sowohl bei den Laktat- wie auch bei den Herzfrequenzwerten, die höheren Ergebnisse bei den Personen finden, die nach kurzer Zeit abbrechen mussten. Die Schwimmer, die 1000 m oder mehr schwimmen konnten, hatten eine mittlere Herzfrequenz von $178,5 \pm 13,3$ Schlägen pro Minute und eine mittlere Laktatkonzentration von $6,82 \pm 1,44$ mmol/l. Die Schwimmer, die weniger als 800 m geschafft haben, hatten eine mittlere Herzfrequenz von $190,5 \pm 13,1$ Schlägen pro Minute und eine mittlere Laktatkonzentration von $8,60 \pm 1,43$ mmol/l. Demnach scheinen gerade die Schwimmer, die frühzeitig abbrechen mussten, besonders intensiv belastet worden zu sein. Diese Erkenntnis wird zusätzlich untermauert durch die Zeitdifferenzen zwischen der vorgegebenen Geschwindigkeit und der tatsächlich realisierten. Die vier Schwimmer, die 1000 m oder mehr bewältigten, hatten die geringsten Zeitüberschreitungen in der Gesamtzeit, d.h. sie schwammen während der ganzen Belastungsdauer nahezu mit dem vorgegebenen Tempo, die anderen schwammen eher langsamer.

Die vorzeitigen Testabbrüche und die hohen Belastungsparameter belegen, dass die CS₁₀₀₋₄₀₀ nicht geeignet ist, das MLSS abzuschätzen. Zusammen mit den Ergebnissen aus dem Vergleich der verschiedenen Kategorien der CS, ist anzunehmen, dass die Ursache für das Scheitern der Validierung an den verwendeten Streckenlängen zur Berechnung liegt. Mit großer Wahrscheinlichkeit könnte ein hoher Zusammenhang zwischen dem MLSS und der CS₁₀₀₋₄₀₀ gefunden werden, aber mit einem deutlichen Skalenshift nach unten.

5.4. Berechnung der ASC

Die Ergebnisse aus dieser Studie zur Berechnung der ASC decken sich mit den Erkenntnissen von MacLaren und Coulson (1999) und Billat et al. (2003): die CS und die ASC verhalten sich konträr zueinander. Sobald sich die CS verbessert, verschlechtert sich der Wert der ASC und umgekehrt. Die ASC soll ein Maß für die anaerobe Leistungsfähigkeit und das Leistungsvermögen bei hochintensiver Arbeit sein. Demzufolge geht eine gute aerobe Grundlagenausdauer (CS) mit schlechteren Werten der anaeroben Fähigkeiten (ASC) einher. Genau dies wurde auch im ersten Teil der Studie gezeigt. Beim Pansold-Test korrespondieren hohe P_{4,0}-Werte mit geringeren maximalen Laktatwerten. Auch Wiedner (2002) vertritt die Meinung, dass sich hohe Kraftwerte nicht mit einer überdurchschnittlichen aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit vereinbaren lassen. Da die anaerobe Leistungsfähigkeit direkt mit der Kraft, die der Schwimmer ins Wasser bringt, in Wechselbeziehung steht, hängt diese Variable auch mit den Krafftfähigkeiten des Athleten zusammen.

Die in dieser Studie ermittelten Werte der ASC von im Mittel 27,3 m über alle Berechnungskategorien decken sich mit den mittleren Werten von Wakayoshi et al. (1993) mit $23,3 \pm 1,72$ m. Die Werte von Dekerle et al. (2002) dagegen scheinen mit $14,80 \pm 2,23$ m sehr niedrig und liegen noch unter den ermittelten ASC₁₀₀₋₂₀₀-Werten ($16,8 \pm 4,0$ m). Auch bei dieser Variable hat die Berechnungsmethode einen wesentlichen Einfluss auf die Größe der Ergebnisdaten. Je länger die einbezogenen Strecken, desto größer der Wert der ASC. Ob dieser Parameter wirklich aussagekräftig ist, konnte wissenschaftlich noch nicht belegt werden. Als Bestätigung könnten die Aussagen sowohl von Sweetenham und Atkinson (2003) wie auch von Wilke und Madsen (2015) gewertet werden, dass maximale Sprintleistungen im alaktaziden Bereich nur über maximal 15–20 m möglich sind.

Bisher gab es noch keine Untersuchungen, ob sich dieser Wert aus den Berechnungen anhand der individuellen Bestzeiten belegen ließe.

5.5. Vergleich der Geschwindigkeit an der AnS aus dem Stufentest mit der CS₂₀₀₋₁₅₀₀ und der CS₁₀₀₋₈₀₀

Die aus den langen Strecken ermittelten CS sind signifikant langsamer als die mittleren Schwellengeschwindigkeiten aus dem Stufentest, in besonderem Maße gilt das für leistungsschwächere Schwimmer. In Einzelfällen liegen die Geschwindigkeiten bis zu 20 s / 200 m auseinander. Zusammen mit der Erkenntnis, dass die AnS aus dem Stufentest nicht im Dauertest durchgehalten werden kann, ist davon auszugehen, dass die CS₂₀₀₋₁₅₀₀ oder CS₁₀₀₋₈₀₀ eher dauerhaft beibehalten werden können.

Der Gesamtüberblick zeigt, dass nur die Kategorie CS₁₀₀₋₂₀₀ schnellere Geschwindigkeiten identifiziert als die Schwellengeschwindigkeiten aus dem Stufentest. Die Berechnungen aus den Strecken 100–400 m und 200–400 m bringen ähnliche Mittelwerte wie die Schwellenwerte aus den Stufentests. Erst wenn die 800 m mit in die Berechnung einfließen, wird die ermittelte Grenzgeschwindigkeit signifikant langsamer als die AnS aus dem Stufentest. Dies korrespondiert mit den Ergebnissen von Costa et al. (2009) der für die CS₅₀₋₁₅₀₀ langsamere Geschwindigkeiten als die 4-mmol-Schwelle und diese langsamer als die CS₅₀₋₂₀₀ ermittelte.

5.6. Validierung der AnS aus dem Stufentest im Dauertest

In einem nächsten Schritt wurde die Gültigkeit der Schwellengeschwindigkeit aus dem Stufentest im Dauertest über 1500 m überprüft. Da keine der vier Auswertungsmethoden als wissenschaftlicher Standard gewertet werden kann, gilt der Mittelwert der vier Methoden als bester Schätzwert der Realität und wurde als Richtgeschwindigkeit vorgegeben. Verglichen zur direkten Messung des MLSS, bei der mehrere Durchgänge von jeweils 30 min bewältigt werden müssen, scheint eine Belastung von 1500 m, die gute Schwimmer in unter 20 min absolvieren, zu kurz (Beneke, 2003). Trotzdem konnten nur vier der insgesamt 54 Teilnehmer zumindest diese Distanz mit einer Überschreitung von weniger als 1 s pro 200 m durchhalten.

Sechs von den Schwimmern konnten den Test über 1500 m zwar beenden, blieben aber mehr als 1,2 s pro 200 m hinter der vorgegebenen Geschwindigkeit. Aufgrund ihrer Äußerung am Testende, sie hätten nicht viel länger durchgehalten, ist anzunehmen, dass die Schwimmer bei einem höheren Tempo den Dauertest ebenfalls früher hätten abbrechen müssen. Aus den Histogrammen (Abb. 46) lässt sich ablesen, dass der Großteil der Schwimmer (43 von 54) die Geschwindigkeitsvorgabe überschritten hat. Auf der anderen Seite gibt es drei Schwimmer, die zwar nur 1200 m bzw. 1250 m bewältigen konnten, aber in der Gesamtbilanz zwischen 2,9 und 5,9 s / 200 m schneller geschwommen sind als vorgegeben. Bei ihnen ist zu vermuten, dass sie bei korrekter Schwimmgeschwindigkeit unter Umständen die 1500 m hätten durchhalten können.

Die nach dem Test gemessenen Laktatkonzentrationen waren bei allen Teilnehmern, bis auf einen, höher als sie aus dem Stufentest zu vermuten wären (vgl. Abb. 46). Die Laktatwerte lagen im Mittel um 2,3 mmol/l höher als die aus dem Stufentest berechneten Laktatwerte. Dies galt unabhängig von der Streckenlänge, die die Athleten im Dauertest durchhielten. Zum Zeitpunkt der Beendigung des Tests lagen die Herzfrequenzen im Mittel bei $174,9 \pm 17,7$ Schlägen pro Minute und damit ebenfalls deutlich höher als die Empfehlungen für ein Training im Bereich der AnS (ca. 150 bpm).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die berechnete Schwimgeschwindigkeit für den größten Teil der Schwimmer zu schnell war und die erfassten Belastungsparameter Laktatkonzentration und Herzfrequenz zu hoch.

Eine mögliche Ursache für die hohe Dropout-Quote im Dauertest zur Validierung der AnS könnte in den Vorgaben für den Testablauf begründet liegen. Die Belastungsnormativa könnten das Laktatverhalten beeinflussen (Bourdon, 2000; Faude et al., 2009; Heck & Roskopf, 1994) und die Ursache für eine fehlerhafte Berechnung der Schwellengeschwindigkeit sein.

Die Belastungsdauer sollte in jeder Stufe mindestens 3–5 min oder länger sein (Bourdon, 2000), da die Regulationsmechanismen des Körpers bei intensiver Belastung eine Weile brauchen, um ein Steady-State zu erreichen und bis das Muskellaktat im Blut nachweisbar wird. Ein Stufentest über 200 m scheint daher ungeeignet, um das MLSS abzuschätzen. Um die höchste Intensität des MLSS zu bestimmen, ist eine Belastungsdauer von mindestens 5 min pro Stufe notwendig.

Eine kürzere Belastungsdauer könnten die Schwellengeschwindigkeit überschätzen.

In der praktischen Anwendung wird der 200-m-Stufentest als Kompromiss zwischen dem Erreichen des MLSS und der physiologischen Belastungsform im Wettkampf angesehen. Die Auswahl des Testprotokolls hängt also von der Zielsetzung der Testanwendung ab. Für Sprinter könnte es wichtiger sein, den Test nahe an der Wettkampfbelastung und mit der entsprechenden technischen Umsetzung, der Zuglänge und Zugfrequenz zu schwimmen als im Bereich der Grundlagenausdauer. Soll hingegen die Dauerbelastungsgrenze abgeschätzt werden, müssen die Belastungsstufen länger als 200 m sein. Selbst Wilke und Madsen (2015) beschreiben zur Bestimmung der AnS lediglich die Variante des Pansold-Tests über 400 m. Dies kann so interpretiert werden, dass die kürzeren Varianten des Pansoldtests über 100 m bzw. 200 m nicht infrage kommen, um die AnS zu bestimmen.

Darüber hinaus kann die Länge der Pausen die LLK beeinflussen. Für die Blutentnahme scheint eine Pausendauer von maximal einer Minute angebracht (Dekerle & Pelayo, 2011). Der gleichbleibende Startabstand, wie er in vielen gängigen Tests verwendet wird (Pyne et al., 2000), führt zu einer kontinuierlichen Verlängerung der Pausendauer in jeder Stufe. Der Laktatabbau innerhalb dieser Pausen wirkt sich jedoch auf die Nettoblutlaktatkonzentration aus. Beide Faktoren könnten eine LLK-Verschiebung nach unten verursachen, was zu höheren Schwellengeschwindigkeiten führen würde.

Insbesondere beim Schwimmen ist zu berücksichtigen, dass der Bereich zwischen submaximalen Geschwindigkeiten unterhalb der anaeroben Schwelle und der maximalen Geschwindigkeit sehr eng ist (Dekerle & Pelayo, 2011; Espada et al., 2015; Greco et al., 2013). Greco et al. (2013) fanden eine Differenz von nur 6 s pro 100 m zwischen der aeroben Schwelle und dem MLSS. Daher ist es im Schwimmsport schwieriger als in anderen Sportarten, eine ausreichende Anzahl einzelner Stufen im Stufentest unterzubringen. Bei der Interpretation müssen dementsprechend die Messgenauigkeit und die Empfindlichkeit der Methode berücksichtigt werden. Ein kleiner Messfehler bei der Laktatprobenabnahme oder dem Zeitpunkt der Messung kann zu erheblichen Änderungen der LLK führen.

Außerdem können minimale Fehler in der Schwellenberechnung zu einer bedeutsamen Unter- oder Überschätzung der Dauerbelastungsgrenze führen.

Aus der Übersicht aller ermittelten Geschwindigkeiten ist zu erkennen, dass der Mittelwert der AnS aus dem Stufentest im Bereich der CS₁₀₀₋₄₀₀ liegt. Zusammen mit den Ergebnissen aus dem Dauertest kann angenommen werden, dass die Geschwindigkeiten CS₂₀₀₋₄₀₀, CS₁₀₀₋₄₀₀ und besonders CS₁₀₀₋₂₀₀ nicht dauerhaft hätten umgesetzt werden können. Die Kategorien unter Einbezug der längeren Strecken (mindestens 800 m) sind signifikant langsamer und identifizieren besonders für die leistungsschwächeren Schwimmer niedrigere Geschwindigkeiten. Es könnte also sein, dass diese ermittelte Grenzgeschwindigkeit eher im Dauertest möglich gewesen wäre.

Demzufolge scheint es unumgänglich, dass Streckenlängen von mindestens 800 m in die Berechnung der CS mit einfließen müssen, wenn die Dauerbelastungsgrenze anhand der Bestzeiten bestimmt werden soll. Die Inklusion der Sprintstrecken über 50 m hingegen kann keinesfalls eine valide Grenzgeschwindigkeit für Langzeitbelastungen ergeben. Dies hat allerdings zur Folge, dass nur für die Freistiltechnik die Wettkampfzeiten herangezogen werden können. In den anderen Schwimmlagen gibt es nur Wettkampfzeiten über 50–200 m. In diesem Fall müssten separate Testdurchgänge über die 400-m- und 800-m-Distanz absolviert werden.

5.7. Bezug zu den Trainingszonen

Die Resultate passen zu der in Abbildung 18 vorgenommenen Einstufung der verschiedenen Schwellen zueinander aus den Angaben verschiedener Autoren. Hier ist zu erkennen, dass die aus kurzen Strecken ermittelte CS häufig oberhalb der 4-mmol-Schwelle oder des MLSS eingereiht werden, die Kategorien, die die 1500 m einschließen aber langsamer eingestuft werden.

Wird, aufgrund der vorherigen Ergebnisse, die Berechnung der CS aus langen Strecken als „korrekte“ Bestimmungsmethode angesehen, muss die CS unterhalb der AnS eingestuft werden. Dies widerspricht aber der Einteilung der Trainingszonen nach Dekerle und Pelayo (2011) wie sie in Abbildung 19 abzulesen ist. Anhand dieser Einteilung sollte die CS oberhalb des MLSS liegen und die „very heavy

exercise domain“ und die „severe exercise domain“ trennen. Leider ist in dem Beitrag nicht definiert, aus welchen Streckenlängen die CS bestimmt wurde. Anhand der dem Artikel zugehörigen Abbildung ist zu vermuten, dass es sich um die CS₂₀₀₋₈₀₀ handelt. Demnach würden die Autoren die CS₂₀₀₋₈₀₀ höher als das MLSS einstufen. Da in der vorliegenden Untersuchung nur die AnS und die CS₁₀₀₋₄₀₀ im Dauertest überprüft wurde, wäre es grundsätzlich möglich, dass die Schwimmer selbst die CS₂₀₀₋₈₀₀ nicht im Dauertest durchgehalten hätten. Dann könnte die CS₂₀₀₋₈₀₀ oberhalb des MLSS liegen und entspräche der Reihenfolge von Dekerle und Pelayo (2011). In diesem Fall wäre aber anzunehmen, dass die AnS noch weit darüber liegt. Laut Definition sollte die AnS das MLSS abschätzen. Die Resultate dieser Untersuchung decken sich demzufolge nicht mit den Erkenntnissen von Jeanne Dekerle und Pelayo (2011).

Dekerle (2006) schreibt, dass die CS nicht länger als 30–40 min aufrechterhalten werden kann und eng bei den Werten eines 30-min (oder 2000-m)-Tests liegt. Das MLSS soll jedoch mindestens eine Stunde aufrechterhalten werden können. Toubekis et al. (2006) hingegen setzt die CS mit dem MLSS gleich und behauptet, dass die CS über 30 min, ohne einen wesentlichen Anstieg der Laktatkonzentration (3–4 mmol/l), durchgehalten werden kann. Ihm zufolge, wie auch laut mehrerer anderer Autoren (Dekerle & Pelayo, 2011; Espada et al., 2015; Greco et al., 2013), sollen das MLSS und die AnS die Grenze zwischen dem Trainingsbereich „heavy endurance“ und „very heavy endurance“ anzeigen.

Wenn Belastungszonen von der LLK abgeleitet werden, muss bedacht werden, dass das MLSS, je nach Bestimmungsmethode, möglicherweise überschätzt wird. Wie Toubekis et al. (2006) anmerken, sollte keine Schwellengeschwindigkeit, die aus der LLK abgeleitet wurde, als „Goldstandard“ zur Abschätzung der Dauerbelastungsgrenze angesehen werden. Aber auch die anderen Methoden variieren erheblich und die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Zonen sind gering. Bei individuellen Abweichungen von mehreren Sekunden pro 200 m ist die Ableitung von Tempovorgaben für einzelne Belastungsbereich grundsätzlich in Frage zu stellen. Nur eine Messung anhand einer Dauerbelastung, wie sie bei der direkten Bestimmung des MLSS durchgeführt wird, lässt Rückschlüsse auf den individuellen Belastungsgrad bei einer bestimmten Geschwindigkeit zu.

Die oben genannten divergierenden Einschätzungen könnten, neben der Auswertungsmethode, auch am Leistungsstand der Schwimmer liegen. Die Teilnehmer dieser Studie waren jünger als in vielen vergleichbaren Untersuchungen aus dem Hochleistungsbereich (Greco et al., 2013; Psycharakis, Cooke, Paradisis, O'Hara & Phillips, 2008; Pyne et al., 2001). Das Alter, die Trainingserfahrung, wie auch die schwimmtechnische Leistungsfähigkeit können sich auf die Ergebnisse auswirken. Unter Umständen entspricht die Schwellenberechnung aus einem Stufentest für Hochleistungsschwimmer eher der MLSS-Geschwindigkeit als bei der Untersuchung von Nachwuchsschwimmern. Auch bei der Ermittlung der CS kann der Leistungsstand eine Rolle spielen, wie an der Drehung der orthogonalen Regressionsgeraden beim Vergleich zwischen CS₂₀₀₋₁₅₀₀ und der AnS zu erkennen war. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass gerade für schwächere Athleten die Methode nach dem CS-Modell geeigneter zu sein scheint, als die Auswertung eines Stufentests.

Die Vergleichbarkeit der vorgestellten Methoden muss außerdem vor dem Hintergrund der Zielstellung betrachtet werden. Jedes Testverfahren eignet sich für eine konkrete Zielstellung und hat seine Berechtigung. Bei der Interpretation spielt zudem die Erfahrung des Testleiters und des Trainers mit der ausgewählten Testform eine wichtige Rolle.

6. Praktische Empfehlung und Schlussfolgerungen

Ziele der Leistungsdiagnostik im Bereich der Ausdauer sind, neben der Feststellung des Leistungsstandes und der Dokumentation von Leistungsentwicklungen, die Ermittlung der Dauerbelastungsgrenze, um eine optimale Trainingsbelastung anhand von Geschwindigkeitsvorgaben sicherzustellen.

Die einzige verlässliche Methode die Dauerbelastungsgrenze als eine Geschwindigkeit, die über einen langen Zeitraum ohne Erschöpfung aufrechterhalten werden kann, zu bestimmen, ist die direkte Messung des MLSS. Bei dieser komplexen und aufwendigen Messung über mehrere Durchgänge von mindestens 30 min darf der maximale La^- -Anstieg nicht mehr als 1,0 mmol/l zwischen der 10. und 30. min bei konstanter Belastung betragen.

Für die indirekte Bestimmung des MLSS, scheint ein Stufentest mit 200-m-Strecken, ungeachtet der gewählten Auswertungsmethode, nicht geeignet zu sein, da die Grenzgeschwindigkeit meist überschätzt wird. Für diese Zielstellung müssten die Belastungszeiten auf mindestens 3–5 min verlängert werden und die Pausenzeiten auf ein Minimum (< 1 min) reduziert werden. Nur so könnte das korrekte Abschätzen der Grenzgeschwindigkeit gewährleistet werden. Noch besser geeignet wäre eine Durchführung im Schwimmkanal, bei der die Belastungsdauer pro Stufe konstant gehalten werden kann. Ein weiteres Problem ist, dass Stufentests sehr anfällig gegenüber einer mangelhaften Ernährung oder Trainingsbelastungen im Vorfeld des Tests sind.

Trotzdem scheinen Stufentests ein sinnvolles Instrument für die langfristige Leistungsdiagnostik an einzelnen Schwimmern zu sein. Selbst für den Fall, dass die Schwellengeschwindigkeit zu hoch eingeschätzt wird, liefern Längsschnittstudien dem Trainer nützliche Ergebnisse für die Trainingssteuerung. Der Leistungsfortschritt innerhalb eines Trainingszyklus wird durch eine Verschiebung oder Formveränderung der LLK deutlich. Ein Anstieg der sportlichen Leistung von Jahr zu Jahr wird durch den Vergleich der LLK erkennbar. Gerade für Sprinter scheint es nicht so wichtig, die Dauerbelastungsgrenze exakt zu bestimmen, sondern Testformen mit wettkampfspezifischen Belastungsformen zu finden. Auch ein

Stufentest über 200 m zeigt im Längsschnitt Veränderungen auf, die Einblicke in die Auswirkungen der Trainingssteuerung geben.

Für eine valide Bewertung müssen die Verfahren und Bedingungen stabil bleiben und andere Einflussfaktoren, wie z.B. der Gesundheitszustand des Athleten berücksichtigt werden (Thompson, Garland & Lothian, 2006).

Die Ableitung von Belastungszonen muss allerdings anhand der vorliegenden Ergebnisse in Frage gestellt werden. Das MLSS wird häufig überschätzt, insbesondere wenn die Belastungsdauer im Stufentest zu kurz ist. Hier ist die Zielstellung des Tests zu hinterfragen. Soll die Dauerbelastungsgrenze ermittelt werden oder liegt der Schwerpunkt auf der wettkampfspezifischen Belastungsform mit wettkampfähnlichen Zugfrequenzen und wettkampfspezifischer Energiebereitstellung.

Das Modell der CS hat im Vergleich zu anderen Methoden der Schwellenbestimmung mit Laktatmessung wesentliche Vorteile in der Anwendung. Es ist kein invasiver Eingriff notwendig, die Anwendung ist kostengünstig und der Trainer kann die Verfahrensweise selbständig durchführen. Gerade im Schwimmsport eignet sich die Methode, da vorhandene Wettkampfzeiten zur Berechnung verwendet werden können und kein zusätzlicher Messaufwand notwendig ist. Im Bereich von anderen Sportarten (z.B. Ballsport) hat das Modell der CS den Nachteil, dass zur Berechnung zunächst mehrere Durchgänge mit verschiedenen Streckenlängen und unter voller Ausbelastung absolviert werden müssen. Diese liegen in den Spielsportarten und auch in anderen Ausdauerdisziplinen wie z.B. Radsport oder Langlauf nicht als Wettkampfzeit vor. Der Vorteil im Schwimmsport ist, dass der Trainer, zumindest in der Kraultechnik, auf Bestzeiten über verschiedene Streckenlängen aus dem Wettkampf zurückgreifen kann und keine gesonderten Testläufe durchführen muss. Die Werte können fortlaufend und unkompliziert anhand regelmäßiger Wettkämpfe aktualisiert werden.

Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass weniger methodische Fehler auftreten können, wie es bei der Bestimmung der Schwelle aus der LLK (Berechnung der LLK, Schwellenbestimmung) der Fall ist.

Das größte Problem des CS-Modells ist die nichtlineare Beziehung zwischen Streckenlänge und Zeit. Der eher polynomische Verlauf führt zu uneinheitlichen Ergebnissen bei der Verwendung verschiedener Streckenlängen. Für eine wissenschaftlich fundierte Ermittlung der Grenzgeschwindigkeit ist die Auswahl der Streckenlängen entscheidend. Erfolgt die Berechnung der CS auf der Basis von Strecken zwischen 200 und 1500 m, ergeben sich niedrigere Schwimmgeschwindigkeiten als im Stufentest über 200 m. Gerade für leistungsschwächere Schwimmer könnte diese Methode besser geeignet sein als ein Stufentest. Für diese Form der Ermittlung einer Grenzgeschwindigkeit müsste allerdings erst der wissenschaftliche Nachweis im Dauertest geliefert werden.

7. Zusammenfassung

Bezugnehmend auf die ursprüngliche Fragstellung der Dissertation können folgende Antworten gegeben werden:

Die Ausdauerleistung der deutschen Schwimmer hat sich in den letzten Jahrzehnten signifikant verschlechtert. Beim Vergleich der nationalen Kaderathleten über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten ergab sich trotz Anstieg der maximalen Schwimgeschwindigkeit eine signifikante Verringerung des Parameters $P_{4,0}$, der ein Index für die aerobe Ausdauerleistung des Schwimmers ist. Die maximal erreichten Laktatwerte stiegen im untersuchten Zeitraum signifikant und auch die Geschwindigkeit an der 4-mmol-Grenze wurde im Mittel verbessert. Daraus wird geschlossen, dass die Schwimmer heute mit mehr anaerobem Aufwand schnellere Leistungen erzielen, aber auf eine schlechtere Grundlagenausdauer zurückgreifen.

Männer erreichen höhere maximale Laktatwerte als Frauen. Die signifikant höheren Laktatwerte der Männer werden auf die höhere Maximalkraft und die höhere Muskelmasse zurückgeführt.

Frauen haben eine höhere Grundlagenausdauer als Männer. Die $P_{4,0}$ -Werte der Frauen liegen signifikant höher als die der Männer und unterstreichen die besseren aeroben Fähigkeiten des weiblichen Geschlechts.

Kurzstreckenschwimmer haben eine geringere Grundlagenausdauer als Mittel- und Langstreckenschwimmer. Diese Aussage scheint zunächst offensichtlich, wird aber zusätzlich durch die signifikant höheren $P_{4,0}$ -Werte der Mittel- und Langstreckenschwimmer wissenschaftlich belegt.

Sprinter erreichen höhere maximale Laktatwerte als Mittel- und Langstreckenschwimmer. Eine hohe anaerobe Mobilisationsfähigkeit ist der entscheidende Faktor für überdurchschnittliche Sprintleistungen. Sie finden Ausdruck in den signifikant höheren maximalen Laktatwerten der Kurzstreckenschwimmer.

Die Korrelationen zwischen den Parametern b_{LLK} , L_{max} und $P_{4,0}$ veranschaulichen, dass eine geringere aerobe Ausdauer mit höheren maximalen Laktatkonzentrationen und einem steileren Kurvenverlauf der LLK einhergeht und belegen

damit das konträre Verhalten zwischen ausgeprägter Grundlagenausdauer und anaerober Mobilisationsfähigkeit.

Die Mittelwerte der vier ausgewählten Bestimmungsmethoden zur Ermittlung der anaeroben Schwelle unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Allerdings zeigt der Methodenvergleich individuelle Abweichungen, die so groß sind, dass sie für die praktische Anwendung nicht akzeptabel wären. Aus diesem Grund wird geschlossen, dass die Methoden nicht gegeneinander austauschbar sind.

Die verschiedenen Berechnungsarten der CS ergeben nicht das gleiche Ergebnis. Die ausgewählten Kategorien der CS unterscheiden sich, je nachdem welche Streckenlänge in die Berechnung einbezogen wird. Die Hauptursache hierfür wird im nichtlinearen Verlauf der Regressionskurve gesehen.

Die CS₁₀₀₋₄₀₀ kann nicht im Dauertest durchgehalten werden. Ein Abbruch des Dauertests nach durchschnittlich 750 m lässt darauf schließen, dass die ermittelte Grenzgeschwindigkeit deutlich zu hoch ist, als dass sie über eine längere Distanz aufrechterhalten werden könnte.

Der Vergleich der mittleren Schwellengeschwindigkeit aus dem Stufentest und der CS₂₀₀₋₁₅₀₀ zeigt eine signifikant langsamere Geschwindigkeit für das CS-Modell. Hinzu kommt eine besonders große Verschiebung der Resultate bei den leistungsschwächeren Schwimmern.

Die mittlere Geschwindigkeit aus den vier Auswertungsmethoden zur Bestimmung der AnS kann im Dauertest nicht durchgehalten werden. Die hohe Dropout-Quote und die Überschreitung der Zielgeschwindigkeit lassen darauf schließen, dass die ermittelte Schwellengeschwindigkeit zu hoch ist, um dauerhaft aufrechterhalten werden zu können.

Die Resultate dieser Dissertation machen zum einen deutlich, dass die neueren Erkenntnisse zum Laktatmetabolismus endlich in die Leistungsdiagnostik aufgenommen werden müssen und von starren Schwellenkonzepten Abstand genommen werden muss. Der Energiehaushalt ist ein kontinuierlicher und parallel ablaufender Prozess ohne abrupte Übergänge von einer Form der Energiebereitstellung zur anderen und daher auch ohne definierbare Grenzen. Laktatkonzentrationen hängen eher von der Verwertung im Körper ab und reflektieren daher nur teilweise den anaeroben Anteil am Gesamtenergieumsatz. Eine Ableitung von Belastungszonen aus den Ergebnissen eines Stufentests oder auch des CS-Modells ist nur bedingt zu empfehlen. Die Bestimmungsmethodik und weitere Einflussfaktoren können die Ergebnisse grundlegend verfälschen.

Zum anderen bestätigen die Resultate der ersten Teilstudie die Vorwürfe, die Grundlagenausdauer der deutschen Schwimmer ist schlechter als früher. Ob die Bestrebungen des Bundestrainers mit dem Nachwuchs-Perspektivteam oder dem Krafttrainingskonzept Früchte tragen, wird sich erst in einigen Jahren zeigen. Eine erste positive Entwicklung gab es bei den aktuellen Weltmeisterschaften 2019 in Gwangju mit immerhin sieben Medaillen für Deutsche Schwimmer (Abb. 47).

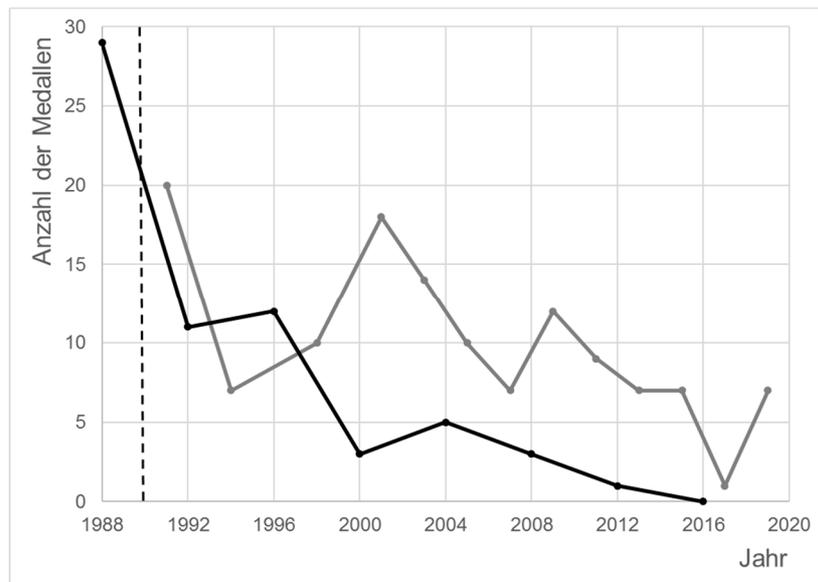


Abbildung 47: Anzahl der von deutschen Schwimmern gewonnenen Medaillen bei Olympischen Spielen (schwarz) und Weltmeisterschaften (grau) inklusiv der WM 2019.

Erwähnenswert ist, dass ausschließlich die Langstreckenschwimmer diese Medaillen erringen konnten. Sechs Medaillen wurden im Freiwasser gewonnen. Das Freiwasserschwimmen ist seit 1991 bei Weltmeisterschaften und seit 2008 bei Olympia als eigenständige Disziplin vertreten. Gerade diese Schwimmer benötigen bekanntlich die größte Grundlagenausdauer.

Zwei der Medaillengewinner von Gwangju zeigten schon 2014 im Pansoldtest ihre besonders hohe Ausdauerqualität: Florian Wellbrock und Sarah Köhler konnten schon damals mit überdurchschnittlichen Werten glänzen. Der $P_{4,0}$ -Wert von Wellbrock lag mit 91,0 % weit über dem Durchschnitt der 400 m F der Männer (89,8 %), wohingegen der maximale Laktatwert mit 6,5 mmol/l unter dem Durchschnitt von 7,6 mmol/l lag. Das gleiche Bild zeigt sich bei Köhler: Ihr $P_{4,0}$ -Wert von 92,4 % liegt höher als der Durchschnitt mit 89,2 % in 200 m F der Frauen und ihr maximaler Laktatwert von 7,5 mmol/l unter dem Durchschnitt von 8,6 mmol/l.

Dies kann wiederum nur die hohe Individualität von Höchstleistungen untermauern. Interessant wäre ein Vergleich von Trainingskonzepten anhand von Trainingsanalysen, die bis vor Kurzem aber noch nicht zentral erfasst wurden. Letztendlich basieren Erfolge, insbesondere im Spitzenbereich, immer auf besonderen persönlichen Voraussetzungen, auf optimalen Trainingsbedingungen und dem idealen Zusammenspiel aller Rahmenfaktoren. Die Leistungsdiagnostik kann in diesem Zusammenhang wertvolle Informationen liefern. Dazu ist es notwendig, neueste wissenschaftliche Erkenntnisse in etablierte Vorgänge einzubinden und Methoden notfalls anzupassen. Ob sich die einzelnen Leistungsfaktoren am Ende zur perfekten Höchstleistung zusammenfügen, bleibt nach wie vor von individuellen Gegebenheiten und letztendlich auch dem Quäntchen Glück abhängig.

8. Danksagung

Ich danke den Schwimmern und Trainern der Stadtwerke München, des TSV Hohenbrunn-Riemerling, der SSG Neptun Germering, des SC Delphin Ingolstadt und des SCW München, die an dieser Studie teilgenommen haben. Insbesondere möchte ich diesbezüglich Katharina Appel für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Tests danken.

Desweiteren bedanke ich mich bei meinem betreuenden Prof. Dr. Martin Lames, der mir mit vielen guten Ratschlägen zur Seite stand, bei meinem Mentor Wolfram Sperling, der mich in allen Krisen mit wohlwollenden Worten aufgemuntert hat, bei Fabian Stöcker, der mich bei der mathematischen Berechnung der Schwellen unterstützt hat und ganz besonders bei meiner Familie, die meine wechselnden Emotionen im Verlauf der Entwicklung der Dissertation gelassen hinnahm und mich mental in jeder Weise unterstützt hat.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anzahl der durch deutsche Schwimmer gewonnenen Medaillen bei Olympischen Spielen (schwarz) und Weltmeisterschaften (grau) zwischen 1988 und 2017. Die gestrichelte Linie zeigt den Zeitpunkt der Vereinigung der beiden Verbände Ost (DSSV) und West (DSV) an.	6
Abbildung 2:	Modell der Leistungsstruktur im Sportschwimmen – Grundvorstellung. Quelle: Schramm (1987, S. 176)	12
Abbildung 3:	Korrelative Beziehung ausgewählter Leistungsfaktoren zur Wettkampfleistung. Quelle: nach Schramm (1987, S. 180)	14
Abbildung 4:	Korrelative Beziehung von Teilergebnissen aus der KLD. Quelle: Rudolph (2014, S. 84)	16
Abbildung 5:	Vergleich der Muskelmorphologie zwischen den beiden Weltmeistern 2019 Adam Peaty über 50 und 100 m Brust und Florian Wellbrock über 1500 m Freistil und 10 km Freiwasserschwimmen. Quellen: Swimexpert.ch und Süddeutsche Zeitung	19
Abbildung 6:	Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laktatdiagnostik und ventilatorischen Messgrößen bezüglich der physiologischen Schwellen. Quelle: Österreichisches Institut für Sportmedizin (2019)	36
Abbildung 7:	Darstellung der Kenngrößen der LLK bei der Auswertung des Pansoldtests.	50
Abbildung 8:	Vorgehen bei der Sensitivitätsanalyse. Eine Veränderung eines Messpunktes um 10 % nach oben verursacht eine Änderung der Parameter der Regressionskurve a und b und der resultierenden Schwellengeschwindigkeit.	58
Abbildung 9:	Rechtsverschiebung der LLK	62
Abbildung 10:	Linksverschiebung der LLK	62
Abbildung 11:	Abwärtsverschiebung im unteren Bereich der LLK	63
Abbildung 12:	Abflachung der LLK	63
Abbildung 13:	Abflachung mit Linksverschiebung	64
Abbildung 14:	Anstieg der maximalen Laktatwerte	64

- Abbildung 15: Zeit-Distanz-Diagramm zur Berechnung der CS aus den Beispieldaten aus Tabelle 11. Die berechnete Steigung beträgt in diesem Fall $b = 1,49$ m/s und der y-Achsenabschnitt $a = 24,5$ m. 67
- Abbildung 16: Verhältnis von Laktatkonzentration (blaue Messpunkte und Linie) und Herzfrequenz (graue Messpunkte und Linie) an einer Beispielkurve aus einem 7×200 m Stufentest. 73
- Abbildung 17: Verhältnis von Herzfrequenz und Laktat bei Kaderschwimmerinnen über 100 m F. Quelle: Rudolph (2014, S. 86) 74
- Abbildung 18: Einstufung der verschiedenen Schwellen im Schwimmen zueinander aus den Angaben mehrerer Autoren 79
- Abbildung 19: Beziehung zwischen den Schwellen der LLK und den Trainingszonen. Im mittleren Bereich Veränderungen der La^- -Konzentration und der VO_2 während eines Stufentests im Schwimmen mit den Schwellen. Außen herum die einzelnen Trainingszonen mit Darstellung des La^- und VO_2 -Verhaltens. Quelle: Jeanne Dekerle und Pelayo (2011, S. 291) 85
- Abbildung 20: Strecken- und Geschlechtsspezifische Abhängigkeit der maximalen Laktatkonzentration L_{max} . 100
- Abbildung 21: Strecken- und Geschlechtsspezifische Abhängigkeit von b_{LLK} . 101
- Abbildung 22: Strecken- und Geschlechtsspezifische Abhängigkeit von $P_{4,0}$. 102
- Abbildung 23: Das Verhältnis der Parameter L_{max} und $P_{4,0}$ zueinander. 103
- Abbildung 24: Das Verhältnis der Parameter b_{LLK} und $P_{4,0}$ zueinander. 104
- Abbildung 25: Entwicklung der v_{max} in den einzelnen Disziplinen über die drei Erhebungszeiträume (EZ 1–3) jeweils für männlich als durchgezogene Linie und für weiblich als gestrichelte Linie dargestellt. 106
- Abbildung 26: Entwicklung der L_{max} in den einzelnen Disziplinen über die drei Erhebungszeiträume (EZ1–3) jeweils für männlich als durchgezogene Linie und für weiblich als gestrichelte Linie dargestellt. 108
- Abbildung 27: Entwicklung von b_{LLK} in den einzelnen Disziplinen über die drei Erhebungszeiträume (EZ 1–3) jeweils für männlich als durchgezogene Linie und für weiblich als gestrichelte Linie dargestellt. 110

- Abbildung 28: Entwicklung von $P_{4,0}$ in den einzelnen Disziplinen über die zwei Erhebungszeiträume (EZ 2–3) jeweils für männlich als durchgezogene Linie und für weiblich als gestrichelte Linie dargestellt. 112
- Abbildung 29: Entwicklung von P_{max} in den einzelnen Disziplinen über die zwei Erhebungszeiträume (EZ 2–3) jeweils für männlich als durchgezogene Linie und für weiblich als gestrichelte Linie dargestellt. 115
- Abbildung 30: Vergleich der LLK jeweils eines 100-m- (schwarz), und 200-m- (dunkelblau) Brustschwimmers und einer 100-m-(grau), und 200-m- (hellblau) Brustschwimmerin. Genaue Angaben zu den Kenngrößen in Tab. 22. 118
- Abbildung 31: Darstellung der Ermittlung dreier der vier ausgewählten Methoden der Schwellenbestimmung an der LLK: die 4-mmol-Schwelle (schwarz), die +1,5-Methode (grün) und die D_{max} -Methode (orange). Die zugehörigen Geschwindigkeitswerte sind in der gleichen Farbe angezeigt. 130
- Abbildung 32: Darstellung der Ermittlung der Schwellenbestimmung mittels der log-log-Methode: sowohl die Laktat-, wie auch Geschwindigkeitswerte wurden logarithmiert. Eine Trendlinie verbindet die ersten beiden Messwerte aus dem aeroben Bereich, die zweite Trendlinie die folgenden fünf Messpunkte. Der Schnittpunkt bildet die aerobe Schwelle. 131
- Abbildung 33: X–Y-Diagramm mit orthogonaler Regressionsgeraden für den Vergleich von t_{log} und $t_{+1,5}$ (grün) und der 45°-Identitätsgeraden (grau). 139
- Abbildung 34: Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich von t_{log} und $t_{+1,5}$ mit einem bias \bar{d} von 1,74 s und 95 % limits of agreement von $\pm 7,88$ s (grün). 139
- Abbildung 35: X–Y-Diagramm und Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich von $t_{4,0}$ und t_{log} . 140
- Abbildung 36: X–Y-Diagramm und Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich von $t_{4,0}$ und $t_{+1,5}$. 141

- Abbildung 37: X–Y-Diagramm und Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich von $t_{4,0}$ und t_{Dmax} . 141
- Abbildung 38: X–Y-Diagramm und Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich von t_{log} und t_{Dmax} . 142
- Abbildung 39: X–Y-Diagramm und Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich von $t_{+1,5}$ und t_{Dmax} . 142
- Abbildung 40: Mittelwerte der einzelnen Kategorien der CS 144
- Abbildung 41: X–Y-Diagramm mit orthogonaler Regressionsgeraden für den Vergleich von $CS_{100-800}$ und CS_{Zacca} mit $y = 0,82x + 28,66$ (grün) und der 45°-Identitätsgeraden (grau) und zugehörigem Bland-Altman-Diagramm für den Vergleich mit einem bias \bar{d} von 0,14 s und 95 % limits of agreement von $\pm 13,08$ s (grün). 146
- Abbildung 42: Dropout-Diagramm für den Dauertest zur Validierung der $CS_{100-400}$ mit Angabe der Distanz und der Zeitdifferenz zwischen vorgegebener Geschwindigkeit und tatsächlich geschwommener Zeit in s / 100 m. 149
- Abbildung 43: X–Y-Diagramm mit orthogonaler Regressionsgeraden für den Vergleich von t_{AnS} und $CS_{200-1500}$ mit $y = 0,41x + 85,3$ (grün) und der 45°-Identitätsgeraden (grau) und zugehörigem Bland-Altman-Diagramm mit einem bias \bar{d} von -8,82 s und 95 % limits of agreement von $\pm 19,24$ s (grün). 150
- Abbildung 44: Grafische Darstellung der Mittelwerte aller ermittelten Grenzgeschwindigkeiten in m/s. Die berechneten Kategorien der CS in blau, die CS_{Zacca} in dunkelblau, die Schwellengeschwindigkeiten aus dem Stufentest in grau und der Mittelwert dieser Schwellengeschwindigkeiten in schwarz. 152
- Abbildung 45: Geschwommene Distanz bis zum Abbruch im 1500 m Dauertest (blau). Differenzen zwischen der vorgegebenen und reell im Dauertest geschwommenen Geschwindigkeit (orange) sowie Differenz zwischen den berechneten und den im Dauertest gemessenen Laktatkonzentrationen (grün). 155
- Abbildung 46: Histogramme für die Verteilungen im Dropout-Diagramm aus Abb. 45. Häufigkeit in Kategorien der geschwommenen Distanz bis zum

	Testabbruch, der Zeitdifferenz zur Sollzeit und der Laktatdifferenz zur vorab berechneten Laktatkonzentration.	156
Abbildung 47:	Anzahl der von deutschen Schwimmern gewonnenen Medaillen bei Olympischen Spielen (schwarz) und Weltmeisterschaften (grau) inklusiv der WM 2019.	175
Abbildung 48:	Beispielprotokollblatt für Schwimmer aus dem 7 × 200 m Stufentest	202

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Modellansatz der Leistungsstruktur im Schwimmen am Beispiel eines 100m-Wettkampfes. Quelle: Rudolph (2015), S. 9); in Anlehnung an Grundlach, 1980	16
Tabelle 2:	Angenommener relativer Anteil der drei Energiesysteme beim Schwimmen. Quelle: Übersetzt aus Ferran Rodriguez und Mader (2011, S. 232)	23
Tabelle 3:	Historische Übersicht über die Entwicklung der aeroben und anaeroben Schwellenkonzepte	30
Tabelle 4:	Statistische Kennwerte (Mittelwert mit Standardabweichung) der Laufgeschwindigkeit, sowie der Laktatkonzentration und Herzfrequenz an der durch die sieben verschiedenen Modelle ermittelten Laktatschwelle. Quelle: Dörr (2010, S. 60)	35
Tabelle 5:	Ablaufprotokoll Pansold-Test für die 100- und 200-m-Strecken nach Pansold und Zinner (1994)	48
Tabelle 6:	Ablaufprotokoll Pansold-Test für die 400-m-Strecken nach Buck (2012)	48
Tabelle 7:	Ablauf des 7 × 200 m Stufentests des Australischen Schwimmverbandes	52
Tabelle 8:	Testablauf Stufentest nach Sweetenham und Atkinson (2003) für männliche Nachwuchsschwimmer in Kraul	53
Tabelle 9:	Testablauf des Stufentests nach Maglischo (2003)	53
Tabelle 10:	Ablauf des Stufentests nach Simon und Thiesmann (1986)	54
Tabelle 11:	Verwendete Beispieldaten zur Berechnung der CS und ASC für die Abb. 15.	67
Tabelle 12:	Übersichtstabelle zu den verwendeten Begriffen bezüglich der Einteilung von physiologischen Schwellen und Belastungszonen.	82
Tabelle 13:	Übersicht zu den Trainingszonen im Schwimmen mit Angabe der Belastungsnormativa.	90
Tabelle 14:	Anthropometrische Daten der Stichprobe aus EZ 3 mit Mittelwert und Standardabweichung	97

Tabelle 15: Mittelwerte und Standardabweichungen der disziplinspezifischen Bestzeiten aus den beiden Erhebungszeiträumen EZ 2 und EZ 3 mit statistischer Auswertung.	105
Tabelle 16: Mittelwerte und Standardabweichungen der v_{\max} aus allen Disziplinen und Erhebungszeiträumen mit statistischer Auswertung.	107
Tabelle 17: Mittelwerte und Standardabweichungen der L_{\max} aus allen Disziplinen und Erhebungszeiträumen mit statistischer Auswertung.	109
Tabelle 18: Mittelwerte und Standardabweichungen der b_{LLK} aus allen Disziplinen und Erhebungszeiträumen mit statistischer Auswertung.	111
Tabelle 19: Mittelwerte und Standardabweichungen der $v_{4,0}$ aus allen Disziplinen und allen Erhebungszeiträumen mit statistischer Auswertung.	113
Tabelle 20: Mittelwerte und Standardabweichungen der $P_{4,0}$ aus allen Disziplinen und den Erhebungszeiträumen EZ 2 und EZ 3 mit statistischer Auswertung.	114
Tabelle 21: Mittelwerte und Standardabweichungen der P_{\max} aus allen Disziplinen und den Erhebungszeiträumen EZ 2 und EZ 3 mit statistischer Auswertung.	116
Tabelle 22: Kenngrößen der Beispielkurven aus Abb. 30	119
Tabelle 23: Testablauf für den 7 × 200 m Stufentest für Schwimmer mit einer persönlichen BZ von unter 2:10 min.	128
Tabelle 24: Ergebnisse aller paarweisen Vergleiche der Berechnungsmethoden mit Funktion der orthogonalen Regressionsgeraden, ICC, r_{CCC} , und $\text{bias } \bar{d} \pm 95\% \text{ limits of agreement } (\pm 1,96 \text{ SD})$.	140
Tabelle 25: Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden der CS durch Einbeziehen unterschiedlicher Streckenlängen zwischen 100 und 1500 m und der Bestimmungsmethode nach Zacca (Mittelwert und Standardabweichung für alle Teilnehmer, nur Männer und nur Frauen in m/s).	143
Tabelle 26: Korrelationsmatrix für die Vergleiche zwischen den verschiedenen Kategorien der CS. Grau markiert die signifikanten Unterschiede.	145
Tabelle 27: Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden der ASC durch Einbeziehen unterschiedlicher Streckenlängen zwischen 100 und 1500 m (Mittelwert und Standardabweichung für alle Teilnehmer, nur Männer und nur Frauen).	145

Tabelle 28: Ergebnisdaten der einzelnen Teilnehmer an der Studie zur Validierung der CS ₁₀₀₋₄₀₀ im Dauertest mit Mittelwerten und Standardabweichung.	148
Tabelle 29: Mittelwerte und Standardabweichungen aller bestimmten Grenzgeschwindigkeiten in m/s und umgerechnet als benötigte Zeit [s] pro 200 m.	151
Tabelle 30: Korrelationsmatrix aller ermittelten Grenzgeschwindigkeiten. Grau markiert die signifikanten Unterschiede.	153
Tabelle 31: Matrix aller ICC-Konkordanz-Korrelationskoeffizienten für sämtliche bestimmten Grenzgeschwindigkeiten. Dabei zeigt die farbliche Markierung folgenden Grad der Übereinstimmung an.	154
Tabelle 32: Ergebnis der Sensitivitätsüberprüfung bei einer Regressionsgeraden mit 5 bzw. 7 Messpunkten. Alle einzelnen Messpunkte wurden um 5 bzw. 10 % nach oben oder unten variiert. Die resultierende Veränderung der Regressionskurve zeigt sich zum einen in den Parametern a und b aus der Funktion $y=a \cdot e^{b \cdot x}$ und zum anderen in der veränderten Schwellengeschwindigkeit $v_{4,0}$ bzw. der Zeit $t_{4,0}$ pro 100 m.	203

11. Abkürzungsverzeichnis

100m TZ	Trainingszeit	86
a	y-Achsenabschnitt einer Geraden	66
ANOVA	Varianzanalyse	99
AnS	Anaerobe Schwelle	28
ASC	Anaerobic swimming capacity	68
ATP	Adenosintriphosphat	25
b	Steigung einer Geraden	66
B	Brustschwimmen	98
b _{LLK}	Koeffizient b der Funktion der Laktatleistungskurve	50
bpm	beats per minute (Schläge pro Minute)	86
BZ	Bestzeit	48
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	27
CS	Critical swimming speed	65
DSV	Deutscher Schwimmverband	6
EZ	Erhebungszeitraum	97
F	Freistilschwimmen	98
GLA	Grundlagenausdauer	18
H ⁺ -Ionen	Wasserstoffionen	26
H ₂ O	Wasser	27
HCO ₃ ⁻	Bikarbonat	27
Hf	Herzfrequenz	38
Hf _{max}	maximale Herzfrequenz	74
IAnS	Individuelle anaerobe Schwelle	33
ICC	Intraclass Korrelationskoeffizient	135
KLD	komplexe Leistungsdiagnostik	9
KP	Kreatinphosphat	23
La ⁻	Laktat	26
LLK	Laktatleistungskurve	28
L _{max}	maximaler Laktatwert	49
LT	Lactate threshold	29
MAV	maximale aerobe Geschwindigkeit	76

MLSS	Maximales Laktat-Steady-State	10
MW _{AnS}	Mittelwert der Schwellengeschwindigkeiten aus dem Stufentest	134
OBLA	onset of lactate accumulation	32
OSP	Olympiastützpunkt	9
P _{4,0}	Leistung bei Laktat 4 mmol/l in % der Bestzeit	49
P _{max}	maximale Leistung in % der Bestzeit	50
R	Rückenschwimmen	98
RCP	Respiratorischer Kompensationspunkt	29
RPE	rating of perceived exertion / Anstrengungsgrad	86
s	Streckenlänge	66
t	Zeit	66
v	Geschwindigkeit	66
V _{+1,5}	Geschwindigkeit an der Schwelle Basislaktat + 1,5 mmol/l	128
V _{4,0}	Geschwindigkeit an der 4-mmol-Schwelle	49
V ₄₀₀	maximale 400-m-Geschwindigkeit	77
VCO ₂	Kohlendioxidabgabe	36
V _{Dmax}	Geschwindigkeit an der Dmax-Schwelle	128
VE	Atemminutenvolumen	36
VE/VO ₂	Atemäquivalent	36
V _{log}	Geschwindigkeit an der Schwelle nach der log-log-Methode	129
V _{max}	maximale Schwimmgeschwindigkeit	49
V _{MLSS}	Geschwindigkeit am MLSS	77
VO _{2max}	maximale Sauerstoffaufnahme	22
VT1	Ventilatorische Schwelle (ventilatory threshold) 1	29
VT2	ventilatorische Schwelle (ventilatory threshold) 2	29
VVO _{2max}	Geschwindigkeit an der VO _{2max}	76
W _{crit}	Critical power	65

12. Literaturverzeichnis

- ADAPT. (2019). ADAPT. Software program for lactate threshold [Computer software]: Australian Institute of Sports.
- Alberty, M., Potdevin, F., Dekerle, J., Pelayo, P., Gorce, P. & Sidney, M. (2008). Changes in swimming technique during time to exhaustion at freely chosen and controlled stroke rates. *Journal of sports sciences*, 26 (11), 1191–1200.
- Anderson, M. E., Hopkins, W. G., Roberts, A. D. & Pyne, D. B. (2006). Monitoring seasonal and long-term changes in test performance in elite swimmers. *European Journal of Sport Science*, 6(3), 145–154.
- ARTE Dokumentation (Autor). (2008). *Im Körper der Topathleten - Michael Phelps* [Video]. Verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=MBSi4vb8Br4>
- Baron, B., Dekerle, J., Robin, S., Nevriere, R., Dupont, L., Matran, R. et al. (2003). Maximal lactate steady state does not correspond to a complete physiological steady state. *International Journal of Sports Medicine*, 24 (8), 582–587. <https://doi.org/10.1055/s-2003-43264>
- Baron, B., Noakes, T. D., Dekerle, J., Moullan, F., Robin, S., Matran, R. et al. (2008). Why does exercise terminate at the maximal lactate steady state intensity? *British Journal of Sports Medicine*, 42 (10), 828–833. <https://doi.org/10.1136/bjism.2007.040444>
- Bassett, D. R., JR & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32 (1), 70–84.
- Beaver, W. L., Wasserman, K. & Whipp, B. J. (1985). Improved detection of lactate threshold during exercise using a log-log transformation. *Journal of applied Physiology*, 59.
- Beneke, R. (2003). Methodological aspects of maximal lactate steady state-implications for performance testing. *European Journal of Applied Physiology*, 89(1), 95–99. <https://doi.org/10.1007/s00421-002-0783-1>
- Billat, L. V., Koralsztein, J. P. & Morton, R. H. (1999). Time in human endurance models. From empirical models to physiological models. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 27 (6), 359–379.
- Billat, V. L., Sirvent, P., Py, G., Koralsztein, J.-P. & Mercier, J. (2003). The concept of maximal lactate steady state: a bridge between biochemistry, physiology and

- sport science. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 33 (6), 407–426.
<https://doi.org/10.2165/00007256-200333060-00003>
- Bishop, D., Jenkins, D. G. & Mackinnon, L. T. (1998). The relationship between plasma lactate parameters, Wpeak and 1-h cycling performance in women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30 (8), 1270–1275.
- Bland, J. M. & Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet (London, England)*, 1 (8476), 307–310.
- Bosquet, L., Leger, L. & Legros, P. (2002). Methods to determine aerobic endurance. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 32 (11), 675–700.
<https://doi.org/10.2165/00007256-200232110-00002>
- Bourdon, P. (2000). Blood lactate transition thresholds: concepts and controversies. In C. J. Gore (Hrsg.), *Physiological tests for elite athletes* (S. 50–65). Lower Mitcham: Human Kinetics.
- Bredel, J. (1991). *Erfahrungen mit dem CONCONI-Test im Schwimmen. Anwendungsaspekte sportwissenschaftlicher Forschung*. Erlensee: SFT-Verl.
- Brooks, G. A. (1985). Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 17 (1), 22–34.
- Brooks, G. A. (2002). Lactate shuttles in nature. *Biochemical Society Transactions*, 30(2), 258–264.
- Brooks, G. A., Brooks, T. G. & Brooks, S. (2008). Laktat als metabolisches Signal der Genexpression. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 59 (12), 280–286.
- Buck, M. (2012). *Vorgaben für die Durchführung Tests im Rahmen der KLD. Ausdauer - Stufentest nach Pansold* (DSV, Hrsg.).
- 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>
- Clasing, D., Weicker, H. & Böning, D. (Hrsg.). (1994). *Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik*. Stuttgart, Jena, New York: Gustav Fischer Verlag.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Hoboken: Taylor and Francis.

- Costa, A. M., Silva, A. J., Louro, H., Reis, V. M., Garrido, N. D., Marques, M. C. et al. (2009). Can the curriculum be used to estimate critical velocity in young competitive swimmers? *Journal of Sports Science and Medicine*, 8, 17–23.
- Coyle, E. F., Coggan, A. R., Hemmert, M. K., Lowe, R. C. & Walters, T. J. (1985). Substrate usage during prolonged exercise following a preexercise meal. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 59 (2), 429–433. <https://doi.org/10.1152/jappl.1985.59.2.429>
- Coyle, E. F., Coggan, A., Hemmert, M. & Walters, T. (1984). Glycogen usage and performance relative to lactate threshold. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 16 (2), 120–121.
- Cserépy, S., Bissig, M. & Gröbli, C. (Hrsg.). (2014). *SchwimmWelt. Schwimmen lernen - Schwimmtechnik optimieren : Grundlagenlehrmittel für den Schwimmsport* (4. Auflage). Bern: Schulverlag plus. Verfügbar unter <http://www.schwimmwelt.ch>
- Czuba, M., Zając, A., Cholewa, J., Poprzęcki, S., Waśkiewicz, Z. & Mikołajec, K. (2009). Lactate Threshold (D-Max Method) and Maximal Lactate Steady State in Cyclists. *Journal of Human Kinetics*, 21 (1), 49–56. <https://doi.org/10.2478/v10078-09-0006-5>
- Davis, J. A., Vodak, P., Wilmore, J. H., Vodak, J. & Kurtz, P. (1976). Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise. *Journal of Applied Physiology*, 41(4), 544–550. <https://doi.org/10.1152/jappl.1976.41.4.544>
- Dekerle, J., Brickley, G., Alberty, M. & Pelayo, P. (2010). Characterising the slope of the distance–time relationship in swimming. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(3), 365–370. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2009.05.007>
- Dekerle, J., Pelayo, P., Clipet, B., Depretz, S., Lefevre, T. & Sidney, M. (2005). Critical swimming speed does not represent the speed at maximal lactate steady state. *International Journal of Sports Medicine*, 26 (7), 524–530. <https://doi.org/10.1055/s-2004-821227>
- Dekerle, J., Sidney, M., Hespel, J. M. & Pelayo, P. (2002). Validity and reliability of critical speed, critical stroke rate, and anaerobic capacity in relation to front crawl swimming performances. *International Journal of Sports Medicine*, 23 (2), 93–98. <https://doi.org/10.1055/s-2002-20125>
- Dekerle, J. (2006). The use of critical velocity in swimming? A place for critical stroke rate? *Biomechanics and Medicine in Swimming X*, 6 (Suppl2), 201–205.

- Dekerle, J. & Pelayo, P. (2011). Assessing aerobic endurance in swimming. In L. Seifert & D. Chollet (Hrsg.), *World book of swimming. From science to performance* (Sports and athletics preparation, performance and psychology, S. 277–296). New York: Nova Science Publishers.
- Di Prampero, P. E. (1999). The concept of critical velocity: a brief analysis. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 80 (2), 162–164.
- Dickhuth, H.-H., Huonker, M., Münzel, T., Drexler, H., Berg, A. & Keul, J. (1991). Individual anaerobic threshold for evaluation of competitive athletes and patients with left ventricular dysfunctions. In N. Bachl, T. E. Graham & H. Löllgen (Hrsg.), *Advances in ergometry*. Berlin: Springer-Verlag.
- Dörr, C. (2010). *Untersuchung der Validität verschiedener Laktatschwellenkonzepte an Ausdauersportlern*. Dissertation. Justus-Liebig-Universität, Gießen.
- Espada, M. C., Reis, J. F., Almeida, T. F., Bruno, P. M., Vleck, V. E. & Alves, F. B. (2015). Ventilatory and Physiological Responses in Swimmers Below and Above Their Maximal Lactate Steady State. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29 (10), 2836–2843. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000504>
- Ettema, J. H. (1966). Limits of human performance and energy-production. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie*, 22 (1), 45–54. <https://doi.org/10.1007/BF00694796>
- Farrell, P. A., Wilmore, J. H., Coyle, E. F., Billing, J. E. & Costill, D. L. (1979). Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Medicine and Science in Sports*, 11 (4), 338–344.
- Faude, O., Meyer, T., Scharhag, J., Weins, F., Urhausen, A. & Kindermann, W. (2008). Volume vs. intensity in the training of competitive swimmers. *International Journal of Sports Medicine*, 29 (11), 906–912. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1038377>
- Faude, O., Kindermann, W. & Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts. How valid are they? *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 39(6), 469–490. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939060-00003>
- Fernandes, R. & Vilas-Boas, J. P. (1999). Critical velocity as a criterion for estimating aerobic training pace in juvenile swimmers. In K. Keskinen, P. Komi & A. P. Hollander (Hrsg.), *Biomechanics and medicine in swimming VIII* (S. 233–238). Jyv.,skyl,: University of Jyv.,skyl,.

- Fernandes, R. J., Sousa, M., Machado, L. & Vilas-Boas, J. P. (2011). Step length and individual anaerobic threshold assessment in swimming. *International Journal of Sports Medicine*, 32(12), 940–946. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1283189>
- Foxdal, P., Sjödin, B., Sjödin, A. & Östman, B. (1994). The Validity and Accuracy of Blood Lactate Measurements for Prediction of Maximal Endurance Running Capacity. *International journal of sports medicine*, 15 (2), 89–95.
- Fröhner, G. (2002). Zustand des Körperbaus und des Halte- und Bewegungssystems bei Nachwuchs- und Hochleistungsschwimmern und trainingsbegleitende Prävention. In DSTV (Hrsg.), *Schwimmen Lernen und Optimieren* (Bd. 21, S. 79–98). Rüsselsheim: Eigenverlag.
- Fuhrmann, S., Kunz, M., Lambertz, H., Wirth, K., Keiner, M., Hartmann, H. et al. (2017). *Rahmentrainingsplan zum Krafttraining im Beckenschwimmen*.
- Gladden, L. B. (2000). Muscle as a consumer of lactate. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32 (4), 764–771.
- Gladden, L. B. (2004). Lactate metabolism: a new paradigm for the third millennium. *The Journal of Physiology*, 558 (Pt 1), 5–30. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.058701>
- Gladden, L. B. (2008a). Current trends in lactate metabolism: introduction. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40 (3), 475–476. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31816154c9>
- Gladden, L. B. (2008b). A lactatic perspective on metabolism. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40 (3), 477–485. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31815fa580>
- Gore, C. J. (Hrsg.). (2000). *Physiological tests for elite athletes*. Lower Mitcham: Human Kinetics.
- Graumnitz, J., Küchler, J. & Lachmann, B. (2009). Zur Struktur der Wettkampfleistungen – Startabschnitt. *swim&more*, (11), 16–18.
- Graumnitz, J., Küchler, J. & Lachmann, B. (2010). Zur Struktur der Wettkampfleistungen – Bewegungsablauf im Wendenabschnitt. *swim&more*, (1), 44–45.
- Greco, C. C., Oliveira, M. F. M. de, Caputo, F., Denadai, B. S. & Dekerle, J. (2013). How narrow is the spectrum of submaximal speeds in swimming? *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27 (5), 1450–1454. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318265a6ce>

- Griess, M., Tegtbur, U., Braumann, K.-M., Maassen, N. & Busse, M. W. (1989). *Eine Methode zur Ermittlung der Dauerleistungsgrenze im Schwimmsport. Sport - Rettung oder Risiko für die Gesundheit? 31. Deutscher Sportärztekongress, Hannover 1988*. Köln: Dt. Ärzte-Verl.
- Heck, H. & Beneke, R. (2008). 30 Jahre Laktatschwellen – was bleibt zu tun? *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 59 (12), 297–302.
- Heck, H., Mader, A., Hess, G., Mucke, S., Müller, R. & Hollmann, W. (1985). Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *International Journal of Sports Medicine*, 6 (3), 117–130. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1025824>
- Heck, H. & Roszkopf, P. (1993). Laktat-Leistungsdagnostik (II): Die Laktat-Leistungsdagnostik - valider ohne Schwellenkonzepte. *Therapiewoche / TW-Sport + Medizin*, 5 (5), S. 344-352.
- Heck, H. & Roszkopf, P. (1994). Grundlagen verschiedener Laktatschwellenkonzepte und ihre Bedeutung für die Trainingssteuerung. In D. Clasing, H. Weicker & D. Böning (Hrsg.), *Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik* (S. 111–131). Stuttgart, Jena, New York: Gustav Fischer Verlag.
- Hill, D. W. & Rowell, A. L. (1996). Significance of time to exhaustion during exercise at the velocity associated with VO₂max. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 72 (4), 383–386.
- Hoffmann, C. & Lames, M. (2017). Entwicklung von Ausdauerleistungen deutscher Spitzenschwimmer über drei Jahrzehnte. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 68(10), 243–248. <https://doi.org/10.5960/dzsm.2017.297>
- Hohmann, A., Lames, M. & Letzelter, M. (2010). *Einführung in die Trainingswissenschaft* (5., unveränd. Aufl.). Wiebelsheim: Limpert.
- Hollmann, W. (1961). Die ärztliche Beurteilung der körperlichen Höchst- und Dauerleistungsfähigkeit. *Die Umschau in Wissenschaft und Technik*, (22), 689–692.
- Holroyd, A. M. & Swanwick, K. M. (1993). A mathematical model for lactate profiles and a swimming power expenditure formula for use in conjunction with it. *Journal of swimming research*, 9, 25–31.
- Hopkins, W. G. (2000). Measures of Reliability in Sports Medicine and Science. *Sports Medicine*, 30 (1), 1–15.

- Horn, F. & Moc, I. (2012). *Biochemie des Menschen. Das Lehrbuch für das Medizinstudium* (5., korrigierte Aufl.). Stuttgart: Thieme. <https://doi.org/10.1055/b-002-10324>
- Hottenrott, K. & Neumann, G. (2008). *Methodik des Ausdauertrainings* (Beiträge zur Lehre und Forschung im Sport, Bd. 165). Schorndorf: Hofmann.
- Hughson, R. L. & Green, H. J. (1982). Blood acid-base and lactate relationships studied by ramp work tests. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14 (4), 297–302.
- Ivy, J. L., Withers, R. T., van Handel, P. J., Elger, D. H. & Costill, D. L. (1980). Muscle respiratory capacity and fiber type as determinants of the lactate threshold. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 48(3), 523–527. <https://doi.org/10.1152/jappl.1980.48.3.523>
- Keul J., Simon G., Berg A., Dickhuth H.-H., Goerttler I., Kübel R. (1979). Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle zur Leistungsbewertung und Trainingsgestaltung. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 30 (7), 212–218.
- Kindermann, W. (2004). Standards der Sportmedizin. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 55(6), 162.
- Kindermann, W., Simon, G. & Keul, J. (1979). The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 42 (1), 25–34.
- Klentrou, P. P. & Montpetit, R. R. (1991). Physiologic and physical correlates of swimming performance. *Journal of Swimming Research*, 7 (1), S. 13-18.
- Koch, R. & Spörl, E. (2007). Statistische Verfahren zum Vergleich zweier Messmethoden und zur Kalibrierung: Konkordanz-, Korrelations- und Regressionsanalyse am Beispiel der Augeninnendruckmessung. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*, 224(1), 52–57. <https://doi.org/10.1055/s-2006-927278>
- Koo, T. K. & Li, M. Y. (2015). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15 (2), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- LaFontaine, T. P., Londeree, B. R. & Spath, W. K. (1981). The maximal steady state versus selected running events. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 13 (3), 190–193.

- Lambertz, H. (2014). Das Perspektiv-Team-Projekt. In DSTV (Hrsg.), *Der Schwimmtrainer. Fachzeitschrift für den Schwimmtrainer* (S. 18–48). Rüsselsheim. Verfügbar unter http://www.dsv.de/fileadmin/dsv/images/schwimmen/News/2014_Ausschreibungen/Perspetiv_Team_Projekt__PTP__Endfassung.pdf
- Leopold, W. (2000a). Zum Anliegen der Leistungsdiagnostik im DSV. In DSTV (Hrsg.), *Schwimmen Lernen und Optimieren* (Bd. 17, Bd. 17, S. 7–13). Rüsselsheim: Eigenverlag.
- Leopold, W. (2000b). Zur Leistungsstruktur im Schwimmen und zur Ausprägung der Leistungsvoraussetzungen in den Disziplinen des Olympischen Programms. In DSTV (Hrsg.), *Schwimmen Lernen und Optimieren* (Bd. 17, Bd. 17, S. 14–18). Rüsselsheim: Eigenverlag.
- Lin, L. I.-K. (1989). A Concordance Correlation-Coefficient To Evaluate Reproducibility. *Biometrics*, 45. <https://doi.org/10.2307/2532051>
- Looney, S. W. & Hagan, J. L. (2015). *Analysis of Biomarker Data. A Practical Guide* (1. Aufl.). s.l.: Wiley. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=943222>
- Maassen, N., Schneider, G. (2011). Die kapilläre Laktatkonzentration als Maß für die Belastungsreaktion. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 62 (4), 92–97.
- Machado, L., Almeida, M., Morais, P., Fernandes, R. & Vilas-Boas, J. P. (2006). Assessing the individual anaerobic threshold: the mathematical model. *Rev Port Cien Desp*, 6 (Supl. 2), 142–144.
- MacLaren, D. P. & Coulson, M. (1999). Critical swim speed can be used to determine changes in training status. *Biomechanics and Medicine in Swimming VIII*, 227–231.
- Mader, A. (2015). *Die Chimäre des Dopings und die Irrealität der Trainingswissenschaft. Das deutsche Hochleistungssportsystem als Staatsreligion oder warum deutsche Sportler nicht mehr so erfolgreich sind, wie sie sein könnten* (1. Aufl.). Berlin: Buchwerkstatt.
- Mader A., Liesen H., Heck H., Philippi H., Rost R., Schürch P., Hollmann W. (1976). Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. *Sportarzt und Sportmedizin*, 27 (4), 109–112.
- Maglischo, E. W. (2003). *Swimming fastest*. Champaign, IL: Human Kinetics.

- Maiberger, A.-L. (2018). *Validierung des Modells der „critical swimming speed“ anhand eines Dauertests über 1500m Freistil. Zulassungsarbeit Lehramt Gymnasium, TU München.*
- Monod, H. & Scherrer, J. (1965). The work capacity of a synergetic muscular group. *Ergonomics*, 8 (3), 329–338. <https://doi.org/10.1080/00140136508930810>
- Moritani, T., Nagata, A., deVries, H. A. & Muro, M. (1981). Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics*, 24 (5), 339–350. <https://doi.org/10.1080/00140138108924856>
- Muniz-Pardos, B., Gomez-Bruton, A., Matute-Llorente, A., Gonzalez-Aguero, A., Gomez-Cabello, A., Gonzalo-Skok, O. et al. (2019). Swim-Specific Resistance Training: A Systematic Review. *Journal of Strength and Conditioning Research*. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000003256>
- Neumann, G. & Schüller, K.-P. (1994). *Sportmedizinische Funktionsdiagnostik. Mit 74 Tabellen* (Sportmedizinische Schriftenreihe, Bd. 29, 2., Neubearb. Aufl.). Leipzig: Barth.
- Ochwat, H. & Mayer, P. (2007). *Trainerhandbuch*. München: Aurach Druck GmbH.
- Olbrecht, J., Madsen, O., Mader, A., Liesen, H. & Hollmann, W. (1985). Relationship between swimming velocity and lactic concentration during continuous and intermittent training exercises. *International Journal of Sports Medicine*, 6 (2), 74–77. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1025816>
- Olbrecht, J. (2011). Lactate Production and Metabolism in Swimming. In L. Seifert & D. Chollet (Hrsg.), *World book of swimming. From science to performance* (Sports and athletics preparation, performance and psychology, S. 255–275). New York: Nova Science Publishers.
- Österreichisches Institut für Sportmedizin. (2019). *Leistungstest (Spiroergometrie)*. Verfügbar unter https://sportmedizin.or.at/index.php?option=com_content&view=article&id=73
- Pansold, B. & Zinner, J. (1994). Die Laktat-Leistungskurve - ein Analyse- und Interpretationsmodell der Leistungsdiagnostik im Schwimmen. In D. Clasing, H. Weicker & D. Böning (Hrsg.), *Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik* (S. 47–64). Stuttgart, Jena, New York: Gustav Fischer Verlag.
- Pansold, B. (1985). *Untersuchungsergebnisse zur komplexen Leistungsbewertung unter Berücksichtigung der Spezifität des Testverfahrens an ausgewählten*

- Gruppen und Probanden von Leistungssportlern.* Dissertation. Universität Greifswald, Greifswald.
- Pessenhofer, H., Schwabeger, G. & Schmid, P. (1980). Zur Bestimmung einer individuellen anaeroben Schwelle. In W. Kindermann (Hrsg.), *Sportmedizin für Breiten- und Leistungssport. Berichtsband 27. Deutscher Sportärztekongreß 16.10. - 19.10.1980.* Saarbrücken: Demeter Verlag Gräfelfing.
- Pfeifer, H. (1991). *Schwimmen* (Technik der Top-Athleten, Bd. 4, 1. Aufl.). Berlin: Sportverl.
- Pfeiffer, H. (1988). Probleme des Erkenntnisstandes über die Leistungsstruktur im Sportschwimmen und davon abzuleitende Anforderungen an das Training, an die Leistungsentwicklung und die Forschung, Theorie und Praxis des Leistungssports. *Theorie und Praxis des Leistungssports*, 26 (5/6), 37–51.
- Psycharakis, S., Cooke, C. B., Paradisis, G. P., O'Hara, J. & Phillips, G. (2008). Analysis of selected kinematic and physiological performance determinants during incremental testing in elite swimmers. *Journal of strength and conditioning research*, 22 (3), 951–957.
- Pyne, D., Lee, H. & Swanwick, K. (2001). Monitoring the lactate threshold in world-ranked swimmers.
- Pyne, D., Maw, G. & Goldsmith, W. (2000). Protocols for the physiological assessment of swimmers. In C. J. Gore (Hrsg.), *Physiological tests for elite athletes* (S. 372–382). Lower Mitcham: Human Kinetics.
- Pyne, D. B. & Sharp, R. L. (2014). Physical and energy requirements of competitive swimming events. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 24 (4), 351–359. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2014-0047>
- Robergs, R. A., Chwalbinska-Moneta, J., Mitchell, J. B., Pascoe, D. D., Houmard, J. & Costill, D. L. (1990). Blood Lactate Threshold Differences Between Arterialized and Venous Blood. *International journal of sports medicine*, 11, 446–451.
- Rodriguez, F., Moreno, D. & Keskinen, K. (2003). Validity of a two-distance simplified testing method for determining critical swimming velocity. In J.-C. Chatard (Ed.), *Biomechanics and medicine in swimming IX* (pp. 385–390).
- Rodriguez, F. & Mader, A. (2011). Energy Systems in Swimming. In L. Seifert & D. Chollet (Hrsg.), *World book of swimming. From science to performance* (Sports and athletics preparation, performance and psychology, S. 225–240). New York: Nova Science Publishers.

- Rossetto, M. (2007). Sport & Laktat. *FIT for LIFE*, (5), 82.
- Rudolph, K. (2006). Ausdauer und Kraftausdauer im System der Leistungsvoraussetzungen des Schwimmers und ihr Training. In DSTV (Hrsg.), *Schwimmen Lernen und Optimieren* (Bd. 25, S. 48–61). Rüsselsheim: Eigenverlag.
- Rudolph, K. (2014). *Hochleistungstraining* (Wege zum Topschwimmer, Bd. 3). Schorndorf: Hofmann.
- Rudolph, K., Bußmann, G.; Döttling, H. W.; Jankowski, A.; Jedamsky, A.; Lambertz, H.; Lamodke, F.; Ludewig, B.; Staufenbiel, K. & Spahl, O. (2.) (Mitarbeiter) (Rudolph, K., Hrsg.). (2015). *Nachwuchskonzeption Schwimmen 2020. Vom Grundlagen- bis zum Anschlussstraining*, DSV. Zugriff am 3.3.16. Verfügbar unter http://www.dsv.de/fileadmin/dsv/documents/schwimmen/Amtliches/150327_Nachwuchskonzeption_Schwimmen_2020.pdf
- Rudolph, K. & Berbalk, A. (2000). Ausdauerdiagnostik im Rahmen der DSV-KLD von 1992-97. In DSTV (Hrsg.), *Schwimmen Lernen und Optimieren* (Bd. 17, S. 33–55). Rüsselsheim: Eigenverlag.
- Schmid, W. & Mahnke, C. (Uni Karlsruhe, Hrsg.). (2016). *Mit 20 Trainingseinheiten zum Erfolg - Trainingsplan Schwimmen*. Zugriff am 19.07.19.
- Schmidt, A., Lim, W.-K., Haaker, R. & Simon, G. (1993). Akuter Einfluss eines intensiven Trainings auf Leistungsfähigkeit, Herzfrequenz- und Laktatverhalten während Laufbandergometerbelastung. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 44 (5), 184–195.
- Schramm, E. (1960). *Untersuchungen über die Abhängigkeit der Leistungen im Kraulschwimmen vom Kraft/Widerstand-Verhältnis*. Dissertation. Leipzig.
- Schramm, E. (1987). *Sportschwimmen*. Berlin: Sportverlag.
- Schwan, U. (2010). Physiologische Aspekte des Wasseraufenthalts und des Aquatrainings mit Herzpatienten. In A. Hahn (Hrsg.), *Biomechanische Leistungsdiagnostik im Schwimmen. Erfahrungen im Leistungssport und Ableitungen für die Ausbildung von Studierenden ; Beiträge zum dvs-Symposium Schwimmen 10. - 12.09.2009 in Leipzig* (1. Aufl., S. 69–73). Köln: Sportverl. Strauß.
- Simon, G., Berg, A., Dickhuth, H.-H., Simon-Alt, A. & Keul, J. (1981). Bestimmung der anaeroben Schwelle in Abhängigkeit vom Alter und von der Leistungsfähigkeit. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 32 (1), 7–14.

- Simon, G. & Thiesmann, M. (1986). Ermittlung der aeroben Leistungsfähigkeit im Schwimmsport. *Leistungssport*, 16 (3), 29–31.
- Simon, G., Thiesmann, M., Clasing, D. & Frohberger, U. (1983). Ergometrie im Wasser - eine neue Methode der Leistungsdiagnostik. In H. Heck (Hrsg.), *Sport: Leistung und Gesundheit. Deutscher Sportärztekongress '82 Köln* (S. 139–143). Köln: Deutscher Ärzte-Verlag.
- Sjodin, B. & Jacobs, I. (1981). Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *International Journal of Sports Medicine*, 2 (1), 23–26. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1034579>
- Skinner, J. S. & McLellan, T. M. (1980). The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 51 (1), 234–248. <https://doi.org/10.1080/02701367.1980.10609285>
- Smith, C. G. & Jones, A. M. (2001). The relationship between critical velocity, maximal lactate steady-state velocity and lactate turnpoint velocity in runners. *European Journal of Applied Physiology*, 85 (1-2), 19–26. <https://doi.org/10.1007/s004210100384>
- Smith, D. J., Norris, S. R. & Hogg, J. M. (2002). Performance evaluation of swimmers. *Sports Medicine*, 32(9), 539–554.
- Soldwisch, J. & Lipinski, T. (n-tv.de, Hrsg.). (2019). *Schwimmen verkümmert zur Randsportart*. Verfügbar unter <https://www.n-tv.de/sport/Schwimmen-verkuemmert-zur-Randsportart-article21132367.html>
- Spiegel ONLINE (SPIEGEL reporter 9/2000, Hrsg.). (2000, 1. September). *Das Biest will Gold*. Verfügbar unter <https://www.spiegel.de/spiegel/dokument/d-17293900.html>
- Stegmann, H., Kindermann, W. & Schnabel, A. (1981). Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. *International Journal of Sports Medicine*, 2 (3), 160–165. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1034604>
- Sweetenham, B. & Atkinson, J. (2003). *Championship swim training*. Champaign, Ill.: Human Kinetics.
- Thompson, K., Garland, S. & Lothian, F. (2006). Interpretation of the Physiological Monitoring of an International Swimmer. *International Journal of Sports Science & Coaching - INT J SPORTS SCI COACH*, 1 (2). <https://doi.org/10.1260/174795406777641249>

- Toubekis, A. G., Tsami, A. P. & Tokmakidis, S. P. (2006). Critical velocity and lactate threshold in young swimmers. *International Journal of Sports Medicine*, 27(2), 117–123. <https://doi.org/10.1055/s-2005-837487>
- Vogt, M., Brügger, O., Schütz, R., Wehrlin, J., Perret, C., Umberg, R. et al. (2005). *Physiologische Trainingsintensitätszonen* (Swiss Olympic, Hrsg.). Magglingen: Bundesamt für Spor.
- Wahl, P., Bloch, W. & Mester, J. (2009). Moderne Betrachtungsweisen des Laktats: Laktat ein überschätztes und zugleich unterschätztes Molekül. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 57 (3), 101–107.
- Wakayoshi, K., Ikuta, K., Yoshida, T., Udo, M., Moritani, T., Mutoh, Y. et al. (1992). Determination and validity of critical velocity as an index of swimming performance in the competitive swimmer. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 64 (2), 153–157.
- Wakayoshi, K., Yoshida, T., Udo, M., Kasai, T., Moritani, T. & Mutoh, Y. (1992). A Simple Method for Determining Critical Speed as Swimming Fatigue Threshold in Competitive Swimming. *International journal of sports medicine*, 13 (5), 367–371. Zugriff am 25.09.2017.
- Wakayoshi, K., Yoshida, T., Udo, M., Harada, T., Moritani, T., Mutoh, Y. et al. (1993). Does critical swimming velocity represent exercise intensity at maximal lactate steady state? *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 66 (1), 90–95. <https://doi.org/10.1007/BF00863406>
- Wasserman, K. & Mcilroy, M. (1964). Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *The American Journal of Cardiology*, 14, 844–852.
- Westhoff, M., Rühle, K. H., Greiwing, A., Schomaker, R., Eschenbacher, H., Siepmann, M. et al. (2013). Ventilatorische und metabolische (Laktat-)Schwellen. Positionspapier der Arbeitsgemeinschaft Spiroergometrie. *Deutsche medizinische Wochenschrift (1946)*, 138(6), 275–280. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1332843>
- Wiedner, H. (2002). Erfahrungen und Erkenntnisse aus trainingsbegleitenden Untersuchungen im Aufbau- und Anschlusstraining zum Schnellkraft- und Schnelligkeitstraining. In DSTV (Hrsg.), *Schwimmen Lernen und Optimieren* (Bd. 21, S. 54–67). Rüsselsheim: Eigenverlag.

- Wiedner, H. & Köthe, T. (2000). Zur weiteren Aufhellung dynamischer leistungsstruktureller Zusammenhänge im Sportschwimmen. Grundlagentraining und Beginn des Aufbautrainings. *Leistungssport*, Heft 2, S. 33–39.
- Wilke, K. & Madsen, Ø. (2015). *Wege zum Topschwimmer - Band 2. Nachwuchstraining* (1. Aufl.). Schorndorf, Württ: Hofmann.
- Wright B. & Smith D.J. (1994). A Protocol for the Determination of Critical Speed as an Index of Swimming Endurance Performance. *Medicine and Science in Aquatic Sports*, 39, 55–59.
- Yoshida, T., Chida, M., Ichioka, M. & Suda, Y. (1987). Blood lactate parameters related to aerobic capacity and endurance performance. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 56 (1), 7–11. <https://doi.org/10.1007/BF00696368>
- Zacca, R., Fernandes, R. J., Pyne, D. B. & Castro, F. A. (2016). Swimming Training Assessment: The Critical Velocity and the 400-m Test for Age-Group Swimmers. *Journal of strength and conditioning research*, 30 (5), 1365–1372. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001239>.
- Zacca, R., Azevedo, R., Silveira, R. P., Vilas-Boas, J. P., Pyne, D. B., S Castro, F. A. de et al. (2019). Comparison of incremental intermittent and time trial testing in age-group swimmers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33 (3), 801–810. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002087>
- Zacca, R., Castro, F. (2010). Predicting performance using critical swimming speed in young swimmers. In P.-L. Kjendlie, R. K. Stallman & J. Cabri (Hrsg.), *Biomechanics and Medicine in Swimming XI* (S. 120).
- Zaciorskij, V. M. & Safarjan, I. G. (1972). Artikel Untersuchung von Faktoren zur Bestimmung der maximalen Geschwindigkeit im Schwimmen. *Theorie und Praxis der Körperkultur*, 21 (2), 117–124.
- Zinner C, Krueger M, Wahl P, Sperlich B, Mester J. (2011). Comparison of Three Different Step Test Protocols in Elite Swimming. *Journal of exercise Physiology online*, 14 (1), 43–48.

13. Anhang

Stufentest Schwimmen



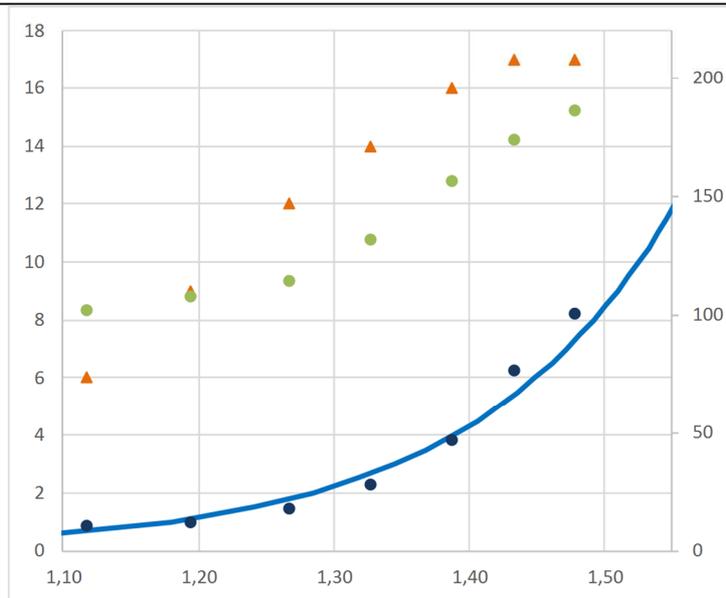
am 14.11.17 in München Olympiabad Technische Universität München

Name: Max Mustermann Jahrgang: 2003
 Verein: Stadtwerke München
 Größe: 178 Gewicht: 60
 Teststrecke: 200 F Bestzeit: 02:11,1

Stufe	50m	100m	150m	200m	Laktatwert	Frequenz	Pulswert	Borgwert	% der BZ
1. Stufe	00:42,1 00:42,1	01:28,2 00:46,1	02:13,3 00:45,1	02:59,1 00:45,8	0,86	31	102	6	73%
2. Stufe	00:39,5 00:39,5	01:22,6 00:43,1	02:05,3 00:42,7	02:47,5 00:42,2	0,97	30	108	9	78%
3. Stufe	00:37,5 00:37,5	01:17,8 00:40,3	01:57,5 00:39,7	02:37,8 00:40,3	1,46	32	114	12	83%
4. Stufe	00:35,4 00:35,4	01:12,3 00:36,9	01:51,4 00:39,1	02:30,7 00:39,3	2,26	34	132	14	87%
5. Stufe	00:33,7 00:33,7	01:09,6 00:35,9	01:47,3 00:37,7	02:24,2 00:36,9	3,81	36	156	16	91%
6. Stufe	00:32,5 00:32,5	01:07,4 00:34,9	01:44,7 00:37,3	02:19,5 00:34,8	6,24	40	174	17	94%
7. Stufe	00:30,1 00:30,1	01:04,9 00:34,8	01:40,7 00:35,8	02:15,3 00:34,6	8,2	44	186	17	97%

Vorbel. Puls: 108 Nachbelastung: 4min: 9,11 10min: 7,2
 Vorbel. Laktat: 0,88 a= 0,000 b= 6,681 R²= 0,959

Laktat	Prognose % der BZ
1	02:49,4 77%
2	02:35,7 84%
3	02:28,7 88%
4	02:24,1 91%
5	02:20,7 93%
6	02:18,1 95%
7	02:15,9 97%
8	02:14,1 98%
9	02:12,5 99%
10	02:11,1 100%
11	02:09,9 101%
12	02:08,8 102%
13	02:07,8 103%
14	02:06,9 103%
15	02:06,1 104%



4mmol-Schwelle	Pyne log-Methode	Simon-Schwelle	Dmax-Methode	Mittelwert
v P4 01:12,0	v P4 01:12,0	v 01:16,4	v 01:14,2	v 01:13,7
P4% BZ 91,01		Laktat 2,36	Laktat 3,04	

Abbildung 48: Beispielprotokollblatt für Schwimmer aus dem 7 x 200 m Stufentest

Tabelle 32: Ergebnis der Sensitivitätsüberprüfung bei einer Regressionsgeraden mit 5 bzw. 7 Messpunkten. Alle einzelnen Messpunkte wurden um 5 bzw. 10 % nach oben oder unten variiert. Die resultierende Veränderung der Regressionskurve zeigt sich zum einen in den Parametern a und b aus der Funktion $y=a \cdot e^{b \cdot x}$ und zum anderen in der veränderten Schwellengeschwindigkeit $v_{4,0}$ bzw. der Zeit $t_{4,0}$ pro 100 m.

Variation um 5 %

Messpkt.	Variation	7 Messpunkte				5 Messpunkte			
		a	b	$v_{4,0}$	$t_{4,0}/100\text{ m}$	a	b	$v_{4,0}$	$t_{4,0}/100\text{ m}$
1	+ 5 %	0,0011	5,8471	1,4040	01:11,2	0,0000	9,4575	1,5431	01:04,8
1	- 5 %	0,0008	6,0507	1,4068	01:11,1	0,0000	9,7616	1,5433	01:04,8
2	+ 5 %	0,0010	5,8795	1,4041	01:11,2	0,0000	9,5061	1,5428	01:04,8
2	- 5 %	0,0008	6,0166	1,4067	01:11,1	0,0000	9,7104	1,5436	01:04,8
3	+ 5 %	0,0010	5,9116	1,4041	01:11,2	0,0000	9,5948	1,5423	01:04,8
3	- 5 %	0,0009	5,9829	1,4067	01:11,1	0,0000	9,6172	1,5442	01:04,8
4	+ 5 %	0,0010	5,9345	1,4042	01:11,2	0,0000	9,6809	1,5418	01:04,9
4	- 5 %	0,0009	5,9588	1,4066	01:11,1	0,0000	9,5267	1,5448	01:04,7
5	+ 5 %	0,0009	5,9942	1,4043	01:11,2	0,0000	9,7893	1,5411	01:04,9
5	- 5 %	0,0010	5,8961	1,4065	01:11,1	0,0000	9,4127	1,5455	01:04,7
6	+ 5 %	0,0009	6,0163	1,4043	01:11,2				
6	- 5 %	0,0010	5,8728	1,4065	01:11,1				
7	+ 5 %	0,0008	6,0411	1,4044	01:11,2				
7	- 5 %	0,0011	5,8467	1,4065	01:11,1				
Größter Wert				1,4068	01:11,2			1,5455	01:04,9
Kleinster Wert				1,4040	01:11,1			1,5411	01:04,7
Spanne				0,0027	00:00,1			0,0044	00:00,2

Variation um 10 %

Messpkt.	Variation	7 Messpunkte				5 Messpunkte			
		a	b	$v_{4,0}$	$t_{4,0}/100\text{ m}$	a	b	$v_{4,0}$	$t_{4,0}/100\text{ m}$
1	+ 10 %	0,0013	5,7525	1,4027	01:11,3	0,0000	9,3161	1,5430	01:04,8
1	- 10 %	0,0007	6,1606	1,4082	01:11,0	0,0000	9,9258	1,5434	01:04,8
2	+ 10 %	0,0011	5,8159	1,4028	01:11,3	0,0000	9,4112	1,5424	01:04,8
2	- 10 %	0,0008	6,0906	1,4081	01:11,0	0,0000	9,8208	1,5441	01:04,8
3	+ 10 %	0,0010	5,8784	1,4030	01:11,3	0,0000	9,5843	1,5414	01:04,9
3	- 10 %	0,0008	6,0214	1,4080	01:11,0	0,0000	9,6294	1,5453	01:04,7
4	+ 10 %	0,0010	5,9233	1,4030	01:11,3	0,0000	9,7526	1,5404	01:04,9
4	- 10 %	0,0009	5,9718	1,4079	01:11,0	0,0000	9,4433	1,5465	01:04,7
5	+ 10 %	0,0008	6,0398	1,4033	01:11,3	0,0000	9,9643	1,5392	01:05,0
5	- 10 %	0,0011	5,8431	1,4078	01:11,0	0,0000	9,2093	1,5481	01:04,6
6	+ 10 %	0,0008	6,0831	1,4034	01:11,3				
6	- 10 %	0,0011	5,7952	1,4077	01:11,0				
7	+ 10 %	0,0007	6,1315	1,4034	01:11,3				
7	- 10 %	0,0012	5,7417	1,4077	01:11,0				
Größter Wert				1,4082	01:11,3			1,5481	01:05,0
Kleinster Wert				1,4027	01:11,0			1,5392	01:04,6
Spanne				0,0055	00:00,3			0,0089	00:00,4