

Aus dem Institut für Sportmedizin der
Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Dynamik der Blutlaktatkonzentration, metabolische und mechanische Leistung
beim Wingate Anaerobic Test**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité - Universitätsmedizin

von

Monika Mühling
aus Berlin

Datum der Promotion: 25.10.2013

*„Wer ES UNTERNIMMT AUF DEM GEBIET DER WAHRHEIT UND DER ERKENNTNIS
ALS AUTORITÄT AUFZUTRETEN, SCHEITERT AM GELÄCHTER DER GÖTTER.“*
Albert Einstein (1879–1955)

Inhaltsverzeichnis

A	Einleitung	6
B	Stand der Wissenschaft	10
1	Leistungsdiagnostische Testverfahren	10
1.1	Historische Entwicklung der Testverfahren	10
1.2	Aerobe Leistungsdiagnostik	11
1.2.1	Aerob dominierte Tests	11
1.2.2	Aerob dominierte Tests mit ansteigend anaerobem Energieanteil zu Testende	12
1.3	Anaerobe Leistungsdiagnostik	14
1.3.1	Anaerob dominierte Tests mit maximaler Kurzzeitbelastung	14
1.3.2	Testverfahren für die alaktazid anaerobe Kapazität	16
1.3.3	Bestimmung der laktaziden Leistungsfähigkeit	17
1.3.4	Testverfahren zur Bestimmung der laktaziden Kapazität	17
1.3.4	Testverfahren für die gesamte anaerobe Kapazität	17
2	Energiegewinnung bei körperlicher Tätigkeit	20
2.1	Energiebereitstellung für Muskelkontraktionen	20
2.2	Aerobe Energiegewinnung und deren Messgrößen	24
2.3	Anaerobe Energiegewinnung und deren biologische Messgrößen	25
2.3.1	Indirekte Methoden	25
2.3.2	Direkte Methoden	27
3	Energiebestimmung beim Wingate Anaerobic Test	28
4	Entwicklung von Berechnungsmodellen für die Verteilung von Stoffen im menschlichen Körper	29
5	Fragestellung	34
C	Methodik	36
1	Durchführung der Experimente	36
1.1	Versuchsaufbau	36
1.2	Probanden	36
1.3	Ablauf Gesamttest	37
1.4	Wingate Anaerobic Test	38
2	Bestimmung der Messgrößen	39
2.1	Leistungswerte	39
2.2	Kapillarblutentnahme	40
2.3	Atemgase	42

3	Datenanalyse und Statistik	42
3.1	Berechnungen	42
3.1.1	Berechnungen zum Laktatverlauf	42
3.1.2	Sauerstoffaufnahme während und nach einem Wingate Test	44
3.2	Energiebestimmung beim Wingate Test	45
3.3	Mechanischer Wirkungsgrad	45
3.4	Statistische Auswertung	46
D	Ergebnisse	47
1	Mechanische Leistung	47
2	Gemessene Laktatwerte	48
2.1	Laktatwerte in Ruhe und nach Erwärmung	48
2.2	Laktatmaximum und Zeitpunkt Laktatmaximum	49
2.3	Laktatverlauf	50
3	Anwendung der „alten“ und „neuen“ Berechnungsformeln	53
3.1	Berechnete Laktatmaxima, Delta-Laktatmaxima, Zeitpunkte der Laktatmaxima	53
3.2	Invasion- und Eliminationskonstanten, approximiertes Laktat A des Extravasalraums	55
4	Überprüfung von systematischen Anwendungseffekten der „alten“ und „neuen“ Formel	60
5	Sauerstoffaufnahme	63
5.1	Sauerstoffaufnahme während des WAnT	63
5.2	Sauerstoffaufnahme nach WAnT	65
6	Energetisches Profil des WAnT	68
6.1	Anaerobe Energie	68
6.1.1	Anaerob-laktazide Energie	68
6.1.2	Anaerob-alaktazide Energie	70
6.2	Aerobe Energie	70
6.3	Gesamtenergie und Wirkungsgrad	72
6.3.1	Energieprofil aus gemessenen Werten	72
6.3.2	Energieprofil aus berechneten Laktatwerten	73
6.3.3	Energieprofil aus dem approximierten Laktat A des Extravasalraums	74
E	Diskussion	75
1	Methodenkritik	75
1.1	Probanden	75
1.2	Einflussfaktoren auf die Leistung	76
1.3	Blutentnahmen	79

2	Ergebnisse	81
2.1	Gemessene Werte	81
2.1.1	Leistungswerte	81
2.1.2	Laktat	82
3	Grundsätzliches Laktatverhalten als Voraussetzung für Berechnungen	84
3.1	Drei-Parameter Bi-Exponential Modell	85
3.2	Güte des Fits der Berechnungsformeln	86
4	Berechnete Werte	86
4.1	Laktat	86
4.2	Approximiertes Laktat A des Extravasalraums	88
4.3	Invasions- und Eliminationskonstanten (k_1 , k_2)	90
5	Anwendungseffekte der Berechnungsformeln	93
6	Weitere Berechnungsmodelle	94
7	Energetisches Profil	95
7.1	Aerobe Energie	96
7.2	Anaerobe Energie	97
7.2.1	Anaerob-alkalazide Energie	98
7.2.2	Anaerob-laktazide Energie	99
7.3	Gesamtenergie und Wirkungsgrad	100
F	Zusammenfassung	106
G	Abkürzungsverzeichnis	109
H	Literaturverzeichnis	110
J	Publikationsliste der Doktorandin	121
I	Danksagung	122
K	Lebenslauf	123
	Eidessattliche Versicherung	124

A EINLEITUNG

„Vogel fliegt, Fisch schwimmt, Mensch läuft.“ Dieses bekannte Zitat von Emil Zatopek (19.09.1922 – 21.11.2000) bringt treffend zum Ausdruck, dass es in der Natur des Menschen liegt, sich zu bewegen. Seit den Anfängen der Sportmedizin beschäftigt sich die Wissenschaft mit der Frage, wie der Mensch die Energie dafür aufbringt.

Es ist hinreichend bekannt, dass der menschliche Körper zu Leistungen unter Anwesenheit von Sauerstoff, den aeroben Leistungen und zu Leistungen unter Abwesenheit von Sauerstoff, den anaeroben Leistungen, fähig ist. Je nach Anforderung überwiegt dabei mehr der aerobe oder anaerobe Energieanteil. Die anaerobe Energie hat einen laktaziden und einen alaktaziden Anteil. Wenn wir bei der Sportlegende bleiben bedeutet dies, dass Emil Zatopek für einen einstündigen Dauerlauf seinen Energiebedarf überwiegend auf aerobem Weg deckt. Mit Beginn des Dauerlaufes werden die Vorräte an Sauerstoff im Körper sowie an kurzfristig verwertbaren energiereichen Verbindungen, dem Adenosintriphosphat (ATP) und Kreatinphosphat (PCr), zur Energiedeckung genutzt. ATP wird sofort wieder resynthetisiert. Auch der Abbau von Glucose beginnt. In der Glykolyse wird Glucose zu Brenztraubensäure (Pyruvat) abgebaut und in der anaeroben Glykolyse dann weiter zum Salz der Milchsäure, dem Laktat verstoffwechselt. Die Laktatdehydrogenase katalysiert diese Reaktion in beide Richtungen. In der Glykolyse dient Nikotinadenamid-Adenin-Dinucleotid (NADH) als Protonendonator. Unter anaeroben Bedingungen ist im kontrahierten Skelettmuskel die Geschwindigkeit der NADH-Bildung in der Glykolyse größer als die Geschwindigkeit der NADH-Oxidation im aeroben Stoffwechsel. Für die Fortdauer der Glykolyse muss genügend NAD⁺ (zur Oxidation des Glycerinaldehyd-3-phosphats) zur Verfügung stehen. Die Anhäufung von NADH und Pyruvat wird durch die Laktatdehydrogenase (LDH) unterbunden, die NADH zu NAD⁺ oxidiert und Pyruvat zu Laktat reduziert. Die Reduktion von Pyruvat zu Laktat dient der Regeneration von NAD⁺, so dass die Glykolyse weiterlaufen kann. Das Redoxgleichgewicht wird aufrechterhalten. Das LDH-Gleichgewicht ist unter anaeroben Bedingungen auf die Seite des Laktats verschoben (Stryer 2003).

Bei fortgesetzter, gleichmäßiger submaximaler Belastung steigt die Sauerstoffaufnahme etwa 2 Minuten an, um dann, trotz andauernder Belastung, auf einem konstanten Wert

zu bleiben oder bis zum Ende der Belastung langsamer als zu Beginn anzusteigen. Es gibt eine schnelle und eine langsame Komponente der Sauerstoffaufnahme. Je nach Belastungsintensität vergehen etwa 2 bis 6 Minuten, bis die O₂-Aufnahme der Belastungsintensität entspricht, sie kann aber auch bis zum Belastungsende ansteigen. Die Phase, in der Sauerstoffaufnahme und Sauerstoffbedarf im Gleichgewicht stehen, bezeichnet man als Steady-State-Zustand. Früher verstand man darunter die Konstanz der Kreislauf-, Atmungs- und Stoffwechselfvorgänge (Hill 1925). Heute wird der Begriff Steady-State nur noch gebunden an ein Kriterium angewandt, weil eine solche Konstanz des Stoffwechsels äußerst selten besteht (Hollmann et al. 2006). Seit vielen Jahren gibt es international anerkannte, standardisierte Testverfahren, wie z.B. Belastungstests mit stufenförmig ansteigender Belastung, um die maximale Leistung einer gleichförmigen Bewegung zu messen. Solche Tests dienen der objektiven Leistungsbestimmung und sind für die Trainingssteuerung wichtig. Es gibt diverse stufenförmige Maximaltests, die auf einem Fahrradergometer oder einem Laufband, teils mit Spirometrie, durchgeführt werden. Dadurch, dass diese Tests nach standardisierten Kriterien durchgeführt werden, sind ihre Ergebnisse international vergleichbar.

Schwieriger gestaltete sich die Entwicklung von Testverfahren, die die Leistung und Energiebereitstellung von kurzfristigen, hochintensiven, erschöpfenden Belastungen messen. Also von Leistungen mit einer hohen bzw. dominant anaeroben Energiebereitstellung, den so genannten supramaximalen Leistungen. Lange Zeit war auch das Wissen, wie der Energiebedarf dabei gedeckt wird, begrenzt. So wurde in den 1980er Jahren in der allgemeinbildenden Schule noch gelehrt, dass bei einem 400-m-Lauf die Energie auf den ersten 70m durch Ausschöpfung der energiereichen Phosphatreserven, die nächsten 230m durch den Wiederaufbau energiereicher Phosphate durch anaerobe Stoffwechselfvorgänge und auf den letzten 100m durch vorwiegend aerobe Stoffwechselfvorgänge erfolgt (Löwe, Riedel 1983). Heute wissen wir, dass selbst bei kurzfristigen, erschöpfenden Leistungen der Energiebedarf immer aerob und anaerob ist (Nevill et al. 1996; Gatin 2001). Dennoch ist es bis heute schwierig, den Energiebedarf einer supramaximalen Leistung genau zu bestimmen. Bei der Entwicklung anaerober Testverfahren ist eine große Zahl an Ansätzen im Feld, auf dem Laufband oder Ergometer entwickelt worden (Cunningham, Faulkner 1969; Aylon 1974; Schnabel, Kindermann 1983). Zunehmende Bedeutung findet in den letzten

Jahren der Wingate Anaerobic Test (WAnT). Dabei handelt es sich um einen 30-s-Ergometerertest zur Bestimmung der anaeroben Leistungsfähigkeit. Entwickelt wurde dieser Test in den 1970er Jahren (Ayalon, Inbar, Bar-Or 1974). Er ist heute ein anerkanntes Testverfahren zur Bestimmung der anaeroben Leistungsfähigkeit. Es gibt viele Untersuchungen rund um das Thema WAnT. Bei einer Ende 2012 durchgeführten Internetrecherche fanden sich alleine in der US National Library of Medicine („Medline“) unter dem Suchbegriff: „Wingate Anaerobic Test“ 456 Einträge (Stand: Dezember 2012). Der WAnT wurde zunächst vorwiegend mit gesunden, erwachsenen, männlichen Probanden durchgeführt. Zunehmend gibt es aber auch Untersuchungen mit Kindern, Frauen, Senioren, Kranken und Behinderten. So haben Frauen beispielsweise eine geringere Peak-Power und Average-Power als Männer (Inbar 1985). Knaben haben im Vergleich zu Jugendlichen und Männern ein geringeres Laktatmaximum, welches sie aber früher erreichen (Beneke 2005). Ältere gesunde Menschen (Jones 1986) und ältere Patienten mit chronisch obstruktiven Lungenerkrankungen (COPD) (Bar-Or et al. 1992) haben den Test unter EKG- und Blutdruckkontrolle komplikationslos durchgeführt, wobei die Tests der COPD-Patienten aus Sicherheitsgründen auf 15 Sekunden verkürzt waren. Kinder und Erwachsene mit Asthma bronchiale konnten den Test ebenso durchführen (Inbar 1981) wie Menschen mit zerebraler Parese, wenn deren Füße in den Pedalen fixiert wurden (Tirosh 1990).

Darüberhinaus sind Kenntnisse über das Laktatverhalten nach einer supramaximalen Leistung in der Leistungsdiagnostik von Bedeutung. Kenntnisse über die Höhe des Laktatmaximums, den Laktatanstieg und -abfall, lassen Rückschlüsse auf den individuellen Trainingszustand des Probanden und auch auf die Einschätzung der anaerob-laktaziden Leistungsfähigkeit zu. Sie sind wichtige diagnostische Mittel und dienen der Steuerung des Trainings. Der Verlauf der Laktatwerte vor, während oder nach einer körperlichen Leistung lässt sich als Kurve darstellen. Durch den Verlauf der Kurve gewinnt man einen Eindruck über die Dynamik des Laktatverlaufs.

Es existieren nur wenige mathematische Modelle, mit Hilfe deren man versucht, den Laktatverlauf nach einem WAnT zu berechnen. Ein schneller Anstieg der Laktatwerte nach einer Leistung zeigt sich graphisch als steile Kurve. Bedingt ist der Anstieg bzw. der Abfall des Laktats durch die stattfindenden Invasions- und Eliminationsvorgänge, die mit entsprechenden Konstanten beschrieben werden. Durch Berechnungsmodelle können z.B. Invasions- und Eliminationskonstanten, sowie das Laktat A des

Extravasalraums approximiert werden und es sind quantitative Aussagen über die Stoffwechseldynamik möglich.

Da das Laktatmaximum nach einer Leistung Rückschlüsse auf die anaerobe Leistungsfähigkeit des untersuchten Probanden erlaubt, erhofft man sich, durch die Berechnungsmodelle das Laktatmaximum exakter ermitteln zu können, da bei den manuellen Messungen die Gefahr besteht, dass das tatsächliche Laktatmaximum nicht erfasst wird, weil es zwischen zwei Blutentnahmezeitpunkten liegen könnte.

Die vorliegende Arbeit untersucht die Dynamik der Blutlaktatantwort nach einer supramaximalen Leistung wie dem WAnT mit einem alten und neuen Drei-Parameter Bi-Exponential Modell sowie Effekte auf die Berechnung der Energiebereitstellung.

B STAND DER WISSENSCHAFT

1. Leistungsdiagnostische Testverfahren

1.1. Historische Entwicklung der Testverfahren

Der Wingate Anaerobic Test wird auf einem speziellen Fahrradergometer durchgeführt. Aus diesem Grund sei hier ein kurzer Exkurs in die Historie der Entwicklung der Ergometer gestattet:

Bereits 1883 wurde das wahrscheinlich erste Ergometer in Deutschland von Speck entwickelt. Im Stehen mussten die Probanden eine Drehkurbel betätigen, deren Kurbelreibung durch eine Schraube und deren Widerstand durch anhängende Gewichte an die Kurbel verändert werden konnte. Die Ausatemluft wurde in einem Doppelspirometer gesammelt (Hollmann 2006). 1896 wurde das erste Fahrradergometer der Welt vom Franzosen Bouny entwickelt (Hollmann 2006). Um die Kraftanstrengung eines Radfahrers zu messen, installierte er eine mechanische Bremse am Hinterrad eines aufgebockten Fahrrades. 1897 ließen die Amerikaner Atwater und Benedict Probanden auf einem Ergometer fahren, an welchem sich ein Dynamo befand. Die Stromerzeugung und Erwärmung diente den Wissenschaftlern als Maß der verrichteten Arbeit (Hollmann 2006). 1912 entstand aus der gleichen Arbeitsgruppe das erste Ergometer mit elektro-magnetischen Bremsen. Allerdings erwies sich der Kontakt von Dynamo und Hinterrad bei höheren Drehgeschwindigkeiten als nicht zuverlässig (Hollmann 2006). 1928 wurde von Knipping ein Dynamoergometer mit großem Schwungrad entwickelt, mit dem nun gleichmäßige Arbeit möglich war (Hollmann 2006). Eine weitere Verbesserung gelang durch die Erfindung eines elektrodynamischen Fahrradergometers mit Drehstrommotor und stufenlos einstellbarem Getriebe. Große-Lordemann und Müller legten damit 1936 die Grundlage für eine über viele Jahrzehnte geschätzte Ergometerqualität mit exakter Widerstandseinstellung (Hollmann 2006). 1952 entwickelte Astrand mit der Firma Monark® ein mechanisch gebremstes Ergometer bei dem der Bremsmechanismus über einen Bremsriemen erfolgte, der am Schwungrad angeschlossen war und an dem Gewichte über ein Pendel hingen. Dieser Bremsmechanismus konnte über eine geeichte Skala abgelesen werden (Hollmann 2006). Noch heute ist die schwedische Firma Monark® Marktführer in Vertrieb und Entwicklung von Ergometern. Die allgemeine Entwicklung der Ergometer schritt im

Laufe der Zeit weiter voran. Als vorläufig letzter Fixpunkt in der Historie sei das Jahr 1974 genannt, in dem das erste elektronisierte und voll computerisierte Fahrradergometer von der Firma Chrysler auf den Markt kam (Hollmann 2006).

1.2. Aerobe Leistungsdiagnostik

1.2.1 *Aerob dominierte Tests*

Bei der aeroben Energiegewinnung erfolgt die Energiegewinnung über die oxidative Verbrennung des aufgenommenen Sauerstoffs. Je länger die Belastungszeit, umso größer ist der aerobe Anteil und umso niedriger ist der anaerobe Anteil der Energiegewinnung. Um die aerobe Leistungsfähigkeit möglichst gut bestimmen zu können, sollte die Belastung deshalb möglichst gleichförmig sein.

Ein häufig praktizierter Test ist der Cooper-Test. Es handelt sich um einen Lauftest der meist auf einer 400-m-Bahn durchgeführt wird. Die Probanden versuchen innerhalb von 12 Minuten eine größtmögliche Strecke zu absolvieren. Die Laufleistung wird anschließend anhand von Wertungstabellen, die nach Alter und Geschlecht gestaffelt sind, beurteilt. Wichtig bei diesem Test ist es, dass bei der Durchführung ein gleichmäßiges Lauftempo eingehalten wird, damit tatsächlich überwiegend die aerobe Leistungsfähigkeit ermittelt wird. Es gibt auch für Kinder einen modifizierten Cooper-Test über 8 Minuten, aber auch einen 15-Minuten-Lauf. Beim Vergleich der Werte der maximalen Sauerstoffaufnahme und der absolvierten Laufstrecke zeigte sich in Untersuchungen an Kindern und Jugendlichen keine signifikante Korrelation. Die maximale Sauerstoffaufnahme hat sich in der Entwicklung von Kindern zu Jugendlichen kaum verändert, während sich die Laufleistungen deutlich verbesserten. So wird empfohlen, dass beim Heranwachsenden die Laufleistung im Cooper-Test das bessere Mittel als die Feststellung der maximalen Sauerstoffaufnahme ist (Weineck 2010). Ein Vorteil des Cooper-Tests ist seine einfache Durchführung und Auswertung. Nachteilig ist, dass die Ermittlung der aeroben Leistungsfähigkeit nur bedingt valide ist. Es ist nicht einfach, ein gleichmäßiges Lauftempo über 12 Minuten einzuhalten. Insbesondere wenn der Test in Gruppen durchgeführt wird, fällt es schwer Temposteigerungen, z.B. als Endspurt, zu vermeiden. Testverfahren in Gruppen durchzuführen, ist vom Zeitablauf ökonomisch, hat aber immer ungewollt auch einen Wettkampfcharakter, da

häufig eine Konkurrenzsituation besteht, der zu solchen Temposteigerungen führen kann.

Neben dem Cooper-Test existieren auch Lauftests unterschiedlicher Länge (1000m, 3000m, 5000m). Da je nach Sportart (z.B. Radfahren, Schwimmen, Skilanglauf, Rudern) unterschiedliche Muskelgruppen beansprucht werden, sollte die Testdurchführung möglichst sportartspezifisch sein und kann auch im Schwimmbecken, auf dem Rad oder auf Langlaufskiern durchgeführt werden (Weineck 2010).

1.2.2. *Aerob dominierte Tests mit ansteigend anaerobem Energieanteil zu Testende*

Das am häufigsten genutzte Verfahren zur Bestimmung der aeroben Leistungsfähigkeit ist der Mehrstufen-Maximaltest (Stufentest). Dabei wird die höchste Leistung sowie, bei gleichzeitig durchgeführter Spirometrie, die höchste erreichte Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2peak}$) gemessen und auf jeder Belastungsstufe die Laktatwerte ermittelt. Dieser Test ist heute in der Sportwissenschaft ein anerkanntes Verfahren, welches nach einheitlichen Richtlinien durchgeführt wird. Die Durchführung erfolgt auf einem Fahrradergometer. So wird in den „aktuellen Leitlinien zur Belastungsuntersuchung in der Sportmedizin der deutschen Gesellschaft für Sportmedizin und Rehabilitation“ seine Durchführung detailliert beschrieben. Es besteht eine dreiminütige Ruhephase vor Belastungsbeginn, eine stufenweise ansteigende Belastung alle 2 bis 5 Minuten, ein Belastungsbeginn im allgemeinen mit 50 Watt (W), für Patienten mit 25W, für Trainierte mit 100W und mehr und Steigerungsstufen von 50 bzw. 25W (je nach Leistungs-/Trainingszustand). Des Weiteren werden in den Leitlinien auch genaue Kriterien für einen eventuellen Testabbruch, für die Belastung von Gesunden und Kranken, sowie für die Umgebungsbedingungen, in denen der Test durchgeführt werden sollte, benannt (DGSP 2002). Die Laktatwerte betragen in der Ruhephase etwa 1-2 mmol/l. Der Verlauf der Laktatwerte ergibt eine Kurve. Die aerobe Schwelle (LT=“Laktat Threshold“) entspricht dabei der Belastungsintensität während des ersten Laktatanstiegs im Bereich der unteren Belastungsstufen. Diesem Zustand liegt ein Fließgleichgewicht des an- und abflutenden Laktats zugrunde, dem so genannten Steady-State. Die Energiegewinnung in dieser Phase ist hauptsächlich aerob. Über einen individuellen

Zeitraum bleibt die Laktatkurve trotz stufenweiser Belastungserhöhung noch sehr flach und es zeigt sich nur ein geringer Anstieg. Der Punkt, an dem die Kurve unter zunehmender Belastung ansteigt, wird die anaerobe Schwelle genannt. Ab diesem Punkt wird die Energie zunehmend anaerob laktazid gewonnen. Mader prägte den Begriff der anaeroben Schwelle 1976 (Mader et al. 1976) und legte diese auf 4 mmol/l fest. Mader ging davon aus, dass die anaerobe Schwelle prinzipiell bei 4 mmol/l liegt. Heute weiß man, dass dieser Bereich individuell variiert (Beneke 1999). Bei Marathonläufern ist diese Schwelle z.B. niedriger. In der Folgezeit wurden verschiedene Schwellenkonzepte zur Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle (IAS) entwickelt. Exemplarisch sei das Schwellenkonzept der Arbeitsgruppe Dickhuth genannt, die 1991 die IAS 1.5 mmol/l über der aeroben Schwelle (LT) festlegte (Beneke 1999).

Neben Radtests können solche Stufentests zur Bestimmung der aeroben Leistungsfähigkeit auch auf dem Laufband ermittelt werden. Ebenso wie bei dem beschriebenen Mehrstufen-Maximaltest wird die höchste Leistung sowie die höchste erreichte Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2peak}$) bei gleichzeitiger Spirometrie, gemessen. Auch hier gelten allgemein anerkannte „aktuelle Leitlinien zur Belastungsuntersuchung in der Sportmedizin der deutschen Gesellschaft für Sportmedizin und Rehabilitation“. Nach den Leitlinien beginnt man mit 2.5 – 3.0 m/s (8 km/h) – je nach Sportart und Trainingszustand – und steigert alle drei Minuten um 0.5 m/s (bzw. 2.0 km/h). Der Neigungswinkel ist festgelegt und beträgt 1.0 % (0.5 – 1.5 % je nach Bauart des Laufbandes). Auch für diesen Test existieren anerkannte Empfehlungen für Patienten, Sportler und Nichtsportler (DGSP 2002). Die Laktatwerte werden stufenweise bestimmt, deren Verlauf dokumentiert und zur Auswertung Laktatschwellenkonzepte angewandt.

Der „Conconi-Test“ ist ein Feldtest. Bei diesem Laufbahntest wird das Lauftempo in bestimmten Abständen gesteigert und dabei die Herzfrequenz gemessen. Es ist ein „unblutiger“ Test, da keine Blutentnahmen erfolgen. Nach einer Erwärmung beginnt der Test mit sehr geringem Tempo. So sollten die ersten 200 Meter in 72 Sekunden gelaufen werden. Alle 200 Meter steigert sich das Tempo um 0.5 km/h. Die Herzfrequenz wird alle 200 Meter protokolliert. Testende ist bei subjektiver Erschöpfung. Zunächst besteht bei langsamer, kontinuierlich gesteigerter Belastung ein linearer Bezug zwischen Herzfrequenz und Belastung. Ab einer bestimmten,

individuellen Belastung verliert die Kurve ihre Linearität. Dieser Punkt wird der Herzfrequenzumschlagpunkt genannt. Die Belastung kann noch gesteigert werden, aber die korrespondierende Herzfrequenz steigt nicht mehr so stark an. Dieser Umschlagpunkt soll nach Conconi die „anaerobe Schwelle“ darstellen.

Die folgende Abbildung (Abb. 1) zeigt einen typischen Kurvenverlauf eines Conconi-Tests.

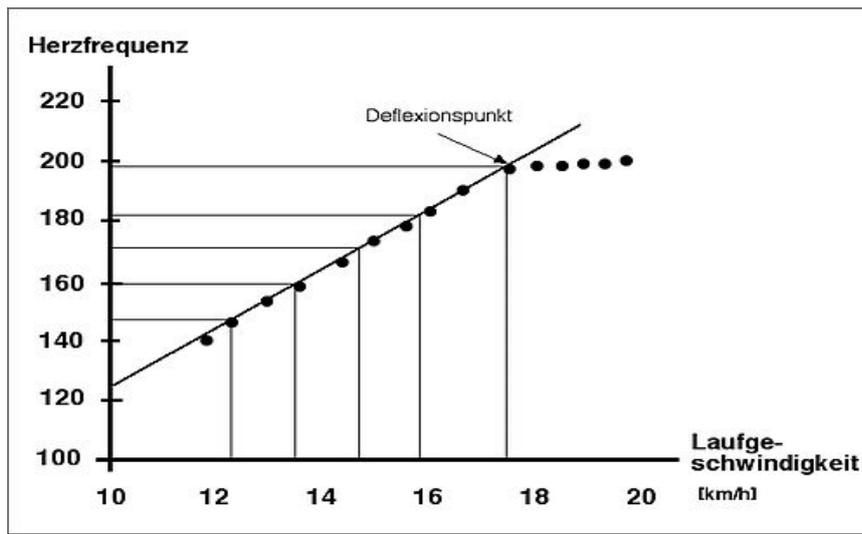


Abb. 1: Conconi-Test Verlaufsprotokoll

Ein Vorteil dieser Methode ist seine unblutige Durchführung, da keine Laktatwerte bestimmt werden müssen. Ein weiterer Vorteil ist seine relativ einfache Durchführung. Nachteilig ist, dass im Kurvenverlauf der Umschlagpunkt nicht immer exakt festzulegen ist. Vergleichende Untersuchungen des Conconi-Tests mit blutigen Laktatbestimmungen haben gezeigt, dass der Umschlagpunkt teilweise nicht mit der tatsächlichen anaeroben Schwelle übereinstimmt (Braumann et al. 1987).

1.3. Anaerobe Leistungsdiagnostik

1.3.1 Anaerob dominierte Tests mit maximaler Kurzzeitbelastung

Es gibt nur relativ wenige Verfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von kurzen, hochintensiven Belastungen. Der älteste publizierte Schnellkraft-Test wurde in den 1920er Jahren durchgeführt und war ein Hochsprungtest (Sargent 1921). Mit diesem

konnte erstmals die mechanische Arbeit berechnet werden. Allerdings konnte die Leistung noch nicht bestimmt werden, da es keinen Anhalt über die Dauer gab, mit der die Kraft während des Tests auf den Körper wirkte. Im Verlauf wurde dieser Hochsprungtest weiterentwickelt und es gelang 1968 (Davies und Rennie 1968) mittels einer speziellen Plattform, mit der die Kontaktzeiten aufgezeichnet werden konnten, die Zeit zu bestimmen, mit der die Kraft auf den Körper wirkte. Somit konnte nun auch die Leistung berechnet werden.

Der lange Zeit wohl bekannteste Test zur Bestimmung der anaerob, alaktaziden Leistungsfähigkeit ist der „Margaria-Step-Running-Test“. 1966 wurde dieser spezielle Treppenlaufstest von der Arbeitsgruppe um den gleichnamigen Margaria (und Aghemo, Rovelli 1966) entwickelt. Bis zur Entwicklung und Etablierung des Wingate Tests war dieser Test ein weit verbreitetes Verfahren. Der Proband steht zwei Meter vor einem Treppenaufgang und wird angewiesen, mit maximaler Geschwindigkeit die zwei Meter und die 14 Treppenstufen hinaufzusprinten, wobei immer zwei Stufen mit einem Schritt überwunden werden und jede Stufe eine Höhe von 175mm hat. Es wird die Zeit gemessen, die für die 3. – 9. Stufe benötigt wird. Lichtschranken erfassen Zeit und Geschwindigkeit mit einer Genauigkeit von 10 ms (Vandewalle et al. 1987; Bouchard et al. 1991; Mc Ardle et al. 1996). Die in Watt berechnete Leistung errechnet sich aus der Vertikalgeschwindigkeit und dem Körpergewicht (Hollmann 2006). Durch Kenntnis der Stufenhöhe und der Körpermasse kann die mechanische Leistung (Nms) P ($W = N \cdot m \cdot s^{-1}$; $F = kg \cdot m \cdot s^{-2}$; $W = N \cdot m$) berechnet werden. Nachteilig ist, dass überwiegend die Streckmuskulatur der Beine für diese Leistung beansprucht wird.

→ mechanische Leistung (überwiegend alaktazide Leistungsfähigkeit)

Es gab in den letzten Jahrzehnten diverse Versuche, sich mit verschiedenen Testverfahren der Bestimmung der anaeroben Leistungsfähigkeit zu nähern. Um die Vielfalt aufzuzeigen, seien folgende kurz genannt:

Borg ließ 1962 (Borg 1962) seine Probanden wiederholt einen 45-s-Test auf einem Fahrradergometer gegen einen ratenweise kontinuierlich zunehmenden Widerstand durchführen. Er beobachtete zusätzlich auch Motivationsaspekte bei der Leistungsdiagnostik. Im weiteren Verlauf entwickelte er mit seiner Arbeitsgruppe ein spezielles Ergometer (Borg, Edstrom, Marklund 1971).

→ alaktazid/laktazide Leistungsfähigkeit.

Katch (Katch 1973) nutzte in den 1970er Jahren einen 60-s-supramaximalen-Radtest um die maximale Sauerstoffaufnahme zu ermitteln. Zur Bestimmung der anaeroben Leistung und Arbeit verkürzte er 1977 die Testdauer auf 40 Sekunden.

Beim Ergometertest nach Cumming (Cumming 1973) radelt der Proband 30 Sekunden schnellstmöglich. Aus der Anzahl der Pedalstöße im schnellsten 5-s-Abschnitt wird die anaerob-alkalotazide Leistungsfähigkeit gemessen (Inbar, Bar-Or, Skinner 1996).

Wesentlich kürzer ist der Explosivkrafttest nach Ayalon (Aylon 1974). Bei ihm wird die Zeit gemessen, die für eine halbe Pedalumdrehung mit einem Bein auf einem feststehenden Ergometer benötigt wird sowie der Tret-Widerstand.

Andere Autoren versuchten die anaerobe Leistungsfähigkeit mittels eines hochintensiven Belastungstest auf dem Ergometer bis zur Erschöpfung zu messen (Cunningham, Faulkner 1969). Dies gelang allerdings nicht zuverlässig, da die Belastungsabbrüche subjektiv erfolgten. Da zur Durchführung dieser Tests relativ hohe Anforderungen an die Probanden bezüglich deren koordinativer und körperlicher Voraussetzungen gestellt werden, konnten häufig ältere, behinderte oder unsportliche Probanden diese Tests nicht durchführen.

1.3.2. Testverfahren für die alkalotazid anaerobe Kapazität

Beim 3 x 60 m Sprinttest nach Hellwig (Hellwig et al.) führen die Probanden jeweils drei Sprints durch. Der erste Sprint soll mit maximaler Geschwindigkeit und die beiden nächsten Sprints mit einer um 0.5 Sekunden langsameren Geschwindigkeit absolviert werden. Die nach den Sprints gemessenen maximalen Nachbelastungslaktatwerte werden in ein Geschwindigkeitsdiagramm übertragen. Die Geschwindigkeit bei einem Laktatwert von 6 mmol/l wird als anaerobe Kapazität angenommen. Laut Hellwig gilt diese Annahme, wenn eine maximale Laktatbildungsrate vorliegt. Der Laktatwert von 6 mmol/l wurde als Durchschnittswert empirisch ermittelt (di Prampero 1981).

→ alkalotazide Kapazität

Beim 40-s-Laufbandtest nach Schnabel und Kindermann rennen die Probanden 40 Sekunden mit einer Geschwindigkeit von 22 km/h und einer Steigung von 7.5 %. Nach Schnabel und Kindermann ist dabei die alkalotazide Kapazität umso höher, je niedriger das maximale Nachbelastungslaktat ist (Schnabel, Kindermann 1983). Die Interpretation der Testergebnisse ist schwierig, da ohne zusätzliche Messung der

maximalen Sauerstoffaufnahme der Einfluss der aeroben Leistungsfähigkeit nicht möglich ist. Als Maß für die alaktazide Kapazität werden die Belastungsdauer und das maximale Nachbelastungslaktat herangezogen. Mittlere maximale Ausbelastungszeiten für 400-m-Läufer lagen bei ca. 90 Sekunden und für Marathonläufer bei ca. 45 Sekunden. Wie oben schon ausgeführt, beeinflusst die aerobe Leistungsfähigkeit auch die Ausbelastungsdauer bei supramaximalen Tests. Daher erscheint die Ausbelastungsdauer ein weniger geeigneter Parameter, als der maximale Nachbelastungslaktatwert. Nach Heck (Heck 2002) ist letzterer unter Berücksichtigung von Diffusions- und Eliminationsprozessen ein direkter Indikator für das im Muskel gebildete Laktat.

→ alaktazide Kapazität

1.3.3 Bestimmung der laktaziden Leistungsfähigkeit

Die maximale Laktatbildungsrate nach einer körperlichen Leistung gilt einheitlich als Parameter für die laktazide Leistungsfähigkeit.

1.3.4 Testverfahren zur Bestimmung der laktaziden Kapazität

Eine isolierte Bestimmung der laktaziden Kapazität ist nur eingeschränkt möglich, da die laktazide Kapazität von der alaktaziden Kapazität mit einfachen Verfahren nicht zu trennen ist (Heck 2002). Wenn die Ausbelastungsdauer als Maß für die laktazide Kapazität herangezogen wird, dann ist ohne Kenntnis der maximalen aeroben Ausdauer der laktazide Anteil nicht abschätzbar (Heck 2002).

1.3.5 Testverfahren für die gesamte anaerobe Kapazität

Neben dem WAnT kamen als praktische Testverfahren zur Einschätzung des anaeroben Energiesystems bislang häufig zwei Testtypen zur Anwendung. Kürzere, maximal anstrengende Tests von 10 bis 15 Sekunden Dauer zur Ermittlung der anaerob alaktaziden Komponente und längere, 60 bis 90 Sekunden dauernde, maximal anstrengende Tests für die anaerob laktazide Energiekomponente (Bouchard et al. 1991). Es besteht kein Konsens über Testart und Testlänge.

Bereits 1965 versuchten Monod und Scherrer mittels der nach ihnen benannten „Critical Power Methode“ die gesamte anaerobe Kapazität zu diagnostizieren. In dem von ihnen entwickeltem Testverfahren absolvieren die Probanden auf einem Laufband verschiedene Belastungstests. Die erbrachte Arbeit wird anhand der maximalen Belastungszeit berechnet. Die Werte werden in ein Arbeit-Zeit-Diagramm übertragen. Die verschiedenen Einzeltests werden mit unterschiedlichen Belastungsintensitäten durchgeführt. Mindestens drei Tests sollten mit submaximaler Belastung erfolgen. Üblichen Belastungszeiten liegen bei 60 bis 150 Sekunden.

Theoretische Grundlage dieser Methode ist die Tatsache, dass eine große Leistung nur über eine kurze Zeit und eine Leistung mit niedriger Intensität über eine lange Zeit erbracht werden kann. Als „Critical Power“ wird dabei die höchste Leistung, die über eine lange Zeit aufrechterhalten werden kann, genannt. Monod und Scherrer stellten eine hyperbolische Beziehung zwischen Leistung und Abbruchzeit her. Nach linearer Regression ergibt sich eine Gerade. Der Schnittpunkt der Geraden mit der Y-Achse ist der anaeroben Kapazität gleichzusetzen und der Anstieg der Geraden der aeroben Leistungsfähigkeit (Green 1996; Jenkins 1991; Heck 2002).

Die Belastung bei den Tests muss deutlich über der maximalen Sauerstoffaufnahme liegen. Die maximale Sauerstoffaufnahme wird gesondert ermittelt. Nachteil dieser Methode ist, dass sie mit einem großen Zeitaufwand verbunden ist, da eine ganze Testbatterie durchgeführt werden muss. Außerdem wird bereits während der Beschleunigung bis zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit Arbeit verrichtet, die bei der Auswertung unberücksichtigt bleibt (Heller 2007).

Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Dauer der Ausbelastungszeiten auf die Energiegewinnung auswirken. Bei längeren Ausbelastungszeiten von 300, 400, 540 Sekunden verringerten sich die Critical-Power-Werte bei gleichzeitiger Erhöhung der anaeroben Kapazität (Bishop et al 1998). Auch hat es sich gezeigt, dass bei kürzeren Ausbelastungszeiten von 20 bis 40 Sekunden der Wirkungsgrad der Muskelarbeit von der Belastungsintensität abhängig ist, da bei zunehmender Belastungsintensität auch zunehmend anaerob dominierte Muskelfasern (Typ II-Fasern, FT), deren ATP-Verbrauch etwa dreimal so hoch ist wie für Typ I-Muskelfasern, genutzt werden (Jeschke et al. 1997). Dieser Methode liegt die Annahme zugrunde, dass die maximale aerobe Leistungsfähigkeit schon zu Beginn der Belastung voll nutzbar ist. Da zu Beginn jeder Belastung ein O₂-Defizit besteht, ist nach Heck diese Annahme allerdings falsch. Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass der Anstieg der alaktaziden Geraden mit der Summe

des oxidativen und glykolytischen Flusses gleichgesetzt wird. Wegen des verzögerten Anstiegs der Sauerstoffaufnahme werden im Messbereich von 25 bis 45 Sekunden aber nur etwa 60 bis 70 % der maximalen Sauerstoffaufnahme erreicht (Heck 2002).

Ebenfalls wird kritisch infrage gestellt, dass die früher vertretene Annahme eines chronologisch differenzierbaren Einsatzes der Energiebereitstellungssysteme heute nicht mehr haltbar ist (Röcker 1999). Noch in den 1980er Jahren wurde dieses Wissen gelehrt (Löwe-Riedel 1983). Heute weiß man, dass bereits in den ersten Sekunden einer körperlichen Beanspruchung die Energie sowohl aerob, als auch anaerob gewonnen wird (Gastin 2001). Somit scheint die „Critical-Power-Methode“ kein geeignetes Testverfahren zur Bestimmung der gesamten anaeroben Kapazität zu sein.

In Anlehnung an die „Critical-Power-Methode“ von Monod und Scherrer wurde in einem ähnlichen Testverfahren von der Arbeitsgruppe Jeschke die maximalen Belastungszeiten für drei getrennt durchgeführte supramaximale Belastungen bestimmt. Die Intensitäten werden so gewählt, dass die Abbruchzeiten zwischen 15 und 35 Sekunden liegen. Aus Belastungszeit und Leistung wird die erbrachte Arbeit berechnet. In einem Belastungszeit-Arbeit-Diagramm liegen die Messwerte auf einer Geraden, deren Schnittpunkt die Ordinate bei dem Arbeitsbetrag schneidet, der mit der alaktaziden Kapazität quantitativ identisch sein soll (Jeschke et al. 1996).

Aufbauend auf der 1920 eingeführten Definition eines O_2 -Defizits (Krogh, Lindhard 1920), welches die Differenz zwischen dem Sauerstoff-Steady-State und der aktuellen Sauerstoffaufnahme zu Beginn einer muskulären Belastung beschreibt, wurde 1988 der Begriff des maximal akkumulierten Sauerstoffdefizits (MAOD) eingeführt (Medbø et al. 1988). Die MAOD ist ein Verfahren, mit dem das O_2 -Defizit als Maß für die gesamte anaerobe Kapazität bestimmt werden kann (Heck 2002). Voraussetzungen dafür sind, dass die anaerobe Energiefreisetzung die Differenz zwischen Gesamtenergiefreisetzung und dem aeroben Anteil, bestimmt durch die akkumulierte O_2 -Aufnahme, ist. Der O_2 -Bedarf sollte linear mit der Belastung ansteigen und während der gesamten definierten Belastungsdauer soll der O_2 -Bedarf konstant sein (Medbø et al. 1988). Das O_2 -Defizit setzt sich zusammen aus dem verbrauchten Sauerstoff, der im Muskel und Blut gespeichert ist, dem Verbrauch an ATP und Kreatinphosphat sowie dem Energiebetrag aus der Glykolyse, der zur Bildung von Laktat führt, zusammen. Es müssen zur Bestimmung des O_2 -Bedarfs mindestens 10 zehnminütige konstante

Belastungen mit unterschiedlicher Intensität durchgeführt werden. Die mittlere O_2 -Aufnahme der beiden letzten Minuten entspricht dem O_2 -Bedarf für die vorgegebene Belastung. Mit Hilfe einer linearen Regression wird die Leistungs- O_2 -Aufnahmefunktion ermittelt (Medbø et al.1988). Mit der MAOD wird nicht die anaerobe Leistungsfähigkeit bestimmt.

Der WAnT ist ein spezieller Fahrradergometrie-Test zur Bestimmung der anaeroben Leistungsfähigkeit. Er ist ein weltweit anerkanntes Testverfahren, um unter standardisierten, reproduzierbaren Bedingungen Untersuchungen zu hochintensiven Kurzzeitbelastungen durchführen zu können. Der WAnT wurde in den 1970er Jahren am Wingate Institut in Israel entwickelt. Seit der Einführung des Prototyps 1974 durch die Arbeitsgruppe um Inbar und Bar-Or gibt es bis heute weltweit diverse Forschungsgruppen, die sich zu unterschiedlichen Aspekten und Fragestellungen rund um das Thema WAnT beschäftigen.

Für den WAnT gibt es Durchführungsempfehlungen, die allerdings in Bezug auf die Ausführlichkeit und Anwendung für kranke und gesunde Probanden noch nicht mit dem oben beschriebenen Mehrstufen-Maximaltest vergleichbar sind, für den es allgemein anerkannte dezidierte Leitlinien gibt.

2. Energiegewinnung bei körperlicher Tätigkeit

2.1. Energiebereitstellung für Muskelkontraktionen

Der Muskel braucht für den Kontraktionsvorgang Adenosintriphosphat (ATP). Das ATP wird beim Kontraktionsvorgang in das energieärmere Adenosindiphosphat (ADP) und anorganisches Phosphat (P_i) gespalten. Im Muskel liegen als schnell verfügbare Energiereserven Kreatinphosphat (PCr) und ATP in kleinen Mengen vor. Verbrauchtes ATP wird sofort wieder regeneriert. Dafür laufen verschiedene Prozesse ab. In einem ersten Prozess wird die energiereiche Phosphatbindung des Kreatinphosphats abgespalten und auf ADP übertragen. Dies geschieht anaerob unter Abwesenheit von Sauerstoff. Der ATP- und PCr-Vorrat der Muskulatur scheint unabhängig vom Trainingszustand zu sein. Er liegt bei etwa 20 – 30 mmol/kg Muskelfeuchtmasse. Davon beträgt der ATP-Anteil etwa ca. 5 – 7 mmol/kg Muskelfeuchtmasse und der PCr-Anteil etwa 15 – 20 mmol/kg Muskelfeuchtmasse (Maughan 1997; Spriet 1995).

Nach extremen, hochintensiven Leistungen wurden auch schon Abnahmen des Muskel-ATP um 30 bis 40 % beobachtet. Ein vollständiges Entleeren des ATP-Vorrates ist nicht möglich (Bangsbo et al.1990; Jacobs et al.1982). Lange Zeit wurde angenommen, dass ein vollständiges Entleeren des PCr-Vorrates nach einer hochintensiven Belastung möglich sei (Bogdanis et al. 1995; Hultman, Vollestad 1988). Durch direkte muskelbiopsische Untersuchungen nach hochintensiven Ergometertests mit unterschiedlicher Dauer von 10 – 190 Sekunden konnte in verschiedenen Studien nachgewiesen werden, dass kein völliges Entleeren des PCr-Vorrates stattfindet (Boobis et al. 1982; Jacobs et al. 1982; Bangsbo 1998). Selbst durch Elektrostimulation entleeren sich die PCr-Vorräte nicht vollständig (Bangsbo 1990).

In einem zweiten, ebenfalls anaeroben Prozess werden Kohlenhydrate, die im Muskel überwiegend als Glykogen vorliegen, mittels der anaeroben Glykolyse zu Pyruvat und Laktat aufgespalten. Alle Stoffwechselforgänge unterliegen Regulationsmechanismen. Damit es zu keinem vollständigen Glucoseabbau kommt, wirken folgende Faktoren u.a. hemmend auf die Glykolyse:

- Glucagon: Bei einem Abfall des Blutzuckerspiegels wird im Pankreas Glucagon ausgeschüttet. Der Anstieg der Glucagonkonzentration bewirkt eine enzymatische Hemmung der Glykolyse durch Hemmung der Phosphofruktokinase.
- H⁺Ionenkonzentration: Durch den Anstieg des Laktats sinkt im zeitlichen Verlauf der Glykolyse der pH-Wert wieder ab.
- Citrat: Anstieg Citrat (Anfangsglied Citratzyklus).
- ATP: ATP-Anstieg hemmt die Phosphofruktokinase (PFK) und damit das Schlüsselenzym der Glykolyse.
- Laktat: Anstieg des Laktats verändert die PFK. Dadurch kommt es zu einer Downregulation der PFK und Hemmung der Glykolyse (Beneke, Leithäuser 2008)

Der dritte Prozess der Energiegewinnung ist die aerobe Verbrennung von Kohlenhydraten, Fetten und unter Umständen auch von Eiweißen in Anwesenheit von Sauerstoff.

Es bestand lange die Vorstellung, dass diese aeroben und anaeroben Prozesse zur Energiebereitstellung im Skelettmuskel nacheinander ablaufen und dass das aerobe System nur sehr langsam auf energetische Anforderungen reagiert und insbesondere bei kurzzeitigen, hochintensiven körperlichen Beanspruchungen keine bzw. nur eine sehr geringe Rolle spielt (Gastin 2001). Diese Vorstellung ist inzwischen überholt. Die Energie für körperliche Aktivitäten wird zu jeder Zeit aus allen Prozessen der Energiebereitstellung gewonnen (Gastin 2001). Es finden also immer aerobe und anaerobe Prozesse gleichzeitig statt; auch bei hochintensiven Kurzzeitbelastungen wie dem 30s WAnT. Die Dauer solch maximaler Leistungen, nach denen der Beitrag aerober und anaerober Energiebereitstellung gleich hoch ist, liegt zwischen der ersten und zweiten Minute, ungefähr bei 75 Sekunden (Gastin 2001).

Bei einem WAnT erfolgt die Energiebereitstellung in den ersten Sekunden hauptsächlich anaerob-alaktazid aus dem ATP-PCr-System. Dadurch kommt es zu einem Anstieg des pH-Wertes, der die Phosphofruktokinase (PFK) aktiviert. Die PFK, als das Schlüsselenzym der Glykolyse, bewirkt einen Anstieg der Glykolyserate. Die Glykolyserate erreicht nach 5 – 10 Sekunden ihr Maximum und bleibt bis zum Ende des WAnT die dominierende Energiequelle. In den letzten Sekunden des Tests liegt die aerobe Energiebereitstellung bei gut 50 % (Beneke et al. 2002).

Das Hauptstoffwechselprodukt der Glykolyse ist das Pyruvat. Die Laktatdehydrogenase (LDH) katalysiert die Umwandlung von Pyruvat zu Laktat und umgekehrt. Durch den Anstieg des Laktats sinkt im zeitlichen Verlauf der Glykolyse der pH-Wert wieder ab, was jetzt einen zunehmend limitierenden Faktor der Glykolyse im weiteren WAnT-Verlauf darstellt und zu einem Absinken der Leistung führt (Boobis et al. 1982; Jacobs et al. 1982, 1983). Erst in den letzten Jahren fand man heraus, dass eine akute Anhäufung von Laktat eine Veränderung der PFK bewirkt und zu einer Downregulation der Glykolyserate führt. Dies wirkt sich effektiver auf die Hemmung der Glykolyse aus als der korrespondierende pH-Abfall (Zancan 2007; Allen 2008; Beneke 2011). Es werden auch noch andere Effekte des Laktats auf den Stoffwechsel diskutiert. So verbessert Laktat die aerobe Energiebereitstellung. Der Sauerstofftransport wird durch eine Erhöhung der Muskeldurchblutung und Reduktion der O₂-Affinität des Hämoglobins beeinflusst (Böning, Maassen 2008). Es entsteht auch eine osmotisch bedingte Wasserverschiebung aus dem Extrazellularraum in den Intrazellularraum, weil

die Milchsäure bei Belastungsbeginn und bei Belastungen mit hoher Intensität intrazellulär akkumuliert. Ob die durch Milchsäure hervorgerufene Azidose als Atemantrieb dient, ist zurzeit allerdings ebenso umstritten (Böning, Maassen 2008), wie deren beschriebene Erregbarkeit stabilisierende Wirkung an der Muskelfaser (Nielsen 2001; Karelis 2004).

Nach neuesten Forschungsergebnissen dient Laktat nicht nur als Energiequelle und glukoneogenetischer Vorläufer, sondern auch als Signalmolekül, als sogenanntes „Lactormon“ (Brooks 2008). Wenn Laktat zu Pyruvat oxidiert oder wenn Laktat durch Pyruvat ersetzt wird, ändert sich das zelluläre Redoxgleichgewicht. Die Produktion von Laktat in einem Zellkompartiment und Abbau in einem anderen Zellkompartiment, unabhängig davon ob benachbart oder entfernt, ist ein wichtiger Signalmechanismus. Diese Redoxveränderungen finden auf millimolarer Ebene statt, im Gegensatz zu sonst meist mikro-/nanomolekularen Veränderungen im Stoffwechsel. Belegt sind solche Signalmechanismen beispielsweise zwischen Blut und Muskulatur, Muskulatur und Leber, Arbeitsmuskulatur und Herz, Cytosol und Mitochondrien (Brooks 2008).

Beim Ausdauertraining kommt es durch die wiederkehrenden Anstiege der Glykolyseraten und Bildung von Sauerstoffradikalen (ROS = reactive oxygene species) zu einer gesteigerten mitochondrialen Biogenese von L6-Myozyten und zu einer gesteigerten Expression von Monocarboxylat1-Transportern (MCT1). MCT1 befinden sich insbesondere in oxidativen Zellen und Mitochondrienmembran der Arbeitsmuskulatur. Sie dienen als Shuttle und transportieren ein Laktatmolekül und ein H⁺-Ion und regulieren damit den Laktattransport und den pH-Wert. Unter Belastung kann die Transportleistung um das fünffache gesteigert werden (Juel 2008). Die vermehrte MCT1-Expression korreliert direkt mit einem Laktatanstieg. Tierexperimentell konnte in vitro an Rattenmuskulatur festgestellt werden, dass die MCT1-Dichte stark mit der Laktatkonzentration zusammenhängt und Minuten bis Stunden nach Belastung anhält (Brooks 2009). Neben vielen anderen Isoformen der MCT kommt in der Skelettmuskulatur neben den MCT1 auch MCT4 vor, die sich überwiegend in glykolytischen Fasern befinden (Beneke, Leithäuser 2008).

Von der ersten Vorstellungen darüber, dass Laktat nach körperlicher Arbeit hauptsächlich die Muskulatur „sauer“ macht, bis hin zum heutigen Kenntnisstand, hat

sich sehr viel getan. Dennoch herrscht nach wie vor Forschungsbedarf auf dem Gebiet der weiteren physiologischen Wirkungen der Milchsäure (Böning, Maassen 2008).

2.2. Aerobe Energiegewinnung und deren Messgrößen

Bei der aeroben Energiegewinnung werden Kohlenhydrate und Fette unter Anwesenheit von Sauerstoff verbrannt. Bei der Verbrennung von Glucose werden dabei unter Standardbedingungen (STPD: „standard temperature pressure dry“) aus einem Liter Sauerstoff circa 21 Kilojoule (KJ) an Energie umgesetzt. Dieses sogenannte kalorische Äquivalent ist für Nahrungsfette und -proteine etwas geringer und hat Werte um die 19 KJ/l Sauerstoff, je nach Protein bzw. Fett (Cook et al. 1994). Das Verfahren dieser Bestimmung ist die so genannte indirekte Kalorimetrie. Der respiratorische Quotient (RQ) steht für das Verhältnis der Kohlendioxidabgabe zur Sauerstoffaufnahme. Er gibt Auskunft über die gerade oxidierten Energie liefernden Substanzen. Bei reinem Fettumsatz beträgt der RQ 0.7, bei reinem Kohlenhydratumsatz 1.0, bei Proteinen liegt er um 0.81. Der RQ kann auch größer als 1 sein, wenn eine metabolische Azidose respiratorisch kompensiert wird. Die Sauerstoffaufnahme und Kohlendioxidabgabe kann heute durch die technische Entwicklung von Messgeräten mittels der sogenannten Spirometrie während einer sportlichen Belastung kontinuierlich gemessen werden.

Bei der Spirometrie wird die Ein- und Ausatemluft über eine Atemmaske zu einem Messgerät geleitet, analysiert und aufgezeichnet. Es besteht ein direktes Verhältnis zwischen dem Sauerstoffverbrauch ($\dot{V}O_2$) und der Produktion von ATP (Åstrand 1981). Energie wird vom Körper in Form von Wärmeenergie an die Umgebung abgegeben. Die direkte Kalorimetrie wird heute nicht mehr angewandt und hat in der Sportmedizin nur noch historischen Charakter. Mit diesem Verfahren kann die Energie unmittelbar bestimmt werden. Dazu befindet sich der Körper in einem geschlossenen System, welches von Eis umgeben ist. Die abgegebene Wärme bringt das Eis zum Schmelzen. Aus der Menge des Schmelzwassers lässt sich die Energiemenge bestimmen. 334 KJ abgegebener Wärme erzeugen 1 Liter Schmelzwasser (Silbernagel 1991). Die ersten Kalorimeter wurden bereits im 18. Jahrhundert von Lavoisier gebaut (Löwe-Riedel 1986). Die Bestimmung des Schmelzwassers ist zudem von Umweltbedingungen stark beeinflusst.

Die Bestimmung des aeroben Energieanteils einer hochintensiven, erschöpfenden Belastung wie dem WAnT erfolgt heute eigentlich einheitlich über den Sauerstoffverbrauch während des Tests, unter Mitberücksichtigung des kalorischen Äquivalentes für Glukose. Das kalorische Äquivalent für Glucose ist 21.131 (Stegemann 1991).

2.3. Anaerobe Energiegewinnung und deren biologische Messgrößen

2.3.1. Indirekte Methoden

Wesentlich schwieriger ist die Bestimmung des anaeroben Energiebetrages. Früher wurde im Blut oft lediglich das maximale Nachbelastungslaktat als Maß für die anaerobe Energiebereitstellung gewertet, weil das Laktat einen Ausdruck über den Umfang der Glykolyse darstellt. Die anaerobe Energie hat einen laktaziden und alaktaziden Anteil. Die alleinige Betrachtung der Laktatwerte nach einer Belastung gibt keinen Hinweis darauf, wie groß die alaktazide Energie ist, die aus dem ATP-PCr-System gewonnen wird.

Bei körperlicher Arbeit besteht ein erhöhter Energiebedarf der Muskulatur. Die Sauerstoffaufnahme steigt an. Der Anstieg ist verzögert. Da eine Differenz zwischen dem Sauerstoffbedarf, der für die vollständige Energiedeckung durch oxidative Prozesse notwendig wäre und dem tatsächlich aufgenommenen Sauerstoff besteht, wird diese als Sauerstoffdefizit bezeichnet. Der Begriff „Sauerstoffdefizit“ wurde bereits 1920 von Krogh und Lindhard (Krogh, Lindhard 1920) geprägt. Nach Beendigung der Arbeit fällt die Sauerstoffaufnahme wieder ab. Es besteht nach Arbeitsende ein Sauerstoffmehrbedarf zum Wiederaufbau der energiereichen Phosphate und zur Laktatumwandlung. Diese Sauerstoffmenge wird auch als Sauerstoffschuld bezeichnet. Die klassische „Hypothese von der Sauerstoffschuld“ nimmt an, dass die Menge der Sauerstoffschuld in direktem Verhältnis zum Sauerstoffdefizit steht. Bei leichter Arbeit im Ausdauerbereich entsprechen sich Sauerstoffschuld und Sauerstoffdefizit tatsächlich annähernd. Diese Sauerstoffschuld wird auch die alaktazide Sauerstoffschuld genannt, da mit ihr die Phosphatspeicher wieder aufgefüllt werden. Die Sauerstoffschuld nach

intensiver Kurzzeitbelastung ist wesentlich größer. Die Kurve der Sauerstoffaufnahme fällt flacher ab. Weil bei solchen Belastungen große Laktatmengen entstehen, wird diese auch die laktazide Sauerstoffschuld genannt (Margaria et al. 1933). Die „Hypothese von der Sauerstoffschuld“ wird heute allerdings sehr kritisch betrachtet. Da nur ein Teil des Sauerstoffs nach Belastung für das Wiederauffüllen von anaeroben Energiespeichern verwendet wird, ist der Begriff „Sauerstoffschuld“ nicht exakt. Stattdessen spricht man heute von einer erhöhten Sauerstoffaufnahme nach Belastung, der sogenannten „Excessive Postexercise Oxygen Consumption-EPOC“ (Brooks et al. 2004).

Die anaerobe Kapazität ist die Summe aller Arbeitsbeträge, die aus chemisch gespeicherter, anaerober Energie gewonnen werden kann. Sie hat einen alaktaziden und einen laktaziden Anteil. Die anaerob-alaktazide Kapazität wird über den ATP- und PCr-Vorrat definiert, der ca. 20 – 25 mmol/kg Muskelfeuchtmasse beträgt. Die anaerob-laktazide Kapazität entspricht der Menge an maximal gebildetem Nachbelastungslaktat. Maximale Blutlaktatwerte liegen im Bereich von ca. 15 – 20 mmol/l. Bei trainierten Menschen, wie z.B. bei 400-m-Läufern, werden teilweise auch Werte bis ca. 25 mmol/l gemessen (Heck 2006). Limitiert ist die Laktatbildung im Wesentlichen durch die maximal tolerable Azidose. Die anaerobe Leistungsfähigkeit ist die Summe der maximalen Arbeitsbeträge pro Zeit (Umsatzraten) der einzelnen anaerob Energie liefernden Systeme (Heck, Schulz 2002).

Die Entwickler des WAnT haben ursprünglich die anaerobe Leistung aus der höchsten Leistung eines 3 bis 5 Sekunden Abschnitts eines WAnT abgeleitet. Andere Autoren benutzen die gleichen Begriffe allerdings auch für andere Testverfahren unterschiedlicher Dauer von 1 – 10 Sekunden und auch für deutlich längere Tests (Margaria et al. 1966; Szögö et al. 1974; Komi et al. 1977). Teilweise werden auch heute noch zur Bestimmung der anaeroben Leistungsfähigkeit ganze Testbatterien mit hohem Aufwand durchgeführt. Als Beispiel sei genannt: Ein 5-s-Maximaltest zur Bestimmung der alaktaziden Leistungsfähigkeit, ein Maximaltest von 10 Sekunden für die laktazide Leistungsfähigkeit, ein Ausbelastungstest von 40 – 100 Sekunden zur Bestimmung der maximalen laktaziden Kapazität und zusätzlich muss die maximale Sauerstoffaufnahme mit einem Stufentest ermittelt werden (Heck, Schulz 2002).

2.3.2. Direkte Methoden

Einen genaueren Einblick in den Muskelstoffwechsel konnte durch die Entwicklung der Biopsie gewonnen werden. Die Nadelbiopsie ist heute Goldstandard zur Muskelfasertypenbestimmung und zur Diagnostik von Muskelkrankheiten. In der Humanmedizin werden damit z.B. Muskeldystrophien typisiert. In der Sportmedizin findet diese Methode Anwendung, weil man mit ihr im Muskel direkt ATP, PCr und weitere Stoffwechselmetaboliten der anaeroben Energiegewinnung wie Laktat und Pyruvat bestimmen kann. Bereits zu Beginn der 1960er Jahre wurde mit dieser Methode geforscht (Bergström 1962). Zwanzig Jahre später war es mittels bioptisch gewonnener Probe aus dem Muskulus vastus lateralis des Muskulus quadriceps möglich, nach einem WAnT intramuskuläres Laktat zu messen. Damit war bewiesen, dass auch schon innerhalb der ersten 10 Sekunden einer supramaximalen Leistung die Energiegewinnung auch über die anaerobe Glykolyse erfolgen muss (Jacobs et al. 1983).

Diese Entdeckung widerlegte die bis dato gültige Annahme, dass in den ersten 10 - 15 Sekunden einer supramaximalen Leistung kein Laktatanstieg stattfindet, also keine Glykolyse abläuft (Margaria et al. 1969). Weitere Erkenntnisse über leistungsphysiologische Abläufe in der Muskulatur des Bewegungsapparates wurden durch einbeinige Kniestrecktests gewonnen. Bevor und unmittelbar nachdem die Probanden 3.2 Minuten lang submaximale, erschöpfende Leistungen in Form von dynamischen Kniestreckungen mit 65 Watt durchgeführt haben, wurden Muskelbiopsien aus dem Muskulus quadriceps der Probanden entnommen. Die Konzentrationen von ATP und PCr nahmen um 30 % bzw. 60 % ab (Bangsbo 1990). Es können Stoffwechselprodukt-Konzentrationen gemessen werden und unter der Annahme, dass die Probe die mittleren Verhältnisse der Arbeitsmuskulatur widerspiegelt, lassen sich von dem einen biopsierten Muskel auch quantitativen Rückschlüsse auf die Gesamtkörper-Muskelmasse ziehen.

In den letzten 25 bis 30 Jahren wurde mit einer relativ neuen Methode, der sogenannten ³¹P-Phosphor-Magnetresonanzspektroskopie (³¹P-MRS), der Muskelstoffwechsel erforscht. Die in vivo Magnetresonanz-Spektroskopie ist eine von verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten des Kernspinresonanz-Effektes, der im Jahr 1946 entdeckt wurde und aus dem Messmethoden und diagnostische Hilfsmittel

hervorgegangen sind. Zunächst wurde die Kernspinresonanz (NMR= Nuclear Magnetic Resonance) als physikalische Methode verstanden. Man hat entdeckt, dass Atomkerne mit einer ungeraden Anzahl von Protonen und Neutronen einen mechanischen Eigendrehimpuls, den „Spin“, besitzen. Felix Bloch und Edward Mills Purcell zeigten 1946 experimentell unabhängig voneinander, dass Atomkerne in der Lage sind, hochfrequente elektromagnetische Wellen zu absorbieren, wenn sie von einem externen Magnetfeld umgeben sind. Im weiteren Verlauf beobachtete man, dass das NMR-Signal von der chemischen Umgebung beeinflusst werden kann und somit Substanzen charakterisiert werden können. Die technischen Anforderungen für die NMR-Spektroskopie sind allerdings deutlich größer als für die reine Bildgebung. Für die Leistungsphysiologie ist es interessant, dass mit der ³¹-Phosphor-Magnetresonanzspektroskopie die Phosphate des Energiestoffwechsels im Muskel (anorganisches Phosphat, ATP, PCr) gemessen werden können (Boesch 1997).

3. Energiebestimmung beim Wingate Anaerobic Test

Die Bestimmung des aeroben Energieanteils erfolgt aus der Sauerstoffaufnahme während des Tests unter Berücksichtigung des kalorischen Äquivalents.

Aus dem Nachbelastungslaktat wird der anaerob laktazide Energieanteil bestimmt. Den anaerob alaktaziden Energieanteil zu bestimmen ist schwieriger und erfolgt indirekt. Ausgehend von der Beobachtung, dass eine belastungsbedingt eingegangene Sauerstoffschuld durch eine erhöhte Sauerstoffaufnahme nach der Belastung wieder ausgeglichen wird (Margaria 1933), wurden Analysen entwickelt, die zur Quantifizierung des Wiederauffüllens der Phosphatspeicher dienen. Die Analysen stützen sich auf die Differenzierung einer schnellen und langsamen Komponente der Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastungsphase und erlauben Rückschlüsse auf die anaerob alaktaziden Energiebereitstellungsprozesse (Knuttgen 1970; di Prampero 1973; Gastin 2001). Über die schnelle Komponente der Sauerstoffaufnahme kann die Sauerstoffmenge der Nachbelastungsphase ermittelt werden. Sie dient überwiegend zur Resynthese energiereicher Phosphate (di Prampero, Ferretti 1999).

4. Entwicklung von Berechnungsmodellen für die Verteilung von Stoffen im menschlichen Körper

Im menschlichen Körper werden Substanzen und Flüssigkeiten im Rahmen von Stoffwechselfvorgängen aufgenommen, verteilt und wieder abgegeben. Schon immer hat man versucht, sich die Funktionsweisen des menschlichen Körpers mit wissenschaftlichen Modellen zu erklären. Auch zur Beschreibung von Stoffwechselfvorgängen existieren Berechnungsmodelle. Bereits 1870 hat Adolf Fick die erste Methode zur Bestimmung des Herzminutenvolumens entwickelt. Das nach ihm benannte „Fick'sche Prinzip“ arbeitet unter der Voraussetzung, dass in einem Organ, dessen Durchblutung gemessen werden soll, eine bestimmbare Dosis D_1 eines geeigneten Indikators in das Blut aufgenommen oder abgegeben wird. Die bestimmbare Dosis wird ins Verhältnis zum zuführenden (arteriellen) und abführenden (venösen) Blutspiegel des Indikators gesetzt.

$$Q_{\min} = \frac{D_1}{y_{\text{art}} - y_{\text{ven}}}$$

D_1 = Dosis, y_{art} = arterielles Blut, y_{ven} = venöses Blut

Nach diesem Verfahren wird auch heute noch die Durchblutung zahlreicher Organe, z.B. des Herzens, der Nieren, des Gehirns, gemessen. Das „Fick'sche Prinzip“ lässt sich auch für die Berechnung der Verteilung eines Stoffes in einem Verteilungsvolumen anwenden.

$$\text{Formel: } V = \frac{D}{a}$$

Wobei „V“ das Verteilungsvolumen, „D“ die Dosis und „a“ der Blut-/Plasmaspiegel ist.

Grundsätzliche Voraussetzung für diese Vorgänge ist es laut Dost „dass das An- und Abklingen einem einfachen, immer wiederkehrenden Exponentialgesetz folgt oder sich in diesem wenigstens näherungsweise unterordnet“ (Dost 1968). Bei dem beschriebenen Vorgang wird vorausgesetzt, dass ein konstanter Zufluss und Abfluss besteht. Es handelt sich um ein so genanntes Monoexponential-Modell. Nach Bertalanffy (Bertalanffy 1950) wird solch ein konstanter Zufluss und Abfluss auch

„Fließgleichgewicht“ und nach Hill (Hill 1925) auch Steady-State genannt. Betrachtet man jetzt das Einfluten oder die Invasion eines Stoffes in das Blut sowie deren Abfluten oder Elimination, so muss die Zunahmegeschwindigkeit bzw. die Abnahmegeschwindigkeit mit berücksichtigt werden. Beschrieben wird dies durch die Invasionskonstante k_1 und die Eliminationskonstante k_2 .

Formel für die Zunahmegeschwindigkeit des Blutspiegels:

$$y = a \cdot (1 - e^{-k_1 t})$$

a = Blut-/Plasmaspiegel, k_1 = Invasionskonstante, e-Funktion = 2.7182

Formel für die Abnahmegeschwindigkeit des Blutspiegels:

$$y = a \cdot (e^{-k_2 t})$$

a = Blut-/Plasmaspiegel, k_2 = Eliminationskonstante

Solche Monoexponentialmodelle werden bei stabilen Fließ-Gleichgewichten oder so genannten Steady-State-Modellen angewandt. Voraussetzung ist ein konstanter Zufluss. Als praktisches Beispiel in der Humanmedizin sei hier die Applikation einer Substanz mittels Dauerinfusion genannt.

Bei der vorgelegten Untersuchung betrachten wir das Laktatverhalten nach einem Wingate Anaerobic Test. Nach einer supramaximalen Leistung wie dem WAnT wird in kurzer Zeit in der Muskulatur sehr viel Laktat gebildet. Es herrscht also kein konstanter Zufluss. Diese Inkonzanz der Laktatbildung ist zum einen durch die Kürze des 30-s-Tests bedingt. Zum anderen aber auch dadurch, dass die Glykolyserate während des Tests selbst inkonstant ist. Sie unterliegt verschiedenen Einflussfaktoren wie z.B. der pH-Wert-Änderung und der Hemmung der Phosphofruktokinase durch Laktat. Somit kann das Monoexponentialmodell nicht für unsere Untersuchung angewandt werden. Die intramuskuläre Laktatbildung nach einem WAnT entspricht eher im übertragenen Sinn einer Bolusgabe, da es innerhalb kurzer Zeit zu einem schnellen Laktatanstieg auf Werte um 14 mmol/l kommt. Nach dieser Laktat- „Bolusgabe“ versucht der Körper nach dem grundsätzlichen Prinzip der Homöostase wieder ein Gleichgewicht herzustellen.

Hierzu laufen zwei sich überlagernde Prozesse bezüglich der Laktatverteilung ab. Diese beiden Vorgänge sind die Invasion und die Elimination des Laktats. Laktat wird im Zytosol der Muskelzelle aus Pyruvat gebildet, passiert durch passiven und aktiven Transport die Zellmembran und wird über das Blut und Interstitium weiter zu den Organen transportiert. Insbesondere in Leber, Niere, Herz, Hirn und Arbeitsmuskulatur wird Laktat (auch Pyruvat) in den Mitochondrien der Gluconeogenese zugeführt. Diese Prozesse brauchen eine gewisse Zeit, die abhängig von der Verteilungsgeschwindigkeit und von der Größe des Verteilungsvolumens sind und werden mit der Invasionskonstanten k_1 und der Eliminationskonstanten k_2 beschrieben. Trotzdem ist die Verwendung des Begriffs „Bolus“-Gabe für die vorgelegte Untersuchung nicht korrekt und es sollte der Begriff „im Muskel gebildetes Laktat“ verwendet werden.

Basierend auf Beobachtungen von Isotopen-Zerfallsreihen beschrieb Harry Bateman 1910 die Invasion und Elimination radioaktiver Stoffe (Bateman 1910). Mit der nach ihm benannten Bateman-Funktion existiert ein anerkanntes Modell, das insbesondere in der Pharmakokinetik angewandt wird (Dost 1968). Mit der Bateman-Funktion sind Berechnungen möglich, wie sich ein Stoff nach einer einmaligen Bolusgabe in den Extravasalraum im Körper verteilt. Bei gleichzeitig exponentiell stattfindender Invasion und Elimination resultiert eine spezifische Blutspiegelkurve des Stoffes (Dost 1968). Man nennt dies eine Biexponentialfunktion. Die Blutspiegelkurve steigt auf ein Maximum an und fällt bis zum vollständigen Abbau des Stoffes asymptotisch wieder ab.

In der folgenden Abbildung 2 ist der typische Kurvenverlauf einer Bateman-Funktion dargestellt.

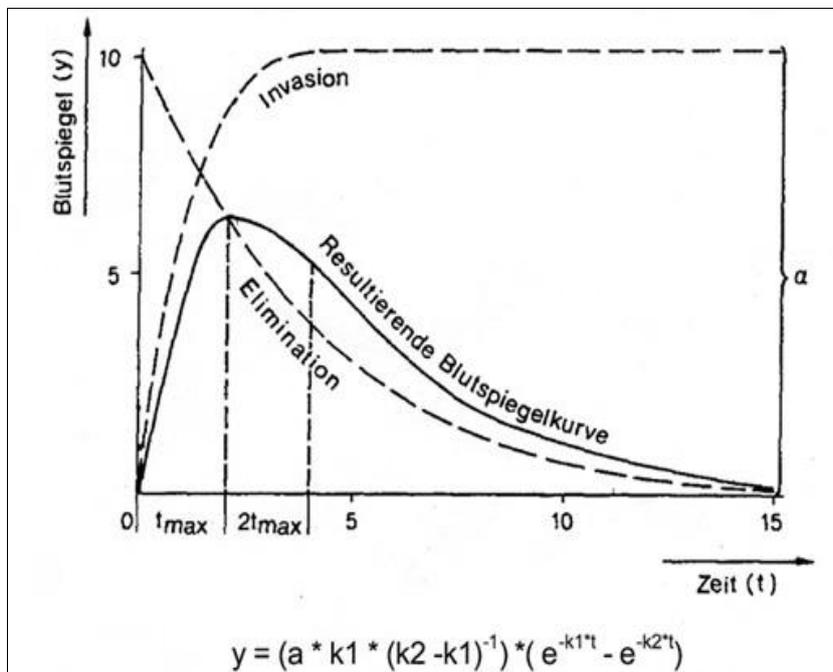


Abb. 2: Typischer Verlauf einer Bateman-Funktion. a = Bolus, k_1 = Invasionskonstante, k_2 = Eliminationskonstante, e = e-Funktion

Angewandt wird die Bateman-Funktion, wenn sich der applizierte Stoff in einem Kompartiment verteilt und wenn Invasion und Elimination einer Reaktion 1. Ordnung folgen. Voraussetzung für die Anwendung ist, dass Invasion und Elimination exponentiell verlaufen. Es gilt die Annahme, dass die Invasion und Elimination nur von der Stoffkonzentration und der Diffusionskonstanten abhängig ist. Das bedeutet, dass aktive Stofftransporte und auch unterschiedliche Verteilung in mehr als einem Kompartiment unberücksichtigt bleiben.

In der vorliegenden Untersuchung wurde das Laktatverhalten nach körperlicher Leistung beschrieben. Die theoretischen Annahmen für die korrekte Anwendung der Bateman-Funktion werden dabei aber nicht vollständig erfüllt, da es auch aktive Transportmechanismen für Laktat, die sogenannten Laktatshuttle, gibt. Auch verteilt sich das Laktat in mehr als einem Kompartiment. Für die Beschreibung solcher

Stoffwechselprozesse existieren bislang keine anderen Berechnungsmodelle. Basierend auf den genannten Überlegung wurde ein Drei-Parameter Bi-Exponential Modell entwickelt (Beneke 2005), dem die Bateman-Funktion zu Grunde liegt. Das Model beschreibt die Kinetik der Blutlaktatkonzentration. Damit ist es möglich, das Laktatmaximum in der Nachbelastungsphase einer supramaximalen Leistung zu berechnen und zu jedem Zeitpunkt der Nachbelastungsphase das Laktat sowie den Zeitpunkt des Laktatmaximums zu bestimmen. Es ist auch möglich, die Laktatkonzentration des Extravasalraums zu approximieren. Es gilt die Anwendungsvoraussetzung, dass nach der Erwärmungsphase und vor Beginn des WAnT noch kein Laktatanstieg stattgefunden hat. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird dieses Model das „alte“ oder das „originale“ Drei-Parameter Bi-Exponential Modell genannt.

In der vorliegenden Untersuchung wurde festgestellt, dass einige Probanden bereits nach der Erwärmung, aber noch vor dem Start des WAnT einen Anstieg ihrer Vorbelastungslaktatwerte hatten. Es finden in der Zeit zwischen Erwärmungsphase und vor Start des WAnT bereits Invasions- und Eliminationsvorgänge des Laktats statt. Aus diesem Grund wurde das originale Drei-Parameter Bi-Exponential Modell weiterentwickelt, um einen möglichen Laktatanstieg nach der Erwärmung vor dem Start des WAnT mit zu berücksichtigen und um korrekte Anwendungsvoraussetzungen für alle Probanden zu schaffen (Mühling 2008).

Im weiteren Verlauf wird dieses Modell das „neue“ Drei-Parameter Bi-Exponential Modell genannt. Bedingung für die Anwendung dieses Modells ist, dass eine ausreichend lange Pause zwischen Erwärmung und Start des Tests liegt, damit die Hauptbelastung durch den WAnT nicht vor dem Wendepunkt des ersten Laktatanstiegs liegt. Die Pause sollte mindestens doppelt so lang sein, wie der Zeitpunkt des Laktatmaximums ($2x t_{max}$), da die Kurve dann monoexponential abfällt (Beneke 2002, 2005).

5. Fragestellung

- (1) Bei wie vielen Probanden der Studie besteht eine Laktaterhöhung bereits vor dem Start des WAnT und ist somit die Anwendung des neuen Drei-Parameter Bi-Exponential Modells von Bedeutung?
- (2) Gibt es einen Unterschied, ob die „neue“ oder „alte“ Methode angewandt wird?
- (3) Unterscheidet sich das Laktatmaximum und sein Zeitpunkt, wenn es gemessen bzw. berechnet wird?
- (4) Unterscheidet sich das approximierte Laktat des Extravasalraums vom Delta-Laktat?
- (5) Das energetische Profil eines WAnT hat einen aeroben, anaerob-alkalischen und anaerob-laktischen Anteil. Wirken sich die unterschiedlichen Bestimmungen des Nachbelastungslaktats auf das energetische Gesamtprofil aus?

Ziel der Studie, die am Institut für Sportmedizin der FU Berlin (Institutsleiter Prof. Dr. med. D. Böning) unter Leitung von Prof. Dr. med. Dipl. Sportl. R. Beneke im Rahmen des „Wingate Projekts“ durchgeführt wurde, ist:

Analyse der Dynamik der Blutlaktatkonzentration bei einer supramaximalen Leistung wie dem WAnT mit einem originalen und modifizierten Berechnungsmodell.

Ziel der vorliegenden Arbeit:

- (1) Vergleich des sogenannten originalen Berechnungsmodells, welches auf der Batemanfunktion basiert, mit einem neuen Model zur Approximation der Dynamik der BLK bei WAnT.

Grund: Trotz standardisiertem Erwärmungsablauf haben einige Probanden bereits vor dem Start des WAnT einen Laktatanstieg. Das alte Modell ist unter der Voraussetzung gültig, dass es nach der Erwärmung zu keinem Anstieg des Laktats kommt. Das neue Model berücksichtigt das Laktatverhalten in dieser Phase zwischen Ende der Erwärmung und dem Start des WAnT.

Hypothese: Berechnungen mit erhöhtem Anfangslaktat führen zu einem Anstieg der Invasionskonstanten und einem erhöhtem Laktat im Extravasalraum bei verminderter Varianz der Laktatantwort.

- (2) Vergleich des energetischen Profils berechnet auf Grundlage
- a) der maximalen gemessenen Änderung der BLK nach WAnT,
 - b) des berechneten Laktat-Maximums,
 - c) des approximierten extravasalen Laktats.

Grund: Das energetische Profil differiert, weil der anaerob-laktazide Energieanteil auf Grundlage von drei verschiedenen Herleitungen (a – c) berechnet wurde.

Hypothese: Das energetische Profil berechnet auf Grundlage des approximierten Laktats des Extravasalraums ist am größten, gefolgt vom berechneten Laktatmaximum und dem manuell gemessenen Laktatmaximum.

C METHODIK

1. Durchführung der Experimente

1.1. Versuchsaufbau

Die Probanden absolvierten zunächst einen WAnT als Probetest, um sich an die Testsituation und den Gesamtablauf, einschließlich aller Blutentnahmen und das Tragen der Atemmaske zu gewöhnen. Nach wenigen Tagen führten sie innerhalb von 3 – 8 Tagen zwei WAnT für diese Untersuchung durch. Vor und nach dem 30 Sekunden dauernden WAnT wurden zu bestimmten Zeitpunkten Blutentnahmen durchgeführt. Die Atemgase wurden kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet. Der Testablauf war standardisiert und wurde exakt protokolliert. Sämtliche Tests fanden in den Vormittagsstunden statt.

1.2. Probanden

Die Untersuchung wurde an 11 gesunden, männlichen, jungen Erwachsenen durchgeführt, die sich in unterschiedlichem Trainingszustand befanden und verschiedene sportliche Disziplinen im Rahmen von Freizeitsportaktivitäten ausübten. Alle Probanden waren Nichtraucher und nahmen keine Medikamente ein. In der Gruppe befanden sich einige Rugbyspieler und Basketballspieler mit 2 Trainingseinheiten in der Woche, einzelne Breitensportler mit gelegentlichem Training verschiedener Sportarten und ein Radsportler mit täglichem Training. Alle Probanden wurden in einem Vorgespräch über den genauen Ablauf und über die Ziele dieser Untersuchung sowie über mögliche Risiken und Nebenwirkungen, die mit der Teilnahme an der Studie verbunden waren, informiert. Sie erklärten schriftlich ihr Einverständnis.

Die anthropometrischen Daten sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

Tab. 1: **Anthropometrische Daten der Probanden in Test1 und Test2.**

SD= Standardabweichung, MW= Mittelwert, cm= Zentimeter, kg= Kilogramm

Proband	Alter (Jahre)	Körpermasse Test 1 (kg)	Körpermasse Test 2 (kg)	Größe (cm)
1	21	83.3	83.1	190
2	27	74.4	73.9	186
3	33	69.9	69.2	178
4	28	75.0	73.3	179
5	28	79.3	78.1	182
6	21	86.4	87.5	188
7	23	79.8	78.4	182
8	31	93.6	94.8	186
9	26	87.4	87.9	192
10	23	87.3	87.5	192
11	34	82.9	82.4	174
MW	26.82	81.75	81.46	184.45
± SD	± 4.56	± 6.92	± 7.69	± 5.96

1.3. Ablauf Gesamttest

In der Vorbereitungsphase des Tests wurden die Körpermasse und Körpergröße der Probanden gemessen. Danach erfolgten das individuelle Anpassen der Atemmaske (Fa. Dräger) und der Sattelhöhe des Wingate-Ergometers. Die Atemmaske wurde mit dem Spirometer der Firma Mijhardt (Typ Oxycon Gamma) verbunden. Es wurden während des gesamten Testablaufs die respiratorischen Daten (VO₂, VCO₂, Ventilation, Atemfrequenz) gemessen und aufgezeichnet. Um die respiratorischen Daten nicht zu beeinflussen, wurden die Probanden dazu angehalten, nicht mehr zu sprechen, sondern sich per Handzeichen verständlich zu machen. Sämtliche Einstellungen wurden notiert, um im Retest gleiche Ausgangsvoraussetzungen zu haben. Die Ohrläppchen wurden mit einer hyperämiesierenden Salbe (Finalgon® extra

stark, Fa. Thomae) bestrichen. Zum Ende der zehnminütigen Vorbereitungsphase wurde den Probanden zur Ermittlung der „Ruhewerte“ Blut aus den Ohrläppchen entnommen.

Anschließend erfolgte eine fünf Minuten dauernde Erwärmungsphase bei 50 W Belastung. Dafür setzte sich der Proband auf das Ergometer Excalibur SPORT der Firma Lode. Es ist ein elektrodynamisches, drehzahlunabhängiges Fahrradergometer. Am Ende der dritten und vierten Minute wurde er aufgefordert, mit maximaler Kurbelfrequenz jeweils zwei bis drei Sekunden anzutreten, um sich auf den Wingate Test vorzubereiten. Danach erfolgte der Transfer aufs Wingate-Ergometer der Firma Monark Typ 824 mit dem individuell eingestellten Bremsgewicht (7.5 % vom Körpergewicht). Die Füße wurden in Pedalvorrichtungen festgeschnallt. Zur Bestimmung der Werte „vor WAnT“ (Vorbelastungswert) wurde 2 Minuten vor dem Start des WAnT Blut aus dem hyperämisierten Ohrläppchen entnommen.

Genau zehn Minuten nach der Aufwärmphase startete der Wingate Test mit dem Kommando „Auf die Plätze – Fertig – Los“. Sofort nach Ende des dreißig Sekunden dauernden WAnT wurde die nächste Blutentnahme aus dem Ohrläppchen vorgenommen. Der Proband verweilte noch fünf Minuten auf dem Wingate-Ergometer und setzte sich dann auf einen bequemen Stuhl mit Arm- und Rückenlehnen. Weitere Blutentnahmen erfolgten zu im Testprotokoll festgelegten Zeitpunkten. Mit Ablauf der dreißigsten Minute war der Gesamttest beendet.

1.4. Wingate Anaerobic Test

Der Wingate Anaerobic Test (WAnT) ist ein Test zur Ermittlung der anaeroben Leistungsfähigkeit. Der WAnT wurde auf dem speziell für diesen Test konzipierten Fahrradergometer Typ 824 E der Firma Monark durchgeführt. Die Sattelhöhe und die Lenkerhöhe werden individuell eingestellt und protokolliert, um im Retest gleiche Ausgangsvoraussetzungen zu haben. Das Wingate-Ergometer ist mit einem Computer verbunden. Vor Testbeginn wurden Körpermasse und Körpergewicht des Probanden eingegeben. Das Ergometer ist mechanisch gebremst, drehzahlabhängig und mit Pedalen, Zahnkranz, Übersetzungskette und einem davon angetriebenem Schwungrad versehen. Der Test begann auf Kommando des Testleiters. Der Proband trat zunächst ohne Widerstand in die Pedalen und versuchte schnellstmöglich eine maximale Pedalfrequenz zu erreichen. Diese wurde über einen Zahnkranz und eine

Übersetzungskette auf das Schwungrad übertragen und maximal beschleunigt. Nach drei Sekunden wurde das maximal beschleunigte Schwungrad mittels Straffung des Seilzuges durch die Gewichtscheiben gebremst, so dass der Proband gegen einen kontinuierlichen Tretwiderstand arbeiten muss. Das Bremsgewicht beträgt 7.5 % des Körpergewichts. Es wird mit Gewichtscheiben bis auf 100 Gramm genau eingestellt. Der Proband versuchte längstmöglich die maximale Pedalfrequenz aufrecht zu erhalten. 30 Sekunden später wurde der Test auf Kommando beendet. Die Leistung wurde in 5-Sekunden-Abschnitten gemittelt und aufgezeichnet. Sie wurde während des Tests bezüglich Trägheitseffekten des langsamer werdenden Schwungrades korrigiert.

2. Bestimmung der Messgrößen

2.1. Leistungswerte

Über ein spezielles Softwareprogramm der Firma Monark werden während des 30 Sekunden dauernden WAnT Leistungsdaten berechnet und aufgezeichnet.

Der Leistungsverlauf wird graphisch dargestellt (Abb. 3).

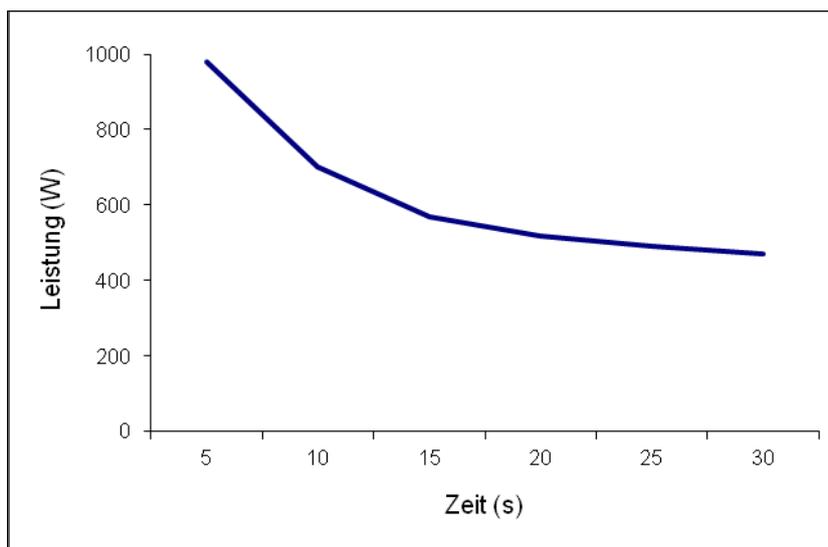


Abb. 3: Typisches Leistungs-Zeit-Diagramm für einen WAnT. Zeit in Sekunden (s), Leistung in Watt (W)

Folgende Leistungsdaten wurden ermittelt:

höchste Leistung: Peak-Power (W), Peak-Power/kg (W/kg).

Höchste während eines 5-s-Abschnitts berechnete

Durchschnittsleistung (A)

niedrigste Leistung: Minimum-Power (W), Minimum-Power/kg (W/kg).

Die niedrigste während eines 5-s-Abschnitts berechnete

Durchschnittsleistung (B)

Durchschnittsleistung: Average-Power (W), Average-Power/kg (W/kg).

Die durchschnittliche Leistung, berechnet aus den zuvor analysierten 5-s-Zeiträumen.

Leistungsabfall: Power-Drop (W/s)

Fatigue-Index: Prozentualer Abfall der Leistung relativ zur Peak-Power

$$\text{Fatigue-Index} = \frac{(\text{PeakPower} - \text{MinimumPower}) \cdot 100}{\text{PeakPower}}$$

2.2. Kapillarblutentnahme

Es wurden 22 Blutentnahmen aus den hyperämisierten Ohrläppchen zu folgenden Zeitpunkten durchgeführt:

Die erste Blutentnahme diente zur Ermittlung des „Ruhewertes“. Die Abnahme erfolgte nach 10 Minuten Ruhephase am sitzenden Probanden. Weitere Entnahmen erfolgten direkt vor („Vorbelastungswert“) und unmittelbar nach dem WAnT („nach Belastung“) und anschließend minütlich über einen Zeitraum von 10 Minuten. Danach alle 2 Minuten bis zum Ende des 30 Minuten dauernden Gesamtversuchs (Abb. 4).

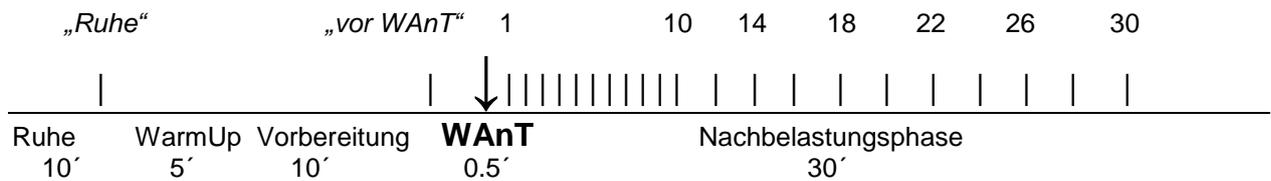


Abb. 4: **Zeitlicher Ablauf der Blutentnahmen in Minuten:** „Ruhe“= Ruhewert, „vor WAnT“= Vorbelastungswert, ↓ = Start Wingate Test, | = Blutentnahme

Zur Blutentnahme wurden die hyperämisierten Ohrläppchen mit einer Lanzette punktiert, der erste Tropfen verworfen und 0,02 ml Kapillarblut in einer 0,02 ml fassenden End-zu-End-Glaskapillare gewonnen. Die Probe wurde in 1 ml ESAT-Systemlösung® (Fa.Eppendorf) hämolysiert und direkt nach Versuchsende analysiert. Die Bestimmung der kapillären Laktatwerte erfolgte nach Testende bei Zimmertemperatur. Es wurden alle Laktat-Röhrchen 45 Sekunden maschinell geschüttelt und anschließend im Messgerät „Ebio plus 6668 V1.24“ der Firma Eppendorf analysiert. Zur Messung der Laktatkonzentration wurden automatisch 200 µl Probenlösung in eine Messzelle gesaugt. Das Gerät arbeitete mit einer Enzymelektrode nach enzymatisch-amperometrischem Prinzip. Diese Methode basiert auf der Oxidation von Laktat zu Pyruvat und Wasserstoffperoxid. Das Wasserstoffperoxid wurde an einer Platinelektrode oxidiert. Die bei der Oxidation gemessene Strom-Zeit-Kurve wurde fortlaufend differenziert. Das Maximum der differenzierten Kurve kennzeichnet den maximalen Anstieg der Strom-Zeit-Kurve. Dieses Maximum wurde in einen Spannungswert umgewandelt. Dieser Spannungswert war zu der Laktatkonzentration der Probe proportional. Der Messbereich reichte von 0.5 bis 30 mmol/l Laktat. Die Unpräzision war $\leq 2.5\%$ bei 12 mmol/l. Die Unpräzision beschreibt die zufällige Messabweichung. Sie beschreibt die Differenz eines Messergebnisses zum Mittelwert, der sich aus einer unbegrenzten Anzahl von Wiederholungsmessungen derselben Messgröße ergeben würde. Die zufällige Messabweichung wird geschätzt durch die Bildung der Differenz des Wertes der Einzelmessung zum arithmetischen Mittelwert der Messwerte (Richtlinien der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung laboratoriumsmedizinischer Untersuchungen 2007).

2.3. Atemgase

Die Atemgase wurden während des gesamten Testablaufes gemessen. Die Messung erfolgte Zug um Zug mit dem Spirometer OXYCON gamma® (Fa. Mijnhardt). Das Spirometer besteht aus Gesichtsmaske, Gasanalysator, Rechner, Bildschirm und Drucker. Atemfrequenz und Atemzugvolumen wurden mittels einer Turbine an der Maske gemessen. Durch Inspirations- und Expirationsluftstrom wurde die Turbine betrieben. Die Umdrehungszahl der Turbine ist proportional zur ventilierten Gasmenge bei BTPS-Bedingungen. Die Umdrehungszahl wurde mit einer Photozelle gemessen. Aus der Expirationsluft wurde nahe der Turbine ein Probenvolumen entnommen und über einen Schlauch mit Dissekator einem paramagnetischen Differenzanalysator (O_2) und einem Infrarotanalysator (CO_2) zugeführt. Die mittels OXYCON gamma® gemessene Sauerstoffaufnahme für STPD-Bedingungen wurde aus Atemzugvolumen und der Differenz der Sauerstoffkonzentrationen zwischen Inspirations- und Expirationsluft errechnet. Zur Qualitätssicherung musste vor jeder Messung eine zweistündige Aufwärmzeit des Gerätes eingehalten werden und es musste die Turbine zur Bestimmung des Atemzugvolumens mit einer 3.0l-Eichpumpe geeicht und das Gerät gegen ein Testgas (5.0% CO_2 , 95.0% N_2) kalibriert werden. Aufgezeichnet und bestimmt wurden die Atemfrequenz, die Sauerstoffaufnahme, die Kohlendioxidabgabe und das Atemzugvolumen.

3. Datenanalyse und Statistik

3.1. Berechnungen

3.1.1. Berechnungen zum Laktatverlauf

Zur Bestimmung der Laktatwerte wurden aus den hyperämisierten Ohrläppchen der Probanden vor und nach dem WAnT zu 22 definierten Zeitpunkten Blutproben entnommen. Grundlage für die Berechnungen des Zeitverhaltens der Blutlaktatkonzentration ist die Bateman-Funktion. Es kann der Blutlaktatverlauf (BLC), die Invasionskonstante „ k_1 “, die Eliminationskonstante „ k_2 “ und das hypothetische,

extravasal gebildete Laktat über die Konstante „A“ berechnet werden (Fig. 1):

$$\text{Fig. 1: } \frac{A \cdot k_1}{k_1 - k_2} \cdot (e^{-k_2 t} - e^{-k_1 t})$$

Da auch im Ruhezustand eine gewisse Laktatmenge (BLC_{Ruhe}) im Blut vorliegt, ist die Formel um diesen Term erweitert und wird die „originale“ oder „alte“ Formel genannt (Fig. 2):

$$\text{Fig. 2: } BLC(t) = \frac{A \cdot k_1}{k_2 - k_1} \cdot (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + BLC_{\text{Ruhe}}$$

Unter der Beobachtung, dass es bei einigen Probanden bereits nach der Erwärmungsphase und noch vor dem Start des WAnT zu einem Anstieg des Laktats gekommen ist (BLC_{PW}), wurde die Formel erweitert, um die Kinetik des Laktatverlaufs im Zeitraum zwischen der Erwärmungsphase und dem Start des WAnT zu berücksichtigen (Fig. 3):

$$\text{Fig. 3: } BLC(t) = \frac{A \cdot k_1}{k_2 - k_1} \cdot (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + (BLC_{\text{PW}} - BLC_{\text{Ruhe}}) \cdot e^{-k_2 t} + BLC_{\text{Ruhe}}$$

Die Formel ist unter der Bedingung gültig, dass der Laktatanstieg nach der Erwärmung seinen Höhepunkt überschritten hat und dann monoexponentiell abfällt, bevor der WAnT startet. Dies gilt, wenn die Zeit zwischen dem Ende der Erwärmung und dem Start des WAnT mindestens doppelt so lang ist, wie der Zeitpunkt des Laktatmaximums (Beneke et al. 2007).

Unter Berücksichtigung des Logarithmus naturalis (\ln) kann der Zeitpunkt des Laktatmaximums (T_{max}) nach Ende des WAnT berechnet werden (Fig. 4).

Der Term „X1“ ist die Differenz zwischen Ruhelaktat und Vorbelastungslaktat ($BLC_{\text{Ruhe}} - BLC_{\text{PW}}$):

Fig. 4:
$$T_{\max} = \frac{1}{k_1 - k_2} \cdot \ln \left(A \cdot k_1^{\frac{2}{(A k_1 k_2 - k_2^{k_1 k_2 x_1})}} \right)$$

3.1.2. Sauerstoffaufnahme während und nach einem Wingate Test

Der anaerob-alaktazide Energieanteil nach einem WANt kann nicht direkt bestimmt werden. Da zur Resynthese energiereicher Phosphate Sauerstoff notwendig ist (Margaria 1933), kann über die Sauerstoffmehraufnahme nach Belastungsende indirekt der alaktazide Energieanteil bestimmt werden. Über die Bestimmung der Sauerstoffmenge in der Nachbelastungsphase eines Wingate Tests kann der Verbrauch von Phosphat quantifiziert werden. Dazu wird die schnelle Komponente der Sauerstoffaufnahme ermittelt, da diese hauptsächlich zur Resynthese energiereicher Phosphate dient (di Prampero, Ferretti 1999) Fig.5:

Fig. 5:
$$VO_{2(t)} = a \cdot e^{-\tau/ta} + b \cdot e^{-\tau/tb} + c$$

Fig. 5: $VO_{2(t)}$ = Sauerstoffaufnahme, a = schnelle Komponente Sauerstoffaufnahme, b = langsame Komponente Sauerstoffaufnahme, c = Sauerstoffaufnahme in Ruhe, ta = Zeitkonstante, tb = Zeitkonstanten der Komponenten, τ = Tau.

Unter Berücksichtigung der e-Funktion (2.71828) und der Zeit der schnellen Sauerstoffkurve (TPCr in min) wird die mittlere Sauerstoffaufnahme ($VO_{PCr_{\text{mean}}}$) bestimmt (Fig. 6).

Fig. 6:
$$VO_{PCr_{\text{mean}}} = a \cdot 2.71828^{\left(\frac{-TPCr}{ta}\right)}$$

Durch Kenntnis der mittleren Sauerstoffaufnahme und der Zeit der schnellen Sauerstoffkurve kann die Sauerstoffmenge (VOPCr in ml), die zur Resynthese energiereicher Phosphate verbraucht wurde, berechnet werden (Fig. 7):

Fig. 7:	$VOPCr \text{ (ml)} = VOPCr_{\text{mean}} \text{ (ml/min)} \cdot TPCr_{\text{max}} \text{ (min)}$
---------	---

3.2. Energiebestimmung beim Wingate Test

Der aerobe Energiebetrag wird über die Sauerstoffaufnahme während des Tests unter Berücksichtigung des kalorischen Äquivalents für Glukose ($21.131 \text{ KJ}\cdot\text{l}^{-1}$) bestimmt. Die anaerob-alkalazide Energie, also die Energiemenge, die aus dem ATP-PCr-System gewonnen wird, berechnet sich über die schnelle Komponente der Sauerstoffaufnahme nach WAnT unter Berücksichtigung des kalorischen Äquivalents für Glucose (Knutgen 1970; Roberts, Morton 1978).

Die Ermittlung der anaerob-laktaziden Energie erfolgt aus dem Netto-Laktatmaximum in der Nachbelastungsphase unter Berücksichtigung des Körpergewichtes und des O₂-Laktatäquivalentes, welches 2.7 bis 3.3 ml O₂ kg⁻¹ · mmol·l⁻¹ beträgt. (Beneke, Meyer 1997; di Prampero 1981; Mader, Heck 1986). Wir haben mit einem O₂-Laktatäquivalent von 2.7 ml O₂·kg⁻¹ · mmol·l⁻¹ gerechnet (Mader 1986).

3.3. Mechanischer Wirkungsgrad

Zur Berechnung des mechanische Wirkungsgrades (in Prozent) wird die Energie, die über den Stoffwechsel generiert wird (metabolische Energie) in Relation zur mechanischen Energie gesetzt.

Mechanischer Wirkungsgrad (%) =	$\frac{\text{metabolische _ Energie _ (KJ)}}{\text{mechanische _ Energie}} \times 100$
---------------------------------	---

3.4. Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wurde mit dem Standard-Softwareprogramm SPSS durchgeführt. Der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigt uns, dass eine Gauß'sche Normalverteilung der Werte vorliegt. Alle Daten sind mit Mittelwerten einschließlich Standardabweichung (mean \pm SD) aufgeführt. Der lineare Zusammenhang zweier Messgrößen wurde mit dem Pearson'schen Korrelationskoeffizienten überprüft. Die Prüfung der statistischen Signifikanz von Mittelwert-Differenzen erfolgt mit Hilfe des t-Tests für verbundene Stichproben. Liegt die Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 5 % ($p < 0.05$), wurde ein Ergebnis als signifikant gewertet. Mögliche systemische Anwendungseffekte der Formeln wurden mit einer Technik der Varianzanalyse, der Verallgemeinerten Schätzungsgleichung („Generalized Linear Model“) geprüft. Zur Beurteilung der Güte der Prognose wurden die mean Sum of Squares (mean SS) bestimmt. Mit dem Bland-Altman-Plot wurden Differenzen der Mittelwertvergleiche aufgezeigt.

D ERGEBNISSE

1. Mechanische Leistung

Unter Test und Re-Test-Bedingungen unterscheiden sich die Messgrößen der mechanischen Leistung Peak-Power (pp), Minimum-Power (mp), Average-Power (ap), Power-Drop und Ermüdungsindex nicht signifikant. Alle Messgrößen korrelieren signifikant. Die Korrelationskoeffizienten (r) der Peak-Power sind $r = 0.90$, der Minimum-Power $r = 0.80$, der Average-Power $r = 0.89$, des Power-Drops $r = 0.92$ und des Ermüdungsindex $r = 0.87$. Alle p-Werte sind < 0.05 .

In der folgenden Tabelle (Tab. 2) werden zunächst die klassischen Ergebnisgrößen der 11 Probanden für den Wingate Anaerobic Test angegeben:

Tab. 2: **Gemittelte klassische Ergebnisgrößen.**

W= Watt, W/s= Watt pro Sekunde, %= Prozent,
SD= Standardabweichung, n.s.= nicht signifikant

	Probanden	Test1 mean \pm SD	Test2 mean \pm SD	Mittelwert- Vergleich (p)
Peak-Power (W)	11	987 \pm 130	1009 \pm 81	n.s.
Minimum-Power (W)	11	513 \pm 45	500 \pm 35	n.s.
Average-Power (W)	11	702 \pm 62	692 \pm 52	n.s.
Power-Drop (W/s)	11	15.5 \pm 4.7	17.0 \pm 2.4	n.s.
Ermüdungsindex (%)	11	47.3 \pm 8.3	50.4 \pm 4.1	n.s.

2. Gemessene Laktatwerte

2.1. Laktatwerte in Ruhe und nach Erwärmung

Das durchschnittliche Ruhelaktat beträgt in Test1: 1.00 (± 0.38 mmol/l) und in Test2: 1.04 (± 0.40 mmol/l). Das durchschnittliche Vorbelastungslaktat ist etwas höher als das Ruhelaktat und beträgt in Test1: 1.42 (± 0.57 mmol/l) und in Test2: 1.32 (± 0.67 mmol/l). Das bedeutet eine Differenz zwischen Ruhelaktat und Vorbelastungslaktat im Mittel von 0.42 mmol/l (Test1) bzw. 0.28 mmol/l (Test2). Es bestehen unter Test-Retest Bedingungen signifikante Korrelationen der Ruhewerte ($r = 0.79$, $p < 0.05$) und der Vorbelastungswerte ($r = 0.78$, $p < 0.05$). Die Ergebnisse unterscheiden sich im Mittelwertvergleich nicht signifikant voneinander. In 16 von 22 Testergebnissen besteht ein erhöhtes Anfangslaktat nach der Erwärmungsphase und noch vor dem Start des WAnT. In Tabelle 3 sind die Ruhelaktatwerte und die nach der Erwärmungsphase und vor dem Start des WAnT gemessenen Vorbelastungslaktatwerte aufgeführt:

Tab. 3: **Laktatwerte in Ruhe und nach Vorbelastung der einzelnen Probanden**

Proband	Test	Ruhelaktat (mmol/l)	Vorbelastungslaktat (mmol/l)
1	1	1.7	1.7
	2	1.6	1.6
2	1	1.2	1.1
	2	1.4	1.7
3	1	0.6	1.3
	2	0.8	1.1
4	1	0.8	1.2
	2	0.7	1.4
5	1	0.6	0.8
	2	0.7	0.6
6	1	1.0	1.9
	2	0.6	0.9
7	1	1.0	1.3
	2	0.8	1.0
8	1	0.8	1.5
	2	0.9	1.0
9	1	0.8	0.7
	2	0.8	0.7
10	1	0.8	1.2
	2	1.4	1.5
11	1	1.6	2.8
	2	1.7	3.0

2.2. Laktatmaximum und Zeitpunkt Laktatmaximum

Das Laktatmaximum ist der höchste Laktatwert, der nach einem WAnT gemessen wird. Da auch in Ruhe eine gewisse Laktatkonzentration im Blut vorliegt, muss zur Ermittlung des maximalen Laktatanstiegs nach einem WAnT, vom Laktatmaximum das Vorbelastungslaktat abgezogen werden. Das Ergebnis ist das so genannte Delta-Laktatmaximum. Die folgende Tabelle 4 zeigt das durchschnittliche Laktatmaximum, das Delta-Laktatmaximum und den Zeitpunkt des Laktatmaximums.

Tab. 4: **Gemessene Mittelwerte der Laktatmaxima, Delta-Laktatmaxima, Zeitpunkte der Laktatmaxima.**

n= Probanden, SD= Standardabweichung, n.s.= nicht signifikant

	n	Test1 mean \pm SD	Test2 mean \pm SD	Mittelwert- Vergleich (p)
Laktatmaximum (mmol/l)	11	13.87 \pm 1.33	14.32 \pm 1.77	n.s.
Delta- Laktatmaximum (mmol/l)	11	12.45 \pm 1.06	13.00 \pm 1.30	n.s.
Zeitpunkt Laktatmaximum (min)	11	6.55 \pm 1.51	6.36 \pm 0.92	n.s.

Die Mittelwerte aller Laktatmaxima und der Zeitpunkte der Laktatmaxima unterscheiden sich nicht signifikant. Es bestehen signifikante Test-Retest-Korrelationen der gemessenen Laktatmaxima ($r= 0.62$, $p< 0.05$) und der Delta-Laktatmaxima ($r= 0.60$, $p= 0.05$). Die Zeitpunkte der Laktatmaxima korrelieren nicht signifikant.

In der folgenden Abbildung 5 sind die Zeitpunkte der gemessenen Laktatmaxima im Test-Retest-Vergleich aller Probanden dargestellt.

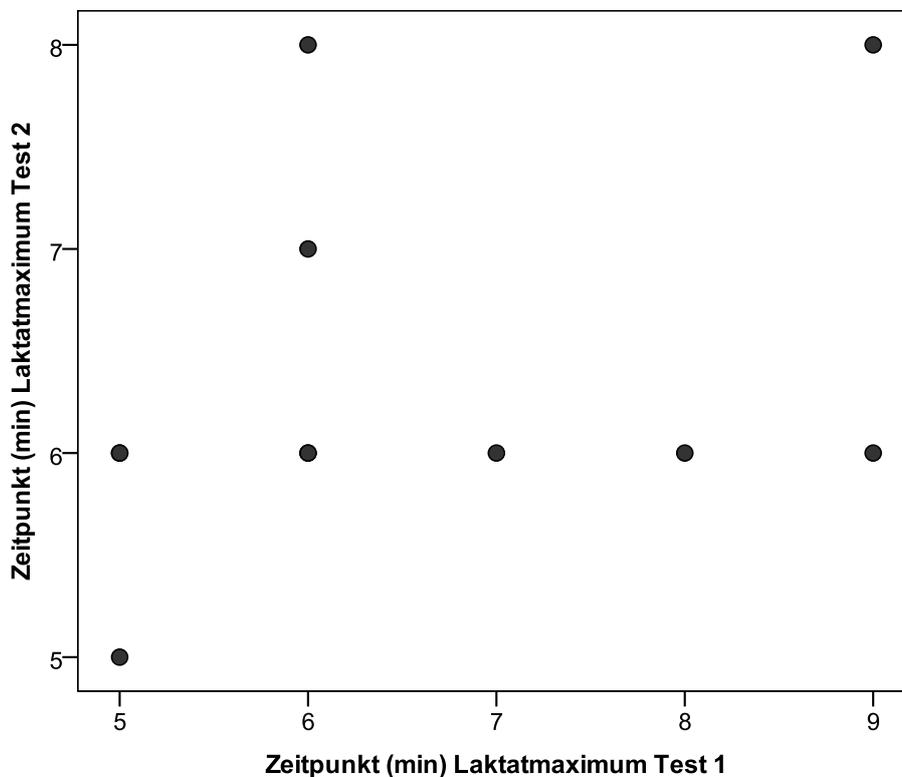


Abb. 5: Zeitpunkt der Laktatmaxima in Test1 und Test2 aller Probanden. Zeit in Minuten.

2.3. Laktatverlauf

Zur Bestimmung der Laktatwerte im Testverlauf wurden den Probanden zu 22 definierten Zeitpunkten Blutproben aus den hyperämisierten Ohrläppchen entnommen. Das Ruhelaktat ($t = -15$) wurde vor der Erwärmungsphase bestimmt. Unmittelbar vor Start des WAnT wurde der Vorbelastungswert ($t = 0$) und sofort nach Beendigung des WAnT der erste Nachbelastungswert ($t = -0.5$) gemessen. Bis zum Abschluss der dreißigsten Minute nach WAnT erfolgten weitere Laktatmessungen.

Ausgehend von niedrigen Ruhelaktat- und Vorbelastungswerten steigt das Laktat nach einem WAnT innerhalb sehr kurzer Zeit deutlich an. In beiden Tests erreichen die Laktatwerte bereits nach 1.5 Minuten zweistellige Werte. Im Zeitraum von Minute 4.5 bis 10.5 (Test1) bzw. 4.5 bis 12.5 (Test2) bleiben die Werte in einem sehr hohen

Bereich und differieren nur gering, ehe die Laktatkurven langsam wieder abfallen. Der Gesamttest endet mit der letzten Blutentnahme 30 Minuten nach WAnT. Zu diesem Zeitpunkt sind die Vorbelastungswerte in beiden Tests noch nicht wieder erreicht.

Tabelle 5 zeigt die durchschnittlichen Laktatwerte der Probanden zu den einzelnen Blutentnahmezeitpunkten von Test1 und Test2 sowie deren Test-Retest Verhalten:

Tab. 5: **Gemittelte Laktatwerte (gemessen) aller Probanden zu den einzelnen Blutentnahmezeitpunkten.**

t= Zeit in Minuten, „Ruhe“= Ruhelaktatwert, „Vorbelastung“= Vorbelastungslaktatwert nach Erwärmung, „nach WAnT“= Blutentnahme unmittelbar nach Ende des WAnT, SD= Standardabweichung, *= signifikant, wenn $p \leq 0.05$

Zeitpunkt der Blutentnahmen	Probanden	Laktat (mmol/l)		Korrelation (r)
		Test1 mean \pm SD (mmol/l)	Test2 mean \pm SD (mmol/l)	
-15 min (Ruhe)	11	1.00 \pm 0.38	1.03 \pm 0.40	0.79*
t= 0 (Vorbelastung)	11	1.42 \pm 0.57	1.32 \pm 0.66	0.78*
t= 0.5 (nach WAnT)	5	6.16 \pm 1.25	7.24 \pm 1.51	0.27
t= 1.5	8	10.18 \pm 0.97	10.52 \pm 1.33	0.06
t= 2.5	11	11.73 \pm 1.30	12.05 \pm 1.42	0.78*
t= 3.5	8	12.83 \pm 1.27	12.70 \pm 1.76	0.81*
t= 4.5	11	13.25 \pm 1.28	13.52 \pm 1.57	0.71*
t= 5.5	10	13.47 \pm 1.41	13.90 \pm 1.74	0.66*
t= 6.5	10	13.69 \pm 1.38	14.17 \pm 1.71	0.66*
t= 7.5	10	13.72 \pm 1.43	14.14 \pm 1.78	0.70*
t= 8.5	11	13.59 \pm 1.39	14.10 \pm 1.77	0.70*
t= 9.5	11	13.55 \pm 1.39	13.87 \pm 1.79	0.63*
t= 10.5	11	13.49 \pm 1.58	13.77 \pm 1.91	0.59
t= 12.5	10	12.84 \pm 1.68	13.03 \pm 1.60	0.37
t= 14.5	11	12.46 \pm 1.56	12.91 \pm 2.13	0.52
t= 16.5	11	11.97 \pm 1.16	12.25 \pm 1.96	0.46
t= 18.5	10	11.08 \pm 2.02	11.07 \pm 2.32	0.75*
t= 20.5	11	10.58 \pm 1.79	10.86 \pm 2.19	0.41
t= 22.5	11	10.03 \pm 1.81	10.30 \pm 2.17	0.47
t= 24.5	11	9.26 \pm 1.18	9.58 \pm 2.20	0.55
t= 26.5	10	8.88 \pm 1.68	8.83 \pm 2.16	0.77*
t= 30.5	9	7.48 \pm 1.18	7.56 \pm 1.94	0.76*

Im Test-Retest Vergleich korrelieren die Ruhelaktatwerte ($r= 0.79$, $p< 0.05$) und die Vorbelastungslaktatwerte ($r= 0.78$, $p< 0.05$) signifikant.

Die Laktatwerte der ersten beiden Blutentnahmezeitpunkte nach WAnT ($t= 0.5$, $t= 1.5$) korrelieren nicht signifikant. Im weiteren Ablauf bestehen bis einschließlich Minute 9.5 zu den weiteren Entnahmezeitpunkten signifikante Korrelationen der Laktatwerte mit r -Werten im Bereich 0.63 bis 0.81 (alle $p< 0.05$). Die Blutentnahmen von Minute 10.5 bis 24.5 korrelieren nicht signifikant. Eine Ausnahme in diesem Verlauf stellen die Laktatwerte bei Minute 18.5 dar. Diese Werte korrelieren signifikant im Test-Retest Vergleich ($r= 0.75$, $p< 0.05$). Bei den beiden letzten Blutentnahmezeitpunkten bestehen wieder signifikante Korrelationen ($t= 26.5$ mit $r= 0.77$, $p< 0.05$ und $t= 30.5$ mit $r= 0.76$, $p< 0.05$). Die Mittelwertvergleiche aller Blutentnahmezeitpunkte zeigen im Test-Retest Verhalten keinen signifikanten Unterschied.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die Laktatwerte vor Beginn des WAnT (Ruhewerte, Vorbelastungswerte), dann von Minute 2.5 bis 9.5 nach WAnT, der Bereich in dem auch sich das Laktatmaximum befindet, und zu den letzten beiden Entnahmezeitpunkten ($t= 26.5$, $t= 30.5$) nicht signifikant voneinander unterscheiden.

3. Anwendung der „alten“ und „neuen“ Berechnungsformeln

Die Anwendung der „alten“ und „neuen“ Berechnungsformel zeigt als Ergebnis, dass die Anpassungsgüten der Fits (r^2) sehr hoch sind. Die „alte“ Formel hat in Test1 eine Anpassungsgüte von 96.2 % und in Test2 von 96.0 %. Das r^2 der „neuen“ Formel beträgt in Test1: 96.7 % und in Test2: 96.2 %. Obwohl beide Anpassungsgüten sehr hoch sind, prognostiziert die „neue“ Formel den Kurvenverlauf noch etwas besser.

3.1. Berechnete Laktatmaxima, Delta-Laktatmaxima, Zeitpunkte der Laktatmaxima

Tabelle 6 zeigt die gemittelten Werte der mit der „alten“ und „neuen“ Formel berechneten Laktatmaxima, der Delta-Laktatmaxima (nach Abzug der Vorbelastungswerte) und der Zeitpunkte der Laktatmaxima sowie deren Test-Retest Verhalten:

Tab. 6: **Berechnete durchschnittliche Laktatmaxima, Delta-Laktatmaxima und Zeitpunkte der Laktatmaxima aller Probanden.**

„alt“= alte Berechnungsformel, „neu“= neue Berechnungsformel, Laktat in mmol/l, Zeitpunkt Laktatmaximum in min, n= Probandenanzahl, SD= Standardabweichung, *= signifikant, wenn $p \leq 0.05$

	n	Test1 mean \pm SD (mmol/l)	Test2 mean \pm SD (mmol/l)	Korrelation (r)
Laktatmaximum „alt“	11	14.06 \pm 1.36	14.43 \pm 1.67	0.68*
Laktatmaximum „neu“	11	14.07 \pm 1.36	14.43 \pm 1.67	0.68*
Delta- Laktatmaximum „alt“	11	12.67 \pm 1.11	13.11 \pm 1.22	0.68*
Delta- Laktatmaximum „neu“	11	12.65 \pm 1.10	13.11 \pm 1.23	0.69*
Zeitpunkt Laktatmaximum „alt“	11	5.31 \pm 0.74	5.32 \pm 1.06	0.49
Zeitpunkt Laktatmaximum „neu“	11	5.47 \pm 0.82	5.40 \pm 1.12	0.27

Die Laktatmaxima, die mit der „alten“ Formel berechnet wurden, korrelieren im Test-Retest Vergleich signifikant ($r = 0.68$, $p < 0.05$). Auch die Laktatmaxima, die mit der „neuen“ Formel berechnet wurden, korrelieren signifikant ($r = 0.68$, $p < 0.05$). Da die Delta-Laktatmaxima die Laktatmaxima abzüglich der Vorbelastungslaktatwerte sind, müssen auch diese Werte signifikant korrelieren (Delta-Laktatmaximum „alt“: $r = 0.68$, $p < 0.05$; Delta-Laktatmaximum „neu“: $r = 0.69$, $p < 0.05$). Die mit der „alten“ und „neuen“ Formel berechneten Zeitpunkte der Laktatmaxima korrelieren nicht signifikant im Test-Retest Vergleich. Alle aufgeführten Werte unterscheiden sich im Mittelwertvergleich nicht signifikant.

3.2. Invasion- und Eliminationskonstanten, approximiertes Laktat A des Extravasalraums

Mit den Berechnungsformeln wurde das Laktat A des Extravasalraums approximiert, sowie die Konstanten k_1 und k_2 , die die Laktatinvasion bzw. -elimination beschreiben, ermittelt. Die Tabellen 7 sowie die Abbildung 6 zeigen die Ergebnisse sowie deren Verhalten im Test-Retest Vergleich.

Tab. 7: **Approximiertes Laktat A des Extravasalraums aller Probanden (gemittelt).**

alt“= alte Berechnungsformel, „neu“= neue Berechnungsformel, Laktat A in mmol/l, n= Probandenanzahl, SD= Standardabweichung, n.s.= nicht signifikant

	n	Test1 mean \pm SD	Test2 mean \pm SD	Mittelwert- Vergleich (p)
A – „alt“ (mmol/l)	11	15.21 \pm 1.48	15.72 \pm 1.44	n.s.
A – „neu“ (mmol/l)	11	14.89 \pm 1.47	15.50 \pm 1.28	n.s.

Die mit der „alten“ Formel berechneten Laktate A des Extravasalraums korrelieren im Test-Retest Vergleich signifikant ($r= 0.68$, $p< 0.05$). Auch die mit der „neuen“ Formel berechneten Laktate A des Extravasalraums korrelieren im Test-Retest Vergleich signifikant ($r= 0.68$, $p< 0.05$). Im Mittelwertvergleich bestehen bei allen Werten keine signifikanten Unterschiede.

Die folgende Abbildung 6 zeigt den Test-Retest Vergleich der mit der „alten“ und der „neuen“ Formel approximierten Laktate A des Extravasalraums.

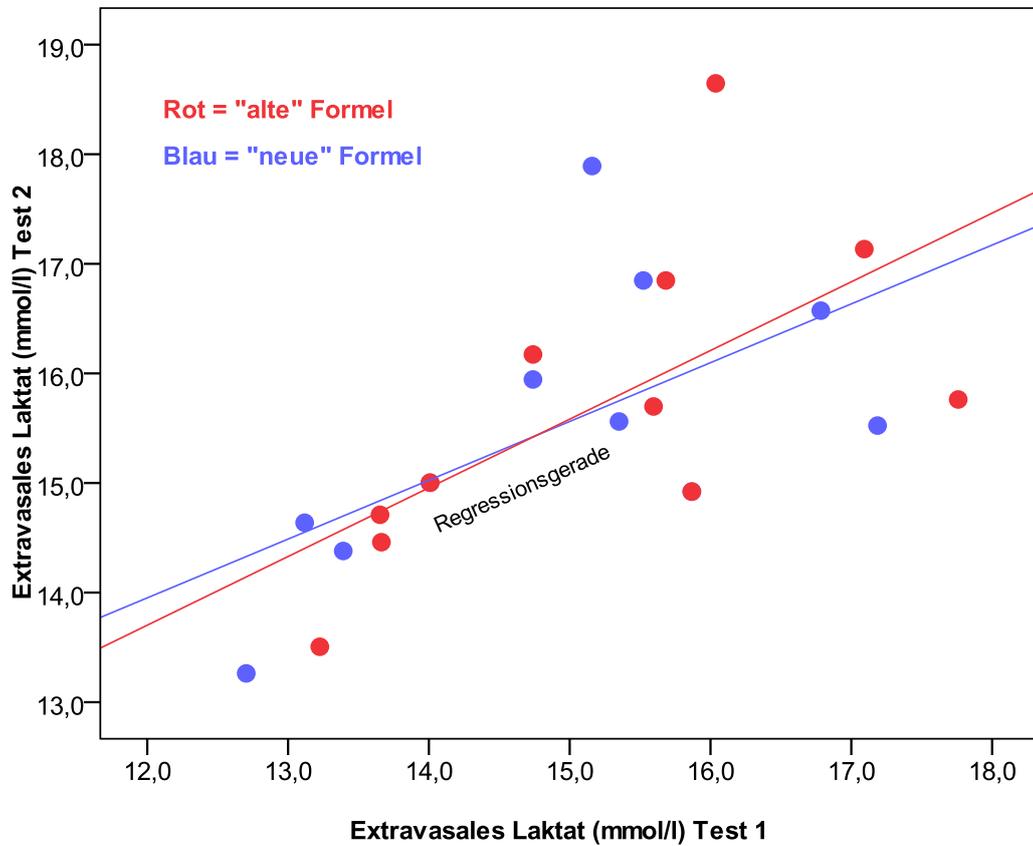


Abb. 6: Approximiertes Laktat A des Extravasalraums im Test-Retest Vergleich. rot= „alte“ Formel, blau= „neue“ Formel, mmol/l= Millimol pro Liter.

Die folgende Tabelle 8 zeigt die mit der „alten“ und „neuen“ Formel berechneten Invasionskonstanten und Eliminationskonstanten aller Probanden im Durchschnitt, sowie deren Test-Retest Vergleich.

Tab. 8: **Invasionskonstanten und Eliminationskonstanten aller Probanden (gemittelt).**

k_1 = Invasionskonstante, k_2 = Eliminationskonstante, „alt“= alte Berechnungsformel, „neu“= neue Berechnungsformel, n= Probandenanzahl, SD= Standardabweichung, n.s.= nicht signifikant; k_1 und k_2 in 1/min

		Test1 Mean \pm SD	Test2 mean \pm SD	Mittelwert- Vergleich (p)
k_1 – „alt“	11	0.56 \pm 0.08	0.58 \pm 0.18	n.s.
k_1 – „neu“	11	0.54 \pm 0.08	0.56 \pm 0.17	n.s.
k_2 – „alt“	11	0.0266 \pm 0.008	0.0276 \pm 0.008	n.s.
k_2 – „neu“	11	0.0271 \pm 0.008	0.0279 \pm 0.008	n.s.

Die Invasionskonstanten und Eliminationskonstanten der „alten“ und auch der „neuen“ Formel korrelieren im Test-Retest Vergleich nicht signifikant. Im Mittelwertvergleich zeigen sich bei allen aufgeführten Werten keine signifikanten Unterschiede im Test-Retest Vergleich.

Mit dem Bland-Altman-Plot werden zwei Methoden verglichen, die das gleiche messen. Üblicherweise wird die Goldstandardmethode mit einer neuen Methode verglichen. Es werden die Mittelwertdifferenzen gegen die Standardabweichung aufgetragen.

In den folgenden Abbildungen 7 – 9 werden die Bland-Altman-Plots für das extravasale Laktat A, die Invasionskonstante k_1 und die Eliminationskonstante k_2 bei Test1 dargestellt.

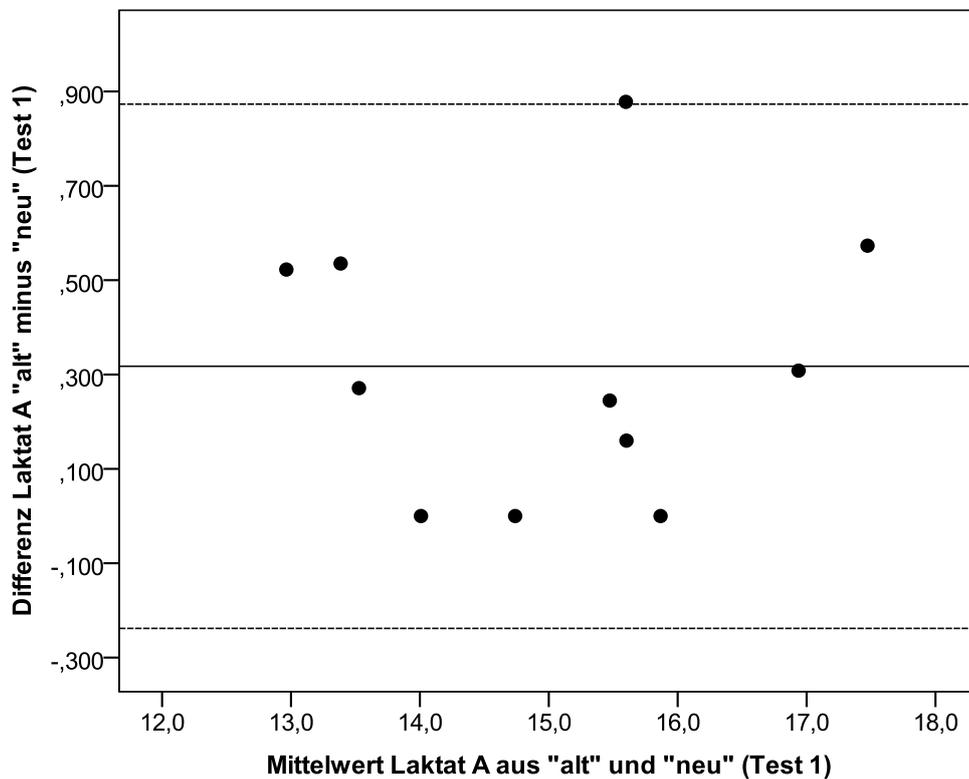


Abb. 7: Bland-Altman-Plot für extravasales Laktat A „alte“ und „neue“ Formel Test1. Mittelwerte und Differenzen in Millimol pro Liter, durchgezogene Linie= Mittelwert aller Probanden, gestrichelte Linie= \pm Standardabweichung \cdot 1.96.

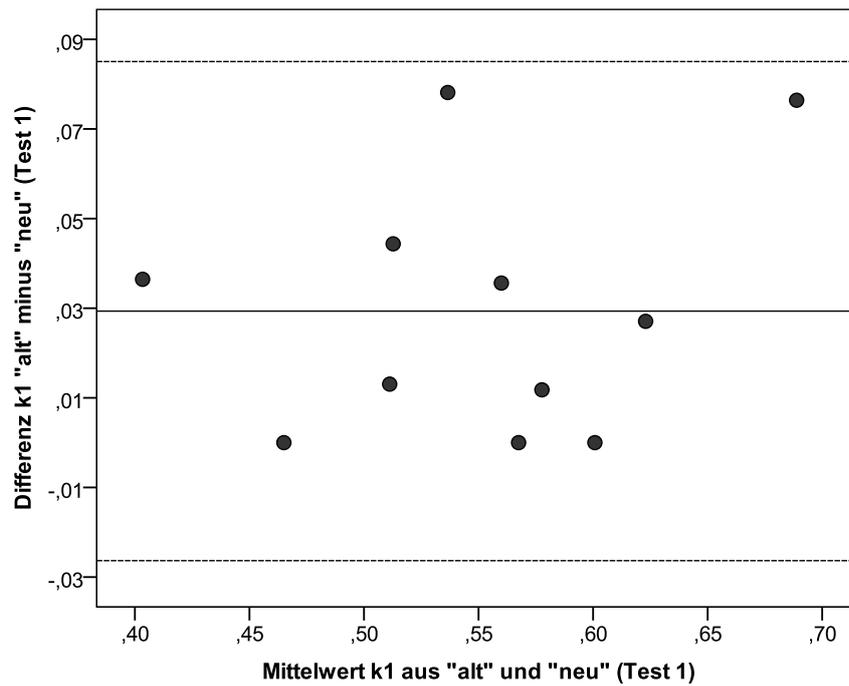


Abb. 8: Bland-Altman-Plot für Invasionskonstante k_1 „alte“ und „neue“ Formel Test1. Mittelwerte und Differenzen in Millimol pro Liter. Durchgezogene Linie= Mittelwert aller Probanden, Gestrichelte Linie= \pm Standardabweichung $\cdot 1.96$.

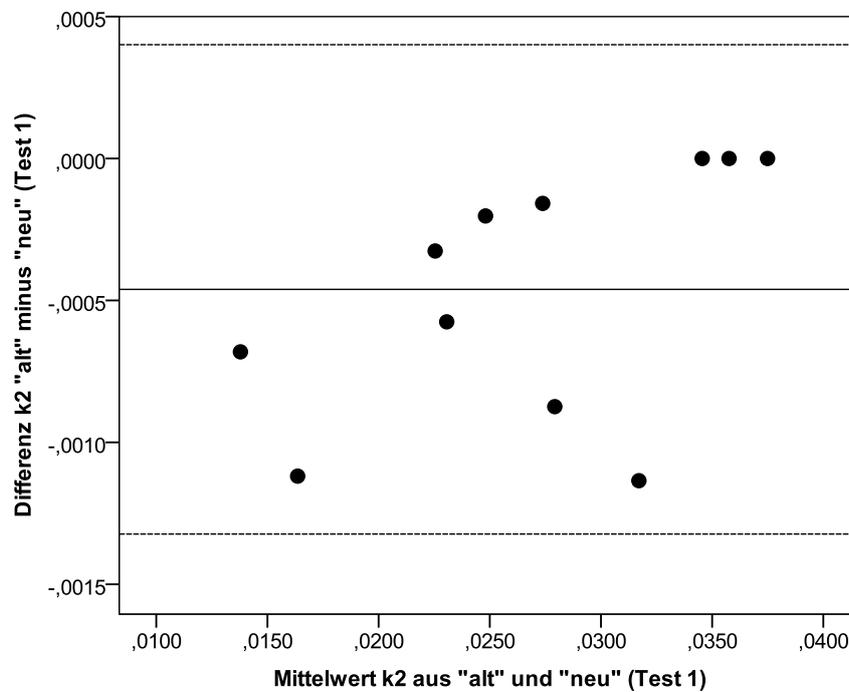


Abb. 9: Bland-Altman-Plot für Eliminationskonstante k_2 „alte“ und „neue“ Formel Test1. Mittelwerte und Differenzen in Millimol pro Liter, durchgezogene Linie= Mittelwert aller Probanden, Gestrichelte Linie= \pm Standardabweichung $\cdot 1.96$.

Die Bland-Altman-Plots zeigen, dass die Differenzen der Mittelwertvergleiche für A, k_1 , k_2 eine gleichmäßige Verteilung im Rahmen der Standardabweichungen haben. A hat einen „Ausreißer“, der knapp außerhalb der Standardabweichungen liegt. Die Differenzen der Mittelwertvergleiche der Invasions- und Eliminationskonstanten (k_1 , k_2) sind gleichmäßig verteilt. Die Differenzen der Mittelwertvergleiche des extravasalen Laktatbolus A werden tendenziell eher größer, je höher die A-Werte sind. Da die Ergebnisse in Test2 ähnlich wie in Test1 sind (extravasales Laktat A und k_1 sind bei der „neuen“ Formel etwas kleiner und k_2 ist etwas größer als bei der „alten“ Formel), wurden hier exemplarisch die Plots für Test1 gezeigt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Güten der Fits (r^2) beider Formeln sehr hoch sind. Der Laktatverlauf wird mit beiden Formeln gut beschrieben, allerdings beschreibt ihn die „neue“ Formel etwas besser. Eine nicht korrekte Anwendung der „alten“ Formel bei Probanden, die bereits vor Start des WAnT ein erhöhtes Anfangslaktat nach der Erwärmung haben, zeigt Auswirkungen auf das approximierte Laktat A des Extravasalraums sowie die Invasionskonstanten k_1 und die Eliminationskonstanten k_2 .

4. Überprüfung von systematischen Anwendungseffekten der „alten“ und „neuen“ Formel

Beide Berechnungsformeln haben eine hohe Anpassungsgüte, wobei die „neue“ Formel die Prognose des Kurvenverlaufs noch etwas besser beschreibt. Um die durchschnittliche Anpassungsgenauigkeit an den prognostizierten Kurvenverlauf weiter zu untersuchen, wurden die mittleren Summen der Abweichungsquadrate (mean Sum of Squares) bestimmt. In der weiteren Untersuchung haben wir die beiden Formeln auf systematische Anwendungseffekte überprüft. Dafür kam mit der „Verallgemeinerten Schätzungsgleichung“ (Generalized Linear Model) ein Modell der Varianzanalyse mit Messwiederholungen zur Anwendung. Damit ist die gleichzeitige Analyse aller Variablen – hier: Güte des Fits, Laktat A des Extravasalraums, Invasionskonstante k_1 , Eliminationskonstante k_2 – möglich. Zunächst wurde untersucht, ob die Anwendung von Test bzw. Re-Test oder die „alte“ bzw. „neue“ Formel einen Effekt haben.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 aufgeführt:

Tab. 9: **Varianzanalyse mittels "Verallgemeinerter Schätzungsgleichung": Überprüfung der abhängigen Variablen: Güte des Fits, Laktat A des Extravasalraums, Invasionskonstante k_1 , Eliminationskonstante k_2 , mittlere Summe der Abweichungsquadrate auf systematische Anwendungseffekte bezüglich Formel und Test.**

df= Freiheitsgrad (df= 1 bei Test bedeutet: Test und Wiederholungstest, df=1 bei Formel bedeutet: "alte" und "neue" Formel; SS mean= Mean Sum of Squares (mittlere Summe der Abweichungsquadrate);
signifikant*, wenn $p \leq 0.05^*$

abhängige Variable	Anwendungs-Quelle	df	Signifikanz
Güte des Fits (r^2)	Test	1	0.354
	Formel	1	0.002*
Laktat A des Extravasalraums	Test	1	0.303
	Formel	1	0.000*
Invasionskonstante k_1	Test	1	0.702
	Formel	1	0.001*
Eliminationskonstante k_2	Test	1	0.702
	Formel	1	0.001*
SS mean	Test	1	0.414
	Formel	1	0.033*

Das Ergebnis zeigt, dass signifikante Effekte bei der systematischen Anwendung der Formeln sowohl auf die Güte der Fits, das Laktat A des Extravasalraums, die Invasionskonstanten k_1 , die Eliminationskonstanten k_2 und die mittleren Summen der Abweichungsquadrate (SS mean) bestehen. Es bestehen keine signifikanten Effekte bei der systematischen Anwendung von Test und Wiederholungstest.

Da die systematische Anwendung der Formeln signifikante Effekte zeigt, wurde nun untersucht, welche der beiden Formeln ("alt" oder "neu") eine geringere Abweichung vom prognostizierten Kurvenverlauf und damit einen geringeren systematischen

Anwendungseffekt hat und somit den Kurvenverlauf genauer prognostiziert. Dafür wurden die Summen der mittleren Abweichungsquadrate (mean Sum of Squares) für die „alte“ und „neue“ Formel gebildet. Anschließend wurden die mean Sum of Squares der „alten“ und „neuen“ Formel zunächst für Test1 und dann auch für Test2 mittels t-Test („alt“ gegen „neu“) einem statistischen Vergleich unterzogen.

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse aufgeführt.

Tab. 10: **Mittlere Summen der Abweichungsquadrate (mean Sum of Squares) der „alten“ und „neuen“ Formel im statistischen Vergleich mittels t-Test für Test1 und Test2.**

mean SS= mittlere Summe der Abweichungsquadrate, SD= Standardabweichung, sig.= signifikant, n.s.= nicht signifikant

	Probanden	„alte“ Formel mean SS \pm SD	„neue“ Formel mean SS \pm SD	Mittelwert- Vergleich (p)
Test1	11	0.34 \pm 0.17	0.30 \pm 0.17	sig.
Test2	11	0.41 \pm 0.27	0.38 \pm 0.27	n.s.

Die mean Sum of Squares der „neuen“ Formel sind in Test1 und in Test2 kleiner, als die mean Sum of Squares der „alten“ Formel. Das bedeutet, dass die „neue“ Formel geringere Abweichungen von der Prognose hat und die zu ermittelnden Werte genauer vorhersagt. Im Test-Retest Vergleich der mean Sum of Squares der „alten“ und „neuen“ Formel für Test1 besteht eine signifikante Korrelation ($r= 0.96$, $p< 0.05$). Dies gilt auch für die mean Sum of Squares der „alten“ und „neuen“ Formel für Test2 ($r= 0.99$, $p< 0.05$). Die Mittelwerte der mean Sum of Squares der „alten“ und „neuen“ Formel für Test1 unterscheiden sich signifikant. Wohingegen sich die Mittelwerte der mean Sum of Squares der „alten“ und „neuen“ Formel für Test2 nicht signifikant unterscheiden.

Zusammenfassend gilt es festzustellen, dass beide Berechnungsformeln eine sehr hohe Anpassungsgüte (r^2) haben, bei der die „neue“ Formel etwas besser ist. Beide Formeln zeigen signifikante Anwendungseffekte. Es bestehen unterschiedliche

Schätzwerte. Die „neue“ Formel prognostiziert den Laktatverlauf genauer als die „alte“ Formel. Mit beiden Formeln können die Laktatmaxima reliabel berechnet werden. Dies zeigt sich im Vergleich mit den Echtwerten. Mit beiden Formeln können auch das Delta-Laktatmaximum und dass etwa 2 mmol/l höhere Laktat (A) des Extravasalraums, sowie die Invasions- und Eliminationskonstanten k_1 und k_2 bestimmt werden. Wenn allerdings die „alte“ Formel bei erhöhten Vorbelastungslaktatwerten angewandt wird, dann führt dies zu systematischen Fehleinschätzungen der untersuchten Parameter. In unserer Untersuchung lagen in 16 von 22 Fällen erhöhte Vorbelastungslaktatwerte vor.

5. Sauerstoffaufnahme

5.1. Sauerstoffaufnahme während des WAnT

Nachdem wir die Laktatwerte gemessen und gefittet haben, ist für die energetische Betrachtung eines WAnT die Ermittlung der Sauerstoffaufnahme während und nach einem WAnT von Bedeutung. Um später den aeroben Energieanteil bestimmen zu können, wird in Tabelle 11 zunächst die mittlere Sauerstoffaufnahme während eines WAnT, sowie deren Test-Retest Verhalten aufgezeigt.

Tab. 11: **Mittlere Sauerstoffaufnahme aller Probanden während eines WAnT.**

SD= Standardabweichung, MW= Mittelwertvergleich, ml= Milliliter, n.s.= nicht signifikant

	Probanden	Test1 mean \pm SD	Test2 mean \pm SD	MW (p)
mittlere Sauerstoffaufnahme (ml)	11	1140 \pm 188	1127 \pm 177	n.s.

Im Test-Retest Vergleich korrelieren die mittleren Sauerstoffaufnahmen während des WAnT nicht signifikant. Die Mittelwerte der mittleren Sauerstoffaufnahmen aller Probanden unterscheiden sich nicht signifikant. In der folgenden Abbildung 10 sind ist die mittlere Sauerstoffaufnahme aller Probanden während des WAnT im Test-Retest Vergleich dargestellt.

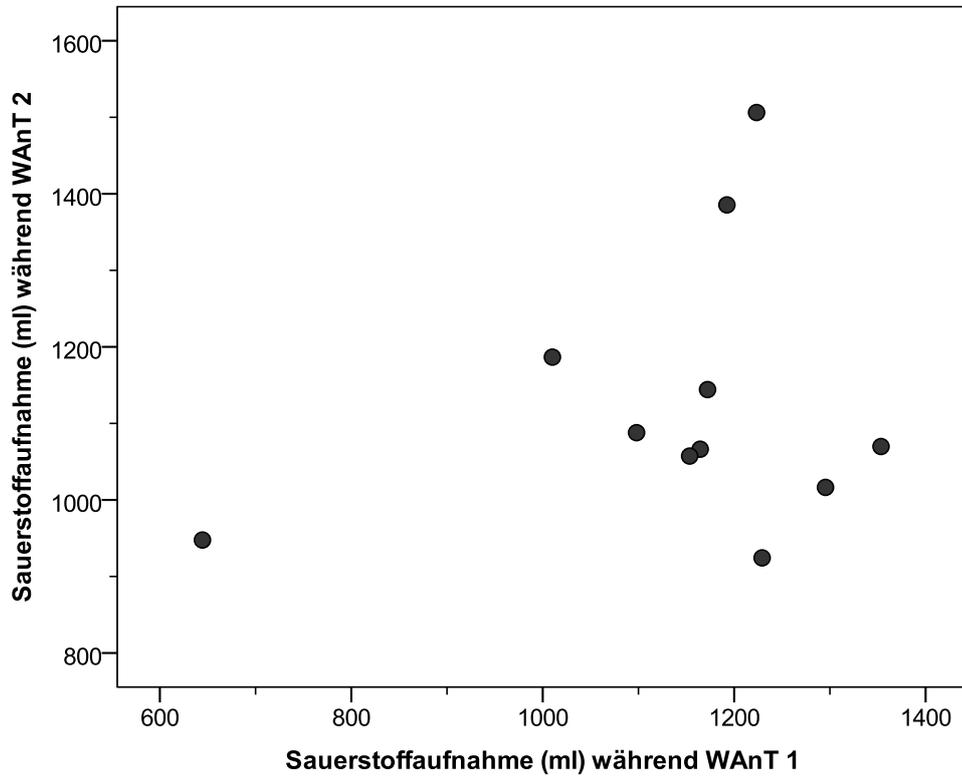


Abb. 10: Sauerstoffaufnahme während des WAnT aller Probanden im Test-Retest Vergleich, ml= Milliliter.

Die folgende Tabelle 12 zeigt die Anzahl der Atemzüge und die Sauerstoffdifferenz pro WAnT, sowie die gemittelten Werte aller Probanden.

Tab.12: Anzahl der Atemzüge pro WAnT, Sauerstoffdifferenz pro Atemzug der einzelnen Probanden während eines WAnT.

O₂= Sauerstoff, ml= Milliliter, SD= Standardabweichung

Proband	Atemzüge pro WanT		O ₂ - Differenz pro Atemzug (ml)	
	Test1	Test2	Test1	Test2
1	30	33	5.6	5.0
2	24	27	6.2	5.5
3	31	38	4.5	3.7
4	26	3	5.8	48.0
5	28	40	5.7	4.0
6	21	24	8.2	7.2
7	34	29	4.7	5.5
8	6	40	31.3	4.7
9	27	25	6.4	7.0
10	13	20	13.4	8.8
11	27	25	6.1	6.6
mean ±SD	24.3 ±8.2	27.6 ±10.7	8.9 ±7.8	9.6 ±12.8

5.2. Sauerstoffaufnahme nach WAnT

Die Energie, die für einen WAnT aufgebracht werden muss, ist zum Teil anaerob alaktazid. Sie wird über die aufgenommene Sauerstoffmenge nach einem WAnT bestimmt, die sich aus der mittleren Sauerstoffaufnahme und der schnellen Komponente der Sauerstoffaufnahme nach einem WAnT errechnen lässt.

In der folgenden Tabelle 13 sind zunächst die Einzelwerte der Probanden aufgelistet:

Tab. 13: **Sauerstoffaufnahme der einzelnen Probanden nach einem WAnT, sowie Zeit der schnellen Komponente der O₂-Aufnahme nach einem WAnT und aufgenommene O₂-Menge nach einem WAnT.**

ml= Milliliter, min= Minute

Proband	Test	Mittlere Sauerstoffaufnahme Nach WAnT (ml/min)	Zeit der schnellen Komponente der O ₂ -Aufnahme nach WAnT (min)	aufgenommene O ₂ -Menge nach WAnT (ml)
1	1	505	2.9	1457
	2	373	3.7	1361
2	1	705	2.7	1880
	2	689	2.6	1803
3	1	793	2.8	2246
	2	911	2.9	2642
4	1	636	2.9	1843
	2	435	4.4	1920
5	1	632	2.4	1486
	2	664	2.9	1938
6	1	691	2.2	1532
	2	655	2.6	1714
7	1	696	1.9	1288
	2	593	1.9	1118
8	1	600	5.0	3001
	2	672	3.6	2441
9	1	467	2.7	1245
	2	450	3.6	1614
10	1	579	2.6	1495
	2	615	2.5	1518
11	1	802	2.3	1870
	2	717	2.4	1709

Tabelle 14 zeigt die aufgenommene Sauerstoffmenge nach einem WAnT aller Probanden im Mittel:

Tab. 14: **Mittlere aufgenommene Sauerstoffmenge (in ml) nach einem WAnT aller Probanden.**

SD= Standardabweichung, MW= Mittelwertvergleich, n.s.= nicht signifikant

	Probanden	Test1 mean \pm SD	Test2 mean \pm SD	Mittelwert- Vergleich (p)
aufgenommene O ₂ -Menge nach WAnT (in ml)	11	1786 \pm 527	1798 \pm 441	n.s.

Es bestehen signifikante Test-Retest Korrelationen der mittleren aufgenommenen Sauerstoffmenge nach einem WAnT ($r= 0.82$, $p < 0.05$). Die Mittelwerte unterscheiden sich nicht signifikant.

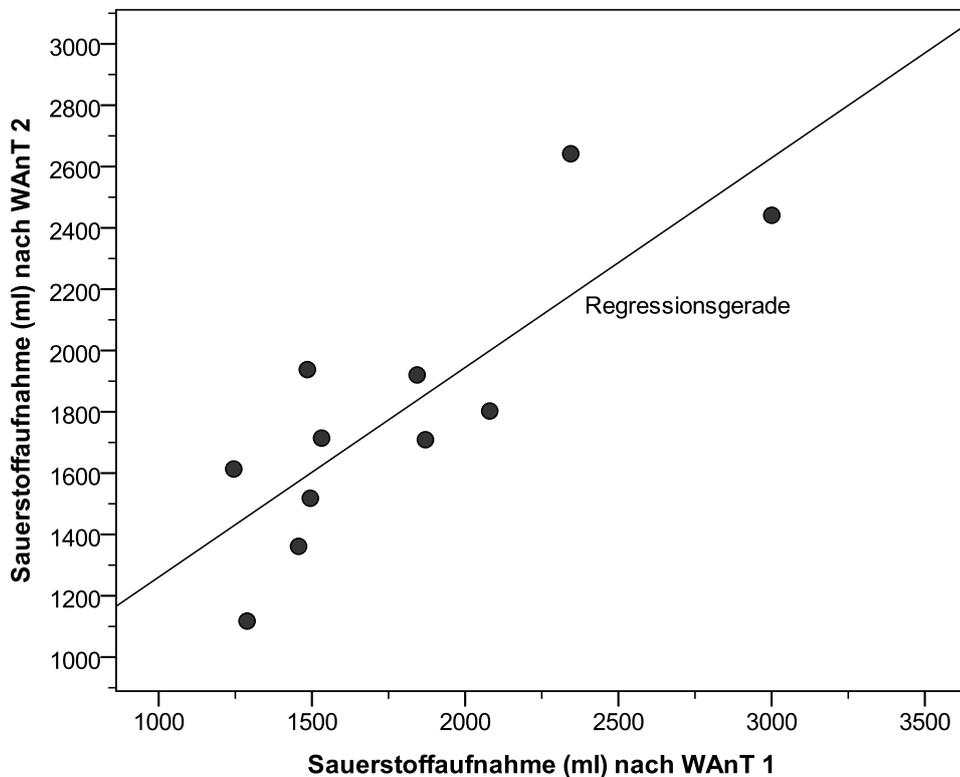


Abb. 11: Sauerstoffaufnahme nach WAnT der einzelnen Probanden im Test-Retest Vergleich. ml= Milliliter.

6. Energetisches Profil des WAnT

6.1. Anaerobe Energie

6.1.1. Anaerob-laktazide Energie

Die Untersuchung der „neuen“ und „alten“ Berechnungsformel hat gezeigt, dass die „neue“ Berechnungsformel für alle Probanden eine gültige Anwendung hat. Auch für die Probanden mit erhöhten Vorbelastungslaktatwerten. Die Bestimmung der entsprechenden Parameter ist mit der „neuen“ Formel genauer und zeigt, entgegen der unkorrekten Anwendung der „alten“ Formel mit erhöhten Vorbelastungslaktatwerten, keine systematischen Fehleinschätzungen. Aus diesem Grund wird in der folgenden energetischen Auswertung des WAnT die laktazide Energie über die gemessenen Werte sowie die mit der „neuen“ Formel berechneten Werte bestimmt.

Die laktazide Energie wurde, aus der gemessenen und berechneten Netto-Laktatproduktion (Delta-Laktat) unter Berücksichtigung des Körpergewichtes und des O₂-Laktatäquivalents ermittelt. Außerdem wurde die laktazide Energie mittels der Konstanten A berechnet, die dem approximierten Laktat des Extravasalraums entspricht.

Die folgende Tabelle 15 zeigt die laktazide Energie, die für einen WAnT aufgebracht wurde. Sie wurde aus dem gemessenen und berechneten Delta-Laktatmaximum sowie dem approximierten Laktat A des Extravasalraums bestimmt.

Tab. 15: Anaerob-laktazide Energie für einen WAnT aller Probanden (gemittelt). Bestimmung über das gemessene Delta-Laktatmaximum, das mit der „neuen“ Formel berechnete Delta-Laktatmaximum und das approximierte Laktat A des Extravasalraums.

d-Laktatmaximum= Delta-Laktatmaximum, n= Probanden, SD= Standardabweichung, MW= Mittelwertvergleich, n.s.= nicht signifikant

Laktat (mmol/l)	n	Energie Test1 mean \pm SD (Joule)	Energie Test2 mean \pm SD (Joule)	MW (p)
gemessen d-Laktat-Maximum	11	58062 \pm 633	60320 \pm 706	n.s.
berechnetes d-Laktat-Maximum	11	58449 \pm 560	60550 \pm 668	n.s.
approximiertes Laktat A	11	69417 \pm 830	72012 \pm 819	n.s.

Es bestehen signifikante Test-Retest Korrelationen aller aufgeführten anaerob-laktaziden Energiebeträge. Der Korrelationskoeffizient, der über die gemessenen Laktatwerte ermittelt wurde, hat ein $r = 0.73$ ($p < 0.05$). Der Korrelationskoeffizient, der über das approximierte Laktat A ermittelt wurde, hat ein $r = 0.75$ ($p < 0.05$). Die laktazide Energie, die über die mit der „neuen“ Formel berechneten Laktatwerte bestimmt wurde, hat ein $r = 0.79$ ($p < 0.05$). Bei allen drei Herleitungen der laktaziden Energiebeträge zeigen sich im Mittelwertvergleich keine signifikanten Unterschiede.

6.1.2. Anaerob-alktazide Energie

Die anaerob-alktazide Energie wurde über die schnelle Komponente der Sauerstoffaufnahme nach WAnT unter Berücksichtigung des O₂-Energieäquivalentes berechnet und beträgt in beiden Tests etwa 34 KJ.

Tab. 16: **Anaerob-alktazide Energie für einen WAnT aller Probanden (gemittelt).**

SD= Standardabweichung, MW= Mittelwertvergleich, n.s.= nicht signifikant

	Probanden	Energie Test1 mean ±SD	Energie Test2 mean ±SD	MW (p)
Alaktazide Energie (Joule)	11	34043 ± 9894	34603 ± 6826	n.s.

Es bestehen signifikante Test-Retest-Korrelationen der alaktaziden Energiebeträge für eine WAnT ($r = 0.77$, $p < 0.05$). Die Mittelwerte zeigen keinen signifikanten Unterschied.

6.2. Aerobe Energie

Die aerobe Energie wurde über die Sauerstoffmenge bestimmt, die während eines Wingate Tests aufgenommen wurde (Tab. 17). In der folgenden Tabelle ist die mittlere anaerobe Energie aller Probanden, die für einen WAnT aufgebracht wurde, dargestellt.

Tab. 17: **Aerobe Energie für einen WAnT aller Probanden (gemittelt).**

ml= Milliliter, SD= Standardabweichung, MW= Mittelwertvergleich, n.s.= nicht signifikant

	Probanden	Test1 mean ±SD	Test2 mean ±SD	MW (p)
Sauerstoffmenge pro WAnT (ml)	11	1140 ± 188	1127 ± 177	n.s.

Test und Retest korrelieren nicht signifikant. Im Mittelwertvergleich besteht kein signifikanter Unterschied. Unter Berücksichtigung des kalorischen Äquivalents und der mechanischen Leistung ergeben sich folgende aeroben Energiebeträge für die einzelnen Probanden (Tab. 18):

Tab. 18: Sauerstoffmenge pro WAnT, Leistung pro WAnT und aerobe Energie pro WAnT der einzelnen Probanden bei Test1 und Test2.
ml= Milliliter, Joule/s= Joule pro Sekunde

Proband	Test	Sauerstoffmenge pro WAnT (ml)	Leistung In Watt (Joule/s)	Aerobe Energie in Joule pro WAnT
1	1	1172	826	24770
	2	1144	806	24177
2	1	1165	820	24608
	2	1066	751	22532
3	1	1295	912	27372
	2	1016	716	21476
4	1	1229	866	25975
	2	924	651	19532
5	1	1353	953	28598
	2	1070	754	22605
6	1	1223	862	25852
	2	1506	1061	31828
7	1	1192	840	25197
	2	1386	976	29276
8	1	645	454	13619
	2	948	668	20025
9	1	1098	773	23201
	2	1088	766	22988
10	1	1010	712	21345
	2	1187	836	25073
11	1	1154	813	24376
	2	1057	745	22343

Das bedeutet eine durchschnittliche aerobe Energie in Test1 von 24083 Joule (SD ± 3972) und in Test2: 23805 Joule (SD ± 3740).

Im Test-Retest Vergleich korrelieren die aeroben Energiebeträge nicht signifikant ($r=0.24$, $p > 0.05$). Der Mittelwertvergleich zeigt keinen signifikanten Unterschied.

6.3. Gesamtenergie und Wirkungsgrad

Im folgenden Abschnitt wird der Gesamtenergiebetrag aufgezeigt, der zur Durchführung eines Wingate Tests aufgebracht werden musste. Die Bestimmung der laktaziden Energie erfolgte auf Grundlage der gemessenen und berechneten, sowie des approximierten Laktats A des Extravasalraums. Die aufgebrachte Energie hat anaerob-laktazide, anaerob-alktazide und aerobe Anteile, die im Verhältnis zum Gesamtbetrag aufgezeigt werden.

6.3.1. Energieprofil aus gemessenen Werten

Die mittlere Gesamtenergie aller Probanden, deren laktazider Energieanteil aus den gemessenen Laktatwerten hergeleitet wurde, sowie die relativen Anteile der aeroben, anaerob-alktaziden und anaerob-laktaziden Energie sind in der folgenden Tabelle 19 dargestellt:

Tab. 19: **Durchschnittliches Gesamtenergieprofil aller Probanden für einen WANt, laktazide Energie ermittelt aus den gemessenen Laktatwerten. Die relativen Energieanteile sind in Prozent dargestellt.**
SD= Standardabweichung, MW= Mittelwertvergleich, n.s.= nicht signifikant, %= Prozent

	Probanden	Test1 mean \pm SD	Test2 mean \pm SD	MW (p)
Gesamtenergie (Joule)	11	116188 \pm 771	118728 \pm 721	n.s.
Relative Energieanteile				
anaerob alaktazid (%)	11	29.1 \pm 6.8	29.1 \pm 5.7	n.s.
anaerob laktazid (%)	11	50.0 \pm 5.2	50.8 \pm 4.6	n.s.
aerob (%)	11	20.9 \pm 3.9	20.1 \pm 3.3	n.s.

Es bestehen signifikante Test-Retest-Korrelationen des durchschnittlichen Gesamtenergieprofils für einen WANt, die aus den gemessenen Laktatwerten ermittelt

wurden ($r= 0.73$, $p< 0.05$). Auch die relativen anaeroben Anteile der alaktaziden ($r= 0.69$, $p< 0.05$) und der laktaziden Energie ($r= 0.69$, $p< 0.05$) korrelieren signifikant. Die relativen aeroben Energieanteile korrelieren nicht im Test-Retest Vergleich. Die Mittelwertvergleiche aller aufgeführten Werte unterscheiden sich nicht signifikant. Der mechanische Wirkungsgrad ist in Test1= 16.56 % und in Test2= 17.16 %.

6.3.2. Energieprofil aus berechneten Laktatwerten

Die Gesamtenergie, die aus den mit der neuen Formeln berechneten Laktatwerten bestimmt wurde sowie deren relativ laktaziden, alaktaziden und aeroben Anteile, sind in der folgenden Tabelle 20 als durchschnittliche Werte aller Probanden aufgeführt.

Tab. 20: **Durchschnittliches Gesamtenergieprofil aller Probanden für einen WAnT, laktazide Energie ermittelt aus den berechneten Laktatwerten. Die relativen Energieanteile sind in Prozent dargestellt.**
SD= Standardabweichung, MW= Mittelwertvergleich, n.s.= nicht signifikant, %= Prozent

	Probanden	Test1 mean \pm SD	Test2 mean \pm SD	MW (p)
Gesamtenergie (Joule)	11	116575 \pm 729	118958 \pm 703	n.s.
Relative Energieanteile				
anaerob alaktazid (%)	11	29.0 \pm 6.9	29.1 \pm 5.6	n.s.
anaerob laktazid (%)	11	50.2 \pm 5.2	50.9 \pm 4.5	n.s.
aerob (%)	11	20.8 \pm 3.9	20.1 \pm 3.3	n.s.

Die Gesamtenergie korreliert im Test-Retest Vergleich signifikant ($r= 0.69$, $p< 0.05$). Auch die relativen anaeroben Anteile der alaktaziden ($r= 0.70$, $p< 0.05$) und der laktaziden Energie ($r= 0.70$, $p< 0.05$) korrelieren signifikant. Die relativen aeroben Energieanteile korrelieren nicht signifikant. Alle Mittelwertvergleiche unterscheiden sich nicht signifikant.

Der mechanische Wirkungsgrad ist in Test1= 16.61 % und in Test2= 17.19 %.

6.3.3. Energieprofil aus dem approximierten Laktat A des Extravasalraums

Die Gesamtenergie, deren laktazider Energieanteil über das approximierte Laktat A des Extravasalraums bestimmt wurde, sowie deren relative laktazide, alaktazide und aerobe Anteile, sind in der folgenden Tabelle 21 als durchschnittliche Werte aller Probanden aufgeführt.

Tab. 21: **Durchschnittliches Gesamtenergieprofil aller Probanden für einen WAnT, laktazide Energie ermittelt aus dem approximierten Laktat A des Extravasalraums. Die relativen Energieanteile sind in Prozent dargestellt.**

SD= Standardabweichung, MW= Mittelwertvergleich, n.s.= nicht signifikant, %= Prozent

	Probanden	Test1 mean \pm SD	Test2 mean \pm SD	MW (p)
Gesamtenergie (Joule)	11	127543 \pm 775	130420 \pm 876	n.s.
relative Energieanteile				
anaerob alaktazid (%)	11	26.6 \pm 6.8	26.6 \pm 5.3	n.s.
anaerob laktazid (%)	11	54.4 \pm 5.6	55.1 \pm 4.3	n.s.
aerob (%)	11	19.0 \pm 3.5	18.3 \pm 2.9	n.s.

Die Gesamtenergie korreliert im Test-Retest Vergleich signifikant ($r= 0.69$, $p< 0.05$). Ebenso korrelieren die relativen anaeroben Anteile der alaktaziden ($r= 0.77$, $p< 0.05$) und der laktaziden Energie ($r= 0.77$, $p< 0.05$). Die relativen aeroben Energieanteile korrelieren nicht signifikant im Test-Retest Vergleich. Alle Mittelwertvergleiche unterscheiden sich nicht signifikant. Die Gesamtenergie und auch der mechanische Wirkungsgrad sind im Vergleich zu den beiden zuvor aufgeführten Gesamtenergiebeträgen (ermittelt aus den gemessenen bzw. mit der „neuen“ Formel berechneten Laktatwerte) höher. Er beträgt in Test1= 18.17 % und in Test2= 18.84 %.

E DISKUSSION

Der Wingate Anaerobic Test ist ein weltweit verbreiteter Test zur Bestimmung der anaeroben Leistungsfähigkeit. Er wird nach einem standardisierten Testablauf durchgeführt, der eine Erwärmungsphase beinhaltet. Nach einer supramaximalen Leistung wie dem WAnT kommt es zu einem Anstieg der Blutlaktatwerte. Unmittelbar nach dem Test steigt das Laktat rasch und deutlich an, ehe es im weiteren Verlauf wieder langsam absinkt. Das Laktatverhalten kann auch berechnet werden. In der vorgelegten Studie wurde das Laktatverhalten mit einer Formel berechnet, welche auf der Batemanfunktion basiert. Voraussetzung für die Anwendung der Formel ist, dass es nach der Erwärmung und vor dem Start des WAnT noch zu keinem Laktatanstieg gekommen ist. Da es in dieser Studie in 16 von 22 Fällen nach der Erwärmungsphase und vor dem Start des WAnT zu einem Laktatanstieg kam, wurde das Berechnungsmodell erweitert, um auch das Laktatverhalten in der Phase zwischen Erwärmung und vor Start des WAnT zu berücksichtigen und somit gültige Anwendungsvoraussetzungen für alle Probanden zu schaffen. Es wurde die Frage gestellt, ob es einen Unterschied bedeutet, die originale („alte“) oder die „neue“ Formel anzuwenden und ob dieses Auswirkungen auf die Messgrößen und das energetische Profil des WAnT hat.

1. Methodenkritik

1.1. Probanden

Die Probanden dieser Studie befinden sich im Alter ihrer größten Leistungsfähigkeit (Inbar et al. 1986). Nach vergleichenden Tabellen (Inbar et al. 1996) erreichten sie exzellente Leistungswerte. Die Untersuchungen wurden an 11 Probanden durchgeführt, womit sich die Anzahl im Bereich verschiedener anderer Studien zu ähnlichen Fragestellungen bezüglich des WAnT steht. So führten beispielsweise Evans und Quinney (1981) Studien mit 12 Probanden, Kaczowski (et al. 1982) mit 9 Probanden und Soussi et al. (2004) mit 19 Probanden durch. Eine größere Probandenanzahl erscheint wünschenswert, ist aber für Testverfahren mit dieser oder ähnlicher Fragestellung nicht üblich und in der Praxis nicht umsetzbar. Wenn durch einen WAnT alleine die Leistungswerte bestimmt werden sollen, können deutlich größere

Probandenkollektive generiert werden. Die Probanden müssten nach der standardisierten Erwärmungsphase den 30s-Test fahren und können anschließend nach Hause gehen. Die Untersuchung der vorgelegten Fragestellung ist deutlich aufwendiger. Nach dem körperlich sehr anstrengenden WAnT müssen die Probanden eine längere Zeit in sitzender Position verweilen, was unmittelbar nach dem Umsteigen vom Wingate-Ergometer in einen Stuhl bei vielen Probanden mit allgemeinem Unwohlsein und Beschwerden im Sinne von Kreislaufdysregulationen verbunden ist. Die Kapillarblutentnahmen aus den hyperämisierten Ohrläppchen erfolgen in den ersten 10 Minuten nach WAnT in maximal praktikabler Frequenz und sind für die Probanden sehr unangenehm. Die hyperämisierende Salbe erzeugt ein stark brennendes Gefühl und die Ohrläppchen müssen für die 22 Blutentnahmen mindestens 22 Mal angestochen werden. Die Dauer des Gesamttest einschließlich der hier durchgeführten Vor- und 30 minütigen Nachbereitungsphase ist mit einem großen zeitlichen Aufwand verbunden.

1.2. Einflussfaktoren auf die Leistung

→ Testdauer

Der WAnT dauert 30 Sekunden. Es gibt verschiedene Untersuchungen und Überlegungen welche Testlänge optimal ist, um die anaerobe Leistungsfähigkeit zu ermitteln. Die gleiche Testlänge wie beim hier durchgeführten WAnT von 30s wurde in den 1970er Jahren von Cumming (1973) beschrieben. Im Verlauf gab es weitere Untersuchungen von Radtests bezüglich ihrer Testdauer. Bereits in der Phase der Testentwicklung des WAnT wurden Tests mit 30s, 45s und 60s Dauer durchgeführt (Inbar, Bar-Or). Katch et al. (1977) verglichen einen 40s-Test mit einem 120s-Test. Maud und Schultz (1989) beobachteten beim längeren Test signifikant niedrigere Peak-Power und Average-Power Werte. Außerdem schlossen sie, dass die Testdauer von 120s für Kinder, Alte und Behinderte zu lang ist. Bei Tests mit einer Länge von 45s, im Vergleich zu 30s und 15s, neigen die Probanden dazu, sich ihre Kraft unbewusst einzuteilen, was zu verminderter Peak-Power und Average-Power in den ersten 10 Testsekunden führt (Wittekind 2009). Die Testlänge von 30s wird auch international am häufigsten genutzt und hat außerdem den Vorteil, dass die Testergebnisse international vergleichbar sind.

→ Testabstand

Die Datenlage bezüglich des Abstandes zwischen zwei WAnT ist gering. In einer Untersuchung an Kindern und Männern wurde festgestellt, dass es unerheblich sei, ob die Tests am gleichen Tag oder mehrere Wochen später durchgeführt wurden (Hebestreit et al. 1993). Selbst wenn der Folgetest nach nur 20-minütiger Pause erfolgte, bestand eine hohe Reliabilität ($r= 0.93$) der Leistungswerte. In einer anderen Untersuchung wurde nach einer nur 4-minütigen Pause beim Folgetest ein Absinken der Peak-Power um 18 % beobachtet (Bogdanis et al.1996). Allerdings werden keine Aussagen bezüglich des Soffwechsels, insbesondere des Laktatverlaufs, nach solch kurzer Regenerationszeit getroffen. In einer kürzlich veröffentlichten Studie wurde untersucht, wie sich Erwärmungen auf den Laktatstoffwechsel nach einem WAnT auswirken (Wittekind et al. 2012). Die Probanden führten Erwärmungen auf einem Ergometer mit unterschiedlicher Intensität durch (5-min bei 40% $\dot{V}O_2$ und 1-min bei 80 oder 110 % $\dot{V}O_2$, bzw. 6-min konstant bei 40 % $\dot{V}O_2$), ruhten anschließend 10 Minuten und fuhren dann einen WAnT. In der Nachbelastungsphase wurden über 30 Minuten, nach dem gleichen Entnahmeprotokoll wie in der vorgelegten Studie, kapilläre Blutproben aus den Ohrläppchen gewonnen. Das Ergebnis zeigt, dass nach der Erwärmung mit der größten Intensität das maximale Nachbelastungslaktat deutlich niedriger war, als nach der Erwärmung mit geringer Intensität (9.5 ± 1.8 versus 12.4 ± 1.7 mmol/l). Körperliche Leistungen wirken sich auf den Laktatstoffwechsel aus.

Die Laktatwerte der Probanden der vorgelegten Studie waren 30 Minuten nach Testende noch deutlich erhöht und haben die Ruhewerte noch nicht wieder erreicht. Die Probanden absolvierten einen Probetest, um sich an den Testablauf zu gewöhnen und im Abstand von 3 – 7 Tagen Test und Wiederholungstest. Bei dieser Abfolge können Lerneffekte, aber keine Trainingseffekte entstehen, da es zur Muskelhypertrophie und damit zu größeren Leistungswerten erst bei regelmäßigem Training (ca. 3x pro Woche) nach etwa 6 bis 8 Wochen kommt (Weineck 2012).

→ Tret-Widerstand

Das Bremsgewicht des Wingate-Ergometers dieser Studie beträgt bei allen Probanden immer 7.5 % des Körpergewichts und entspricht damit weit verbreiteten Standardisierungen und Empfehlungen. Eine Senkung des Widerstands ist dann sinnvoll, wenn Menschen mit zerebraler Parese, Muskeldystrophie oder ähnlichen

Einschränkungen mit dem standardisierten Widerstand von 7.5 % keine Pedalumdrehung schaffen (Tirosh 1990). Ein größeres Bremsgewicht von 7.5-10 % des Körpergewichts sollte bei Kraftsportlern bzw. gut trainierten Sportlern anaerob dominierter Sportarten eingesetzt werden (Dotan et al. 1983; Inbar et al. 1996). Der Tretwiderstand hat Auswirkungen auf die Leistungswerte. Verschiedene Arbeitsgruppen untersuchten den „optimalen“ Tretwiderstand, also den Widerstand, mit dem die höchste Peak-Power und Average-Power bei einem WAnT zu erzielen ist. Die höchste Average-Power wurde mit einem 20-30% höheren Widerstand erzielt, als es das Originalprotokoll mit 7.5% des Körpergewichts vorgibt. Die höchste Peak-Power wurde mit einem noch höheren Widerstand erreicht (Inbar et al.1996). Alle Untersuchungen zeigen, dass es nicht den einen Widerstand gibt, mit dem sowohl höchste Peak-Power, als auch höchste Average-Power zu erzielen sind. Es wurden unterschiedliche Ergebnisse je nach Trainingszustand, Gesundheitszustand, Alter und Geschlecht herausgefunden (Inbar et al. 1996). Da es nicht den „optimalen“ Widerstand gibt, ist man international überwiegend bei einem Widerstand von 7.5 % des Körpergewichts geblieben. Dies hat den Vorteil, dass die Ergebnisse vergleichbar sind.

→ Tagesrhythmus

Der Einfluss des Tagesrhythmus auf viele physiologische Körperfunktionen ist bekannt. So existieren zyklische Blutdruckschwankungen (Cabri et al. 1988), die mit der Zunahme der Körpertemperatur im Tagesverlauf zusammenhängen (Reilly 1987). Je größer der Anteil eingesetzter Muskelmasse bei hochintensiven Leistungstests ist, desto größer ist die Leistung am Abend. Dies hängt mit der im Tagesverlauf gestiegenen Körpertemperatur zusammen (Baxter, Reilly 1983, 1987). Signifikant höhere Leistungswerte am frühen Abend wurden auch beim Wingate Test gefunden (Soussini et al. 2003, 2004). Da bei der vorgelegten Studie alle Tests am Vormittag durchgeführt wurden, ist ein potentieller Einfluss des Tagesrhythmus standardisiert.

→ Motivation

Die Motivation hat auf alle Leistungstests einen hohen Einfluss. Es werden motivationsabhängige Peak-Power Werte beim WAnT beschrieben, die auf emotionalen Faktoren wie Bestrafung und Belohnung beruhen. Kognitive Informationen zeigten

keinen oder nur einen geringen Einfluss (Geron, Inbar 1980). Auch die Testlänge scheint keinen Einfluss auf die Motivation zu haben, obwohl der WAnT körperlich sehr anstrengend ist. In einer anderen Untersuchung führten Probanden Sprint-Tests mit einer Testdauer von 5, 15, 30 und 45 Sekunden durch. Vor und nach den Tests wurde die Stimmungslage der Probanden mit einem standardisierten Fragebogen untersucht (POMS= „Profile of Mood States Questionary“). Die POMS ist eine Selbstbeurteilungsskala zur Erfassung von Stimmungen und Befindenszuständen. Abgefragt wurden: Spannung (Tension), Niedergeschlagenheit (Depression), Missmut (Anger), Tatendrang (Vigour), Müdigkeit (Fatigue), Verwirrung (Confusion). Es zeigte sich kein Einfluss der Testlänge auf Motivation oder Stimmungslage der Probanden (Wittekind 2009). Die Probanden der vorgelegten Studie erreichten nach vergleichenden Tabellen hohe Peak-Power Werte (Inbar, Bar-Or, Skinner 1996) und hohe Laktatwerte in Test und Wiederholungstest, was objektive Anhaltspunkte für eine hohe Motivation sind.

1.3. Blutentnahmen

Das aus den hyperämisierten Ohrläppchen entnommene Kapillarblut entspricht arterialisierendem Venenblut. Daraus gewonnene Aussagen und Informationen bezüglich des Laktats und seines Verlaufs können auf Arterienblut übertragen werden (Oyono-Enguelle et al. 1989). Um den Laktatverlauf, das Laktatmaximum und die Konstanten zu bestimmen bzw. zu berechnen, wurden in dieser Untersuchung jeweils die Ruhewerte, Vorbelastungswerte, unmittelbare Nachbelastungswerte sowie weitere 20 kapilläre Blutproben entnommen. Manuelle Laktatmessungen zeigen eine Variabilität zwischen 0.5 und 2 % (Beneke et al. 1994). Bei den unterschiedlichen Untersuchungen rund um das Thema Wingate Test variiert die Anzahl der Blutentnahmezeitpunkte. Eine gleiche Anzahl an Blutentnahmen führte beispielsweise die Arbeitsgruppe Morrow mit Tests mit 45-s-Testdauer durch (Morrow et al. 1988). Deutlich mehr Blutentnahmen hat die Arbeitsgruppe um Freund und Zouloumian entnommen, die das Laktatverhalten nach unterschiedlichen körperlichen Belastungsformen auf dem Ergometer untersuchte. In dieser Studie wurden aber keine Wingate Tests durchgeführt, sondern submaximale Leistungstests. Außerdem hatten die Probanden Verweilkatheter in der Brachialarterie und -vene, aus denen in kurzen Abständen alle 10 bis 30 Sekunden arterielle und venöse Blutproben gewonnen wurden (Freund H, Zouloumian P 1981). So führte

beispielsweise die Arbeitsgruppe Hebestreit Untersuchungen zum Verlauf der Laktatkonzentration von Jungs und Männern nach einem WAnT durch. Es wurden vier Blutproben aus den Ohrläppchen bis zur zehnten Minuten nach WAnT analysiert (Hebestreit et al. 1996). Die Arbeitsgruppe Weinstein führte nach einem WAnT bei Männern und Frauen ebenfalls 4 Blutproben aus den Fingerbeeren bis zur neunten Minute nach Testende durch (Weinstein et al.1998). Mit der Anzahl der kapillären Blutentnahmen und den daraus ermittelten Laktatwerten nach einer supramaximalen Leistung liegt die vorgelegte Studie im internationalen Vergleich an der Spitze. Das gemessene und berechnete Laktatmaximum der vorliegenden Studie liegt um die Minuten 6 bis 7. Im Bereich um Minute 5 bis 11 befindet sich die Laktatkurve in einer Hochphase, in der nur sehr geringe Unterschiede der Laktatwerte bestehen. Diese geringen Unterschiede im hochwertigen Laktatbereich bei manuellen Messungen könnten dazu führen, dass Laktatmaximum sowie sein Zeitpunkt nicht korrekt bestimmt wird. Aus dieser Feststellung kann man schlussfolgern, dass für sichere Messungen des Laktatmaximums die Blutentnahmen deutlich länger als 10 Minuten nach Testende durchgeführt werden sollten. Die sehr hohe Anzahl von Blutproben in der vorgelegten Untersuchung über einen langen Zeitraum ist eine wichtige Voraussetzung zur Bestimmung der Konstanten, mit denen die Dynamik des Laktatverlaufs berechnet werden kann. Mehr Blutentnahmen aus den Ohrläppchen als in der vorgelegten Studie erscheinen praktisch nicht möglich.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die in dieser Untersuchung angewandten Methoden wissenschaftlich fundiert und international anerkannt sind. Durch die maximal hohe Anzahl an kapillären Blutentnahmen vor und nach dem WAnT und der mit 30 Minuten sehr lange Nachtestphase wurden wichtige Voraussetzungen geschaffen, um die Fragen dieser Studie untersuchen zu können.

2. Ergebnisse

2.1. Gemessene Werte

2.1.1. Leistungswerte

Durch viele Studien ist nachgewiesen, dass das Alter einen Einfluss auf die körperliche Leistungsfähigkeit hat. Bereits 1966 stellte Margaria mittels seines gleichnamigen Tests fest, dass Kinder im Vergleich zu Erwachsenen eine geringere absolute und relative Peak-Power erreichen. Di Prampero (1969) und Davies (1972) stellten ähnliche Beobachtungen fest. Die Peak-Power und Average-Power nehmen auch beim WAnT vom 10. Lebensjahr bis ins junge Erwachsenenalter konstant zu (Inbar 1986). Die maximale Peak-Power wird zum Ende der 3. Lebensdekade erreicht (Inbar 1986). In der vorgelegten Studie hat das Alter der Probanden keinen Einfluss auf die Ergebnisse, da der Altersdurchschnitt 26.8 Jahre (21-34 Jahre) beträgt. Die Probanden befinden sich im leistungsfähigsten Alter (Inbar, Bar-Or, Skinner 1996). Die von den Probanden dieser Studie erreichten Leistungswerte der Peak-Power, Average-Power und des Fatigue-Index in beiden Tests, können nach vergleichenden Tabellen des israelischen Wingate-Instituts als exzellent eingestuft werden (Inbar, Bar-Or, Skinner 1996). Die vorgelegten Ergebnisse entsprechen denen anderer Studien (Bar-Or 1977; Evans, Quinney 1981; Kaczkowski 1982; Patton 1985; Inbar et al. 1986). Die signifikanten Test-Retest-Korrelationen der Leistungswerte dieser Studie und die exzellenten Leistungswerte der Probanden sind auch ein Anzeichen dafür, dass die Tests und Wiederholungstests im standardisierten Rahmen korrekt durchgeführt wurden und dass die Probanden die Tests mit voller Leistungsbereitschaft durchgeführt haben.

Die Leistungskurve bei einem Wingate Test erreicht in typischer Weise innerhalb der ersten Sekunden ein Maximum und fällt im weiteren Verlauf ab. Es scheinen viele Faktoren beim Leistungsabfall eine Rolle zu spielen, die zum Teil noch nicht vollständig erforscht sind. Allein für eine einzige Muskelkontraktion sind zentrale und periphere neurophysiologische Mechanismen notwendig. Auf dem Weg von den motorischen Zentren unseres Gehirns hin zu den kontraktilen Filamenten der ausführenden Muskelfaser existieren viele Einflussmöglichkeiten. Nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft scheinen aber eher periphere Faktoren bei der Ermüdung eine Rolle zu spielen (McLester 1997). Außerdem spielt bei der Ermüdung hochintensiver

Kurzzeitbelastungen die abnehmende ATP-Resyntheserate und die zurückgehende Nutzung des Kontraktionsapparates eine Rolle.

2.1.2. Laktat

→ Ruhelaktat

Die Ruhelaktatwerte der Probanden lagen im Mittel bei 0.6-1.7 mmol/l. Damit befinden sich alle Probanden in einem normalen Bereich (Pokan 2004). In 16 von 22 Testergebnissen besteht ein erhöhtes Anfangslaktat nach der Erwärmungsphase und noch vor Start des WAnT. In 4 Fällen ist das Laktat nach der Erwärmung um 0.1 mmol/l niedriger als der Ruhewert. Laktat zeigt eine biologische Variabilität, die von der Höhe des Laktatwerts abhängt (Beneke 1999, Hauser 2011). Untersuchungen von Dauerleistungen zeigten eine Variabilität von $3.6 \pm 2.7 \%$ bis $8.0 \pm 5.7 \%$ (Beneke 1999). Je niedriger der Laktatwert, desto größer die Variabilität. Die Ruhewerte sind die niedrigsten Laktatwerte. Nach der Erwärmung kam es bei einigen Probanden zu keinem und bei vielen Probanden zu einem geringen Anstieg der Vorbelastungswerte, sodass dies bei angenommener biologischer Variabilität von 8 % für diese Untersuchung eine Variabilität der Ruhelaktatwerte bzw. Vorbelastungslaktatwerte von 0.05 bis 0.14 mmol/l bedeutet. Dieser Sachverhalt erklärt die 4 Fälle, in denen die Vorbelastungswerte 0.1 mmol/l niedriger als die Ruhewerte waren.

Die Belastungsintensität der Erwärmungsphase hat Auswirkungen auf das Vorbelastungslaktat. Je höher die Intensität der Erwärmung ist, desto höher ist das Vorbelastungslaktat (Wittekind 2012). Die Erwärmung unserer Untersuchung fand bei geringer Intensität von 50 Watt statt. Die Leistungsvorgabe war unabhängig von der Kurbelfrequenz.

→ Laktatmaximum

Das Laktatmaximum ist der höchste, nach einem WAnT messbare Laktatwert. Das Delta-Laktat entspricht dem Laktatmaximum abzüglich des Vorbelastungslaktatwerts. Es beschreibt sozusagen das „Netto“-Laktat. Allerdings muss mit dem Begriff „Netto“-Laktat sehr vorsichtig umgegangen werden. Die Vorstellung, dass man beim maximalen Laktatwert nach einem WAnT über das „Brutto“-Laktat und nach Abzug des Vorbelastungslaktats vom „Netto“-Laktat sprechen kann ist nicht korrekt, da das Laktat schon während seiner Bildung gleichzeitig stattfindenden Abbauprozessen unterliegt.

Während des WAnT ist dies die aerobe Laktatverbrennung. Im späteren Verlauf nach Testende wird Laktat in der Leber der Gluconeogenese zugeführt (Stryer 2003). Auch dient Laktat unter anderem als Energiequelle für Zellen mit aerobem Stoffwechsel wie z.B. die Herzmuskulatur, die Nieren und das Gehirn. Berücksichtigt man den Sachverhalt, dass gleichzeitig zur Laktatbildung bereits Eliminierungsprozesse ablaufen, dann muss das absolute bzw. theoretisch maximal gebildete Laktat größer sein als das tatsächlich gemessene Laktatmaximum.

Die Laktatmaxima dieser Untersuchung liegen um die 14 mmol/l. Das bedeutet bei einem gerätetechnischen Messfehler (Unpräzision) von $\leq 2.5\%$ bei 12 mmol/l, eine möglichen Messungengenauigkeit von etwa 0.3 mmol/l. Im Bereich der Laktatmaxima differieren die umliegenden Laktatwerte nur gering. Die möglichen Messungengenauigkeiten erscheinen gering. Da für die Trainingssteuerung möglichst genaue Kenntnisse des Laktatmaximums wichtig sind, bedeuten im Leistungssport kleine Unterschiede möglicherweise einen leichten Vorteil gegenüber der Konkurrenz, der gerade in der Weltspitze über Sieg oder Niederlage entscheiden kann. Die Laktatmaxima dieser Studie korrelieren signifikant im Test-Retest Vergleich, was als Hinweis darauf gewertet werden kann, dass die Probanden der vorgelegten Studie die Tests mit maximaler Leistungsbereitschaft durchgeführt haben. Andere Untersuchungen bestätigen die Höhe unseres maximalen Nachbelastungslaktats. So fand beispielsweise die Arbeitsgruppe Jones (1985) nach einem ähnlichen Test mit ähnlicher Belastung (30-s-isokinetischer-Test) mittels Muskelbiopsie Laktatwerte von 29.0 mmol/kg Muskelfeuchtgewicht (± 3.98 mmol/kg) bzw. 30.0 mmol/kg Muskelfeuchtgewicht (± 4.31 mmol/kg), deren Höhe der in dieser Studie im Blut gemessenen Laktatmaxima entsprechen.

3. Grundsätzliches Laktatverhalten als Voraussetzung für Berechnungen

Bereits in den Anfängen des letzten Jahrhunderts hat man erkannt, dass das Laktat in einem wichtigen Zusammenhang mit Stoffwechselfvorgängen nach körperlicher Leistung steht und ein Indikator für glykolytische Aktivität ist (Boycott, Haldane 1908). Nach einer kurzen, hochintensiven körperlichen Belastung wie dem WAnT steigt das Laktat innerhalb weniger Minuten deutlich an. Es bleibt dann über einige Minuten auf einem relativ konstanten Niveau, auf dem sich die Laktatwerte überwiegend nur im Bereich der ersten Stelle hinter dem Komma ändern, ehe es wieder abfällt. Das Laktatverhalten nach intensiver körperlicher Belastung ist reproduzierbar (Freund, Zouloumian 1981; Beneke 2002, 2007). Die Untersuchungsergebnisse der vorgelegten Studie bestätigen, dass das Laktatverhalten nach einer supramaximalen Leistung einen typischen, reproduzierbaren Verlauf hat. Ausgehend von den Vorbelastungswerten kommt es in den ersten Minuten nach einem WAnT zu einem schnellen und hohen Anstieg des Laktats, ehe die Werte nach einiger Zeit dann wieder langsam absinken. Der gemessene Zeitpunkt des Laktatmaximums liegt bei etwa 6.5 Minuten. Im Bereich des Laktatmaximums hat die Kurve einen sehr flachen Verlauf. Diese flache Phase dauert etwa von Minute 5 bis 11. Dort sind die Laktatwerte im zeitlichen Verlauf der Blutentnahmezeitpunkte konstant hoch mit Werten um die 14 mmol/l. Im weiteren Verlauf sinkt das Laktat dann langsam wieder ab. Der letzte gemessene Laktatwert bei Minute 30 liegt im Mittel bei etwa 7.5 mmol/l. Der Ausgangswert ist noch nicht wieder erreicht. Der Laktatverlauf nach einem WAnT zeigt, dass das Laktatmaximum kein Einzelwert ist, der wie ein Peak heraus sticht, sondern dass es sich beim Maximum um den höchsten Wert in einem flachen Kurvenabschnitt handelt. Es wird deutlich, dass es nicht einfach ist, den Zeitpunkt des Laktatmaximums manuell exakt zu bestimmen, da auch Messfehler zu kleinen Abweichungen der Laktatwerte führen können. Auch die Interpretation des Laktatverhaltens nach intensiver körperlicher Leistung ist bis heute schwierig (Beneke 2007).

Aufgrund der Reproduzierbarkeit konnten Berechnungsmodelle zur Beschreibung des Laktatverhaltens entwickelt werden (Freund, Zouloumian 1981; Beneke 2002, 2007). Mit der Anwendung eines Berechnungsmodells konnte in dieser Untersuchung der Laktatverlauf nach einem WAnT, einschließlich seines Maximums und dessen Zeitpunkt beschrieben werden, was von Vorteil ist, da das Laktatmaximum bei manueller

Messung zwischen zwei Blutentnahmezeitpunkten liegen könnte. Häufig erfolgten die Blutentnahmen über einen viel zu kurzen Zeitraum (Hebestreit 1996, Weinstein 1998), so dass das Laktatmaximum möglicherweise nicht korrekt gemessen werden konnte.

Möglichst genaue Kenntnisse über das individuelle Laktatmaximum und über die individuelle Dynamik der Laktatantwort nach einer supramaximalen Leistung sind wichtig, um die anaerobe Leistungsfähigkeit besser beurteilen und die Trainingsabläufe besser steuern zu können. Die Anwendung von Berechnungsmodellen ist dem Versuch geschuldet, diesen Kenntnisstand zu verbessern.

3.1. Drei-Parameter Bi-Exponential Modell

In der vorgelegten Untersuchung wurde die Bateman-Funktion als Basis für die Berechnungen genutzt, weil es nach einer supramaximalen Leistung wie dem WAnT innerhalb sehr kurzer Zeit zu einem rasanten Anstieg der Laktatkonzentration in der Muskelzelle und im Blut kommt. Da mit Start des WAnT sofort intramuskuläre Laktatbildungs- und Eliminierungsprozesse stattfinden, beginnen auch die Berechnungen mit Start des WAnT. Weil in dieser Untersuchung der WAnT die Laktatbildung in Gang setzt bedeutet dies im übertragenen Sinn, dass das intramuskulär gebildete Laktat über einen relativ langen Zeitraum von 30 Sekunden dem Körper „zugeführt“ wird. Da die Elimination des Laktats aus dem Muskel aber um ein Vielfaches länger dauert als seine Bildung, erscheint die Anwendung der Batemanfunktion für diese Untersuchung möglich. Nach 30 Minuten, dem Zeitpunkt der letzten Blutentnahme, ist der Ruhewert noch nicht wieder erreicht. Das bedeutet, dass die Laktatelimination mehr als 60-mal länger dauert, als die fiktive „Laktat-Injektion“. Modifikationen der Bateman-Funktion, die diesen Sachverhalt mit Start der Berechnungen erst nach dem WAnT berücksichtigen, haben in Vorversuchen gezeigt, dass es im Ergebnis keine quantitativ bedeutsamen Unterschiede bedeutet (mündliche Mitteilung Prof. Beneke 2012). Die Anwendung der Batemanfunktion ist unter der Bedingung gültig, dass es nach der Erwärmung und vor Start des WAnT noch zu keinem Laktatanstieg gekommen ist. In dieser Untersuchung lag in 16 von 22 Fällen ein solcher Laktatanstieg nach der Erwärmung und vor Start des Tests bereits vor. Somit wären die meisten Fälle von den Berechnungen ausgeschlossen. Aus diesem Grund wurde die Formel um einen Term erweitert, der diesen Zustand berücksichtigt („neue“ Formel). Weil die biexponentielle Kurve nach der Zeit $2x$ Zeitpunkt des

Laktatmaximums (T_{max}) monoexponential verläuft, kann der zusätzliche Term mit einer einfachen Eliminationskinetik beschrieben werden (Beneke 2007). Der berechnete Zeitpunkt des Laktatmaximums dieser Studie liegt bei 5 Minuten. Der Zeitraum zwischen Ruhewert und Vorbelastungswert beträgt 10 Minuten. In der Erwärmungsphase kommt es bei der niedrigen Intensität zu keinem exponentiellen Laktatanstieg, weil die beiden kurzen 2-Sekundensprints ihre Energie aus dem ATP-PCr-System generieren. Somit ist die Anwendungsbedingung erfüllt. Wird die original („alte“) Formel bei erhöhten Vorbelastungswerten trotzdem angewendet, ändern sich die Berechnungsergebnisse. Es wirken systematische Effekte auf alle Parameter (Beneke 2007).

3.2. Güte des Fits der Berechnungsformeln

Die Güte des Fits (r^2) ist bei beiden Berechnungsformeln sowohl bei Test eins als auch bei Test zwei sehr hoch. Da im Mittel nur eine geringe Differenz des Anfangslaktats zu Grunde liegt, sind keine großen Unterschiede zu erwarten. Somit muss, bei sehr hoher Anpassungsgüte der alten Formel, auch die Anpassungsgüte der neuen Formel sehr hoch sein. Im Mittelwertvergleich besteht zwischen Test und Retest kein Unterschied.

4. Berechnete Werte

4.1. Laktat

→ Laktatmaximum

In der vorgelegten Untersuchung wurde das Laktatmaximum gemessen und berechnet. Es bestehen zwischen den manuellen Messergebnissen und den Berechnungen nur geringe Differenzen. Das berechnete Laktatmaximum ist bei beiden Formeln 0.2 bzw. 0.11 mmol/l höher als das gemessene. Bei der Betrachtung der gemessenen und berechneten Laktatmaxima jedes einzelnen Probanden fällt auf, dass die berechneten Laktatmaxima immer höher sind als die gemessenen Werte. Da alle berechneten Laktatmaxima etwas größer sind als die gemessenen, müssen bei der Verstoffwechslung des Laktats die Invasionsprozesse und das extravasale Laktat A etwas größer oder und die Eliminationsprozesse etwas kleiner sein. Die Differenzen

sind mit 0.2 bzw. 0.11 mmol/l so gering, dass die verwendeten Formeln die Invasions- und Eliminationsvorgänge ausreichend gut berücksichtigen um die Laktatmaxima zu berechnen. Die vorgelegten Ergebnisse zeigen, dass die Laktatmaxima zuverlässig berechnet werden können. Die Ergebnisse sind durch Muskelbiopsien betätigt (Jones et al. 1985).

→ Delta-Laktatmaximum

Das Laktatmaximum ist der höchste nach einem WAnT im Kapillarblut gemessene oder berechnete Laktatwert. Auch in Ruhe befindet sich immer eine gewisse Laktatkonzentration im Blut. Viele Probanden haben bereits nach der Erwärmung einen leichten Laktatanstieg. Die Differenz zwischen Vorbelastungslaktat und Laktatmaximum ist das Delta-Laktatmaximum. Die signifikante Test-Retest Korrelation spricht für einen reliablen Laktatanstieg während und nach WAnT. Das Delta-Laktatmaximum ist etwa 2 mmol/l kleiner als das approximierte Laktat A des Extravasalraums. Weil auf dem Weg von der Laktatbildung in der Muskelzelle bis zum Eintritt ins Blut und in die Organe bzw. Zellen weitere Stoffwechselprozesse stattfinden, muss das Delta-Laktatmaximum kleiner als A sein.

→ Zeitpunkt Laktatmaximum

Die berechneten Zeitpunkte der Laktatmaxima liegen etwa eine Minute früher als die gemessenen Werte. Die mit der „alten“ Formel berechneten Zeitpunkte der Laktatmaxima (T_{max}) liegen im Vergleich zu den Ergebnissen mit der „neuen“ Formel im Mittel etwas früher. In der vorgelegten Untersuchung wurden die Blutproben über einen 30-minütigen Zeitraum gewonnen und es besteht eine sehr hohe Blutentnahmedichte mit minütlichen Blutproben in den ersten 10 Minuten nach Ende des WAnT. Die gemessenen und berechneten T_{max} -Werte differieren nur im Bereich um einen Blutentnahmezeitpunkt. Die Zeit des gemessenen Laktatmaximums korreliert bei minütlicher Messung nicht (Abb.5). Auch unter Berücksichtigung der Gesamtheit der gemessenen Laktatwerte und Schätzung des Zeitpunkts des Maximums wird der Zusammenhang nicht signifikant. Mögliche Gründe dafür können sein, dass T_{max} in einem sehr engen Wertebereich liegt. Es ist auch möglich, dass die minütlichen Messungen immer noch zu grobrastig sind, um den Zeitpunkt des tatsächlichen Maximums zu finden. Die berechneten Werte werden aus allen approximierten

Konstanten errechnet, so dass die nicht signifikante Korrelation von T_{max} auch dadurch bedingt sein könnte, dass die Konstanten k_1 und k_2 auch nicht korrelieren.

4.2. Approximiertes Laktat A des Extravasalraums

Nach einer supramaximalen Leistung wie dem WAnT wird im Muskel schnell sehr viel Laktat gebildet. Die Probanden dieser Studie erreichten Laktatmaxima um die 14 mmol/l. Im übertragenen Sinn kann diese schnelle Laktatbildung im Muskel mit einer Bolusgabe verglichen werden. Da dieser „Bolus“ nicht von außen in den Körper gebracht wird, sondern es sich um eine im Muskel schnell gebildete Substanz handelt, kann das Berechnungsmodell wie für eine intramuskuläre Injektion angewandt werden. Weil der Begriff Bolus aber formal nicht korrekt ist, wird hier vom „im Muskel gebildeten“ Laktat gesprochen. Die Konstante A entspricht der im Muskel gebildeten Menge Laktat unter Berücksichtigung der Verdünnungsbedingungen des Extravasalraums. Es ist die Laktatmenge, die im Muskel aus der Bilanz Glykolyse und gleichzeitig stattfindendem oxidativen Abbau übrig bleibt und steht für die tatsächliche anaerobe Laktatbildung (Beneke 2008). Der Laktatwert, der im Kapillarblut gemessen wird, ist schon durch weitere Abbauprozesse gesenkt.

Die Anwendung der beiden Formeln bei allen Probanden zeigt, dass das mit der „neuen“ Formel berechnete Laktat A des Extravasalraums etwas kleiner, ist als das mit der „alten“ Formel berechnete. Die „neue“ Formel berücksichtigt einen möglichen Laktatanstieg nach der Erwärmungsphase und vor Start des WAnT. Sie berücksichtigt außerdem die in dieser Phase schon beginnende Laktatelimination des angestiegenen Vorbelastungslaktats. Somit muss das Laktat A der „neuen“ Formel kleiner sein, als bei der „alten“ Formel.

Untersucht man nur die 16 Fälle mit erhöhtem Vorbelastungslaktat und berechnet A mit der „neuen“ und „alten“ Formel, dann ist das A, das mit der „neuen“ Formel berechnet wurde im Mittel 0.4 mmol/l kleiner und beträgt 15.2 mmol/l im Vergleich zum A, das mit der „alten“ Formel berechnet wurde (15.6 mmol/l) (Mühling 2008). Obwohl dies ein geringer Unterschied ist wird die Tendenz deutlich, dass das A umso kleiner wird, je größer das Vorbelastungslaktat ist. Die Erwärmungsphase vor dem WAnT hat eine niedrige Belastungsintensität. Die Probanden fahren auf einem Ergometer 5 Minuten mit 50 Watt und absolvieren 2 kurze Belastungssteigerungen in Form schneller Antritte über 2-3 Sekunden. Die kurzen Antritte stellen keine starke glykolytische

Beanspruchung dar, weil die Energie für diese kurzen, intensiven Abschnitte überwiegend alaktazid aus dem ATP-PCr System generiert wird. Ein deutlicher Laktatanstieg ist bei dieser Belastungsintensität nicht zu erwarten. Daran schließt sich eine 10-minütige Ruhephase an.

In einer anderen Untersuchung zeigten sich Auswirkungen von Erwärmung unterschiedlicher Intensität auf das extravasale Laktat A. Probanden führten drei 60-Sekunden Maximaltest mit Erwärmungsphasen unterschiedlicher Intensitäten, bei gleich langen anschließenden Ruhephasen von 10 Minuten, durch. Die unterschiedlichen Erwärmungen zeigten Auswirkungen auf das A. Nach einer leichten Erwärmung bei 40% peak $\dot{V}O_2$ war der Vorbelastungslaktatwert im Mittel mit 1.2 ± 0.3 mmol/l am niedrigsten und A mit 14.8 ± 1.9 mmol/l am höchsten. Nach einer moderaten Erwärmung, die eine Belastung über 5 Minuten bei 40% peak $\dot{V}O_2$ und anschließend 1 Minute bei 80 % peak $\dot{V}O_2$ beinhaltete, war das Vorbelastungslaktat mit 2.0 ± 0.3 mmol/l etwas höher und A mit 14.1 ± 2.3 mmol/l etwas niedriger. Eine Erwärmung bei 110% peak $\dot{V}O_2$ führte zum höchsten Vorbelastungslaktat von 4.2 ± 0.9 mmol/l und dem niedrigsten A mit 12.9 ± 1.6 mmol/l (Wittekind, Beneke 2010).

Erwärmungen sind im Sport üblich und wichtig, damit der Sportler seine bestmögliche Leistung abrufen kann. Die Erwärmungen variieren in jeder Sportart und sind zusätzlich auch auf die individuellen Bedürfnisse bzw. die Trainings- und Wettkampfphasen des Athleten abgestimmt. Die standardisierte Erwärmung der vorgelegten Untersuchung mit niedriger Intensität zeigt bereits leichte Auswirkungen auf das Stoffwechselverhalten nach dem WAnT. Diesen Sachverhalt zu kennen und in der Erwärmungsphase vor Wettkämpfen umzusetzen, ist ein wichtiger Hinweis insbesondere im Spitzensport. Gerade im Bereich der Weltspitze entscheiden oft kleine Unterschiede über Sieg oder Niederlage.

Das A („neue“ Formel) der Probanden erreicht in der vorgelegten Untersuchung Werte von 12.70 bis 17.89 mmol/l. Es bestehen individuell große Unterschiede in der Höhe von A zwischen den Probanden. Beispielhaft sei Proband 3 genannt, der in Test1 ein A von 12.70 mmol/l hat und Proband 11 mit einem A von 17.89 mmol/l in Test2. Die Differenz der einzelnen Probanden zwischen Test und Wiederholungstest ist aber nie größer als etwa 1 mmol/l. Sowohl die mit der „alten“ als auch mit der „neuen“ Formel

berechneten Laktate A korrelieren im Test-Retest signifikant. Zur weiteren Analyse haben wir einen Bland-Altman-Plot erstellt (Abb.7).

Mit dem Bland-Altman-Plot werden zwei Methoden verglichen, die das gleiche messen. Üblicherweise wird die Goldstandardmethode mit einer neuen Methode verglichen. In unserem Fall ist es der Vergleich der „alten“ mit der „neuen“ Berechnungsformel. Es werden von den einzelnen Probanden die Mittelwerte der beiden Methoden auf die x-Achse und die Differenz der Mittelwerte auf die y-Achse, sowie die Standardabweichung bei Normalverteilung aufgetragen. Aus dem Diagramm lassen sich Rückschlüsse auf das Abweichungsverhalten bei großen oder kleinen Werten ziehen. Die Differenz der Mittelwertvergleiche von A wird von Test1 der „alten“ und „neuen“ Formel umso größer, je höher der Mittelwert von A ist. In diesem Fall liegen im Bland-Altman-Plot alle Werte im Bereich der Standardabweichung, bis auf eine Ausnahme, die sich knapp außerhalb der Standardabweichung befindet. Beide statistischen Analysen zeigen keinen Unterschied im Mittelwertvergleich.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit beiden Formeln das Laktat A des Extravasalraums zuverlässig berechnet werden kann, mit der „neuen“ Formel aber etwas besser. Durch die Approximation des extravasalen Laktats A konnte außerdem gezeigt werden, dass entgegen weit verbreiteter Meinung zwischen Kindern und Erwachsenen keine Unterschiede bezüglich deren muskulärer Leistung und Glykolyserate pro Kilogramm Muskel bestehen (Beneke et al. 2007).

4.3. Invasions-/Eliminationskonstanten

Die Geschwindigkeit des An- und Abflutens von Laktat im Blut kann mit der Invasions- und Eliminationskonstanten k_1 und k_2 beschrieben werden (Beneke et al. 2005, 2007). Da die Invasion von Laktat nach einer supramaximalen Leistung ins Blutkompartiment deutlich schneller ist als dessen Elimination, ist die Invasionskonstante k_1 größer als die Eliminationskonstante k_2 . Beispielfhaft sei hier das durchschnittliche k_1 in Test1 und Test2 („neue“ Formel) genannt. Ein k_1 von 0.55 bedeutet eine Zeitkonstante von 1.82 Minuten. Das durchschnittliche k_2 in Test1 und Test2 („neue“ Formel) von 0.0275 bedeutet eine Zeitkonstante von 36.36 Minuten. Somit dauert die Laktatelimination aus dem Blut etwa 20 Mal länger, als das Anfluten des Laktats.

In der vorgelegten Studie wurden den Probanden nach dem WAnT über 30 Minuten zu definierten Zeitpunkten Kapillarblutproben entnommen. Unsere Nachtestphase deckt also knapp eine Zeitkonstante ab. Unter der Berücksichtigung, dass die Eliminationskonstante etwa 20-mal kleiner ist als die Invasionskonstante und der WAnT selbst nur 30 Sekunden dauert, erscheint uns die Anwendung der Formel plausibel. Uns ist nur eine andere Untersuchung mit einer so langen Nachtestphase nach einem WAnT bekannt und diese Untersuchung baut auf den vorgelegten Ergebnissen auf (Beneke 2008). Weitere Untersuchungen mit Blutentnahmen über einen längeren Zeitraum als 30 Minuten wären wünschenswert, erscheinen aber schwer praktikabel, da schon eine Nachtestphase von 30 Minuten in sitzender Position einschließlich der Blutentnahmen ein hohes Maß an die Geduld und auch an die Leidensfähigkeit der Probanden erfordert.

Die mit der „neuen“ Formel berechneten Invasionskonstanten sind etwas niedriger und unterscheiden sich nur gering von den Invasionskonstanten, die mit der „alten“ Formel berechnet wurden. Die Eliminationskonstanten der „neuen“ Formel stimmen in Test1 und Test2 in den ersten drei Stellen hinter dem Komma mit der „alten“ Formel überein. Ein geringer Unterschied zeigt sich ab der vierten Stelle hinter dem Komma. K_2 der „neuen“ Formel ist etwas größer. Im Test-Retest Vergleich korrelieren beide Konstanten nicht bei Mittelwertvergleichen ohne Unterschied. Zur weiteren Analyse haben wir einen Bland-Altman-Plot erstellt.

Der Bland-Altman-Plot (Abb.8+9) zeigt für k_1 und k_2 eine gleichmäßige Verteilung der Mittelwertdifferenzen im Bereich der Standardabweichung, was zeigt, dass kein systematischer Bias vorliegt und bei fehlender Mittelwertdifferenz positiv bezüglich Wiederholbarkeit gewertet werden kann. Trotzdem ist dieses Ergebnis etwas unbefriedigend.

Bei der Betrachtung von k_1 und k_2 der einzelnen Probanden fallen intraindividuell große Unterschiede zwischen Test1 und Test2 auf. Bei fast allen Probanden bestehen bei der „neuen“ Formel zwischen Test und Wiederholungstest Differenzen von 10 % oder mehr. Bei 6 Probanden (jeweils k_1 und k_2) beträgt die Differenz 20 % oder mehr und sogar 4 (k_1) bzw. 5 (k_2) Probanden zeigen eine Differenz von 30 % und mehr. Die Differenzen sind bei der „alten“ Formel ganz ähnlich. Geringere Unterschiede zwischen Test und Wiederholungstest zeigen sich für die Konstante A. Hier liegt die Differenz zwischen 1 und 15 %. Wobei die Testergebnisse von Proband 11 mit 15 % Differenz (Test1: 15.16

mmol/l, Test2: 17.89 mmol/l) etwas herausfallen. Möglicherweise hat der Proband im ersten Test noch nicht seine volle Leistung abgerufen. Die intraindividuellen Unterschiede bei den Invasions- und Eliminationskonstanten k_1 und k_2 könnten die schlechten Test-Retest-Korrelationskoeffizienten erklären. Obwohl Test und Retest innerhalb einer Woche durchgeführt wurden, unterliegt der Stoffwechsel der Probanden individuellen Schwankungen. Außerdem könnten die Unterschiede von k_1 und k_2 darin begründet sein, dass die Konstanten k_1 und k_2 mit A korrelieren, wie das bei einfachen Dauerinfusionsmodellen der Fall ist (Dost 1968) und es sich bei den Transportbedingungen nicht nur um passive Diffusion handelt, sondern auch um aktiven Transport, der eine Sättigungskinetik aufweist (Beneke, Masen 2007; Brooks 2009). Darüber kann man anhand der vorliegenden Daten nur spekulieren. Berechnungen, die dies mit berücksichtigen würden, wären ungleich komplizierter. Untersuchungen mit Wingate Tests von 30 Sekunden Dauer und supramaximalen Kurzzeitbelastungstests von 10 Sekunden Dauer zeigten individuell unterschiedliche k_1 - und k_2 -Werte mit unterschiedlich hohen Laktatmaxima, die als Hinweise auf eine Sättigungskinetik gedeutet werden (Beneke, Masen 2007).

Fazit: Wird die „alte“ Berechnungsformel auch bei Tests mit erhöhtem Vorbelastungslaktat angewendet, dann sind in Test und Wiederholungstest A, k_1 größer und k_2 kleiner, als bei Anwendung der „neuen“ Formel, die den Zeitraum zwischen Erwärmung und Start des WAnT berücksichtigt. Das bedeutet, dass bei nicht korrekter Anwendung der Berechnungsformel auch die Dynamik der Laktatantwort nicht korrekt dargestellt wird.

Aufbauend auf diesen grundlegenden Erkenntnissen dieser Studie hat die Arbeitsgruppe um Prof. Beneke eine weitere Untersuchung durchgeführt. Bei gleichem, standardisierten Testablauf und Kapillarblutentnahmen absolvierten 19 männliche Probanden ein bis zwei WAnT im Abstand von einer Woche, so dass insgesamt 31 Testprotokolle erstellt werden konnten. Bei diesen 31 Tests lag in 21 Fällen ein erhöhtes Vorbelastungslaktat nach der Erwärmung vor. In dieser Untersuchung wurden allerdings keine Test-Retest-Vergleiche durchgeführt. Die „alte“ Formel wurde bei allen 31 Tests angewandt, die „neue“ Formel aber nur bei den 21 Fällen mit erhöhtem Anfangslaktat. Es zeigte sich die gleiche Tendenz wie in der vorgelegten Untersuchung. Bei Anwendung der „alten“ Formel sind A und k_1 größer und k_2 kleiner, als bei Anwendung der „neuen“ Formel. Außerdem zeigte es sich, dass diese Unterschiede

umso größer wurden, je größer die Differenzen zwischen Ruhelaktat und Vorbelastungslaktat waren. Die Anwendung des originalen Modells bei Vorbelastungslaktatwerten von 2 mmol/l und mehr führte zu einer Überschätzung von A um 8 %, k_1 um 30 % und zu einer Unterschätzung von k_2 um 10% (Beneke et al. 2010). Schwerpunkt der Studie der Arbeitsgruppe von Prof. Beneke war die Untersuchung der Laktatelimination nach dem WAnT. Vergleichend wurde ein Monoexponentialmodell angewandt, dass seinen Startpunkt erst nach dem WAnT zwischen Minute eins und zehn hatte. Das Ergebnis wurde mit den Ergebnissen der auch hier angewandten Eliminationskonstanten verglichen. Es zeigte sich, dass es bei Anwendung des Monoexponentialmodells bis zur sechsten Minute nach WAnT zu einer signifikanten Unterschätzung der Eliminationskonstanten kam (Beneke 2010) und somit zu einer Fehleinschätzung der Dynamik das Laktatantwort nach einer supramaximalen Leistung wie dem WAnT.

5. Anwendungseffekte der Formeln

In der vorgelegten Studie wurden die „alte“ und „neue“ Formel auf systematische Anwendungseffekte untersucht. Zunächst wurde die „alte“ und „neue“ Formel mit dem paarweisen t-Test untersucht. Analysiert wurde jeweils Test1 bzw. Test2 der „alten“ Formel mit Test1 bzw. Test2 der „neuen“ Formel. Die untersuchten Parameter: Güte des Fits (r^2), A , k_1 , und k_2 korrelieren alle hochsignifikant. Diese hohen Korrelationen sind hier zu erwarten, da die meisten Probanden dieser Studie nur eine geringe Differenz zwischen Ruhelaktat und Vorbelastungslaktat haben. Somit können die berechneten Parameter auch nur geringe Unterschiede aufweisen, da ihnen eine ähnliche Berechnungsbasis zu Grunde liegt. Die Untersuchung auf mögliche systematische Anwendungseffekte wurde mit einer verallgemeinerten Schätzungsgleichung („Generalized Linear Model“) durchgeführt. Es ist eine Technik der Varianzanalyse mit Messwiederholungen, die moduliert werden können, unter Verwendung einer nicht strukturierten Korrelationsmatrix. Bei dieser Analysemethode werden auch Abhängigkeiten berücksichtigt. Das heißt für die Anwendung, dass mit dieser Methode eine Untersuchung von Test, Retest, sowie „alter“ und „neuer“ Formel möglich ist und das außerdem berücksichtigt wird, dass alle Probanden jeweils zwei Test absolvierten. In der Varianzanalyse zeigt es sich, dass beide Formeln einen signifikanten Effekt in der Anwendung haben. Bei den Tests zeigen sich keine

Anwendungseffekte. Um herauszufinden, ob eine der beiden Formeln besser ist als die andere, haben wir in der weiteren Analyse die Summe der mittleren Abweichungsquadrate ermittelt. Hier zeigt es sich, dass die Summe der mittleren Abweichungsquadrate („mean Sum of Squares“) der neuen Formel kleiner ist. Das bedeutet, dass die neue Formel dichter an der Prognose ist und die Prognose genauer vorhersagt. Man kann sagen, dass beide Formeln gut sind, aber die „neue“ Formel etwas genauer ist. Dieser Effekt wird dadurch begünstigt, dass die „neue“ Formel auf der „alten“ Formel basiert und mit der Einbeziehung des Zeitraums zwischen Ruhephase und Vorbelastungswert einen zusätzlichen Korrekturterm hat.

6. Weitere Berechnungsmodelle

Es gibt nur sehr wenig Berechnungsmodelle für die Beschreibung des Laktatverhaltens nach intensiver körperlicher Leistung. Außer dem hier verwendeten 3-Parameter Biexponential Modell gibt es noch ein so genanntes 4-Parameter Biexponential-Modell. Dieses Modell beschreibt die Verteilung des Nachbelastungslaktats in 2 Kompartimenten. Das eine Kompartiment ist der Arbeitsmuskel, das andere ist der nicht-muskuläre Laktatverteilungsraum. Prinzipiell liegt diesem Modell die Annahme zu Grunde, dass die intravaskuläre Laktatkonzentration äquivalent zur durchschnittlichen Laktatkonzentration des nicht muskulären Laktatverteilungsraumes ist. Die beiden Exponentialterme beschreiben den Nachbelastungsfluss des Laktats vom Muskel in den nicht muskulären Verteilungsraum und das spätere Verschwinden des Laktats aus dem nicht muskulären Kompartiment. Dieses Modell wurde von der Arbeitsgruppe um Freund entwickelt (Freund et al. 1981, 1989).

Die Formel dieses Modells lautet:

$$\text{BLC}(t) = \text{BLC}_{\text{end_Ex}} + A_1 \cdot (1 - e^{-y_1 t}) + A_2 \cdot (1 - e^{-y_2 t})$$

Berücksichtigt werden bei der Berechnung das Laktat zum Zeitpunkt des Übungsendes ($\text{BLC}_{\text{end_Ex}}$) und folgende vier Parameter: die Amplitude (A_1) des Laktatanstiegs, die Konstante des Laktatanstiegs (y_1), sowie die Amplitude (A_2) und die Konstante des Laktatabfalls (y_2). Ein weiterer Unterschied zu unserer Methode besteht darin, dass neben den 4 Parametern und 2 Kompartimenten die Laktatmessung erst am Ende der

Belastung startet, während wir auch schon den Vorbelastungswert vor Beginn der Belastung messen und bei den Berechnungen berücksichtigen.

Es stellt sich nun natürlich die Frage, welches Modell sich für die Beurteilung der Laktatantwort nach einem WAnT besser eignet. In einer Untersuchung wurde das „original“ 3-Parameter Bi-Exponential Modell nach Dost mit dem 4-Parameter Bi-Exponential Modell der Arbeitsgruppe Freund nach einer supramaximalen Leistung verglichen (Beneke 2007). Die Probanden absolvierte Wingate Tests und supramaximale Kurzzeittests mit einer Dauer von 10 Sekunden und 30 Sekunden. Das Ergebnis zeigt, dass beide Modelle zu mindestens 93.69 % die Varianz der Blutlaktatantwort beschreiben. Beide Modelle zeigen identische Ergebnisse bezüglich der Laktatinvasion ins Blutkompartiment. Allerdings zeigt sich keine Übereinstimmung der Laktatelimination. Die mit dem 4-Parameter Modell berechneten Werte stellten sich als unrealistisch dar. Die Werte für den Laktatabfall waren mit 3450 Minuten extrem hoch und die Eliminationsamplitude war stark negativ. Diese extremen Parametereinschätzungen sprechen gegen die Anwendung des 4-Parameter Modells zur Beschreibung der Dynamik der Laktatantwort nach einer supramaximalen Leistung wie dem WAnT. Weitere Berechnungsmodelle, die das gleichzeitige An- und Abfluten von Laktat berücksichtigen sind nicht bekannt.

7. Energetisches Profil

Die Energie, die für einen WAnT aufgebracht werden muss, hat einen aeroben, einen anaerob-alaktaziden und einen anaerob-laktaziden Anteil. Für die Bestimmung des energetischen Profils einer supramaximalen Leistung gibt es keinen einheitlichen Standard. So versuchte man beispielsweise, das energetische Profil über die Sauerstoffschuld und Laktatbildung im Verhältnis zur Leistungsdauer und den Leistungswerten, zu bestimmen (Fox et al. 1969). Man ging davon aus, dass bestimmte sportliche Aktivitäten mehr aerob, anaerob-alaktazid oder anaerob-laktatid geprägt sind und listete diese Aktivitäten auf (Fox, Mathews 1971). Im weiteren Verlauf wurde diese Auflistung teilweise so interpretiert, dass bei sportlichen Aktivitäten die drei Energiesysteme nacheinander aktiviert werden (Löwe-Riedel 1983; Gastein 2001). Teilweise basieren die energetischen Einschätzungen auf allgemeinen Annahmen oder Vorstellungen. Eine Quantifizierung aller Energieanteile ist bis heute nicht einfach, da nur begrenzt Daten direkt, z.B. über Muskelbiopsien, gemessene Sauerstoffaufnahme

oder Blutuntersuchungen gewonnen werden können (Jacobs 1982; Serresse et al. 1988).

7.1. Aerobe Energie

Lange Zeit ging man davon aus, dass bei einer hochintensiven Kurzzeitbelastung die Generierung aerober Energie nur in sehr geringem Maß erfolgt und keinen bedeutenden Beitrag in der Gesamtenergiebilanz spielt. Dieses Wissen ist heute überholt (Gastin 2001). Dem allgemein anerkannten Sachverhalt folgend, dass zwischen der aufgenommenen Sauerstoffmenge und der aeroben Regeneration von ATP ein direkter Zusammenhang besteht (Åstrand 1981), erfolgt die Quantifizierung der aeroben Energiefreisetzung einheitlich über die aufgenommene Sauerstoffmenge während der zu messenden körperlichen Leistung. Auch in der vorgelegten Untersuchung wurde die aerobe Energie über die während des WAnT aufgenommene Sauerstoffmenge unter Berücksichtigung des kalorischen Äquivalents für Sauerstoff bestimmt. Die mittlere Sauerstoffaufnahme der Probanden dieser Studie entspricht vergleichenden Studien (Bogdanis et al. 1996; Beneke 2002; Heck 2002). Die schlechte Test-Retest Korrelation der Sauerstoffaufnahme (Abb.10) kann auf das unterschiedliche Atemverhalten der Probanden während des Tests zurückgeführt werden. Die Anzahl der Atemzüge während des 30s-Tests bei den Probanden zeigt eine große Breite von drei bis vierzig. Im Durchschnitt nahmen die Probanden 25 Atemzüge pro WAnT. Auch intraindividuell differiert die Anzahl der Atemzüge von Test zu Retest. Die größte Differenz zeigt Proband 6, der in Test1: 6 Atemzüge und in Test2: 40 Atemzüge hatte. Im Durchschnitt betrug die Differenz aller Probanden 9 Atemzüge zwischen Test und Retest. Die O₂-Differenz pro WAnT ist etwa 160 ml. Das bedeutet bei der sehr unterschiedlichen Anzahl von Atemzügen der Probanden pro WAnT große Unterschiede der O₂-Differenzen pro Atemzug. Die O₂-Differenzen reichen von 3.7 bis 48.0 ml. Der aerobe Energiebetrag wurde unter Berücksichtigung des kalorischen Äquivalents von 21.121 KJ/IO₂ (Stegemann 1991) bestimmt (Inbar et al. 1996; Beneke 2002, 2007; Jeukendrup, Wallis 2005; Wittekind et al. 2012). In anderen Untersuchungen wird mit einem niedrigeren kalorischen Äquivalent von 20.92 (Smith, Hill 1991) bzw. 20 KJ/l O₂ (Gastin 2001) kalkuliert, was sich dann auch in einem geringeren aeroben Energiebetrag ausdrückt. Die aerob generierte Energie von etwa 24 KJ der Probanden dieser Studie bedeutet einen aeroben Anteil der Gesamtenergie von

etwa 20%. Die Ergebnisse entsprechen anderen veröffentlichten Daten (Inbar et al. 1996; Beneke et al. 2002; Minahan et al. 2007).

Es existieren im Körper Sauerstoffspeicher wie das Myoglobin, Hämoglobin und das venöse System. Es wird kontrovers diskutiert, ob diese Sauerstoffspeicher bei körperlicher Leistung zur aeroben Energiegewinnung beitragen (Beneke et al. 2002; Astrand, Rohdahl 2003). Die Einbeziehung der angenommenen Sauerstoffreserven durch die Sauerstoffspeicher Hämoglobin und Myoglobin von etwa 400 ml (Åstrand, Rohdal 1977) in die Energiebilanz, würde einen Anstieg der aeroben Energie um etwa 36% bedeuten. Würden die Sauerstoffspeicher nach Ende des WAnT unmittelbar wieder mit Sauerstoff aufgefüllt, dann würde der Sauerstoff nicht in vollem Umfang zur Resynthese des Kreatinphosphats zur Verfügung stehen, was eine Auswirkung auf die Energiebilanz mit einer Verminderung des anaerob-alkalischen Energieanteils um etwa 20% zur Folge hätte. Folglich würde sich auch die Gesamtenergiebilanz verändern. Der Anteil der aeroben Energie würde etwa 24% und der anaerob-alkalischen Energie etwa 26% betragen (Beneke et al. 2002). Andere Autoren widersprechen dem und gehen davon aus, dass in der ersten Phase einer Belastung der Sauerstoff aus den lokalen Speichern nicht genutzt werden kann (Grassi et al. 2003; Whipp 2007). Zu diesem Thema herrscht noch Forschungsbedarf.

7.2. Anaerobe Energie

Zu Beginn dieses Kapitels sei kurz der Unterschied zwischen anaerober Leistungsfähigkeit und anaerober Kapazität aufgezeigt: Die anaerobe Leistungsfähigkeit ist die Summe der maximalen Umsatzraten (Arbeitsbeträge pro Zeit) der einzelnen Energie liefernden Systeme und beschreibt die höchste Flussrate. Die anaerobe Kapazität ist definiert als die Summe aller Arbeitsbeträge, die aus chemisch gespeicherter Energie anaerob gewonnen werden kann (Heck, Schulz 2002). Der WAnT ist ein Testverfahren für die anaerobe Leistungsfähigkeit.

7.2.1. Anaerob-alkalazide Energie

Die anaerob-alkalazide Energie wurde in der vorgelegten Untersuchung mit einem Biexponential-Modell zur Beschreibung der Sauerstoffkinetik während der Nachbelastungsphase, unter Berücksichtigung der Sauerstoffmenge der schnellen Komponente der Sauerstoffkinetik, bestimmt (Bogdanis et al 1995; Knuttgen 1970). Dem Modell zur Beschreibung der Sauerstoffkinetik während der Nachbelastungsphase liegt die Annahme zugrunde, dass Kreatinphosphat während der Belastung dephosphoryliert und unmittelbar nach der Belastung wieder sauerstoffabhängig rephosphoryliert wird (Knuttgen 1970; di Prampero 1981; di Prampero, Ferretti 1999; Beneke 2002, et al. 2010; Jenkins 2002; Wittekind et al. 2012). Die Sauerstoffmenge, die in der Phase der schnellen Komponente der Sauerstoffkinetik nach einem WAnT aufgenommen wurde, entspricht Ergebnissen anderer Studien (Beneke et al. 2002).

Dass die Anwendung des Biexponential-Modells zur Bestimmung der anaerob-alkalaziden Energie möglich ist wurde durch andere Untersuchungen, wie Kernspintomografie (Taylor et al. 1983), Muskelbiopsien (Harris et al. 1974; Jacobs 1982, Bangsbo et al. 1990, 1992) oder Bestimmung der Sauerstoffkinetik (Knuttgen 1970; Prampero, Ferretti 1999), bestätigt. Die anaerob-alkalazide Energiebereitstellung ist begrenzt, weil die ATP-und PCr- Vorräte limitiert sind. Die ATP-Synthese in den ersten 10 Sekunden beträgt ca. $15 \text{ mmol ATP}\cdot\text{kg Muskelrockenmasse}^{-1}\cdot\text{sec}^{-1}$ aus PCr-Abbau und Glykolyse (Lakomy 2000). Wobei der PCr-Abbau unmittelbar nach Kontraktionsbeginn seinen Höhepunkt hat und bereits nach 1.3 Sekunden (Maughan et al. 1997) nachlässt. Das Maximum der glykolytischen ATP-Produktion liegt bei ca. 5 Sekunden und bleibt dann einige Sekunden auf hohem Niveau (Maughan et al. 1997). Unterschiedliche Erwärmungen zeigen keinen Einfluss auf die schnelle Komponente der Sauerstoffaufnahme und die Rephosphorylierung (Wittekind, Beneke 2012). Die Probanden dieser Studie generierten für einen WAnT etwa 34 KJ Energie anaerob-alkalazid. Test und Retest korrelieren signifikant.

7.2.2. Anaerob-laktazide Energie

Die laktazide Energie wurde in der vorgelegten Untersuchung über das maximal gebildete Laktat der Nachbelastungsphase unter Berücksichtigung des O₂-Laktatäquivalents bestimmt. Das maximale Nachbelastungslaktat ist von der maximalen Umsatzrate des Laktats aus dem Muskel in den Extrazellularraum abhängig (Beneke 1999). Die laktazide Energie wurde über das Laktatmaximum und das O₂-Laktatäquivalent im Verhältnis zum Körpergewicht bestimmt und entspricht anderen Studien (di Prampero 1981; Mader, Heck 1986; Beneke, Meyer 1997). Unter der Annahme einer Muskelmasse von etwa 40% bei normalen Verdünnungsbedingungen des Gesamtkörperwassers (di Prampero 1973; Beneke 1988) und normaler Blutzusammensetzung liegt die Flussrate des intramuskulären Laktats bei einem WAnT im Bereich von etwa 0.77 bis 0.92 mmol·kg⁻¹·s⁻¹ (Beneke 2005, 2007) und entspricht muskelbiptischen Untersuchungen (Jones et al. 1985; Spriett et al. 1987). Andere Untersuchungen bestätigen dies. So wird beispielsweise die Flussrate des Laktats in glykolytischen Muskelfasern, die hauptsächlich bei einem WAnT beansprucht werden, mit etwa 0.5 bis 0.9 mmol·kg⁻¹·s⁻¹ angegeben (Ahlborg et al. 1972; Gollnick et al. 1972; Sahlin 1978). Bei längeren Belastungen sinkt die Flussrate ab und erreicht nach einer etwa 60 Sekunden dauernden intensiven Belastung einen Wert von 0.70 mmol·kg⁻¹·s⁻¹ (Spriett et al. 1987). In den ersten Sekunden eines WAnT erfolgt die Energiebereitstellung hauptsächlich über den ATP-und PCr-Abbau. Im weiteren Testverlauf bleibt die Glykolyse die hauptsächliche Energiequelle und es kommt zur Bildung von Laktat, einem Stoffwechselprodukt der Glykolyse. Da die Glykolyse nicht unbegrenzt läuft, kommt es im weiteren Verlauf des WAnT zu einer Limitierung der anaeroben-laktaziden Energiebereitstellung und somit zur Ermüdung, die sich im Leistungsabfall ausdrückt.

Dabei können verschiedene Faktoren eine Rolle spielen, die die Glykolyse beeinflussen. Dadurch, dass bei hochintensiven Leistungen die Glykolyserate kurzfristig um das hundertfache ansteigt, steigt die Konzentration von H⁺-Ionen deutlich an, was ein geringes Absinken des pH-Wertes bewirkt. Der Abfall des pH-Wertes bewirkt über die angestiegene Konzentration von H⁺-Ionen eine verminderte Aktivität der Schlüsselenzyme der Glykolyse, der Phosphofruktokinase und Phosphorylase, was eine verminderte ATP-Resynthese zur Folge hat (Hultman et al. 1990). In einem

anderen Erklärungsansatz wird die abnehmende Aktivität der Phosphorylase auf das Absinken der AMP-Konzentration im sarkoplasmatischen Retikulum zurückgeführt (Hermansen 1981). Auch scheinen Veränderungen der Elektrolyte Natrium (Na^+) und Kalium (K^+) bei der Ermüdung eine Rolle zu spielen, die zu Veränderungen des Ruhemembranpotentials der Zellen führen, was die Erregbarkeit beeinflusst und die Kontraktilität der Muskelzellen herabsetzt (Mairböurl, Maassen 2002). Das Existieren noch weiterer Erklärungsmodelle macht deutlich, dass auf diesem Gebiet noch Forschungsbedarf besteht. Eine einheitliche Auffassung besteht aber darin, dass es nicht den einen Mechanismus gibt, der die Ermüdung nach intensiver körperlicher Betätigung erklärt, sondern dass es sich um ein sehr komplexes Geschehen handelt (Wahl et al. 2009).

Beim WAnT werden etwa 60 KJ anaerob-laktazide Energie verbraucht. Die laktazide Energie, die über die gemessenen Werte bestimmt wurde ist fast gleich groß wie die laktazide Energie, die über die berechneten Werte ermittelt wurde. Die Ergebnisse der vorgelegten Studie stimmen mit den Ergebnissen anderer Studien überein (Beneke et al. 2002, 2005, 2007) und wurden auch durch Muskelbiopsien bestätigt (Jacobs et al. 1982). Der laktazide Energieanteil nach einer supramaximalen Leistung wie dem WAnT beträgt somit etwa 50% von der Gesamtenergie.

Die laktazide Energiemenge, die über das approximierte Laktat A des Extravasalraums ermittelt wurde ist mit etwa 70KJ größer als die Energiemenge, die über das Kapillarblutlaktat ermittelt wurde, da das Laktat des Extravasalraums auch größer als die maximale Laktatdifferenz des Kapillarbluts ist. Es bestehen bei allen laktaziden Energiebeträgen (gemessen, berechnet, Laktat A) signifikante Test-Retest Korrelationen und keine Unterschiede im Mittelwertvergleich. Die Ergebnisse der vorgelegten Untersuchung sind mit denen anderer Studien vergleichbar (di Prampero, Ferretti 1999; Beneke et al. 2002).

7.3. Gesamtenergie und Wirkungsgrad

Im Vergleich der Energieprofile, die aus den gemessenen, berechneten Laktatwerten und über das approximierte Laktat A des Extravasalraums ermittelt wurden, ist die Gesamtenergie aus den gemessenen Werte am niedrigsten. Geringfügig größer ist die Gesamtenergie der berechneten Werte, da die berechneten Laktatwerte in beiden Tests

auch geringfügig größer sind als die gemessenen Werte. Die Energie, die für eine supramaximale Leistung eines WAnT aufgebracht wird, ist zu etwa 20% aerob und 80% anaerob (davon etwa 50% laktazid und 30% alaktazid) und entspricht vergleichenden Studien (Beneke, Hütler 2002). Berücksichtigt man das approximierte Laktat A des Extravasalraums in der Bilanz der Gesamtenergie, so kommt es zu Veränderungen des energetischen Profils. Da das approximierte Laktat A des Extravasalraums etwa 2 mmol/l größer ist als die maximale Laktatdifferenz des Kapillarbluts, muss auch die Gesamtenergie, die über das Laktat A berechnet wurde, größer sein. Der laktazide Energieanteil steigt um 5% auf etwa 55% und der alaktazide Anteil fällt mit 27% etwas niedriger aus, ebenso wie der aerobe Anteil von etwa 18%.

Auch wenn es heute noch nicht allgemein üblich ist, das energetische Profil über das Laktat A des Extravasalraums zu bestimmen, besteht mit dieser Möglichkeit ein zusätzliches Detail zur Quantifizierung des Laktatstoffwechsels zur Verfügung. Das Laktat A des Extravasalraums repräsentiert das nach einer Leistung tatsächlich gebildete Laktat (Beneke et al. 2007, 2010), das nach seiner Bildung in der Muskelzelle nur der Glykolyse und dem aeroben Efflux ausgesetzt war.

Der mechanische oder biomechanische Wirkungsgrad, der der Quotient aus physikalischer Arbeit und dem Leistungsenergiebedarf des Organismus ist (Löwe-Riedel 1983), beschreibt den Nutzeffekt der aufgebrachten Arbeit. Im technischen Bereich liegt der Wirkungsgrad eines Otto-Motors bei etwa 30% (Löwe-Riedel 1983). Ein höherer Wirkungsgrad hat beim Menschen z.B. die aerobe Glykolyse mit etwa 38% im Gegensatz zur anaeroben Glykolyse mit etwa 2% (Löwe-Riedel 1983). Über den Wirkungsgrad nach einer hochintensiven Leistung gibt es keine einheitlichen Aussagen, weil es keine einheitliche Bestimmung der Gesamtenergie mit seinen aeroben, anaerob-alaktaziden und anaerob-laktaziden Anteilen gibt.

Da es in der Vergangenheit nicht möglich war, das energetische Gesamtprofil des WAnT aus allen drei Teilkomponenten und darüber den Wirkungsgrad zu bestimmen, versuchte man sich dem energetischen Profil und Wirkungsgrad mit Abschätzungen zu nähern. Zur Überprüfung der Validität des WAnT wurden beispielsweise die Leistungswerte peak-power und mean-power mit anderen Feldtests verglichen, die ein mehr oder weniger ausgeprägtes anaerobes Profil hatten (Bar-Or et al. 1977; Kaczowski et al. 1982). Im Abschnitt B (Stand der Wissenschaft) der vorliegenden

Arbeit sind verschiedene Testverfahren aufgeführt, mit denen man versuchte, die Leistung und die anaerobe Leistungsfähigkeit einer hochintensiven Kurzzeitbelastung zu messen, bzw. abschätzen zu können. Die Vielfalt der aufgeführten Testverfahren ist dem Umstand geschuldet, dass es, im Gegensatz zur Bestimmung der aeroben Leistungsfähigkeit, nicht einfach ist, die anaerobe Leistungsfähigkeit zu messen. Auch forschte man unter Laborbedingungen mit hochintensiven Belastungstests, ob über die Bestimmung des Ausmaßes von Parameteränderungen der Ventilation oder des Laktats die Validität zu bestimmen sei (Inbar et al. 1981).

Mit Biopsien können die Laktat-, ATP- und PCr-Konzentrationen eines Muskels gemessen werden (Jacobs et al. 1982) und man bekommt über Hochrechnungen über die bei dem Test eingesetzte Skelettmuskulatur eine Einschätzung des anaeroben Energieanteils einer solchen Leistung. Mit Biopsien werden Konzentrationen gemessen und keine Mengen. Allerdings überwiegen die Nachteile der Methode, da nur eine kleine Muskelprobe untersucht werden kann. Wenn bei einem Leistungstest wie dem WAnT etwa 80 % der Skelettmuskulatur aktiviert sind (Beneke et al 2002), stellt das Biopsat nur einen sehr kleinen Ausschnitt aus der Arbeitsmuskulatur dar. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Laktatkonzentration trotz Hochrechnung unterschätzt wird (Bangsbo 1998), da es nicht einfach ist, aus einem kleinen Anteil eines einzelnen Muskels Rückschlüsse auf die absolvierte Ganzkörperleistung und deren Stoffwechselprozessen zu erlangen. Außerdem ist jede Biopsie invasiv und stellt eine Verletzung des Muskels dar. Es gilt auch, die ethische Aspekte dieser invasiven Methode, insbesondere bei Kindern und Kranken zu diskutieren. Auch ist zu bedenken, dass Biopsien nur von ärztlichen Mitarbeitern durchgeführt werden dürfen. Blutentnahmen aus den Ohrläppchen, die in der Praxis eine weit verbreitete Methode zur Laktatbestimmung sind, dürfen auch von medizinisch angeleiteten Mitarbeitern durchgeführt werden. Die Durchführung von Muskelbiopsien ist zudem kostenintensiver als die Blutentnahmen aus den Ohrläppchen.

Mit der relativ neuen Methode der nicht invasiven ^{31}P -Magnetresonanzspektroskopie können ebenfalls Stoffwechselmetaboliten gemessen werden (Gastin 2001). Diese Methode ist aber mit einem großen technischen, zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden. Die Vorteile der Methode sind, dass es ein nicht invasives Verfahren ist und dass komplette Muskeln und ihre Stoffwechselforgänge untersucht werden können.

Zudem ist es eine ungefährliche Methode, die die gleichen Ausschlusskriterien wie die konventionelle MRI hat, d.h. Ausschluss von Probanden mit Herzschrittmachern oder Vorhandensein von magnetischen Materialien im Körper (Reiser, Kuhn, Debus 2006). Nachteile der Methode sind, dass ein relativ großer technischer Aufwand nötig ist, dass sie teuer ist und dass die Untersuchung etwa eine Stunde dauert. Die ³¹P-MRS ist aber schon heute eine wichtige Ergänzung in der Sportwissenschaft.

Häufig wurde in der Vergangenheit der anaerobe Energieanteil mit der Sauerstoffdefizitmethode ermittelt, bei der angenommen wird, dass die Sauerstoffmenge der Nachbelastungsphase äquivalent zum Sauerstoffdefizit der Anfangsphase der Belastung verhält und das daraus Rückschlüsse über die PCr-Resynthese und den Laktatstoffwechsel möglich sind (Hollmann 2006). Allerdings widersprechen viele Autoren dieser Annahme, da nur etwa ein Drittel der aufgenommenen Sauerstoffmenge nach einer hochintensiven Belastung so genutzt wird (Bangsbo et al. 1990). In der Erholungsphase nach einer solchen Leistung sind inzwischen andere Faktoren bekannt, die den Sauerstoffverbrauch anheben, aber nicht in den anaeroben Energiestoffwechsel involviert sind, wie zum Beispiel hormonelle Faktoren oder belastungsbedingte Temperaturerhöhungen (Gasser, Brooks 1984; Gastin 2001; Vandewalle et al. 1987). Obwohl ein enges Verhältnis zwischen dem Sauerstoffdefizit und Veränderungen im Muskelstoffwechsel einer kleinen Muskelgruppe nachgewiesen werden konnte ist es nicht möglich, daraus exakte Quantifizierungen über die anaerobe Energiebereitstellung bei Ganzkörperarbeit, also bei Arbeit mit überwiegender Aktivität großen Muskelgruppen, vorzunehmen (Medbø 1988; Bangsbo 1998).

Ein Problem bei der Quantifizierung der anaeroben Energie ist die Tatsache, dass in früheren Untersuchungen häufig Laktat und PCr nicht bestimmt wurden oder nicht bestimmt werden konnten und man sich mittels Abschätzungen über die genannten Verfahren versuchte, sich dem Gesamtenergiebetrag zu nähern. Möglicherweise erfolgten die durchgeführten Laktatmessungen aber auch über einen zu kurzen Zeitraum, sodass das Laktatmaximum nicht sicher gemessen werden konnte. Wenn die anaerobe Energie nicht genau ermittelt wird, bewirkt dies Ungenauigkeiten bei der weiteren Abschätzung des Gesamtenergieprofils.

Die aerobe Energie einer Leistung wird heute eigentlich einheitlich über die aufgenommene Sauerstoffmenge während der Leistung bestimmt. Da die Bestimmung des anaerob-alkalischen und -laktischen Energieanteils schwieriger ist, wird häufig über den aeroben Energiebetrag und den angenommenen Wirkungsgrad das energetische Profil abgeschätzt.

Dass Abschätzungen des energetischen Profils zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können wird in dem folgenden Beispiel verdeutlicht. Nach Untersuchungen von Maximalbelastungen mit einer Dauer von 10 Sekunden bis 120 Minuten und Abschätzung der aeroben und anaeroben Energieanteile unter Berücksichtigung des Sauerstoffdefizits wurde gefolgert, dass es bei intensiven kürzeren Belastungen und einem angenommenen Wirkungsgrad von 22%, nach zwei Minuten zu einem Gleichgewicht der aeroben und anaeroben Energie kommt (Astrand, Rodahl 1970). Eine andere Arbeitsgruppe hat nach einer Untersuchung mit ähnlichem Versuchsablauf und dem gleichem angenommenen Wirkungsgrad gefolgert, dass das Gleichgewicht der aeroben und anaeroben Energie erst nach drei bis vier Minuten besteht (Mathew, Fox 1971). Dieser Unterschied ist dadurch bedingt, dass die anaeroben Energiebeträge unterschiedlich bestimmt bzw. geschätzt wurden (Gastin 2001) und verdeutlichen, wie wichtig eine genaue Bestimmung des energetischen Profils und des Wirkungsgrades ist, da es sonst zu Fehleinschätzungen kommt.

Ausgehend vom Kenntnisstand, dass der Wirkungsgrad submaximaler Leistung bei 20 bis 25% liegt und der Wirkungsgrad einer supramaximalen Leistung geringer ist, schätzte die Arbeitsgruppe um Inbar (et al. 1996) den Wirkungsgrad für einen WAnT auf etwa 16-22% ein. Sie untersuchten, welche Auswirkungen die Höhe des Wirkungsgrades unter Berücksichtigung der Sauerstoffaufnahme während eines WAnT auf den aeroben Energieanteil hat. Bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 22% ergab sich ein aeroben Energieanteil von 28.6% und bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 18% war der aerobe Energieanteil nur 13% (Inbar et al. 1996). Der Wert von 13% wurde unter der Annahme ermittelt, dass das Sauerstoffdefizit der Sauerstoffschuld entspricht (Inbar et al. 1996). Andere Autoren beschreiben ähnlich niedrige Werte (Jacobs 1997, McCartney et al. 1983). Andere Studien bestimmten die anaerobe Energie eines WAnT über das maximal akkumulierte Sauerstoffdefizit (MAOD) und beschrieben Wirkungsgrade von 23 bis 33% (Gastin 1994; Smith, Hill 1991). Kavanagh und Jacobs (1988) beschreiben den Wirkungsgrad nach einer

hochintensiven Kurzzeitbelastung mit 25% und einem aeroben Energieanteil von 18.5% (Gastin 2002). In der Literatur werden aber auch höhere Werte angegeben. Bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 25% wird der aerobe Energieanteil eines WAnT mit 27% angenommen (Stevens, Wilson 1986). Diese Beispiele verdeutlichen, dass die möglichst genaue Ermittlung der Energieteilbeträge und des Wirkungsgrades von großer Bedeutung sind, um Fehleinschätzungen zu vermeiden, denn unterschiedliche Annahmen eines Wirkungsgrades haben direkte Auswirkungen auf die energetischen Ergebnisse anderer Studien, die über die Sauerstoffaufnahme bei angenommenem konstantem Wirkungsgrad berechnet wurden (Inbar 1985; Seresse 1988). Es wird deutlich, dass der Wirkungsgrad umso besser bestimmt werden kann, je präziser die Quantifizierung des energetischen Profils mit seinen aeroben, anaerob-alaktaziden und anaerob-laktaziden Anteilen, ist. Obwohl dies verständlich ist, ist die Bestimmung aller drei Teilenergiebeträge bis heute nicht einfach und keinesfalls einheitlich.

Im Jahr 2002 wurde eine Arbeit veröffentlicht, die erstmals alle drei Teilkomponenten des energetischen Profils eines WAnT gemessen hat (Beneke et al. 2002). Die Ergebnisse wurden mit Untersuchungen anderer Studien verglichen, die die einzelnen Teilenergiebeträge ermittelt oder gemessen haben und konnten verifiziert werden. Damit war es erstmals möglich, das Gesamtenergieprofil eines WAnT über die drei Energieteilkomponenten zu quantifizieren und aus der Gesamtenergie auch den Wirkungsgrad zu bestimmen. In der vorliegenden Untersuchung wurden die drei Teilenergiebeträge mit den gleichen Methoden bestimmt.

Hier zeigt es sich, dass die Wirkungsgrade, die über die gemessenen und mit der „neuen“ Formel berechneten Laktatwerten ermittelt wurde, nur geringe Unterschiede aufweist, da sich die Laktatmaxima auch nur gering unterscheiden. Bei der Herleitung über die gemessenen Laktatwerte beträgt er um die 17% und ist nur geringfügig kleiner als bei den berechneten Werten. Der Wirkungsgrad, der unter Berücksichtigung des approximierten Laktats A des Extravasalraums ermittelt wurde ist etwa 9% größer als der Wirkungsgrad, der aus den gemessenen bzw. berechneten maximalen Laktatdifferenzen des Kapillarbluts ermittelt wurde.

Der Wingate Anaerobic Test ist ein valides Verfahren zur Ermittlung der anaeroben Leistungsfähigkeit ist. Die Bestimmungsmethoden der aeroben, anaerob-alaktaziden und anaerob-laktaziden Energieanteile eines WAnT unserer Studie, über die Sauerstoffaufnahme während des WAnT, die Sauerstoffaufnahme nach WAnT unter

Berücksichtigung der schnellen Komponente der Sauerstoffaufnahme und das höchste Nachbelastungslaktat, führt zu Ergebnissen, die durch andere Untersuchungen von Teilenergiebeträgen verifiziert wurden. Der WAnT selbst und auch die Energiebestimmungen über die Atemgase und die Kapillarblutentnahmen sind sehr praxistauglich.

F Zusammenfassung

Der WAnT ist ein Testverfahren für die anaerobe Leistungsfähigkeit. Nach einer supramaximalen Leistung wie dem WAnT kommt es zu einem schnellen, hohen Anstieg der Laktatwerte im Kapillarblut auf etwa 14 mmol/l, die im weiteren Verlauf wieder absinken. Das Laktatverhalten hat einen reproduzierbaren Verlauf und kann mit einem Drei-Parameter Bi-Exponential Modell („alte“ Formel) über einen extravasalen Laktatanstieg (A), die Invasionskonstante (k_1), die Eliminationskonstante (k_2) beschrieben und das Laktatmaximum und dessen Zeitpunkt berechnet werden. Für dieses Berechnungsmodell gilt die Anwendungsbedingung, dass das Vorbelastungslaktat nach der Vorbereitung auf den Test nicht angestiegen ist. Da bei vielen Probanden ein solcher Anstieg jedoch vorliegt, wurde die Formel um einen Term erweitert, der diesen Zustand berücksichtigt („neue“ Formel). Die vorliegende Arbeit untersucht das Laktatverhalten nach einem WAnT mit dem „alten“ und „neuen“ Drei-Parameter Bi-Exponential Modell, sowie die manuell gemessenen und daraus hergeleiteten Ergebnisse auf mögliche Unterschiede bezüglich der Dynamik des Laktatzeitverlaufs und wie sich diese Unterschiede auf die Beurteilung des energetischen Profils des WAnT auswirken.

11 männliche gesunde Probanden (Alter 26.82 ± 4.56 Jahre, Größe 184.45 ± 5.96 cm, Gewicht 81.75 ± 6.92 kg) absolvierten innerhalb von einer Woche je zwei WAnT nach einer standardisierten Erwärmung niedriger Intensität. Vor und nach den Tests wurden bis zum Ablauf der dreißigsten Minute zu definierten Zeitpunkten aus den Ohrläppchen 22 Blutproben entnommen und die Laktatwerte bestimmt. Außerdem wurden die Leistungswerte und Atemgase vor, während und nach dem WAnT ermittelt.

Beide Formeln erklärten 96% der Varianz des Laktatverhaltens. Die Verwendung der „alten“ Formel bei Probanden mit erhöhten Vorbelastungslaktatwerten (Test1: 1.42 ± 0.57 , Test2: 1.32 ± 0.67 mmol/l) führte zu systematischen Anwendungseffekten, die sich auf alle Parameter auswirken. Das Laktat A des Extravasalraums wird überschätzt (1.75%). Die Dynamik des Laktatverhaltens verändert sich. Die Invasionskonstante k_1 wird kleiner (3.51%), die Eliminationskonstante k_2 wird größer (1.46%). Aus diesem Grund sollten die Berechnungen bei erhöhtem Vorbelastungslaktat nur noch mit der „neuen“ Formel durchgeführt werden. Der aerobe Energieanteil wurde über die O_2 -Aufnahme während des Belastung unter Berücksichtigung des Energieäquivalents ($21.121 \text{ KJ}\cdot\text{l}^{-1}$) bestimmt und ist $24.1 (\pm 4.0 \text{ KJ Test1})$ bzw. $23.8 (\pm 3.7 \text{ KJ Test2, } p > 0.05)$. Der alaktazide Energieanteil wurde über die schnelle Komponente der O_2 -Aufnahme nach Belastungsende unter Berücksichtigung des Energieäquivalents ermittelt und beträgt $34.0 (\pm 9.9 \text{ KJ Test1})$ bzw. $34.6 (\pm 6.8 \text{ KJ, Test2, } p < 0.05)$. Der laktazide Energieanteil wurde unter Berücksichtigung des O_2 -Laktatäquivalents ($2.7 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$) bestimmt und beträgt aus den gemessenen Werten $58.1 (\pm 6.3 \text{ KJ Test1})$ und $60.3 (\pm 7.1 \text{ KJ Test2, } p < 0.05)$, sowie aus den berechneten Werten $58.5 (\pm 5.6 \text{ KJ Test1})$ und $60.6 (\pm 6.7 \text{ KJ Test2, } p < 0.05)$ und aus dem Laktat A ermittelten Werten $69.4 (\pm 8.3 \text{ KJ Test1})$ und $72.0 (\pm 8.2 \text{ KJ Test2, } p < 0.05)$. Unter Test-Retest Bedingungen ist die Gesamtenergie, die aus den gemessenen und mit der „neuen“ Formel berechneten Werten ermittelt wurde fast nicht unterschiedlich. Sie beträgt bei den gemessenen Werten $116.2 (\pm 0.77 \text{ KJ Test1})$ und $118.7 (\pm 0.72 \text{ KJ Test2, } p < 0.05)$, sowie bei den berechneten Werten $116.6 (\pm 0.73 \text{ KJ Test1})$ und $119.0 (\pm 0.70 \text{ KJ Test2, } p < 0.05)$. Höher ist die Gesamtenergie, die aus dem Laktat A des Extravasalraums bestimmt wurde ($127.5 \pm 0.76 \text{ KJ Test1, } 130.0 \pm 0.88 \text{ KJ Test2, } p < 0.05$). Der mechanische Wirkungsgrad beträgt 16.86% (gemessene Laktatwerte) bzw. 16.9% (berechnete Laktatwerte). Da das Laktat A etwa 2 mmol/l höher ist als die maximale Laktatdifferenz des Kapillarbluts, muss auch die daraus bestimmte Gesamtenergie größer sein und beträgt 128 KJ (Test1) und 130 KJ (Test2). Das bedeutet einen größeren Wirkungsgrad von 18.51%. Unterschiedliche Annahmen eines Wirkungsgrades haben direkte Auswirkungen auf die energetischen Ergebnisse anderer Studien. Etwa 50% der Energie, die für einen WAnT aufgebracht werden muss, ist anaerob-laktazid, etwa 30% anaerob-alaktazid und etwa 20% aerob.

Die Entwicklung des „neuen“ Drei-Parameter Bi-Exponential Modells und seine Anwendung ist eine Bereicherung der Leistungsdiagnostik. Mit ihm steht ein zuverlässiges Instrument der anaeroben Leistungsdiagnostik zur Verfügung, das in der Praxis gut durchführbar ist. Eine Optimierung der Leistungsdiagnostik ist eine wichtige Voraussetzung, um die Trainingsplanung und damit auch die Leistungsentwicklung eines Sportlers zu optimieren. Da im Hochleistungssport bereits kleine Veränderungen über Sieg oder Niederlage entscheiden, ist es von Vorteil, durch verbesserte Leistungsdiagnostik den Sportler differenzierter zu trainieren und seine Leistung verbessern zu können.

G ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A	Approximiertes Laktat des Extravasalraums
Abb	Abbildung
AMP	Adenosinmonophosphat
ATP	Adenosintriphosphat
H ⁺	Wasserstoffproton
k ₁	Invasionskonstante
k ₂	Eliminationskonstante
kg	Kilogramm
KG	Körpergewicht
KJ	Kilojoule
l	Liter
min	Minute
MW	Mittelwertvergleich
ml	Milliliter
mmol/l	Millimol pro Liter
N ₂	Stickstoff
O ₂	Sauerstoff
r	Korrelationskoeffizient
SD	Standardabweichung
Tab	Tabelle
·VO ₂	Sauerstoffaufnahme
W	Watt
WAnT	Wingate Anaerobic Test

H LITERATURVERZEICHNIS

- Ahlborg B, Bergstrom J, Ekelund LG, Guarnieri G, Harris RC, Hultman E, Nordesjo L-O. *Muscle metabolism during isometric exercise performed at constant force*. J Appl Physiol. 1972;33:224-8.
- Åstrand P-O. *Aerobic and anaerobic energy sources in exercise*. Med Sport Sci. 1981;13:22-37.
- Åstrand PO, Rodahl, K. *Textbook of work physiology*. 4. Auflage. Champaign (IL): Human Kinetics; 2003.
- Ayalon A, Inbar O, Bar-Or O. *Relationships among measurements of explosive strength and anaerobic power*. International series on sports sciences. 1: Biomachanics IV, eds Nelson RC, Morehouse CA. Baltimore: University Park Press; 1974;527-32.
- Bangsbo J. *Quantification of anerobic energy production during intense exercise*. Med Sci Sports Exerc. 1998;30(1):47-52.
- Bangsbo J, Gollnick PD, Graham TE, Juel C, Kiens B, Mizuno M, Saltin B: *Anaerobic energy production and O2 deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans*. J Physiol. 1990; 422(3):539-59.
- Bangsbo J, Graham TE, Kiens B, Saltin B: *Elevated muscle glycogen and anaerobic energy production during exhaustinve exercise in man*. J Physiol. 1992; 451:205-227.
- Bar-Or O, Dotan R, Inbar O. *A 30-second all-out ergometric test: Its reliability and validity for anaerobic capacity*. Isr J Med Sci. 1977;13:326.
- Bar-Or O, Berman L, Salsberg A. *An abbreviated Wingate anaerobic test for woman and men of advanced age*. Med Sci Sports Exerc. 1992;24:22.
- Bateman H: *The solution of an system of differential equations occuring in the theory of radioactive transformations*. Proc Cambridge Phil Soc. 1910;15:423-27.
- Beneke R. *Laktat bei Dauerleistung*. Habilitationsschrift, FU Berlin 1999.
- Beneke R, Boldt F, Richter T, Kress A, Leithäuser R, Behn C. *Laktatmessung in der Sportmedizin – drei Messgeräte im Vergleich*. Dt Z Sportmed 1994;45:60-69.
- Beneke R, Hütler M, Jung M, Leithäuser R.M. *Modelling the blood lactate kinetics at maximal short-term exercise conditions in children, adolescents and adults*. J Appl Physiol. 2005;99:499-504.

- Beneke R, Hütler M, Leithäuser RM. *Maximal lactate-steady-state independent of Performance*. Med Sci Sports Exerc 2000;32:1135-9.
- Beneke R, Leithäuser R. *Anaerobic and aerobic utilization*. Thieme e-Book, Mooren (Hrsg). 2008.
- Beneke R, Masen DJ, Leithäuser RM. *Modelling the lactate response to short-term all out exercise*. Dyn Med. 2007;9(11);6:10.
- Beneke R, Meyer K: *Walking performance and economy in chronic heart failure patients pre and post exercise training*. Eur J Appl Physiol 1997;75:246-51.
- Beneke R, Pollmann C, Bleif I, Leithäuser RM, Hutler M: *How anaerobic is the Wingate Anaerobic Test for humans?* Eur J Appl Physiol. 2002 Aug; 87(4-5):388-92.
- Beneke R, Wittekind A, Mühlhng M, Bleif I, Leithäuser RM: *Lactate response to short term exercise with elevated starting levels*. Eur J Appl Physiol. 2010 Sept; 110(1):215-8.
- Berg JM, Tymoczko JL, Stryer L: *Biochemie*. Spectrum der Wissenschaft. 5. Auflage, 2003; 564-565.
- Berg U. *Human power at subnormal body temperature*. Acta Physiol Scand (Suppl.) 1980;478.
- Bergström J. *Muscle electrolytes in man, determined by neutron activation analysis on needle biopsy specimens: a study on normal subjects, kidney patients and patients with chronic diarrhoe*. Scand J Clin Lab Investing. 1962;14 Suppl.68:1.
- Bertalanffy L. *The Theory of Open Systems in Physics and Biology*. Science. 1950;111:23-29.
- Bishop D, Jenkins DG, Howard A. *The critical power function is dependent on the duration of the predictive exercise tests chosen*. Int J Sports Med.1998;19:125-29.
- Böning D, Maassen N. *Physiologische "Nebenwirkungen" der Milchsäure*. Dt. Zeitschrift für Sportmedizin. 2008;12:292-296.
- Boesch C. *Magnetresonanz-Spektroskopie in vivo*. AMSM-Paper. Labor und Medizin. 1997;24:245-253.
- Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, et al. *Recovery of power output and muscle metabolites following 30 s of maximal sprint cycling in man*. J Appl Physiol. 1995;482(2):467-80.

- Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, et al. *Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise*. J Appl Physiol 1996;80(3):876-84.
- Boobis LH, Williams C, Wooton SA. *Human muscle metabolism during brief maximal Exercise*. J Physiol (Lond). 1982;338:21-22.
- Borg G. *Physical performance and perceived exertion*. Thesis. Lund:Gleerup; 1962.
- Borg G, Edstrom EG, Marklund G. *A bicycle ergometer for physiological and psychological studies*. Report no.24, Institute for Applied psychology, University of Stockholm; 1971.
- Bouchard C, Taylor AW, Simoneau J-A, Dulac S. *Testing anaerobic power and capacity*. In *Physiological testing of the high-performance athlete*, eds. MacDougall JD, Wegner HA, Green HJ. Champaign (IL): Human Kinetics; 1991: 175-221.
- Braumann K, Busse M, Maassen N. *Zur Interpretation von Laktatleistungskurven*. Leistungssport. 1987;17(4),35-8.
- Brooks GA. *Cell-cell and intracellular lactate shuttles*. J Physiol. 2009; Dec 1; 587(23):5591–600.
- Brooks GA, Brooks TG, Brooks S. *Laktat als metabolisches Signal der Genexpression*. Dt. Ztschrift für Sportmedizin. 2008. 12: 280-286.
- Brooks GA, Fahey TD, Baldwin KM. *Exercise Physiology*. McGraw-Hill; 2004.
- Cook DI, Lingard JM, Wegmann E, Young JA. *Lehrbuch der Physiologie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 1994.
- Cunningham D, Faulkner J. *The effect of training on aerobic and anaerobic metabolism during a short exhaustive run*. Med Sci Sports Exerc. 1969;1:65-69.
- Davies CTM, Rennie R. *Human power output*. Nature. 1968;217:770.
- De Bruyn-Prévost P. *Essai de mise au point d'une epreuve anaérobic sur bicyclette ergométrique*. Med du Sport. 1975;49:202-6.
- Dobson GP, Parkhouse WS, Weber JM, Stuttard E, Harman J, Snow DH, Hochachka PW. *Metabolic changes in skeletal muscle and blood of greyhounds during 800-m track sprint*. Am J Physiol. 1988;255:513-19.
- Dost FH: *Grundlagen der Pharmakokinetik*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag. 1968;29-47.
- Dotan R, Bar-Or O. *Load optimization for the wingate anaerobic test*. J Appl Physiol Occup Physiol. 1983;51(3):409-17.

- Falgairrette G, Duche P, Bedu M, Fellmann N, Coudert J. *Bioenergetic characteristics in prepubertal swimmers. Comparison with active and non-active boys.* Int J Sports Med. 1993 Nov;14(8):444-8.
- Falk B, Tenenbaum G. *The effectiveness of resistance training in children. A meta-analysis.* Sports medicine Auckland NZ. 1996; 22:176-186.
- Fox EL, Robinson S, Wiegmann DL. *Metabolic energy sources during continuous and interval running.* J Appl Physiol. 1969;27(2):174-8.
- Frauendorf H, Kobryn U, Gelbrich W, Erdmann U. *Ergometrische Untersuchungen an unterschiedlichen Muskelgruppen in ihrer Auswirkung auf Herzschlagfrequenz und Blutdruck.* Z Klin Med. 1986;41:343-346.
- Freund H, Gendry P: *Lactate kinetics after short strenuous exercise in man.* Eur J Appl Physiol. 1978;39:123-135.
- Freund H, Oyono-Enguelle S, Heitz A, Marbach J, Ott C, Gartner M. *Effect of Exercise duration on lactate kinetics after short muscular exercise.* Eur J Appl Physiol. 1989;58:534-2.
- Freund H, Zouloumian P. *Lactate after exercise in man: I. Evolution kinetics in arterial blood.* Eur J Appl Physiol. 1981;46(2):121-33.
- Freund H, Zouloumian P. *Lactate after exercise in man: IV. Physiological Observations and model predictions.* Eur J Appl Physiol. 1981;46(2):161-76.
- Gaesser GA, Brooks GA. *Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review.* Med Sci Sports Exerc. 1984;16(1):29-43.
- Gastin PB. *Energy System Interaction and Relative Contribution During Maximal Exercise.* Sports Med. 2001;31(10):725-741.
- Gastin PB, Lawson DL. *Variable resistance all-out test to generate accumulated oxygen deficit and predict anaerobic capacity.* Eur J Appl Physiol. 1994;69:331-6.
- Gollnick PD, Bayly WM, Hodgson DR. *Exercise intensity, training, diet, and lactate concentration in muscle and blood.* Med Sci Sports Exerc. 1986;18:334-40.
- Grassi B, Pogliaghi S, Rampichini S, Quaresima V, Ferrari M, Marconi C, Cerretelli P. *Muscle oxygenation and pulmonary gas exchange kinetics during cycling exercise on-transitions in humans.* J Appl Physiol. 2003;95(1):149-58.
- Green HJ. *Manifestations and sites of neuromuscular fatigue.* In: Taylor AW, ed. Biochemistry of exercise VII: international series on sports sciences. Champaign (IL): Human Kinetics; 1990:13-35.

- Guerra M, Gine-Garriga M, Fernhall B. *Reliability of Wingate testing in adolescent with Down syndrome*. *Pediatr Exerc Sci*. 2009 Feb;21(1):47-54.
- Harris RC, Hultmann E, Nordesjö LO. *Glycogen, glycolytic intermediates and high-energy phosphates determined in biopsy samples of musculus quadriceps femoris of man in rest*. *Scand J Clin Lab Invest*. 1974 April;(33)109-20.
- Hauser T, Bartsch D, Schulz H. *Reliabilität der Leistung und Laktatkonzentration im Maximalen Laktat-steady-state bei Radergometrie*. *Dtsch Z Sportmed*. 2011;62:320-3.
- Hebestreit H, Meyer F, Heigenhauser GJ, Bar-Or O. *Plasma metabolites, volume, and Electrolytes following 30-s high intensity exercise in boys and men*. *Eur J Appl Physiol*. 1996;72:563-9.
- Hebestreit H, Mimura K-I, Bar-Or O. *Recovery of muscle power after high-intensity short-term exercise: comparing boys and men*. *Am Phys Society*, 1993.
- Heck H, Schulz H. *Methoden der anaeroben Leistungsdiagnostik*. *Dtsch Z Sportmed* 2002;53,Nr.7+8.
- Heck H. *Muskulärer Energiestoffwechsel und sportliche Aktivität*. *Blickpunkt der Mann*. 2006; 4(4):23-28.
- Heller E. *Die Bestimmung der aeroben und anaeroben Leistungsfähigkeit im Jahres-Längsschnitt bei trainierten und untrainierten Männern*. Dissertation. Eberhard-Karls-Universität Tübingen. 2007.
- Hellwig T, Liesen H, Mader A, Hollmann W. *Möglichkeiten einer sprintspezifischen Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung mit Hilfe der Blutlaktatkonzentration*. *Dtsch Z Sportmed*. 1988;(39)392-406.
- Hermansen L. *Muscular fatigue during maximal exercise of short duration*. *Med Sport Sci*. 1981;13:45-52.
- Hill AV. *Muscular Activity*. Baltimore: Williams & Wilkins; 1925.
- Hill AV, Long CHN, Lupton H. *Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilisation of oxygen*. London: Proc Roy Soc. 1924-1925;97:84-138.
- Holloway SA, Sundstrom D, Senior DF. *Effect of acute induced metabolic alkalosis on the acid/base responses to sprint exercise of six racing greyhounds*. *Research in Veterinary Science*. 1996;Nov;245-251.
- Hollmann W, Strüder H, Predel H, Tagarakis C. *Spiroergometrie. Kardiopulmonale Leistungsdiagnostik des Gesunden und Kranken*. Stuttgart: Schattauer Verlag; 2006.

- Hultman E, Bergström M, Spriet LL, et al. *Energy metabolism and fatigue*. In: Taylor AW, ed. *Biochemistry of exercise VII: international series on sports sciences*. Champaign (IL): Human Kinetics; 1990;73-92.
- Inbar O. *The Wingate Anaerobic Test: Its performance, characteristics, applications, and norms*. Netanya, Israel: Wingate Institute (Hebrew); 1985.
- Inbar O, Bar-Or O. *Anaerobic characteristics in male children and adolescents*. *Med Sci Sports Exerc*. 1986;18:264-69.
- Inbar O, Alvares DX, Lyons MA. *Exercise-induced asthma. A comparison between two modes of exercise stress*. *Eur J Respir*. 1981;Dis.62:160-67.
- Inbar O, Bar-Or O, Skinner J. *The Wingate Anaerobic Test*. Champaign (IL): Human Kinetics; 1996.
- Jacobs I. *The effect of thermal dehydration on performance of the Wingate test of anaerobic power*. Unpublished master's thesis. Windsor, Ontario: University of Windsor; 1979:1-76.
- Jacobs I, Bar-Or O, Karlsson J, et al. *Changes in muscle metabolites in females with 30-s exhaustive exercise*. *Med Sci Sports Exerc*. 1982;14(6):457-60.
- Jacobs I, Tesch A, Bar-Or O, Karlsson J, Dotan R. *Lactate in human skeletal muscle after 10 and 30 s of supramaximal exercise*. *J Appl Physiol*. 1983;55(2):365-367.
- Jenkins DG, Quigley B.M. *The Y-intercept of the critical power function as a measure of anaerobic work capacity*. *Ergonomics*. 1991;34:13-22.
- Jeschke D, Lorenz R, Fay H. *Diagnostik der Stoffwechsellkapazität bei kurzzeitigen Maximalbelastungen*. In: Bundesinstitut für Sportwissenschaft (Hrsg.), *BISp Jahrbuch 1996*. Köln; 1997;135-140.
- Jeukendrup AE, Wallis GA. *Measurement of substrate oxidation during exercise by means of gas exchange measurements*. *Int J Sports Med*. 2005;26(Suppl 1):28-37. doi:10.1055/s-2004-830512.
- Kaczowski W, Montgomery DL, Taylor AW, Klissouras V. *The relationship between muscle fiber composition and maximal anaerobic power and capacity*. *J Sports Med Phys Fit*. 1982;22:407-13.
- Karelis AD, Marcil M, Peronnet F, Gardiner PF. *Effect of lactate infusion on M-wave characteristics and force in the rat plantaris muscle during repeated stimulation in situ*. *J Appl Physiol*. 2004; 96:2133-2138.

- Katch V, Weltman A, Martin R, Gray L. *Optimal test characteristics for maximal anaerobic work on the bicycle ergometer*. Res.Q. 1977;48:319-26.
- Kavanagh MF, Jacobs I. *Breath-by-breath oxygen consumption during performance of the Winagte Test*. Can J Sport Sci. 1988 Mar;13(1):91-3.
- Knuttgen HG. *Oxygen debt after submaximal physical exercise*. J Appl Physiol. 1970 Nov;29(5):651-7.
- Kuno S, Takahashi H, Fujimoto K, Akima H, Miyamaru M, Nemoto I, Itai Y, Katsuta S. *Muscle metabolism during exercise using phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy in adolescents*. Eur J Appl Physiol Occup Physiol. 1995;70(4):301-4.
- Krogh A, Lindhard J: *The changes in respiration at the transition from work to rest*. J Physiol Lond. 1920;53:431-437.
- Lakomy HKA. *Physiology and biochemistry of sprinting*. In: Hawley JA, ed. Running: handbook of sports medicine and science. Oxford: Blackwell Science; 2000:1-13.
- Leitlinien zur Belastungsuntersuchung in der Sportmedizin*. DGSP. 2002.
- Löwe B, Riedel A. *Lehrbuch „Stoffwechsel-Ökologie“*. Schwententhal: Buchner Verlag; 1983.
- Mader A, Heck H. *A theory of the metabolic origin of „anaerobic threshold“*. Int J Sports Med. 1986;7:45-65.
- Mader A, Liesen H, Heck H, Philippi H, Rost R, Schürch P, Hollmann W. *Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor*. Sportarzt und Sportmedizin. 1976;27(4):80-88 und (5):109-112.
- Mairböurl H, Maassen N. *Ionenhomöostase, Muskelkontraktibilität und muskuläre Ermüdung*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin. 2002;9:238-242.
- Margaria R, Edwards HAT, Dill DB. *The possible mechanisms of contacting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction*. Am J Physiol. 1933;106:689-715.
- Margaria R, Aghemo P, Rovelli E. *Measurement of muscular power (anaerobic) in man*. J Appl Physiol. 1966;21:1662-64.
- Margaria R, Oliva D, Di Prampero PE, Cerretelli P: *Energy utilization in intermittent exercise of supramaximal intensity*. J Appl Physiol. 1969;26:752-56.
- Mathew DK, Fox EL. *The physiological basis of physical education and athletics*. Philadelphia (PA): WB Saunders; 1971.

- Maughan RJ, Gleeson M, Greenhaff PL. *Biochemistry of exercise and training*. Oxford: Oxford University Press; 1997.
- McCartney N, Heigenhauser GJF, Jones N.L. *Power output and fatigue of human muscle in maximal cycling exercise*. J Appl Physiol. 1983;55:218-24.
- McLester JR. *Muscle contraction and fatigue: the role of adenosine 5'-diphosphate*. Sports Med. 1997;23(5):287-305.
- McMahon S, Jenkins D. *Factors affecting the rate of phosphocreatine resynthesis following intense exercise*. Sports Med. 2002;32(12):761-84.
- Medbø JI, Mohn A, Tabata I, et al. *Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit*. J Appl Physiol. 1988;64(1):50-60.
- Micklewright D, Alkhatib A, Beneke R. *Mechanically versus elektro-magnetically braked cycle ergometer: performance and energy cost of the Wingate Anaerobic test*. Eur J Appl Physiol. 2006;9:1-4.
- Morrow JA, Fell RD, Gladden LB. *Respiratory alkalosis, no effect on blood lactate decline or exercise performance*. Eur J Appl Physiol. 1988;58:175-181.
- Motulsky HJ, Ransnas LA. *Fitting curves to data using nonlinear regression: a practical and nonmathematical review*. FASEB J. 1987;1:365-4.
- Mutschler E. *Arzneimittelwirkungen*. Lehrbuch der Pharmakologie und Toxikologie. 6.Auflage. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH; 1991.
- Nevill ME, Bogdanis GC, et al. *Muscle metabolism and performance during sprinting*. Champaign (IL): Human Kinetics; 1996;243-59.
- Nielsen OB, De Paoli F, Overgaard K. *Protective effects of lactic acid on force production in rat skeletal muscle*. J Physiol. 2001(526):161-166.
- Oyono-Enguelle S, Gartner M, Marbach J, Heitz A, Ott C, Freund H. *Comparison of arterial and venous blood lactate kinetics after short exercise*. Int J Sports Med. 1989 Feb;10(1):16-24.
- Ozyener F, Rossiter HB, Ward SA, Whipp BJ. *Negative accumulated oxygen deficit during heavy and very heavy intensity cycle ergometry in human*. Eur J Appl Physiol. 2003 Sep;90(1-2):185-90. (Epub 2003 Jul 9)
- Petersen SR, Gaul CA, Stanton MM, Hanstock CC. *Skeletal muscle metabolism during short-term, high-intensity exercise in prepubertal and pubertal girls*. J Appl Physiol. 1999 Dec;87(6):2151-6.
- Pieschl RL, Toll PW, Leith DE, Peterson LJ, Fedde MR. *Acid-base changes in the running greyhound: contributing variables*. J Appl Physiol. 1992;73(6):2297-304.

- Pokan F, et al. *Kompendium der Sportmedizin*. Wien: Springer-Verlag; 2004;33
- Popadic Gacesa JZ, Barak OF, Grujic NG. *Maximal anaerobic power test in athletes of different sport disciplines*. J Strength Cond Res. 2009 May;23(3):751-5.
- Prampero PE di: *Energetics of muscular exercise*. Rev Physiol Biochem Pharmacol. 1981;89:142-222.
- Prampero PE di, Ferretti G. *The energetics of anaerobic muscle metabolism:a Reappraisal of older and recent concepts*. Respir Physiol. 1999;118(2-3):103-15.
- Prampero PE di, Piiper J. *Effects of shortening velocity and of oxygen consumption on efficiency of contraction in dog gastrocnemius*. Eur J Appl Physiol. 2003 Oct;90(3-4):270-4. (Epub 2003 Oct 2)
- Reiser M, Kuhn F, Debus J. *Radiologie*. Duale Reihe. Stuttgart: Thieme; 2006.
- Reiser R, Broker J, Peterson M.L. *Inertial effects on mechanically braked Wingate power calculations*. Med Sci Sports Exe. 2000;1660-1664.
- Reilly T. *Circadian rhythm and exercise*. In: Exercise, benefits limits and adaptations, ed. MacLeod D, Maughan R, Nimmo N et al. London: E.and FN Spon; 1987;346-66.
- Röcker K. *Die Breath-by-Breath-Analyse von CO₂ zur Bewertung der Kinetik des Energiestoffwechsels*. Habilitationsschrift. Universität Tübingen-Medizinische Fakultät. Abteilung Sportmedizin;1999.
- Rossiter HB, Ward SA, Howe FA, Wood DM, Kowalchuk JM, Griffith JR, Whipp BJ. *Effects of dichloroacetate on VO₂ and intramuscular 31P metabolite kinetics during high-intensity exercise in humans*. J Appl Physiol. 2003 Sep;95(3):1105-15. (Epub 2003 May)
- Sahlin K: *Intracellular pH and energy metabolism in skeletal muscle of man. With Special reference to exercise*. Acta Physiol Scand. 1978;(Suppl 455):1-56.
- Sargent DA *The physical test of a man*. Am Phys Educ Rev.1921; 26:188-94.
- Serresse O, Lortie G, Bouchard C, Boulay MR. *Estimation of the contribution of the Various energy systems during maximal work of short duration*. Int J Sports Med. 1988;9:456-60.
- Soussi N, Gauthier A, Sesboue B, Larue J, Davenne D. *Circadian rhythm in two types of anaerobic cycle leg exercise: force-velocity and 30-s-Wingate tests*. Int J Sports Med. 2004 Jan;25(1):14-9.

- Soussi N, Sesboue B, Gauthier A, Larue J, Davenne D. *Effects of one night's sleep deprivation on anaerobic performance the following day*. Eur J Appl Physiol. 2003 May;89(3-4):359-66.
- Spriett LL, Söderlund K, Bergström M, Hultman E: Skeletal muscle glycogenolysis and pH during electrical stimulation in men. J Appl Physiol. 1987 Feb;62(2):616-21.
- Silbernagel S, Despopoulos A. *Taschenatlas der Physiologie*. 4.überarb.Auflage. Stuttgart: Thieme Verlag; 1991.
- Smith JC, Hill DW: *Contribution of energy systems during a Wingate power test*. Br J Sp Med. 1991;25(4)196-9.
- Stegemann J: *Leistungsphysiologie*. Physiologische Grundlagen der Arbeit und des Sports 4. Georg-Thieme Verlag Stuttgart. 1991.
- Stevens GHJ, Wilson B.W: *Aerobic contribution to the Wingate test*. Med Sci Sport Exerc. 1986;18:2.
- Szögöy A, Cherébetiu G. *Minutentest auf dem Fahrradergometer zur Bestimmung der anaeroben Kapazität*. Eur J Appl Physiol 1974;33:171-76.
- Tesch PA, Daniels WL, Sharp DS. *Lactat accumulation in muscle and blood during submaximal exercise*. Acta Physiol Scand. 1982;114:441-6.
- Thornton MK, Potteiger LA. *Effects of resistance exercise bouts of different Intensities but equal work on EPOC*. Med Sci Sports Exerc. 2002(34):715-722.
- Tirosh E, Rosenbaum P, Bar-Or. *New muscle power test in neuromuscular disease. Feasibility and reliability*. Am J Dis Children. 1990;144:1083-87.
- Vandewalle H, Peres G, Monod H. *Standard anaerobic exercise tests*. Sports Med. 1987;4:268-89.
- Vollestad NK, Serersted OM. *Biochemical correlation of fatigue*. Eur J Appl Physiol. 1988;57:336-47.
- Wahl W, Bloch W, Mester J. *Moderne Betrachtungsweisen des Laktats: Laktat ein überschätztes und zugleich unterschätztes Molekül*. Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie. 2009;57(3),105.
- Weineck J. *Optimales Training*. 16. Auflage. Balingen: Spitta Verlag; 2010;303-9.
- Weinstein Y, Bediz C, Dotan R, Falk B. *Reliability of peak-lactate, heart rate and plasma volumen following the Wingate test*. Med Sci Sports Exerc. 1998 Sep;30(9):1456-60.
- Whipp BJ. *Physiological mechanisms dissociating pulmonary CO₂ and O₂ exchange dynamics during exercise in humans*. Exp Physiol. 2007;92(2),347-55.

- Wittekind AL, Beneke R. *Effect of warm-up on run time to exhaustion*. J Sci Med Sport. 2009 Jul;12(4):480-4. (Epub 2008 Jun 11)
- Wittekind AL, Cooper CE, Elwell CE, Beneke R. *Warm-up effects on muscle oxygenation, metabolism and sprint cycling performance*. Eur J Appl Physiol. 2012 Aug;112(8):3129-39. (Epub 2012 Jan 3)
- Wittekind AL, Micklewright D, Beneke R. *Teleoanticipation in all-out short duration cycling*. Br J Sports Med. 2011 Feb;45(2):114-9. (Epub 2009 Aug 12)
- Zanconato S, Buchthal S, Barstow TJ, Cooper DM. *³¹P-magnetic resonance spectroscopy of leg muscle metabolism during exercise in children and adults*. J Appl Physiol. 1993;74(5):2214-8.
- Ziegler A. *Einfluss einer kurzen Hyperventilation auf die Leistung bei einem supra-maximalen 30s-Wingate Test*. Dissertation 2002, FU Berlin.
- Zouloumian P, Freund H. *Lactate after exercise in man. II Mathematical model*. Eur J Appl Physiol. 1981;46:135-147.
- Zouloumian P, Freund H. *Lactate after exercise in man. III Properties of the compartment model*. Eur J Appl Physiol. 1981;46:149-160.

I PUBLIKATIONSLISTE DER DOKTORANDIN
--

Mühling M, Wittekind A, Leithäuser RM, Beneke R. *Modelling the blood lactate response to maximal short term exercise with elevated starting levels.*

Abstract. Med Sci Sports Exerc. 2008;40(5):67.

Beneke R, Wittekind A, Mühling M, Bleif I, Leithäuser RM.: *Lactate response to short term exercise with elevated starting levels.* Eur J Appl Physiol. 2010

Sept;110(1):215-8.

J DANKSAGUNG

Herrn Prof. Dr. Dipl. Sportl. R. Beneke danke ich herzlich für die Überlassung des Themas, die Entwicklung der „neuen“ Formel, hilfreiche Anregungen und das Durchhalten bis zum Schluss.

Ganz besonders möchte ich mich bei den Probanden bedanken, insbesondere bei meinem Bruder Stefan und meinem Cousin Christian, die diese quälenden Tests mit viel Einsatz durchgeführt haben. Ohne Euch hätte dieses Projekt nie stattgefunden. Auch den Mitarbeiterinnen des Instituts für Sportmedizin, Frau Himmelsbach-Wegner, Frau Nadol und Frau Woweries danke ich für die freundliche Mitarbeit, sowie meinen MitstreiterInnen des „Wingate Projekts“: der leider viel zu früh verstorbenen Frau Dr. I. Bleif, Herrn A. Bellon, Herrn Dr. M. Hütler, Herrn S. Schönhoff und Herrn Dr. A. Ziegler.

Herrn Dr. J. Gladitz danke ich für die hilfreiche Unterstützung und Anregung bei einigen statistischen Fragen.

Bei meinen Kollegen und Vorgesetzten und ganz besonders Herrn Dr. J. Wismach bedanke ich mich recht herzlich für das aufgebrachte Verständnis und die gute Unterstützung auf der Zielgeraden dieser Arbeit.

Meiner Freundin Frau Prof. Dr. Johanna Mierendorff danke ich außerordentlich für die hilfreichen Kommentare, das Korrekturlesen und „fine tuning“ auf den letzten Metern. Ein großartiges Gefühl.

Meiner Freundin Hanna Neumann danke ich von Herzen für die Begleitung dieser Arbeit besonders in den schwierigen Momenten und für eine wunderbare Freundschaft. Du schaffst das auch.

Abschließend möchte ich mich bei den wichtigsten Menschen in meinem Leben bedanken, meinen Eltern, meiner Familie und meinen Freunden. Ich danke euch, dass ihr mit mir so lange durchgehalten, mich unterstützt, ertragen und tapfer und mit sehr viel Ausdauer an einen guten Ausgang dieses Projekts geglaubt habt.

K **LEBENS LAUF**

"Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht."

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Monika Mühling, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Dynamik der Blutlaktatkonzentration, metabolische und mechanische Leistung beim Wingate Anaerobic Test“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem Betreuer, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autorin bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.

Datum

Unterschrift

Anteilerklärung an etwaigen erfolgten Publikationen

Monika Mühling hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation 1: Mühling M, Wittekind A, Leithäuser RM, Beneke R. *Modelling the blood lactate response to maximal short term exercise with elevated starting levels*. Abstract. Med Sci Sports Exerc. 2008;40(5):67.

Beitrag im Einzelnen: Erstautorin

Publikation 2: Beneke R, Wittekind A, Mühling M, Bleif I, Leithäuser RM.: *Lactate response to short term exercise with elevated starting levels*. Eur J Appl Physiol. 2010 Sept; 110 (1): 215-8.

Beitrag im Einzelnen: Co-Autorin

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers

Unterschrift der Doktorandin