

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

DISSERTATION

**Analyse und Vergleich von Methoden zur Bestimmung
der anaeroben Kapazität und Leistungsfähigkeit
bei Freizeitsportlern auf dem Fahrradergometer**

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Masen Dirk Jumah
aus Berlin

Gutachter: 1. Prof. Dr. med. Dipl.-Sportl. R. Beneke
 2. Priv.-Doz. Dr. med. F. C. Dimeo
 3. Prof. Dr. N. Maassen

Datum der Promotion: 20.11.2009

Abkürzungsverzeichnis

AP10	Average Power 10 (W), durchschnittliche mechanische Leistung im kAnT
AP30	Average Power 30 (W), durchschnittliche mechanische Leistung im WAnT
ADP	Adenosindiphosphat
ATP	Adenosinriphosphat
BMI	Body Mass Index
BLK	Blutlaktat-Konzentration
CrP	Kreatinphosphat
FI10	Fatigue Index 10 (%), Erschöpfungsindex im kAnT
FI30	Fatigue Index 30 (%), Erschöpfungsindex im WAnT
kÄ	Kalorisches Äquivalent
KG	Körpergewicht (kg)
kAnT	kurzer Anaerober Test (10 Sekunden Belastungsdauer)
LP10	Least Power 10 (W), niedrigste mechanische Leistung im kAnT
LP30	Least Power 30 (W), niedrigste mechanische Leistung im WAnT
MAOD	Maximal Akkumuliertes Sauerstoffdefizit
OFF-FC	Schnelle Komponente der Sauerstoffaufnahme nach der Belastung
OFF-SC	Langsame Komponente der Sauerstoffaufnahme nach der Belastung
ON-FC	Schnelle Komponente der Sauerstoffaufnahme während der Belastung
ON-SC	Langsame Komponente der Sauerstoffaufnahme während der Belastung
P	Leistung (W)
PP10	Peak Power 10 (W), höchste mechanische Leistung im kAnT
PP30	Peak Power 30 (W), höchste mechanische Leistung im WAnT
RQ	Respiratorischer Quotient von Kohlendioxidabgabe zu Sauerstoffaufnahme
ST	Stufentest
VO ₂	Sauerstoffvolumen (ml)
ḂCO ₂	Kohlendioxidabgabe (ml·min ⁻¹)
ḂO ₂	Sauerstoffaufnahme (ml·min ⁻¹)
ḂO _{2peak}	Höchste im Test gemessene Sauerstoffaufnahme (ml·min ⁻¹)
WAnT	Wingate Anaerobic Test (30 Sekunden Belastungsdauer)

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Material und Methoden	7
2.1 Probanden	7
2.2 Testbeschreibung	8
2.2.1 Stufentest	8
2.2.2 Supramaximaler Ausbelastungstest	10
2.2.3 Wingate Anaerobic Test	11
2.2.4 Kurzer anaerober Test	13
2.3 Messgrößen und Geräte	14
2.3.1 Spiroergometrie	14
2.3.2 Höchste Sauerstoffaufnahme	14
2.3.3 Herzfrequenz	15
2.3.4 Blutlaktatkonzentration	15
2.3.5 Subjektives Belastungsempfinden	15
2.3.6 Ergometer	16
2.4 Berechnung der mechanischen Leistung	17
2.5 Berechnung der Einzelkomponenten der metabolischen Leistung	18
2.5.1 Berechnung der aeroben metabolischen Leistung	18
2.5.2 Berechnung der anaerob-laktaziden metabolischen Leistung	18
2.5.3 Berechnung der anaerob-alaktaziden metabolischen Leistung	19
2.5.3.1 Verfahren nach Knuttgen	20
2.5.3.2 Verfahren modifiziert nach di Prampero	21
2.6 Verfahren zur Bestimmung des Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizits	22
2.6.1 Regressionsgerade	23
2.6.2 Berechnungen des Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizits	24
2.7 Metabolischer Arbeitsumsatz	25
2.8 Wirkungsgrad	27
2.9 Statistik	27
3 Untersuchungsergebnisse	28
3.1 Höchste Sauerstoffaufnahme	28
3.2 Mechanische Leistung	29
3.3 Einzelkomponenten der metabolischen Leistung	30

3.3.1	Metabolische Leistung im supramaximalen Ausbelastungstest	31
3.3.2	Metabolische Leistung im Wingate Anaerobic Test	35
3.3.3	Metabolische Leistung im kurzen anaeroben Test	39
3.3.4	Energiebereitstellung bezogen auf den Stoffwechselweg	42
3.4	Maximal Akkumuliertes Sauerstoffdefizit	45
3.4.1	Regressionsgerade	45
3.4.2	Akkumuliertes Sauerstoffdefizit	46
3.4.3	Energiebereitstellung nach dem akkumulierten Sauerstoffdefizit	47
3.5	Anaerobe Energiebereitstellung im supramaximalen Ausbelastungstest	48
3.6	Wirkungsgrad	49
4	Diskussion	51
4.1	Probanden	51
4.2	Bestimmung der höchsten Sauerstoffaufnahme	51
4.3	Mechanische Leistung in den anaerob dominierten Testverfahren	52
4.4	Bestimmung der Einzelkomponenten der metabolischen Leistung	53
4.4.1	Messung des aeroben Stoffwechsels	53
4.4.2	Messung und Modellierung des Blutlaktatverhaltens	55
4.4.3	Bestimmung der Kreatinphosphat-Resynthese	57
4.5	Bestimmung des Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizits	58
4.5.1	Rahmenbedingungen zum Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizit	61
4.5.1.1	Bestimmung des Energiebedarfs bei submaximalen Belastungen	62
4.5.1.2	Energiebedarf während konstanter Belastung	67
4.5.1.3	Vorgabe der Belastung im Supramaximalbelastungstest	67
4.5.2	Beurteilung des Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizits	69
4.6	Vergleich der Methoden zur Bestimmung der anaeroben Leistungsfähigkeit	69
4.7	Energiebereitstellung bei verschiedenen Belastungsintensitäten	70
4.8	Wirkungsgrad	71
5	Zusammenfassung	73
6	Literaturverzeichnis	75
7	Danksagung	87
8	Lebenslauf	88
9	Selbständigkeitserklärung	89
10	Publikationsliste des Doktoranden	90

1 Einleitung

Bei der Muskelkontraktion wird Energie benötigt, die dem kontraktilem Apparat in Form von Adenosintriphosphat (ATP) zur Verfügung gestellt wird. Der primäre Energiespeicher ATP ist in der Muskelzelle nur in begrenzter Form vorhanden und muss zur Aufrechterhaltung der Kontraktionsfähigkeit resynthetisiert werden. Dies kann über drei verschiedene Wege erfolgen: Erstens kann anaerob durch den Abbau von muskulär gespeichertem Kreatinphosphat (CrP) Energie bereitgestellt werden (Lohmann, 1935). Zweitens wird durch den anaeroben Abbau von Kohlenhydraten mittels Glykolyse Energie freigesetzt (Araki, 1891). Bei letzterem Vorgang kommt es zur Anhäufung von Laktat, weswegen dieser als anaerob-laktazid bezeichnet wird. In Abgrenzung dazu steht die Bezeichnung anaerob-alaktazid für die Energiebereitstellung durch den Abbau von CrP. Drittens kann aerob Energie durch eine Kaskade sauerstoffabhängiger Reaktionen bereitgestellt werden. Die drei Stoffwechselwege tragen in unterschiedlichem Ausmaß zur Energiebereitstellung bei verschiedenen intensiven Belastungen bei.

Über die anaeroben Stoffwechselwege kann Energie in hohen Raten umgesetzt werden. Dies ermöglicht eine hohe muskuläre Leistung, z.B. zu Beginn einer Belastung. Die Kapazität des anaeroben Stoffwechsels als Gesamtmenge der zur Verfügung stehenden anaeroben Energie ist deutlich limitiert. Eine rasche Reduktion der CrP-Speicher sowie die Akkumulation saurer Stoffwechselprodukte, welche die Schlüsselenzyme der Glykolyse hemmen, begrenzen die anaerobe Kapazität und führen zu einer Reduktion der muskulären Leistung im Verlauf der Belastung. Die anaerobe Leistungsfähigkeit wird als maximale pro Zeiteinheit geleistete Arbeit bei hochintensiven Belastungen verstanden. Die anaerobe Kapazität entspricht der maximalen Menge an ATP, die während einer spezifischen hochintensiven Belastung durch anaerobe Stoffwechselforgänge resynthetisiert wird (Green et al., 1994). Limitierend für die anaerob-alaktazide Leistungsfähigkeit ist die Zeitkonstante des Enzyms Kreatinphosphokinase, welches die Geschwindigkeit des Kreatinphosphatabbaus und damit die Dephosphorylierung von ATP zu Adenosindiphosphat (ADP) bestimmt. Die anaerob-alaktazide Kapazität ist abhängig von der Menge an muskulär verfügbarem CrP und beträgt bezogen auf die Muskelmasse bis zu $26 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Prampero et al., 1981). Die Vorräte an CrP reichen aus, um den ATP-Gehalt der Muskelzelle (etwa $6 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) für einige Sekunden konstant zu halten (Mader und Heck, 1986). Die anaerob-laktazide Leistungsfähig-

keit wird bestimmt durch die maximale Glykolyserate. Diese ist abhängig vom Gehalt und der Aktivität von Glykolyseenzymen wie der Phosphofruktokinase. Die anaerob-laktazide Kapazität wird limitiert durch die maximal tolerierbare laktatbedingte Belastungsazidose (Mader et al., 1979). Maximale Blutlaktatwerte liegen dabei bei 15-25 mmol·l⁻¹ (Prampetro et al., 1981). Der aerobe Stoffwechsel weist dagegen eine sehr große Kapazität bei deutlich geringeren Umsatzraten auf. Die aerobe Leistungsfähigkeit wird bestimmt durch die maximale Oxidationsrate in der Atmungskette. Limitierende Faktoren sind die träge Aktivierung intrazellulärer Schlüsselenzyme und eine Verzögerung, bedingt durch die kardiopulmonale Zirkulation. Die Kapazität des aeroben Stoffwechsels wird begrenzt durch die Menge an gespeicherten Substraten, z.B. Glykogen und Fettsäuren (Whipp und Wasserman, 1972).

Die drei Energie liefernden Systeme ergänzen sich durch die alternierende Leistungsfähigkeit und Kapazität und ermöglichen durch ihre Interaktion bei einer breiten Spanne von Belastungen eine angepasste Energieversorgung. Bei intensiven Belastungen, wie sie im Sport beim Sprint oder bei Intervallbelastungen mit einer Belastungsdauer von Sekunden bis zu wenigen Minuten vorkommen, kommt dem anaeroben Stoffwechsel eine besondere Bedeutung zu. Dieser spielt in zahlreichen Sportarten eine entscheidende Rolle für den Wettkampferfolg. Auch bei länger andauernden Belastungen hat der anaerobe Stoffwechsel einen hohen Stellenwert und ist bei der Entwicklung von Trainingsmethoden zu bedenken (Bulbulian et al., 1986). Auch dem aeroben Stoffwechsel kommt bei sehr kurzen Belastungen eine hohe Bedeutung zu (Gastin, 2001).

Die Bestimmung von Kapazität und Leistungsfähigkeit der Einzelkomponenten des Energiestoffwechsels ist wichtig für die Leistungsdiagnostik. So können Defizite in Teilbereichen aufgedeckt und Trainingsstrategien entwickelt werden. Die anaerobe Energiebereitstellung ist neben dem aeroben Stoffwechsel von Interesse für das Verständnis und die Therapie zahlreicher Erkrankungen (Mezzani et al., 2006).

Der aerobe Stoffwechsel lässt sich durch die Messung der Sauerstoffaufnahme bestimmen, wodurch direkt auf die aerob gewonnene Energiemenge geschlossen werden kann. Zur Bestimmung der aeroben Leistungsfähigkeit werden spiroergometrische Messungen durchgeführt. Mehrstufentests mit einer hohen Gesamtbelastungsdauer haben sich als Belastungsschemata bewährt (Hollmann und Hettinger, 2000). Als Messparameter werden die erbrachte Leistung, die Blutlaktatkonzentration, die Herzfrequenz und spirometrische Messgrößen sowie das subjektive Belastungsempfinden er-

fasst (Meyer und Kindermann, 1990). Die Untersuchung der aeroben Dauerleistungsgrenze erfolgt durch die Bestimmung von Belastungsschwellen, wie etwa der Laktat-Schwelle oder des „maximalen Laktat-Steady-States“ (Beneke et al., 2007). Diese markieren den Übergang einer moderaten Belastung, bei der der Energiebedarf aerob abgedeckt wird, in eine Belastungsintensität, bei der zusätzlich eine deutliche Laktatakkumulation auftritt. Der Verlauf der Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$) während der Belastung ist dabei auch von der Intensität abhängig. Bei submaximalen Intensitäten wird zwischen moderaten Belastungen, bei denen sich ein stabiler Endzustand („steady-state“) der $\dot{V}O_2$ einstellt, und hohen Belastungen, bei denen durch das Auftreten einer langsamen Komponente das Sauerstoffaufnahmeverhalten komplexer wird, unterschieden (Whipp, 1994; Zoladz et al., 1998).

Der anaerobe Stoffwechsel hingegen entzieht sich einer quantitativ eindeutig zuzuordnenden Messung. Die Stoffwechselfvorgänge finden in der arbeitenden Muskelzelle statt und unterliegen komplexen Abläufen. Es wurden verschiedene Ansätze zur Bestimmung des anaeroben Stoffwechsels oder dessen Einzelkomponenten entwickelt.

Die Bestimmung von Zwischen- und Endprodukten, wie Laktat im peripheren Blut oder Analysen zur Wiederauffüllung der Phosphatspeicher, erlauben Rückschlüsse auf die anaeroben Energiebereitstellungsprozesse. Durch eine Analyse der komplexen Dynamik der Diffusions- und Eliminationsprozesse werden Aussagen über die anaerob bereitgestellte Energie getroffen. Das Konzept der Sauerstoffschuld, nach dem eine belastungsbedingt eingegangene Sauerstoffschuld durch eine erhöhte Sauerstoffaufnahme nach der Belastung beglichen wird (Margaria et al., 1933), wurde zu einer Methodik für die Bestimmung des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels weiterentwickelt. In der Nachbelastungsphase lassen sich eine schnelle und eine langsame Komponente der Sauerstoffaufnahme differenzieren und damit Rückschlüsse auf die Wiederauffüllung der Kreatinphosphat-Speicher ziehen (Knuttgen, 1970; Prampero und Ferretti, 1999; Prampero et al., 1973). Durch die Messung der Laktatkonzentration im peripheren Blut lässt sich unter Einsatz komplexer Modelle der anaerob-laktazide Energiebereitstellungsanteil errechnen (Beneke et al., 2007; Beneke et al., 2002; Prampero et al., 1981). Die Methoden zur indirekten Bestimmung der anaeroben Einzelkomponenten können bei einer Vielzahl von sportartspezifischen Belastungen in Ergometrielaboratorien oder als Feldstudien durchgeführt werden.

Eine direkte Bestimmung der Stoffwechselprodukte erfolgt mittels invasiver muskelbiop-tischer Analytik durch Stanzbiopsien (Bangsbo, 1998; Jacobs et al., 1982). Weiterhin werden durch kernspintomografische Untersuchungen Muskelmetabolite vor und nach einer Belastung bestimmt (Sapega et al., 1993). Die genannten Methoden liefern nur relative Werte, da die eingesetzte Muskelmasse abgeschätzt werden muss (Scott et al., 1991). Sie konnten sich wegen der Invasivität und dem hohen apparativen Aufwand nicht in der Routine durchsetzen.

Maximalbelastungstests werden zur ergometrischen Messung der mechanischen Ener-gie und Arbeit bei kurz andauernden intensiven Belastungen durchgeführt. Die Bela-stung wird dabei höher gewählt als die Leistung, die mit der maximalen Sauerstoffauf-nahme korrespondiert, und als supramaximal bezeichnet. Bei geeigneter Belastung werden durch die Messung der Arbeitsleistung Rückschlüsse auf die anaerobe Lei-stungsfähigkeit oder Kapazität gezogen. Durch die Auswahl der Dauer und Intensität der Belastung wird versucht, den Einfluss des zu messenden anaeroben Teilbereichs zu maximieren, während die anderen Teilbereiche möglichst wenig zu der zu bestim-menden Messgröße beitragen. Der Treppentest nach Margaria (1966) oder der „Winga-te Anaerobic Test“ (WAnT) auf dem Fahrradergometer, der in den 70er Jahren entwic-kelt wurde und als gut evaluiert gilt (Inbar et al., 1996), sind Beispiele für Verfahren, mit denen die anaerobe Leistungsfähigkeit als geleistete mechanische Arbeit pro Zeiteinheit bestimmt wird. Die zugrunde liegenden Energiebereitstellungsprozesse werden dabei nicht beachtet.

Der WAnT ist der am häufigsten eingesetzte Test zur Bestimmung der anaeroben Lei-stung bei Gesunden (Bar-Or, 1987; Beneke et al., 2007; Beneke et al., 2002; Inbar et al., 1996) und dient zur Untersuchung von Patienten (van Brussel et al., 2007). Es han-delt sich um einen 30 Sekunden andauernden erschöpfenden Maximalbelastungstest auf einem drehzahlabhängigen Fahrradergometer. Es zeigte sich, dass 70-80% der me-tabolischen Energie durch anaerobe Stoffwechselwege bereitgestellt werden, wobei der Glykolyse der größte Stellenwert zukommt (Beneke et al., 2002; Serresse et al., 1988). Der mit 20-30% nicht unerhebliche aerobe Energiebereitstellungsanteil und die hohe Belastung der Probanden durch den Test führten einige Arbeitsgruppen zu einer Redu-zierung der Testdauer (Laurent et al., 2007).

Ein weiteres indirektes Testverfahren ist die Bestimmung des Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizits („Maximal Accumulated Oxygen Deficit“, MAOD) (Medbø et al., 1988).

Es handelt sich hierbei um eine auf zahlreichen Annahmen basierende Methode, die mehrzeitig die Bestimmung der nicht-aerob bereitgestellten Energie zum Ziel hat. Der Kalkulation der anaeroben Energiemenge liegt eine Ermittlung des theoretischen Sauerstoffbedarfs einer definierten supramaximalen Belastung zugrunde. Dieser Gesamtenergiebedarf der spezifischen Belastung wird mittels Extrapolation des Verhältnisses von mechanischer Leistung und Sauerstoffaufnahme ermittelt und als akkumulierte Sauerstoffmenge angegeben. Zur individuellen Bestimmung des genannten Verhältnisses werden submaximale Belastungen herangezogen. Von dieser theoretischen Größe, dem akkumulierten Sauerstoffbedarf, wird die während des Tests tatsächlich aufgenommene Sauerstoffmenge abgezogen. Der supramaximale Test wird bei einer Belastung durchgeführt, die nach etwa 180 Sekunden zur Erschöpfung der Probanden führt. Daraus ergibt sich mit dem MAOD die anaerob bereitgestellte Energiemenge (Medbø et al., 1988). In den letzten Jahren sind zahlreiche Arbeiten unter Verwendung der MAOD-Methode veröffentlicht worden (Bangsbo, 2000; Chatagnon und Busso, 2006; Chatagnon et al., 2005; Doherty und Smith, 2001; Doherty et al., 2000; Hill et al., 2002; Mezzani et al., 2008; Mezzani et al., 2006; Minahan et al., 2007; Minahan und Wood, 2008; Moore und Murphy, 2003; Pouilly und Busso, 2008; Reis et al., 2004; Russell et al., 2002; Truijens et al., 2003; Weber und Schneider, 2000; Weber und Schneider, 2001). Obwohl weiterhin vielfach angewendet, werden das Verfahren und die zugrunde liegenden Annahmen in der Literatur sehr kritisch diskutiert (Bangsbo, 2000; Buck und McNaughton, 1999; Green und Dawson, 1995; Saltin, 1990).

In der vorliegenden Arbeit wird die anaerobe Kapazität mit dem MAOD-Verfahren und die anaerobe Leistungsfähigkeit mit dem WAnT bestimmt. Um eine spezifischere Messung des anaerob-alkalischen Stoffwechsels als im WAnT zu ermöglichen und den Einfluss des aeroben Stoffwechsels zu reduzieren, wird ein auf 10 Sekunden verkürzter Test (kurzer anaerober Test, kAnT) durchgeführt.

Bei den jeweiligen Belastungen (10, 30, etwa 180 Sekunden) wird die metabolisch bereitgestellte Energie ermittelt. Dabei dient die Messung der Sauerstoffaufnahme der Bestimmung des aeroben Stoffwechsels. Die Messung und Modellierung der Blutlaktatkonzentration wird zur Bestimmung des anaerob-alkalischen Energieanteils und die Messung der Wiederauffüllung der Kreatinphosphat-Speicher in der Nachbelastung für den anaerob-alkalischen Energieanteil verwendet.

Durch die Anwendung verschiedener Testverfahren (MAOD, WAnT, kAnT) zur Ermittlung der anaeroben Leistungsfähigkeit und Kapazität werden Teilbereiche des anaeroben Stoffwechsels gemessen. Ob diese Verfahren vergleichbare Ergebnisse liefern und wie diese im Vergleich zur Bestimmung der metabolischen Einzelkomponenten der Energiebereitstellung gewertet werden können, ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Eine Bestimmung der anaerob-alkalischen Energiemenge durch Analyse der Sauerstoffaufnahme bei einer Testdauer von nur 10 Sekunden wurde in der vorliegenden Arbeit erstmals angewendet. Die Durchführbarkeit dieses Verfahrens für die kurze Belastungsdauer gilt es zu prüfen.

Eine zentrale Fragestellung im Zusammenhang mit dem Konzept des Sauerstoffdefizits ist, ob das MAOD-Verfahren zur Messung der anaeroben Kapazität reproduziert werden kann.

Durch einen Vergleich von weiblichen und männlichen Probanden sollen geschlechtsspezifische Besonderheiten bei den verschiedenen Testverfahren überprüft werden.

2 Material und Methoden

2.1 Probanden

Siebzehn Freizeitsportler nahmen an der Untersuchung teil (anthropometrische Daten in Tabelle 1 und 2). Zum Zeitpunkt der Testreihe waren die Probanden anamnestisch und klinisch gesund, Medikamente wurden nicht eingenommen. Im Vorfeld der Untersuchung wurde nach ausführlicher Aufklärung eine schriftliche Einverständniserklärung gegeben. Die Studie folgte den Vorgaben der Ethikkommission der FU Berlin.

Proband	Alter [Jahre]	Größe [m]	Gewicht [kg]	BMI [kg/m ²]
1	25	1,85	72	21,0
2	25	1,82	76	22,9
3	23	1,86	82	23,7
4	25	1,71	74	25,3
5	24	1,69	64	22,4
6	24	1,87	66	18,9
7	19	1,83	65	19,4
8	28	1,83	67	20,0
9	27	1,86	81	23,4
10	26	1,82	89	26,9
11	25	1,92	90	24,4
Mittelwert	24,6	1,82	75,1	22,6
±SD	2,3	0,068	9,4	2,5

Tabelle 1: Anthropometrie, männliche Probanden, BMI= Body Mass Index

Proband	Alter [Jahre]	Größe [m]	Gewicht [kg]	BMI [kg/m ²]
12	21	1,63	62	23,3
13	21	1,71	69	24,6
14	21	1,61	58	22,4
15	22	1,64	62	23,1
16	20	1,76	68	22,0
17	20	1,74	70	23,1
Mittelwert	20,8	1,68	64,8	22,9
±SD	0,8	0,063	4,8	0,6

Tabelle 2: Anthropometrie, weibliche Probanden, BMI= Body Mass Index

2.2 Testbeschreibung

Jeder Proband wurde nach einer Einführung in die Bedienung der Testergometer und Probeübungen einem aeroben Vortest und dann drei verschiedenen kurz andauernden Tests unterzogen. Zunächst wurde eine stufenweise ansteigende Fahrradspiroergometrie vorgenommen. Der Stufentest (ST) wurde zur Erfassung der testspezifischen maximalen Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2peak}$) durchgeführt, weiterhin diente er als Grundlage für das MAOD-Testverfahren.

Die folgenden Tests wurden zur Erfassung der Leistungsfähigkeit und Kapazität bei kurzzeitigen supramaximalen Belastungen durchgeführt.

Die Probanden absolvierten die folgenden Tests in randomisierter Reihenfolge:

- Supramaximaler Ausbelastungstest (SMAX),
- „Wingate Anaerobic Test“ (WAnT) und
- kurzer anaerober Test (kAnT).

Zwischen den einzelnen Tests wurde ein zeitlicher Abstand von mindestens 2 und maximal 4 Tagen eingehalten. Alle Probanden führten die Tests zu konstanter Tageszeit und unter gleichem Raumklima im Ergometrielabor des Instituts für Sportmedizin der Freien Universität Berlin durch. Die Probanden wurden angewiesen, sich zum Testtag angemessen zu ernähren, reichlich Flüssigkeit zu sich zu nehmen und am Vortag keine anstrengende körperliche Arbeit zu verrichten.

Vor Beginn der Belastung gab es eine Referenzphase von 3 Minuten, die alle Probanden sitzend auf dem Fahrradergometer verbrachten. Sie diente der Gewöhnung an die Testsituation und der Messung von Referenzwerten in körperlicher Ruhe.

2.2.1 Stufentest

Der Stufentest (ST) wurde als erschöpfende, stufenweise ansteigende Fahrradspiroergometrie auf einem drehzahlunabhängigen Fahrradergometer konzipiert. Der Test setzte sich aus aufeinander folgenden Stufen von fünfminütiger Belastung mit anschließender fünfminütiger Erholung zusammen. Die Belastung wurde von Stufe zu Stufe bis zur Erschöpfung gesteigert (Abbildung 1 auf folgender Seite). Die Erholungsphasen wurden in körperlicher Ruhe sitzend auf dem Ergometer verbracht. Der Test diente der Erfassung aerober Leistungsparameter und der Bestimmung der individuellen linearen Abhängigkeit zwischen Intensität und Sauerstoffaufnahme für das MAOD-Verfahren.

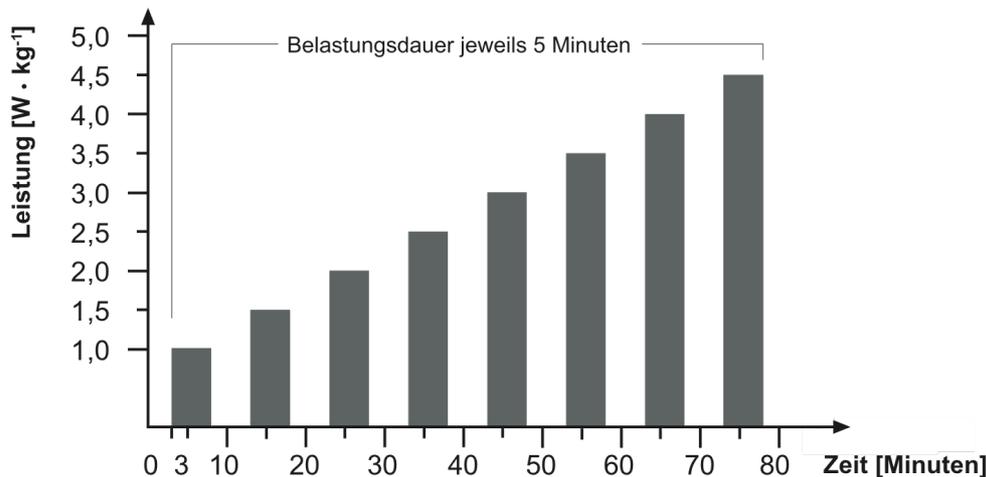


Abbildung 1: Ablaufschema des Stufentests (ST). Die grauen Balken stellen die Belastungsphasen (5 Minuten) mit zunehmender Intensität dar, zwischen den Belastungen wurden Pausen in körperlicher Ruhe von 5 Minuten Dauer eingelegt.

Nach der Referenzphase wurde der Test mit den Belastungsstufen bei vorgegebener konstanter Leistung gestartet. Die Belastung wurde körperrgewichtabhängig vorgegeben. Sie betrug in der ersten Stufe $1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ Körpergewicht (KG) und wurde in jeder weiteren Stufe um $0,5 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ KG bis zum Testende gesteigert (Formel 1).

$$P_{\text{Stufe}}[\text{W}] = (1 + \text{Stufe}) \cdot \text{KG}[\text{kg}] \cdot 0,5[\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Formel 1: Berechnung der Belastung der Stufen im Stufentest (ST). P_{Stufe} = Leistung der Belastungsstufe, KG = Körpergewicht des Probanden in kg

Die Probanden wurden aufgefordert, auf dem Sattel sitzend, eine konstante Trittfrequenz zu erbringen. Die Pedaltrittfrequenz konnte im vorgegebenen Bereich zwischen 60 bis 100 Umdrehungen pro Minute ($\text{U} \cdot \text{min}^{-1}$) frei gewählt werden. Die Frequenz sollte innerhalb einer Stufe konstant gehalten werden. Da die optimale Frequenz mit steigender Belastung ansteigt (Coast und Welch, 1985), sollte mindestens die Trittfrequenz eingehalten werden, die in der vorangegangenen Stufe gewählt wurde. Die Probanden sollten die für die jeweilige Stufe gewählte Trittfrequenz in wenigen Sekunden erreichen. Sie wurden instruiert, sich bis an ihre Leistungsgrenze zu belasten und wurden zum Ende des Tests durch die Testleiter motiviert. Bei subjektiver Erschöpfung der Probanden wurde der Test abgebrochen.

Eine kontinuierliche Messung der ventilatorischen Messgrößen mittels Spirometrie und eine Messung der Herzfrequenz wurden während des gesamten Tests durchgeführt. Es erfolgte eine Befragung nach dem subjektiven Belastungsempfinden (siehe 2.3.5).

Für die Durchführung und Auswertung des im Kapitel 2.6 beschriebenen MAOD-Verfahrens wurden Daten aus dem ST herangezogen: Der Zusammenhang zwischen erbrachter Leistung und gemessener Sauerstoffaufnahme wurde für jede Belastungsstufe ermittelt und durch eine Regressionsgerade ausgedrückt (siehe 2.6.1).

2.2.2 Supramaximaler Ausbelastungstest

Der supramaximale Ausbelastungstest (SMAX) diente im Rahmen des MAOD-Verfahrens der Erfassung der anaeroben Kapazität (Medbø et al., 1988; Medbø und Tabata, 1989; Medbø und Tabata, 1993) und wurde auf einem drehzahlunabhängigen Ergometer bei konstanter Leistung durchgeführt.

Der Test sollte nach etwa 180 (150 bis 210) Sekunden zur Erschöpfung der Probanden und damit zum Testabbruch führen. Die konstante Belastung wurde basierend auf Testergebnissen aus dem Stufentest individuell festgelegt und entsprach der Leistung bei einer Sauerstoffaufnahme von 120% der $\dot{V}O_{2\text{peak}}$ (siehe Formel 2).

$$P_{\text{Smax}}[W] = \frac{\dot{V}O_{2\text{peak}}[ml \cdot \text{min}^{-1}] \cdot 1,2 - Y_{\text{Schnitt}}}{St_{\text{Regress}}}$$

Formel 2: Berechnung der Belastung für den SMAX. St_{Regress} : Steigung der Regressionsgeraden, Y_{Schnitt} : Y-Achsen-Schnittpunkt der Regressionsgeraden. 120% der $\dot{V}O_{2\text{peak}}$ wird in die Geradengleichung eingesetzt.

Dem SMAX ging ein standardisiertes Aufwärmprogramm mit einer Belastung von 50 Watt für 5 Minuten voraus. Die Trittfrequenz sollte von den Probanden frei gewählt werden. Zwei kurze schnelle Zwischensprints von 3 Sekunden Dauer bei maximaler Trittfrequenz wurden nach 3:00 und 4:30 Minuten durchgeführt. Die folgende zehnminütige Pause vor dem Start des SMAXs wurde in körperlicher Ruhe verbracht.

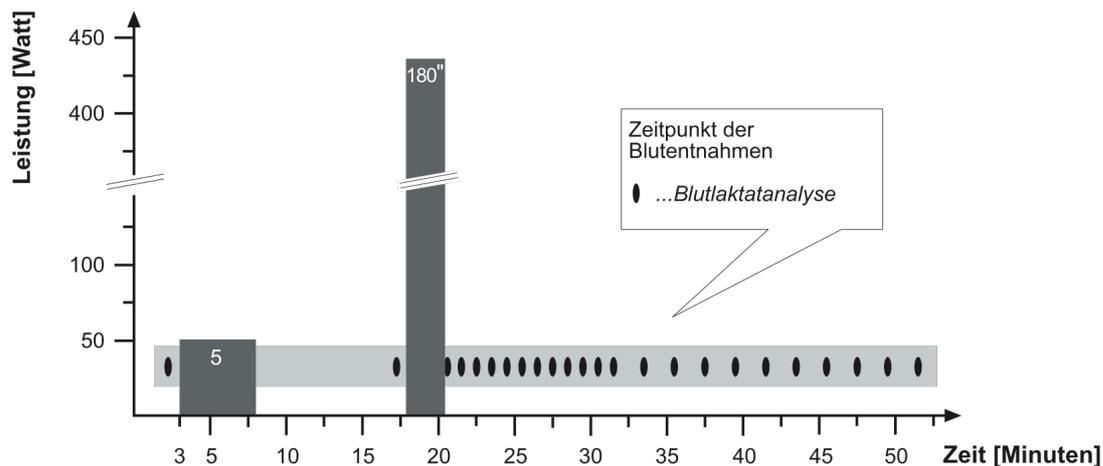


Abbildung 2: Ablaufschema des supramaximalen Ausbelastungstests (SMAX). Aufwärmphase (5 Minuten, dunkelgrauer Balken, 5), Belastungsphase (180 Sekunden, dunkelgrauer Balken, 180"). Kennzeichnet sind die Zeitpunkte der Blutentnahme zur Blutlaktatbestimmung

Im Test wurden die Probanden angehalten, sitzend die vorgegebene stetige Leistung bei konstanter Pedaltrittfrequenz zu erbringen. Diese sollte die während der letzten Stufe im ST gewählte Trittfrequenz nicht unterschreiten (Coast und Welch, 1985).

Zum Testabbruch kam es, wenn die instruierten und geübten Probanden nicht mehr in der Lage waren, die gewählte Trittfrequenz einzuhalten (Frequenzabfall $> 40 \text{ U} \cdot \text{min}^{-1}$). Wenn die Probanden ihre absolute Erschöpfung signalisierten, wurden sie motiviert alle Reserven zu mobilisieren und einige Sekunden weiter durchzuhalten.

Der erschöpfenden Belastung folgte eine Nachbelastungsphase von 30 Minuten Dauer. Sie wurde zunächst für 5 Minuten in körperlicher Ruhe auf dem Ergometer, dann auf einem Stuhl verbracht. Die Spirometrie und Herzfrequenzmessung erfolgte kontinuierlich während des Tests und der Nachbelastung. In der Nachbelastungsphase erfolgten die Abnahmen für die Blutlaktatbestimmung während der ersten 10 Minuten jede Minute, in der folgenden Zeit alle 2 Minuten. Der Ablauf des SMAXs ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

2.2.3 Wingate Anaerobic Test

Der Wingate Anaerobic Test (WAnT) ist ein Maximalbelastungstest. Als limitierender Faktor wird bei der supramaximalen Belastung die Fähigkeit anaerob chemische Energie in mechanische zu überführen gesehen. Diese mechanische Energie wird gemessen und damit die maximale anaerobe Leistung erfasst (Bar-Or, 1987; Inbar et al., 1996). Der Test wurde auf einem drehzahlabhängigen mechanisch gebremsten Ergo-

meter durchgeführt. Die Bremskraft wurde mit $0,075 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ KG}$ individuell festgelegt und blieb während des gesamten Tests konstant. Die Trittfrequenz bestimmte bei dem verwendeten Ergometer die Leistung im WAnT (siehe 2.3.6).

Aus körperlicher Ruhe heraus wurde auf die maximal mögliche Pedaltrittgeschwindigkeit beschleunigt. Dazu wurde vor Beginn der eigentlichen WAnT-Zeitmessung den sitzenden Probanden 3 Sekunden Zeit gegeben ohne Bremswiderstand auf die maximale Trittfrequenz zu beschleunigen. Das Bremsgewicht wurde appliziert und damit automatisch die Zeitmessung gestartet. Während der folgenden 30 Sekunden andauernden Belastung mussten die Probanden fest auf dem Sattel sitzend die maximal mögliche Trittfrequenz erbringen, diese wurde elektronisch erfasst. Die Probanden wurden während der gesamten Testdauer zur maximalen Ausbelastung motiviert (Ablaufschema siehe Abbildung 3).

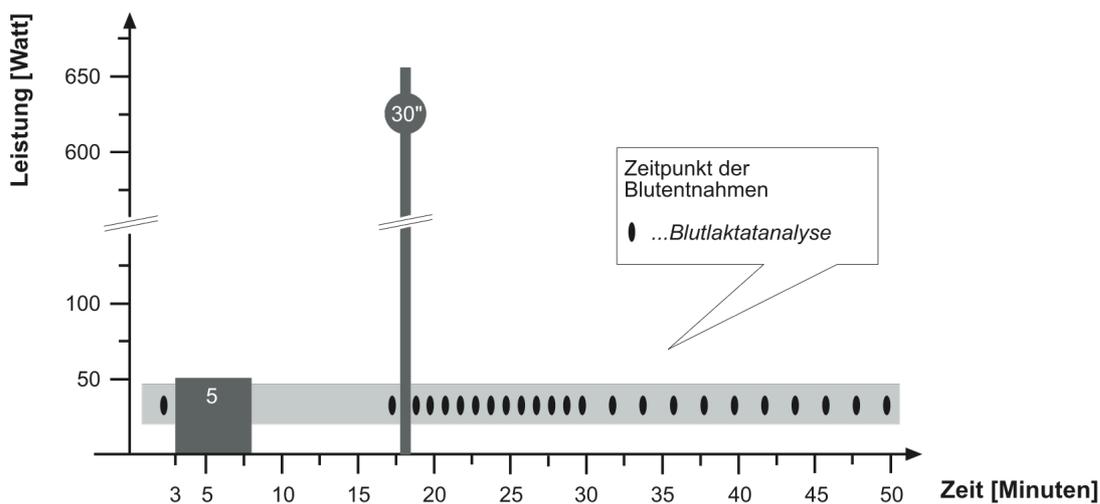


Abbildung 3: Ablaufschema des WAnTs. Aufwärmphase (5 Minuten, dunkelgrauer Balken, 5), Belastungsphase (30 Sekunden, dunkelgrauer Balken, 30''). Gekennzeichnet sind die Zeitpunkte der Blutentnahme zur Blutlaktatbestimmung

Dem WAnT ging das im SMAX beschriebene Aufwärmprogramm voraus, dieses wurde auf dem drehzahlunabhängigen Ergometer durchgeführt. Die Probanden wechselten zu Beginn der 10 Minuten andauernden Vorstartpause auf das Testergometer.

Eine Nachbelastungsphase wurde an den WAnT analog zum SMAX angeschlossen. Die Erfassung der spirometrischen Daten und der Herzfrequenzmessung sowie die Blutentnahmen zur Bestimmung der Blutlaktatkonzentration wurden für 30 Minuten nach der Belastung weiter durchgeführt.

2.2.4 Kurzer anaerober Test

Der kurze anaerobe Test (kAnT) ist ein Maximalbelastungstest, der nach dem im WAnT beschriebenen Ablauf erfolgte.

Die maximale Geschwindigkeit sollte für nur 10 Sekunden gehalten werden. Das Bremsgewicht entsprach mit $0,075 \text{ kg Gewicht} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Körpergewicht}$ dem im WAnT angelegten Bremsgewicht (Inbar et al., 1996).

Die Probanden wurden darüber informiert, dass der Test nach 10 Sekunden abgebrochen werden würde. Sie absolvierten eine Aufwärmphase mit anschließender Vorstartpause analog zu den zuvor beschriebenen Tests (Ablaufschema in Abbildung 4).

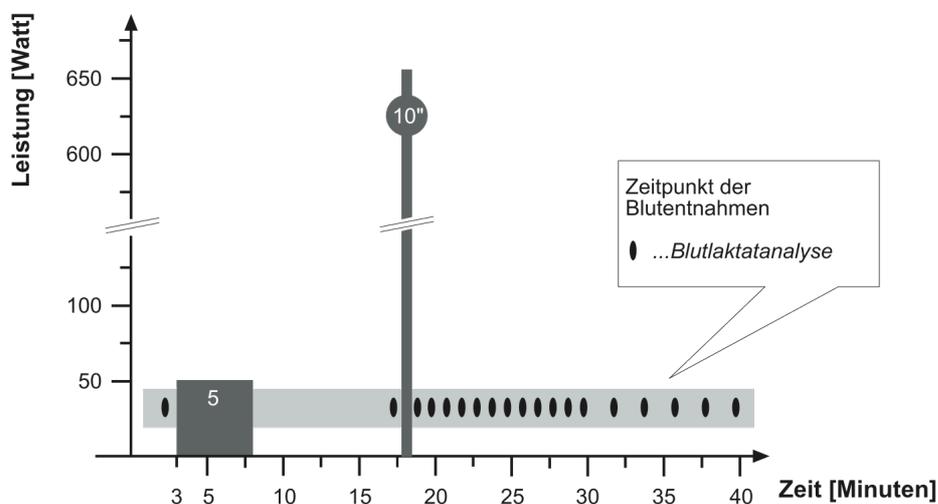


Abbildung 4: Ablaufschema des kurzen anaeroben Tests. Aufwärmphase (5 Minuten, dunkelgrauer Balken, 5), Belastungsphase (10 Sekunden, dunkelgrauer Balken, 10"). Gekennzeichnet sind die Zeitpunkte der Blutentnahme zur Blutlaktatbestimmung.

Wie im WAnT setzte die körperliche Belastung des Probanden aus dem körperlichen Ruhezustand ein. Im Anschluss an die kurze Belastung folgte eine zwanzigminütige Nachbelastungsphase. Diese wurde im körperlichen Ruhezustand durchgeführt. Die Spirometrie und Herzfrequenzmessung erfolgten während des gesamten Tests und der Nachbelastung. Die Zeitpunkte der Blutentnahmen zur Bestimmung der Blutlaktatkonzentration sind in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

2.3 Messgrößen und Geräte

2.3.1 Spiroergometrie

Die Leistungstests wurden unter kontinuierlicher spiroergometrischer Messung durchgeführt. Die Messung von endexpiratorischer Sauerstoff- und Kohlenstoffdioxidkonzentration, Atemzugvolumen und Atemfrequenz erfolgten mit einem offenen Spirometriesystem (Oxycongamma, Mijnhard, Niederlande). Die Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$) und Kohlendioxidabgabe ($\dot{V}CO_2$), der respiratorische Quotient von $\dot{V}CO_2$ und $\dot{V}O_2$ (RQ) und das Atemminutenvolumen als Produkt aus Atemzugvolumen und Atemfrequenz wurden aus den gemessenen Größen errechnet.

Das Spirometriesystem bestand aus einer Atemmaske mit 90 ml Volumen, diese wurde mit dem Spirometer über ein Schlauchsystem verbunden. Durch ein ins Messsystem integriertes Flowmeter (Triple V Transducer, Mijnhard, Niederlande), in dem eine Fotozelle die Rotationsrichtung und Geschwindigkeit der Turbinenflügel registriert, wurde das Atemzugvolumen und die Atemfrequenz unter BTPS Bedingungen (Body Temperature Pressure Saturated: 37°C, Druck 760mmHg, Wasserdampfsättigung) errechnet. Über Gasanalytoren (differential paramagnetischer Sauerstoff- und Infrarot Kohlenstoffdioxid-Analysator) wurden zeitgleich die Gaskonzentrationen erfasst. Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung war eine Berechnung der Gasvolumina bei jedem Atemzug möglich. Den Herstellerangaben entsprechend wurde das Gerät mindestens 30 Minuten vor der Eichung in Betrieb genommen, so konnte eine konstante Betriebstemperatur als Grundlage für die Gas- und Volumeneichung gesichert werden. Vor jeder Messung wurde eine regelrechte Eichung durchgeführt: Die Turbine, die Atemvolumen- und Atemflusssensoren wurden mit einer 3 L Eichpumpe geprüft. Die Gasanalysekalibration wurde gegen ein bekanntes Testgas (5% Kohlenstoffdioxid, 95% Stickstoff) sowie gegen die Umgebungsluft durchgeführt.

2.3.2 Höchste Sauerstoffaufnahme

Die testspezifische höchste Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2peak}$) entsprach der höchsten gemessenen Sauerstoffaufnahme im Stufentest. Sie wurde definiert als der höchste Wert, der während des Stufentests im Mittel über eine Minute aufgenommen wurde.

2.3.3 Herzfrequenz

Die Herzfrequenzmessung erfolgte mit einem Messsystem (Fa. Polar, Finnland). In einem am Thorax anliegenden Brustgurt waren Messelektroden und Sendeelektronik integriert. Die Messung funktionierte nach dem Elektrokardiogramm-Prinzip (Heck, 1990), bei dem die Herzfrequenz durch Auszählung der RR-Intervalle über einen definierten Zeitraum ermittelt wurde. Die Messwerte wurden gespeichert und zusätzlich durch einen telemetrischen Sporttester PE-3000 (Fa. Polar, Finnland) angezeigt und im Testprotokoll festgehalten.

2.3.4 Blutlaktatkonzentration

Die Blutlaktatkonzentration (BLK) wurde aus 20 µl Kapillarblut bestimmt. Das Blut wurde aus dem hyperämisierten Ohrläppchen entnommen. Dazu wurde das Ohrläppchen mit einer sterilen Einmallinganzette punktiert. Nachdem der erste Tropfen verworfen wurde, konnte das spontan oder unter leichtem Druck austretende Blut mit einer Glaskapillare (Fa. Marienfeld, Deutschland) aufgenommen werden. Die Proben wurden direkt in 1000 µl Probengefäße mit Systemlösung (EBIO plus, Fa. Eppendorf, Deutschland) gegeben und hämolysiert.

Die Laktatkonzentration in der Probe wurde nach dem enzymatisch-amperometrischen Messprinzip mit einem Laktat- und Glukosemessgerät (EBIO plus 6668, Fa. Eppendorf, Deutschland) bestimmt. Dabei wurde durch das membranständige Enzym Laktatoxidase die Oxidation von Laktat und Sauerstoff zu Pyruvat und Wasserstoffperoxid katalysiert. Letzteres wurde an einer Platinelektrode oxidiert und konnte als fortwährendes Messsignal abgeleitet werden. Das Maximum der differenzierten Kurve markierte den maximalen Anstieg der Strom-Zeit-Kurve und wurde in einen Spannungswert umgewandelt. Dieser Wert war proportional zur Laktatkonzentration. Die Messungenauigkeit betrug laut Herstellerangaben $< 2,5\%$ bei $12 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$.

2.3.5 Subjektives Belastungsempfinden

Im Anschluss an jede im Stufentest absolvierte Belastungsstufe und den SMAX, den WAnT und den kAnT wurde das Belastungsempfinden der Probanden mit Hilfe einer Rating-Skala abgefragt (Borg, 1970). Die Probanden zeigten dazu auf einen Zahlenwert zwischen 6 (sehr leicht) und 20 (sehr, sehr anstrengend), siehe Abbildung 5.

6	
7	sehr leicht
8	
9	
10	leicht
11	
12	
13	etwas anstrengend
14	
15	
16	anstrengend
17	
18	sehr anstrengend
19	
20	sehr, sehr anstrengend

Abbildung 5: BORG-Skala, Angabe des subjektiven Belastungsempfindens

2.3.6 Ergometer

Das elektronisch gebremste Ergometer „Lode Excalibur Sport V 2.0“ (Fa. Lode, Niederlande) wurde im Stufentest und im SMAX sowie im standardisierten Aufwärmprotokoll verwendet. An einer Drehzahlanzeige konnten Probanden und Versuchsleiter die Pedaltrittfrequenz kontrollieren. Das Ergometer arbeitete nach dem verschleißlosen Wirbelstrombremsenprinzip, wobei eine Kupferbremsscheibe von einer Kurbelachse angetrieben wurde (Hollmann und Hettinger, 2000). Die Kraftübertragung von den Pedalen erfolgte über eine spezielle Ketten- und Riementransmission. Die Leistungsbreite des Ergometers lag zwischen 10 und 1000 Watt bei einer Abweichung von $\pm 2\%$, der Drehzahlbereich zwischen 10 und 220 $\text{U}\cdot\text{min}^{-1}$ bei einer Messabweichung von $\pm 1\%$. Die Steuerung der Leistung erfolgte mit Hilfe der im Spiroergometrieprogramm integrierten Software.

Der WAnT und der kAnT wurden auf dem mechanisch gebremsten „Monark Weight Ergometer, Model 824 E“ (Fa. Monark, Schweden) durchgeführt. Das Ergometer arbeitete drehzahlabhängig. Über die Pedale wurde ein Zahnrad angetrieben, das über eine Fahrradkette ein Schwungrad in Bewegung setzte. Das Schwungrad wurde durch ein Flaschenzugsystem gebremst. Das anliegende Bremsgewicht konnte in 100 g Schritten abgestuft werden. Zum Start einer Beschleunigungsphase wurde das Gewicht mit einer

Schlaufe angehoben, wodurch sich das Polyester-Bremseil von der Lauffläche des Schwungrades löste. Bei Messbeginn wurde die Schlaufe losgelassen und das Gewicht bremste das Schwungrad. Über eine integrierte Lichtschranke erfolgte die Registrierung der Seilspannung. Bei einer Veränderung der Spannung wurde automatisch die Messung der Leistung gestartet. Es erfolgte eine optimale Anpassung der Fahrradergometer an die Probanden (Bar-Or, 1987; Mandroukas, 1990). Eine gute Kraftübertragung von den Füßen auf die Pedale wurde mit Hilfe von Pedalschlaufen gesichert.

2.4 Berechnung der mechanischen Leistung

Beim WAnT und beim kAnT erfolgte die Messung der mechanischen Leistung bei vorgegebener konstanter Bremskraft (siehe 2.2.3 und 2.2.4). Sie errechnete sich aus dem Produkt von Kraft und Geschwindigkeit. Die Kraft entsprach dem konstanten Bremswiderstand und die Geschwindigkeit der zurückgelegten Strecke (gegeben durch den Durchmesser der Schwungscheibe) bezogen auf die Testdauer. Die aktuelle Leistung war abhängig von der jeweiligen Drehzahl und wurde über 5 Sekunden gemittelt. Die mechanischen Leistungen im WAnT und kAnT wurden zu verschiedenen Zeitpunkten ermittelt.

Aus dem WAnT wurden folgende Messwerte zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit verwendet. Die Spitzenleistung („Peak Power 30“, PP30) war die höchste, während eines 5 Sekundenabschnitts im Test erbrachte mechanische Leistung, die Minimalleistung („Least Power 30“, LP30) die niedrigste. Die Durchschnittsleistung („Average Power 30“, AP30) entsprach der über den gesamten WAnT gemittelten Leistung. Der Erschöpfungsindex („Fatigue Index 30“, FI30) errechnete sich aus dem Unterschied von Spitzenleistung und Minimalleistung aus der Formel 3. Aus dem Protokoll des kAnTs wurde die Spitzenleistung („Peak Power 10“, PP10), die Minimalleistung („Least Power 10“, LP10), die Durchschnittsleistung („Average Power 10“, AP10) und der Erschöpfungsindex („Fatigue Index 10“, FI10) (Formel 3) verwendet.

$$FI[\%] = (PP[W] - LP[W]) \cdot PP[W] \cdot 100$$

Formel 3: Berechnung des Fatigue Index im WAnT (FI30) und kAnT (FI10)

Beim ST und beim SMAX wurde die vorgegebene mechanische Leistung unabhängig von der aktuellen Drehzahl durch das Ergometer konstant gehalten. Die Festlegung der mechanischen Leistung für die Belastungen im ST wird unter 2.2.1 und für den SMAX unter 2.2.2 beschrieben.

2.5 Berechnung der Einzelkomponenten der metabolischen Leistung

Der aerobe, der anaerob-laktazide und der anaerob-alaktazide Energiebereitstellungsanteil wurden getrennt ermittelt. Der anaerobe Stoffwechsel im SMAX wurde wie unter 2.6 beschrieben zusätzlich nach dem MAOD-Verfahren bestimmt.

2.5.1 Berechnung der aeroben metabolischen Leistung

Für die einzelnen Tests errechnete sich der aerobe Stoffwechsel aus der Energiemenge, die unter Sauerstoffverbrauch bereitgestellt wurde. Die aerobe Energiemenge war proportional zu der Menge an Sauerstoff, die während der Belastung aufgenommen wurde. Die Sauerstoffmenge wurde durch Addition der Sauerstoffaufnahme durch die Atemzüge während der Belastung errechnet. Zur Berechnung der aeroben metabolischen Leistung wurde die Sauerstoffmenge, die während der Belastungsphase über dem Ruhewert aufgenommen wurde, herangezogen. Als Ruhewert wurde bei den männlichen Probanden $4 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ KG und bei den weiblichen Probanden $3,5 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ KG zugrunde gelegt (Geigy, 1982).

2.5.2 Berechnung der anaerob-laktaziden metabolischen Leistung

Der anaerob-laktazide Stoffwechsel wurde auf der Grundlage der in der Nachbelastung engmaschig erfolgten Blutlaktatkontrollen bestimmt. Das Zeitverhalten der Blutlaktatkonzentration (BLK) wurde mit Hilfe einer mathematischen Gleichung modelliert. Die Bestimmung basierte auf dem pharmakokinetischen Modell einer einmaligen intramuskulären Pharmakongabe equivalent zu einem arbeitsbedingten extravasalen Laktatanstieg (A_L) sowie der entsprechenden Invasion und Evasion im Blutkompartiment, siehe Abbildung 6 auf der folgenden Seite (Dost, 1968). Zur Modellierung wurde ein Drei-Parameter-Modell verwendet, welches in einer vorangegangenen Publikation für die gegebenen Belastungen evaluiert wurde (Beneke et al., 2007). Basierend auf den ge-

messenen Werten wurde eine Funktion gebildet und daraus eine Invasionskonstante, eine Eliminationskonstante, A_L als hypothetischer Laktatbolus sowie der maximale Blutlaktatwert und dessen Zeitpunkt berechnet (siehe Formel 4 und Abbildung 6). Zur Bestimmung der anaerob-laktaziden Energiemenge wurde der Laktatbolus A_L verwendet.

$$BLK[mmol \cdot l^{-1}] = \frac{A \cdot k_1}{k_2 - k_1} \cdot (e^{-k_1 \cdot t} - e^{-k_2 \cdot t}) + BLK_{Ruhe}$$

Formel 4: Berechnungsformel des Drei-Parameter-Modells. BLK= Blutlaktatspiegel, A_L = angenommener Laktatbolus, t = Zeit, k_1 = Invasionskonstante, k_2 = Eliminationskonstante, e = Konstante (2,71828), Blutlaktatwert vor der Belastung (BLK_{Ruhe})

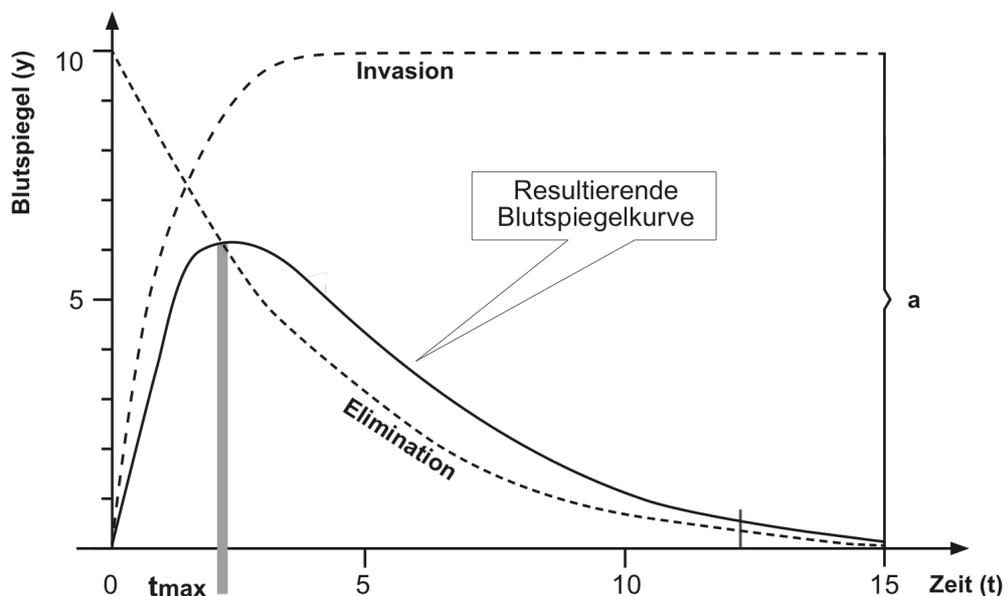


Abbildung 6: Darstellung der modellhaften Analyse des Laktatverhaltens bei intensiver Belastung als resultierende Kurve zwischen gleichzeitiger Invasion und Elimination (Dost, 1968)

2.5.3 Berechnung der anaerob-alaktaziden metabolischen Leistung

Zur Bestimmung des anaerob-alaktaziden Anteils wurde die Sauerstoffmehraufnahme nach Belastungsende betrachtet (Margaria et al., 1933). Daraus konnten Rückschlüsse auf die Resynthese energiereicher Phosphate gezogen werden. Mittels mathematischer Modelle wurde die Sauerstoffmenge in der Nachbelastung ermittelt, die der sogenannten schnellen Komponente der Sauerstoffaufnahme entsprach. Diese dient hauptsächlich zur Resynthese energiereicher Phosphate (Prampetro und Ferretti, 1999).

2.5.3.1 Verfahren nach Knuttgen

Das Sauerstoffaufnahmeverhalten wurde mit Hilfe einer biexponentziellen Funktion (Knuttgen, 1970) dargestellt (Abbildung 7 und Formel 5), wobei der erste Term den schnellen und der zweite Term den langsamen Verlauf der Kurve wiedergibt; C steht für die Sauerstoffaufnahme im Ruhezustand.

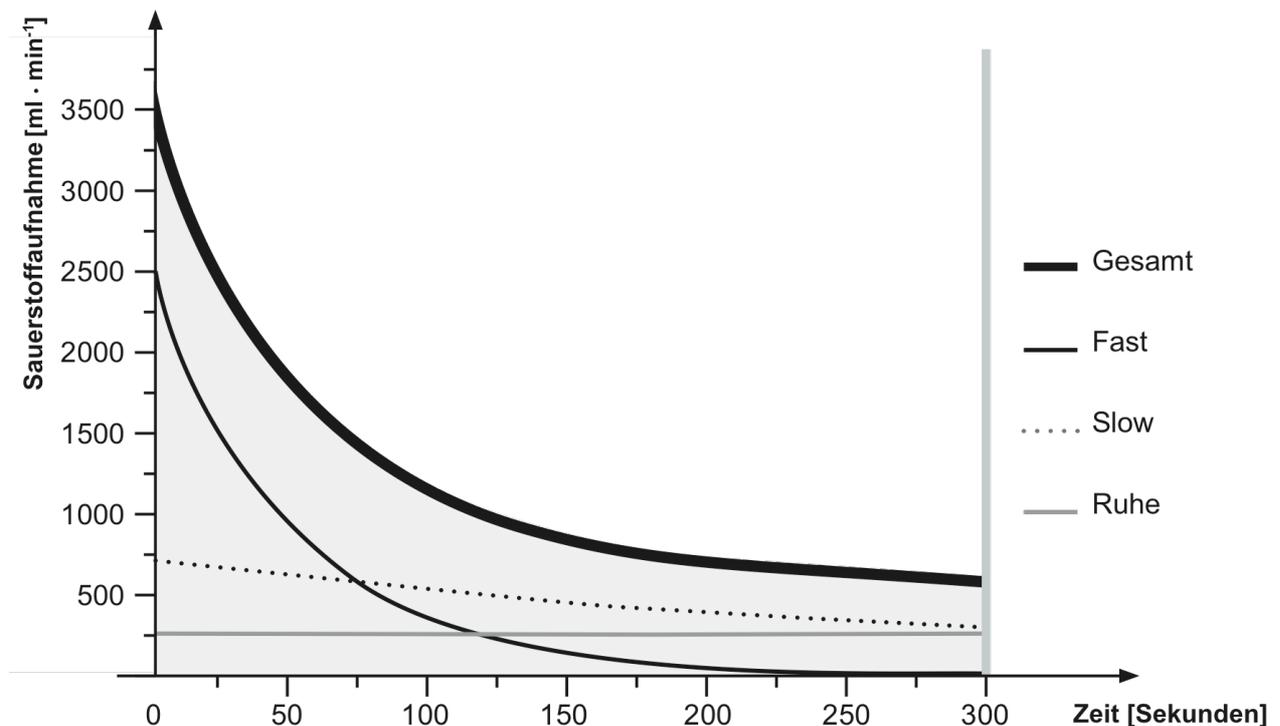


Abbildung 7: Grafische Darstellung der Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung, nach Knuttgen (1970), Gesamt= Gesamtverlauf der Sauerstoffaufnahme, Fast= schnelle Komponente, Slow= langsame Komponente und Ruhe= Ruhesauerstoffaufnahme

Der anaerob-alktazide Anteil ergab sich aus der Integration der schnellen Komponente der Nachbelastungskinetik zum Zeitpunkt $4 \cdot \tau a$ (Formel 6 auf folgender Seite). Es handelte sich um die Sauerstoffmenge, die der schnellen Komponente der $\dot{V}O_2$ -Nachbelastung entsprach (Zanconato et al., 1991).

$$\dot{V}O_2(t) = A \cdot e^{(-t/\tau a)} + B \cdot e^{(-t/\tau b)} + C$$

Formel 5: Biexponentzieller Verlauf der Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung (in $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$). A= Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente, τa = Zeitkonstante, B= Sauerstoffaufnahme der langsamen Komponente, τb = Zeitkonstante, C= Ruhe-Sauerstoffaufnahme, e= Konstante (2,71828)

$$\dot{V}O_2 = \tau a \cdot A - \tau a \cdot A \cdot e^{(-4)}$$

Formel 6: Berechnung der Fläche unter der Kurve der schnellen Komponente des biexponentziellen Verlaufs der Sauerstoffaufnahme über den Zeitraum 0 bis $4 \cdot \tau a$ (in ml). A= Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente, τa = Zeitkonstante, e= Konstante (2,71828)

Bei den mit einer Belastungsdauer von 10 (kAnT) bzw. 30 Sekunden (WAnT) sehr kurzen Tests konnte unmittelbar nach Ende der Belastung ein weiterer Anstieg der Sauerstoffaufnahme und damit ein verzögert einsetzender Abfall der $\dot{V}O_2$ nicht ausgeschlossen werden. Die Approximation durch das biexponentzielle Modell nach Knuttgen konnte in diesem Fall nicht sicher angewendet werden (Beneke et al., 2002).

2.5.3.2 Verfahren modifiziert nach di Prampero

Bei den kurzen anaeroben Tests (WAnT und kAnT) wurde das Sauerstoffaufnahmeverhalten nach der Belastung auf einen verzögert einsetzenden Abfall der $\dot{V}O_2$ überprüft. Um eine Zeitverzögerung nachzuweisen wurde die Sauerstoffaufnahme während der Nachbelastung halblogarithmisch gegen die initialen 2 Minuten der Nachbelastungszeit aufgetragen. Die Bestimmung des Zeitpunkts der Zeitverzögerung erfolgte durch eine grafische Identifizierung des Moments an dem die $\dot{V}O_2$ von einer gefitteten Geraden deutlich abwich (Prampero et al., 1973).

Bei Auftreten eines verzögert einsetzenden Abfalls der $\dot{V}O_2$ wurde das Sauerstoffaufnahmeverhalten mittels eines Verfahrens modifiziert nach di Prampero et al. modelliert. In der Literatur wurde diese Methode bei der 30 Sekunden andauernden WAnT-Belastung angewendet (Beneke et al., 2002). Die schnelle Komponente entsprach dabei einem Anteil der Sauerstoffaufnahme während der initialen Phase der Nachbelastung. Dieser Anteil wurde durch die Differenz der Gesamtsauerstoffaufnahme und der Sauerstoffmenge der langsamen Komponente ermittelt. Die langsame Komponente wurde aus der Sauerstoffaufnahme ab der 3. Minute als monoexponentielle Funktion dargestellt und in den Bereich der schnellen Komponente extrapoliert (Abbildung 8 auf folgender Seite). Die Modifikation bestand darin, eine monoexponentielle Funktion statt einer Geraden, wie von der Arbeitsgruppe um di Prampero et al. verwendet, zur Approximation der langsamen Komponente zu verwenden (Beneke et al., 2002).

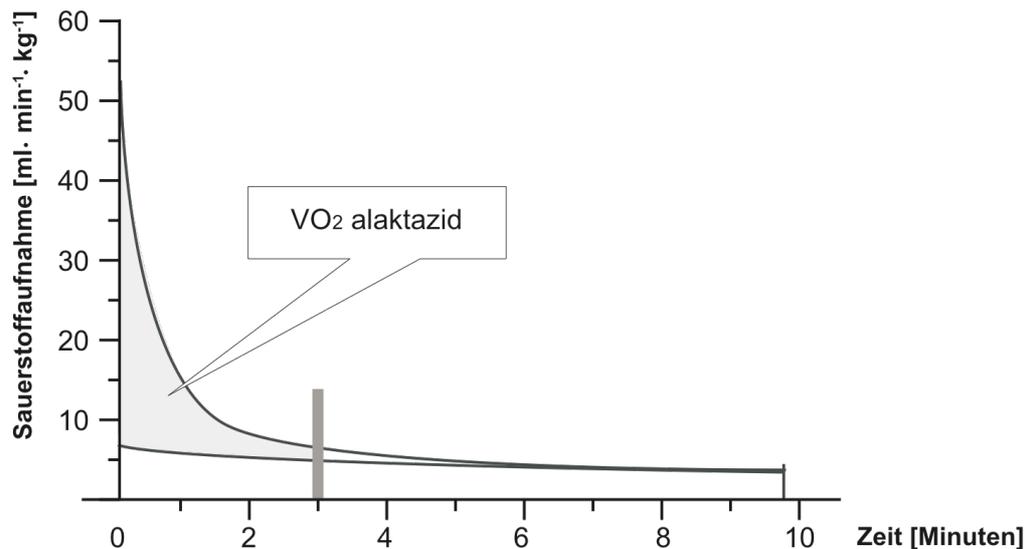


Abbildung 8: Sauerstoffaufnahme nach Belastungsende. Modelliert nach di Prampero et al. 1973 (Erläuterung siehe Text). VO_2 alaktazid= der Resynthese energiereicher Phosphate entsprechende Sauerstoffmenge (in ml) berechnet bis zur 3. Minute der Nachbelastung

2.6 Verfahren zur Bestimmung des Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizits

Die Bestimmung des Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizits (MAOD) gliederte sich formal in zwei aufeinander folgende Abschnitte: Zunächst wurde mittels aerob dominanter Untersuchungen der individuelle lineare Zusammenhang zwischen Intensität und Sauerstoffaufnahme ermittelt. Anhand dieser Regressionsanalyse (Kapitel 2.6.1) wurde der theoretische akkumulierte Sauerstoffbedarf für die Leistung im SMAX extrapoliert (siehe Formel 8 und Abbildung 9a auf den folgenden Seiten). Das Verfahren zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Intensität und Sauerstoffaufnahme wurde in der vorliegenden Arbeit nach testökonomischen Gesichtspunkten modifiziert. Im zweiten Abschnitt wurde die im gesamten SMAX tatsächlich aufgenommene Sauerstoffmenge vom theoretisch ermittelten akkumulierten Sauerstoffbedarf abgezogen. Die Differenz der über die Testdauer akkumulierten Sauerstoffmenge ergab das akkumulierte Sauerstoffdefizit (Medbø et al., 1988) (Abbildung 9b auf folgender Seite). Maximale Werte für das Sauerstoffdefizit wurden nach Medbø et al. (1988) für eine vorgegebene Belastung mit einer Dauer von etwa 180 Sekunden ermittelt.

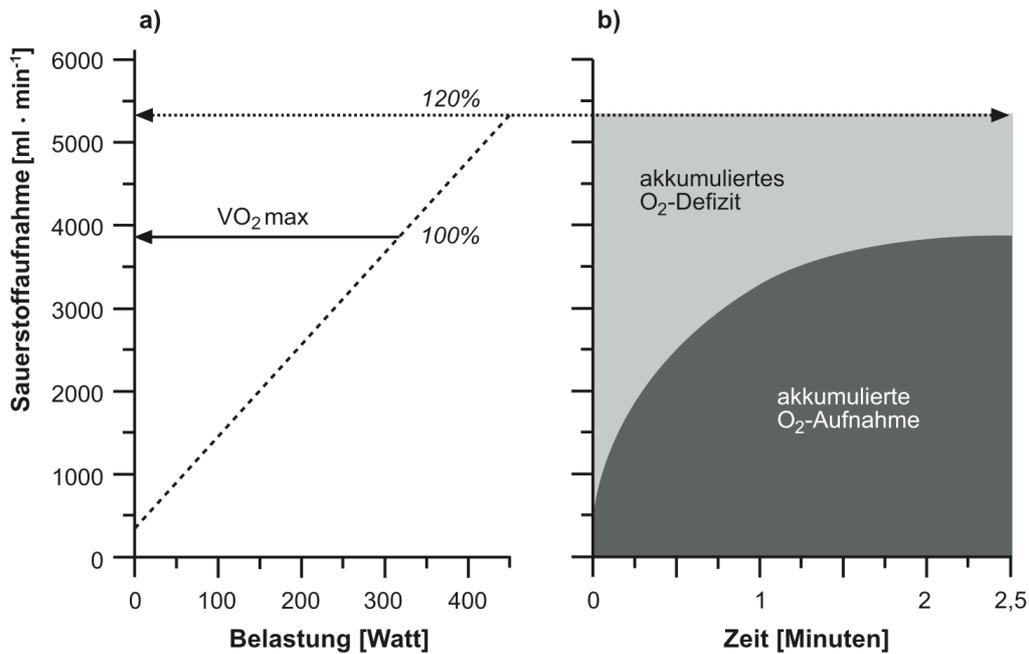


Abbildung 9 a) und b): Schematische Darstellung des MAODs nach Medbø et al. (1988); a) Der Sauerstoffbedarf ergibt sich aus der Regressionsgeraden, b) Das MAOD (akkumuliertes O₂-Defizit) errechnet sich aus der Differenz der Integrale des Sauerstoffbedarfs (akkumulierter O₂-Bedarf) und der Sauerstoffaufnahme (akkumulierte O₂-Aufnahme)

2.6.1 Regressionsgerade

Der Zusammenhang zwischen Sauerstoffaufnahme und Leistung der jeweiligen Stufen im Stufentest wurde in Form einer Regressionsgeraden für jeden Probanden individuell dargestellt. Nach Medbø et al. (1988) wurde als lineares Modell eine Geradengleichung (Formel 7) verwendet. Zur Berechnung wurden alle vollständig absolvierten Stufen aus dem Stufentest verwendet. Die Sauerstoffaufnahme wurde über die 5. Belastungsminute gemittelt und mit der Leistung korreliert.

$$\dot{V}O_2[ml \cdot \text{min}^{-1}] = St_{\text{Regress}} \cdot P_{\text{Stufe}} + Y_{\text{Schnitt}}$$

Formel 7: Regressionsgerade zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen Leistung und Sauerstoffaufnahme. $\dot{V}O_2$ =Sauerstoffaufnahme (in ml·min⁻¹), St_{Regress} = die Steigung der Geraden, P_{Stufe} = Leistung der Belastungsstufe im ST, Y_{Schnitt} = Schnittpunkt mit der Y-Achse

2.6.2 Berechnungen des Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizits

Die Bestimmung des akkumulierten Sauerstoffbedarfs für die supramaximale Belastung erfolgte durch Extrapolation der jeweiligen Regressionsgeraden in den Bereich, der mit der Leistung im SMAX korrespondierte (siehe Formel 8).

Die Durchführung des SMAXs stellt den zweiten Abschnitt des MAOD-Verfahrens dar. Der Test wurde so konzipiert, dass er nach etwa 180 Sekunden (150-120 Sekunden) zur Erschöpfung der Probanden und damit zum Testabbruch führte. Dazu wurde eine Leistung korrespondierend zu 120% der $\dot{V}O_{2peak}$ vorgegeben (siehe Kapitel 2.2.2).

$$AO_2Bedarf[ml] = (St_{Regress} \cdot P_{120\%} + Y_{Schnitt}) \cdot SMAX_{Dauer}$$

Formel 8: Berechnung des akkumulierten Sauerstoffbedarfs mit Hilfe der Regressionsformel, $AO_2Bedarf$: akkumulierter Sauerstoffbedarf, $St_{Regress}$ ist die Steigung der Geraden, $Y_{Schnitt}$ der Schnittpunkt mit der Y-Achse, $P_{120\%}$ entspricht der vorgegebenen Leistung im SMAX, $SMAX_{Dauer}$ = Testdauer des SMAXs (siehe auch Formel 7)

Anhand des akkumulierten Sauerstoffbedarfs erklären die Autoren der Originalmethode den Gesamtenergiebedarf der vorgegebenen supramaximalen Belastung (Medbø et al., 1988). Von dieser theoretischen Sauerstoffmenge wurde die im erschöpfenden SMAX tatsächlich aufgenommene Sauerstoffmenge abgezogen. Die Differenz ergab über die Zeit integriert das akkumulierte Sauerstoffdefizit, siehe Formel 9.

$$AO_2Defizit = AO_2Bedarf - AO_2Aufnahme$$

Formel 9: Berechnung des MAODS ($AO_2Defizit$) aus der Differenz des akkumulierten Sauerstoffbedarfs ($AO_2Bedarf$) und der akkumulierten Sauerstoffaufnahme ($AO_2Aufnahme$) während des SMAXs

Durch die Messgröße wurden sowohl die anaerob-alkalisch bereitgestellte Energie aus der Spaltung von CrP als auch die anaerob-laktisch bereitgestellte Energie aus der anaeroben Glykolyse erfasst. Das MAOD wurde in $ml \cdot kg^{-1}$ bzw. $mmol \cdot kg^{-1}$ Sauerstoff angegeben (Medbø et al., 1988).

2.7 Metabolischer Arbeitsumsatz

Die während der Tests aufgenommene Sauerstoffmenge wurde mit dem kalorischen Äquivalent (kÄ) multipliziert (Formel 10). Das kÄ wurde abhängig vom durchschnittlichen respiratorischen Quotienten (RQ) der Belastung ermittelt (Stegemann, 1991). Bei den intensiven Tests lag eine Glukoseverstoffwechselung (RQ > 1) mit einem kÄ von 21,131 J·ml⁻¹ vor (Hollmann und Hettinger, 2000).

$$W_{aerob} [J] = VO_{2Netto} [l] \cdot k\ddot{A} [J \cdot l^{-1}]$$

Formel 10: Berechnung des aeroben Arbeitsumsatzes (W_{aerob}), VO_{2Netto} = Nettosauerstoffaufnahme. kÄ= kalorisches Äquivalent

Die anaerob-laktazide Arbeit ergab sich aus dem Produkt von A_L , dem Sauerstoff-Laktat-Äquivalent, dem Körpergewicht und dem kÄ (Formel 11) (Beneke et al., 2007; Mader und Heck, 1986; Prampero et al., 1981). Das kÄ liegt bei 21,131 J·ml⁻¹ (Hollmann und Hettinger, 2000), für das Sauerstoff-Laktat-Äquivalent wurden 3,0 ml·mmol⁻¹·l·kg⁻¹ zugrunde gelegt (Prampero et al., 1981).

$$W_{anaerob-laktazid} [J] = A_L [mmol \cdot l^{-1}] \cdot 3,0 [ml \cdot mmol^{-1} \cdot l \cdot kg^{-1}] \cdot KG [kg] \cdot 21,131 [J \cdot ml^{-1}]$$

Formel 11: Berechnung des anaerob-laktaziden Arbeitsumsatzes ($W_{anaerob-laktazid}$). A_L = errechneter extravasaler Laktatanstieg; KG= Körpergewicht des Probanden

Zur Berechnung der anaerob-alaktaziden Arbeit wurde die Sauerstoffmenge der schnellen Komponente mit dem kÄ von 21,131 J·ml⁻¹ multipliziert (Formel 12).

$$W_{anaerob_alaktazid} [J] = VO_{2alaktazid} [ml] \cdot 21,131 [J \cdot ml^{-1}]$$

Formel 12: Berechnung des anaerob-alaktaziden Arbeitsumsatzes ($W_{anaerob-alaktazid}$). $VO_{2alaktazid}$ = Sauerstoffmenge die der Resynthese energiereicher Phosphate entsprach

Zur Berechnung der anaeroben Energiemenge nach dem MAOD-Verfahren wurde das akkumulierte Sauerstoffdefizit mit dem kÄ von 21,131 J·ml⁻¹ verrechnet (Hollmann und Hettinger, 2000), siehe Formel 13.

$$W_{MAOD}[J] = AO_2Defizit[l] \cdot 21,131[J \cdot l^{-1}]$$

Formel 13: Berechnung des Arbeitsumsatzes nach dem MAOD-Verfahren (W_{MAOD}). $AO_2Defizit$ = akkumuliertes Sauerstoffdefizit, entspricht der anaeroben Sauerstoffmenge nach dem MAOD-Verfahren, multipliziert mit dem kÄ von 21,131

Der Arbeitsumsatz einer Belastung ergab sich aus der Summe der Teilbeträge von aerobem und anaerobem Stoffwechsel (Beneke und Meyer, 1997). Die Teilbeiträge des aeroben Stoffwechsels wurden mit dem anaerob-laktaziden und dem anaerob-alaktaziden Stoffwechsel (Formel 14) bzw. dem anaeroben Energiebereitstellungsanteil aus dem MAOD-Verfahren (Formel 15) addiert. Der jeweilige Anteil am Arbeitsumsatz pro Zeit (Leistung) wurde berechnet.

$$P_{gesamtEINZEL}[W] = \frac{W_{aerob}[J] + W_{anaerob-laktazid}[J] + W_{anaerob-aktazid}[J]}{Belastungsdauer[s]}$$

Formel 14: Berechnung der erbrachten Leistung über dem Ruheumsatz ($P_{gesamtEINZEL}$). W_{aerob} = aerober Anteil am Arbeitsumsatz; $W_{anaerob-laktazid}$ = anaerob-laktazider Anteil am Arbeitsumsatz; $W_{anaerob-alaktazid}$ = anaerob-alaktazider Anteil am Arbeitsumsatz

$$P_{gesamtMAOD}[W] = \frac{W_{aerob}[J] + W_{MAOD}[J]}{Belastungsdauer[s]}$$

Formel 15: Berechnung der erbrachten Leistung über dem Ruheumsatz ($P_{gesamtMAOD}$) beim MAOD-Verfahren. W_{aerob} = aerober Anteil am Arbeitsumsatz; W_{MAOD} = anaerober Anteil am Arbeitsumsatz

Eine Teilleistung ergab sich aus dem Quotienten des entsprechenden Anteils am Arbeitsumsatz und der Dauer.

2.8 Wirkungsgrad

Das Verhältnis zwischen mechanischer Arbeit und metabolischem Arbeitsumsatz bei unterschiedlichen Belastungen wird durch den Begriff des biomechanischen Wirkungsgrades definiert (Moseley und Jeukendrup, 2001; van Ingen Schenau und Cavanagh, 1990). Der biomechanische Wirkungsgrad errechnete sich als Quotient aus der erbrachten physikalischen Arbeit und dem benötigten Arbeitsumsatz pro Zeiteinheit, angegeben in Prozent (Formel 16).

$$\eta[\%] = \frac{\text{Arbeit}[N \cdot m] \cdot \text{Zeit}[s]^{-1}}{\text{Arbeitsumsatz}[J] \cdot \text{Zeit}[s]^{-1}} \cdot 100$$

Formel 16: Berechnung des Wirkungsgrades in Prozent. Biomechanischer Wirkungsgrad: η (*eta*) in %, 1 N·m= 1 J

2.9 Statistik

Die Auswertung erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS 16. Die deskriptiven Ergebnisse wurden als Mittelwert und Standardabweichung wiedergegeben. Eine Prüfung auf Normalverteilung wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test durchgeführt.

Multiple Mittelwertvergleiche wurden mittels eines kombinierten ANOVA-Modells mit Testverfahren als within-factor und Geschlecht als between-factor analysiert. Zur Post-hoc-Analyse wurden gepaarte und ungepaarte T-Tests durchgeführt.

Die mathematische Approximation der Sauerstoffkinetik nach der Belastung mittels mono- und biexponentiellen Modellen sowie des Blutlaktatverhaltens mit einem biexponentiellen Drei-Parameter-Modell erfolgte durch nicht-lineare Regressionsanalyse.

Lineare Abhängigkeiten zwischen Messgrößen wurden mittels einfacher bzw. multipler Regressionsmodelle getestet.

Die Ergebnisse wurden mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 5% ($p < 0,05$) als statistisch signifikant gewertet.

Wenn erforderlich wurde zum Ausgleich der Alphafehler-Kumulierung eine Bonferroni-Korrektur vorgenommen.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Höchste Sauerstoffaufnahme

Die höchste Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2peak}$) betrug $3,653 \pm 0,852 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ bezogen auf die Körpermasse $50,73 \pm 7,07 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Bei den Männern lag die $\dot{V}O_{2peak}$ absolut wie auch relativ zum KG signifikant über der der Frauen (Männer $54,23 \pm 5,94 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, Frauen $44,21 \pm 3,25 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, $p < 0,001$). Die Abbildung 10 zeigt die individuellen Werte der $\dot{V}O_{2peak}$ in Relation zum Körpergewicht.

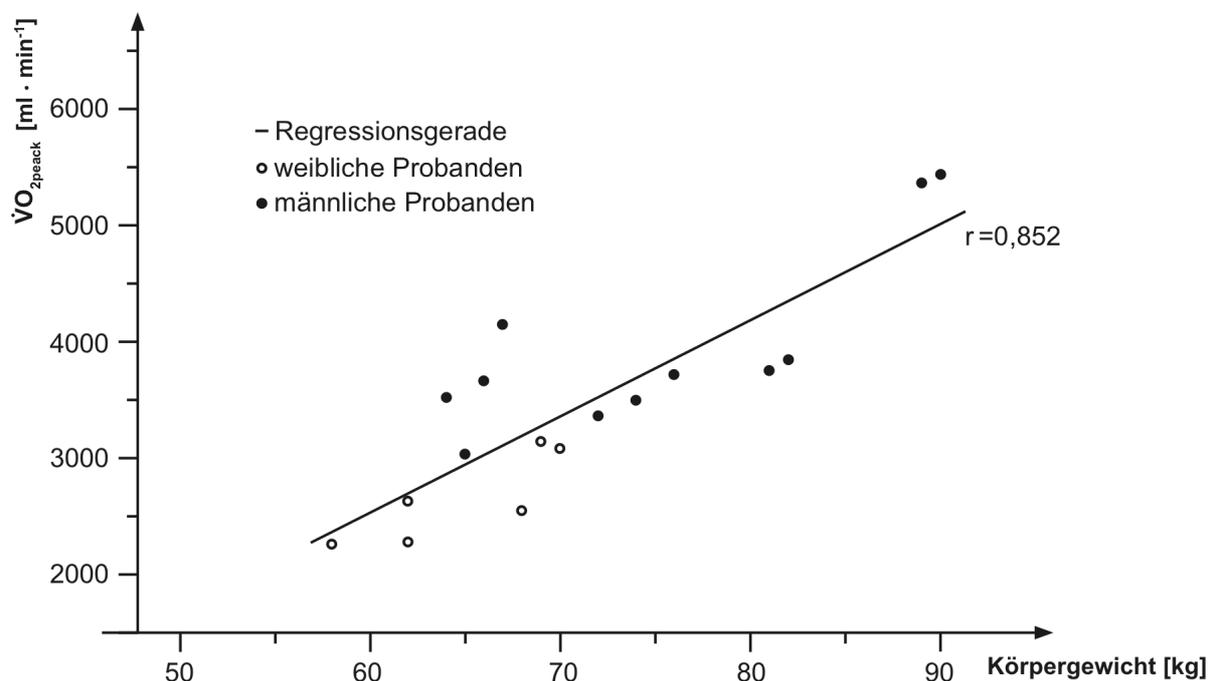


Abbildung 10: Höchste Sauerstoffaufnahme im Stufentest in Relation zum Körpergewicht. Darstellung der weiblichen und männlichen Probanden. $\dot{V}O_{2peak}$ = höchste Sauerstoffaufnahme (in $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$), Körpergewicht (in kg). Regressionsgerade des Gesamtkollektivs ($r = 0,852$, $p < 0,05$)

Bei Erreichen der $\dot{V}O_{2peak}$ war eine Herzfrequenz von $182,9 \pm 9,1$ Schlägen pro Minute messbar. Die maximale Blutlaktatkonzentration im Anschluss an den Stufentest lag bei $12,24 \pm 2,12 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$. Bei Testabbruch erreichte der RQ $1,10 \pm 0,04$. Das respiratorische Atemäquivalent lag bei >35 . Das Belastungsempfinden wurde durch alle Probanden mit dem höchsten Wert (20) auf der Skala nach Borg angegeben.

Die neben der höchsten Sauerstoffaufnahme im ST erhobenen Messungen wurden zur Bestimmung des Sauerstoffbedarfs nach dem MAOD-Verfahren verwendet und werden unter 3.4 aufgeführt.

3.2 Mechanische Leistung

Im SMAX wurde eine vorgegebene Leistung von $326,5 \pm 71,3$ W erbracht (Männer $363,3 \pm 58,2$ W, Frauen $259,0 \pm 32,4$ W, $p < 0,001$). Bezogen auf die Körpermasse lag die Leistung bei $4,54 \pm 0,60$ W·kg⁻¹ (Männer $4,84 \pm 0,51$ W·kg⁻¹, Frauen $3,98 \pm 0,25$ W·kg⁻¹, $p < 0,002$). Der SMAX hatte eine Dauer von $184,5 \pm 26,57$ Sekunden. Die resultierende mechanische Arbeit lag bei $60,4 \pm 16,29$ kJ.

Ein typischer Verlauf der Leistung (gemittelt über 5 Sekundenintervalle) aus dem WAnT ist in Abbildung 11 dargestellt.

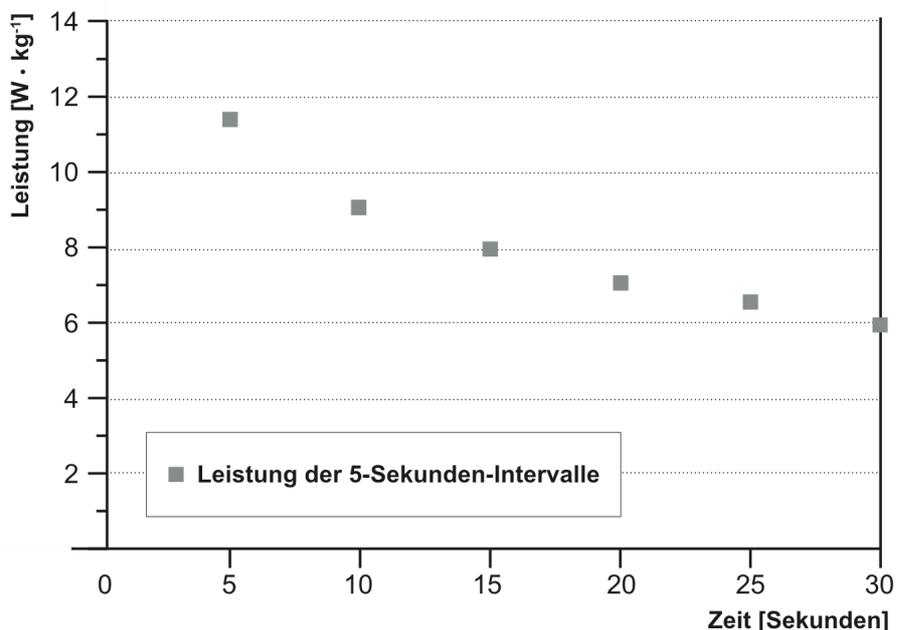


Abbildung 11: Grafische Darstellung des WAnT-Protokolls am Beispiel des Probanden 2, Leistungs-Zeit-Diagramm, Verlauf der mechanischen Leistung im WAnT

Aus der Tabelle 3 (folgende Seite) ist zu entnehmen, dass im statistischen Vergleich bei der höchsten Leistung zwischen WAnT (PP30) und kAnT (PP10) kein signifikanter Unterschied ($p < 0,842$) beobachtet werden konnte. Die Werte zeigten eine hohe Korrelation ($R = 0,961$; $p < 0,001$). Die LP10 gemessen von der 5. bis 10. Sekunde war im kAnT größer als die LP30 im WAnT (gemessen von der 25. bis 30. Belastungssekunde), der Fatigue Index war im kAnT (FI10) kleiner als der FI30 im WAnT (jeweils $p < 0,001$).

KAnT		Alle	±SD	Männer	±SD	Frauen	±SD	P
PP10	[Watt]	777,8	155,1	848,4	143,5	648,5	68,8	0,006
	[Watt·kg ⁻¹]	10,84	1,24	11,29	1,18	10,01	0,92	0,037
LP10	[Watt]	614,4	99,0	657,3	91,5	535,8	55,9	0,010
	[Watt·kg ⁻¹]	8,61	0,88	8,26	0,57	8,79	0,99	0,250
FI10		20,29	6,23	21,97	6,04	17,21	5,80	0,136
WAnT								
PP30	[Watt]	775,7	146,3	837,6	140,4	662,3	72,1	0,013
	[Watt·kg ⁻¹]	10,81	1,00	11,14	1,07	10,20	0,50	0,062
AP30	[Watt]	573,2	101,35	620,1	93,0	487,3	43,3	0,005
	[Watt·kg ⁻¹]	8,00	0,75	8,27	0,72	7,53	0,57	0,047
LP30	[Watt]	450,5	93,7	495,9	82,8	367,3	39,0	0,003
	[Watt·kg ⁻¹]	6,30	1,04	6,64	1,11	5,67	0,50	0,062
FI30		41,71	7,57	40,25	8,70	44,40	4,32	0,295

Tabelle 3: Mechanische Leistung aus dem kAnT und dem WAnT, Gesamtkollektiv (Alle) und nach Geschlechtern getrennt, p= Signifikanzwert des ungepaarten t-Tests, PP10= höchste Leistung im kAnT, LP10= niedrigste Leistung im kAnT, FI10= Fatigue Index im kAnT, PP30= höchste Leistung im WAnT, AP30= durchschnittliche Leistung im WAnT, LP30= höchste Leistung im WAnT, FI30= Fatigue Index im WAnT

Die Belastung gegen die Bremskraft dauerte im WAnT $30,29 \pm 0,47$ Sekunden. Daraus ergab sich eine mechanische Arbeit von $17,36 \pm 3,06$ kJ. Der kAnT dauerte $10,71 \pm 0,47$ Sekunden, die mechanische Arbeit betrug $7,45 \pm 1,30$ kJ. Die Beschleunigungsphase im kAnT und im WAnT dauerte jeweils 3 Sekunden und wurde nicht zur Bestimmung der mechanischen Arbeit herangezogen (Inbar et al., 1996). Zwischen den Geschlechtern ergab sich in Bezug auf die Dauer kein signifikanter Unterschied, die mechanische Arbeit war bei den männlichen Probanden jeweils signifikant höher als bei den weiblichen Probanden ($p < 0,001$).

Die durchschnittliche Leistung im SMAX war signifikant geringer als die AP30 im WAnT und die mittlere Leistung im kAnT (jeweils $p < 0,001$). Die mechanische Arbeit war im SMAX größer als im WAnT und im kAnT (jeweils $p < 0,001$).

3.3 Einzelkomponenten der metabolischen Leistung

Die Messung der metabolischen Leistung basierte auf den erhobenen Messungen der Sauerstoffaufnahme während der Belastung, der Blutlaktatkonzentration und der Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente in der Nachbelastung. Diese Messwerte

und die daraus errechneten metabolischen Einzelkomponenten der Energiebereitstellung werden zu den einzelnen Tests aufgeführt. Zur besseren Übersicht werden die Einzelkomponenten im Folgenden auch nach den Stoffwechselwegen dargestellt.

3.3.1 Metabolische Leistung im supramaximalen Ausbelastungstest

Im supramaximalen Ausbelastungstest (SMAX) lag der RQ bei $1,34 \pm 0,06$. Das Belastungsempfinden wurde durch alle Probanden mit dem höchsten Wert (20) auf der Skala nach Borg angegeben. Die maximale Sauerstoffaufnahme, gemessen in den letzten 30 Sekunden des SMAX, betrug $3,592 \pm 0,910 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ und unterschied sich nicht signifikant von der im ST gemessenen $\dot{V}O_{2\text{peak}}$.

Die Messwerte aus dem SMAX sind in Tabelle 4 und auf der folgenden Seite in Tabelle 5 aufgeführt.

Proband	Belastung [Watt]	Dauer [Sek]	Net VO ₂ [ml]	BLK (A _L) [mmol·l ⁻¹]	Fc Alakt [ml]
1	315	159	6731	18,41	1954
2	369	188	9475	17,28	1756
3	360	218	11259	20,61	1401
4	325	167	8069	13,86	1914
5	305	196	9314	19,60	1637
6	360	177	9688	16,04	1745
7	315	203	10153	18,69	1146
8	377	160	9293	19,64	1821
9	330	207	11012	16,50	2119
10	460	211	15150	24,79	2373
11	480	177	14178	24,50	2373
12	245	230	8813	18,40	1550
13	295	158	6371	16,69	1173
14	219	159	4977	13,72	1069
15	240	151	5064	15,97	1078
16	254	221	8545	15,72	1412
17	301	154	6614	13,30	1441
Mittel	326,5	184,5	9100,4	17,87	1644,8
±SD	71,29	26,60	2810,3	3,32	418,1

Tabelle 4: Ergebnisse aus dem SMAX, Belastung = vorgegebene Belastung, Net VO₂= gemessene Gesamtsauerstoffaufnahme über Ruhe, BLK (A_L)= Laktatbildung (angenommener Laktatbolus), Fc Alakt = schnelle Komponente der $\dot{V}O_2$ der Nachbelastung

Über die Dauer des Tests wurden bezogen auf die Körpermasse $125,7 \pm 27,81 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1}$ Sauerstoff über dem Ruhewert aufgenommen.

Der anaerob-laktazide Stoffwechsel wurde mit Geschwindigkeitskonstanten für die Invasion und Elimination von $0,348 \pm 0,124 \text{ min}^{-1}$ und $0,032 \pm 0,013 \text{ min}^{-1}$ modelliert. Der anaerob-alaktazide Energiebereitstellungsanteil wurde in allen Fällen mit Hilfe des biexponentziellen Modells nach Knuttgen et al. (1970) bestimmt. Die Fittung der Nachbelastungs-Sauerstoffkinetik ergab für die Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente $2870 \pm 802 \text{ ml}$ und für die zugehörige Zeitkonstante $0,567 \pm 0,067 \text{ Minuten}$, für die langsame Komponente $691 \pm 192 \text{ ml}$ und $7,50 \pm 2,88 \text{ Minuten}$. Die schnelle Komponente betrug bezogen auf die Körpermasse $22,1 \pm 4,75 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$.

SMAX		Frauen	±SD	Männer	±SD	p
Net $\dot{V}O_2$	[ml]	6731	1651	10393	2463	0,005
BLK (A_L)	[mmol·l ⁻¹]	15,63	1,90	19,08	3,35	0,036
Fc Alakt	[ml]	1287	206,3	1839	374,8	0,005

Tabelle 5: Ergebnisse aus dem SMAX nach Geschlechtern getrennt, p= Signifikanzwert des ungepaarten t-Tests, Net $\dot{V}O_2$ = gemessene Gesamtsauerstoffaufnahme über dem Ruhewert, BLK (A_L)= Laktatbildung (angenommener Laktatbolus), Fc Alakt = schnelle Komponente der $\dot{V}O_2$ der Nachbelastung

Wie aus Tabelle 5 zu entnehmen ist, nahmen die männlichen Probanden signifikant mehr Sauerstoff über die Testdauer auf. Der angenommene Laktatbolus A_L war bei den Männern signifikant höher als bei den Frauen ($p < 0,036$). Die Geschwindigkeitskonstante der Invasion zeigte bei den Männern mit $0,313 \pm 0,116 \text{ min}^{-1}$ keinen Unterschied ($p < 0,110$) zu der der Probandinnen mit $0,413 \pm 0,119 \text{ min}^{-1}$. Bei der Laktatelimination war ebenfalls kein geschlechtsspezifischer Unterschied auszumachen (Männer $0,033 \pm 0,014 \text{ min}^{-1}$, Frauen $0,030 \pm 0,014 \text{ min}^{-1}$, $p < 0,709$).

Die schnelle Komponente der Nachbelastungssauerstoffkinetik lag bei den Männern signifikant über der der Frauen (siehe Tabelle 5). Die Approximation der Nachbelastungskinetik der Sauerstoffaufnahme unterschied sich nur in den Endwerten der schnellen und langsamen Komponente. Die Zeitkonstanten zum Erreichen dieser Endwerte waren nicht signifikant unterschiedlich.

In Tabelle 6 und Tabelle 7 (folgende Seiten) sind die errechneten metabolischen Energiebeträge der einzelnen Stoffwechselwege aus dem SMAX dargestellt.

Proband	Gesamt [kJ]	WG [%]	Aerob [%]	Aerob [kJ]	Laktazid [%]	Laktazid [kJ]	Alaktazid [%]	Alaktazid [kJ]
1	267,56	18,72	53,16	142,23	31,41	84,03	15,43	41,30
2	320,57	21,64	62,46	200,22	25,97	83,25	11,57	37,10
3	374,66	20,95	63,50	237,91	28,60	107,14	7,90	29,61
4	275,98	19,67	61,78	170,51	23,56	65,02	14,66	40,45
5	310,93	19,22	63,30	196,81	25,57	79,52	11,13	34,60
6	308,70	20,64	66,32	204,72	21,74	67,11	11,94	36,87
7	315,77	20,26	67,94	214,54	24,39	77,01	7,67	24,21
8	318,26	18,96	61,70	196,37	26,21	83,42	12,09	38,47
9	362,20	18,87	64,25	232,70	23,39	84,72	12,36	44,78
10	510,15	19,02	62,75	320,14	27,42	139,86	9,83	50,15
11	489,52	17,35	61,20	299,60	28,56	139,78	10,24	50,14
12	291,31	19,35	63,93	186,23	24,83	72,32	11,25	32,76
13	232,42	20,05	57,92	134,63	31,41	73,00	10,67	24,79
14	178,20	19,55	59,02	105,17	28,31	50,45	12,68	22,59
15	192,55	18,81	55,57	107,01	32,60	62,77	11,83	22,77
16	278,16	20,17	64,91	180,56	24,36	67,76	10,73	29,83
17	229,22	20,21	60,97	139,76	25,75	59,01	13,28	30,44
Mittel	309,18	19,62	61,8	192,63	26,7	82,13	11,49	34,76
±SD	89,24	1,01	3,73	59,38	3,08	25,18	2,01	8,83

Tabelle 6: Energiebereitstellungsanteile im SMAX, Gesamt= metabolische Gesamtenergie (Summe aus aerober, laktazider und alaktazider Energiemenge), WG= Wirkungsgrad im SMAX (unter Verwendung von Gesamt), Aerob= aerober Anteil und Energiemenge, Laktazid= laktazider Anteil und Energiemenge, Alaktazid= alaktazider Anteil und Energiemenge

Im folgenden Absatz werden die in der Tabelle 6 dargestellten Ergebnisse bezogen auf das Körpergewicht der Probanden genannt: die metabolische Gesamtenergie, als Summe aus aerobem, anaerob-laktazidem und anaerob-alaktazidem Stoffwechsel, belief sich auf $4,27 \pm 0,80 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Aerob lag die Energie bei $2,66 \pm 0,59 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, anaerob-laktazid $1,13 \pm 0,21 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ und anaerob-alaktazid bei $0,48 \pm 0,09 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Der Anteil der anaeroben Energiebereitstellung, als Summe der anaerob-laktaziden und anaerob-alaktaziden Energiemengen, lag bei $116,89 \pm 32,04 \text{ kJ}$, bezogen auf die Körpermasse bei $1,62 \pm 0,25 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Anaerob wurden $38,19 \pm 3,72\%$ der metabolischen Gesamtenergie erbracht.

SMAX		Frauen	±SD	Männer	±SD	p
Gesamt	[kJ]	233,64	44,92	350,39	80,264	0,005
	[kJ·kg ⁻¹]	3,602	0,653	4,638	0,619	0,006
Wirkgrad	[%]	19,69	0,56	19,57	1,22	0,825
Aerob	[%]	60,39	3,59	62,58	3,73	0,260
	[kJ]	142,23	34,88	219,61	52,05	0,005
	[kJ·kg ⁻¹]	2,191	0,516	2,911	0,467	0,010
Anaerob	[%]	39,61	3,59	37,42	3,73	0,260
- Laktazid	[%]	27,88	3,50	26,07	2,80	0,262
	[kJ]	64,22	8,65	91,90	26,07	0,025
	[kJ·kg ⁻¹]	0,991	0,120	1,210	0,212	0,036
- Alaktazid	[%]	11,74	1,07	11,35	2,42	0,717
	[kJ]	27,20	4,36	38,88	7,90	0,005
	[kJ·kg ⁻¹]	0,420	0,063	0,517	0,078	0,019

Tabelle 7: Energiebereitstellungsanteile im SMAX, nach Geschlechtern getrennt. Gesamt= metabolische Gesamtenergie (Summe der einzelnen Stoffwechselwege), Wirkgrad= Wirkungsgrad im SMAX unter Verwendung von Gesamt, Aerob, Laktazid, Alaktazid = Anteile und Energie der jeweiligen Stoffwechselwege, p= Signifikanzwert des ungepaarten t-Tests

Wie aus Tabelle 7 zu entnehmen lag die Gesamtenergiemenge bei den Männern, sowohl absolut als auch bezogen auf die Körpermasse, signifikant höher als die der Frauen. Die aerobe, anaerob-laktazide und anaerob-alaktazide Leistung der Männer war signifikant größer, auch bei Betrachtung der Absolutwerte der einzelnen Energiebereitstellungswege und bezogen auf die Körpermasse. Die anaerobe Gesamtleistung als Summe der anaerob-laktaziden und anaerob-alaktaziden Energiemenge lag bei den männlichen Probanden absolut und bezogen auf die Körpermasse signifikant höher als bei den weiblichen Probanden.

Beim prozentualen Anteil der Einzelleistungen und der anaeroben Leistung an der Gesamtleistung konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern festgestellt werden.

Mittels Regressionsanalyse erklärt sich die Varianz der Leistung im SMAX zu 94% aus dem aeroben Stoffwechsel. Der Einschluss des anaerob-laktaziden oder des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels hat keinen Einfluss auf das lineare Regressionsmodell.

3.3.2 Metabolische Leistung im Wingate Anaerobic Test

Die Ergebnisse zu den Kenngrößen der mechanischen und zur metabolischen Leistung aus dem WAnT sind Tabelle 8 und auf der folgenden Seite Tabelle 9 zu entnehmen.

Proband	PP30 [Watt]	AP30 [Watt]	Net VO ₂ [ml]	BLK (A _L) [mmol·l ⁻¹]	Fc Alakt [ml]
1	748	565	1155	14,42	2046
2	870	637	982	15,79	1755
3	989	662	950	15,11	1396
4	652	491	691	9,70	1844
5	777	553	1137	18,11	1364
6	781	616	1118	14,57	1384
7	773	556	607	14,57	1034
8	663	555	1017	14,37	1579
9	868	640	1185	14,78	2065
10	1019	724	1083	14,14	2153
11	1073	822	1672	16,60	3014
12	653	506	725	15,66	1495
13	693	511	759	12,88	1979
14	568	465	692	11,12	1583
15	604	426	716	10,46	1062
16	683	467	882	12,84	1537
17	773	549	865	14,92	1476
Mittel	775,7	573,2	954,8	14,12	1692,4
±SD	146,3	101,4	263,4	2,16	473,2

Tabelle 8: Ergebnisse aus dem WAnT, PP30= Maximale Leistung im WAnT, AP30= Durchschnittliche Leistung im WAnT, Net VO₂= gemessene Gesamtsauerstoffaufnahme über Ruhe, BLK (A_L)= Laktatbildung (angenommener Laktatbolus), Fc Alakt = schnelle Komponente der $\dot{V}O_2$ der Nachbelastung

In den folgenden Absätzen werden weitere Ergebnisse aus dem WAnT genannt. In dem Test wurden bezogen auf das Körpergewicht der Probanden $13,29 \pm 2,78 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ Sauerstoff über dem Ruhewert aufgenommen.

Die Berechnung des anaerob-laktaziden Stoffwechsels ergab Geschwindigkeitskonstanten der Invasion und Elimination von $0,708 \pm 0,221 \text{ min}^{-1}$ und $0,023 \pm 0,011 \text{ min}^{-1}$.

Die Bestimmung der Zeitverzögerung beim Abfall der Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung ergab in 10 Fällen einen sofortigen Abfall und in 7 Fällen einen verzögerten Abfall der Sauerstoffaufnahme, so dass der anaerob-alaktazide Energiebereitstellungsanteil in 10 Fällen mit Hilfe des biexponentziellen Modells nach Knuttgen et al. (1970) bestimmt wurde. Die Fittung der Nachbelastungs-Sauerstoffkinetiken ergab für die Sauerstoffaufnahme der schnellen Komponente $2421 \pm 436 \text{ ml}$ und für die zugehörige Zeitkonstante $0,656 \pm 0,116 \text{ Minuten}$. Für die langsame Komponente ergaben sich $626 \pm$

173 ml und $8,53 \pm 3,80$ Minuten. Die schnelle Komponente betrug $1,536 \pm 0,286$ L, bezogen auf die Körpermasse $22,4 \pm 2,95$ ml·kg⁻¹. In den weiteren 7 Fällen wurde das Verfahren modifiziert nach di Prampero angewendet, hier ergab sich für die schnelle Komponente eine anaerob-alaktazide Sauerstoffmenge von $1,858 \pm 0,531$ L, bzw. $24,5 \pm 6,1$ ml·kg⁻¹.

WAnT		Frauen	±SD	Männer	±SD	P
Net VO ₂	[ml]	773	81	1054	278	0,030
BLK (A _L)	[mmol·l ⁻¹]	12,98	2,03	14,74	2,05	0,111
Fc Alakt	[ml]	1522	292,3	1785	537,2	0,287

Tabelle 9: Ergebnisse aus dem WAnT nach Geschlechtern getrennt, p= Signifikanzwert des ungepaarten t-Tests, Net VO₂= gemessene Gesamtsauerstoffaufnahme über Ruhe, BLK (A_L)= Laktatbildung (angenommener Laktatbolus), Fc Alakt = schnelle Komponente der VO₂ der Nachbelastung

Wie in Tabelle 9 aufgelistet, lag die Sauerstoffaufnahme bei den Männern signifikant über der der Frauen. Relativ zur Körpermasse waren die Werte bei den Männern mit $14,04 \pm 3,22$ ml·kg⁻¹ nicht signifikant unterschiedlich ($p < 0,06$) zu denen der Frauen mit $11,91 \pm 0,69$ ml·kg⁻¹. Der angenommene Laktatbolus A_L wies zwischen Männern und Frauen keinen Unterschied auf. Die zugehörige Geschwindigkeitskonstante der Invasion war bei den Männern mit $0,614 \pm 0,164$ min⁻¹ niedriger ($p < 0,012$) als bei den Frauen mit $0,881 \pm 0,217$ min⁻¹. Die Geschwindigkeitskonstante der Elimination unterschied sich nicht zwischen den Geschlechtern (Männer $0,021 \pm 0,011$ min⁻¹, Frauen $0,026 \pm 0,012$ min⁻¹, $p < 0,409$). Bei der schnellen Komponente zur Bestimmung des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels ließ sich kein Unterschied zwischen den Geschlechtern darstellen (siehe Tabelle 9), auch bezogen auf die Körpermasse zeigte sich kein Unterschied (Männer $23,56 \pm 3,32$ ml·kg⁻¹, Frauen $23,12 \pm 5,13$ ml·kg⁻¹, $p < 0,851$).

In Tabelle 10 und Tabelle 11 (folgende Seiten) sind die errechneten metabolischen Energiebeträge der einzelnen Stoffwechselwege aus dem WAnT dargestellt.

Proband	Gesamt [kJ]	WG [%]	Aerob [%]	Aerob [kJ]	Laktazid [%]	Laktazid [kJ]	Alaktazid [%]	Alaktazid [kJ]
1	140,3	12,08	17,39	24,40	46,91	65,82	35,70	50,08
2	133,9	14,27	15,49	20,74	56,82	76,07	27,69	37,08
3	123,8	16,04	16,21	20,06	63,46	78,54	20,33	25,17
4	98,1	15,52	14,89	14,61	46,40	45,50	38,71	37,96
5	126,2	13,13	19,02	24,03	58,16	73,48	22,82	28,82
6	113,8	16,24	20,75	23,61	53,56	60,96	25,69	29,24
7	94,8	17,59	13,52	12,82	63,33	60,04	23,15	21,95
8	115,9	14,85	18,54	21,48	52,67	61,03	28,78	33,35
9	143,8	13,35	17,42	25,04	52,79	75,89	29,79	42,83
10	148,2	15,15	15,44	22,88	53,84	79,78	30,71	45,50
11	184,2	13,39	19,18	35,33	51,43	94,71	29,39	54,12
12	108,5	13,99	14,13	15,32	56,75	61,55	29,12	31,59
13	112,1	14,14	14,30	16,03	50,27	56,34	35,43	39,71
14	89,0	15,68	16,43	14,61	45,97	40,89	37,60	33,45
15	81,2	15,74	18,62	15,12	50,64	41,13	30,74	24,97
16	106,5	13,16	17,50	18,64	51,99	55,35	30,51	32,48
17	115,7	14,71	15,80	18,28	57,24	66,21	26,96	31,19
Mittel	119,73	14,65	16,74	20,18	53,66	64,31	29,59	35,27
±SD	25,21	1,41	2,04	5,57	5,19	14,49	5,13	8,93

Tabelle 10: Energiebereitstellungsanteile im WAnT, Gesamt= metabolische Gesamtenergie (Summe aus aerober, laktazider und alaktazider Energiemenge), WG= Wirkungsgrad im WAnT (unter Verwendung von Gesamt), Aerob= aerober Anteil und Energiemenge, Laktazid= laktazider Anteil und Energiemenge, Alaktazid= alaktazider Anteil und Energiemenge

Im folgenden Absatz werden die in der Tabelle 10 dargestellten Ergebnisse zu den Energiemengen aus dem WAnT bezogen auf das Körpergewicht der Probanden genannt: die metabolische Gesamtenergie als Summe aus aerobem, anaerob-laktazidem und anaerob-alaktazidem Stoffwechsel lag bei $1,67 \pm 0,21 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Aerob wurden $0,28 \pm 0,06 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ geleistet, anaerob-laktazid $0,90 \pm 0,14 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ und anaerob-alaktazid $0,49 \pm 0,09 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Die anaerobe Energiebereitstellung, als Summe der anaerob-laktaziden und anaerob-alaktaziden Energiemengen, machte einen Anteil von $83,26 \pm 2,04\%$ an der metabolischen Gesamtenergie aus und lag bei $99,58 \pm 20,26 \text{ kJ}$ und bezogen auf die Körpermasse bei $1,39 \pm 0,16 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

WAnT		Frauen	±SD	Männer	±SD	P
Gesamt	[kJ]	102,14	13,80	129,36	25,18	0,028
	[kJ·kg ⁻¹]	1,573	0,149	1,720	0,224	0,171
Wirkgrad	[%]	14,57	1,01	14,69	1,63	0,870
Aerob	[%]	16,13	1,77	17,01	2,18	0,376
	[kJ]	16,33	1,71	22,27	5,87	0,030
	[kJ·kg ⁻¹]	0,252	0,014	0,297	0,068	0,135
Anaerob	[%]	83,87	1,77	82,92	2,18	0,376
- Laktazid	[%]	52,14	4,27	54,49	5,63	0,389
	[kJ]	53,58	10,49	70,17	13,20	0,018
	[kJ·kg ⁻¹]	0,823	0,129	0,935	0,130	0,111
- Alaktazid	[%]	31,73	4,00	28,43	5,47	0,216
	[kJ]	32,23	4,73	36,92	10,38	0,222
	[kJ·kg ⁻¹]	0,498	0,070	0,489	0,108	0,851

Tabelle 11: Energiebereitstellungsanteile im WAnT, nach Geschlechtern getrennt. Gesamt= metabolische Gesamtenergie (Summe der einzelnen Stoffwechselwege), Wirkgrad= Wirkungsgrad im WAnT (unter Verwendung von Gesamt); Aerob, Laktazid, Alaktazid= Anteile und Energiemengen der jeweiligen Stoffwechselwege, p= Signifikanzwert des ungepaarten t-Tests

Wie aus der Tabelle 11 zu entnehmen, lag die erbrachte Gesamtenergiemenge bei den Männern absolut betrachtet signifikant höher als die der Frauen, bezogen auf die Körpermasse zeigte sich kein geschlechtsspezifischer Unterschied. Die aerobe Einzelleistung war absolut, nicht jedoch bezogen auf die Körpermasse, unterschiedlich. Ebenso verhielt es sich mit der anaerob-laktaziden Einzelleistung. Bei der anaerob-alaktaziden Leistung zeigte sich weder bei Betrachtung der Absolutwerte noch bezogen auf die Körpermasse ein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern. Die anaerobe Gesamtleistung, als Summe der anaerob-laktaziden und anaerob-alaktaziden Energiemenge, lag bei den männlichen Probanden absolut mit $107,09 \pm 19,98$ kJ signifikant höher als bei den weiblichen mit $85,81 \pm 15,78$ kJ ($p < 0,033$). Bezogen auf die Körpermasse zeigte sich kein signifikanter Unterschied (Männer $1,423 \pm 0,163$ kJ·kg⁻¹, Frauen $1,320 \pm 0,148$ kJ·kg⁻¹, $p < 0,223$). Beim Anteil der Einzelleistungen und der anaeroben Leistung an der Gesamtleistung konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern festgestellt werden.

Die Varianz der durchschnittlichen Leistung im WAnT konnte im linearen Regressionsmodell zu 83% aus dem anaerob-laktaziden Stoffwechsel erklärt werden. Der Einschluss des aeroben oder des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels hatte keinen Einfluss auf das Modell.

3.3.3 Metabolische Leistung im kurzen anaeroben Test

Die Tabellen und 13 zeigen die Ergebnisse für den Stoffwechsel im kAnT.

Proband	PP10 [Watt]	LP10 [Watt]	Net VO ₂ [ml]	BLK (A _L) [mmol·l ⁻¹]	Fc Alakt [ml]
1	801	634	78	7,60	1852
2	891	754	262	7,32	1548
3	1064	730	139	11,07	1461
4	635	505	0	4,25	1250
5	724	609	215	11,11	1087
6	795	660	163	9,31	1047
7	808	595	31	10,35	1455
8	683	577	248	8,06	1530
9	905	667	70	8,30	1454
10	962	661	0	10,69	1955
11	1064	838	423	10,57	2295
12	715	562	147	9,25	1040
13	628	592	173	5,00	1132
14	564	468	101	5,69	759
15	604	484	220	6,56	981
16	634	511	214	8,08	1409
17	746	598	215	9,59	956
Mittel	777,8	614,4	158,9	8,40	1365,2
±SD	155,1	99,0	108,0	2,13	400,9

Tabelle 12: Ergebnisse aus dem kAnT, PP10= Maximale Leistung im kAnT, LP10= Minimale Leistung im kAnT, Net VO₂= gemessene Gesamtsauerstoffaufnahme über Ruhe, BLK (A_L)= Laktatbildung (angenommener Laktatbolus), Fc Alakt = schnelle Komponente der $\dot{V}O_2$ der Nachbelastung

Relativ zur Körpermasse wurde im kAnT eine Sauerstoffaufnahme von $2,25 \pm 1,39$ ml·kg⁻¹ gemessen. Die Geschwindigkeitskonstante der Laktatinvasion lag bei $0,807 \pm 0,307$ min⁻¹, die der Elimination bei $0,042 \pm 0,011$ min⁻¹. Zur Bestimmung des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels wurde in allen Fällen (n= 17) das Verfahren, modifiziert nach di Prampero, angewendet, hier ergab sich aus der schnellen Komponente eine anaerob-alaktazide Sauerstoffmenge bezogen auf die Körpermasse von $18,9 \pm 3,8$ ml·kg⁻¹.

kAnT		Frauen	±SD	Männer	±SD	p
Net VO ₂	[ml]	178	47	148	131	0,602
BLK (A _L)	[mmol·l ⁻¹]	7,36	1,90	8,97	2,11	0,143
Fc Alakt	[ml]	1045	216,2	1539	373,1	0,010

Tabelle 13: Ergebnisse aus dem kAnT nach Geschlechtern getrennt, p= Signifikanzwert des ungepaarten t-Tests, Net VO₂= gemessene Gesamtsauerstoffaufnahme über Ruhe, BLK (A_L)= Laktatbildung (angenommener Laktatbolus), Fc Alakt = schnelle Komponente der $\dot{V}O_2$ der Nachbelastung

Wie in der Tabelle 13 (vorangegangene Seite) zu erkennen ist, unterschied sich die Sauerstoffaufnahme im kAnT nicht zwischen Männern und Frauen, relativ zur Körpermasse gab es ebenfalls keinen signifikanten Unterschied (Männer $1,98 \pm 1,64 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$, Frauen $2,73 \pm 0,65 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$, $p < 0,205$). Der angenommene Laktatbolus A_L war bei den Männern nicht unterschiedlich zu dem der Frauen. Die zugehörigen Geschwindigkeitskonstanten unterschieden sich jeweils nicht zwischen den Geschlechtern (Invasion: Männer $0,733 \pm 0,244 \text{ min}^{-1}$, Frauen $0,943 \pm 0,384 \text{ min}^{-1}$, $p < 0,263$, Elimination: Männer $0,041 \pm 0,011 \text{ min}^{-1}$, Frauen $0,045 \pm 0,011 \text{ min}^{-1}$, $p < 0,500$). Die schnelle Komponente der Nachbelastungs-Sauerstoffkinetik lag bei den Männern signifikant höher als die der Frauen (Tabelle 9), bezogen auf das Körpergewicht zeigte sich ebenfalls ein signifikanter Unterschied (Männer $20,39 \pm 3,52 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$, Frauen $16,07 \pm 2,72 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$, $p < 0,02$).

In Tabelle 14 und auf der folgenden Seite in Tabelle 15 sind die metabolischen Energiebeiträge der einzelnen Stoffwechselwege aus dem kAnT dargestellt.

Proband	Gesamt [kJ]	WG [%]	Aerob [%]	Aerob [kJ]	Laktazid [%]	Laktazid [kJ]	Alaktazid [%]	Alaktazid [kJ]
1	75,46	9,51	2,19	1,66	45,97	34,69	51,84	39,12
2	73,50	12,32	7,53	5,53	47,98	35,27	44,49	32,70
3	91,36	9,82	3,22	2,94	62,98	57,54	33,80	30,88
4	46,35	13,74	0,00	0,00	43,01	19,94	56,99	26,42
5	72,59	10,11	6,26	4,54	62,10	45,08	31,64	22,97
6	64,52	12,41	5,35	3,45	60,37	38,95	34,28	22,12
7	74,05	10,43	0,90	0,66	57,59	42,65	41,51	30,74
8	71,81	9,65	7,31	5,25	47,67	34,23	45,02	32,33
9	74,85	11,55	2,00	1,50	56,94	42,62	41,06	30,73
10	101,62	7,99	0,00	0,00	59,35	60,31	40,65	41,31
11	117,74	8,89	7,59	8,94	51,22	60,31	41,18	48,49
12	61,42	11,44	5,05	3,10	59,19	36,36	35,76	21,97
13	49,43	12,34	7,38	3,65	44,24	21,87	48,37	23,91
14	39,10	14,52	5,48	2,14	53,51	20,92	41,01	16,03
15	51,17	11,69	9,07	4,64	50,42	25,80	40,51	20,73
16	69,11	9,12	6,54	4,52	50,39	34,83	43,07	29,77
17	67,31	9,98	6,74	4,54	63,25	42,57	30,02	20,20
Mittel	70,67	10,91	4,86	3,36	53,89	38,47	41,25	28,85
±SD	19,72	1,78	2,90	2,28	6,80	12,65	7,04	8,47

Tabelle 14: Energiebereitstellungsanteile im kAnT, Gesamt= metabolische Gesamtenergie (Summe aus aerober, laktazider und alaktazider Energiemenge), WG= Wirkungsgrad im kAnT (unter Verwendung von Gesamt), Aerob= aerober Anteil und Energiemenge, Laktazid= laktazider Anteil und Energiemenge, Alaktazid= alaktazider Anteil und Energiemenge

Im folgenden Absatz werden die in Tabelle 14 (vorangegangene Seite) dargestellten Ergebnisse aus dem kAnT bezogen auf das Körpergewicht genannt: Die metabolische Gesamtenergie lag bei $0,98 \pm 0,18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, aerob wurden $0,05 \pm 0,03 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, anaerob-laktazid $0,53 \pm 0,07 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ und anaerob-alaktazid $0,40 \pm 0,08 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ geleistet. Die anaerobe Energiebereitstellung (Summe aus anaerob-laktazider und anaerob-alaktazider Energiemenge) machte einen Anteil von $95,14 \pm 2,90\%$ an der metabolischen Gesamtenergie aus und lag bei $67,31 \pm 19,15 \text{ kJ}$, bzw. $0,93 \pm 0,18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

kAnT		Frauen	±SD	Männer	±SD	P
Gesamt	[kJ]	56,26	11,67	78,53	19,01	0,020
	[kJ·kg ⁻¹]	0,864	0,179	1,041	0,174	0,052
Wirkgrad	[%]	11,52	1,89	10,58	1,72	0,318
Aerob	[%]	6,71	1,44	3,85	3,04	0,019
	[kJ]	3,76	1,00	3,13	2,77	0,602
	[kJ·kg ⁻¹]	0,058	0,014	0,042	0,035	0,205
Anaerob	[%]	93,29	1,44	96,15	3,04	0,019
- Laktazid	[%]	53,50	6,81	54,11	7,11	0,867
	[kJ]	30,39	8,80	42,87	12,53	0,048
	[kJ·kg ⁻¹]	0,467	0,121	0,568	0,134	0,143
- Alaktazid	[%]	39,79	6,30	42,04	7,58	0,547
	[kJ]	22,10	4,57	32,53	7,88	0,010
	[kJ·kg ⁻¹]	0,340	0,057	0,431	0,074	0,020

Tabelle 15: Energiebereitstellungsanteile im kAnT, nach Geschlechtern getrennt. Gesamt= metabolische Gesamtenergie (Summe der einzelnen Stoffwechselwege), Wirkgrad= Wirkungsgrad im SMAX unter Verwendung von Gesamt, Aerob, Laktazid, Alaktazid = Anteile und Energie der jeweiligen Stoffwechselwege, p= Signifikanzwert des ungepaarten t-Tests

Die Ergebnisse, die in der Tabelle 15 aufgeführt werden, zeigen, dass die erbrachte Gesamtenergiemenge bei den Männern absolut betrachtet signifikant über der der Frauen lag. Bezogen auf die Körpermasse zeigte sich kein geschlechtsspezifischer Unterschied. Die aerobe Einzelleistung war im kAnT absolut, nicht jedoch bezogen auf die Körpermasse, unterschiedlich. Ebenso verhielt es sich mit der anaerob-laktaziden Einzelleistung. Bei der anaerob-alaktaziden Leistung zeigte sich sowohl bei Betrachtung der Absolutwerte als auch bezogen auf die Körpermasse ein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern. Die anaerobe Gesamtleistung als Summe der anaerob-laktaziden und anaerob-alaktaziden Energiemenge lag bei den männlichen Probanden absolut mit $75,40 \pm 17,94 \text{ kJ}$ signifikant höher als bei den weiblichen Probanden mit $52,49 \pm 11,03 \text{ kJ}$ ($p < 0,013$). Bezogen auf die Körpermasse zeigte sich ebenfalls ein signifikanter Unterschied (Männer $0,999 \pm 0,160 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, Frauen $0,806 \pm 0,141 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,

$p < 0,026$). Beim prozentualen Anteil der Einzelleistungen konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern festgestellt werden. Wurde die Summe der anaerob-laktaziden und anaerob-alaktaziden Einzelleistungen betrachtet, zeigte sich für den prozentualen Anteil der anaeroben Leistung ein signifikanter Unterschied (siehe Tabelle 15, Seite 41).

Im kAnT wurde die Varianz der durchschnittlichen Leistung zu 69% durch den anaerob-laktaziden Stoffwechsel erklärt. Der Einschluss des aeroben oder des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels hatte keinen Einfluss auf die Güte des linearen Regressionsmodells.

3.3.4 Energiebereitstellung bezogen auf den Stoffwechselweg

Zur besseren Übersicht werden die drei Energiebereitstellungswege (aerob, anaerob-laktazid und anaerob-alaktazid) separat betrachtet.

Die aerobe Sauerstoffmenge und die sich daraus ergebenden Energiebeträge unterschieden sich zwischen den einzelnen Tests jeweils absolut gesehen sowie bezogen auf die Körpermasse signifikant ($p < 0,001$) voneinander (Abbildung 12).

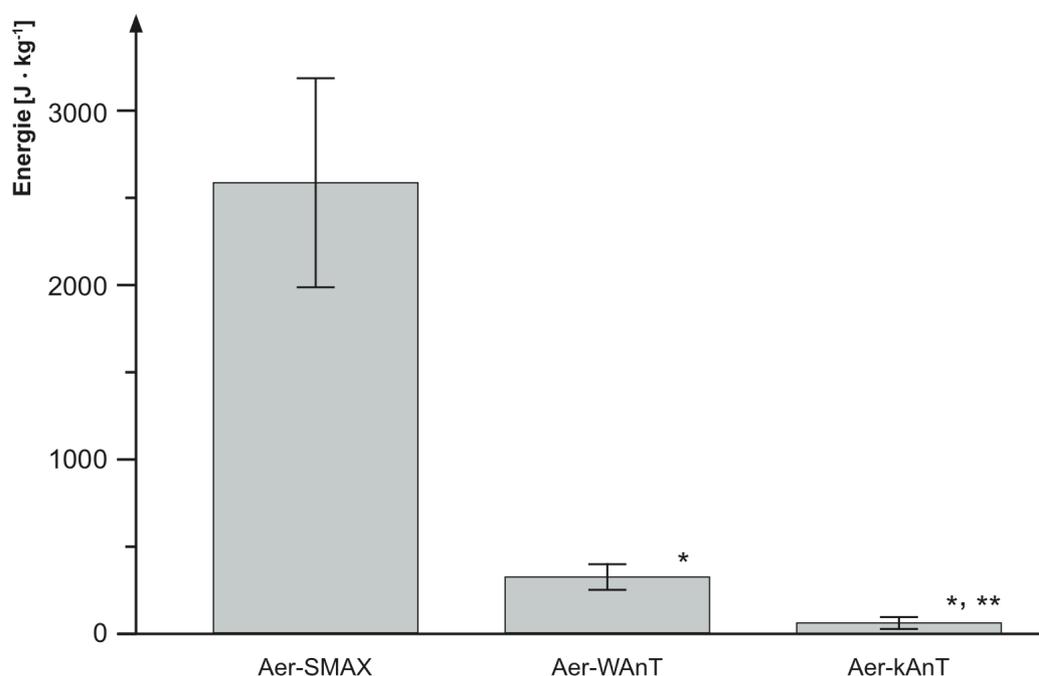


Abbildung 12: Aerobe Energiemenge der einzelnen Tests (in $J \cdot kg^{-1} KG$), Aer-kAnT= Aerober Stoffwechsel im 10 Sekunden Anaerobic Test, Aer-WAnT= Aerober Stoffwechsel im Wingate Anaerobic Test, Aer-SMAX= Aerober Stoffwechsel im SMAX. *= signifikanter Unterschied zu Aer-SMAX, **= signifikanter Unterschied zu Aer-WAnT ($p < 0,001$)

Die anaerob-laktazide Energiemenge unterschied sich zwischen den Tests sowohl absolut als auch bezogen auf die Körpermasse signifikant ($p < 0,001$), siehe Abbildung 13. Der prozentuale Anteil der anaerob-laktaziden Energiebereitstellung an der jeweiligen Gesamtenergie des Tests war im WAnT mit $53,7 \pm 4,94$ % nicht signifikant unterschiedlich ($p < 0,764$) zum kAnT mit $53,9 \pm 6,80$ %.

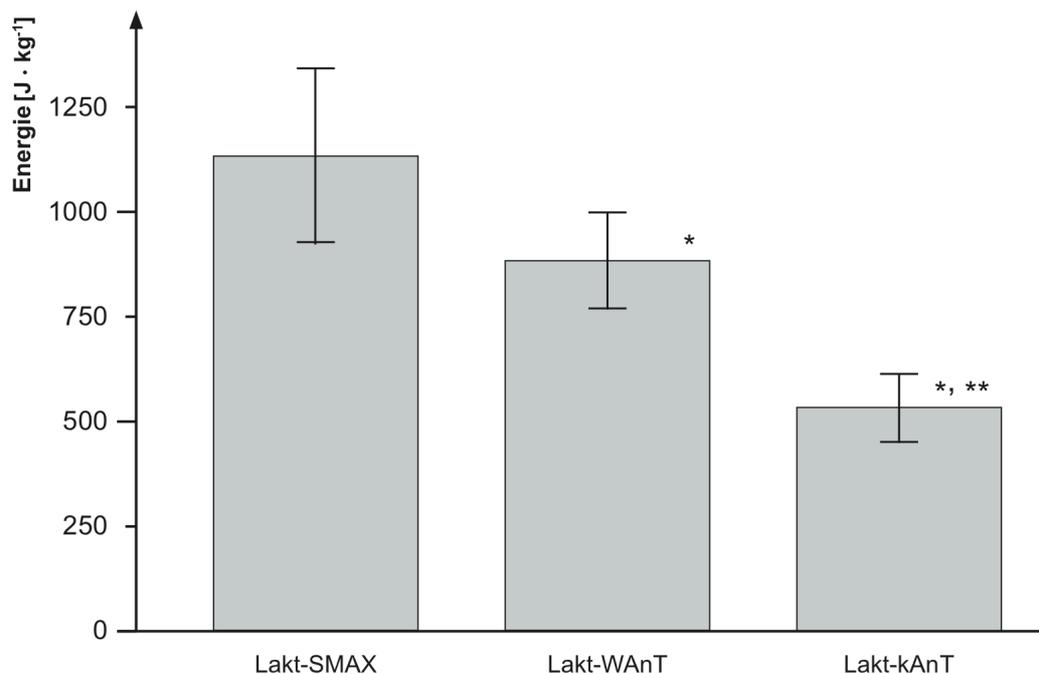


Abbildung 13: Anaerob laktazide Energiemenge der einzelnen Tests (in $J \cdot kg^{-1} \cdot KG$), Lakt-kAnT= Anaerob-laktazider Stoffwechsel im 10 Sekunden Anaerobic Test, Lakt-WAnT= Anaerob-laktazider Stoffwechsel im Wingate Anaerobic Test, Lakt-SMAX= Anaerob-laktazider Stoffwechsel im SMAX. *= signifikanter Unterschied zu Lakt-SMAX, **= signifikanter Unterschied zu Lakt-WAnT ($p < 0,001$)

Die anaerob-alkalaziden Energiemengen bezogen auf die Körpermasse sind in Abbildung 14 (folgende Seite) dargestellt. Die anaerob-alkalazide Energiemenge war im kAnT signifikant niedriger als im WAnT ($p < 0,004$) und im SMAX ($p < 0,004$).

Zwischen dem WAnT und dem SMAX ließ sich weder bei den Absolutwerten der anaerob-alkalaziden Energiemenge ($p > 0,55$) noch bezogen auf die Körpermasse ($p > 0,5$) ein signifikanter Unterschied feststellen.

Die Berechnung der anaerob-alkalaziden Leistung in den anaeroben Tests erfolgte abhängig von der Sauerstoffkinetik während der Nachbelastungsphase (Knuttgen, 1970; Prampero et al., 1973). Der Bestimmung des anaerob-alkalaziden Stoffwechsels wurde die Analyse der Zeitverzögerung vorangestellt: Beim kAnT trat bei allen Probanden eine

Zeitverzögerung auf. Im Mittel lag diese bei $0,412 \pm 0,086$ Minuten (Männer $0,386 \pm 0,078$, Frauen $0,458 \pm 0,086$, $p < 0,099$). Die Modellierung der Sauerstoffkinetik der Nachbelastung wurde im kAnT in allen Fällen ($n = 17$) nach dem Verfahren nach di Prampero vorgenommen. Beim WAnT kam es bei 7 Probanden (47,1%) zu einer Zeitverzögerung von $0,171 \pm 0,119$ Minuten (Männer $0,133 \pm 0,151$, Frauen $0,191 \pm 0,100$, $p < 0,356$), so dass in diesen Fällen das Verfahren nach di Prampero ($n = 7$) angewendet wurde. Bei den anderen Probanden ($n = 10$) wurde das Verfahren nach Knuttgen angewendet. Im kAnT war die Zeitverzögerung signifikant länger ($p < 0,001$) als im WAnT. Im SMAX kam es zu keiner Zeitverzögerung, so dass in allen Fällen ($n = 17$) das Verfahren nach Knuttgen benutzt wurde.

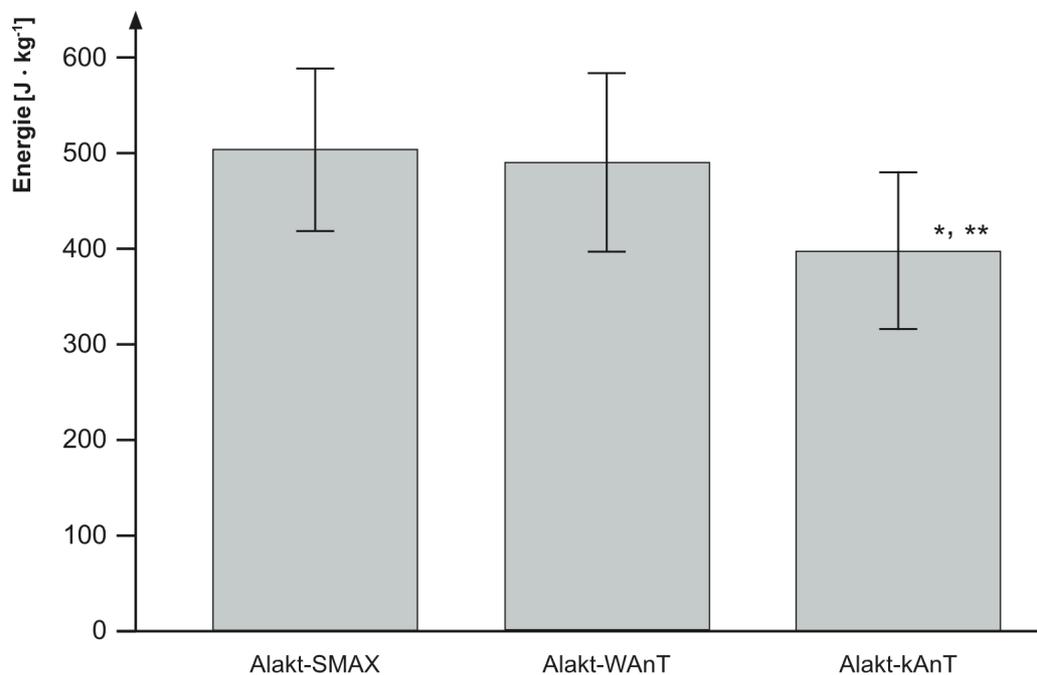


Abbildung 14: Alaktazide Energiemenge der einzelnen Tests (in $J \cdot kg^{-1} KG$), Alakt-kAnT= Anaerob-alaktazider Stoffwechsel im 10 Sekunden Anaerobic Test, Alakt-WAnT= Anaerob-alaktazider Stoffwechsel im Wingate Anaerobic Test, Alakt-SMAX= Anaerob-alaktazider Stoffwechsel im SMAX. *= signifikanter ($p < 0,004$) Unterschied zu Alakt-SMAX, **= signifikanter ($p < 0,004$) Unterschied zu Alakt-WAnT.

In der Tabelle 16 sind die Ergebnisse aus den vorausgegangenen Kapiteln zu den prozentualen Anteilen der einzelnen Stoffwechselwege an der Energiebereitstellung und zum Wirkungsgrad aus dem SMAX, dem WAnT und dem kAnT zusammengefasst.

SMAX		Alle	±SD	Frauen	±SD	Männer	±SD	P
Gesamt	[kJ]	309,18	90,0	233,64	44,92	350,39	80,264	0,005
	[kJ·kg ⁻¹]	4,272	0,796	3,602	0,653	4,638	0,619	0,006
Wirkgrad	[%]	19,61	1,01	19,69	0,56	19,57	1,22	0,825
Aerob	[%]	61,8	3,7	60,4	3,6	62,6	3,7	0,260
Anaerob	[%]	38,2	3,7	39,6	3,6	37,4	3,7	0,260
- Laktazid	[%]	26,7	3,1	27,9	3,5	26,1	2,8	0,262
- Alaktazid	[%]	11,5	2,0	11,7	1,1	11,4	2,4	0,717
WAnT								
Gesamt	[kJ]	119,73	25,21	102,14	13,80	129,36	25,18	0,028
	[kJ·kg ⁻¹]	1,668	0,208	1,573	0,149	1,720	0,224	0,171
Wirkgrad	[%]	14,65	1,41	14,57	1,01	14,69	1,63	0,870
Aerob	[%]	16,7	2,0	16,1	1,7	17,0	2,2	0,376
Anaerob	[%]	83,3	2,0	83,9	1,8	83,0	2,2	0,376
- Laktazid	[%]	53,7	5,2	52,1	4,3	54,5	5,6	0,389
- Alaktazid	[%]	29,6	5,1	31,7	4,0	28,4	5,5	0,216
kAnT								
Gesamt	[kJ]	70,67	19,72	56,26	11,67	78,53	19,01	0,020
	[kJ·kg ⁻¹]	0,979	0,182	0,864	0,179	1,041	0,174	0,052
Wirkgrad	[%]	10,91	1,78	11,52	1,89	10,58	1,72	0,318
Aerob	[%]	4,9	2,9	6,7	1,4	3,9	3,0	0,019
Anaerob	[%]	95,1	2,9	93,3	1,4	96,2	3,0	0,019
- Laktazid	[%]	53,9	6,8	53,5	6,8	54,1	7,1	0,867
- Alaktazid	[%]	41,2	7,0	39,8	6,3	42,0	7,6	0,547

Tabelle 16: Wirkungsgrad, Anteile der Energiebereitstellungswege im SMAX, im WAnT und im kAnT, Alle Probanden und nach Geschlechtern getrennt. p= Signifikanzwert des ungepaarten t-Tests. Gesamt= metabolische Gesamtenergie, Wirkgrad= Wirkungsgrad im SMAX im WAnT und im kAnT; Aerob, Laktazid, Alaktazid= Anteile des jeweiligen Stoffwechselweges, Anaerob= Anteil der gesamten anaeroben Energiebereitstellung

3.4 Maximal Akkumuliertes Sauerstoffdefizit

Im Folgenden werden die für das Verfahren zur Berechnung des Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizits (MAOD) relevanten Untersuchungsergebnisse aus dem ST und dem SMAX dargestellt.

3.4.1 Regressionsgerade

Die Sauerstoffaufnahme der einzelnen Stufen (gemessen während der 5. Belastungsminute) aus dem ST sind der Tabelle 17 auf der folgenden Seite zu entnehmen.

Stufe	Alle	$\dot{V}O_{2(5)}$	$\pm SD$	Frauen	$\dot{V}O_{2(5)}$	$\pm SD$	Männer	$\dot{V}O_{2(5)}$	$\pm SD$	p
1	n=17	1202	218	n= 6	1078	81	n=11	1270	242	0,082
2	n=17	1537	261	n= 6	1420	137	n=11	1642	284	0,094
3	n=17	2015	342	n= 6	1786	145	n=11	2140	357	0,018
4	n=17	2461	392	n= 6	2227	195	n=11	2588	420	0,055
5	n=17	2945	485	n= 6	2663	165	n=11	3099	530	0,032
6	n=12	3512	515	n=2	3258		n=10	3563	554	
7	n=7	4006	731				n=7	4006	731	
8	n=2	4879					n=2	4879		

Tabelle 17: Sauerstoffaufnahmen aus dem Stufentest. $\dot{V}O_{2(5)}$ gemessene Sauerstoffaufnahme während der 5. Belastungsminute der einzelnen Stufen in $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$, Sauerstoffaufnahme der einzelnen Stufen, Alle= Gesamtkollektiv, und nach Geschlechtern getrennt (Frauen, Männer), p= Signifikanzwert des ungepaarten t-Tests

Zur Berechnung der Regressionsgeraden wurden $6,24 \pm 1,03$ (Männer $6,73 \pm 0,91$, Frauen $5,33 \pm 0,516$, $p < 0,004$) komplett absolvierte Stufen aus dem ST verwendet.

Die Regressionsgerade ergab eine Steigung von $12,49 \pm 0,89 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ (Männer $12,57 \pm 0,96 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$, Frauen $12,35 \pm 0,81 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$, $p < 0,639$) und einen Y-Achsenabschnitt von $257 \pm 209 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ (Männer $246 \pm 74 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$, Frauen $134 \pm 55 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$, $p < 0,741$). Bezogen auf die Körpermasse ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Geschlechtern. Das Bestimmtheitsmaß für die Berechnung lag bei $0,991 \pm 0,008$ (Männer $0,9932 \pm 0,005$, Frauen $0,989 \pm 0,008$, $p < 0,283$).

3.4.2 Akkumuliertes Sauerstoffdefizit

Der akkumulierte Sauerstoffbedarf aus dem MAOD-Verfahren lag bei $13,422 \pm 3,836 \text{ L}$ Sauerstoff (Männer $15,162 \pm 3,404 \text{ L}$, Frauen $10,230 \pm 2,242 \text{ L}$, $p < 0,006$), bezogen auf die Körpermasse bei $185,67 \pm 35,95 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Männer $201,00 \pm 28,28 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$, Frauen $157,61 \pm 32,82 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$, $p < 0,012$).

Vom theoretischen akkumulierten Sauerstoffbedarf von $185,67 \pm 35,95 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ wurde die Bruttosauerstoffaufnahme während des SMAXs mit $137,5 \pm 29,4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ abgezogen. Aus der Differenz errechnete sich ein MAOD von $48,16 \pm 10,71 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$. Absolut lag das akkumulierte Sauerstoffdefizit bei $3,472 \pm 1,037 \text{ L}$ Sauerstoff (Männer $3,826 \pm 1,073 \text{ L}$, Frauen $2,823 \pm 0,601 \text{ L}$, $p < 0,053$). Bezogen auf die Körpermasse zeigte das MAOD mit $50,70 \pm 11,24 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ bei den Männern keinen signifikanten Unterschied zu dem der Frauen mit $43,50 \pm 8,59 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($p < 0,193$).

Der akkumulierte Sauerstoffbedarf und die akkumulierte Sauerstoffaufnahme lagen sowohl absolut als bezogen auf das Körpergewicht bei den Männern signifikant höher.

Das MAOD war weder absolut noch relativ zur Körpermasse zwischen den Geschlechtern statistisch unterschiedlich.

MAOD		Alle	±SD	Frauen	±SD	Männer	±SD	p
AO ₂ -Bedarf	[l]	13,422	3,836	10,230	2,242	15,162	3,404	0,006
	[ml·kg ⁻¹]	185,67	35,95	157,61	32,82	201,00	28,28	0,012
AO ₂ -Aufnahme	[l]	9,9949	3,004	7,407	1,792	11,336	2,614	0,005
	[ml·kg ⁻¹]	137,5	29,4	114,12	26,49	150,27	22,92	0,010
AO ₂ -Defizit	[l]	3,472	1,037	2,823	0,601	3,826	1,073	0,053
	[ml·kg ⁻¹]	48,16	10,71	43,50	8,59	50,70	11,24	0,193

Tabelle 18: Maximal Akkumuliertes Sauerstoffdefizit (MAOD) im SMAX, insgesamt und nach Geschlechtern. p= Signifikanzwert des ungepaarten t-Tests, AO₂-Bedarf = akkumulierter Sauerstoffbedarf, AO₂-Aufnahme= akkumulierte Sauerstoffaufnahme, AO₂-Defizit = akkumuliertes Sauerstoffdefizit

3.4.3 Energiebereitstellung nach dem akkumulierten Sauerstoffdefizit

In Tabelle 20 sind der Anteil an der Gesamtenergiebereitstellung und die Energiemenge nach dem MAOD-Verfahren für den SMAX dargestellt.

Proband	Gesamt [kJ]	WG [%]	MAOD [%]	MAOD [kJ]	MAOD [kJ·kg ⁻¹]
1	220,22	22,74	35,41	77,98	1,08
2	285,96	24,26	29,98	85,74	1,13
3	328,64	23,89	27,61	90,72	1,11
4	226,34	23,99	24,67	55,84	0,75
5	287,36	20,80	31,51	90,55	1,41
6	266,73	23,89	23,25	62,01	0,94
7	263,00	24,31	18,43	48,46	0,75
8	272,59	22,14	27,96	76,22	1,14
9	317,59	21,51	26,73	84,89	1,05
10	454,30	21,37	29,53	134,16	1,51
11	382,46	22,21	21,67	82,86	0,92
12	259,45	21,72	28,22	73,22	1,18
13	208,03	22,40	35,29	73,41	1,06
14	155,88	22,35	32,53	50,71	0,87
15	147,89	24,49	27,64	40,88	0,66
16	240,81	23,30	25,02	60,24	0,89
17	199,20	23,24	29,87	59,53	0,85
Mittelwert	265,68	22,86	27,96	73,38	1,02
±SD	79,95	1,16	4,52	21,92	0,23

Tabelle 19: Energiebereitstellung im SMAX nach dem MAOD-Verfahren, Gesamt= metabolische Gesamtenergie (Summe von MAOD und aerober Energiemenge), WG= Wirkungsgrad im SMAX (unter Verwendung des MAODS zur Bestimmung der anaeroben Energie), MAOD= Anteil und Energiemenge (absolut und bezogen auf die Körpermasse) des akkumulierten Sauerstoffdefizits

Die in der Tabelle 19 (vorangegangene Seite) aufgeführte Gesamtmenge an metabolisch bereitgestellter Energie nach den MAOD-Verfahren ergab sich aus der Summe des gemessenen aeroben Stoffwechsels und des MAODs. Das MAOD im SMAX betrug prozentual $27,96 \pm 4,52\%$ an der Gesamtenergie (siehe Tabelle 19).

SMAX		Frauen	±SD	Männer	±SD	p
MAOD	[kJ]	59,66	12,70	80,86	22,67	0,053
	[kJ·kg ⁻¹]	0,92	0,18	1,07	0,24	0,193
Anteil MAOD	[%]	29,76	3,68	26,98	4,79	0,236
Wirkgrad	[%]	22,92	0,98	22,83	1,29	0,885

Tabelle 20: Energiebereitstellung im SMAX nach dem MAOD-Verfahren, nach Geschlechtern getrennt, MAOD= Energiemenge (absolut und bezogen auf die Körpermasse) des akkumulierten Sauerstoffdefizit, Anteil MAOD= Anteil des anaeroben Stoffwechsel nach dem MAOD-Verfahren an der Gesamtenergie im SMAX, Wirkgrad= Wirkungsgrad im SMAX (unter Verwendung des MAODs zur Bestimmung der anaeroben Energie), p= Signifikanzwert des ungepaarten t-Tests.

Wie in Tabelle 20 dargestellt zeigte die anaerobe Energiemenge, berechnet nach dem MAOD-Verfahren, absolut sowie bezogen auf die Körpermasse keinen signifikanten Unterschied zwischen den Geschlechtern. Ebenso wies der Anteil der anaeroben Energie an der Gesamtenergie keinen signifikanten Unterschied zwischen den Geschlechtern auf (Tabelle 20).

Die Varianz der Leistung im SMAX wird auch unter Verwendung des MAOD-Verfahrens zur Bestimmung des anaeroben Stoffwechsels zu 94% aus dem aeroben Stoffwechsel erklärt. Die Varianz der Energiemenge des anaeroben Stoffwechsels nach dem MAOD-Verfahren erklärte sich zu 35,4% durch den anaerob-laktaziden Stoffwechsel. Ein Einschluss des aeroben oder anaerob-alaktaziden Stoffwechsels hatte keinen Einfluss auf das Regressionsmodell.

3.5 Anaerobe Energiebereitstellung im supramaximalen Ausbelastungstest

Die anaerobe Kapazität nach Medbø ergab im Vergleich zur Bestimmung der anaeroben Einzelkomponenten im SMAX signifikant kleinere Werte ($p < 0,001$) für die anaerobe Energiemenge (Abbildung 15, folgende Seite). Die anaerobe Energiemenge nach dem MAOD-Verfahren fiel etwa 1/3 geringer aus. Der prozentuale Anteil an der Gesamtenergie war ebenfalls signifikant kleiner ($p < 0,001$).

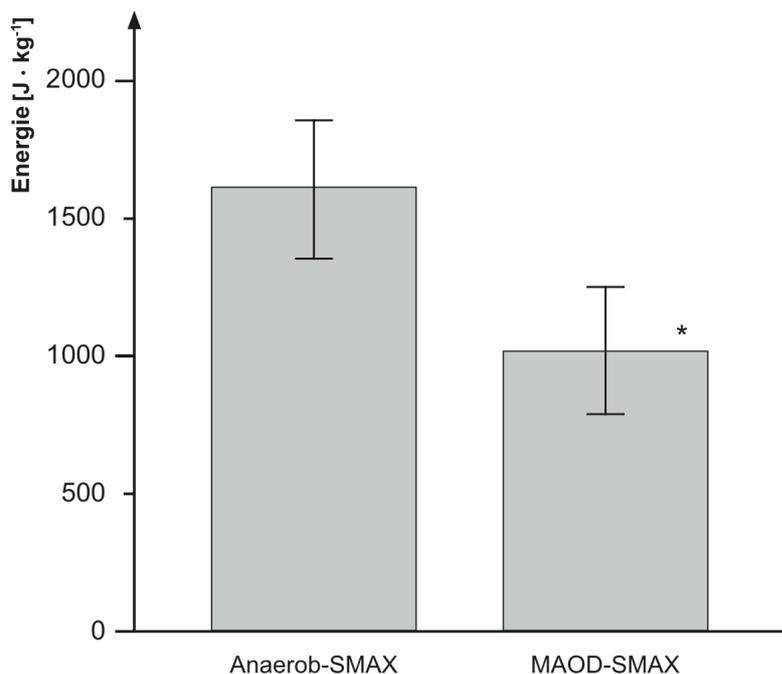


Abbildung 15: Anaerobe Energiemenge im SMAX (in $J \cdot kg^{-1} KG$). Nach dem MAOD-Verfahren und der Summe aus anaerob-laktaziden und anaerob-alaktaziden Energiebeiträgen. MAOD-SMAX= Anaerobe Energie ermittelt nach dem MAOD-Verfahren, Anaerob-SMAX= Anaerobe Energie ermittelt durch die Blutlaktatakkumulation und die alaktazide Kreatinphosphatsynthese im SMAX. *= signifikanter Unterschied zu Anaerob-SMAX ($p < 0,001$)

3.6 Wirkungsgrad

Unter Verwendung der metabolischen Einzelkomponenten (Sauerstoffaufnahme, Glykolyse und Kreatinphosphat-Verbrauch) machte der biomechanische Wirkungsgrad bei der Belastung im SMAX $19,62 \pm 1,01\%$ aus und war signifikant höher als beim WAnT mit $14,65 \pm 1,41\%$ und kAnT $10,91 \pm 1,78\%$ (jeweils $p < 0,001$). Der Wirkungsgrad unterschied sich ebenfalls signifikant zwischen WAnT und kAnT ($p < 0,001$) (siehe Abbildung 16 auf der folgenden Seite).

Wurde das MAOD-Verfahren zur Bestimmung des anaeroben Stoffwechsels im SMAX herangezogen, errechnete sich ein Wirkungsgrad von $22,86 \pm 1,16\%$. Damit ergaben sich abhängig vom verwendeten Verfahren zur Bestimmung des anaeroben Stoffwechsels im SMAX unterschiedliche Werte für den biomechanischen Wirkungsgrad ($p < 0,002$) (siehe Abbildung 17 auf der folgenden Seite).

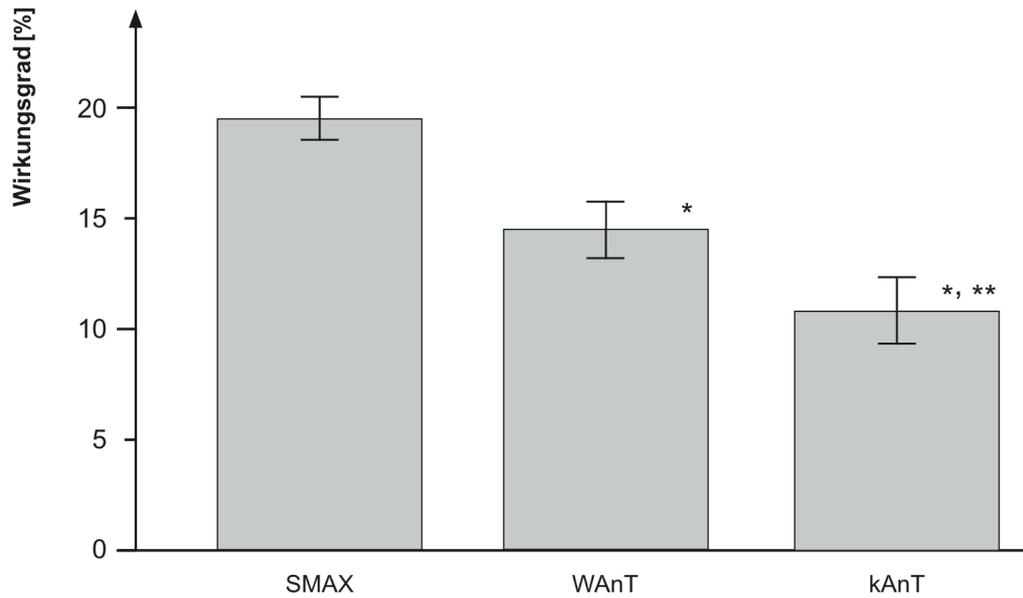


Abbildung 16: Biomechanischer Wirkungsgrad (in %). SMAX= Supramaximaler Ausbelastungstest, WAnT= Wingate Anaerobic Test, kAnT= kurzer anaerober Test. *= signifikanter Unterschied zum SMAX ($p < 0,001$), **= signifikanter Unterschied zum WAnT ($p < 0,001$)

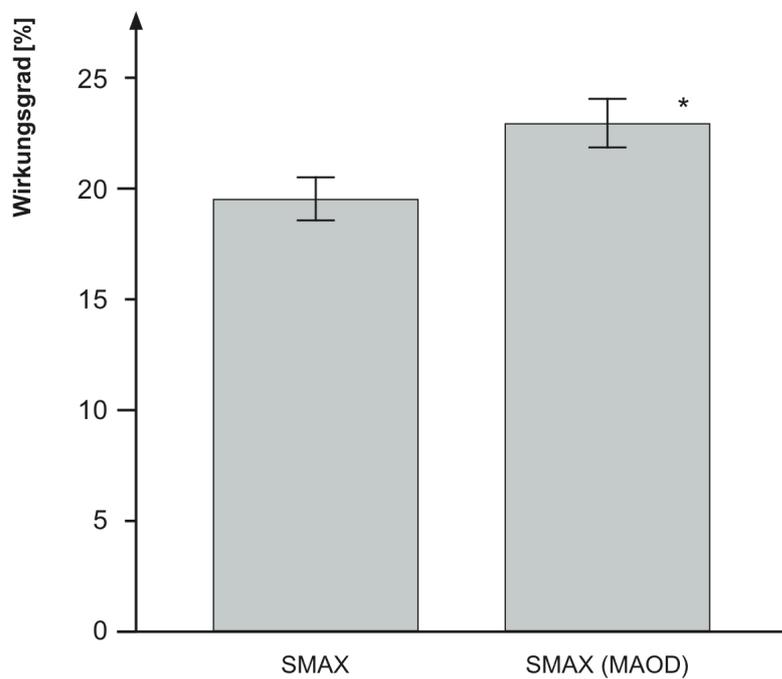


Abbildung 17: Biomechanischer Wirkungsgrad im SMAX unter Verwendung der verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des anaeroben Stoffwechsels. SMAX= Summe aus aerobem Stoffwechsel und Blutlaktatakkumulation sowie Kreatinphosphatsynthese. SMAX(MAOD)= Summe aus aerobem Stoffwechsel und MAOD. *= signifikanter Unterschied zum SMAX ($p < 0,002$)

4 Diskussion

4.1 Probanden

Die Anzahl der Probanden lag mit 17 Freizeitsportlern in derselben Größenordnung wie bei vergleichbaren Studien (Minahan et al., 2007; Scott et al., 1991). Es wurden weibliche ($n= 6$) und männliche ($n= 11$) Probanden ausgewählt, um Einflussgrößen zwischen den Geschlechtern zu untersuchen. Auch die Anzahl der Probanden in der männlichen und weiblichen Gruppe ist vergleichbar zu anderen Studien (Minahan et al., 2007; Weber und Schneider, 2002). Das Alter lag mit $23,3 \pm 2,7$ Jahren in einem Bereich, in dem die Probanden ihre höchste Leistungsfähigkeit erreichen können (Inbar und Bar-Or, 1986). Die Körpergröße (Männer größer als Frauen, $p < 0,001$), die Körpermasse (Männer schwerer als Frauen, $p < 0,026$) und der Body Mass Index (BMI) entsprachen den Angaben in vergleichbaren Studien bei der Untersuchung von weiblichen und männlichen Freizeitsportlern (Perez-Gomez et al., 2008). Der BMI von $22,7 \pm 2,0$ zeigte keinen geschlechtsspezifischen Unterschied ($p < 0,693$).

4.2 Bestimmung der höchsten Sauerstoffaufnahme

Die im ST gemessene $\dot{V}O_{2peak}$ lag im Normalbereich für fahrradergometrische Messungen bei Freizeitsportlern (Meyer und Kindermann, 1990). In der Literatur wird zur Ermittlung der $\dot{V}O_{2peak}$ eine Belastungsdauer von etwa 8 bis 15 Minuten empfohlen, da bei kürzeren Belastungen aufgrund der langen Anlaufzeit der aeroben Prozesse die Gefahr besteht, zu geringe Werte zu messen (Buchfuhrer et al., 1983). Die Gesamtdauer der Beanspruchung lag im ST bei $37,81 \pm 5,06$ Minuten, allerdings setzte sich der Test aus einzelnen Belastungsstufen mit 5 Minuten kontinuierlicher Belastung und dazwischen 5 Minuten andauernden Pausen zusammen. Der kontinuierlichen Belastung ging ab der 2. Stufe eine Vorbelastung voraus. Die Anlaufzeit der aeroben Prozesse wird bei intensiven Vorbelastungen verkürzt (Burnley et al., 2002; Burnley et al., 2002), so dass das im ST verwendete Protokoll die Messung von ausreichend hohen $\dot{V}O_{2peak}$ -Werten ermöglicht.

Alle Probanden gaben eine vollständige Ausbelastung bei Abbruch des ST an. Die Ausbelastungskriterien zur Messung der $\dot{V}O_{2peak}$ (Meyer und Kindermann, 1990) wurden im ST erfüllt.

4.3 Mechanische Leistung in den anaerob dominierten Testverfahren

Die Ergebnisse der Kenngrößen zur Bestimmung der mechanischen Leistung im WAnT stimmten mit den veröffentlichten Ergebnissen bei männlichen und weiblichen Freizeitsportlern überein (Inbar et al., 1996). Auch die im kAnT ermittelten Werte entsprachen veröffentlichten Daten (Jacobs et al., 1983).

Die erbrachte Leistung im WAnT wird in der sportmedizinischen Praxis zur Bestimmung von Teilbereichen des anaeroben Stoffwechsels, z.B. der anaeroben Leistungsfähigkeit, herangezogen (Inbar et al., 1996). Allerdings wurde beim WAnT über einen aerob erbrachten Anteil der Energiebereitstellung von bis zu 30% berichtet (Beneke et al., 2002; Souissi et al., 2007). Daraus wurde geschlossen, dass die Höhe der erbrachten Leistung bei der 30 Sekunden andauernden Belastung auch von der aeroben Leistungsfähigkeit abhängig ist. Eine Reduktion der Testdauer sollte zu einer Reduktion des Einflusses der aeroben Energiebereitstellung führen. Dieser Effekt der Reduktion der Testdauer konnte in der vorliegenden Arbeit anhand der Bestimmung der metabolischen Energiebeträge gut nachvollzogen werden und wird im Kapitel 4.4 diskutiert.

Ein Vergleich der mechanischen Leistung während der ersten 10 Sekunden im WAnT und der 10 Sekunden Testdauer im kAnT zeigte keinen signifikanten Unterschied.

Ebenso war die Spitzenleistung im kAnT (PP10) und im WAnT (PP30) nicht unterschiedlich und korrelierte deutlich. Vor dem Hintergrund, dass die Probanden über die abweichende Testdauer informiert waren, zeigte dieses Ergebnis, dass bei beiden Testdauern eine maximale Leistung, gemessen durch die jeweilige höchste Leistung, erbracht wurde. Die Kenntnis der Belastungsdauer hatte damit keinen Einfluss auf die zentralnervöse Steuerung der Leistung während der 10 Sekunden andauernden Belastung im kAnT und der initialen Phase im WAnT. Im Gegensatz dazu wurde eine solche zielorientierte Leistungseinteilung für längere Belastungen beschrieben und als Teleoantizipation bezeichnet (Ulmer, 1996).

In der Literatur wurde über eine Optimierung der Leistung im WAnT durch eine Steigerung der Bremsgewichte berichtet. Diese wurden bei den männlichen Probanden mit bis zu $0,105 \text{ kg Gewicht} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ KG}$ um über 25% höher gewählt als in der vorliegenden Studie. Männlichen Probanden wurden höhere Bremsgewichte pro kg Körpergewicht vorgegeben als weiblichen Probanden (Bar-Or, 1987). Diese geschlechtsspezifisch unterschiedliche Anpassung erscheint bei einem höheren Muskelanteil an der Körpermasse berechtigt (Janssen et al., 2000). Unter Berücksichtigung der Literaturdaten wären in

der vorliegenden Studie die männlichen Probanden mit einem weniger optimalen Bremsgewicht belastet als die weiblichen Probanden. Eine angepasste Erhöhung des Bremsgewichtes würde höhere Leistungen besonders der männlichen Probanden erwarten lassen. Die Erhöhung des Bremsgewichts wurde für hochtrainierte Probanden und nicht für Freizeitsportler, wie das hier untersuchte Kollektiv, empfohlen (Inbar et al., 1996). In der vorliegenden Arbeit konnte bei der Verwendung des Bremsgewichts von $0,075 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ KG}$ ein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern festgestellt werden.

4.4 Bestimmung der Einzelkomponenten der metabolischen Leistung

4.4.1 Messung des aeroben Stoffwechsels

Die Sauerstoffaufnahme über die Testdauer von etwa 3 Minuten im SMAX entsprachen in der Literatur angegebenen Werten (Bangsbo, 1992; Bangsbo, 1996; Hill et al., 2002; Medbø et al., 1988; Weber und Schneider, 2000). Im SMAX wurde mit rund 62% ein hoher Anteil der Energie aerob bereitgestellt. Die maximale Sauerstoffaufnahme, gemittelt über die letzten 30 Sekunden der SMAX-Belastung, zeigte keinen signifikanten Unterschied zur $\dot{V}O_{2\text{peak}}$ aus dem ST ($p > 0,05$), so dass von einer maximalen Aktivierung des aeroben Systems ausgegangen werden kann. Die im WAnT über die Testdauer aufgenommene Sauerstoffmenge und der daraus resultierende aerobe Anteil von etwa 17% an der Energiebereitstellung entspricht den bisher veröffentlichten Daten für Freizeitsportler (Beneke et al., 2002; Inbar et al., 1996; Minahan et al., 2007). Am Ende des WAnTs erreichte die $\dot{V}O_2$ Werte von etwa 80% der $\dot{V}O_{2\text{peak}}$, dieses Ergebnis entspricht veröffentlichten Beobachtungen (Bogdanis et al., 1996).

Im kAnT wurden unter 200 ml Sauerstoff während der 10 Sekunden andauernden Belastung aufgenommen und damit unter 5% der Energie aerob umgesetzt. Die niedrigen Werte sind darauf zurückzuführen, dass die Zeitkonstante der Aktivierung des aeroben Systems die Zeit bis zum Abschluss der Belastung überschreitet (Grassi, 2000).

Die Bestimmung des aeroben Stoffwechsels allein durch eine Messung des aufgenommenen Sauerstoffs könnte zu einer Unterbewertung führen, da die Sauerstoff-Körperspeicher (venöses Reservoir, Myoglobin, Hämoglobin) zu Anfang der Belastung

zusätzlich Sauerstoff zur aeroben Verstoffwechslung bereitstellen könnten. Je nach Belastungsintensität stünde eine Sauerstoffmenge von bis zu $5,6 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ Körpergewicht (entsprechend einer Stoffmenge von $0,25 \text{ mmol O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$) für den aeroben Stoffwechsel zur Verfügung. Eine Korrektur um 400 bis 550 ml Sauerstoff wäre damit zu beachten (Åstrand und Rodahl, 2003; Karlsson, 1971). Dies würde beim SMAX zu einer geringen Veränderung der aeroben Energiemenge führen. Im WAnT würde sich die aerobe Energiemenge um etwa 36% erhöhen (Beneke et al., 2002). Wenn die angenommene Korrektur während der initialen Sekunden einer Belastung notwendig würde, hätte diese einen hohen Einfluss auf den kAnT. Hier käme es zu einer Veränderung bei der Bestimmung des aeroben Metabolismus um etwa 200%.

Sollten die unter der Belastung entleerten Sauerstoffspeicher während der initialen Phase der Nachbelastung wieder aufgefüllt werden, wäre ein zusätzlicher Anteil der Sauerstoffmenge nach der Belastung dem aeroben Stoffwechsel und nicht der Wiederauffüllung der CrP-Speicher zuzuschreiben. Dies würde eine Korrektur des aus der Sauerstoffaufnahme während der Nachbelastung ermittelten anaerob-alaktaziden Stoffwechsels um bis zu $6 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ KG notwendig machen (Åstrand und Rodahl, 2003; Beneke et al., 2002; McMahon und Jenkins, 2002). Durch den genannten Mechanismus wäre eine Reduktion der über die verschiedenen Intensitäten weitgehend konstanten anaerob-alaktaziden Energiemenge um etwa 20%-25% notwendig.

Insgesamt würden sich nach der Korrektur im SMAX ein aerober Anteil von etwa 65% und ein anaerob-alaktazider Anteil von unter 10% ergeben. Im WAnT würde der aerobe Anteil etwa 25% und der anaerob-alaktazide etwa 26% betragen. Im kAnT würde sich ein aerober Anteil von etwa 15% zeigen, der anaerob-alaktazide würde sich auf einen Anteil von etwa 35% reduzieren. Die Korrektur um die Energie aus den Sauerstoffspeichern müsste ebenso in die Berechnung des MAODs eingehen (Heck und Schulz, 2002; Medbø et al., 1988) und hätte damit für einen Vergleich des anaeroben Stoffwechsels nach dem MAOD-Verfahren und durch die Bestimmung der Einzelkomponenten keine Relevanz. In beiden Verfahren wäre quantitativ dieselbe Korrektur anzusetzen. Für die Belastung des SMAXs ist eine Verschiebung um 10% zum aeroben Stoffwechsel möglich. Dies stimmt mit der Einschätzung der Autoren der MAOD-Originalmethode überein (Medbø et al., 1988).

Entgegen der diskutierten Annahme wird von verschiedenen Autoren angezweifelt, dass der lokal verfügbare Sauerstoff in den ersten Sekunden der Belastung aerob ver-

stoffwechselt werden kann (Barstow, 1994; Grassi, 2000; Grassi et al., 2003; Whipp, 2007). Die Verfügbarkeit der Sauerstoffmenge im Muskel und die Sauerstoffaufnahmekapazität des Muskels werden nicht als einzig limitierende Faktoren des aeroben Stoffwechsels angenommen. Der Aktivität der stoffwechselsteuernden Enzyme wird eine wesentliche Rolle zugeschrieben. Die Zeitkonstante des oxidativen Stoffwechsels der Muskulatur und des enzymatischen Versatzes ist mit etwa 20 Sekunden annähernd identisch (Grassi, 2000). In einer Studie wurde unter Verwendung der Nahinfrarotspektroskopie während der ersten 10 Sekunden der Belastung kein Abfall des oxygenierten Hämoglobin und Myoglobin im Muskel gemessen (Grassi et al., 2003).

Aufgrund der metabolisch bedingten Verzögerung wäre eine relevante Entleerung von Sauerstoffspeichern während der ersten Sekunden der Belastung nicht anzunehmen. Demzufolge würde eine Unterbewertung des aeroben Stoffwechsels bei den kurz andauernden Tests geringer ausfallen. Ein deutlich geringerer Anteil der Sauerstoffaufnahme nach Belastungsende würde der Wiederauffüllung der Sauerstoffspeicher zugeschrieben werden. Damit fiel die mögliche Überbewertung des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels also sehr viel kleiner aus als kalkuliert.

Bei vorliegender widersprüchlicher Literaturlage wurde eine Korrektur um den möglichen Effekt der Sauerstoffspeicher in der vorliegenden Arbeit nicht vorgenommen.

4.4.2 Messung und Modellierung des Blutlaktatverhaltens

Die Bestimmung der Blutlaktatkonzentration in der Nachbelastung wurde durch die Korrektur des zeitlichen Verlaufes der Laktatkonzentration präzisiert (Beneke et al., 2005; Beneke et al., 2007; Beneke et al., 2002). Die Modellierung erfolgte mittels Fittung der Kinetik nach einer mehrfach exponentiellen Funktion.

Ein Teil der Daten zur Bestimmung des Blutlaktatverhaltens der vorliegenden Arbeit wurde 2007 veröffentlicht (Beneke et al., 2007). In der genannten Publikation wurde das in der vorliegenden Arbeit angewendete Drei-Parameter-Modell mit einem Vier-Parameter-Modell verglichen. Das Modell liefert Informationen über die Dynamik des Laktatverhaltens bei sehr kurzen anaeroben Belastungen wie dem kAnT. Die Ergebnisse korrelieren mit denen vorangegangener Publikationen. So ergaben Bestimmungen aus kapillarisiertem Blut bei vergleichbaren Belastungen ähnliche Energiemengen (Beneke et al., 2005; Beneke et al., 2007; Beneke et al., 2002).

Während der 10 Sekunden Belastungszeit des kAnTs ist mit 38 kJ ein Anteil von über 50% der Arbeit durch anaerobe Glykolyse erbracht worden. Die hohe Energiemenge

und der mit 69% hohe Anteil an der Varianz der durchschnittlichen Leistung im kAnT lassen darauf schließen, dass der anaerob-laktazide Stoffwechsel in den initialen Sekunden einer hochmaximalen Belastung einen entscheidenden Einfluss auf die Leistung hat. Beim WAnT zeigte sich mit etwa 64 kJ eine um 68% höhere anaerob-laktazide Energiemenge als im kAnT, diese entspricht den durch Muskelbiopsien nach 10 und 30 Sekunden andauernden Belastungen ermittelten Ergebnissen (Jacobs et al., 1983). Der Einfluss des anaerob-laktaziden Stoffwechsels auf die Varianz der durchschnittlichen Leistung im WAnT war mit 83% deutlicher höher als im kAnT, dies ging mit einem signifikant geringeren alaktaziden Anteil an der metabolischen Arbeit einher.

Während der etwa 3 Minuten andauernden Belastung im SMAX wurden etwa 82 kJ durch anaerobe Glykolyse umgesetzt. Die etwa dreifach höhere Arbeit im SMAX in der vorliegenden Arbeit wird nicht durch den anaeroben, sondern durch den aeroben Stoffwechsel erklärt. Der Einfluss des anaerob-laktaziden Stoffwechsels reduziert sich deutlich nach den ersten 30 Sekunden der Belastung.

Die Ergebnisse zu den geschlechtsspezifischen Unterschieden entsprechen denen veröffentlichter Studien. Ein Vergleich von Männern und Frauen zeigte nach 10 und 30 Sekunden Belastungsdauer signifikant höhere Werte für den anaerob-laktaziden Stoffwechsel der männlichen Probanden (Jacobs et al., 1983). Auch bei Belastungen von etwa 3 Minuten Dauer erreichten männliche Probanden signifikant höhere anaerob-laktazide Energiemengen als weibliche (Ramsbottom et al., 1997).

In der vorliegenden Arbeit ergab der prozentuale Anteil der Glykolyse am Gesamtstoffwechsel während der verschiedenen Belastungsdauern keinen signifikanten Unterschied zwischen den Geschlechtern.

Die Varianz der durchschnittlichen Leistung im WAnT konnte im linearen Regressionsmodell zu 83% aus dem anaerob-laktaziden Stoffwechsel erklärt werden. Der Einschluss des aeroben oder des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels hatte keinen Einfluss auf das Modell. Dies entspricht den publizierten Beobachtungen zum 30 Sekunden WAnT bei 11 männlichen Rugby-Spielern (Beneke et al., 2002). Im kAnT wird ebenfalls ein Großteil der Varianz der durchschnittlichen Leistung durch die anaerob-laktazid erbrachte Leistung erklärt. Der Einfluss ist mit 69% weniger stark, zeigt jedoch, dass auch bei einer Dauer von nur 10 Sekunden und einem anaerob-alaktaziden Anteil an der Gesamtenergie von 41% der anaerob-laktazide Stoffwechsel den größten Einfluss auf die Varianz der mechanischen Leistung im kAnT hat.

4.4.3 Bestimmung der Kreatinphosphat-Resynthese

Die Berechnung des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels beruht auf der Annahme, dass das während der Belastung dephosphorylierte CrP unmittelbar nach der Belastung durch eine sauerstoffabhängige Reaktion rephosphoryliert wird (Harris et al., 1976; Knuttgen, 1970; Mahler, 1985; McMahon und Jenkins, 2002; Nevill et al., 1997; Prampero und Ferretti, 1999; Prampero et al., 1973). Der anaerob-alaktazide Stoffwechsel wird aus dem Sauerstoffanteil der schnellen Komponente eines biexponentziellen Modells der Sauerstoffkinetik während der Nachbelastung berechnet (Bogdanis et al., 1995; Knuttgen, 1970). Die Ergebnisse liegen in der Größenordnung vergleichbarer Studien (Beneke et al., 2002; Prampero und Ferretti, 1999).

Zur spezifischeren Untersuchung des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels bietet sich ein Test mit einer kürzeren Belastungsdauer als den 30 Sekunden im WAnT an. Verschiedene Publikationen haben den WAnT bezüglich der Belastung (Baron, 2001; Smith und Hill, 1991) oder der Dauer (Laurent et al., 2007; Serresse et al., 1988) modifiziert. In der vorliegenden Arbeit wurde mit dem kAnT ebenfalls ein auf eine Dauer von 10 Sekunden verkürzter WAnT angewendet und im Gegensatz zu anderen Arbeiten auf die metabolische Energiebereitstellung untersucht. Bei sehr kurzen hochintensiven Belastungen wurde über eine komplexere Kinetik der Rephosphorylierung des CrP berichtet (Newcomer et al., 1999). In Übereinstimmung mit den veröffentlichten Beobachtungen fiel beim kAnT in 100% und beim WAnT in 47,1% ein verzögerter Abfall der Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung auf. Hier konnte eine biexponentzielle Approximierung der Sauerstoffaufnahme nicht angewendet werden (Beneke et al., 2002). Das Verfahren nach di Prampero (1973) weist bei kurzen Belastungsdauern auch bei einem verzögerten Abfall der Sauerstoffaufnahme eine hohe Güte auf und kann in modifizierter Form zur Bestimmung des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels herangezogen werden (Beneke et al., 2002).

Die Verwendung eines biexponentziellen Modells wurde in Veröffentlichungen durch Muskelbiopsien (Harris et al., 1976), durch Untersuchungen mittels Kernspintomografie (Sapega et al., 1993; Taylor et al., 1983) oder durch eine Bestimmung der Sauerstoffkinetik (Knuttgen, 1970; Prampero und Ferretti, 1999; Prampero et al., 1973) bestätigt.

Einige Arbeitsgruppen haben für hochintensive Belastungen zusätzlich zur Rephosphorylierung des CrP während der schnellen Komponente über eine anhaltende relevante Rephosphorylierung während der folgenden langsamen Phase der Sauerstoffaufnahme

nach der Belastung berichtet (Bogdanis et al., 1995; Nevill et al., 1997; Newcomer et al., 1999). Sollte sich diese Annahme als richtig erweisen, käme es durch die isolierte Betrachtung der schnellen Komponente zu einer Unterbewertung des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels. Die höher komplexen Modelle zur CrP-Resynthese bieten sich nicht für die Approximation der Sauerstoffaufnahme an, sondern wurden vielmehr an isolierten Muskelmodellen entwickelt. Ob diese komplexeren Modelle auf die Bestimmung des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels aus der Sauerstoffaufnahme nach intensiver Belastung übertragen werden können, ist anhand des Datensatzes der hier vorliegenden Studie nicht zu überprüfen.

Laut Literaturangaben wird ein prozentualer Anteil der Arbeit von etwa 44% im WAnT während der ersten 10 Sekunden des Tests verrichtet (Bogdanis et al., 1996). Damit wurde während der ersten 10 Sekunden eine deutlich höhere Energieumsatzrate als in den folgenden 20 Sekunden festgestellt. In der vorliegenden Untersuchung wurde im Vergleich zwischen WAnT und kAnT mit über 50% ein noch größerer Anteil der Gesamtarbeit aus dem WAnT in den 10 Sekunden des kAnTs verrichtet. Dies ließ sich durch den anaeroben Stoffwechsel erklären: Im kAnT wurde über 80% der anaerob-alaktaziden Energiemenge des WAnTs gemessen, der Energieumsatz während der ersten 10 Sekunden war signifikant höher als in den folgenden 20 Sekunden der WAnT-Belastung. Im Vergleich zum WAnT erklärte sich dementsprechend ein geringerer Teil der Varianz der durchschnittlichen Leistung durch den anaerob-laktaziden Stoffwechsel.

4.5 Bestimmung des Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizits

Das ermittelte MAOD ist mit publizierten Daten vergleichbar und typisch für Belastungen auf dem Fahrradergometer. Untersuchungen von nicht spezifisch trainierten Männern auf dem Fahrradergometer ergaben ein MAOD von $54 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Medbø und Tabata, 1989) und $50 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Gastin und Lawson, 1994). Pizza et al. testeten untrainierte Männer auf dem Fahrradergometer und ermittelten ein MAOD von $39 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$, bei Kraft- und Ausdauertrainierten wurden 53 bzw. $54 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ bestimmt (Pizza et al., 1996). Untersuchungen von trainierten männlichen Athleten ergaben mit $53,4 \pm 14,6 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Buck und McNaughton, 1999) und mit $55,2 \pm 10,3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Green und Dawson, 1996) ähnliche Werte wie in der hier vorgestellten Studie. Andere Autoren ermittelten bei Athleten mit $57,6 \pm 6,7 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ bis $66,9 \pm 2,2 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ höhere MAOD-Werte als die hier präsentierten

Ergebnisse (Craig et al., 1993; Craig et al., 1995). Ein Vergleich von Leistungs-Radsportlern im untrainierten Zustand ergab mit $53,3 \pm 16,6 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ signifikant geringere Werte als 6 Monate später während der Wettkampfsaison mit $75,8 \pm 4,3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Lopez Calbet et al., 1993). Die Differenz wird in verschiedenen Arbeiten auf unterschiedlich große Muskelmassen der trainierten im Vergleich zu untrainierten Probanden zurückgeführt (Bangsbo et al., 1993; Truijens et al., 2003). Insgesamt sind Vergleiche der Untersuchungsergebnisse erschwert, weil sich die Studien in der Methodik deutlich voneinander unterscheiden.

Bei den trainierten Probanden geht das höhere MAOD mit höheren Werten für den Sauerstoffbedarf einher. Wird der Sauerstoffbedarf als Maß der Effektivität der supra-maximalen Belastung betrachtet, erscheint der Zusammenhang wenig plausibel, da trainierte Probanden eine Belastung mit einer höheren Effektivität als nicht trainierte absolvieren können (Green und Dawson, 1995). Bei der Betrachtung der Rahmenbedingungen zum MAOD-Verfahren werden die Zusammenhänge mit besonderer Berücksichtigung der Sauerstoffkinetik während der Belastung im Kapitel 4.5.1.1 diskutiert.

In der Literatur wird angegeben, das MAOD sei zu ca. 90% durch die anaerob-alkalazide und anaerob-laktazide Kapazität bestimmt (Medbø et al., 1988). Damit könnte angenommen werden, dass sich die Varianz des MAODs durch den anaerob-laktaziden und den anaerob-alkalaziden Stoffwechsel erklärt. In der vorliegenden Studie zeigte sich mit 35% nur ein geringer Anteil der Varianz durch den anaerob-laktaziden Stoffwechsel erklärt, der Einschluss des anaerob-alkalaziden Stoffwechsels hatte keinen Einfluss auf das Regressionsmodell.

Die Bestimmung der anaeroben Kapazität mittels MAOD-Methode führte zu signifikant niedrigeren Werten als die Bestimmung der anaeroben Energiemenge aus der Summe von anaerob-laktazidem und anaerob-alkalazidem Stoffwechsel (siehe Kapitel 3.5). Dies lässt den Schluss zu, dass das MAOD-Verfahren zu einer Unterbewertung der anaeroben Kapazität führt. Die Beobachtung einer Unterbewertung des anaeroben Stoffwechsels durch das MAOD wurde von einigen Arbeitsgruppen angenommen (Bangsbo, 1992; Bangsbo, 1996; Bangsbo et al., 1993; Green und Dawson, 1996; Truijens et al., 2003). Dabei zeigte ein Vergleich zwischen dem MAOD und metabolischen Analysen aus Muskelbiopsien aus dem M. vastus lateralis bei Radsportlern keinen schlüssigen Zusammenhang zwischen dem MAOD und den Proben vor und nach Belastung. Die muskelbiopsischen Untersuchungen ergaben höhere Werte als die Berechnungen aus

dem MAOD-Verfahren (Green et al., 1996). Medbø und Tabata hingegen stellten einen signifikanten Zusammenhang zwischen anaeroben Energiebeträgen, ermittelt durch Muskelbiopsien, und dem MAOD bei verschiedenen Belastungsdauern von 30 Sekunden bis 3 Minuten dar (Medbø und Tabata, 1989). Die Arbeitsgruppe um Bangsbo erklärte den signifikanten Zusammenhang der Studie von Medbø und Tabata dadurch, dass sowohl das MAOD als auch die anaeroben Energiebeträge niedrige Werte bei kurzer Belastungsdauer und hohe Werte bei einer Testdauer über 3 Minuten zeigten. Von einem physiologischen Zusammenhang wurde nicht ausgegangen (Bangsbo, 1992).

Weder durch publizierte Arbeiten, die Muskelbiopsien mit dem MAOD verglichen (Green et al., 1996), noch durch den hier vorgenommenen Vergleich des MAODs mit den Bestimmungen der anaerob-laktaziden und anaerob-alaktaziden Energiebeträge konnte zur Validisierung des MAOD-Verfahrens beitragen werden.

Weibliche Probanden sind seltener nach dem MAOD-Verfahren untersucht worden und die Veröffentlichungen zeigen widersprüchliche Ergebnisse. Mit einem MAOD von etwa $50 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ gemessen bei Freizeitsportlerinnen (Hill, 1996), liegen die MAOD-Werte in der Größenordnung von vergleichbaren Studien mit männlichen Probanden. In einem Vergleich zwischen untrainierten Probanden zeigten die weiblichen Studienteilnehmer mit etwa $38 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ signifikant geringere Werte als die männliche Vergleichsgruppe mit etwa $46 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Weber und Schneider, 2000). Bei trainierten Athleten erreichten die weiblichen Probanden mit $52,3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ ebenfalls signifikant geringe Werte als die männlichen mit $68,6 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Naughton et al., 1997). In einer Trainingsstudie hatte ein 8-wöchiges Training in Bezug auf das MAOD keine unterschiedlichen Auswirkungen auf weibliche und männliche Probanden, in beiden Gruppen zeigte sich nach dem Training ein deutlich höheres MAOD (Weber und Schneider, 2002). In der zitierten Studie konnte der geschlechtsspezifische Unterschied auch bezogen auf die aktive Muskelmasse dargestellt werden. Aus diesem Ergebnis wurde abgeleitet, dass ein geschlechtsspezifischer Unterschied in der anaeroben Kapazität durch das MAOD-Verfahren gemessen würde.

Das MAOD wies in der hier vorliegenden Studie weder absolut noch bezogen auf die Körpermasse einen signifikanten Unterschied zwischen den Geschlechtern auf. Im Gegensatz zum MAOD waren die anaerob-laktazide Energiemenge und die Summe der anaerob-laktaziden und anaerob-alaktaziden Energiemenge dazu geeignet, zwischen

männlichen und weiblichen Probanden zu unterscheiden. Das Ausbleiben von geschlechtsspezifischen Unterschieden beim MAOD in der vorliegenden Studie könnte auf unterschiedlich intensive Vorbelastungen im ST zurückgeführt werden. Die Belastung der einzelnen Belastungsstufen im ST erfolgte abhängig vom Körpergewicht. Wird ein höherer Muskelanteil an der Gesamtkörpermasse bei den männlichen im Vergleich zu den weiblichen Probanden angenommen (Janssen et al., 2000), ergibt sich nach den Daten der vorliegenden Arbeit bezogen auf die Muskelmasse eine höhere Belastung der weiblichen Probanden. In einer Untersuchung des metabolischen Stoffwechsels im ST am selben Probandenkollektiv wurde eine höhere Beanspruchung der weiblichen Probanden mit signifikant niedrigerem aerobem und höherem anaerobem Energiebereitstellungsanteil gemessen (Grzegorski, 2001).

Bei Verwendung intensiverer submaximaler Belastungen wurde im Vergleich zu geringerer Intensität über einen höheren Sauerstoffbedarf und damit über ein höheres MAOD berichtet (Green und Dawson, 1996). Dieser Zusammenhang zwischen einer gering unterschiedlich intensiven Belastung in den Vorversuchen und dem MAOD weist auf Mängel in der Methodik zur Berechnung der Regressionsgerade hin und ist damit ein wichtiger Kritikpunkt am MAOD-Verfahren (siehe Kapitel 4.5.1.1).

4.5.1 Rahmenbedingungen zum Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizit
Die Bestimmung der anaeroben Kapazität durch das MAOD-Verfahren erfolgte vor dem Hintergrund folgender Annahmen (Medbø et al., 1988):

- (1) Der Energiebedarf steigt linear mit der Belastungsintensität und kann bei submaximalen Belastungen aus der Sauerstoffaufnahme ermittelt werden.
- (2) Der Energiebedarf ist für eine definierte Belastung während der gesamten Belastungsdauer konstant.
- (3) Die anaerobe Energiemenge errechnet sich aus der Differenz des errechneten Gesamtenergiebedarfs und der Energie, die dem tatsächlich aufgenommenen Sauerstoff in der spezifischen Belastung entspricht.

Diese Prämissen werden vor dem Hintergrund der festgestellten Unterbewertung des anaeroben Stoffwechsels durch das MAOD-Verfahren im Vergleich zur Bestimmung des anaerob-laktaziden und anaerob-alaktaziden Stoffwechsels kritisch diskutiert.

4.5.1.1 Bestimmung des Energiebedarfs bei submaximalen Belastungen

Der Sauerstoffbedarf einer supramaximalen Belastung wurde unter Verwendung der MAOD-Methode durch eine Extrapolation des Verhältnisses der Sauerstoffaufnahme und der Belastung während submaximaler Belastungen verschiedener Intensitäten ermittelt. Dazu wurde eine Regressionsgerade gebildet und als linear angenommen. In der vorliegenden Arbeit sind dazu die Sauerstoffaufnahmen aus den einzelnen Stufen aus dem Stufentest verwendet worden. Stufentestverfahren wurden aus testökonomischen Überlegungen von verschiedenen Arbeitsgruppen zur Bestimmung der Regressionsgerade angewendet (s.u.). Die ermittelte Steigung der Regressionsgeraden entspricht publizierten Beobachtungen. Bei untrainierten Männern wurde unter Verwendung eines Stufentests über eine Steigung der Regressionsgeraden von $11,7 \pm 0,4 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ berichtet (Green und Dawson, 1995). Eine weitere Arbeitsgruppe ermittelte, ebenfalls unter Verwendung eines Stufentests, eine Steigung von $12,9 \pm 0,6 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ bei trainierten Radsportlern (Craig et al., 1993). Durch diskontinuierliche Belastungsprotokolle, bei denen Pausen zwischen den Belastungen erfolgten, konnte der Effekt der Vorbelastung reduziert werden (Green und Dawson, 1996). Zahlreiche weitere Arbeitsgruppen verwendeten kontinuierliche oder diskontinuierliche Protokolle zur Bestimmung der Regressionsgeraden und weitere von der Originalmethode abweichende Methoden zur Etablierung der individuellen Regressionsgeraden (Bangsbo, 1996; Bangsbo et al., 1990; Bangsbo et al., 1993; Friedmann et al., 2007; Green und Dawson, 1995; Green und Dawson, 1996; Green et al., 1996; Maxwell und Nimmo, 1996; Olesen, 1992; Olesen et al., 1994; Pizza et al., 1996; Scott et al., 1991). Dabei zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit der Steigung der Regressionsgeraden von der Intensität der Belastungen. Bei Belastungen unterhalb einer respiratorisch ermittelten Laktatschwelle wurden in der Literatur $10,5 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$, im Bereich der Laktatschwelle $12,8 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ und oberhalb der Laktatschwelle $14,8 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ angegeben (Henson et al., 1989). Dies ist auf überproportional höhere Sauerstoffaufnahmen bei höher-intensiven Belastungen zurückzuführen und stellt eine Grundannahme zur Bestimmung des Energiebedarfs nach dem MAOD-Verfahren in Frage.

Die höhere Intensität der Belastung der weiblichen Probanden im ST würde unter Annahme eines überproportionalen Anstiegs der Sauerstoffaufnahme bei steigender Belastungsintensität zu einer relativ höheren Steigung der Regressionsgeraden führen. Aufgrund der intensiveren submaximalen Belastungen der weiblichen Probanden würde

der extrapolierte Sauerstoffbedarf relativ höher ausfallen als bei den männlichen Probanden, die im ST moderater belastet wurden.

Die unproportional höhere Sauerstoffaufnahme bei höheren Belastungsintensitäten ist auf einen Mehrbedarf an Energie bei höheren Belastungen zurückzuführen (Åstrand und Rodahl, 2003; Zoladz et al., 2007). Dieser kann zum Beispiel durch eine erhöhte Körpertemperatur und eine erhöhte Atemarbeit erklärt werden.

Bei höherer Intensität der submaximalen Belastungen hat der Zeitpunkt, zu dem die Sauerstoffaufnahme gemessen wird, einen Einfluss auf die Steigung der Regressionsgeraden und damit auf die Höhe des MAODs (Green und Dawson, 1996). Berechnungen ergaben bei kurzen submaximalen Belastungen von 4-6 Minuten Dauer im Vergleich zu Belastungen von 8-10 Minuten ein um 33% kleineres MAOD (Bangsbo, 1996). Bei Belastungen mit höherer submaximaler Intensität wird kein „steady state“-Verhalten der Sauerstoffaufnahme erwartet, dies ist auf das Auftreten einer langsamen Komponente des Sauerstoffaufnahmeverhaltens während der Belastung (engl. onset slow component, ON-SC) zurückzuführen (Åstrand und Rodahl, 2003). Durch diese wird das Sauerstoffaufnahmeverhalten komplexer (Whipp und Wasserman, 1972). Die ON-SC wird als Differenz der Sauerstoffaufnahme in der 3. Minute und dem Ende der Belastung oder als Teil einer mehrexponentiellen mathematischen Funktion dargestellt (Barstow, 1994; Xu und Rhodes, 1999). Die minimale Belastungsdauer, die notwendig ist um die ON-SC nach einer mathematischen Funktion zu modellieren, wird mit 4 Minuten angegeben (Barstow und Mole, 1991).

Die ON-SC nimmt bei steigender Belastungsintensität zu und führt zur Einstellung eines neuen „steady states“ auf einem höheren Niveau oder bei Belastungen nahe der $\dot{V}O_{2peak}$ zu einem kontinuierlichen Anstieg der Sauerstoffaufnahme bis zur Erschöpfung (Xu und Rhodes, 1999). Als Erklärung für das Auftreten einer ON-SC bei konstanter Belastung werden neben einer erhöhten Körpertemperatur und Ventilation (Hagberg et al., 1978), einem Anstieg des Plasmaadrenalins (Xu und Rhodes, 1999) und der Rekrutierung von Typ II Muskelfasern (Whipp, 1994) viele weitere Faktoren genannt (Zoladz und Korzeniewski, 2001).

Um den Einfluss der ON-SC zu minimieren, wurden von verschiedenen Arbeitsgruppen Belastungszeiten von unter 5 Minuten Dauer zur Bestimmung der Regressionsgeraden gewählt (Green und Dawson, 1995). Bei niedrigen Belastungen wurde ein „steady state“

der Sauerstoffaufnahme nach 4 Minuten beobachtet. Dies wurde bei Belastungen von über 80-90% der $\dot{V}O_{2peak}$ unabhängig von der Dauer nicht erreicht (Bickham et al., 2002). Friedmann et al. verwendeten einen Stufentest mit einer Belastungsdauer von 5 Minuten mit 1 Minute Pause zwischen den Belastungen (Friedmann et al., 1996). In der vorliegenden Arbeit wurde die Sauerstoffaufnahme der 5. Belastungsminute zur Ermittlung der Regressionsgerade verwendet. Die Pause zwischen den Belastungen wurde mit einer Dauer von 5 Minuten gewählt, um den Effekt der Vorbelastung auf die Sauerstoffkinetik möglichst klein zu halten (Koppo und Bouckaert, 2001).

Nach der Originalmethode sollten die Belastungen zur Bestimmung der Regressionsgeraden eine Dauer von mindestens 10 Minuten aufweisen (Medbø et al., 1988). Da bei intensiveren submaximalen Belastungen nicht von einem „steady state“ der Sauerstoffkinetik ausgegangen werden könne, würden kürzere Belastungsdauern zu einer Unterbewertung des Sauerstoffbedarfs führen (Buck und McNaughton, 1999; Buck und McNaughton, 1999; Medbø, 1996; Medbø et al., 1988). In dieser Argumentation wird nicht beachtet, dass die Sauerstoffaufnahme bei höheren submaximalen Belastungen auch nach der 10. Minute weiter ansteigt und damit keine Aussage zum Sauerstoffbedarf der jeweiligen Belastung getroffen werden kann (Bangsbo, 1996; Xu und Rhodes, 1999).

In der vorliegenden Arbeit wurden zur Berechnung der Regressionsgerade $6,24 \pm 1,03$ submaximale Belastungen verwendet. Dies entspricht der Menge an submaximalen Belastungen, die häufig zur Erfassung der Regressionsgeraden angegeben wurden (Gastin und Lawson, 1994; Green und Dawson, 1996; Weyand et al., 1994).

Die Regressionsgerade wurde mit einem Korrelationskoeffizienten von $0,991 \pm 0,008$ ermittelt. Ähnlich hohe Korrelationskoeffizienten wurden im Zusammenhang mit der Bestimmung des MAODs als Beweis für die Linearität der Regressionsgeraden bewertet (Medbø et al., 1988; Medbø und Tabata, 1993; Scott et al., 1991). Diese Aussage muss kritisch betrachtet werden, da es sich unter anderem durch das Auftreten der ON-SC nicht um eine lineare Beziehung handelt (Green und Dawson, 1995).

Die Aussagekraft des Regressionsverfahrens wird bei weniger als 10 submaximalen Belastungen als kritisch betrachtet (Buck und McNaughton, 1999; Medbø et al., 1988; Russell et al., 2002). Die Autoren der Originalmethode sahen eine grafische Darstellung der Ergebnisse und eine „visuelle Inspektion“ mit Entfernung „fehlerhafter“ Messungen vor. Mindestens 10 submaximale Belastungen wurden nach der Korrektur für die in-

individuelle Regressionsgerade verwendet. Diese hatte im Mittel einem Korrelationskoeffizienten von 0,995 bis 0,998 (Medbø, 1996; Medbø et al., 1988; Medbø und Tabata, 1989; Medbø und Tabata, 1993). Eine Durchführung dieser Methode, bei der eine große Anzahl an Vorversuchen notwendig wäre, erscheint aus testökonomischen Überlegungen unter Einbeziehung der zahlreichen Unstimmigkeiten nicht sinnvoll.

Ein nicht-lineares Verhalten der Sauerstoffaufnahme bei höher intensiven submaximalen Belastungen wurde vielfach beschrieben (Barstow et al., 1990; Barstow und Mole, 1991; Poole et al., 2008; Poole und Richardson, 1997; Scheuermann et al., 2001; Zoladz et al., 1998; Zoladz et al., 1995; Zoladz et al., 1998; Zoladz et al., 2007). In Übereinstimmung mit den in der Literatur veröffentlichten Daten konnte an dem Probandenkollektiv der vorliegenden Studie eine abweichend hohe Sauerstoffaufnahme bei höher intensiven submaximalen Belastungen im ST beobachtet werden (Grzegorski, 2001). Daraufhin wurde die ON-SC durch die Differenz zwischen der 3. und der 5. Belastungsminute und anhand von mathematischen Modellierungen der Sauerstoffkinetik ermittelt. Durch die mathematische Approximation wurde die schnelle Komponente der Sauerstoffaufnahme (engl. onset fast component, ON-FC) und die ON-SC bestimmt, diese wurden mit mono- oder biexponentieller Approximation mit einem Korrelationskoeffizienten von $0,928 \pm 0,056$ modelliert. Anhand der Untersuchungen zum metabolischen Stoffwechsel an dem Probandengut der hier vorliegenden Studie konnte festgestellt werden, dass Belastungen, die zu einer erhöhten Laktatakkumulation führen, mit dem Auftreten der ON-SC einhergehen (Grzegorski, 2001). Diese traten ab einer Intensität von im Mittel 65% der $\dot{V}O_{2peak}$ auf und führten zu einem überproportionalen Anstieg der Sauerstoffaufnahme.

Neben der Intensität der submaximalen Belastungen hatte die Dauer einen hohen Einfluss auf die Berechnung des MAODs. Es zeigte sich, dass eine längere Dauer der submaximalen Belastungen zu einer Vergrößerung der ON-SC führt und sich der Effekt auf das MAOD verstärkte (Russell et al., 2002). Es kann angenommen werden, dass bei einer extrapolierten Belastungsdauer von 10 Minuten im ST ein deutlich größerer Einfluss der ON-SC auf das MAOD resultieren würde. Um dies zu untersuchen, kann die von Grzegorski 2001 während der Belastungsstufen im ST durchgeführte Modellierung der Sauerstoffaufnahme herangezogen werden. Eine Extrapolation der approximierten Sauerstoffaufnahme bis zur angenommenen 10. Belastungsminute würde eine

abweichende Regressionsgerade ergeben. Diese hätte mit $14,08 \pm 1,22 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ eine signifikant größere Steigung ($p < 0,001$) und mit $128 \pm 261 \text{ ml}$ einen signifikant kleineren Y-Achsen Schnittpunkt ($p < 0,001$). Das Bestimmtheitsmaß für die Berechnung läge bei $0,961 \pm 0,008$. Daraus würde sich mit $201,11 \pm 34,98 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ ein signifikant höherer Sauerstoffbedarf ($p < 0,001$) und damit ein mit $63,60 \pm 63,60 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ signifikant höheres akkumuliertes Sauerstoffdefizit ($p < 0,001$) errechnen. Das MAOD, berechnet mit den extrapolierten submaximalen Belastungen, würde höher als das MAOD auf Grundlage der gemessenen 5. Belastungsminute ausfallen. Allerdings wäre die Energiemenge signifikant kleiner als die Summe aus anaerob-laktazidem und anaerob-alkalazidem Stoffwechsel ($p < 0,003$). Es käme damit weiterhin zu einer Unterbewertung des anaeroben Stoffwechsels im SMAX. Dies träfe auch zu, wenn zur Berechnung der ON-SC die Differenz zwischen der 3. Minute und dem Ende der jeweiligen Belastungsstufe im Stufentest herangezogen würde.

Der Vorstellung eines konstant steigenden Sauerstoffbedarfs liegt die Annahme zugrunde, dass der Energiebedarf linear mit der Belastungsintensität ansteigt. Ein lineares Verhältnis von Energiebedarf und Belastungsintensität kann nicht angenommen werden, vielmehr nimmt der biomechanische Wirkungsgrad bei intensiven Belastungen ab (Astrand et al., 1986; Beneke et al., 2002; Mourots et al., 2004; Zoladz und Korzeniowski, 2001). Dies wurde z.B. auf einen nichtlinearen Anstieg der Atemarbeit zurückgeführt. Gerade im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit macht der Energiebedarf der Ventilation einen erheblichen Anteil der Sauerstoffaufnahme aus (Heck und Schulz, 2002). Weiterhin wurde beschrieben, dass bei hohen Belastungen der Wirkungsgrad muskulärer Arbeit abnimmt (Gaesser und Brooks, 1975). Es kommt zu einem höheren Energiebedarf bei steigender Belastungsintensität, vor allem oberhalb einer Intensität von 100% der $\dot{V}O_{2\text{peak}}$. Dieser Mehrbedarf wird sowohl über eine aerobe als auch über eine anaerobe Energiebereitstellung gedeckt (Beneke et al., 2002). Eine Kalkulation nur auf Grundlage des aeroben Stoffwechsels wie im Extrapolationsverfahren führt zur Unterbewertung des Energiebedarfs. Diese Unterbewertung des Gesamtenergiebedarfs für die supramaximale Belastung wird in der MAOD-Methodik durch die ebenfalls nicht korrekte Einbeziehung der ON-SC ins Extrapolationsverfahren quantitativ teilweise ausgeglichen. Wie der Gesamtenergiebedarf verhält sich die Sauerstoffaufnahme aufgrund der ON-SC nicht linear zur Leistung, sondern steigt überproportional an (Whipp, 1994;

Whipp und Wasserman, 1972; Zoladz et al., 1998; Zoladz et al., 1995; Zoladz et al., 2007).

Barstow et al. separierten die ON-SC von der ON-FC und fanden ein lineares Verhältnis der Belastung und der ON-FC im Bereich zwischen 38% und 100% der $\dot{V}O_{2peak}$ (Barstow et al., 1996). Bangsbo et al. kritisierten, dass die anaerobe Energiebereitstellung im Extrapolationsverfahren nicht mit einbezogen wird. Dabei macht der anaerob-laktazide Stoffwechsel etwa 10% der Energiebereitstellung bei hohen submaximalen Belastungen (Bangsbo et al., 1990) und etwa 30% beim supramaximalen Test mit einer Dauer von 2-3 Minuten aus (Medbø et al., 1988). Der Anteil an der metabolischen Energiemenge sollte mit einberechnet werden, anstatt durch eine fälschlicherweise mit einbezogene ON-SC quantitativ ungenau ausgeglichen zu werden (Bangsbo, 1996; Bangsbo et al., 1993). Dass die anaerobe Energiebereitstellung bei hohen submaximalen Belastungen nicht zur Ermittlung des Energiebedarfs der supramaximalen Belastung herangezogen wird, wurde auch von weiteren Arbeitsgruppen kritisch bemerkt (Green und Dawson, 1995; Truijens et al., 2003).

4.5.1.2 Energiebedarf während konstanter Belastung

Die Kalkulation des MAODs setzt die Annahme eines konstanten Energiebedarfs während einer konstanten Belastung voraus. Dies wird in der Literatur in Frage gestellt: Anhand von Muskelbiopsien wurde bei konstanten Belastungen aufgezeigt, dass die während der ersten 20 Sekunden geleistete Arbeit deutlich höher war als die Arbeit in den folgenden Minuten. Der Energiebedarf wäre demnach nicht als konstant anzunehmen und müsste zur Bestimmung eines korrekten MAODs für die einzelnen Phasen der Belastung getrennt errechnet werden (Bangsbo, 1996).

4.5.1.3 Vorgabe der Belastung im Supramaximalbelastungstest

Neben der Berechnung des Energiebedarfs aus submaximalen Belastungen ergibt sich aus der Intensität und Dauer der supramaximalen Belastung eine Ursache für Abweichungen im MAOD-Verfahren (Medbø et al., 1988). Die supramaximale Belastung sollte intensiv und lang genug sein, um zu einer maximalen Ausschöpfung der anaeroben Kapazität zu führen. Hier wurde eine minimale Testdauer von etwa 2 Minuten ermittelt (Medbø et al., 1988). Frühere Studien zur Differenz zwischen erwarteter Sauerstoffaufnahme und der tatsächlich aufgenommenen Menge an Sauerstoff während der Belastung haben ab einer Belastungsdauer von etwa 2 Minuten keine Zunahme dieser Diffe-

renz festgestellt (Karlsson, 1971). Belastungen von mehr als etwa 2 Minuten Dauer ergaben dementsprechend keinen Anstieg der MAOD-Werte. Länger andauernde Belastungen führten zu einem Anstieg des aeroben Energieumsatzes (Medbø et al., 1988). Viele Arbeitsgruppen verwendeten supramaximale Belastungen mit einer Dauer von 3 Minuten zur Bestimmung des MAODs. In der Originalarbeit wurden 3 Minuten als Belastungsdauer vorgeschlagen, um mit einer hohen Wahrscheinlichkeit die vollständige Ausschöpfung der anaeroben Kapazität zu erreichen (Medbø et al., 1988). Dementsprechend wurde der SMAX so konzipiert, dass nach einer Dauer von etwa 3 Minuten eine vollständige Erschöpfung der Probanden auftrat und der Test abgebrochen wurde. Die Vorgabe von 120% der $\dot{V}O_{2peak}$ hat sich in Vorversuchen und unter Berücksichtigung der Literatur (Friedmann et al., 1996; Medbø, 1996; Minahan und Wood, 2008; Weber und Schneider, 2001) als geeignet erwiesen, um nach 3 Minuten Belastungsdauer zum Testabbruch zu führen.

An der Methode zur Bestimmung der Intensität und Dauer der supramaximalen Belastung allein auf der Grundlage von aeroben Leistungsparametern wurde Kritik geäußert (Barnett et al., 1996; Strobel et al., 1999). Die Autoren verwendeten ein alternatives Verfahren und bestimmten die Leistung durch eine Kombination aus den Ergebnissen eines aeroben Tests zur Ermittlung der maximalen Sauerstoffaufnahme und der durchschnittlichen Leistung aus einem WAnT (Barnett et al., 1996). Mit diesem Verfahren wurde die geringste Varianz der Zeit bis zum Testabbruch erreicht. Durch die Kombination von aerober und anaerober Energiebereitstellung wird das Vorgehen, besonders bei unterschiedlich trainierten Probanden, von der Arbeitsgruppe als überlegen bezeichnet. Einschränkend wurde festgestellt, dass die Ermittlung des Sauerstoffbedarfs durch eine Extrapolation aus submaximalen Belastungen wie im MAOD-Originalverfahren ungenau bleibt. Strobel et al. ermittelten die Belastung für den MAOD-Test in nicht näher bezeichneten Vorversuchen. Diese machte, abhängig vom aeroben bzw. anaeroben Trainingsstatus, 116% bzw. 140% der $\dot{V}O_{2peak}$ aus (Strobel et al., 1999). In Übereinstimmung damit schlagen Craig et al. vor, die Testdauer des supramaximalen Tests variabel zu gestalten und an die spezifischen Leistungs- und Wettbewerbsprofile der zu untersuchenden Athleten anzupassen. Anaerobe Athleten erreichten in der Untersuchung maximale Werte bei 70 Sekunden hochintensiver Belastung, ausdauertrainierte Sportler bei 5 Minuten Dauer. Es wurde auf der Grundlage der Sauerstoffkinetik diskutiert, dass eine schnelle Sauerstoffaufnahmekinetik bei aerob trainierten Athleten zu einem relativ kleinen Defizit am Anfang der Belastung führt, von der an-

aeroben Kapazität müsste dementsprechend weniger aufgebraucht werden. Bei Sprintern wurde angenommen, dass die anaerob erbrachte Leistung am Anfang der Belastung bei höherer Leistung größer ausfallen müsste, da die Sauerstoffaufnahme langsamer ansteigt (Craig et al., 1995).

4.5.2 Beurteilung des Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizits

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das MAOD-Verfahren nur mit Einschränkungen reproduzierbar ist. Die Einordnung der eigenen Ergebnisse und Vergleiche zwischen verschiedenen Arbeiten werden dadurch erschwert, dass in der Literatur zahlreiche Modifikationen der MAOD-Methode angewendet wurden. Neben anderen kritisch zu betrachtenden Details können durch die Bestimmung des Sauerstoffbedarfs aus submaximalen Belastungen besonders große methodische Fehler entstehen. Wegen der überproportional höheren Sauerstoffaufnahme bei intensiven Belastungen ist kein lineares Verhältnis zwischen Sauerstoffaufnahme und Leistung zu erwarten. Die Annahme einer linearen Beziehung und die Extrapolation in den Bereich der supramaximalen Belastung, wie sie im MAOD-Verfahren angewendet wird, führen zu einer Unterbewertung des Energiebedarfs und der anaeroben Kapazität. Obwohl es wünschenswert wäre, ein Verfahren wie die MAOD-Methode zur Bestimmung der anaeroben Kapazität zu benutzen, erscheint das MAOD-Verfahren aufgrund der Unschlüssigkeiten in der Methode im Vergleich zu den weiteren verwendeten Verfahren und vor dem Hintergrund der aktuellen Literatur nicht als geeignet.

4.6 Vergleich der Methoden zur Bestimmung der anaeroben Leistungsfähigkeit

In der Praxis gehören der WAnT und das MAOD-Verfahren zu den am häufigsten angewendeten Methoden in der anaeroben Diagnostik. Scott et al. fanden eine hohe Korrelation zwischen der maximalen Leistung im WAnT und der anaeroben Kapazität aus dem MAOD-Verfahren, jeweils bezogen auf die Körpermasse ($r = 0,69$, $p < 0,05$) (Scott et al., 1991). Die Ergebnisse dieser Studie können durch einen methodischen Mangel beeinflusst sein, da Sprinter und Langstreckenläufer eingeschlossen wurden. Bei den Sprintern ist sowohl ein höheres MAOD als auch eine höhere maximale Leistung im WAnT zu erwarten.

Andere Autoren kommen zu keiner Übereinstimmung der Testergebnisse zwischen dem WAnT und den Werten aus dem MAOD-Verfahren (Minahan et al., 2007) oder empfehlen, die Methoden nicht miteinander zu vergleichen, da sie verschiedene Teilbereiche des anaeroben Stoffwechsels abbilden (Inbar et al., 1996). In der vorliegenden Arbeit zeigte sich nur dann eine hohe Korrelation zwischen den Ergebnissen beider Tests, wenn diese absolut betrachtet wurden (PP30 und MAOD, $r = 0,718$, $p < 0,001$). Relativ zur Körpermasse zeigte sich mit $r = 0,395$ ($p < 0,116$) keine signifikante Korrelation. Wurde der Einfluss des Geschlechts durch eine partielle Korrelation konstant gehalten, konnte ebenfalls kein Zusammenhang zwischen der höchsten Leistung aus dem WAnT und dem MAOD-Verfahren, jeweils bezogen auf die Körpermasse, festgestellt werden ($r = 0,289$, $p < 0,277$). Vor dem Hintergrund der hier vorliegenden Ergebnisse kann kein Zusammenhang zwischen der anaeroben Leistungsfähigkeit aus dem WAnT und der anaeroben Kapazität dem MAOD-Verfahren festgestellt werden.

4.7 Energiebereitstellung bei verschiedenen Belastungsintensitäten

Über die prozentualen Anteile an der Energiebereitstellung für erschöpfende Belastungen mit unterschiedlich langer Dauer wurde in Übersichtsarbeiten berichtet (Gastin, 2001). In der Abbildung 18 (modifiziert nach Gastin, 2001; auf der folgenden Seite) sind die Literaturdaten grafisch dargestellt und die prozentualen Anteile der metabolischen Energiebereitstellung aus der vorliegenden Arbeit mit eingetragen.

Die ermittelten Energiebeträge aus dem kAnT mit einer Testdauer von 10 Sekunden stimmen dabei mit den grafisch wiedergegebenen Literaturdaten überein. Beim 30 Sekunden andauernden WAnT zeigt sich ein höherer anaerob-alkalischer und ebenfalls ein erhöhter anaerob-laktatischer Anteil, der aerobe Anteil fällt geringer aus. Im SMAX ist der anaerobe Anteil höher als bei den zusammengefassten Literaturdaten. Hier weicht besonders der anaerob-laktatische Anteil ab.

Die Abweichung kann dadurch erklärt werden, dass in der Literatur der anaerob-alkalische Anteil von vielen Arbeitsgruppen nur geschätzt und nicht bestimmt wurde. Die Ermittlung des anaeroben Stoffwechsels erfolgte in einigen Fällen durch das MAOD-Verfahren. Im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit wurde die Energiemenge durch die Sauerstoffspeicher bei längeren Belastungen in die Berechnung des aeroben Stoffwechsels mit einbezogen (Gastin, 2001).

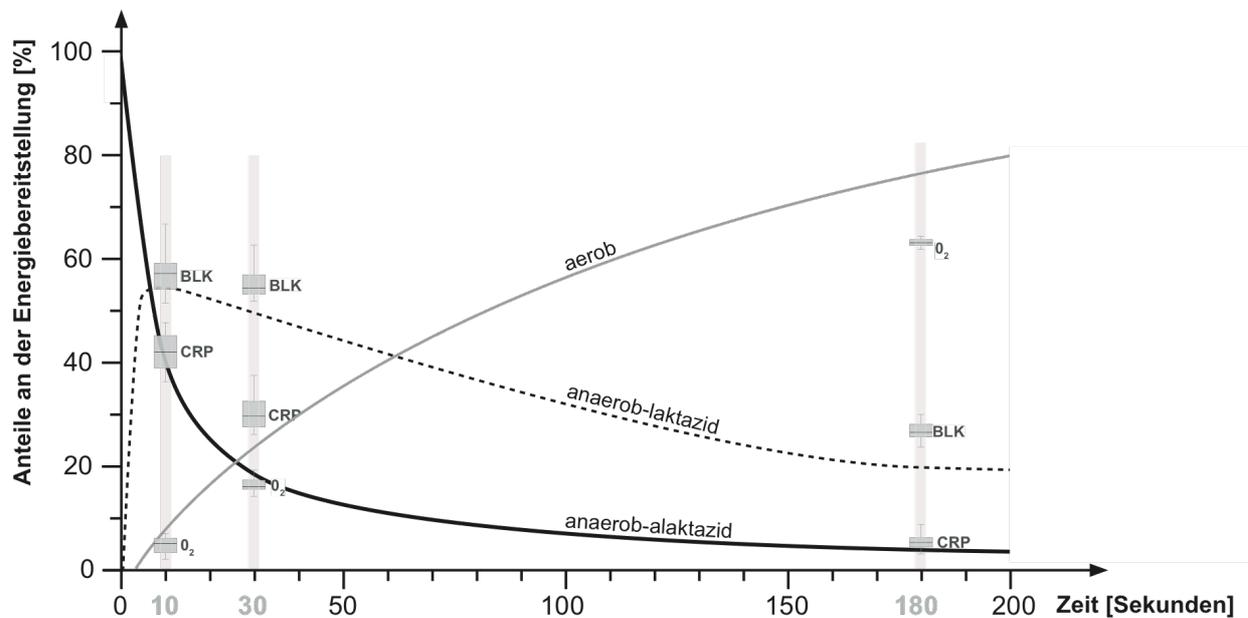


Abbildung 18: Prozentuale Anteile an der Energiebereitstellung für erschöpfende Belastungen. Die Kurven geben Informationen zum Anteil der Energiebereitstellung aus verschiedenen Übersichtsartikeln zu dem Thema wieder, sie beziehen sich nicht auf das Zeitverhalten der einzelnen Stoffwechselwege. In die Grafik sind die Anteile an der metabolischen Energiebereitstellung aus den in dieser Arbeit verwendeten Tests (10: kAnT, 30: WAnT, 180: SMAX) eingetragen, anaerob-alaktazid, CRP= anaerob-alaktazide Energiebereitstellung, anaerob-laktazid, BLK= Energie aus anaerober Glykolyse, aerob, O₂= aerober Energiebereitstellung

Die Ergebnisse der metabolischen Energiebereitstellung der vorliegenden Arbeit bestätigen die Literaturdaten, nach denen die Stoffwechselforgänge nicht einer streng sequenzartigen Aktivierung folgen, sondern ineinander übergehen und dem Energiebedarf der Belastungen angepasst sind (Gastin, 2001).

4.8 Wirkungsgrad

Der biomechanische Wirkungsgrad wurde in der vorliegenden Arbeit durch die erbrachte mechanische und die metabolisch bereitgestellte Energie ermittelt. Dabei zeigte sich eine signifikante Reduktion des Wirkungsgrads bei zunehmender Intensität der Belastung. Obwohl an den verwendeten Verfahren zur Bestimmung des anaerob-laktaziden und des anaerob-alaktaziden Stoffwechsels Kritik geäußert wurde (siehe Kapitel 4.4.2 und 4.4.3), bleibt die Aussage eines mit steigender Intensität sinkenden Wirkungsgrads bestehen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass mögliche Fehler in der Bestimmung des anaeroben Stoffwechsels sich in Ungenauigkeiten bei der Bestimmung des Wirkungsgrads ausdrücken.

Überlegungen zum Wirkungsgrad sind für das MAOD-Verfahren von entscheidender Bedeutung. Wie in der Methodenkritik unter 4.5.1.1 beschrieben, ist das Regressionsverhältnis nicht als linear und damit der Wirkungsgrad nicht als konstant anzunehmen. Dies ist vor allem auf das Auftreten der ON-SC und den zunehmenden Einfluss des anaeroben Stoffwechsels bei intensiven Belastungen zurückzuführen.

Nach dem MAOD-Verfahren wird keine exakte Bestimmung des Wirkungsgrads bei submaximalen Belastungen vorgenommen und dadurch auch ein zu hoher Wirkungsgrad für die supramaximale Belastung ermittelt (Zoladz et al., 1998).

Eine Bestimmung des Wirkungsgrads für intensive Belastungen sollte die anaerobe Energiebereitstellung mit berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund ist die Entwicklung eines optimierten MAOD-Verfahrens wünschenswert.

5 Zusammenfassung

Bei körperlicher Belastung wird Energie durch drei verschiedene Stoffwechselwege zur Verfügung gestellt. Durch den anaeroben Abbau von Kreatinphosphat aus der Muskelzelle können hohe Energiemengen in kurzer Zeit umgesetzt werden. Ebenfalls anaerob werden hohe Energieumsatzraten unter Laktatproduktion mittels anaerober Glykolyse erreicht. Die hohen Umsatzraten sind bei den anaeroben Stoffwechselwegen auf einen kurzen Zeitraum beschränkt. Aerob werden Kohlenhydrate und Fettsäuren unter Sauerstoffverbrauch abgebaut. Dieser Stoffwechselweg weist eine hohe Kapazität auf, die Umsatzraten sind geringer als beim anaeroben Stoffwechsel.

Im Gegensatz zur Messung des aeroben Stoffwechsels konnte für die Messung des anaeroben Stoffwechsels in der Sportphysiologie kein Goldstandard etabliert werden. Verschiedene Methoden wurden in den letzten Jahrzehnten verwendet, um Teilbereiche der anaeroben Kapazität und Leistungsfähigkeit bei kurzen und intensiven Belastungen quantitativ zu bestimmen. In der vorliegenden Arbeit wurden häufig angewendete fahrradergometrische Methoden zur Messung des anaeroben Stoffwechsels untersucht. Der „Wingate Anaerobic Test“ (WAnT) führt zu einer hohen Beanspruchung des anaeroben Stoffwechsels und gilt als gut evaluierter Test zur Bestimmung der maximalen anaeroben Leistungsfähigkeit. In der vorliegenden Arbeit wurde der WAnT bei einer Dauer von 30 Sekunden und ein auf 10 Sekunden reduzierter Test (kurzer anaerober Test, kAnT) durchgeführt. Die Messung des Maximal Akkumulierten Sauerstoffdefizits (MAOD) erfolgte zur Bestimmung der maximalen anaerob bereitstellbaren Energiemenge. Das komplexe Testverfahren, mit verschiedenen intensiven submaximalen Belastungen und einer supramaximalen Belastung von etwa 180 Sekunden Dauer, wurde nachvollzogen und vor dem Hintergrund der in der Literatur geäußerten Kritik untersucht.

Bei den verschiedenen Belastungen (10, 30 und etwa 180 Sekunden) wurde eine Bestimmung der metabolisch freigesetzten Energie vorgenommen. Der anaerob-laktazide Stoffwechsel wurde durch die Menge an Kreatinphosphat, welches im Anschluss an die Belastung rephosphoryliert wurde, bestimmt. Dazu wurde die Sauerstoffmenge ermittelt, die zur Wiederauffüllung der während der Belastung entleerten Muskelspeicher diente. Der anaerob-laktazide Stoffwechsel wurde durch die Bestimmung der maximalen Laktatproduktion, basierend auf Blutlaktatwerten nach der Bela-

stung, ermittelt. Der aerobe Stoffwechsel konnte durch die Messung der aufgenommenen Sauerstoffmenge quantifiziert werden.

Die Auswertung der mechanischen Leistung im WAnT und kAnT ergab, dass sich die Spitzenleistung nicht signifikant unterschied. Die Bestimmung der metabolischen Energie ergab signifikant von der Intensität und Belastungsdauer abhängige Ergebnisse. Der Energieumsatz im kAnT war signifikant höher als im WAnT. Dabei war im kAnT der prozentuale Anteil der anaerob bereitgestellten Energie mit 95% höher als im WAnT mit 80%. Der prozentuale Anteil der anaerob-laktaziden Leistung war nicht unterschiedlich. Die Varianz der durchschnittlichen Leistung im WAnT konnte zu 83% durch den anaerob-laktaziden Stoffwechsel erklärt werden, im kAnT zu 69%. Die gezeigten Ergebnisse für den anaerob-laktaziden Stoffwechsel im kAnT sprechen für eine zeitlich frühe Aktivierung des anaerob-laktaziden Stoffwechsels und damit gegen eine sequenzielle Aktivierung der Stoffwechselwege bei intensiven Belastungen.

Bei der etwa 180 Sekunden andauernden Belastung lag der prozentuale Anteil des anaeroben Stoffwechsels unter 40% und damit signifikant niedriger als im kAnT und WAnT. Die anaerob-alaktazide Energiemenge war dabei nicht unterschiedlich zum WAnT. Wurde die anaerobe Energiemenge durch das MAOD-Verfahren ermittelt, ergab sich im Vergleich zur Summe der Energiebeträge aus dem anaerob-alaktaziden und anaerob-laktaziden Stoffwechsel im etwa 180 Sekunden andauernden Test eine signifikant geringe Energiemenge. Durch das MAOD-Verfahren kam es damit zu einer Unterbewertung der anaeroben Kapazität, diese erklärt sich durch einen zu gering ermittelten Energiebedarf durch die MAOD-Originalmethode.

Im Gegensatz zum MAOD war die Summe der anaerob-laktaziden und anaerob-alaktaziden Energiemenge dazu geeignet, zwischen männlichen und weiblichen Probanden zu unterscheiden.

Die aufgeführten Methoden zur Bestimmung des anaerob-laktaziden und anaerob-alaktaziden Stoffwechsels sollten weiterhin validiert werden. Eine Verwendung dieser Verfahren zur Bestimmung der metabolisch bereit gestellten anaeroben Energie erscheint sinnvoll, da mit dem WAnT nur ein Teilbereich des anaeroben Stoffwechsels gemessen wird und mit dem MAOD-Verfahren keine verlässlichen Aussagen zur anaeroben Kapazität gemacht werden können. Vor dem Hintergrund der erhobenen Daten und der aktuellen Literatur ist eine Anwendung der MAOD-Methode nicht zu empfehlen.

6 Literaturverzeichnis

- Araki, T. (1891): Über die Bildung von Milchsäure und Glycose im Organismus bei Sauerstoffmangel, *Zeitschr Phys Chem* 15, Seite 335-70.
- Astrand, P. O.; Hultman, E.; Juhlin-Dannfelt, A. und Reynolds, G. (1986): Disposal of lactate during and after strenuous exercise in humans, *J Appl Physiol* 61 [1], Seite 338-43.
- Åstrand, PO und Rodahl, K. (2003): *Textbook of Work Physiology*, 4. Auflage, Human Kinetics, Champaign, ISBN: 978-0736001403.
- Bangsbo, J. (1992): Is the O₂ deficit an accurate quantitative measure of the anaerobic energy production during intense exercise?, *J Appl Physiol* 73 [3], Seite 1207-9.
- Bangsbo, J. (1996): Oxygen deficit: a measure of the anaerobic energy production during intense exercise?, *Can J Appl Physiol* 21 [5], Seite 350-63; 364-9.
- Bangsbo, J. (1998): Quantification of anaerobic energy production during intense exercise, *Med Sci Sports Exerc* 30 [1], Seite 47-52.
- Bangsbo, J. (2000): Muscle oxygen uptake in humans at onset of and during intense exercise, *Acta Physiol Scand* 168 [4], Seite 457-64.
- Bangsbo, J.; Gollnick, P. D.; Graham, T. E.; Juel, C.; Kiens, B.; Mizuno, M. und Saltin, B. (1990): Anaerobic energy production and O₂ deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans, *J Physiol* 422, Seite 539-59.
- Bangsbo, J.; Michalsik, L. und Petersen, A. (1993): Accumulated O₂ deficit during intense exercise and muscle characteristics of elite athletes, *Int J Sports Med* 14 [4], Seite 207-13.
- Bar-Or, O. (1987): The Wingate anaerobic test. An update on methodology, reliability and validity, *Sports Med* 4 [6], Seite 381-94.
- Barnett, C.; Jenkins, D.; MacKinnon, L. und Green, S. (1996): A new method for the calculation of constant supra-VO₂peak power outputs, *Med Sci Sports Exerc* 28 [12], Seite 1505-9.
- Baron, R. (2001): Aerobic and anaerobic power characteristics of off-road cyclists, *Med Sci Sports Exerc* 33 [8], Seite 1387-93.
- Barstow, T. J. (1994): Characterization of VO₂ kinetics during heavy exercise, *Med Sci Sports Exerc* 26 [11], Seite 1327-34.

- Barstow, T. J.; Jones, A. M.; Nguyen, P. H. und Casaburi, R. (1996): Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise, *J Appl Physiol* 81 [4], Seite 1642-50.
- Barstow, T. J.; Lamarra, N. und Whipp, B. J. (1990): Modulation of muscle and pulmonary O₂ uptakes by circulatory dynamics during exercise, *J Appl Physiol* 68 [3], Seite 979-89.
- Barstow, T. J. und Mole, P. A. (1991): Linear and nonlinear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise, *J Appl Physiol* 71 [6], Seite 2099-106.
- Beneke, R.; Hutler, M.; Jung, M. und Leithauser, R. M. (2005): Modeling the blood lactate kinetics at maximal short-term exercise conditions in children, adolescents, and adults, *J Appl Physiol* 99 [2], Seite 499-504.
- Beneke, R.; Hutler, M. und Leithauser, R. M. (2007): Anaerobic performance and metabolism in boys and male adolescents, *Eur J Appl Physiol* 101 [6], Seite 671-7.
- Beneke, R.; Jumah, M. D. und Leithauser, R. M. (2007): Modelling the lactate response to short-term all out exercise, *Dyn Med* 6, Seite 10.
- Beneke, R. und Meyer, K. (1997): Walking performance and economy in chronic heart failure patients pre and post exercise training, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 75 [3], Seite 246-51.
- Beneke, R.; Pollmann, C.; Bleif, I.; Leithauser, R. M. und Hutler, M. (2002): How anaerobic is the Wingate Anaerobic Test for humans?, *Eur J Appl Physiol* 87 [4-5], Seite 388-92.
- Bickham, D.; Le Rossignol, P.; Gibbons, C. und Russell, A. P. (2002): Re-assessing accumulated oxygen deficit in middle-distance runners, *J Sci Med Sport* 5 [4], Seite 372-82.
- Bogdanis, G. C.; Nevill, M. E.; Boobis, L. H.; Lakomy, H. K. und Nevill, A. M. (1995): Recovery of power output and muscle metabolites following 30 s of maximal sprint cycling in man, *J Physiol* 482 (Pt 2), Seite 467-80.
- Bogdanis, G. C.; Nevill, M. E.; Lakomy, H. K.; Graham, C. M. und Louis, G. (1996): Effects of active recovery on power output during repeated maximal sprint cycling, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 74 [5], Seite 461-9.
- Borg, G. (1970): Perceived exertion as an indicator of somatic stress, *Scand J Rehabil Med* 2 [2], Seite 92-8.

- Buchfuhrer, M. J.; Hansen, J. E.; Robinson, T. E.; Sue, D. Y.; Wasserman, K. und Whipp, B. J. (1983): Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment, *J Appl Physiol* 55 [5], Seite 1558-64.
- Buck, D. und McNaughton, L. (1999): Maximal accumulated oxygen deficit must be calculated using 10-min time periods, *Med Sci Sports Exerc* 31 [9], Seite 1346-9.
- Buck, D. und McNaughton, L. R. (1999): Changing the number of submaximal exercise bouts effects calculation of MAOD, *Int J Sports Med* 20 [1], Seite 28-33.
- Bulbulian, R.; Wilcox, A. R. und Darabos, B. L. (1986): Anaerobic contribution to distance running performance of trained cross-country athletes, *Med Sci Sports Exerc* 18 [1], Seite 107-13.
- Burnley, M.; Doust, J. H.; Ball, D. und Jones, A. M. (2002): Effects of prior heavy exercise on VO₂ kinetics during heavy exercise are related to changes in muscle activity, *J Appl Physiol* 93 [1], Seite 167-74.
- Burnley, M.; Doust, J. H. und Jones, A. M. (2002): Effects of prior heavy exercise, prior sprint exercise and passive warming on oxygen uptake kinetics during heavy exercise in humans, *Eur J Appl Physiol* 87 [4-5], Seite 424-32.
- Chatagnon, M. und Busso, T. (2006): Modelling of aerobic and anaerobic energy production during exhaustive exercise on a cycle ergometer, *Eur J Appl Physiol* 97 [6], Seite 755-60.
- Chatagnon, M.; Pouilly, J. P.; Thomas, V. und Busso, T. (2005): Comparison between maximal power in the power-endurance relationship and maximal instantaneous power, *Eur J Appl Physiol* 94 [5-6], Seite 711-7.
- Coast, J. R. und Welch, H. G. (1985): Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 53 [4], Seite 339-42.
- Craig, N. P.; Norton, K. I.; Bourdon, P. C.; Woolford, S. M.; Stanef, T.; Squires, B.; Olds, T. S.; Conyers, R. A. und Walsh, C. B. (1993): Aerobic and anaerobic indices contributing to track endurance cycling performance, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 67 [2], Seite 150-8.
- Craig, N. P.; Norton, K. I.; Conyers, R. A.; Woolford, S. M.; Bourdon, P. C.; Stanef, T. und Walsh, C. B. (1995): Influence of test duration and event specificity on maximal accumulated oxygen deficit of high performance track cyclists, *Int J Sports Med* 16 [8], Seite 534-40.

- Doherty, M. und Smith, P. M. (2001): The reliability of cycling maximal accumulated oxygen deficit (MAOD) and time to exhaustion (T(lim)) in untrained subjects, *Med Sci Sports Exerc* 33 [10], Seite 1794-5.
- Doherty, M.; Smith, P. M. und Schroder, K. (2000): Reproducibility of the maximum accumulated oxygen deficit and run time to exhaustion during short-distance running, *J Sports Sci* 18 [5], Seite 331-8.
- Dost, FH (1968): Grundlagen der Pharmakokinetik Seite 29-62, Thieme, Stuttgart.
- Friedmann, B.; Frese, F.; Menold, E. und Bartsch, P. (2007): Effects of acute moderate hypoxia on anaerobic capacity in endurance-trained runners, *Eur J Appl Physiol* 101 [1], Seite 67-73.
- Friedmann, B.; Siebold, R. und Bärtsch, P. (1996): Vergleich der anaeroben Leistungsfähigkeit von 400 m- und Langstreckenläufern unter Anwendung unterschiedlicher Meßmethoden, *Dtsch Z Sportmed* 47, Seite 379-390.
- Gaesser, G. A. und Brooks, G. A. (1975): Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate, *J Appl Physiol* 38 [6], Seite 1132-9.
- Gastin, P. B. (2001): Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise, *Sports Med* 31 [10], Seite 725-41.
- Gastin, P. B. und Lawson, D. L. (1994): Influence of training status on maximal accumulated oxygen deficit during all-out cycle exercise, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 69 [4], Seite 321-30.
- Geigy, J. R. (1982): Wissenschaftliche Tabellen Geigy. Somatometrie, Biochemie 8, Ciba-Geigy AG, Basel.
- Grassi, B. (2000): Skeletal muscle VO₂ on-kinetics: set by O₂ delivery or by O₂ utilization? New insights into an old issue, *Med Sci Sports Exerc* 32 [1], Seite 108-16.
- Grassi, B.; Pogliaghi, S.; Rampichini, S.; Quaresima, V.; Ferrari, M.; Marconi, C. und Cerretelli, P. (2003): Muscle oxygenation and pulmonary gas exchange kinetics during cycling exercise on-transitions in humans, *J Appl Physiol* 95 [1], Seite 149-58.
- Green, S. und Dawson, B. T. (1995): The oxygen uptake-power regression in cyclists and untrained men: implications for the accumulated oxygen deficit, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 70 [4], Seite 351-9.
- Green, S. und Dawson, B. T. (1996): Methodological effects on the VO₂-power regression and the accumulated O₂ deficit, *Med Sci Sports Exerc* 28 [3], Seite 392-7.

- Green, S.; Dawson, B. T.; Goodman, C. und Carey, M. F. (1994): Y-intercept of the maximal work-duration relationship and anaerobic capacity in cyclists, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 69 [6], Seite 550-6.
- Green, S.; Dawson, B. T.; Goodman, C. und Carey, M. F. (1996): Anaerobic ATP production and accumulated O₂ deficit in cyclists, *Med Sci Sports Exerc* 28 [3], Seite 315-21.
- Grzegorski, O. (2001): Energiestoffwechsel und biomechanischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Belastungsintensität bei Fahrradergometrie, Institut für Sportwissenschaft, Universität Potsdam Potsdam
- Hagberg, J. M.; Mullin, J. P. und Nagle, F. J. (1978): Oxygen consumption during constant-load exercise, *J Appl Physiol* 45 [3], Seite 381-4.
- Harris, R. C.; Edwards, R. H.; Hultman, E.; Nordesjo, L. O.; Nylin, B. und Sahlin, K. (1976): The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man, *Pflugers Arch* 367 [2], Seite 137-42.
- Heck, H. (1990): Energiestoffwechsel und medizinische Leistungsdiagnostik, Hofmann, Schorndorf, ISBN: 3778080814.
- Heck, H. und Schulz, H. (2002): Methoden der anaeroben Leistungsdiagnostik, *Dtsch Z Sportmed* 53 [7+8], Seite 202-212.
- Henson, L. C.; Poole, D. C. und Whipp, B. J. (1989): Fitness as a determinant of oxygen uptake response to constant-load exercise, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 59 [1-2], Seite 21-8.
- Hill, D. W. (1996): Determination of accumulated O₂ deficit in exhaustive short-duration exercise, *Can J Appl Physiol* 21 [1], Seite 63-74.
- Hill, D. W.; Davey, K. M. und Stevens, E. C. (2002): Maximal accumulated O₂ deficit in running and cycling, *Can J Appl Physiol* 27 [5], Seite 463-78.
- Hollmann, W. und Hettinger, T. (2000): Sportmedizin, Grundlagen für Arbeit, Training und Präventivmedizin, 4. Auflage, Schattauer Verlag,, Stuttgart, ISBN: 3-7945-1672-9.
- Inbar, O. und Bar-Or, O. (1986): Anaerobic characteristics in male children and adolescents, *Med Sci Sports Exerc* 18 [3], Seite 264-9.
- Inbar, O.; Bar-Or, O. und J., Skinner. (1996): The Wingate Anaerobic Test, *Human Kinetics*, Champaign, ISBN: 0873229460.

- Jacobs, I.; Bar-Or, O.; Karlsson, J.; Dotan, R.; Tesch, P.; Kaiser, P. und Inbar, O. (1982): Changes in muscle metabolites in females with 30-s exhaustive exercise, *Med Sci Sports Exerc* 14 [6], Seite 457-60.
- Jacobs, I.; Tesch, P. A.; Bar-Or, O.; Karlsson, J. und Dotan, R. (1983): Lactate in human skeletal muscle after 10 and 30 s of supramaximal exercise, *J Appl Physiol* 55 [2], Seite 365-7.
- Janssen, I.; Heymsfield, S. B.; Wang, Z. M. und Ross, R. (2000): Skeletal muscle mass and distribution in 468 men and women aged 18-88 yr, *J Appl Physiol* 89 [1], Seite 81-8.
- Karlsson, J. (1971): Lactate and phosphagen concentrations in working muscle of man with special reference to oxygen deficit at the onset of work, *Acta Physiol Scand Suppl* 358, Seite 1-72.
- Knuttgen, H. G. (1970): Oxygen debt after submaximal physical exercise, *J Appl Physiol* 29 [5], Seite 651-7.
- Koppo, K. und Bouckaert, J. (2001): The effect of prior high-intensity cycling exercise on the VO₂ kinetics during high-intensity cycling exercise is situated at the additional slow component, *Int J Sports Med* 22 [1], Seite 21-6.
- Laurent, C. M., Jr.; Meyers, M. C.; Robinson, C. A. und Green, J. M. (2007): Cross-validation of the 20- versus 30-s Wingate anaerobic test, *Eur J Appl Physiol* 100 [6], Seite 645-51.
- Lohmann, K. (1935): Konstitution der Adenylpyrophosphorsäure und der Adenosindiphosphorsäure, *Biochem Z* 282, Seite 120-23.
- Lopez Calbet, J. A.; Navarro, M. A.; Barbany, J. R.; Garcia Manso, J.; Bonnin, M. R. und Valero, J. (1993): Salivary steroid changes and physical performance in highly trained cyclists, *Int J Sports Med* 14 [3], Seite 111-7.
- Mader, A. und Heck, H. (1986): A theory of the metabolic origin of "anaerobic threshold", *Int J Sports Med* 7 Suppl 1, Seite 45-65.
- Mader, A.; Heck, H.; Föhrenbach, R. und Hollmann, W. (1979): Das statische und dynamische Verhalten des Laktats und des Säure-Basen-Status im Bereich niedriger bis maximaler Azidosen bei 400-m- und 800-m-Läufern bei beiden Geschlechtern nach Belastungsabbruch, *Dtsch Z Sportmed* 30 [7+8], Seite 249-261.

- Mahler, M. (1985): First-order kinetics of muscle oxygen consumption, and an equivalent proportionality between $\dot{V}O_2$ and phosphorylcreatine level. Implications for the control of respiration, *J Gen Physiol* 86 [1], Seite 135-65.
- Mandroukas, K. (1990): Some effects of knee angle and foot placement in bicycle ergometer, *J Sports Med Phys Fitness* 30 [2], Seite 155-9.
- Margaria, R. ; Edwards, H.T. und Dill, D.B. (1933): The possible mechanisms of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction, *Am J Physiol* 106, Seite 689–715.
- Maxwell, N. S. und Nimmo, M. A. (1996): Anaerobic capacity: a maximal anaerobic running test versus the maximal accumulated oxygen deficit, *Can J Appl Physiol* 21 [1], Seite 35-47.
- McMahon, S. und Jenkins, D. (2002): Factors affecting the rate of phosphocreatine re-synthesis following intense exercise, *Sports Med* 32 [12], Seite 761-84.
- Medbø, J. I. (1996): Is the maximal accumulated oxygen deficit an adequate measure of the anaerobic capacity?, *Can J Appl Physiol* 21 [5], Seite 370-83; 384-8.
- Medbø, J. I.; Mohn, A. C.; Tabata, I.; Bahr, R.; Vaage, O. und Sejersted, O. M. (1988): Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O_2 deficit, *J Appl Physiol* 64 [1], Seite 50-60.
- Medbø, J. I. und Tabata, I. (1989): Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise, *J Appl Physiol* 67 [5], Seite 1881-6.
- Medbø, J. I. und Tabata, I. (1993): Anaerobic energy release in working muscle during 30 s to 3 min of exhausting bicycling, *J Appl Physiol* 75 [4], Seite 1654-60.
- Meyer, T. und Kindermann, W. (1990): Maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2max}$), *Dtsch Z Sportmed* 50 [9], Seite 285-286
- Mezzani, A.; Corra, U.; Andriani, C.; Giordano, A.; Colombo, R. und Giannuzzi, P. (2008): Anaerobic and aerobic relative contribution to total energy release during supramaximal effort in patients with left ventricular dysfunction, *J Appl Physiol* 104 [1], Seite 97-102.
- Mezzani, A.; Corra, U.; Sassi, B.; Colombo, R.; Giordano, A. und Giannuzzi, P. (2006): Maximal accumulated oxygen deficit in patients with chronic heart failure, *Med Sci Sports Exerc* 38 [3], Seite 424-32.

- Minahan, C.; Chia, M. und Inbar, O. (2007): Does power indicate capacity? 30-s Wingate anaerobic test vs. maximal accumulated O₂ deficit, *Int J Sports Med* 28 [10], Seite 836-43.
- Minahan, C. und Wood, C. (2008): Strength training improves supramaximal cycling but not anaerobic capacity, *Eur J Appl Physiol* 102 [6], Seite 659-66.
- Moore, A. und Murphy, A. (2003): Development of an anaerobic capacity test for field sport athletes, *J Sci Med Sport* 6 [3], Seite 275-84.
- Moseley, L. und Jeukendrup, A. E. (2001): The reliability of cycling efficiency, *Med Sci Sports Exerc* 33 [4], Seite 621-7.
- Mourot, L.; Hintzy, F.; Messonnier, L.; Zameziati, K. und Belli, A. (2004): Supra-maximal cycling efficiency assessed in humans by using a new protocol, *Eur J Appl Physiol* 93 [3], Seite 325-32.
- Naughton, G. A.; Carlson, J. S.; Buttifant, D. C.; Selig, S. E.; Meldrum, K.; McKenna, M. J. und Snow, R. J. (1997): Accumulated oxygen deficit measurements during and after high-intensity exercise in trained male and female adolescents, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 76 [6], Seite 525-31.
- Nevill, A. M.; Jones, D. A.; McIntyre, D.; Bogdanis, G. C. und Nevill, M. E. (1997): A model for phosphocreatine resynthesis, *J Appl Physiol* 82 [1], Seite 329-35.
- Newcomer, B. R.; Boska, M. D. und Hetherington, H. P. (1999): Non-P(i) buffer capacity and initial phosphocreatine breakdown and resynthesis kinetics of human gastrocnemius/soleus muscle groups using 0.5 s time-resolved (31)P MRS at 4.1 T, *NMR Biomed* 12 [8], Seite 545-51.
- Olesen, H. L. (1992): Accumulated oxygen deficit increases with inclination of uphill running, *J Appl Physiol* 73 [3], Seite 1130-4.
- Olesen, H. L.; Raabo, E.; Bangsbø, J. und Secher, N. H. (1994): Maximal oxygen deficit of sprint and middle distance runners, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 69 [2], Seite 140-6.
- Perez-Gomez, J.; Rodriguez, G. V.; Ara, I.; Olmedillas, H.; Chavarren, J.; Gonzalez-Henriquez, J. J.; Dorado, C. und Calbet, J. A. (2008): Role of muscle mass on sprint performance: gender differences?, *Eur J Appl Physiol* 102 [6], Seite 685-94.
- Pizza, F. X.; Naglieri, T. A.; Holtz, R. W.; Mitchell, J. B.; Starling, R. D.; Phillips, M. D.; Cavender, D. L. und Braun, W. A. (1996): Maximal accumulated oxygen deficit of resistance-trained men, *Can J Appl Physiol* 21 [5], Seite 391-402.

- Poole, D. C.; Barstow, T. J.; McDonough, P. und Jones, A. M. (2008): Control of oxygen uptake during exercise, *Med Sci Sports Exerc* 40 [3], Seite 462-74.
- Poole, D. C. und Richardson, R. S. (1997): Determinants of oxygen uptake. Implications for exercise testing, *Sports Med* 24 [5], Seite 308-20.
- Pouilly, J. P. und Busso, T. (2008): Accumulated oxygen deficit during ramp exercise, *Int J Sports Med* 29 [1], Seite 16-20.
- Prampero, P. E. di und Ferretti, G. (1999): The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts, *Respir Physiol* 118 [2-3], Seite 103-15.
- Prampero, P. E. di; Meyer, M.; Cerretelli, P. und Piiper, J. (1981): Energy sources and mechanical efficiency of anaerobic work in dog gastrocnemius, *Pflugers Arch* 389 [3], Seite 257-62.
- Prampero, P. E. di; Peeters, L. und Margaria, R. (1973): Alactic O₂ debt and lactic acid production after exhausting exercise in man, *J Appl Physiol* 34 [5], Seite 628-32.
- Ramsbottom, R.; Nevill, M. E.; Nevill, A. M. und Hazeldine, R. (1997): Accumulated oxygen deficit and shuttle run performance in physically active men and women, *J Sports Sci* 15 [2], Seite 207-14.
- Reis, V. M.; Duarte, J. A.; Espirito-Santo, J. und Russell, A. P. (2004): Determination of accumulated oxygen deficit during a 400m run, *J Exerc Physiol online* 7 [2], Seite 77-83.
- Russell, AP.; Rossignol, P.; Snow, R. und Lo, S. (2002): Improving the precision of the accumulated oxygen deficit using VO₂-power regression points from below and above the lactate threshold, *J Exerc Physiol online* 5 [1], Seite 23-31.
- Saltin, B. (1990): Anaerobic capacity: past, present and prospective, Taylor, A.W.; Gollnick, P.D.; Green, H.J.; C.D., Ianuzzo.; Noble, E.G.; Metivier, G. und Sutton, J., *Biochemistry of Exercise VII* Seite 387-412, Human Kinetics, London.
- Sapega, A. A.; Sokolow, D. P.; Graham, T. J. und Chance, B. (1993): Phosphorus nuclear magnetic resonance: a non-invasive technique for the study of muscle bioenergetics during exercise, *Med Sci Sports Exerc* 25 [6], Seite 656-66.
- Scheuermann, B. W.; Hoelting, B. D.; Noble, M. L. und Barstow, T. J. (2001): The slow component of O₂ uptake is not accompanied by changes in muscle EMG during repeated bouts of heavy exercise in humans, *J Physiol* 531 [1], Seite 245-56.

- Scott, C. B.; Roby, F. B.; Lohman, T. G. und Bunt, J. C. (1991): The maximally accumulated oxygen deficit as an indicator of anaerobic capacity, *Med Sci Sports Exerc* 23 [5], Seite 618-24.
- Serresse, O.; Lortie, G.; Bouchard, C. und Boulay, M. R. (1988): Estimation of the contribution of the various energy systems during maximal work of short duration, *Int J Sports Med* 9 [6], Seite 456-60.
- Smith, J. C. und Hill, D. W. (1991): Contribution of energy systems during a Wingate power test, *Br J Sports Med* 25 [4], Seite 196-9.
- Souissi, N.; Bessot, N.; Chamari, K.; Gauthier, A.; Sesboue, B. und Davenne, D. (2007): Effect of time of day on aerobic contribution to the 30-s Wingate test performance, *Chronobiol Int* 24 [4], Seite 739-48.
- Stegemann, J. (1991): *Leistungsphysiologie. Physiologische Grundlagen der Arbeit und des Sports* 4, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Strobel, G.; Friedmann, B.; Siebold, R. und Bartsch, P. (1999): Effect of severe exercise on plasma catecholamines in differently trained athletes, *Med Sci Sports Exerc* 31 [4], Seite 560-5.
- Taylor, D. J.; Bore, P. J.; Styles, P.; Gadian, D. G. und Radda, G. K. (1983): Bioenergetics of intact human muscle. A ³¹P nuclear magnetic resonance study, *Mol Biol Med* 1 [1], Seite 77-94.
- Truijens, M. J.; Toussaint, H. M.; Dow, J. und Levine, B. D. (2003): Effect of high-intensity hypoxic training on sea-level swimming performances, *J Appl Physiol* 94 [2], Seite 733-43.
- Ulmer, H. V. (1996): Concept of an extracellular regulation of muscular metabolic rate during heavy exercise in humans by psychophysiological feedback, *Experientia* 52 [5], Seite 416-20.
- van Brussel, M.; Lelieveld, O. T.; van der Net, J.; Engelbert, R. H.; Helders, P. J. und Takken, T. (2007): Aerobic and anaerobic exercise capacity in children with juvenile idiopathic arthritis, *Arthritis Rheum* 57 [6], Seite 891-7.
- van Ingen Schenau, G. J. und Cavanagh, P. R. (1990): Power equations in endurance sports, *J Biomech* 23 [9], Seite 865-81.
- Weber, C. L. und Schneider, D. A. (2000): Maximal accumulated oxygen deficit expressed relative to the active muscle mass for cycling in untrained male and female subjects, *Eur J Appl Physiol* 82 [4], Seite 255-61.

- Weber, C. L. und Schneider, D. A. (2001): Reliability of MAOD measured at 110% and 120% of peak oxygen uptake for cycling, *Med Sci Sports Exerc* 33 [6], Seite 1056-9.
- Weber, C. L. und Schneider, D. A. (2002): Increases in maximal accumulated oxygen deficit after high-intensity interval training are not gender dependent, *J Appl Physiol* 92 [5], Seite 1795-801.
- Weyand, P. G.; Cureton, K. J.; Conley, D. S.; Sloniger, M. A. und Liu, Y. L. (1994): Peak oxygen deficit predicts sprint and middle-distance track performance, *Med Sci Sports Exerc* 26 [9], Seite 1174-80.
- Whipp, B. J. (1994): The slow component of O₂ uptake kinetics during heavy exercise, *Med Sci Sports Exerc* 26 [11], Seite 1319-26.
- Whipp, B. J. (2007): Physiological mechanisms dissociating pulmonary CO₂ and O₂ exchange dynamics during exercise in humans, *Exp Physiol* 92 [2], Seite 347-55.
- Whipp, B. J. und Wasserman, K. (1972): Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work, *J Appl Physiol* 33 [3], Seite 351-6.
- Xu, F. und Rhodes, E. C. (1999): Oxygen uptake kinetics during exercise, *Sports Med* 27 [5], Seite 313-27.
- Zanconato, S.; Cooper, D. M. und Armon, Y. (1991): Oxygen cost and oxygen uptake dynamics and recovery with 1 min of exercise in children and adults, *J Appl Physiol* 71 [3], Seite 993-8.
- Zoladz, J. A.; Duda, K. und Majerczak, J. (1998): Oxygen uptake does not increase linearly at high power outputs during incremental exercise test in humans, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 77 [5], Seite 445-51.
- Zoladz, J. A. und Korzeniewski, B. (2001): Physiological background of the change point in VO₂ and the slow component of oxygen uptake kinetics, *J Physiol Pharmacol* 52 [2], Seite 167-84.
- Zoladz, J. A.; Rademaker, A. C. und Sargeant, A. J. (1995): Non-linear relationship between O₂ uptake and power output at high intensities of exercise in humans, *J Physiol* 488 (Pt 1), Seite 211-7.
- Zoladz, J. A.; Szkutnik, Z.; Majerczak, J. und Duda, K. (1998): Detection of the change point in oxygen uptake during an incremental exercise test using recursive residuals: relationship to the plasma lactate accumulation and blood acid base balance, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 78 [4], Seite 369-77.

Zoladz, J. A.; Szkutnik, Z.; Majerczak, J.; Duda, K. und Pedersen, P. K. (2007): Non-linear relationship between oxygen uptake and power output in the Astrand nomogram-old data revisited, J Physiol Pharmacol 58 [2], Seite 265-73.

7 Danksagung

Prof. D. Böning als ehemaligen Leiter des Instituts für Sportmedizin danke ich für die freundlich gewährte Unterstützung.

Herrn Prof. R. Beneke danke ich herzlich für Vergabe des Themas und die jederzeit gewährte Unterstützung und Betreuung. Dank gilt auch Frau Dr. M. Leithäuser, die mich bei der Vorbereitung, der Durchführung und der Auswertung der Testreihe unterstützte und zum Gelingen des Projekts beitrug.

Oliver Grzegorski gilt Dank für die gemeinsame Konzeption und Durchführung sämtlicher Versuche sowie für die gute Zusammenarbeit bei der Auswertung der Daten.

Weiterhin möchte ich mich bei den medizinisch-technischen Angestellten des Instituts für Sportmedizin, Frau Himmelsbach-Wegner, Frau Nadol und Frau Woweries, herzlich für die freundliche Unterstützung bedanken.

Mein besonderer Dank gilt natürlich den zuverlässigen und leidensfähigen Probanden und den Freunden sowie der Familie, die immer mit Rat und Tat zur Seite standen.

8 Lebenslauf

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

9 Selbständigkeitserklärung

„Ich, Masen Dirk Jumah, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: *Analyse und Vergleich von Methoden zur Bestimmung der anaeroben Kapazität und Leistungsfähigkeit bei Freizeitsportlern auf dem Fahrradergometer* selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Berlin, Datum.....

Unterschrift.....

10 Publikationsliste des Doktoranden

Erstautor

- 1) Jumah M, Fleiner F, Wendt S, Pavel M, Schwabe M, Göktas Ö (2009): Gering differenziertes neuroendokrines Larynxkarzinom: Diagnostische Besonderheiten, Therapiestrategie und Prognose. HNO 57 [2], Seite 135-141.
- 2) Jumah M, Schlachta M, Prilipp E, Sedlmaier B (2008): Kontinuierliche Trommelfellimpedanzmessung unter veränderlichem Umgebungsdruck bei Patienten mit Tubenfunktionsstörungen. 52. Österreichischer HNO Kongress, Graz.
- 3) Jumah M, Schlachta M, Pomorzev A, Sedlmaier B (2008): Messung der Funktion der Tuba eustachii in der Druckkammer. 79. Jahrestagung der HNO-Ärzte, Bonn.
- 4) Jumah M, Flügel W, Adler D (2005): Primäres kleinzelliges Larynxkarzinom mit mediastinaler LK-Metastase bei einem 33 jährigen Mann. 76. Jahrestagung der HNO-Ärzte, Erfurt.

Zweitautor

- 1) Fleiner F, Jumah M, Göktas Ö. Squamous cell carcinoma of the external ear channel (2009): Indian Journal of Otolaryngology and Head & Neck Surgery, in Publikation.
- 2) Loch A, Hillebrandt J, Birnbaum J, Jumah M, Fietze I, Hölzl M (2008): Einfluss der Nasentamponade auf die Veränderung des Apnoe-Hypopnoe Index (AHI) nach operativen Eingriffen in Narkose bei Patienten mit obstruktivem Schlaf-Apnoe Syndrom (OSAS). 79. Jahrestagung der HNO-Ärzte, Bonn.
- 3) **Beneke R, Jumah M, Leithauser R (2007): Modelling the lactate response to short-term all out exercise. Dynamic Medicine, 6:10. (Originalarbeit)**
- 4) **Beneke R, Jumah M, Leithauser R (2005): 4-parameter Model To Analyse The Blood Lactate Response To Short-term All-out Exercise. Med Sci Sports Exerc 37 [5]. (Kongressbeitrag)**
- 5) Fröschl U, Jumah M, Adler D. (2003): Akute Entzündung in Narben und Tätowierung bei okkulten Sarkoidose. 74. Jahrestagung der HNO-Ärzte in Dresden.