

Aus der Medizinischen Universitätsklinik und Poliklinik Tübingen

Abteilung Sportmedizin

Ärztlicher Direktor: Professor Dr. H.-H. Dickhuth

**Untersuchungen zur Pufferkapazität
und anaeroben Kapazität auf
dem Laufbandergometer**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin der Medizinischen Fakultät der
Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

Nicole Ploog
aus Ruit

2003

Dekan: Professor Dr. Claus D. Claussen

1. Berichterstatter: Professor Dr. H.-H. Dickhuth

2. Berichterstatter: Professor Dr. H. Northoff

*In den Wissenschaften ist viel Gewisses,
sobald man sich von den Ausnahmen
nicht irremachen lässt und die
Probleme zu ehren weiss.*

Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832)

INHALTSVERZEICHNIS

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	<i>I</i>
<i>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</i>	<i>VI</i>
<i>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</i>	<i>X</i>
1 <i>Einleitung</i>	1
1.1 Leistungsdiagnostik	1
1.2 Aerobe Leistungsdiagnostik	2
1.2.1 Begriff der maximalen Sauerstoffaufnahme	3
1.2.2 Bestimmung der Dauerleistungsgrenze	4
1.3 Anaerobe Diagnostik	6
1.3.1 Begriff der Pufferkapazität.....	7
1.3.2 Begriff der anaeroben Kapazität	8
1.3.3 Verfahren zur Bestimmung der anaeroben Kapazität	9
1.4 Problemstellung	10
1.5 Ziele der Arbeit	11
1.6 Aufbau der Arbeit	12

2	Methodik.....	15
2.1	Probanden.....	15
2.2	Methoden.....	16
2.2.1	Ablauf.....	16
2.2.2	VO _{2 max} -Test.....	19
2.2.3	Mehrstufentest	21
2.2.4	Maximalsprinttest.....	22
2.2.5	Sprinttestserie	23
2.3	Laktatleistungsdiagnostische Parameter	25
2.3.1	Messgrößen aus dem Kapillarblut	25
2.3.2	Verlauf der blutchemischen Messgrößen unter stufenweise ansteigender Belastung (Mehrstufentest).....	25
2.3.3	Herzfrequenzmessung	26
2.4	Spirometrie	26
2.4.1	Atemvolumen bei Belastung (VE).....	26
2.4.2	Messung der Atemgaskonzentration.....	27
2.4.3	Funktionsweise des Massenspektrometers	27
2.4.4	Breath-by-Breath-Methode	27
2.4.5	Messsystem.....	28
2.4.6	Atemgasparameter	28
2.4.6.1	Primäre Parameter (gemessen).....	29

2.4.6.2	<i>Sekundäre Parameter (berechnet)</i>	29
2.4.7	Verlauf der Atemgasparameter bei steigender Belastung	29
2.4.7.1	<i>Verlauf der Atmung</i>	29
2.5	Modus der Auswertung	31
2.5.1	Minimalinvasive und nichtinvasive Messdaten.....	31
2.5.2	Spirometrische Messdaten	32
2.5.3	Berechnung der Pufferkapazität.....	33
2.5.4	Berechnung der anaeroben Kapazität	34
2.6	Statistik	36
3	<i>Ergebnisse</i>	37
3.1	Ergebnisse des VO_2 max-Test	37
3.1.1	Nichtinvasiv bestimmte Messgrößen.....	37
3.1.2	Ergebnisse der Spirometrie	38
3.2	Schnelligkeitstest	40
3.3	Mehrstufentest	42
3.3.1	Ergebnisse der Laktatdiagnostik	42
3.3.2	Ergebnisse der nicht invasiv bestimmten Messgrößen.....	46
3.3.2.1	<i>Laufgeschwindigkeit</i>	46
3.3.2.2	<i>Herzfrequenzbestimmung</i>	49
3.3.3	Ergebnisse der Spirometrie	51

3.3.3.1	<i>Relative Sauerstoffaufnahme</i>	51
3.3.3.2	<i>Bestimmung des respiratorischen Kompensationspunktes (RCP)</i>	53
3.3.3.3	<i>Korrelation zwischen der individuell anaeroben Schwelle (IAS) und dem respiratorischen Kompensationspunkt (RCP)</i>	54
3.4	Ergebnisse der Sprintserie	57
3.4.1	Ergebnisse der Berechnung der anaeroben Kapazität	57
3.5	Vergleich der relativen Pufferkapazität mit der anaeroben Kapazität	58
4	Diskussion	62
4.1	Allgemeine Anmerkungen zur anaeroben Leistungsdiagnostik	62
4.2	Anaerobe Testverfahren	63
4.2.1	Diagnostik der alaktaziden Kapazität	63
4.2.1.1	<i>Sprinttest über 3x60 m nach Hellwig et al. (1988)</i>	63
4.2.1.2	<i>Laufbandtest über 40 s nach Schnabel und Kindermann (1983)</i>	64
4.2.1.3	<i>Verfahren nach Jeschke et al. (1997)</i>	64
4.2.2	Diagnostik der laktaziden Kapazität	64
4.2.2.1	<i>Laufband-Ausbelastungstest nach Schnabel und Kindermann (1983)</i>	65
4.2.3	Diagnostik der alaktaziden und laktaziden Kapazität.....	65

4.2.3.1	<i>Kombinationstest nach Jeschke et al. (1997)</i>	65
4.3	Anmerkung zur Methodik	67
4.3.1	Anmerkung zum Schnelligkeitstest.....	68
4.3.2	Anmerkung zum Mehrstufentest und $VO_{2\max}$ -Test	69
4.4	Ergebnisse der anaeroben Kapazität	69
4.5	Allgemeine Anmerkung zur Pufferkapazität	72
4.6	Bestimmung der Pufferkapazität	73
4.7	Anmerkung zur Bestimmung der Pufferkapazität	74
4.8	Ergebnisse der Pufferkapazität	75
4.9	Ein Vergleich von anaerober Kapazität und Pufferkapazität	76
4.10	Schlussfolgerungen	78
5	<i>Zusammenfassung</i>	79
	<i>LITERATUR</i>	<i>XII</i>
	<i>ANHANG</i>	<i>XIX</i>
1.1	Tabellen	XIX
1.2	Studienprotokolle	XXIX

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Aufbau der Arbeit	14
Abb. 2: $VO_{2\max}$ -Test. Exemplarisches Beispiel für den Verlauf der Sauerstoffaufnahme eines Probanden. Hervorgehoben ist die $VO_{2\max}$ am < levelling off > Phänomen.	19
Abb. 3: Untersuchungsablauf des $VO_{2\max}$ -Tests	20
Abb. 4: Untersuchungsablauf des Mehrstufentests	22
Abb. 5: Sicherheitsvorkehrung auf dem Laufband	24
Abb. 6: Bestimmung der aeroben Schwelle (LT) und der individuellen an- aeroben Schwelle	32
Abb. 7: Beispielhafte Darstellung für die Bestimmung der Pufferkapazität (relFP). Die relFP berechnet sich als Differenz der Laufge- schwindigkeit an LT und RCP in Prozent der Laufge- schwindigkeit am RCP.....	34
Abb. 8: Beispiel für die Berechnung der anaeroben Kapazität (Y-Schnittpunkt der Regressionsgeraden aus geleisteter Arbeit zur Laufzeit)	35
Abb. 9: $VO_{2\max}$ -Test. Mittelwerte und Standardabweichung der $relVO_{2\max}$ (ml/min/kg) der Gruppen AT, AeT und UT.	39

Abb. 10: $VO_{2\max}$ -Test. Mittelwerte und Standardabweichung der Geschwindigkeit (km/h) beim Erreichen der $VO_{2\max}$ der Gruppen AT, AeT und UT.....	40
Abb. 11: Schnelligkeitstest. Mittelwerte und Standardabweichung der Maximalgeschwindigkeiten in km/h der Gruppen AT, AeT und UT...41	
Abb. 12: Mehrstufentest. Mittelwerte der leistungsdiagnostischen Parameter von AT, AeT und UT.	45
Abb. 13: Mehrstufentest. Mittelwert und Standardabweichung des Laktatanstiegs von der aeroben Schwelle (LT) zum respiratorischen Kompensationspunkt (RCP).....	45
Abb. 14: Mehrstufentest. Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeiten an der aeroben Schwelle (LT) der Gruppen AT, AeT und UT.	48
Abb. 15: Mehrstufentest. Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeiten an der individuellen anaeroben Schwelle (IAS) der Gruppen AT, AeT und UT.	48
Abb. 16: Mehrstufentest. Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeiten bei Ausbelastung (V_{\max}) der Gruppen AT, AeT und UT.....	49
Abb. 17: Mehrstufentest. Mittelwerte und Standardabweichung der $relVO_{2\max}$ der Gruppen AT, AeT und UT.....	52

Abb. 18: Mehrstufentest. Mittelwerte und Standardabweichung der Geschwindigkeit an der VO_{2max} der Gruppen AT, AeT und UT.....	53
Abb. 19: Lineare Korrelation der Geschwindigkeiten in km/h an der IAS und der Geschwindigkeit in km/h am RCP für das Gesamtkollektiv (n = 30). Die Linie entspricht der Regressionsgeraden. Das 95 % Konfidenzintervall liegt zwischen 0,45 und 0,94.....	55
Abb. 20: Mittelwert und Standardabweichung der relativen Pufferkapazität der Gruppen AT, AeT und UT.	56
Abb. 21: Sprintserie. Mittelwert und Standardabweichung der anaeroben Kapazität der Gruppen AT, AeT und UT.	58
Abb. 22: Lineare Korrelation zwischen relativer funktioneller Pufferkapazität (relFP) und anaerober Kapazität (AC) für das Gesamtkollektiv (n = 30). Die Linie entspricht der Regressionsgeraden. Das 95 % Konfidenzintervall liegt zwischen 0,85 und 0,96.....	59
Abb. 23: Lineare Korrelation zwischen relativer funktioneller Pufferkapazität (relFP) und anaerober Kapazität (AC) für das Kollektiv AT (n = 10). Die Linie entspricht der Regressionsgeraden. Das 95 % Konfidenzintervall liegt zwischen 0,01 und 0,89.....	60

-
- Abb. 24: Lineare Korrelation zwischen relativer funktioneller Pufferkapazität (relFP) und anaerober Kapazität (AC) für das Kollektiv AeT (n = 10). Die Linie entspricht der Regressionsgeraden. Das 95 % Konfidenzintervall liegt zwischen 0,26 und 0,94.....60
- Abb. 25: Lineare Korrelation zwischen relativer funktioneller Pufferkapazität (relFP) und anaerober Kapazität (AC) für das Kollektiv UT (n = 10). Die Linie entspricht der Regressionsgeraden. Das 95 % Konfidenzintervall liegt zwischen 0,43 und 0,96.61

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

- AC anaerobe Kapazität
- AeT aerob trainierte Langstreckenläufer
- AT anaerob trainierte Langstreckenläufer
- ATP Adenosintriphosphat
- CO₂ Kohlenstoffdioxid
- ETCO₂ endexpiratorische CO₂-Konzentration
- ETO₂ endexpiratorischer Sauerstoffgehalt
- ET endexpiratorische Gaskonzentration
- EQCO₂ Atemäquivalent für Kohlendioxid
- EQO₂ Atemäquivalent für Sauerstoff
- FRC funktionellen Residualkapazität
- HF Herzfrequenz
- HMV Herzminutenvolumen
- H₂O Wasser
- HZV Herzzeitvolumen
- IAS individuelle anaerobe Schwelle
- KrP Kreatinphosphat
- LT aerobe Schwelle
- n Anzahl
- n.s. nicht signifikant

-
- O₂ Sauerstoff
 - p Irrtumswahrscheinlichkeit
 - Pa*I/s Einheit für Druck
 - PC Computer
 - pCO₂ transkutaner arterieller Kohlenstoffdioxidwert im Blut
 - pH-Wert negative dekadische Logarithmus der Wasserstoff-
ionenkonzentration
 - r Korrelationskoeffizient
 - RCP respiratorischer Kompensationspunkt
 - relFP relative funktionelle Pufferkapazität
 - relVO_{2max} relative maximale Sauerstoffaufnahme / KG
 - RQ respiratorischer Quotient
 - t Formelabkürzung für Zeit
 - UT Kollektiv der untrainierten Probanden
 - V Abkürzung für die Geschwindigkeitsformel
 - VE Atemminutenvolumen in ml/min
 - VCO₂ Kohlendioxidabgabe in ml/min
 - VO_{2max} maximalen Sauerstoffaufnahme in ml/min
 - v.s. versus
 - VT funktionelles Lungenvolumen
 - w Formelabkürzung für Arbeit

1 Einleitung

1.1 Leistungsdiagnostik

Seit Jahren werden sportmedizinische Untersuchungsverfahren zur Überprüfung der Gesundheit, zur Leistungsdiagnose und zur Steuerung der Belastung im Trainings- oder Rehabilitationsprozess eingesetzt. Die Untersuchung umfasst vor allem die Beurteilung des Stütz- und Bewegungsapparates und die Kontrolle des kardiopulmonalen Systems.

Zu Beginn wird der allgemeine Gesundheitsstatus festgestellt, danach erfolgt eine ergometrische Untersuchung, die zur Leistungsbeurteilung herangezogen werden kann.

Das Prinzip der Ergometrie hat sich in den letzten Jahren vielfach bewährt, da dem Sportler eine definierte Leistung unter standardisierten Bedingungen meist mit ansteigender Belastung abverlangt wird, um sein eigenes Leistungsvermögen bestimmen zu können. Während und nach der Belastung können Funktionsparameter gemessen werden, die objektive und vergleichbare Aussagen über den momentanen Leistungsstand erlauben. Als beurteilungsfähige Funktionsparameter werden vor allem die physikalische Leistung, der Stoffwechselmetabolismus, die Herzfrequenzregulation und die Atemgasanalyse herangezogen.

Um aussagefähige Ergebnisse zu bekommen, sollte eine sportartspezifische Belastungsform, wie zum Beispiel die Fahrradergometrie, die Laufbandergometrie oder die Ruderergometrie, herangezogen werden. Bei sportartunspezifischen Untersuchungen ist dagegen nur eine geringe Aussagekraft gegeben. So kann eine fahradergometrische Untersuchung von Schwimmern beispielsweise nur eine Aussage über den konditionellen Zustand der Athleten widerspiegeln, nicht aber die Leistungsfähigkeit in ihrer spezifischen Sportart.

Solche Untersuchungen lassen sich besser als so genannte Feldtests durchführen, wie zum Beispiel bei Skilangläufern auf der Skiloipe. Ein Nachteil von Feldtests ist die nicht immer exakte Standardisierungsmöglichkeit der Untersuchungsbedingungen, wodurch die Aussagekraft eingeschränkt sein kann.

Ein weiterer Aspekt der Leistungsdiagnostik ist die Möglichkeit, in die Trainingssteuerung einzugreifen und gezielte Vorgaben zur Verbesserung von Trainingsprozessen machen zu können. Hierbei wird nicht nur die Leistung bestimmt, sondern es werden auch Funktionsparameter wie Herzfrequenz, Laktatkonzentration oder auch respiratorische Parameter herangezogen, um somit die Intensitäten von Trainingsprozessen zu überwachen. Dies gilt inzwischen nicht nur für den Leistungssport, sondern immer mehr auch für den Rehabilitations- und Präventionssport.

Im folgenden Abschnitt werden die Methoden der Leistungsdiagnostik im Einzelnen vorgestellt.

1.2 Aerobe Leistungsdiagnostik

Die Diagnostik der aeroben Leistungsfähigkeit -maximale Sauerstoffaufnahme pro Zeiteinheit- wird vor allem in Ausdauersportarten ohne standardisierte Wettkampfstrecken, wie Radfahren, Triathlon oder Straßenlauf, angewendet. Als Belastungsschema in der aeroben Leistungsdiagnostik haben sich Mehrstufentests bewährt, da sich das Verhältnis von Aufwand und Informationsgewinn in einer vertretbaren Relation befindet. Als Messparameter werden in der Routine neben der Leistung die Blutlaktatkonzentration, die Herzfrequenz, spirometrische Messgrößen und das subjektive Belastungsempfinden erfasst (Kindermann, 1985).

Für eine gute Ausdauerleistungsfähigkeit ist besonders die Fähigkeit der aeroben Energiegewinnung wichtig. So werden bei Ausdauerwettbewerben ab ½ h Dauer 90 bis 95 % der Leistung aerob erbracht. Diese Leistungsfähigkeit wird vorwiegend, aber nicht nur durch die aerobe Kapazität (maximale Sauerstoffaufnahme pro Zeiteinheit) bestimmt und ist deshalb vor allem im angloamerikanischen Bereich eine häufig verwendete Messgröße (Foster, 1983 und Howley et al., 1995). Sie kann durch einen Belastungstest bestimmt werden, der kontinuierlich von einer niedrigen zur einer maximalen Intensität ansteigt. Allerdings spielt die Schnelligkeit mit der die Belastung gesteigert wird, eine Rolle. Üblicherweise werden Belastungszeiten zwischen 10 bis 20 min mit rampenartigen Belastungsprotokollen und Stufenzeiten zwischen 3 bis 5 min gewählt; Stufenhöhe und Stufendauer werden allerdings vielfach variiert, oft durch kleine Modifikationen des Untersuchungsziels bedingt. Eine einheitliche Festlegung gibt es weder für die zu messenden Größen noch deren Bewertung. Deshalb werden im folgenden die Grundparameter und deren Beurteilung dargestellt.

1.2.1 Begriff der maximalen Sauerstoffaufnahme

Die maximale Sauerstoffaufnahme ist die Menge an Sauerstoff, die maximal bei schwerer körperlicher Arbeit aufgenommen werden kann. Sie gilt als Bruttokriterium kardio-pulmonaler–metabolischer Kapazität, da sie die Mechanismen erfasst, die an der Erbringung der Leistung beteiligt sind. Dazu gehören die äußere Atmung, der Gasaustausch in der Lunge, das Herzzeitvolumen (HZV), der O₂-Transport im Blut, die belastungsgerechte Verteilung des HZV (einschließlich kollateraler Vasokonstriktion) sowie die O₂-Aufnahme in die Arbeitsmuskulatur (kurze Diffusionswege, metabolische Kapazität) (Lentner, 1990). Einige dieser Teilbereiche können durch Training verändert werden (z. B. HZV, metabolische Leistung der Muskulatur), andere sind nicht oder kaum beeinflussbar (Gasaustausch). So weisen

Ausdauersportler, wie Langstreckenläufer, Radfahrer oder Triathleten, eine höhere maximale Sauerstoffaufnahme auf als Untrainierte (Weber und Janicki, 1986).

Für die Ableitung der Trainingsempfehlung ist jedoch zu beachten, dass validierte submaximale Schwellenwerte zumeist exaktere Angaben liefern, als die Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme.

Die VO_{2max} wird in Litern pro Minute angegeben. Ein Bezug auf die Körpermasse ist jedoch für Vergleiche zwischen verschiedenen Personen sinnvoll, weil einsetzbare Muskelmasse, Herzgröße und Blutvolumen sich in Abhängigkeit vom Körpergewicht unterscheiden.

Hochausdauertrainierte Läufer erzielen maximale Sauerstoffaufnahmewerte von bis zu 90 ml pro min x kg. Die höchsten Absolutwerte werden bei Radfahrern und Ruderern mit etwa 6 l pro min gemessen (Meyer, Kindermann;1999).

1.2.2 Bestimmung der Dauerleistungsgrenze

Mit modernen Methoden kann die Gaskonzentration von O_2 und CO_2 eines jeden Atemzuges analysiert werden (breath by breath). Dieses hat die Auswertung stark beeinflusst. Nicht zuletzt dadurch ist die Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme als bisher wichtigster Parameter zurückgedrängt worden, da die Gaskinetik auf submaximalen Belastungsstufen für die Beurteilung der aeroben Dauerleistungsfähigkeit von größerer Bedeutung zu sein scheint (Beaver et al., 1986 und Wassermann et al., 1973). So kommt es bei ansteigender Belastung ab einer bestimmten, individuellen Belastungsintensität, die als oxidative Kapazität (AT) bezeichnet wird, zu einer zunehmenden Inanspruchnahme der anaeroben Energiebereitstellung mit Zunahme der Laktatazidose und Abfall des pH-Wertes. Dieses führt zur vermehrten Stimulierung der Atmung mit Abfall der endexpiratorischen CO_2 -Konzentration. Dieser Bereich kann deshalb über die Messgrößen Ventilation

(VE) oder endexpiratorische CO₂-Konzentration (ETCO₂) bestimmt werden und wird als respiratorischer Kompensationspunkt (RCP) bezeichnet (Wassermann et al., 1973). Der RCP charakterisiert eine submaximale Belastungsintensität, die im Bereich der Langzeitausdauer (Ausdauerleistungsgrenze) und damit in der gleichen Größenordnung wie die durch Laktat bestimmte anaerobe Schwelle liegt (Coyle, 1995 und Dickhuth et al., 1998 und Hagberg, 1984). Die so bestimmte Dauerleistungsgrenze zeigt zwar eine enge Korrelation zur maximalen O₂-Aufnahme pro kg und damit zur aeroben Kapazität, berücksichtigt aber auch mögliche Kompensationsmechanismen und Einflussgrößen wie die Pufferkapazität, den Laktatmetabolismus und die hormonell vegetative Reaktion (Kindermann et al., 1977; Whipp et al., 1989). Zwischen der Dauerleistungsgrenze und der Wettkampfleistung besteht deshalb in Langzeitausdauersportarten eine engere Beziehung als zur maximalen Sauerstoffaufnahmefähigkeit (Dickhuth et al., 1998).

Im Wesentlichen wird in der Routinediagnostik aber die Laktatbestimmung eingesetzt. Dazu beigetragen hat die leichte und reproduzierbare Bestimmbarkeit im kapillar-arteriellen Blut (Fingerbeere, Ohrläppchen). Eine Basislaktatkonzentration ist immer im Blut und Serum vorhanden, sie schwankt um 1 mmol/l. Bei der ansteigenden ergometrischen Belastung kommt es beim Übergang von der überwiegend aeroben zur anaeroben Energiebereitstellung zu einem Anstieg der Laktatproduktion und -konzentration zunächst im Muskel und durch rasche Diffusion auch im Blut. Dieser erste Anstieg über die normale Basalkonzentration wird auch als aerobe Schwelle (LT) bezeichnet, da ab dieser Belastungsintensität die anaerobe Energiebereitstellung erkennbar zunimmt. Bei dieser Belastungsintensität fällt der pH-Wert rasch ab. Für eine gewisse Spanne ist dieser Bereich noch durch eine vollständige respiratorische Kompensation gekennzeichnet (Hagberg, 1984; Röcker et al., 1994; Whipp et al., 1989). Die maximal kompensierte Intensität wird aber bei einem weiteren Anstieg der Belastungsintensität bei einer individuellen Laktatkonzentration überschritten. Dieser Bereich wird deshalb als individuelle anaerobe Schwelle

bezeichnet (IAS) (Stegmann et al., 1981; Keul et al., 1979). Die IAS zeigt eine sehr enge Beziehung zum respiratorisch bestimmten RCP, ist mit diesem aber nicht identisch (Dickhuth et al., 1998).

1.3 Anaerobe Diagnostik

In den letzten Jahren hat sich in der Routinediagnostik vor allem die oben beschriebene aerobe Leistungsdiagnostik etabliert. Das Problem, das sich daraus ergibt, ist die mangelnde Spezifität der Leistungsfähigkeit für Athleten in Kurzzeitbelastungssportarten mit einer Belastungsdauer von 30 Sekunden bis 3 Minuten, da hier der anaerobe Stoffwechselmechanismus eine entscheidende Rolle für den Wettkampferfolg spielt (Green et al., 1994, Bulbulian et al., 1986, Roberts et al., 1982). Neben der Depotkapazität an Kreatinphosphat und ATP scheint die Verfügbarkeit der anaeroben Glykolyse hochintensive Belastungen zu limitieren (Mader et al., 1976), wobei diese letztlich durch die zunehmende Belastungsazidose begrenzt wird (McNaughton, 1992).

Die objektive Erfassung der anaeroben Kapazität konnte bisher auf dem Laufband kaum verwirklicht werden. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass die Erfassung der anaeroben Kapazität wegen der hohen Belastungsintensitäten sehr viel aufwendiger und problematischer ist als die der aeroben Leistungsfähigkeit. Die in der Vergangenheit entwickelten Testverfahren bezogen sich vielmehr auf Fahrradergometer oder sportartspezifische Feldtestuntersuchungen (Gaesser, Wilson, 1988; Green, 1995).

Zur Quantifizierung der anaeroben Kapazität wird in dieser Studie ein Verfahren angewendet, das an das von Monod und Scherrer erstmals beschriebene Critical-Power-Concept angelehnt ist (Monod und Scherrer, 1965). Bei intensiven dynamischen Fahrradergometerbelastungen wurde dieses Konzept von einer Vielzahl von Autoren mehrfach angewendet (Whipp et al., 1982;

Jenkins et al., 1993; Nebelsick–Gullett et al., 1988; Gaesser et al., 1995). Im Gegensatz dazu konnten Untersuchungen auf dem Laufbandergometer, die sich mit der spezifischen Belastungsform Laufen auseinandersetzen, auf Grund technischer Schwierigkeiten bislang nur eingeschränkt durchgeführt werden.

Ein wesentlicher Punkt, der das Verfahren bestimmt, ist die Testdauer, die nicht über 50 Sekunden liegen sollte, da sonst der aerobe Stoffwechselanteil entscheidenden Einfluss auf die Gesamtleistung hat, was einer Mischbeanspruchung von aerober und anaerober Kapazität entspricht (Bangsbo et al., 1990; Green, 1995).

1.3.1 Begriff der Pufferkapazität

Der Parameter, der zum Vergleich der anaeroben Kapazität dient, ist die Pufferkapazität. Belastungen in Kurz- und Mitteldistanzsportarten sind durch das Auftreten einer deutlichen metabolischen Belastungsazidose gekennzeichnet. Die Verfügbarkeit der anaeroben Glykolyse bestimmt das Ausmaß einer hochintensiven Belastung. Durch die Belastungsazidose wird die Glykolyse gehemmt, so dass die Belastungsazidose als leistungslimitierender Faktor angesehen werden kann.

Die Pufferung kompensiert die bei Belastung auftretende metabolische Azidose. Durch Proteine, wie Hämoglobin, Histidin und Carnosin, Bicarbonationen und Phosphationen wird der pH-Abfall bei Belastung verzögert (McKenzie et al., 1982). Der Anstieg der Laktatkonzentration im Blutserum ohne adäquaten pH-Abfall ist bei steigender Belastungsintensität ein erstes Zeichen einer erfolgten Pufferung, die vorerst intrazellulär und unabhängig vom Serumbicarbonat über < Nicht–Carbonat > erfolgt.

Über die Reaktion von Bicarbonat und Wasserstoffionen entsteht Kohlensäure, aus der wiederum CO_2 und H_2O entstehen können. Durch diese Gleichung entsteht vermehrt Kohlenstoffdioxid CO_2 , das einen Anstieg des respiratorischen Quotienten bewirkt und den Beginn der Pufferung durch

Bicarbonat anzeigt. Man spricht in diesem Zusammenhang vom nicht-metabolischen Kohlendioxid (Wassermann, McIlroy; 1964). Mit dem markanten Beginn des Anstiegs des respiratorischen Quotienten ($V\text{CO}_2 / V\text{O}_2$) wird der Beginn des Puffervorgangs durch Bicarbonat direkt erfasst (Wassermann, 1987; Hirakoba et al., 1992).

Die Parameter der Ventilation sind mit der Stoffwechselsituation eng verbunden. Die Chemosensoren der Karotisgabel und der Aorta sind sensitiv für pH und den Sauerstoffpartialdruck. Ein Anstieg der Laktatkonzentration im Blutserum bewirkt jedoch erst nach einiger Zeit eine zusätzliche Stimulation der Ventilation, die sich in einem überlinearen Mehranstieg des Minutenvolumens darstellt. Dieses Einsetzen der respiratorischen Kompensation markiert den endgültigen Übergang der Pufferphase in die Belastungsazidose (Whipp und Ward, 1980).

1.3.2 Begriff der anaeroben Kapazität

In der Literatur wird der Begriff der anaeroben Kapazität unterschiedlich interpretiert. Heck (1998) definiert den Begriff Kapazität des muskulären Energiestoffwechsels als die Summe aller Arbeitsbeträge, die aus chemisch gespeicherter Energie gewonnen werden können. Entsprechend lässt sich die Leistungsfähigkeit als Summe maximaler Umsatzraten (Arbeitsbeträge/ Zeit) der einzelnen Energie liefernden Systeme definieren. Unter Energieliefernden Systemen werden die anaerob-laktaziden und die anaeroben-laktaziden und die aeroben Energiestoffwechselformen verstanden. Sie ermöglichen die ATP-Resynthese und sind damit für die erbringbare Muskelarbeit die entscheidende Größe.

Die anaerobe Energiebereitstellung wird danach unterschieden, ob sie mit oder ohne Milchsäurebildung vonstatten geht (Astrand, Rodahl; 1977).

- Anaerob–alaktazide Energiebereitstellung: Energie wird durch die Aufspaltung energiereicher Phosphate (ATP, KrP) ohne Beteiligung von Sauerstoff und Bildung von Laktat gewonnen
- Anaerobe–laktazide Energiebereitstellung: Energie wird durch die Glykolyse (Glykogen oder Glukose) ohne Beteiligung von Sauerstoff und unter Bildung von Milchsäure gewonnen

1.3.3 Verfahren zur Bestimmung der anaeroben Kapazität

Die Erfassung der anaeroben Leistungsfähigkeit ist sehr viel aufwendiger und problematischer als die der aeroben Leistungsfähigkeit (Heck et al., 1998 und Jeschke et al., 1997). Im Prinzip muss die Belastung deutlich über der maximalen Sauerstoffaufnahme gewählt werden, was deren Kenntnis voraussetzt. Für diese kurzen und meist schnellen Belastungen muss ein hochwertiges Laufband mit hohem Sicherheitsaufwand zur Verfügung stehen, leichter werden Fahrradergometer oder Ruderergometer verwendet.

Die erbringbare Leistung pro Zeit kann als anaerobe (laktazide und alaktazide) Arbeitskapazität gewertet werden. Dieses Verfahren lehnt sich an eine Methode an, die von Monod und Scherrer entwickelt wurde. Sie stellten in ihrem Verfahren eine hyperbolische Beziehung zwischen Leistung und Abbruchzeit her. Diese Beziehung wurde von Monod und Scherrer sowie Whipp et al. auf zwei verschiedenen Wegen linearisiert. Nach beiden Verfahren ergibt das Auftragen von Arbeit (kJ) über Abbruchzeit (t) und auch Leistung (w) über 1/t Geraden:

$$W = \frac{v \times \text{kg} \times (2,11 + S \times 0,25) + 2,2 \times \text{kg} - 151}{10,5 \times 1000} \times t \quad (\text{Gleichung 1})$$

Der Arbeitsbetrag $t = 0$, entsprechend dem Schnittpunkt auf der Geraden mit der Y–Achse, wird als anaerobe Kapazität interpretiert (Green et al., 1994; Green, 1995; Vandewalle et al., 1997).

Eine systematische Vereinheitlichung dieser Testform besteht derzeit nicht. Herzfrequenz- aber auch Laktatmessungen spielen bei dieser Testform keine wesentliche Rolle, da sie bei dieser kurzen und hohen Intensität keine linearen und reproduzierbaren Beziehungen zur anaeroben Kapazität aufweisen.

1.4 Problemstellung

In den vergangenen Jahren wurde eine Fülle von Testverfahren zur Bestimmung der anaeroben Kapazität entwickelt. Diese werden in der anschließenden Diskussion beispielhaft vorgestellt. Im Unterschied zur Bestimmung der aeroben Kapazität ist eine objektive Beurteilung der anaeroben Kapazität bisher nicht ohne Einschränkung möglich. Die Probleme der bisherigen Verfahren werden in Kapitel 1.3.3 dargestellt.

Die Definition und die genaue Bestimmung von submaximalen Belastungen stellt ein Hindernis in der Standardisierung der Leistungsdiagnostik dar.

Ein weiteres Problem ist der Mangel an Sicherheitsmaßnahmen in vielen Untersuchungszentren. Oftmals sind die Laufbänder nicht für die hohen kurzen Belastungen aus Sicherheitsgründen nicht geeignet. Bisher waren außerdem viele Versuchstage notwendig, um die anaerobe Kapazität eines Probanden bestimmen zu können, was auf Dauer für die Routinediagnostik zu Zeit- und Kosten-intensiv wäre.

In der vorliegenden Studie wurde ein Verfahren entwickelt, das eine Anwendung in der Trainingssteuerung von Kurzstanz- und Mitteldistanzathleten findet, so dass die hierdurch gewonnene Kenntnis der anaeroben Kapazität entscheidend zur Wettkampfvorbereitung und Leistungsverbesserung eingesetzt werden kann. Außerdem wurde geprüft, ob zwischen weiteren anaeroben Parametern, wie zum Beispiel der Pufferkapazität und der anaeroben Kapazität sowie der maximalen Laufgeschwindigkeit der

Athleten ein Zusammenhang besteht, um in der weiteren Routinediagnostik das Messverfahren vereinfachen zu können.

Aus dieser Tatsache leiten sich die folgenden Untersuchungsziele ab.

1.5 Ziele der Arbeit

Im Mittelpunkt der Arbeit steht die Entwicklung eines anaeroben Testverfahrens zur Bestimmung der anaeroben Kapazität, welches lauf- und vor allem sprintspezifisch ist. Das Verfahren ist an die Methode von Monod und Scherrer angelehnt.

Teilfragestellungen:

- Ist die Aussage dieses Verfahrens mit Verfahren zur Bestimmung der Pufferkapazität vergleichbar?
- Sind die aus der Literatur verwendeten Werte zur Festlegung einer submaximalen Belastung bei diesem Verfahren anwendbar?
- Sind die Sicherheitsvorkehrungen des Laufbands ausreichend und in der Routine praktikabel anwendbar?
- Überprüfung der Verwendbarkeit des Verfahrens unter Bildung von drei Kollektiven (Gruppe 1: Untrainierte, Gruppe 2: Aerob-trainierte Ausdauersportler, Gruppe 3: Anaerob-trainierte Sprinter), die sich bezüglich ihrer spezifischen Belastungsanpassung unterscheiden.
- Bewertung der Messdaten unter folgender Fragestellung:
 1. Differenziert das Testverfahren die anaerobe Kapazität der unterschiedlich angepassten Kollektive?
 2. Differenziert das Verfahren die anaerobe Kapazität plausibel innerhalb eines Kollektivs?
 3. Differenziert das Testverfahren die Pufferkapazität plausibel der unterschiedlich angepassten Kollektive?

4. Lässt sich ein standardisierter anaerober Laufbandtest ableiten, der in der Routinediagnostik eingeführt werden kann?
5. Ist ein entsprechender Einsatz zum Beispiel im Talentsichtungsbereich möglich?
6. Lässt sich die Kenntnis der anaeroben Kapazität sinnvoll in Trainingsplanung und Steuerung einbauen?

1.6 Aufbau der Arbeit

Dieser Arbeit liegt das von Monod und Scherrer formulierte Verfahren zu Grunde, welches in Kapitel 1.3.3 vorgestellt wurde. Es handelt sich bei diesem Verfahren um die allgemeine Bestimmung von anaerober Kapazität. In der vorliegenden Arbeit soll eine Versuchsreihe entwickelt werden, die sich an die Theorie von Monod und Scherrer anlehnt, die aber spezifische Aussagen der Leistungsfähigkeit von Kurz- und Mitteldistanzathleten besonders im Hinblick auf Laufsport macht.

In Kapitel 1.5 sind die genauen Zielsetzungen festgelegt, die überprüft werden sollen.

Im Einführungskapitel wurden zunächst bisher entwickelte Verfahren und der genaue Einsatz von leistungsdiagnostischen Verfahren erläutert. Des Weiteren wurden Parameter beschrieben, die messbar und standardisiert reproduzierbar sind, wie zum Beispiel die in Kapitel 1.1.2 beschriebene maximale Sauerstoffaufnahme.

Im zweiten Kapitel werden der Aufbau der Versuchsreihe, die technischen Hilfsmittel und die mathematischen und statistischen Verfahren vorgestellt, die für die Versuchsdurchführung und die Auswertung benötigt werden.

In Kapitel 2.4.7 wird der Verlauf der Atemgasparameter bei Belastung beschrieben, um die spirometrische Messmethodik zu verdeutlichen.

Die erhaltenen Werte werden im dritten Kapitel in Tabellenform und teilweise in Schaubildern dargestellt und im jeweiligen Text beschrieben.

Da die Messung der anaeroben Kapazität das zentrale Thema der Arbeit darstellt, werden im vierten Kapitel schon bestehende Versuchsreihen exemplarisch erläutert und die Vor- und Nachteile gegenüber gestellt.

Im Folgenden werden Probleme und Fehlerquellen der hier verwendeten Messmethoden diskutiert und die erhaltenen Messwerte den Verfahren gegen übergestellt und bewertet.

In Kapitel 4.10 werden die wesentlichen Schlussfolgerungen gezogen und im folgenden fünften Kapitel die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und auf einen weiteren Forschungsbedarf hingewiesen.

Im Folgenden werden die einzelnen Bausteine der Arbeit graphisch in Abbildung 1 dargestellt.

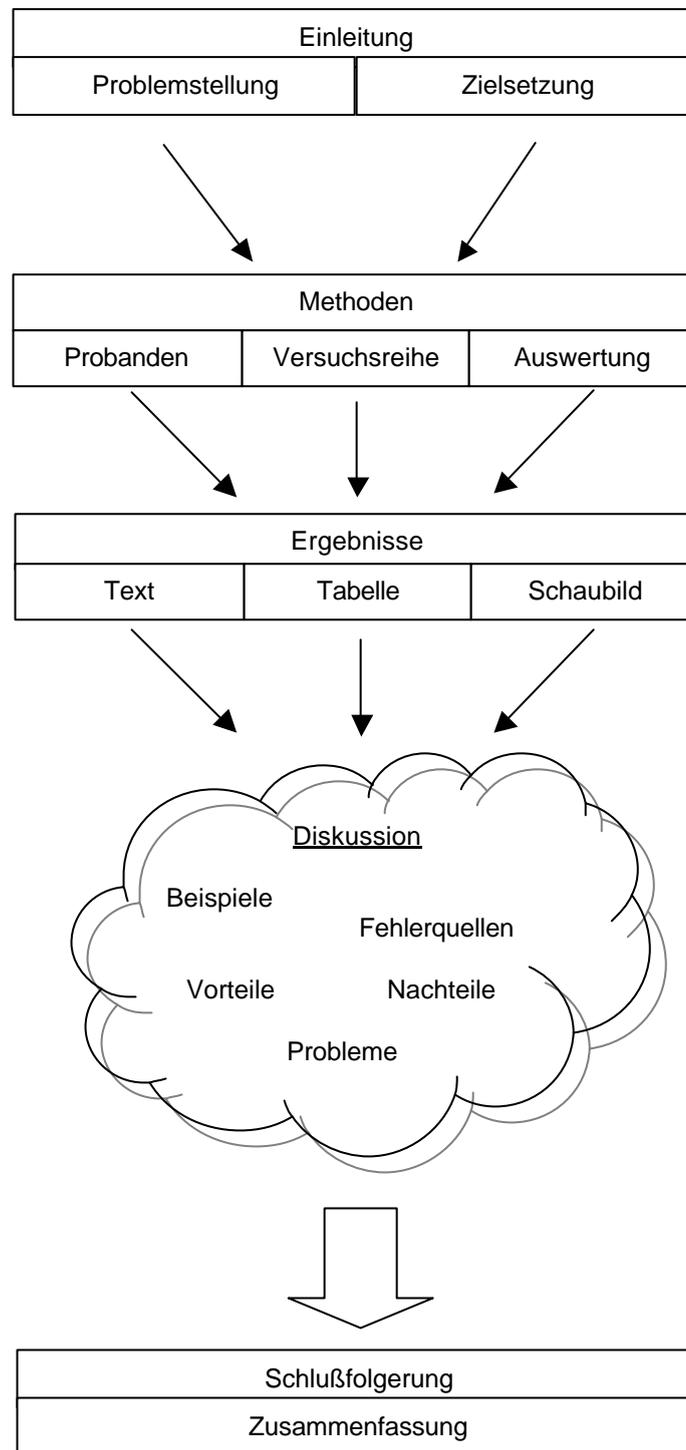


Abb. 1: Aufbau der Arbeit

2 Methodik

2.1 Probanden

Es wurden drei verschiedene Gruppen von Probanden im Alter von 18 bis 35 Jahren untersucht. Jede Gruppe bestand dabei aus 10 Athleten, die über das Untersuchungsziel aufgeklärt wurden und ihr Einverständnis zur Teilnahme gaben.

Eine erste Gruppe (AeT, n=10) bestand aus trainierten Langstreckenläufern, die seit mindestens vier Jahren ein aerobes Lauftraining mit einem Trainingsumfang von 50 bis 100 km pro Woche absolvierten, aber kein intensives Tempotraining durchführten.

Die zweite Gruppe (UT, n=10) bildeten Studenten, die freizeitorientiert Sport trieben und die kein spezielles Ausdauertraining durchführten. In der dritten Gruppe (AT, n = 10) wurden anaerob-trainierte Sprinter zusammengefasst, die 100 m bis 400 m als Wettkampfdisziplin trainierten. Die Bestzeiten im Mittel bei 100 m betragen 11,08 s ($\pm 0,25$), bei 200 m waren es 22,18 s ($\pm 0,61$) und bei 400 m 49,14 s ($\pm 1,21$). Diese Athleten trainierten vor allem im anaeroben Bereich, d. h. ihr Trainingsplan enthielt ein intensives Tempotraining, Kraft- und Schnelligkeitsarbeit und nur einen geringen Anteil an aerobem Ausdauertraining. In Tabelle 1 sind die anthropometrischen Daten aufgeführt.

Tab. 1: Anthropometrische Daten der untersuchten Probanden. AT (Sprinter), AeT (Langstreckenläufer), UT (Kontrollgruppe).

	AT	AeT	UT
Anzahl (n)	10	10	10
Alter (Jahre)	23 ± 5,2	30,5 ± 4,1	23 ± 3,9
Gewicht (kg)	75,9 ± 7,4	71,7 ± 5,8	75,2 ± 7,2
Größe (cm)	182,9 ± 5,12	177,5 ± 3,62	180,5 ± 3,83

2.2 Methoden

2.2.1 Ablauf

Die Untersuchungsreihe bestand aus mehreren Versuchstagen mit unterschiedlichen Belastungsmethoden. Der Ablauf wird im Folgenden näher beschrieben und in tabellarischer Form (Tabelle 2) dargestellt. Die Sportler wurden zunächst umfassend über die Testreihe aufgeklärt und gaben schriftlich ihr Einverständnis zur Versuchsteilnahme. Danach absolvierten sie am ersten Versuchstag zwei unterschiedliche aerobe leistungsdiagnostische Tests auf dem Laufbandergometer (HP Cosmos, Saturn, Traunstein, D). Zwischen den beiden Untersuchungen hatten die Athleten 60 min Pause.

An einem zweiten Untersuchungstag wurde ein Maximalgeschwindigkeitstest durchgeführt. Hierbei musste jeder Proband mit maximaler Geschwindigkeit 15 m auf einer Tartanbahn laufen. Der Anlauf betrug ca. 15 m. Es wurden jeweils drei Versuche mit jeweils 5 min Pause zwischen den Läufen durchgeführt und am Ende wurde der schnellste Lauf der drei Versuche gewertet.

Der letzte Untersuchungsteil bestand aus der Maximalsprintserie. Die Gesamtzahl der Belastungen ergab sich aus dem individuellen Leistungsvermögen beim Schnelligkeitstest. Es wurden aber höchstens zwei bis drei Belastungen pro Tag mit jeweils 60 min Pause zwischen den einzelnen Belastungen durchgeführt. Die erste Belastung errechnete sich aus der Geschwindigkeit bei maximaler Sauerstoffaufnahme im Rampentest zuzüglich 2 km/h. Die folgenden Belastungen wurden immer um 2 km/h gesteigert. Als Grenze für die letzte Belastung diente der Wert, den die Athleten im Schnelligkeitstest erzielten.

Die Anzahl der Belastungen hing von der maximalen Laufgeschwindigkeit und VO_{2max} ab. Einige Athleten benötigten daher einen weiteren Untersuchungstag, da maximal drei Belastungen pro Tag durchgeführt wurden, um leistungsmindernde Faktoren, wie z. B. Erschöpfung, auszuschließen.

Tab. 2: Darstellung des Untersuchungsablaufs

1. Untersuchungstag: Spiroergometrische Untersuchung

1. Rampentest
60 min Pause
 2. Mehrstufentest
-
-

2. Untersuchungstag: Maximalgeschwindigkeitstest

1. Sprinttest
5 min Pause
 2. Sprinttest
5 min Pause
 3. Sprinttest
-
-

3. Untersuchungstag: Sprintserie

1. Belastung
60 min Pause
2. Belastung
60 min Pause
3. Belastung

eventuell 4. Untersuchungstag

2.2.2 $VO_{2\max}$ -Test

Zuerst wurde eine Laufbandergometrie mit stufenweise ansteigender Belastung durchgeführt. Es wurde mit 4 km/h begonnen und nach 30 s um 2 km/h gesteigert, nach weiteren 30 s wurde wiederum um 2 km/h gesteigert etc. Die Steigung des Laufbandes betrug hierbei 1,5 %. Die Belastungsgrenze war die subjektive Erschöpfung, die der Proband per Handzeichen anzeigte.

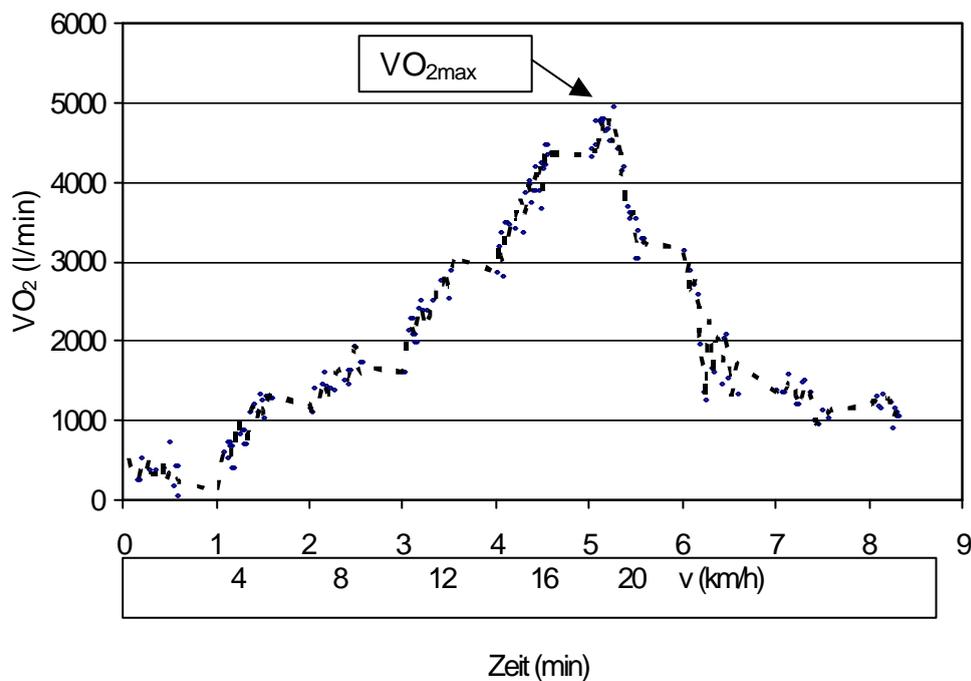


Abb. 2: $VO_{2\max}$ -Test: Exemplarisches Beispiel für den Verlauf der Sauerstoffaufnahme eines Probanden. Hervorgehoben ist die $VO_{2\max}$ am < levelling off > Phänomen.

Direkt vor und während der Belastung wurde die maximale Sauerstoffaufnahme ($VO_{2\max}$) mit Hilfe eines Spirometers online gemessen. Als Maß für die maximale Sauerstoffaufnahme wurde das sogenannte < levelling off >

Phänomen angenommen ($VO_2 \text{ max}$) (Fairshter et al., 1983). Dies entspricht der gemessenen VO_2 beim Erreichen eines Plateauwertes (siehe Abbildung 2).

Die kapillare Laktatbestimmung aus Ohrläppchenblut erfolgte jeweils direkt vor sowie im Anschluß an die Belastung. Des Weiteren wurden in gleichen Zeitintervallen die Pulswerte mit einem Polar-Pulsmessgerät bestimmt.

Zur besseren Verdeutlichung der Testreihe ist der Ablauf in Abbildung 3 graphisch dargestellt.

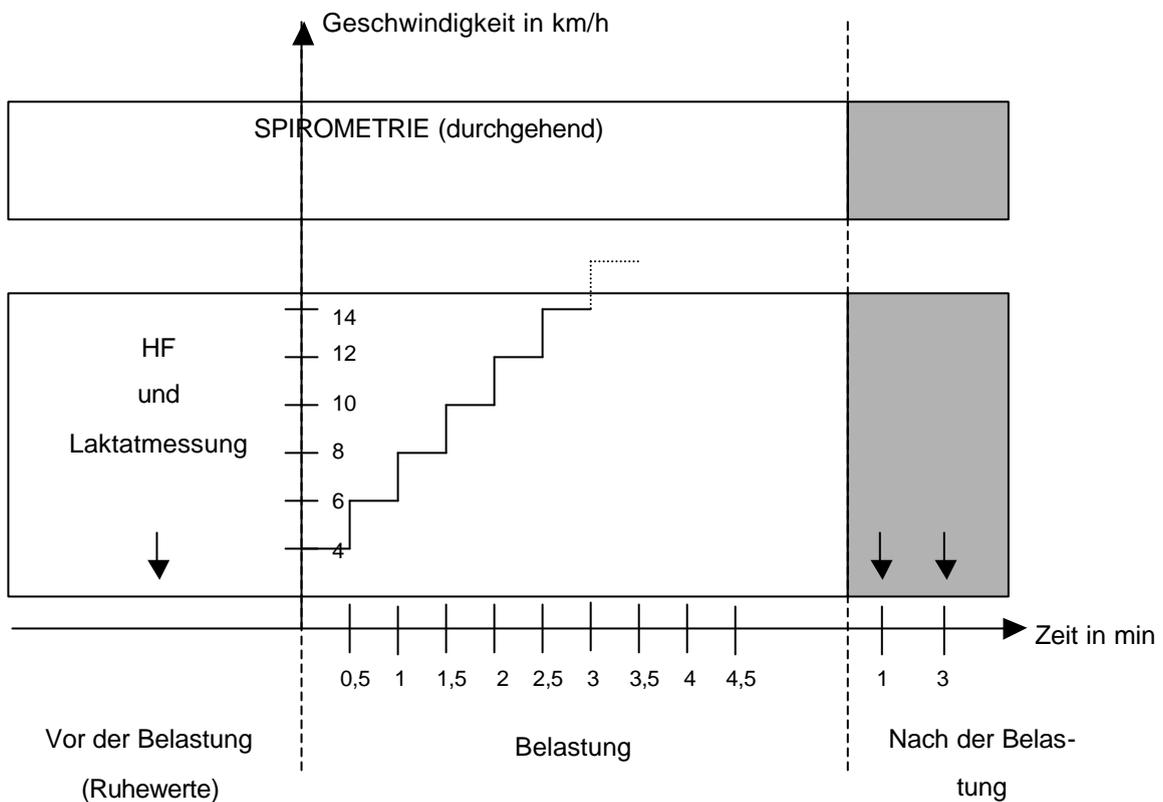


Abb. 3 : Untersuchungsablauf des $VO_2 \text{ max}$ -Test

2.2.3 Mehrstufentest

Beim Mehrstufentest handelt es sich ebenfalls um einen stufenförmig gesteigerten Belastungstest auf dem Laufbandergometer. Begonnen wurde mit einer Geschwindigkeit von 6 km/h, Steigerung alle 3 min um 2 km/h, bis zur subjektiven Ausbelastung des Probanden, die Laufbandsteigung betrug 1,5%.

Zwischen den einzelnen Stufen lag jeweils eine Pause von 60 s. Während dieser Pause, d. h. jeweils alle 3 min sowie vor und nach der Belastung, erfolgte die Kapillarblutentnahme zur Laktatbestimmung und die Pulsfrequenzmessung.

Während und nach der gesamten Testphase wurde die Ventilation mittels eines Spiroergometers online aufgezeichnet. Beurteilungsparameter waren die Geschwindigkeit an der anaeroben Schwelle, die Geschwindigkeit an der aeroben Schwelle (LT), an der individuellen anaeroben Schwelle (IAS) und am respiratorischen Kompensationspunkt (RCP) sowie die Geschwindigkeit bei VO_{2max} (siehe Abbildung 4).

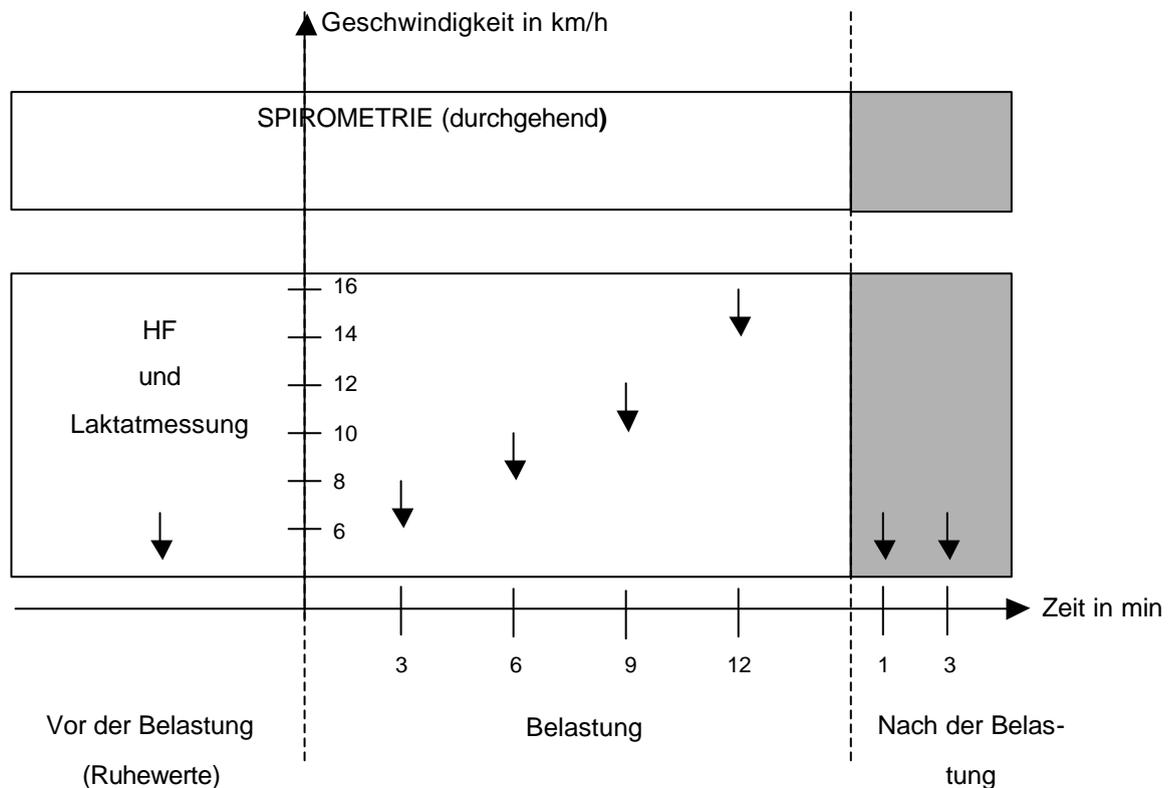


Abb.4: Untersuchungsablauf des Mehrstufentests

2.2.4 Maximalsprinttest

Am zweiten Versuchstag wurde die maximale Laufgeschwindigkeit der Athleten bestimmt. Hierbei wurde ein *15 m-Fliegend-Test*, abgewandelt nach Grosser eund Starischka (1986), durchgeführt. Die Athleten sprinteten nach einer 15 m langen Anlaufphase 15 m mit maximaler Geschwindigkeit auf einer Tartanbahn. Der Start nach der Anlaufphase erfolgte somit fliegend. Die Geschwindigkeit wurde mit Hilfe einer elektronischen Lichtschrankenmessung (System der Firma Metior, Stuttgart) gemessen. Jeder Proband führte drei Sprints mit jeweils 5 min Pause durch, von denen der Versuch mit der höchsten Laufgeschwindigkeit (km/h) als Belastungsparameter gewertet wurde.

2.2.5 Sprinttestserie

An einem dritten Versuchstag wurde die Maximalsprintserie durchgeführt. Die Athleten unterzogen sich maximal drei Belastungen mit jeweils 60 min Pause. Die Laufbandsteigung betrug 1,5 %. Die Geschwindigkeit der ersten Belastung war von Proband zu Proband unterschiedlich und errechnete sich aus der Geschwindigkeit beim Erreichen der maximalen Sauerstoffaufnahme im Rampentest zuzüglich 2 km/h.

Die zweite Belastung wurde mit der Geschwindigkeit von Test 1+2 km/h durchgeführt, und die Geschwindigkeit der dritten Belastung ergab sich aus Test 1+4 km/h etc. Als Grenze für die letzte und höchste Belastung diente der Wert der Maximalgeschwindigkeit im Schnelligkeitstest auf der Tartanbahn. Der Belastungsabbruch nach jedem Test erfolgte bei subjektiver Ausbelastung, welche die Probanden per Handzeichen anzeigten. In Tabelle 3 ist das Belastungsschema zur einfacheren Anschauung aufgeführt.

Als Beurteilungsparameter diente die Belastungszeit, die sich als Zeit zwischen Belastungsbeginn und Belastungsende abzüglich der Beschleunigungszeit ergab. Des Weiteren wurde Kapillarblut vor und nach der Belastung abgenommen, sowie die Pulswerte in gleicher Weise registriert.

Da die Geschwindigkeiten bei diesem Test sehr hoch wurden, war eine besondere Sicherheitsvorkehrung auf dem Laufband notwendig. Mit Hilfe eines Gurtes wurden die Probanden am Oberkörper gesichert und konnten mit einem Zug am Gurt das Laufband jederzeit stoppen (siehe Abbildung 5).

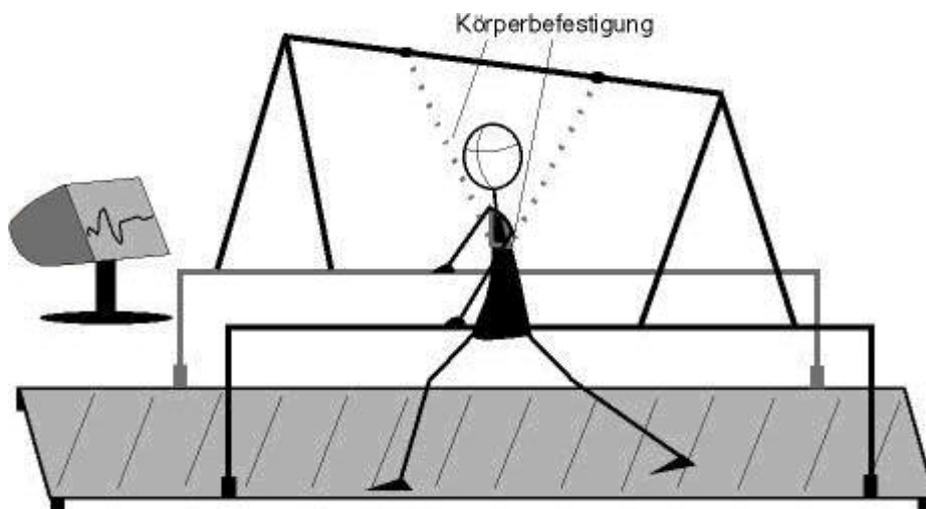


Abb. 5: Sicherheitsvorkehrung auf dem Laufband.

Tab. 3: Laufgeschwindigkeiten der Maximalsprintserie

Geschwindigkeit in km/h pro Belastung

v an $VO_{2max} + 2$ km/h

v an $VO_{2max} + 4$ km/h

v an $VO_{2max} + 6$ km/h

v an $VO_{2max} + 8$ km/h \Rightarrow falls $v = v_{max}$ Maximalsprinttest \Rightarrow Ende der Belastung

2.3 Laktatleistungsdiagnostische Parameter

2.3.1 Messgrößen aus dem Kapillarblut

Aus hyperämisiertem Ohrläppchen wurde arterialisiertes Kapillarblut entnommen. Beim Rampentest fand die Laktatmessung vor und nach der Belastung statt, während beim Mehrstufentest vor, nach, sowie während der Belastung Kapillarblut entnommen wurde. Bei den Maximalsprintserien erfolgte die Laktatbestimmung wiederum nur vor und nach der Belastung.

Aus diesen Proben wurde nach Hämolyse die Laktatkonzentration mit der enzymatischen Methode (ESAT 6661 Lactat, Eppendorf) automatisch bestimmt.

Die Normalwerte in körperlicher Ruhe liegen bei 0,666–2,2442 mmol Laktat (Kruse-Jarres, 1987).

2.3.2 Verlauf der blutchemischen Messgrößen unter stufenweise ansteigender Belastung (Mehrstufentest)

Bei zunehmender Belastungsintensität steigt die Laktatkonzentration nach einer mehr oder weniger lang andauernden Plateauphase zunehmend steil an. Der Punkt des ersten Anstiegs wird als die sogenannte aerobe Schwelle (LT) bezeichnet (Beaver et al., 1986; Spurway, 1992). Die Belastungsintensität, bei der die Laktatkonzentration erstmals ansteigt, ist individuell verschieden (Gladden, 1984) und ist ein Kennzeichen der Ausdauerleistungsfähigkeit, bzw. die oxidative Kapazität (AT) (Dickhuth et al., 1991a; Mader et al., 1976; Margaria, 1993; Wassermann, 1984).

Das Ansteigen der Milchsäurekonzentration in der Zelle bewirkt einen Diffusionsantrieb der Milchsäure vom Intrazellulärraum in den Extrazellulärraum, wodurch die Konzentration im Blut zuzunehmen beginnt. Als Folge setzen extrazelluläre Puffervorgänge im Organismus ein, die der

beginnenden Azidose entgegen wirken. Dieser Kompensationsmechanismus führt dazu, dass ein Abfall des pH-Wertes mit zeitlicher Verzögerung einsetzt, und dass er nicht direkt proportional zum Anstieg der Laktatkonzentration ist. Ab einer bestimmten Laktatkonzentration ist eine ausreichende Pufferung nicht mehr möglich. Dies kennzeichnet die Individuelle anaerobe Schwelle (IAS) und kann nach verschiedenen Verfahren festgelegt werden (Dickhuth et al., 1998).

2.3.3 Herzfrequenzmessung

Die Herzfrequenz wurde parallel zur Abnahme der blutchemischen Messgrößen, jeweils zu Beginn der Belastung, während der Belastung und nach der Belastung, mit Hilfe eines Pulsmessgerätes (Polar Sport, Polar Electro Oy, Finnland) aufgezeichnet.

2.4 Spirometrie

2.4.1 Atemvolumen bei Belastung (VE)

Ein sogenanntes offenes spirometrisches System bietet die beste Möglichkeit, die Atemvolumina über eine längere Zeit zu messen (Schmidt, Thews, 1997). Es werden zunächst die Atemstromstärken mit Hilfe eines Pneumographen gemessen. Strömt die Einatemluft durch das Messsystem, entsteht eine Druckdifferenz, die mit Hilfe von zwei Druckaufnehmern gemessen wird. Die Atemstromstärke ist der Druckdifferenz direkt proportional. Das Gesamtvolumen der veratmeten Luft ergibt sich nun durch die Integration der Volumengeschwindigkeit über die Zeit ($V = \int dV / dt$), die in einem sogenannten Spirogramm elektronisch aufgezeichnet wird (Schmidt, Thews, 1997).

2.4.2 *Messung der Atemgaskonzentration*

Die Atemgaskonzentrationen der Probanden wurden während der gesamten Belastung beim Rampentest und Mehrstufentest mit Hilfe eines Massenspektrometers im offenen spirometrischen System gemessen.

Der Athlet ist dabei an einen Pneumographen, über ein Flowmeter, angeschlossen. Es werden kontinuierlich Gasmengen abgesaugt, in einem Zeitintervall von 50 ms analysiert und für jeden Atemzug berechnet (die Breath-by-Breath-Methode, siehe 2.4.4). Mittels der Breath-by-Breath-Methode ist eine Analyse der Atemstromkurve online möglich.

2.4.3 *Funktionsweise des Massenspektrometers*

Durch die Anwendung eines vierpoligen Massenspektrometers können verschiedene Gase gleichzeitig analysiert werden (Röcker, 1999). Die positiv ionisierten Atemgasmoleküle werden durch verschiedene elektrische Felder in einem vierpoligen System zeitlich getrennt und von einem Umwandler entschlüsselt, nachdem der Ionenstrom verstärkt wurde. Auf diese Weise ist man in der Lage, verschiedene Ionen im Atemgas zu analysieren.

2.4.4 *Breath-by-Breath-Methode*

Die schnelle und zeitnahe Bestimmung der Atemgaskonzentration und des Volumenflusses ermöglicht eine Berechnung der Gasmenge $<$ von Atemzug zu Atemzug $>$ (Beaver et al., 1981). Das Prinzip der Methode beruht hierbei auf der Bestimmung der Differenz von O_2 -Aufnahme und CO_2 -Abgabe während der Inspiration und Expiration. Dieses wird durch die fortlaufende Integration der Gaskonzentrationen gegen den Atemzugvolumenstrom berechnet. Das

expiratorische Atemvolumen (VE) ergibt sich aus dem Integral des Gasflusses während der jeweiligen Expirationsphasen. Als endalveoläre Gaskonzentration (ET) wurde der Durchschnittswert der Plateauphasen der Gaskonzentrationen am Ende der Atemzüge gemittelt. Die Änderung der funktionellen Residualkapazität (FRC) in jedem einzelnen Atemzug ist bei der Auswertung berücksichtigt. Die FRC wird durch die zeitgleich bestimmte Stickstoffkonzentration rechnerisch ausgeglichen. Stickstoff kann nicht über die alveolären Membranen diffundieren, so dass die Konzentration theoretisch gleich bleibt und als Referenz zur Berechnung der FRC verwendet werden kann.

2.4.5 Messsystem

Die Analyse der Atemvolumina und der Atemgaskonzentrationen während des Rampentests und des Mehrstufentests wurde mittels eines Spiroergometriesystems mit angeschlossenem Massenspektrometer (Oxycon-Beta Gerät der Firma Pulmocard, Herdecke) durchgeführt. Die Informationen zur Atemgasanalyse werden durch einen paramagnetischen Differential-Sauerstoffanalysator, einen Infrarotanalysator sowie ein Signalverarbeitungssystem gewonnen. Die Software ist an das gesamte System gekoppelt. Dadurch ist eine interne Auswertung und eine Übernahme der Daten in andere Statistikprogramme möglich.

2.4.6 Atemgasparameter

Die Atemgasparameter werden hier genauer dargestellt, um auf die Veränderung der Ventilation bei steigender Belastung im folgenden Abschnitt näher einzugehen.

2.4.6.1 Primäre Parameter (gemessen)

- VO_2 Sauerstoffaufnahme (ml/min)
- VCO_2 Kohlendioxidabgabe (ml/min)
- $ETCO_2$ Endalveolärer Kohlendioxidgehalt (%)
- ETO_2 Endalveolärer Sauerstoffgehalt (%)
- VE Atemminutenvolumen (ml/min)

2.4.6.2 Sekundäre Parameter (berechnet)

- RQ Respiratorischer Quotient
- $EQCO_2$ Atemäquivalent für Kohlendioxid
- EQ_2 Atemäquivalent für Sauerstoff
- VT Funktionelles Lungenvolumen

2.4.7 Verlauf der Atemgasparameter bei steigender Belastung

2.4.7.1 Verlauf der Atmung

Das expiratorische Atemvolumen steigt kontinuierlich, während die Belastungsintensität stufenweise gesteigert wird. Bei geringer Belastung ist der Anstieg linear proportional zur Belastungsintensität, zur Kohlendioxidproduktion (VCO_2) (Wassermann et al.,1990) und zur Sauerstoffaufnahme (VO_2). Die Energiegewinnung wird bei dieser Belastungsintensität vorwiegend durch die Lipolyse bestimmt, dadurch steigt das Verhältnis zwischen VCO_2 und VO_2 (der respiratorische Quotient = RQ) nur geringfügig an. Die Atemäquivalente für O_2 und CO_2 (EQO_2 und $EQCO_2$) fallen währenddessen ab, da die Atmung ökonomisiert wird. Nimmt die Intensität der Belastung zu, kommt es proportional

zu einem erhöhten O_2 -Verbrauch und einer erhöhten CO_2 -Produktion. Infolgedessen fällt der endalveoläre O_2 -Gehalt (ETO_2), und der endalveoläre CO_2 -Gehalt ($ETCO_2$) steigt an. Ebenso nimmt das funktionelle Lungenvolumen (VT) stetig zu.

Ab einer bestimmten Erhöhung der Belastungsintensität kommt es intrazellulär zu einer vermehrten Milchsäurebildung. Die Belastungsintensität des ersten Laktatanstiegs ist ein Kennzeichen der Ausdauerleistungsfähigkeit und wird als oxidative Kapazität (AT) bezeichnet. Die Zunahme der Protonenkonzentration im Körper setzt die Puffervorgänge in Gang. Dadurch erhöht sich die Menge an nichtmetabolischem CO_2 , weshalb die endalveoläre CO_2 -Konzentration zunimmt. Dieser Mechanismus hat eine Stimulation des Atemvolumens zur Folge, was sich in einer direkt proportionalen Steigerung der Ventilation, d. h. einem überproportionalen Anstieg von VCO_2 gegenüber VO_2 , zeigt. (Beaver, 1991; Wassermann et al., 1990, Yano, 1987; Yano et al., 1984).

Als Folge vergrößert sich das Herzminutenvolumen, was zur Konsequenz hat, dass die Parameter Sauerstoffaufnahme, VE , VT und VO_2 ebenfalls linear proportional zur Belastungsintensität zunehmen. Voraussetzung hierfür ist die optimale Sauerstoffdiffusion von Alveole zur Blutbahn. Durch die oben genannten Vorgänge erreichen die Werte von ETO_2 und $ETCO_2$ eine Plateauphase (Wassermann, 1987), wohingegen $ETCO_2$ und $EQCO_2$ durch die Bildung von nichtmetabolischem CO_2 leicht ansteigen.

Ab einer kritischen Belastungsintensität beginnt das Atemvolumen sprunghaft anzusteigen (Yoshida, Fukaba, 1992), was die Folge des Kompensationsmechanismus ist, die der Übersäuerung des Organismus gegensteuert. Hierbei wird versucht, die Entstehung von fixen Säuren im Sinne einer metabolischen Azidose mit Hilfe der erhöhten Ventilation zu kompensieren. Dieser Mechanismus tritt ein, wenn die Pufferung ausgeschöpft ist (Whipp, 1977). Der mehr oder weniger sichtbare Punkt, nachdem die Ventilation überproportional ansteigt, wird als Punkt der respiratorischen Kompensation (RCP) bezeichnet.

Bei weiterer Belastungszunahme stoppt der proportionale Anstieg des Herzminutenvolumens und der Lungenperfusion. Die Diffusion der Alveolarluft ins Blut ist wegen der stark verkürzten Kontaktzeit nicht mehr effektiv möglich (Thews et al., 1988). Dadurch verlangsamt sich die Sauerstoffaufnahme gravierend. Dieser Punkt wird als maximale Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) bezeichnet, der höchste Wert vor Erreichen des sogenannten < Leveling off > Phänomen entspricht der sogenannte VO_{2max} .

Während der sprunghaften Zunahme der Atemfrequenz steigt das funktionelle Lungenvolumen (V_T) nicht weiter an. Das durch die Hyperventilation vermehrt abgeatmete CO_2 zeigt sich in dem Abfall des $ETCO_2$ mit antiproportionalem Anstieg des ETO_2 (Linnarsson, 1974; Wassermann et al.; 1981, Whipp et al.; 1980). Die sich verschlechternde Ökonomisierung der Atmung zeigt sich in einem deutlichen Anstieg der Atemäquivalente für O_2 und CO_2 (Wassermann, 1987).

2.5 Modus der Auswertung

2.5.1 *Minimalinvasive und nichtinvasive Messdaten*

Der Verlauf der Laktatkonzentration und der Herzfrequenz wurde graphisch unter Anwendung eines ausgleichenden Spline-Verfahrens (Späth, 1986, 1990) interpoliert und geglättet. Nach Glättung und Interpolation wurde die aerobe Schwelle (LT) als niedrigster Wert des Quotienten (Laktat / Leistung) angegeben. Die individuelle anaerobe Schwelle (IAS) wurde als Laufgeschwindigkeit bei der Laktatkonzentration von Basislaktat 1,5 mmol/l bezeichnet (Dickhuth et al., 1991b). Die numerische und graphische Auswertung erfolgte in PC Routinen (C++).

Die graphische Auswertung und Darstellung ist in Abbildung 6 aufgezeigt.

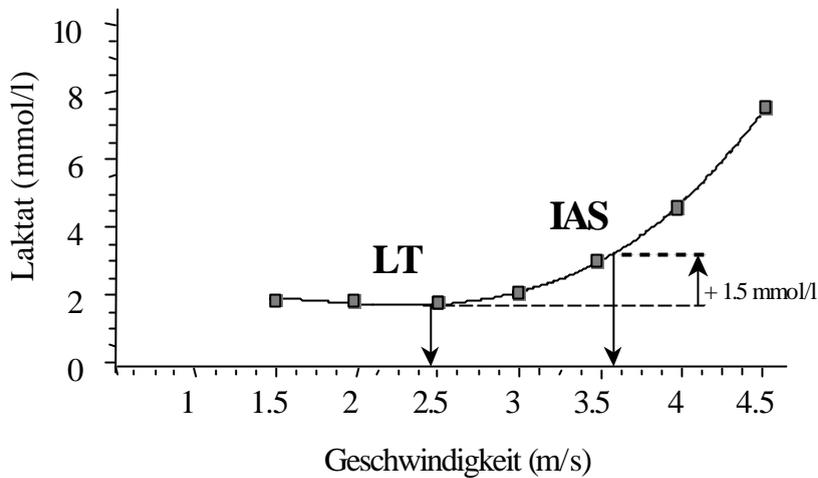


Abb. 6: Bestimmung der aeroben Schwelle (LT) und der individuellen anaeroben Schwelle (IAS).

2.5.2 Spirometrische Messdaten

Mit Hilfe des Statistikprogrammes JMP erfolgte die Auswertung der Atemgaswerte. Unter Anwendung des Spline-Verfahrens (Faktor 0,1) wurde der Kurvenverlauf der O_2 -Aufnahme interpoliert und geglättet. Mit Hilfe dieser graphisch ermittelten Werte wurde die relative maximale Sauerstoffaufnahme, die sich auf das individuelle Körpergewicht bezieht, berechnet.

2.5.3 Berechnung der Pufferkapazität

Unter Anwendung der spirometrischen Kenndaten von RCP_{ETCO_2} und RCP_{VT} (Beaver und Wassermann, 1991) wurde die relative funktionelle Pufferkapazität (relFP) bestimmt. Die relative funktionelle Pufferkapazität ist definiert als Anteil der Pufferung an der Leistung, bis die respiratorische Kompensation (RCP) einsetzt. Der Prozentanteil ergibt sich als Maß für den Bereich zwischen dem Punkt des ersten Laktatanstiegs (LT) und dem Moment der respiratorischen Kompensation (RCP) in Relation zur Leistung am RCP, der als 100 % gesetzt wurde (siehe Gleichung 2). Im Folgenden wird die Bestimmung der Pufferkapazität in Abbildung 7 graphisch dargestellt.

$$relFP[\%] = [(I_{RCP} - I_{LT}) / I_{RCP}] \cdot 100 \quad (\text{Gleichung 2})$$

Mit I_{RCP} = Leistung am RCP und I_{LT} = Leistung an der LT

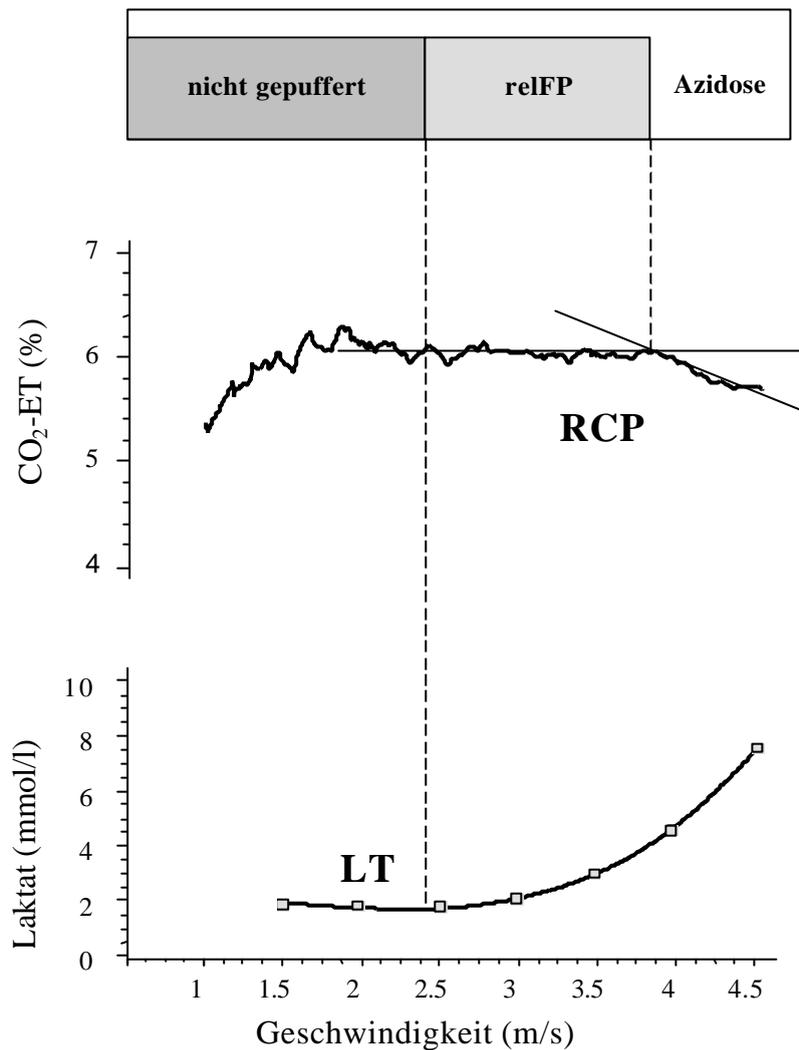


Abb.7: Beispielhafte Darstellung für die Bestimmung der Pufferkapazität (relFP). Die relFP berechnet sich als Differenz der Laufgeschwindigkeit an LT und RCP in Prozent der Laufgeschwindigkeit am RCP.

2.5.4 Berechnung der anaeroben Kapazität

Die Berechnung der anaeroben Kapazität erfolgte in Anlehnung an das Verfahren von Monod und Scherrer, die das < Critical-Power-Concept > erstmals beschrieben haben. Aus der Laufbandgeschwindigkeit (v), der Belastungszeit (t) und der Steigung des Laufbandes bei der Maximalsprintserie

sowie dem Körpergewicht (kg) wurde die jeweils verrichtete Arbeitssumme (W) in Kilojoule (kJ) nach Gleichung 3 berechnet.

$$W = \frac{v \times \text{kg} \times (2,11 + S \times 0,25) + 2,2 \times \text{kg} - 151}{10,5 \times 1000} \times t \quad (\text{Gleichung 3})$$

Die geleisteten Arbeitssummen (W) wurden gegen die Laufzeiten in den einzelnen Sprinttests (t) in einem Arbeitssummen-Zeit-Diagramm nach Monod und Scherrer graphisch aufgetragen (Schaubild). Nach Durchführung einer linearen Regression wurde der Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der y-Achse als anaerobe Kapazität definiert (Whipp et al., 1982; Jenkins et al., 1993; Nebelsick-Gullett et al., 1988; Gaesser et al., 1995). Zur Berechnung der Regressionsgeraden wurden nur Laufzeiten aus den Sprinttests bis 50 Sekunden berücksichtigt (Abbildung 8).

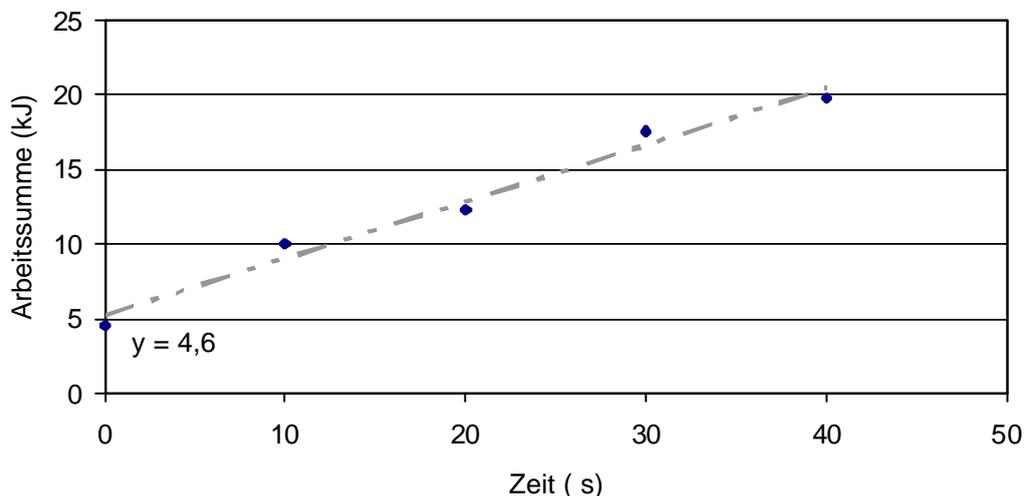


Abb. 8: Beispiel für die Berechnung der anaeroben Kapazität (Y-Schnittpunkt der Regressionsgeraden aus geleisteter Arbeit zur Laufzeit)

2.6 Statistik

Der Analysendatenpool wurde unter Verwendung des Datenbanksystems ORACLE verwaltet. Für die Berechnung der Pufferkennwerte und der LT wurden PC-Routinen in der Programmiersprache ORACLE erstellt.

Die Berechnungen sowie die Kurvendarstellungen und Bearbeitung der Rohdaten außerhalb der Datenerfassung erfolgten unter Verwendung von statistischen Standardprogrammen: JMP Version 3.1.5, SAS Institute Inc.

Im Rahmen der weiteren Auswertung wurden alle Parameter mittels des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung getestet und jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Die Parameter sind jeweils als Mittelwert \pm Standardabweichung dargestellt.

Eine Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0,0001$ wurde als hoch signifikant, $p < 0,001$ als signifikant und $p < 0,01$ als schwach signifikant bezeichnet.

Die Vergleiche der einzelnen Parameter erfolgte mittels Varianzanalyse (ANOVA) für normalverteilte Parameter.

Mit der Korrelationsanalyse wurde geprüft, wie stark die verschiedenen Messgrößen von einander abhängen.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse des Rampentests

3.1.1 Nichtinvasiv bestimmte Messgrößen

Bei den maximal erreichten Laufgeschwindigkeiten im Rampentest finden sich schwach signifikante Unterschiede zwischen den aerob-trainierten Probanden (AeT) bzw. den untrainierten Probanden (UT), die eine maximale Geschwindigkeit von $20,2 \pm 1,1$ km/h und $18,4 \pm 1,8$ km/h erreichten. Demgegenüber zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen der Gruppe der untrainierten Probanden (UT) und der Gruppe der anaerob-trainierten Probanden (AT), die eine Geschwindigkeit von $20,8 \pm 1,8$ km/h erreichten. Zwischen den AeT und den AT finden sich keine signifikanten Unterschiede (siehe Tabelle 4).

Tab. 4: Rampentest. Mittelwert und Standardabweichung der maximal erreichten Geschwindigkeit (km/h) der Gruppen AT, AeT und UT.

Parameter	AT	AeT	UT
V_{\max} (km/h)	$20,8 \pm 1,3$	$20,2 \pm 1,1$	$18,4 \pm 1,8$
P	UT vs. AeT < 0,01	UT vs. AT < 0,001	AeT vs. AnT n.s.

3.1.2 Ergebnisse der Spirometrie

Die Ergebnisse der maximalen Sauerstoffaufnahme sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Werte lassen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen erkennen. Der Mittelwert beträgt bei den anaerob-trainierten Sprintern 4276 ± 688 ml/min, bei den aerob-trainierten Langstreckenläufern 4439 ± 544 ml/min und bei den untrainierten Probanden 3989 ± 472 ml/min.

Die Ergebnisse der relativen maximalen Sauerstoffaufnahme liegen für die aerob-trainierten Langstreckenläufer (AeT) bei $62,1 \pm 6,0$ ml/min/kg, bei den anaerob-trainierten Sprintern (AT) bei $56,7 \pm 9,6$ ml/min/kg, und bei der Gruppe der untrainierten Probanden (UT) betragen die Werte im Mittel $53,2 \pm 6,6$ ml/min/kg. Statistisch läßt sich hier weder ein signifikanter Unterschied zwischen den anaerob-trainierten Sprintern noch den aerob-trainierten Langstreckenläufern (AeT) sowie zwischen den untrainierten Probanden und den anaerob-trainierten Sprintern feststellen. Jedoch liegt ein signifikanter Unterschied zwischen den aerob-trainierten Langstreckenläufern und den untrainierten Probanden vor.

Die Geschwindigkeit beim Erreichen der VO_{2max} beträgt bei den aerob-trainierten-Langstreckenläufern im Mittel $19,24 \pm 1,0$ km/h. Diese entspricht etwa dem Mittelwert, den auch die anaerob-trainierten Sprinter beim Erreichen ihrer VO_{2max} laufen können ($19,98 \pm 1,5$ km/h) . Diese Werte liegen über dem Wert der untrainierten Probanden ($17,0 \pm 1,5$ km/h). Die Geschwindigkeiten der aerob-trainierten Probanden unterscheiden sich schwach signifikant von dem Mittelwert der Geschwindigkeit der untrainierten, die Geschwindigkeit der anaerob-trainierten Sprinter unterscheiden sich signifikant von der Geschwindigkeit der untrainierten Probanden. Dagegen unterscheiden sich die Geschwindigkeiten der anaerob-trainierten Sprinter nicht von denen der aerob-trainierten Langstreckenläufer. In Abbildung 9 und 10 sind die Ergebnisse im Säulendiagramm graphisch dargestellt.

Tab. 5: $VO_{2\max}$ -Test: Mittelwerte und Standardabweichung der $relVO_{2\max}$ (ml/min/kg), der maximalen $VO_{2\max}$ (ml/kg) und der Geschwindigkeit (km/h) beim Erreichen der $VO_{2\max}$ der Gruppen AT, AeT und UT.

Parameter	AT	AeT	UT
$relVO_{2\max}$ (ml/min/kg)	56,70 ± 9,6	62,10 ± 6,0	53,19 ± 6,6
$VO_{2\max}$ (ml/min)	4276 ± 688,2	4439 ± 544,2	3989 ± 472,7
V bei $VO_{2\max}$ (km/h)	19,98 ± 1,5	19,24 ± 1,0	17,0 ± 1,5
P	UT vs. AeT	UT vs. AT	AeT vs. AnT
$relVO_{2\max}$	< 0,01	n.s.	n.s.
$VO_{2\max}$	n.s.	n.s.	n.s.
V bei $VO_{2\max}$	0,001	0,01	n.s.

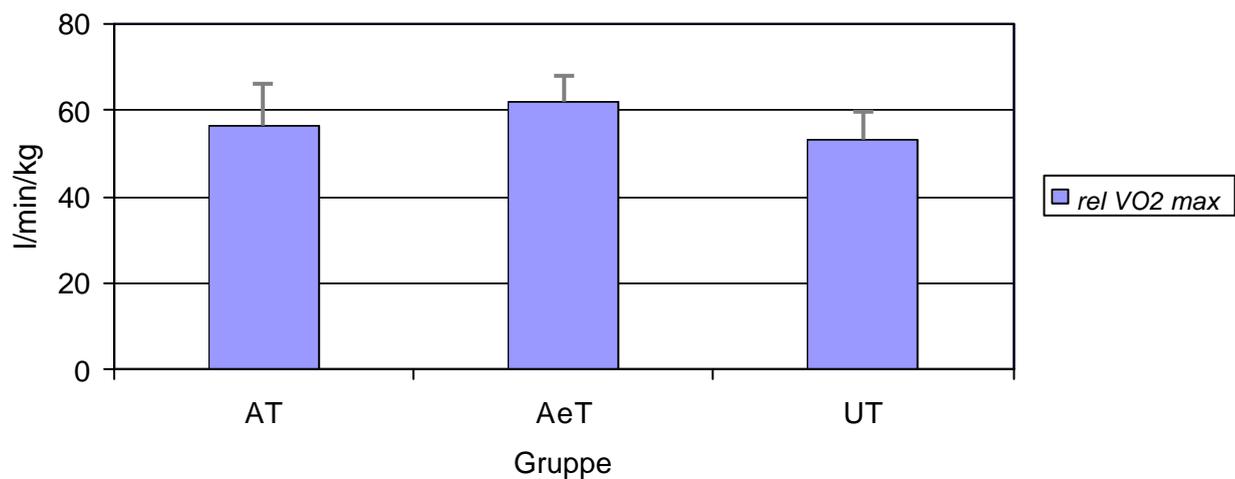


Abb. 9: $VO_{2\max}$ -Test: Mittelwerte und Standardabweichung der $relVO_{2\max}$ (ml/min/kg) der Gruppen AT, AeT und UT.

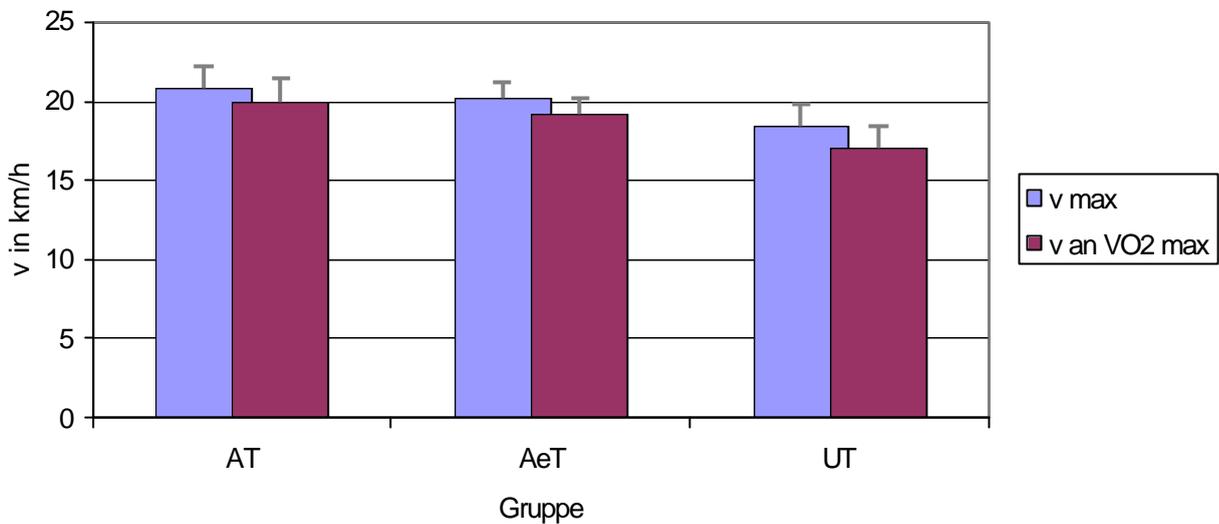


Abb. 10: VO_{2max} -Test. Mittelwerte und Standardabweichung der Geschwindigkeit (km/h) beim Erreichen der VO_{2max} der Gruppen AT, AeT und UT.

3.2 Schnelligkeitstest

Die anaerob-trainierten Sprinter (AT), die aerob-trainierten Langstreckenläufer (AeT) und die untrainierten Probanden (UT) lassen sich anhand der gemessenen Maximalgeschwindigkeiten über 10 m wie folgt unterscheiden. Der berechnete Mittelwert der anaerob-trainierten Sprinter liegt bei $32,4 \pm 0,5$ km/h Maximalgeschwindigkeit. Die aerob-trainierten Langstreckenläufer erreichen $27,2 \pm 1,1$ km/h und die untrainierten Probanden laufen im Durchschnitt $28,83 \pm 0,9$ km/h (siehe Tabelle 6 und Abbildung 11). Diese Ergebnisse demonstrieren hoch signifikante Unterschiede zwischen den anaerob-trainierten Sprintern und der Gruppe der untrainierten Probanden sowie zwischen den anaerob-trainierten Sprintern und den aerob-trainierten Langstreckenläufern. Die Geschwindigkeiten der Gruppe der untrainierten Probanden gegenüber denen der aerob-trainierten Langstreckenläufer unterscheiden sich ebenfalls signifikant.

Tab. 6: Schnelligkeitstest. Mittelwerte und Standardabweichung der Maximalgeschwindigkeiten in km/h der Gruppen AT, AeT und UT.

Parameter	AT	AeT	UT
V_{\max} (km/h)	$32,4 \pm 0,5$	$27,2 \pm 1,1$	$28,8 \pm 0,9$
P	UT vs. AeT < 0,01	UT vs. AT < 0,0001	AeT vs. AnT < 0,0001

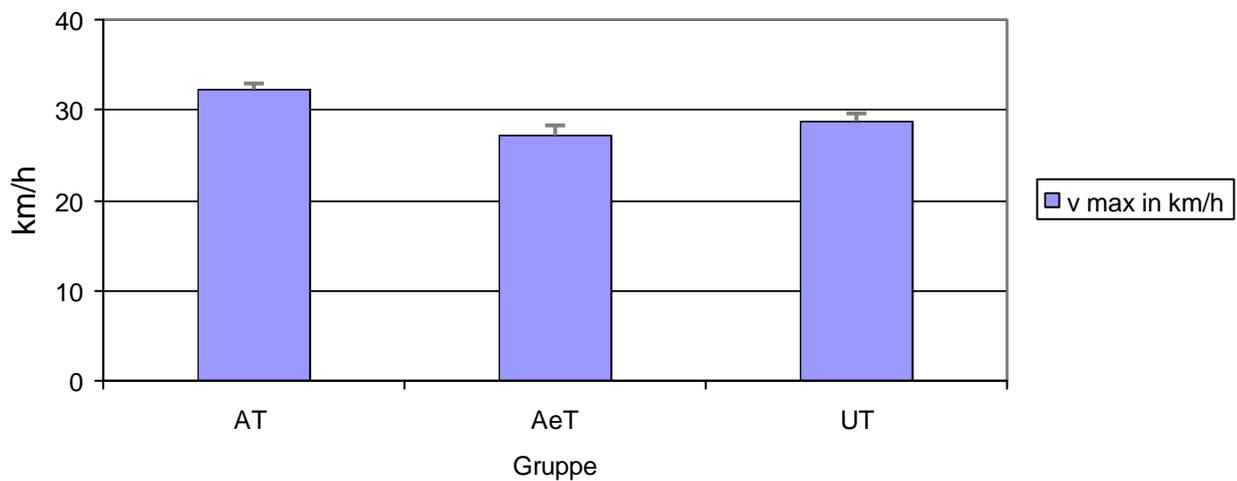


Abb. 11: Schnelligkeitstest. Mittelwerte und Standardabweichung der Maximalgeschwindigkeiten in km/h der Gruppen AT, AeT und UT.

3.3 Mehrstufentest

3.3.1 Ergebnisse der Laktatdiagnostik

Die Ergebnisse des Mehrstufentests sind in Tabelle 7 aufgeführt. Die Mittelwerte der Ruhelaktatwerte vor der Belastung liegen bei allen Probanden im Normbereich zwischen 1,4–1,5 mmol/l.

Der Laktatspiegel an der aeroben Schwelle (LT) liegt bei den aerob-trainierten Langstreckenläufern (AeT) bei $1,1 \pm 0,3$ mmol/l. Dieser Wert ist hoch signifikant niedriger als bei den anaerob-trainierten Sprintern (AT). Ebenso unterscheiden sich die aerob-trainierten Langstreckenläufer und die untrainierten Probanden (UT) hoch signifikant. Es ergeben sich für die anaerob-trainierte Gruppe (AT) Werte von $2,2 \pm 0,7$ mmol/l und für die untrainierte Gruppe (UT) Werte von $2,3 \pm 0,7$ mmol/l. Demgegenüber besteht kein signifikanter Unterschied der Kollektive UT und AT.

Die Laktatspiegel an der individuellen anaeroben Schwelle (IAS) zeigen folgende Charakteristik: Mit $2,6 \pm 0,3$ mmol/l liegt der Mittelwert der aerob-trainierten Langstreckenläufer hoch signifikant unter dem der anaerob-trainierten Sprinter (AT) $3,7 \pm 0,7$ mmol/l bzw. hoch signifikant unter dem der untrainierten Probanden (UT) $3,8 \pm 0,7$ mmol/l. Auch bei den Laktatwerten an der IAS unterscheiden sich wiederum die untrainierten Probanden (UT) nicht signifikant von den anaerob-trainierten Sprintern.

Der Wert für die Laktatkonzentration bei Ausbelastung ist bei den aerob-trainierten Langstreckenläufern ($8,4 \pm 1,6$ mmol/l) am niedrigsten. Mit $9,7 \pm 1,4$ mmol/l liegen die Mittelwerte der anaerob-trainierten Sprinter und der UT mit $9,9 \pm 2,5$ mmol/l über dem der aerob-trainierten Langstreckenläufer. Hierbei unterscheiden sich die Werte der aerob-trainierten Langstreckenläufer nicht signifikant von den Werten der anaerob-trainierten Sprinter und denen der Gruppe der Untrainierten. Der gesamte Laktatanstieg vom Ruhewert bis zur Ausbelastung ist in Abbildung 12 graphisch verdeutlicht.

Die Laktatkonzentration am respiratorischen Kompensationspunkt (RCP) weist keine signifikante Differenzen bei den Gruppen UT und AT auf. Die Werte liegen bei den AT bei $5,3 \pm 1,8$ mmol/l und UT bei $4,7 \pm 1,5$ mmol/l. Im Unterschied dazu unterscheiden sich die Werte der AeT ($2,0 \pm 0,6$ mmol/l) signifikant von denen der UT, die Werte der AeT und der AT differenzieren sich hoch signifikant.

Der Laktatanstieg am Punkt der aeroben Schwelle (LT) bis zum respiratorischen Kompensationspunkt (RCP) ist bei den aerob-trainierten Langstreckenläufern mit $0,9 \pm 0,4$ hoch signifikant niedriger als bei den anaerob-trainierten Sprintern und signifikant niedriger als bei den untrainierten Probanden (UT). Die Kollektive UT und AT unterscheiden sich mit Anstiegswerten von $3,2 \pm 1,4$ mmol/l und $2,4 \pm 1,1$ mmol/l nicht signifikant (siehe Abbildung 13).

Tab. 7: Mehrstufentest. Mittelwerte und Standardabweichung der leistungsdagnostischen Parameter von AT, AeT und UT.

Parameter	AT	AeT	UT
Laktat an der LT _(mmol/l)	2,2 ± 0,7	1,1 ± 0,3	2,3 ± 0,7
Laktat an der IAS _(mmol/l)	3,7 ± 0,7	2,6 ± 0,3	3,8 ± 0,7
Laktat bei Ausbelastung _(mmol/l)	9,7 ± 1,4	8,4 ± 1,6	9,9 ± 2,5
Laktat am RCP _(mmol/l)	5,3 ± 1,8	2,0 ± 0,6	4,7 ± 1,5
Laktatanstieg LT-RCP _(mmol/l)	3,2 ± 1,4	0,9 ± 0,4	2,4 ± 1,1
P	UT vs. AeT	UT vs. AT	AeT vs. AT
Laktat vor Belastung _(mmol/l)	n.s.	n.s.	n.s.
Laktat an der LT _(mmol/l)	< 0,0001	n.s.	< 0,0001
Laktat an der IAS _(mmol/l)	< 0,0001	n.s.	< 0,0001
Laktat bei Ausbelastung _(mmol/l)	n.s.	n.s.	n.s.
Laktat am RCP _(mmol/l)	< 0,001	n.s.	< 0,0001
Laktatanstieg LT-RCP _(mmol/l)	< 0,01	n.s.	< 0,0001

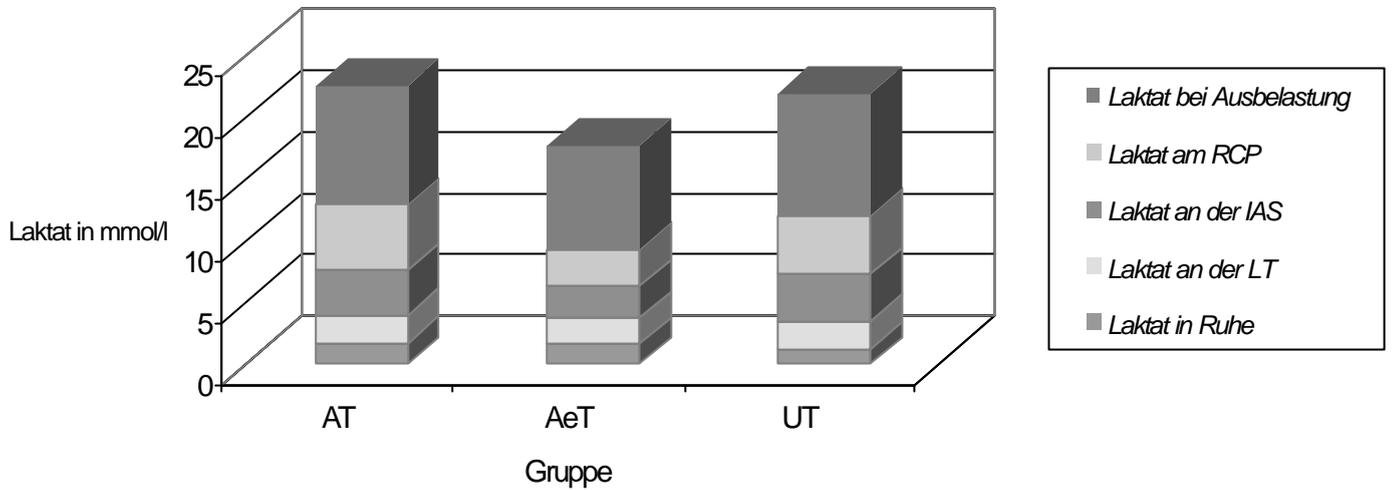


Abb. 12: Mehrstufentest. Mittelwerte der leistungsdiagnostischen Parameter von AT, AeT und UT.

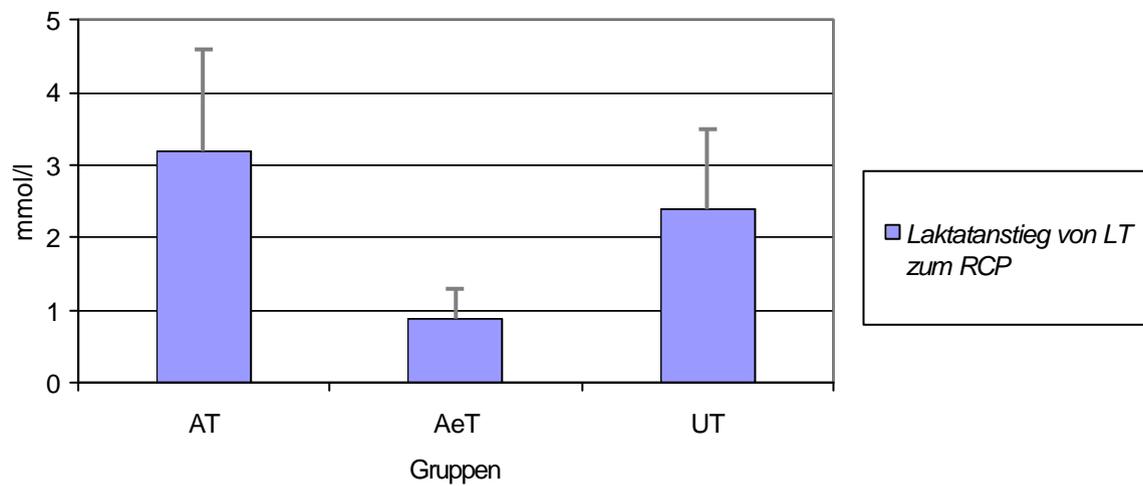


Abb. 13: Mehrstufentest. Mittelwert und Standardabweichung des Laktatanstiegs von der aeroben Schwelle (LT) zum respiratorischen Kompensationspunkt (RCP).

3.3.2 *Ergebnisse der nichtinvasiv bestimmten Messgrößen*

3.3.2.1 Laufgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit an der aeroben Schwelle (LT) beträgt bei den aerob-trainierten Langstreckenläufern (AT) $10,9 \pm 0,9$ km/h. Dieser Mittelwert liegt signifikant über dem der anaerob-trainierten Sprinter ($8,7 \pm 0,6$ km/h) und über dem der untrainierten Probanden (UT) ($8,6 \pm 0,9$ km/h). Die aerob-trainierten Langstreckenläufer erreichen an der LT somit eine hoch signifikant höhere Geschwindigkeit als die anderen beiden Kollektive. Im Gegensatz dazu besteht zwischen den anaerob-trainierten Sprintern und den untrainierten Probanden (UT) keine signifikante Differenz bezüglich der Laufgeschwindigkeit an der LT (siehe Tabelle 8 und Abbildung 14).

Die aerob-trainierten Langstreckenläufer erreichen an der IAS eine Geschwindigkeit von $14,7 \pm 0,9$ km/h. Dieser Wert liegt hoch signifikant über dem der anaerob-trainierten Probanden (AT) ($11,8 \pm 0,7$ km/h) und signifikant über dem der untrainierten Probanden (UT) ($11,2 \pm 1,1$ km/h), wohingegen sich der Wert der anaerob-trainierten Sprinter nicht signifikant von dem der untrainierten Probanden (UT) unterscheidet. Die Messgröße wird in Abbildung 15 dargestellt.

Der Mittelwert für die Geschwindigkeit bei Ausbelastung beträgt bei den aerob-trainierten Athleten (AeT) $18,1 \pm 0,8$ km/h. Er liegt hoch signifikant über dem Wert der anaerob-trainierten Sprinter ($16 \pm 1,4$ km/h) und hoch signifikant über dem der Gruppe der UT ($14,8 \pm 1,2$ km/h). Im Gegensatz dazu sind die Mittelwerte der Geschwindigkeit bei Ausbelastung zwischen den anaerob-trainierten Sprintern und der untrainierten Probanden (UT) nicht signifikant unterschiedlich (siehe Abbildung 16).

Tab. 8: : Mehrstufentest. Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeiten an der aeroben Schwelle (LT) ,der individuellen anaeroben Schwelle (IAS) und bei Ausbelastung (V_{max}) der Gruppen AT, AeT und UT.

Parameter	AT	AeT	UT
V an LT _(km/h)	8,8 ± 0,6	10,9 ± 0,9	8,6 ± 0,9
V an IAS _(km/h)	11,8 ± 0,7	14,7 ± 0,9	11,1 ± 1,1
V bei Ausbelastung _(km/h)	15,96 ± 1,4	18,1 ± 0,8	14,8 ± 1,2
P	UT vs. AeT	UT vs. AT	AeT vs. AT
V an LT _(km/h)	< 0,0001	n.s.	< 0,0001
V an IAS _(km/h)	< 0,0001	n.s.	< 0,0001
V bei Ausbelastung _(km/h)	< 0,0001	n.s.	< 0,0001

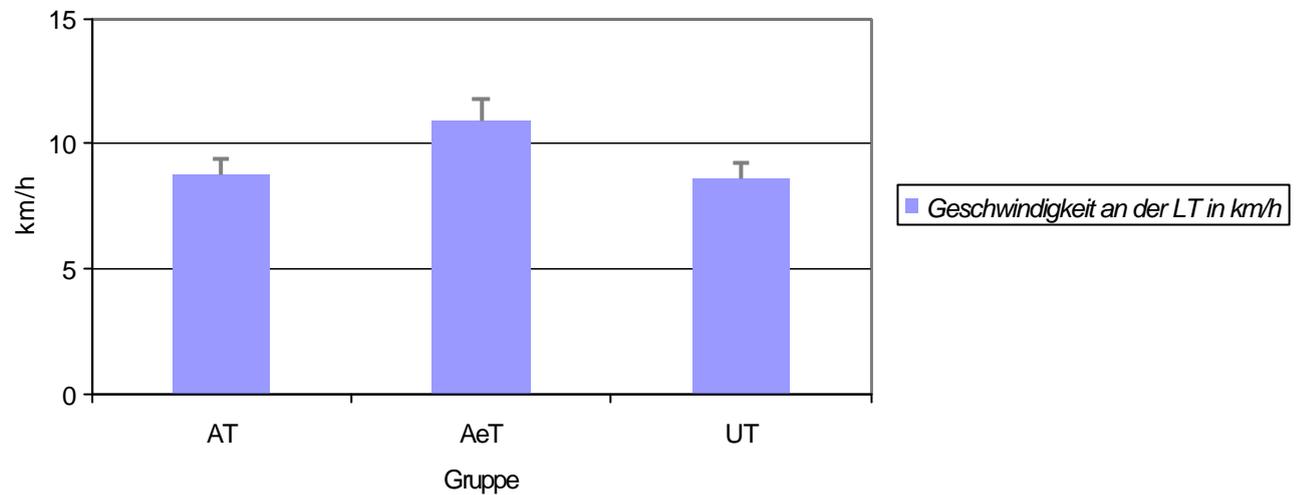


Abb. 14: Mehrstufentest. Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeiten an der aeroben Schwelle (LT) der Gruppen AT, AeT und UT.

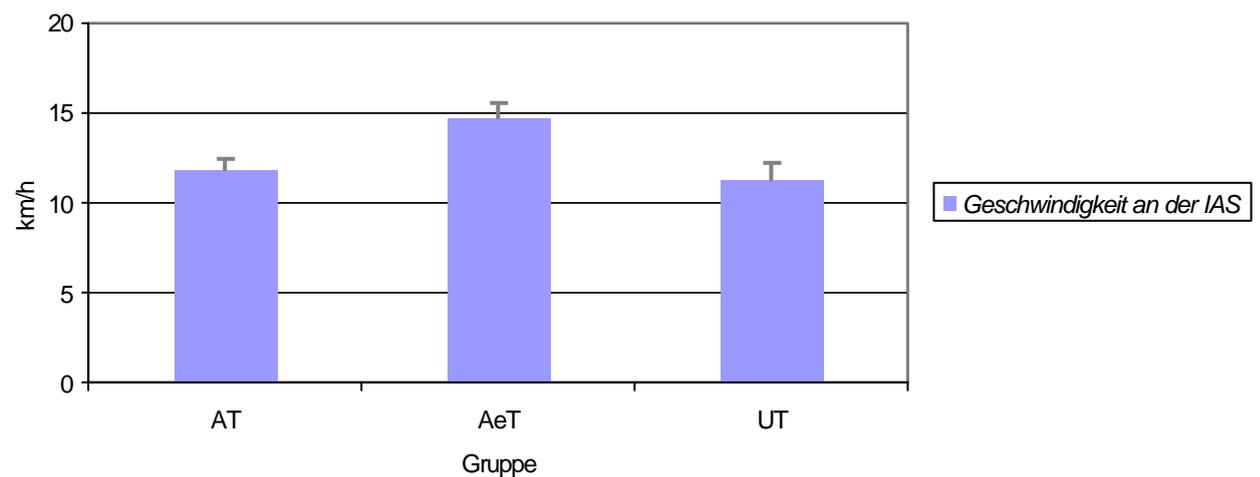


Abb. 15: Mehrstufentest. Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeiten an der individuellen anaeroben Schwelle (IAS) der Gruppen AT, AeT und UT.

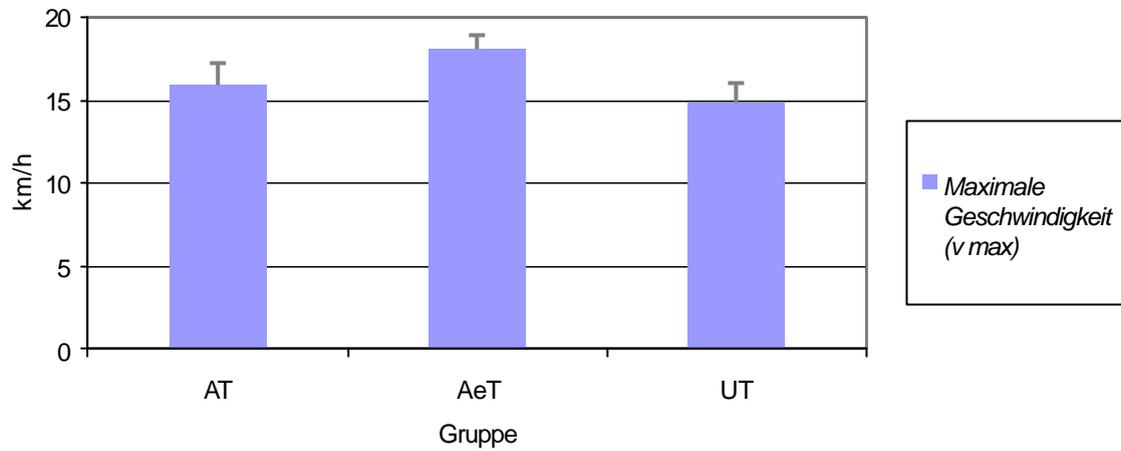


Abb.16: Mehrstufentest. Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeiten bei Ausbelastung (V_{max}) der Gruppen AT, AeT und UT.

3.3.2.2 Herzfrequenzbestimmung

Die Werte vor der Belastung der Herzfrequenzen im Gruppenvergleich sind nicht signifikant unterschiedlich. Der Mittelwert der aerob-trainierten Langstreckenläufer ($91,1 \pm 16,4$) liegt unter dem der untrainierten Probanden (UT) ($95,0 \pm 10,2$) und unter dem der anaerob-trainierten Sprinter ($100,2 \pm 20,5$). Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Tab. 9: Mehrstufentest. Ergebnisse der Herzfrequenzbestimmung der Gruppen AT, AeT und UT.

Parameter	AT	AeT	UT
HF vor			
Belastung _(1/min)	100,2 ± 20,5	91,1 ± 16,4	95,0 ± 10,2
HF an			
IAS _(1/min)	179,5 ± 9,5	175,6 ± 11,5	174,0 ± 9,8
HF an			
RCP _(1/min)	184,2 ± 10,8	170,0 ± 13,8	178,0 ± 11,5
HF bei			
Ausbelastung _(1/min)	195,0 ± 9,5	189,8 ± 11,9	194,4 ± 8,4
P	UT vs. AeT	UT vs. AT	AeT vs. AT
HF vor			
Belastung _(1/min)	n.s.	n.s.	n.s.
HF an			
IAS _(1/min)	n.s.	n.s.	n.s.
HF an			
RCP _(1/min)	n.s.	n.s.	< 0,01
HF bei			
Ausbelastung _(1/min)	n.s.	n.s.	n.s.

Bei der Herzfrequenz an der aeroben Schwelle (LT) finden sich nur geringe Unterschiede zwischen den Gruppen. Die AeT weisen mit $152,1 \pm 14,6$ 1/min den niedrigsten Wert auf, gefolgt von den UT mit $156,0 \pm 11,6$ 1/min. Die Werte der AT liegen über denen der untrainierten Probanden (UT) ($160,6 \pm 11,7$ 1/min).

Ebenso unterscheiden sich die Herzfrequenzen an der IAS und bei Ausbelastung nicht signifikant.

Die erreichten Herzfrequenzen am respiratorischen Kompensationspunkt (RCP) unterscheiden sich zwischen den Gruppen der anaerob-trainierten Sprinter und der aerob-trainierten Langstreckenläufer schwach signifikant ($184,2 \pm 10,8$ 1/min und $170,0 \pm 13,8$ 1/min). Im Gegensatz dazu weisen die anaerob-trainierten Sprinter und die untrainierten Probanden (UT) ($178,0 \pm 11,5$ 1/min) sowie die aerob-trainierten Langstreckenläufer und die untrainierten Probanden (UT) keine signifikanten Unterschiede auf.

3.3.3 Ergebnisse der Spirometrie

3.3.3.1 Relative Sauerstoffaufnahme

Unter Ausbelastung zeigt sich ein schwach signifikanter Unterschied der Werte der körperrgewichtbezogenen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}/kg) der AeT ($63,4 \pm 7,9$ mmol/l/kg) gegenüber der UT ($53,8 \pm 5,0$ mmol/l/kg) (siehe Tabelle 10 und Abbildung 17).

Die Mittelwerte der Sauerstoffaufnahme der AT ($58,9 \pm 8,4$) zeigen keine signifikanten Unterschiede zu denen der UT, ebenso wie zu denen der AeT.

Bei den Laufgeschwindigkeiten an der maximalen Sauerstoffaufnahme (v an VO_{2max}) finden sich signifikante Unterschiede in allen drei Gruppen (siehe Abbildung 18). Die AeT erreicht mit einer Geschwindigkeit von $17,2 \pm 0,8$ km/h einen höheren Wert, als die AT ($15,2 \pm 1,3$ km/h) und UT ($14,1 \pm 1,1$ km/h).

Tab. 10: Mehrstufentest. Mittelwerte und Standardabweichung der $relVO_{2max}$ und der Geschwindigkeit an der VO_{2max} der Gruppen AT, AeT und UT.

Parameter	AT	AeT	UT
$relVO_{2max}$ (ml/min/kg)	$58,9 \pm 8,4$	$63,4 \pm 7,8$	$53,8 \pm 5,0$
v bei VO_{2max} (km/h)	$15,2 \pm 1,2$	$17,2 \pm 0,8$	$14,08 \pm 1,1$
P	UT vs. AeT	UT vs. AT	AeT vs. AT
$relVO_{2max}$ (ml/min/kg)	< 0,01	n.s.	n.s.
v bei VO_{2max} (km/h)	< 0,0001	< 0,01	< 0,001

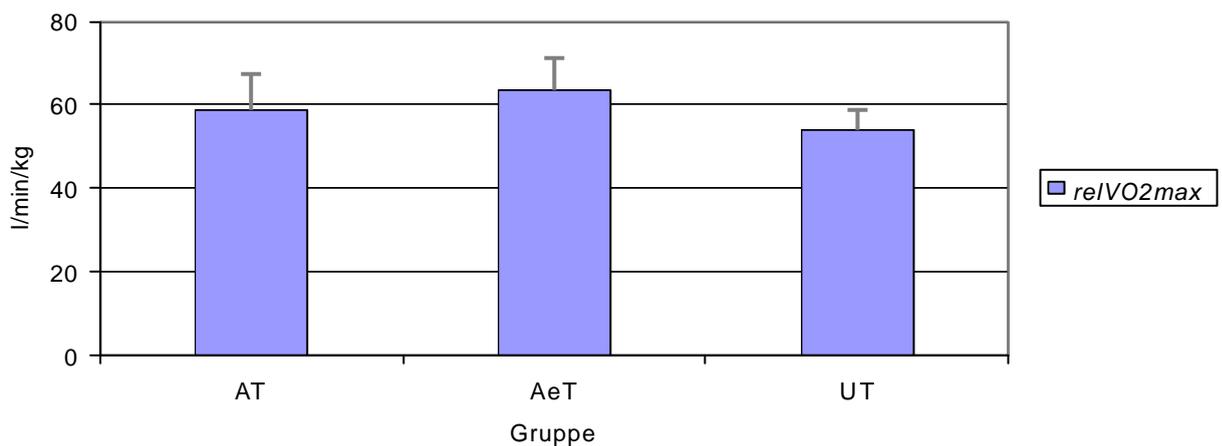


Abb. 17: Mehrstufentest. Mittelwerte und Standardabweichung der $relVO_{2max}$ der Gruppen AT, AeT und UT.

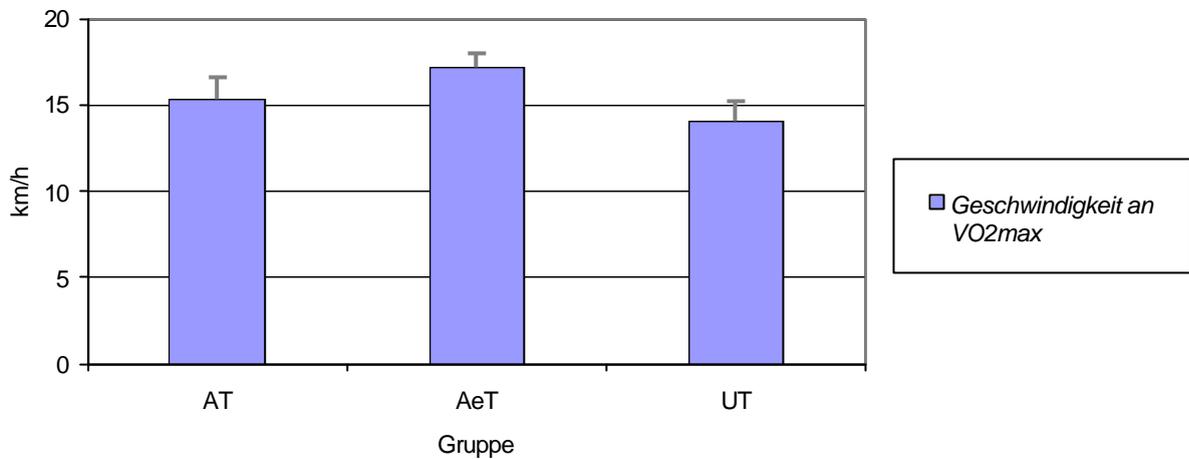


Abb. 18: Mehrstufentest. Mittelwerte und Standardabweichung der Geschwindigkeit an der VO_{2max} der Gruppen AT, AeT und UT.

3.3.3.2 Bestimmung des respiratorischen Kompensationspunktes (RCP)

Die Laufgeschwindigkeiten am respiratorischen Kompensationspunkt (RCP) zeigen bei der anaerob-trainierten Gruppe (AT) ($12,9 \pm 0,9$ km/h) keine signifikanten Unterschiede gegenüber der nicht trainierten Gruppe (UT) ($12,1 \pm 1,3$ km/h) und keine Signifikanzen zwischen der anaerob-trainierten und aerob-trainierten ($13,9 \pm 0,7$ km/h) Gruppe. Im Vergleich dazu sind die Geschwindigkeiten der aeroben- und der untrainierten Gruppe schwach signifikant (siehe Tabelle 11).

Tab.11: Mehrstufentest. Mittelwerte und Standardabweichung der Leistung am respiratorischen Kompensationspunkt (RCP).

Parameter	AT	AeT	UT
RCP _{ETCO2} (km/h)	12,9 ± 1,1	13,5 ± 1,2	11,7 ± 1,5
RCP _{VT} (km/h)	12,9 ± 0,9	13,9 ± 0,7	12,1 ± 1,3
P	UT vs. AeT	UT vs. AT	AeT vs. AT
RCP _{ETCO2} (km/h)	< 0,01	n.s.	n.s.
RCP _{VT} (km/h)	< 0,01	n.s.	n.s.

3.3.3.3 Korrelation zwischen der individuell anaeroben Schwelle (IAS) und dem respiratorischen Kompensationspunkt (RCP)

Vergleicht man die gemessene Laufgeschwindigkeit an der IAS und am RCP, so zeigen sich für alle Gruppen höhere Laufgeschwindigkeiten am RCP als an der IAS.

Besonders bei der Gruppe der anaerob-trainierten Probanden (AT) beträgt die Laufgeschwindigkeit an der IAS 108,0 ± 7,1% der Laufgeschwindigkeit am RCP. Die Werte an der IAS von den aerob-trainierten (AeT) (91,634 ± 6,3 %) und untrainierten Probanden (UT) (94,5 ± 5,9 %) dagegen weisen keine signifikanten Unterschiede im statistischen Mittel zu den Werten am RCP auf. Die Korrelationsgerade ist in Abbildung 19 dargestellt.

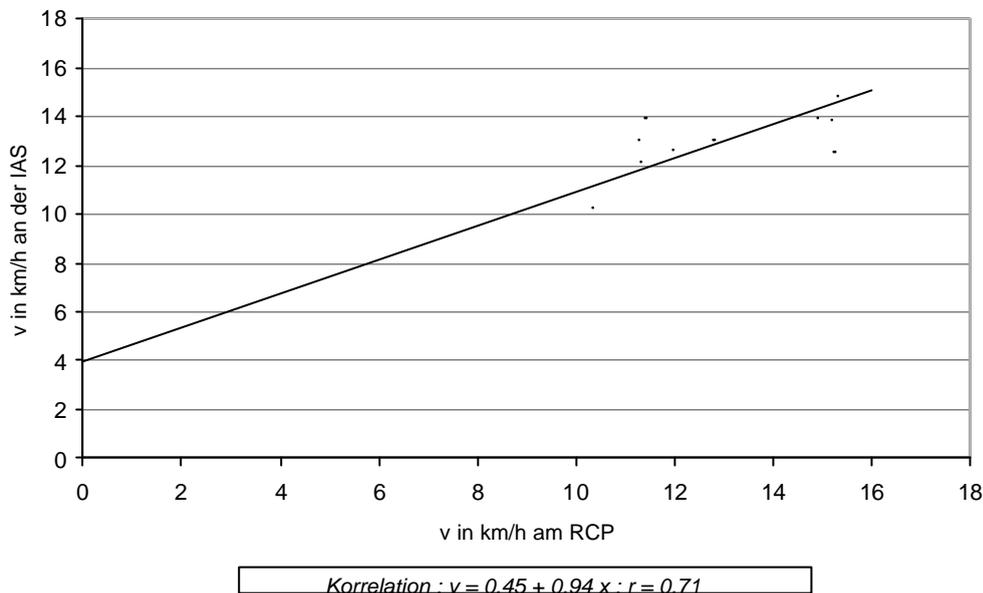


Abb. 19: Lineare Korrelation zwischen der Geschwindigkeit in km/h an der IAS und der Geschwindigkeit in km/h am RCP für das Gesamtkollektiv ($n = 30$). Die Linie entspricht der Regressionsgeraden. Das 95 % Konfidenzintervall liegt zwischen 0,45 und 0,94.

3.3.3.4 Relative funktionelle Pufferkapazität

Die relative funktionelle Pufferkapazität wurde mit Hilfe der Werte der Leistung an der LT, IAS und am RCP berechnet. Es ergab sich eine hoch signifikant höhere relative Pufferkapazität bei den anaerob-trainierten Sprintern ($32,0 \pm 2,4$) gegenüber den aerob-trainierten Langstreckenläufern ($20,1 \pm 2,6$). Ebenfalls ist die relFP der untrainierten Probanden (UT) ($27,3 \pm 4,6$) signifikant größer als die der aerob-trainierten Langstreckenläufer. Zwischen der Gruppe der untrainierten Probanden (UT) und den anaerob-trainierten Sprintern besteht ein schwach signifikanter Unterschied (siehe Tabelle 12 und Abbildung 20).

Tab. 12: Mittelwert und Standardabweichung der relativen Pufferkapazität (relFP) der Gruppen AT, AeT und UT.

Parameter	AT	AeT	UT
relFP %	32,1 ± 2,4	20,1 ± 2,6	27,3 ± 4,6
P	UT vs. AeT	UT vs. AT	AeT vs. AT
relFP %	< 0,001	< 0,01	< 0,0001

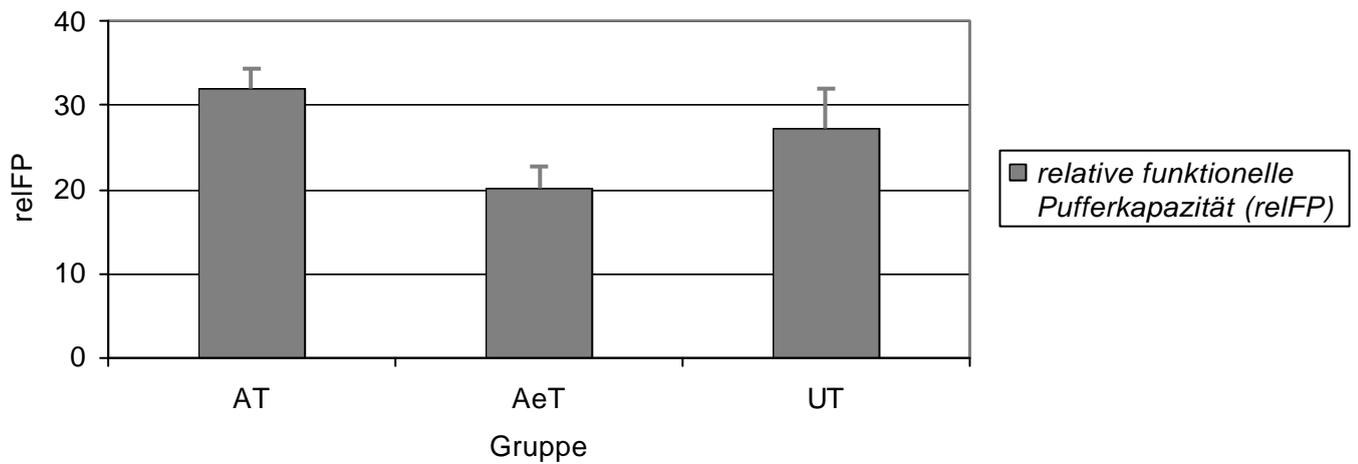


Abb. 20: Mittelwert und Standardabweichung der relativen Pufferkapazität (relFP) der Gruppen AT, AeT und UT.

3.4 Ergebnisse der Sprintserie

Zwischen den Geschwindigkeiten der höchsten Belastungsstufen gab es in den Ergebnissen zwischen den Gruppen signifikante Unterschiede.

Die anaerob-trainierten Sprinter liefen im Durchschnitt 32,0 km/h pro Stunde, die untrainierten Probanden (UT) 27,6 km/h und die aerob-trainierten Langstreckenläufer liefen 26,4 km/h.

3.4.1 Ergebnisse der Berechnung der anaeroben Kapazität

Die Berechnung der anaeroben Kapazität ergab zwischen allen drei Gruppen signifikante Unterschiede (siehe Tabelle 13). Für die AT errechnete sich die größte anaerobe Kapazität von $4,1 \pm 0,6$ kJ. Dieser Wert differiert hoch signifikant zu der erreichten anaeroben Kapazität der AeT ($1,8 \pm 0,7$ kJ) und signifikant von der anaeroben Kapazität der UT ($3,2 \pm 0,7$ kJ). Das Ergebnis ist in Abbildung 21 graphisch aufgezeigt.

Tab. 13: Sprintserie. Mittelwerte und Standardabweichung der anaeroben Kapazität der Gruppen AT, AeT und UT.

Parameter	AT	AeT	UT
anaerobe Kapazität (kJ)	$4,1 \pm 0,6$	$1,8 \pm 0,7$	$3,2 \pm 0,7$
P anaerobe Kapazität (kJ)	UT vs. AeT	UT vs. AT	AeT vs. AT
	< 0,001	< 0,01	< 0,0001

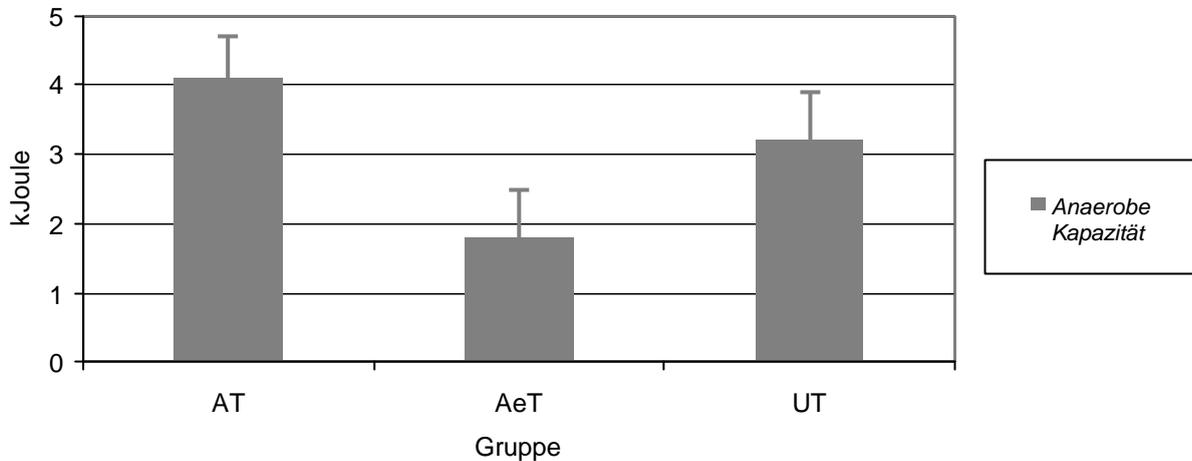


Abb. 21: Sprintserie. Mittelwert und Standardabweichung der anaeroben Kapazität der Gruppen AT, AeT und UT.

3.5 Vergleich der relativen Pufferkapazität mit der anaeroben Kapazität

Der Vergleich zwischen relativer Pufferkapazität und anaerober Kapazität ergab sowohl für die einzelnen Gruppen ($n = 10$) als auch für das Gesamtkollektiv ($n = 30$) signifikante Korrelationen. Dabei ergab sich für das Gesamtkollektiv ein Korrelationskoeffizient von $r = 0,92$ (95 % Konfidenzintervall $r = 0,85$ und $0,96$). Tendenziell zeigten die Probanden mit den niedrigeren Werten für relative Pufferkapazität und anaerobe Kapazität eine niedrigere Differenz zur Regressionsgeraden, die in Abbildung 22 dargestellt ist, als die Probanden mit den besseren Werten für die beiden Parameter.

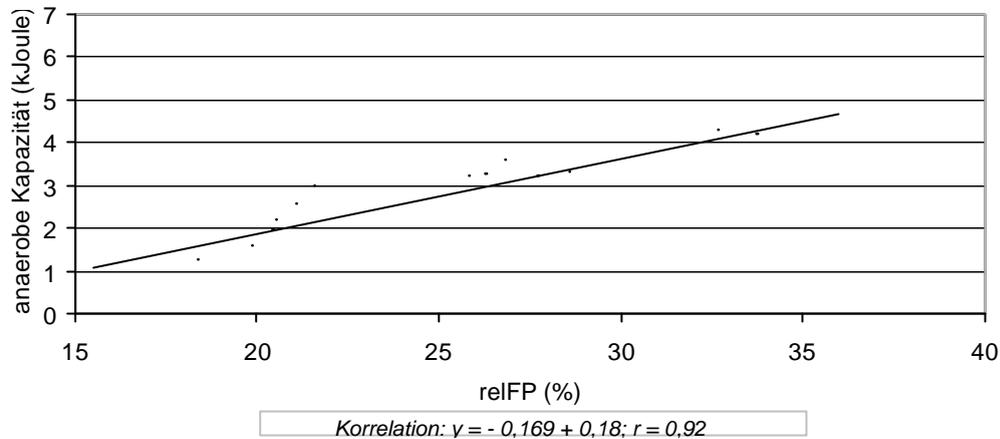


Abb.22 : Lineare Korrelation zwischen relativer funktioneller Pufferkapazität (relFP) und anaerober Kapazität (AC) für das Gesamtkollektiv ($n = 30$). Die Linie entspricht der Regressionsgeraden. Das 95 % Konfidenzintervall liegt zwischen 0,85 und 0,96.

Betrachtet man die einzelnen Kollektive getrennt, so ergibt sich für den Korrelationskoeffizienten der anaerob-trainierten Probanden ein Wert von $r = 0,62$ mit einem 95 % Konfidenzintervall für $r = -0,15$ und $0,65$ (siehe Abbildung 23).

Des Weiteren liegen die Korrelationskoeffizienten der aerob-trainierten Probanden (AT) bei $r = 0,77$ mit einem 95 % Konfidenzintervall für $r = 0,26$ und $0,94$ (siehe Abbildung 24).

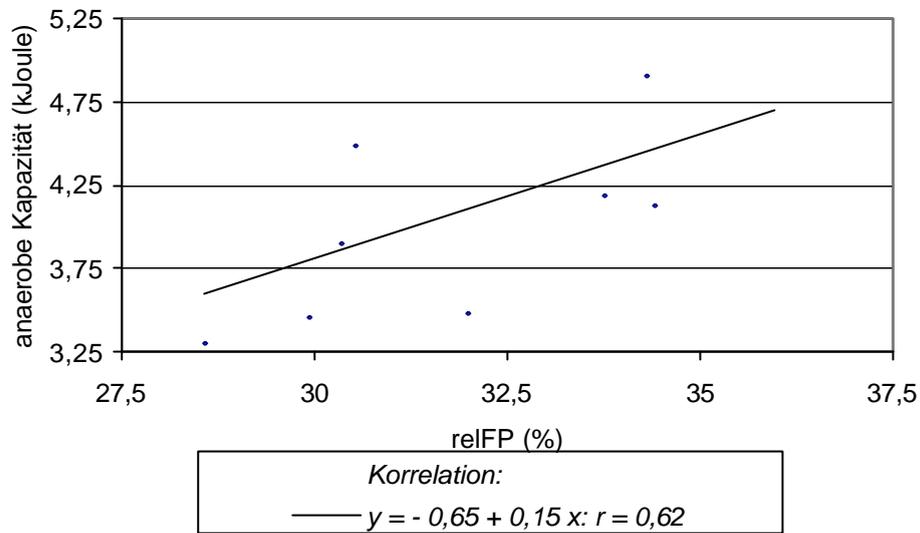


Abb. 23: Lineare Korrelation zwischen relativer funktioneller Pufferkapazität (relFP) und anaerober Kapazität (AC) für das Kollektiv AT ($n = 10$). Die Linie entspricht der Regressionsgeraden. Das 95 % Konfidenzintervall liegt zwischen 0,01 und 0,89.

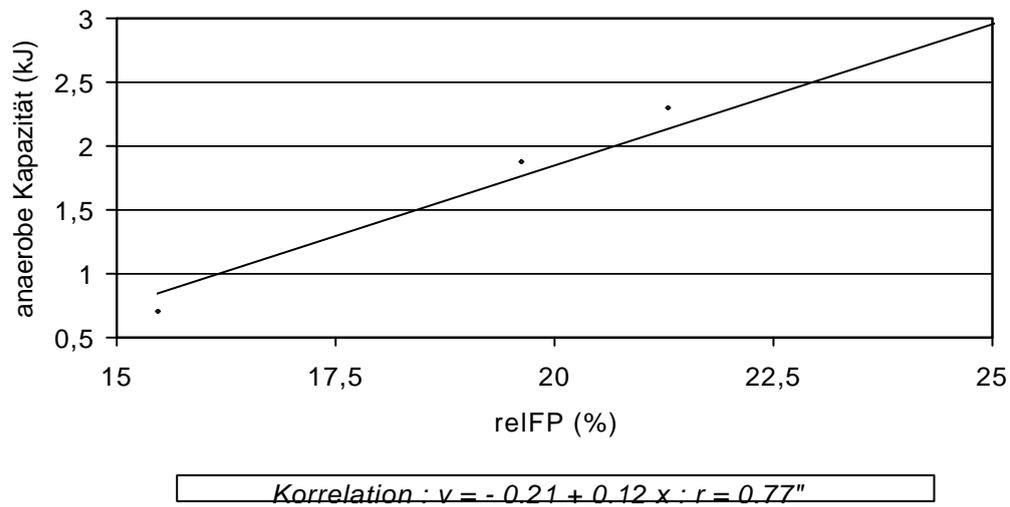


Abb. 24: Lineare Korrelation zwischen relativer funktioneller Pufferkapazität (relFP) und anaerober Kapazität (AC) für das Kollektiv AeT ($n = 10$). Die Linie entspricht der Regressionsgeraden. Das 95 % Konfidenzintervall liegt zwischen 0,26 und 0,94.

Für die Gruppe der UT liegt der Korrelationskoeffizient zwischen der relativen Pufferkapazität und der anaeroben Kapazität bei $r = 0,84$ mit einem 95 % Konfidenzintervall von $r = 0,43$ bis $r = 0,96$.

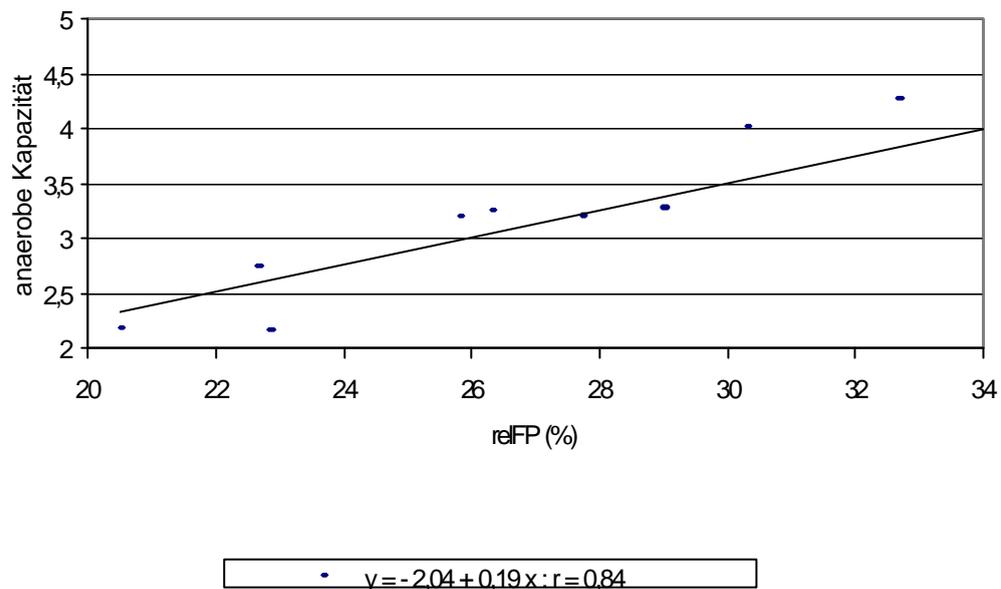


Abb. 25: Lineare Korrelation zwischen relativer funktioneller Pufferkapazität (relFP) und anaeroben Kapazität (AC) für das Kollektiv UT ($n = 10$). Die Linie entspricht der Regressionsgeraden. Das 95 % Konfidenzintervall liegt zwischen 0,43 und 0,96.

4 Diskussion

4.1 Allgemeine Anmerkungen zur anaeroben Leistungsdiagnostik

Die Möglichkeit im Laufsport Hochleistung zu bringen wird im Wesentlichen von der Kapazität und Leistungsfähigkeit der Energieliefernden Systeme der belasteten Muskulatur bestimmt (Kavanagh und Jacobs, 1988). Im Kurzstreckenbereich, 100 m bis 400 m Distanzen, wird vor allem das anaerobe Stoffwechselsystem beansprucht.

Für eine erfolgreiche Trainingsplanung ist es daher sinnvoll, Defizite in bestimmten Teilbereichen des Energiestoffwechsels festzustellen, um zielgerichtet diese Bereiche zu verbessern oder um die eingesetzten Trainingsmittel zu überprüfen (Braith et al.; 1989; Houston et al.; 1983). Die anaerobe Kapazität ist ein wesentlicher Teilbereich des Energiestoffwechsels, und ihre Bestimmung wäre daher in die Routine der leistungsdiagnostischen Untersuchung von praktischer Bedeutung.

Die Messung der anaeroben Kapazität konnte bisher nur mit aufwendigen Messverfahren bestimmt werden (Serresse et al., 1988). Eine wesentliche Ursache hierfür besteht darin, dass die benötigten Substrate des Stoffwechsels im Muskel vorliegen und nur durch invasive Methoden, wie z. B. durch die Muskelbiopsie bestimmt werden können.

Die Versuche der nichtinvasiven Bestimmung scheiterten bisher an technischen Schwierigkeiten (Spriet, 1992), da bei dem Test zur Beurteilung der anaeroben Kapazität die alaktaziden, laktaziden und oxidativen Komponenten sich nicht durch die Bestimmung von Laktat und Ausbelastungszeiten voneinander unterscheiden lassen (Mader, Heck, 1986; Heck, Schulz, 1999). Im Gegensatz dazu hat die Messung der aeroben Leistungsfähigkeit eine lange Tradition. Die Belastungsschemata der Tests werden so gestaltet, dass durch Indikatoren wie

Laktat und maximale Sauerstoffaufnahme im Wesentlichen die Leistungsfähigkeit des aeroben Energiesystems erfasst werden kann.

Da bei der Messung der anaeroben Leistungsfähigkeit im Gegensatz zur Bestimmung der aeroben Leistungsfähigkeit bisher noch keine einheitlichen und standardisierten Indikatoren und Belastungsschemata vorliegen, sollte in der vorliegenden Studie die Verwendbarkeit von Methoden der nichtinvasiven Bestimmung der anaeroben Kapazität untersucht werden (Heck et al., 1998).

4.2 Anaerobe Testverfahren

In der Literatur finden sich zahlreiche Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der anaeroben Kapazität und Leistungsfähigkeit. Eine Übersicht geben Vandewalle et al.(1987) und Green (1995). Eine Evaluation oder Vereinheitlichung der Methoden gibt es allerdings nicht.

Im Folgenden werden einige Verfahren exemplarisch vorgestellt. Die Testverfahren werden hierbei unterteilt in die Bestimmung der alaktaziden Kapazität und der laktaziden Kapazität.

4.2.1 Diagnostik der alaktaziden Kapazität

4.2.1.1 Sprinttest über 3 × 60 m nach Hellwig et al. (1988)

Es werden drei Sprinttests durchgeführt, der erste mit maximaler Geschwindigkeit und die nachfolgenden mit einer 0,5 s höheren Laufzeit. Die maximalen Laktatbelastungswerte werden in ein Geschwindigkeit–Laktatdiagramm eingezeichnet. Die Geschwindigkeit bei 6 mmol/l wird als anaerobe Kapazität festgelegt. Dies ist jedoch nur gültig, wenn maximale Laktatbildungsraten vorliegen.

4.2.1.2 Laufbandtest über 40 s nach Schnabel und Kindermann (1983)

Der Laufbandtest mit einer Geschwindigkeit von 22 km/h und einem Anstieg von 7,5 % wird nach 40 s abgebrochen. Je niedriger der maximale Nachbelastungswert liegt, desto höher ist die alaktazide Kapazität.

Die Interpretation des Testergebnisses ist schwierig, da ohne zusätzliche Messung der maximalen Sauerstoffaufnahme der Einfluss der maximalen aeroben Leistungsfähigkeit nicht möglich ist.

4.2.1.3 Verfahren nach Jeschke et al. (1997)

In Anlehnung an die Critical-Power-Methode (Monod und Scherrer, 1965) wird die maximale Belastungszeit für drei getrennt durchgeführte supramaximale Belastungen bestimmt. Die Intensitäten werden so gewählt, dass die Abbruchzeiten zwischen 15 und 35 s liegen. Aus Belastungszeit und Leistung wird die erbrachte Arbeit berechnet (Lorenz et al., 1993). In einem Belastungszeit–Arbeit–Diagramm liegen die Messwerte auf einer Geraden, deren Schnittpunkt die Ordinate bei dem Arbeitsbetrag schneidet, der mit der alaktaziden Kapazität quantitativ identisch sein soll (Jeschke et al. 1997).

4.2.2 Diagnostik der laktaziden Kapazität

Eine Diagnostik der laktaziden Kapazität ist nur eingeschränkt möglich, da sie von der alaktaziden Kapazität nicht mit einfachen Verfahren getrennt werden kann. Wird die Ausbelastungsdauer als Maß für die laktazide Kapazität herangezogen, dann ist ohne Kenntnis der maximalen aeroben Ausdauer der laktazide Anteil nicht abschätzbar.

4.2.2.1 Laufband–Ausbelastungstest nach Schnabel und Kindermann (1983)

Hier wird mit einer Geschwindigkeit von 22 km/h bei einem Anstieg von 7,5 % bis zur Erschöpfung gelaufen. Als Maß für die laktazide Kapazität wird zum einen die Belastungsdauer und zum anderen das maximale Nachbelastungslaktat herangezogen. Die mittleren maximalen Ausbelastungszeiten für 400 m-Läufer lagen bei 45 s (Kindermann, Schnabel, 1980).

Wie schon erwähnt, beeinflusst die aerobe Leistungsfähigkeit auch die Ausbelastungsdauer bei supramaximalen Tests. Daher ist die Ausbelastungsdauer ein weniger geeigneter Parameter als die maximalen Nachbelastungsparameter.

4.2.3 Diagnostik der alaktaziden und laktaziden Kapazität

4.2.3.1 Kombinationstest nach Jescke et al.(1997)

Der Test wurde in Anlehnung an die Critical–Power-Methode entwickelt. Zwischen Belastung und Ausbelastungsdauer besteht eine hyperbole Beziehung (Monod und Scherrer, 1965).

Hierbei wird eine lineare Beziehung zwischen Belastungszeit und verrichteter Arbeit beschrieben. Die Beziehung wird in einem Arbeitszeit–Diagramm aufgetragen. Der Arbeitsbetrag für $t = 0$ entspricht dem Schnittpunkt mit der Y–Achse und wird als anaerobe Kapazität definiert (Sharp et al., 1986; Gaesser et al., 1995; Monod und Scherrer, 1965).

Zur Bestimmung der anaeroben Kapazität werden drei supramaximale Belastungen durchgeführt und die Belastungszeiten gemessen. Die Intensitäten werden so gewählt, dass die Abbruchzeiten zwischen 60 s und 130 s liegen. Das weitere Vorgehen ist oben beschrieben.

Werden dieser Test und der in 4.2.1.3 beschriebene Test zur Bestimmung der alaktaziden Kapazität kombiniert, so ergibt sich die Möglichkeit, die laktazide und alaktazide Kapazität sowie den maximalen oxidativen und laktaziden Fluss zu bestimmen (Mader, 1984).

Hierzu müssen einige Kritikpunkte angebracht werden:

Das Modell der Critical-Power berücksichtigt nicht den verzögerten Anstieg der Sauerstoffaufnahme zu Beginn einer Belastung. Da das daraus resultierende Energiedefizit ebenfalls anaerob gedeckt wird, würde dies nach Heck zu einem nichtlinearen Anteil im unteren Zeitbereich mit einem höheren Wert der anaeroben Kapazität führen (Heck et al., 1998).

Des Weiteren wird der Anstieg der alaktaziden Geraden mit der Summe des oxidativen und glykolytischen Flusses gleichgesetzt. Auf Grund des verzögerten Anstiegs der Sauerstoffaufnahme werden im Messbereich von 25 bis 45 s nur etwa 60 bis 70 % der maximalen Sauerstoffaufnahme erreicht.

Die getrennte Untersuchung von alaktazider und laktazider Energiebereitstellung ist kritisch zu betrachten, da die in der Literatur noch vertretene Annahme eines chronologisch differenzierbaren Einsatzes der Energiebereitstellung heute nicht mehr haltbar ist (Röcker, 1999). Nach Hollmann und Hettinger wird eine dynamische Beanspruchung von etwa 10 s Dauer zu 85 % allein von energiereichen Phosphaten bestritten. Anschließend beginnt die anaerobe Glykolyse unter Laktatbildung die dominierende Rolle zu spielen (Hollmann und Hettinger, 1990). Welches System in der Muskulatur jedoch tatsächlich zur Geltung kommt, hängt jedoch von der Belastungsintensität ab (Sahlin, 1986; Weicker und Strobel, 1994).

4.3 Anmerkung zur Methodik

In der vorliegenden Studie wurde eine Versuchsreihe entwickelt, die sich an dem Prinzip der Critical-Power-Methode orientiert.

Der Schwerpunkt der Studie liegt in der Durchführung einer Maximalsprintserie, bei der die Laufbandgeschwindigkeit als Maß der Belastungsintensität definiert wird. Aus der Belastungsintensität wird die Arbeit mit Hilfe der Formel nach Whipp berechnet und die anaerobe Kapazität mittels Y-Schnittpunkt der Regressionsgeraden aus geleisteter Arbeit zur Laufzeit ermittelt.

In verschiedenen Studien soll sich trotz der in 4.2.3.1 beschriebenen Kritikpunkte, die Bestimmung des Y-Achsenabschnitts als zuverlässiges Verfahren erwiesen haben. Dieses beruht vor allem darauf, dass sich leistungshemmende Faktoren, wie Ischämie, Hypoxie oder Hyperoxie nicht auf die Werte des Y-Achsenabschnitts auswirken (Whipp et al., 1982 und Mortani et al., 1981).

Es werden eine Anzahl von drei Belastungen als ausreichend angesehen (Jenkins, Quingley, 1993; Housh et al., 1990; Jenkins, Quingley, 1992; Nebelsick-Guellett et al., 1988; Poole et al., 1990). Dies wurde in den letzten Jahren durch wiederholte hochintensive Belastungen unterschiedlicher Intensität auf dem Fahrradergometer (Vandewalle, Peres, 1987; Green, 1995; Monod und Scherrer, 1965; Jenkins und Quingley, 1993; Billat et al., 1995) und auf dem Laufband (Houghson et al., 1984; Billat et al., 1995) getestet.

Aus physiologischer Sicht scheint eine Belastung von 50 s maximal sinnvoll zu sein, da bei länger andauernder Belastung der aerobe Stoffwechsel entscheidenden Einfluss auf die Energiebereitstellung im menschlichen Organismus gewinnt (Green, 1995).

Zu der in 4.2.3.1 beschriebenen Kritik an der Critical-Power-Methode kommen weitere technische Probleme, die diskutiert werden müssen.

Es muss bei diesem Verfahren berücksichtigt werden, dass die Probanden sich möglicherweise auf dem Laufband weniger ausbelasten, als in einer

Wettkampfsituation, da das Kriterium der Erschöpfung motivationsabhängig ist (Vandewalle et al., 1987).

Ein weiterer Punkt ist die technische Voraussetzung, die das Laufbandergometer erfüllen muss. Zum einen muss das Laufband eine hohe Beschleunigung auf die jeweilige Testgeschwindigkeit aufweisen, zum anderen muss die Möglichkeit zur Sicherung der Probanden gegeben sein, da nur auf diese Weise das Ausbelastungsstadium bei sehr hohen Laufgeschwindigkeiten erreicht werden kann.

Von Seiten der Biomechanik werden Differenzen der zu untersuchenden Parameter zwischen dem Laufen auf dem Laufband und auf der Straße bzw. auf der Tartanbahn angegeben (Wank et al., 1998). Die Autoren stellen Unterschiede im Hüftgelenk- und Kniegelenkwinkel fest, die schon bei Geschwindigkeiten von 6 km/h deutlich sind. Wie groß die Unterschiede bei viel höheren Geschwindigkeiten sind, muß jedoch noch durch weitere Studien festgestellt werden.

4.3.1 Anmerkung zum Schnelligkeitstest

Das Messverfahren des Schnelligkeitstests wurde an die Gegebenheiten einer Standardsporthalle angepasst. Da aber bei einem 100 m-Lauf ein Beschleunigungsabschnitt von bis zu 60 m gemessen werden kann (Jonath et al., 1983), wird für die Maximalgeschwindigkeit ein Wert errechnet, der sich auf den positiven Beschleunigungsabschnitt bezieht. Die Ergebnisse liegen somit unterhalb der Maximalgeschwindigkeit.

Im Rahmen einer sportmedizinischen, leistungsdiagnostischen Routineuntersuchung könnte daher die Maximalgeschwindigkeit von der aktuellen 100 m-Bestzeit abgeleitet werden.

4.3.2 Anmerkung zum Mehrstufentest und $VO_{2\max}$ -Test

Diese Verfahren wurden durchgeführt, da zur Bestimmung der anaeroben Kapazität eine Belastungsintensität erreicht werden sollte, die deutlich über der Leistung an der maximalen Sauerstoffaufnahme liegt, was deren Kenntnis voraussetzt.

Vergleicht man das Ergebniss des Gesamtkollektivs des Rampentests mit denen des Mehrstufentests, so kann auf die Durchführung hinsichtlich der Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme verzichtet werden. In dieser Testreihe wurde die $VO_{2\max}$ bestimmt, um eine Belastungsstufe festzulegen, bei der die Probanden eine submaximale Belastung, deren Energiebereitstellung anaerob erfolgt, erbringen müssen.

Um das Testverfahren zu vereinfachen, wäre es möglich, auf die Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme zu verzichten, d. h. der Rampentest und der Mehrstufentest müssen nicht durchgeführt werden. Stattdessen könnte aus der Maximalgeschwindigkeit die Stufe der Sprinttestserie, mit der begonnen werden soll, berechnet werden. Somit wäre das Festsetzen einer submaximalen Belastungsgrenze vereinfacht.

4.4 Ergebnisse der anaeroben Kapazität

Die Werte der anaeroben Kapazität zeigen in der vorliegenden Studie signifikante Unterschiede (siehe 3.4.1). Die Gruppe der anaeroben Sprinter hat deutlich höhere Werte aufzuweisen.

Die ermittelten Mittelwerte stimmen bei den anaerob-trainierten Probanden mit 4,1kJ mit den bisherigen Literaturdaten überein. Es werden aus Hochrechnungen des Kreatinphosphat-Gehaltes Werte zwischen 5 kJ und 10 kJ als realistisch angesehen (Lorenz et al., 1993; Gastin, 1994). Die Werte der aerob-trainierten und der untrainierten Athleten sind mit 1,8 kJ etwas zu niedrig.

Daraus kann man schließen, dass das Testverfahren qualitativ die anaerobe Kapazität bestimmt, da das Leistungsvermögen von Kurzstreckenathleten von ihrer anaeroben Leistungsfähigkeit abhängt.

Dieses lässt sich unter anderem durch eine genetisch determinierte Muskelfaserstruktur erklären (Schmidt und Thews, 1997). Es handelt sich hierbei um sogenannte fast-twitch oder weiße Muskelfasern, die vor allem für Kraftausdauer- und Schnelligkeitsbelastungen geeignet sind. Die Farbe des Muskels ist durch seinen Gehalt an Myoglobin bedingt, einem Hämoglobin ähnlichen Stoff, das der O₂-Aufnahme in die Muskelzelle dient. Es werden myoglobinreiche und myoglobinarmer Muskeln unterschieden, deren Fasern sich funktionell und strukturell besonders aber biochemisch unterscheiden. Unterschiedlich ist vor allem der Gehalt an Enzymen des oxidativen bzw. glykolytischen Stoffwechsels und die Aktivität der Myosin-ATPase (Schmidt und Thews, 1997). Die schnellen weißen Muskeln bestehen vorwiegend aus Typ IIA- und Typ IIB-Fasern, deren Myosin eine hohe ATPase-Aktivität aufweist. Da sie bei der Kontraktion sehr viel ATP spalten und damit sehr viel Energie umsetzen, ermüden sie schneller als die Typ I-Fasern. Insbesondere die glykolytischen weißen Muskelfasern (Typ IIB) sind für lange und kontinuierliche Leistungen ungeeignet, da sie das ATP hauptsächlich auf anaerobem Weg gewinnen und dabei Laktat akkumulieren. Man kann folglich annehmen, dass die anaerob-trainierten Athleten genetisch bedingt einen höheren Anteil dieser Muskelgruppen besitzen und dass dieser schon vorhandene Anteil speziell trainiert und gefördert wurde und gefördert werden kann (Simoneau et al., 1986). Eine Zusammenfassung der unterschiedlichen Skelkettmuskelfasern ist in Tabelle 14 dargestellt.

Tab. 14: Einteilung der Skelettmuskelfasertypen

Fasertyp	IIB	IIA	I
Farbe	weiß	weiß	rot
Kontraktionsform	schnelle Zuckung	schnelle Zuckung	langsame Zuckung
Ermüdbarkeit	rasch	mittel	gering
Stoffwechsel	glykolytisch	glykolytisch und oxidativ	oxidativ
Myosin-ATPase Aktivität	hoch	hoch	niedrig
Laktatdehydrogenaseaktivität	hoch	mittel oder hoch	niedrig

Die aerob-trainierten Langstreckenläufer hingegen weisen einen höheren Anteil von slow-twitch Muskelfasern, die sogenannten roten Muskeln, die hauptsächlich Typ I-Muskelfasern mit einer niedrigen Myosin-ATPase-Aktivität enthalten. Sie arbeiten weniger schnell, sind aber besonders für ein sehr langes und energiesparendes Leistungsvermögen geeignet (Schmidt und Thews, 1997). Diese Muskelgruppe wird vor allem durch spezielles Ausdauertraining gefördert. Folglich besitzen die aerob-trainierten Athleten eine geringe anaerobe Kapazität; sie können auf Grund ihrer Muskelstruktur langwehrenden Belastungen länger standhalten, welche andere Leistungsfähigkeiten beanspruchen, wie z. B. eine hohe maximale Sauerstoffaufnahme sowie eine hohe Dauerleistungsgrenze.

Die Gruppe der untrainierten Probanden weist eine mittlere anaerobe Kapazität auf, was darauf hindeutet, dass sie weder die slow-twitch Muskulatur, noch die fast-twitch Muskulatur speziell fördern und trainieren.

4.5 Allgemeine Anmerkung zur Pufferkapazität

Der Vorgang der Pufferung ist ein Faktor, der die Leistung bei Kurz- und Mittelzeitbelastung mit beeinflusst, indem er die Belastungsazidose kompensiert.

Die Azidose ist ein wesentlicher leistungslimitierender Faktor bei der Energiebereitstellung unter Belastung. Die Pufferung ist hierbei ein spezifischer Kompensationsmechanismus der Azidose.

Der Mechanismus der pathophysiologischen Wirkung der leistungslimitierenden Azidose ist bekannt und vielfach untersucht worden: Die Aktivität der Phosphofruktokinase, das Enzym der Glykolyse sinkt proportional mit der zunehmenden H^+ -Konzentration in der Zelle (Trivedi, Danford, 1966). Eine deutliche Enzymhemmung wird bei einem pH-Wert von 6,3 beobachtet (Sutton et al., 1981). Dies hat zur Folge, dass der Muskeltonus sich ungünstig verändert (Garg, Fretthold, 1978, Fabiato, 1978). Ebenso binden sich vermindert Calciumionen an die kontraktilen Proteine (Parkhouse et al., 1985; Fuchs, 1979), und die neuromuskuläre Erregungsübertragung ist beeinträchtigt.

Das Wettkampfleistungsvermögen der 100 bis 400 m-Läufer wird vor allem durch anaerobe Energiebereitstellung bestritten, so dass die Pufferkapazität als leistungsbeeinflussender Faktor angesehen werden kann (Neville et al., 1989), der trainierbar ist und zu weiteren Leistungssteigerungen führen kann (McKenzie et al., 1982).

4.6 Bestimmung der Pufferkapazität

Die Größe der Pufferkapazität ist vielfach untersucht. So konnten Sharp et al. in einem Trainingsversuch durch Muskelbiopsie einen Anstieg der Pufferkapazität nach einem speziellen Sprinttraining nachweisen, auf den einen spezifischen Leistungsanstieg zurückgeführt wurde (Sharp et al., 1986; Costill et al., 1983). Hinsichtlich dieses Verfahrens sind jedoch einige Kritikpunkte anzuführen:

Die Anwendung von Muskelbiopsien ist in der Routinediagnostik aus methodischen, ethischen und medizinischen Gründen nicht geeignet (Röcker et al., 1990).

Ein weiterer Punkt ist die Bestimmung der Pufferkapazität in Ruhe, die bei der Anwendung der Biopsie dargestellt wird. Hierbei wird nur die intrazelluläre Bicarbonatmenge und nicht die Menge im Extrazellularraum und die Mengen der anderen Puffersysteme gemessen, was nicht den Verhältnissen unter Belastung entspricht.

Des Weiteren resultiert durch eine Belastung eine vermehrte Ausschöpfung von Sauerstoff im Hämoglobin, was zu einem Anstieg der arterio-venösen Sauerstoffdifferenz führt. Dadurch verbessert sich die Pufferwirkung, was in Ruhe nicht erfasst wird (Röcker et al., 1994).

Um diese Nachteile zu umgehen wurden weitere Methoden entwickelt, die nichtinvasiv aber direkt die Pufferkapazität unter Verwendung eines Spiroergometers bestimmen.

Bei einer dieser Methoden wird über die Messgröße Ventilation (V_T) oder endexpiratorische CO_2 -Konzentration ($ETCO_2$) der Punkt der respiratorischen Kompensation (RCP) gemessen, der den Beginn einer verstärkten Atmung signalisiert. Der RCP charakterisiert eine submaximale Belastungsintensität, die im Bereich der Langzeitausdauer und damit in der gleichen Größenordnung wie die laktatbestimmte anaerobe Schwelle liegt (Beaver et al., 1986; Coyle, 1995; Dickhuth et al., 1998). Die so bestimmte Dauerleistungsgrenze zeigt eine enge Korrelation zur maximalen Sauerstoffaufnahme pro kg, berücksichtigt aber auch mögliche Kompensationsmechanismen und Einflussgrößen wie die

Pufferkapazität, den Laktatmetabolismus und die hormonell vegetative Reaktion (Whipp et al., 1989; Röcker et al., 1994; Coyle, 1995; Dickhuth et al., 1998).

Zur Bestimmung des RCPs können verschiedene Methoden angewendet werden. In Kapitel 2.5.3 ist die Berechnung der Pufferkapazität mittels der endalveolären CO_2 -Konzentration (ETCO_2) und der Ventilation (VT) beschrieben.

Zwei weitere Methoden ergeben sich aus der Bestimmung des Punktes des überproportionalen Anstiegs des Atemvolumens (VE) oder die Erfassung transkutaner und arterieller Werte für pCO_2 (Röcker et al., 1994; Steinacker und Röcker, 1987).

Allerdings erscheint die in dieser Studie verwendete Methode, die Messung der Gaskonzentration in der Breath-by-Breath-Analyse mit einem schnellen Massenspektrometer (siehe Kapitel 4.8) zuverlässiger als die Messung der atemvolumenabhängigen Parameter VE, VCO_2 und VO_2 , da das ETCO_2 vom Atemvolumen und Flowmeter unabhängig gemessen wird und so äußere Einflussgrößen eine geringe Rolle spielen.

4.7 Anmerkung zur Bestimmung der Pufferkapazität

Die spiroergometrische Messeinrichtung zur Messung von Atemgasparametern muss mit der Bewegungsamplitude des Probanden mitbewegt werden, da eine objektive Messung der Belastungsgrenzen nur möglich ist, wenn Laufrhythmus und Koordination uneingeschränkt möglich sind. Bei dieser Studie wurde eine Aufhängung verwendet, die sich bei früheren Studien als sehr geeignet erwies, da sie den Bewegungsformen auf dem Laufband angepasst wurde (Striegel, 1996).

Was die Messungenauigkeiten betrifft, so lieferte die Messeinrichtung zur Bestimmung der Atemgasparameter unter Ruhebedingungen und unter niedrigen Belastungsintensitäten Werte, mit einem Korrelationskoeffizienten von

3–6 %. Diese kommen hauptsächlich durch den erhöhten Ausatemwiderstand durch das Flowmeter mit eingebautem Sieb zustande. Bei höheren Belastungen erreichte der Ausatemwiderstand nicht unwesentliche Werte von 3mmHg. Nach Böhme ist eine unbehinderte Atmung erst unterhalb eines Atemwiderstandes von 40 pa (l / s) möglich (Böhme, 1981). Auch unter verbesserten Systemen, wie unter Verwendung von Ultraschallflowmetern ohne jeglichen Widerstand, kommt es zu Ungenauigkeiten durch die Verschmutzung von Expectorans und Feuchtigkeit.

Im Gegensatz dazu liefert das Massenspektrometer einen Variationskoeffizient von ca. 0,1 % unter Verwendung eines geeigneten Kalibrationsgases und eignet sich somit gut zur Bestimmung des Punktes der respiratorischen Kompensation und der relativen funktionellen Pufferkapazität.

4.8 Ergebnisse der Pufferkapazität

Ebenso wie bei der anaeroben Kapazität weisen die anaeroben Sprinter eine signifikant höhere relative Pufferkapazität gegenüber den aeroben Langstreckenläufern auf. D. h., unterschiedlich trainierte Kollektive lassen sich mit Hilfe der Pufferkapazität unterscheiden. Hier kann wieder die spezifische fast-twitch Muskulatur als eine Ursache angeführt werden, genauso wie ein höherer Gehalt an pufferaktiven Proteinen in dieser Muskulatur (Parkhouse, 1985).

Die gemessene geringe Pufferkapazität der aerob-trainierten Langstreckenläufer durch Ausdauertraining bestätigt diese Auffassung (Hirakoba et al., 1992; Bell und Wenger, 1988).

4.9 Ein Vergleich von anaerober Kapazität und Pufferkapazität

Wie in Kapitel 3.5 dargestellt ergab sich ein Korrelationskoeffizient von 0,92 für das Gesamtkollektiv ($n = 30$) zwischen anaerober Kapazität und relativer Pufferkapazität.

Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass sich die verschiedenen Kollektive mittels anaerober Kapazität und relativer Pufferkapazität in etwa gleich gut unterscheiden lassen.

Die Korrelationskoeffizienten der einzelnen Kollektive ergaben für die anaerob-trainierten Sprinter (AT) $r = 0,62$; für die aerob-trainierten Langstreckenläufer (AeT) $r = 0,77$ und für die untrainierten Athleten (UT) $r = 0,84$.

Die Werte weisen eine erhöhte Messungenauigkeit bei der Gruppe der AT bei höheren Geschwindigkeiten auf, die durch Koordinationsprobleme auf dem Laufbandergometer bei hohen Geschwindigkeiten zustande kommen könnte. Eine weitere Möglichkeit wäre eine zu große Behinderung durch die Sicherungsvorrichtung, die bei diesen Geschwindigkeiten notwendig ist. Des Weiteren kann der Belastungsabbruch bei subjektiver Ermüdung eine enorme Rolle spielen: Die Belastung auf dem Laufband entspricht zudem nicht ganz der Situation im Wettkampf, bei dem noch motivationsabhängig entscheidende Kraftreserven mobilisiert werden können.

Aus praktischer Sicht hängt insbesondere die Wahl eines Testverfahrens von der Verwendbarkeit der Ergebnisse für Trainer und Sportler, sowie der Praktikabilität des Testverfahrens innerhalb eines Untersuchungstages ab. Auf Grund der Ergebnisse der vorliegenden Studie ließe sich in Zukunft das Testverfahren so vereinfachen, dass die anaerobe Kapazität innerhalb eines Testtages bestimmt werden könnte. Die Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme könnte entfallen und die maximale Laufgeschwindigkeit ließe sich aus der 100 m-Bestzeit berechnen, wobei die Sprinttestserie an dem Versuchstag erfolgen könnte oder anamnestische Daten verwendet werden könnten.

Trotz der oben genannten Schwierigkeiten ist die Unterscheidung von verschiedenen trainierten Kollektiven mit beiden Verfahren möglich, und damit auch im Talentsichtungsbereich, einsetzbar.

Das vorliegende Verfahren scheint, abgesehen von der theoretischen Diskussion um die Critical–Power-Methode unter Berücksichtigung von Laufzeiten bis maximal 50 Sekunden, eine Methode zur Bestimmung der laufspezifischen anaeroben Kapazität darzustellen.

Allerdings ist zum jetzigen Zeitpunkt eine Standardisierung auf Grund von den in Kapitel 4.3 beschriebenen theoretischen und in Kapitel 4.2.3.1 beschriebenen methodischen Schwierigkeiten und den hieraus resultierenden Messungenauigkeiten nicht möglich und Athleten können innerhalb eines Kollektives kaum differenziert werden.

In weiteren Studien wäre außerdem zu klären, ob sich mit dem vorgestellten Verfahren individuelle Veränderungen der anaeroben Kapazität im Saisonverlauf (Längsschnitt) darstellen lassen, und ob diese Veränderungen einen Zusammenhang zu den entsprechend erzielten Wettkampfleistungen zeigen. In diesem Fall könnte die Bestimmung der anaeroben Kapazität Teil einer komplexen Leistungsdiagnostik darstellen und auch zum Einsatz im Rahmen der Trainingssteuerung geeignet sein. Da, wie oben erwähnt, bisher die Messungenauigkeiten zu groß sind, ist eine Differenzierung individuell für jeden Athleten im Jahresverlauf nicht möglich. Daher ist der Einsatz des Verfahrens bisher im Rahmen von einer Trainingsplanung und Steuerung nicht sinnvoll.

Des Weiteren ist zu prüfen, ob die etwas einfachere Methode, wie zum Beispiel die Bestimmung der relativen Pufferkapazität, ausreicht, um von ihren Werten auf die anaerobe Kapazität schließen zu können.

4.10 Schlussfolgerungen

Aus den obigen Ausführungen ergeben sich zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen.

- I. Das Erreichen von individuellen maximalen Wettkampfleistungen im Kurzzeit- und Mittelzeitbereich ist entscheidend von der Verfügbarkeit des anaeroben Stoffwechsels abhängig.
- II. Anaerob-trainierte Probanden zeigen eine spezifische Anpassung an die Wettkampfbelastungsform durch Verbesserung der Pufferkapazität und der anaeroben Kapazität.
- III. Das vorliegende Verfahren kann mittels Bestimmung der anaeroben Kapazität Unterschiede zwischen anaerob-trainierten Sprintern und Langzeitausdauerathleten feststellen.
- IV. Somit ist ein entsprechender Einsatz im Talentsichtungsbereich möglich
- V. Auf Grund von theoretischen und methodisch-praktischen Schwierigkeiten und der hieraus resultierenden Messungenauigkeiten ist eine Standardisierung zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich.
- VI. Eine Differenzierung innerhalb einer Gruppe scheint zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich.
- VII. Derzeit ist somit auf Grund von technischen Schwierigkeiten und der methodischen Problematik der Critical-Power-Methode kein Einsatz im Rahmen einer Trainingsplanung und Steuerung möglich.

5 Zusammenfassung

Die Objektivierung der anaeroben Kapazität konnte bisher kaum verwirklicht werden, spielt aber in Kurz- und Mitteldistanzdisziplinen eine entscheidende Rolle für den Wettkampferfolg.

Um eine neue Methode zur Quantifizierung der anaeroben Kapazität auf die spezifische Leistungsfähigkeit zu prüfen, wurden drei Probandenkollektive mit definierter Adaptation [Untrainierte (UT, $n = 10$); aerob-trainierte Langstreckenläufer (AeT, $n = 10$) und anaerob-trainierte Sprinter (AT, $n = 10$)] einem Rampentest, einem Mehrstufentest und einer Maximalsprintserie unterzogen.

Der Schnelligkeitstest und der spiroergometrische Rampentest legten den Belastungsrahmen für die Sprinttestserie fest. Der Mehrstufentest diente der Einschätzung des aeroben Laufvermögens und der Bestimmung der relativen Pufferkapazität.

Die Ergebnisse der Sprinttestserie wurden als Arbeitssumme dargestellt. Der Arbeitsbetrag bei $t = 0$ entsprach dem Y-Achsenabschnitt und wurde als anaerobe Kapazität interpretiert.

Verglichen wurden die anaerobe Kapazität mit der relativen Pufferkapazität. Als Maß für den Start der Pufferung wurde die Leistung an der LT verwendet. Als Endpunkt wurde der Beginn der respiratorischen Kompensation der Belastungsazidose (RCP) angenommen. Die Angabe der relFP erfolgte als prozentualer Anteil der Pufferung an der Leistung am RCP.

Die Gruppe AT und AeT zeigten hinsichtlich ihrer maximalen Leistungsdaten keine wesentlichen Unterschiede ($Laktat_{max}$, V_{max} , VO_{2max}). Auch für die Laufgeschwindigkeiten am RCP fanden sich keine signifikanten Unterschiede. Jedoch erreichte die Gruppe der AT signifikant höhere Werte der relFP und der anaeroben Kapazität.

Hinsichtlich der Korrelationskoeffizienten der relativen Pufferkapazität und der anaeroben Kapazität ergab sich für das Gesamtkollektiv eine signifikante

Korrelation ($r = 0,92$). Der Vergleich der relativen Pufferkapazität und der anaeroben Kapazität innerhalb der einzelnen Gruppen, ergab schwach signifikante Korrelationen ($AT \Rightarrow r = 0,62$; $AeT \Rightarrow r = 0,77$ und $UT \Rightarrow r = 0,84$).

Daraus ergibt sich ein Testverfahren, welches die Kollektive der Kurz- und Mitteldistanzathleten von Langausdauerathleten mittels Bestimmung der anaeroben Kapazität voneinander unterscheiden lassen kann. Ein entsprechender Einsatz, vor allem im Talentsichtungsbereich, könnte nach Abklärung weiterer Aspekte sinnvoll sein.

Das Testverfahren kann so vereinfacht werden, dass die Bestimmung der anaeroben Kapazität in kurzer Zeit und mit relativ wenigen Tests möglich ist.

Durch technische Schwierigkeiten auftretende Messungenauigkeiten machen eine Standardisierung zum jetzigen Zeitpunkt unmöglich. Insbesondere eine Differenzierung innerhalb eines Kollektives ist nicht möglich, so dass ein Einsatz des Verfahrens in der Trainingsplanung und Steuerung derzeit noch keinen sinnvollen Einsatz darstellt.

LITERATUR

1. Astrand P. O., Rodahl K.: Textbook of work physiology physiological bases of exercise. McGraw-Hill, New York (1977).
2. Bangsbo J., Gollnick P. D., Graham T. E., Juel C., Kiens B., Mizumo M., Saltin B.: Anaerobic energy production and O₂-deficit-dept relationship during exhaustive exercise in humans. *J Physiol Lond* 42 (1990): 539-559.
3. Beaver W. L., Lamarra, N., Wassermann K: Breath-by-Breath measurement of true alveolar gas exchange. *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol.* 51 (1981): 1662-1675.
4. Beaver W. L., Wassermann K., Whipp B. J.: Improved detection of the lactate threshold during exercise using a log-to-log transformation. *J. Appl. Physiol.* 59 (1986): 1936-1940.
5. Beaver W. L., Wassermann K.: Muscle RQ and lactate accumulation from analysis of the VCO₂-VO₂ relationship during exercise. *Clin J Sports Med* 1 (1991): 27–34.
6. Bell G. J., Wenger H. A.: The effect of one-legged sprint training in intramuscular pH and nonbicarbonate buffering capacity. *Eur. J. Appl. Physiol.* 58 (1-2) (1988):158-164.
7. Billat V., Renoux J. C., Pinoteau J., Petit B., Koralstein J. P.: Times to exhaustion at 90, 100 and 105 % of velocity at VO_{2max} (maximal aerobic speed) and critical speed in elite long-distance runners. *Arch Physiol Biochem* 103 (2) (1995): 129-135.
8. Böhme P.: Zulässige Grenzwerte technischer Atemwiderstände bei Gasstoffwechsel Untersuchungen auf dem Fahrradergometer an Hochleistungssportlern. Inaug. Diss.; Technische Hochschule Illmenau (1981).
9. Braith R. W., Graves J. E., Pollok M. L., Leggett S. L., Carpenter D. M., Colvin A. B.: Comparison of 2 vs 3 days/week of variable resistance training during 10- and 18-week programs. *Int J Sports Med* 10 (1989): 450-454.
10. Bulbulian R., Wilcox A. R., Darabos B. L.: Anaerobic contribution to the distance running performance of trained cross-country athletes. *Med Sci Sports Exerc* 18 (1986): 107-113.
11. Costill D. L., Sharp P. L., Rink W. L., Katz A.: Determination of human Muscle pH in Needle Biopsy Specimens. *J Appl Physiol Respirat* 53 (1983): 1310–1313.
12. Coyle E. F.: Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exerc Sport Sci Rev* 23 (1995): 25–3.

13. Dickhuth H.-H., Heitkamp C. H., Mayer F., Aufenager W., Keul J.: Sportmedizinische Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung. Leistungssport. Herausforderung für die Sportwissenschaft (111-112). Karl-Hoffmann Verlag Schorndorf 1991 (a).
14. Dickhuth H.-H., Röcker K., Nieß A., Striegel H., Heitkamp H. C.: Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung. Sportorthopädie- Sporttraumatologie 14.4 (1998): 176–180.
15. Dickhuth H.-H., Yinn L., Nieß A., Röcker K., Mayer F., Heitkamp H. C.: Ventilatory Lactate-derived and catecholamine thresholds during incremental treadmill running: relationship and reproducibility. Int J Sports Med (Germany), Feb 1999, 20(2): 122-7.
16. Dickhuth H.-H., Huonker M., Muenzel T., Drexler H., Berg A., Keul J.: Individual anaerobic threshold for evaluation of competitive athletes and patients with left ventricular dysfunction in: Bachl N., Graham T., Loellgen H. (eds): Advances in ergometry. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New-York 1991 (b): pp 173-179.
17. Fabiato A., Fabiato F.: Effects of pH on the myofillaments and the sarcoplasmic reticulum of skinned cells from cardiac and skeletal muscle. J Physiol (1978): 233–55.
18. Fairshter R., Walter L., Salness K., Fox M, Minah V., Wilson A.: A comparison of incremental exercise tests during cycle and treadmill ergometry. Medicine and science in sports and exercise, Vol. 15 (1983): 549-554.
19. Foster C.: VO_{2max} and training indices as determinants of running performance. J Sports Sci 1 (1983): 13–22.
20. Fuchs F.: The relationship between pH and the amount of calcium bound to glycerinated muscle fibers. Biochem Biophys Acta 585 (1979): 477-479.
21. Gaesser G. A., Carnevale T. J., Garfinkel A., Walter D. O., Womack C. J.: Estimation of critical power with non-linear and linear models. Med Sci Sports Exerc 27 (1995): 1430-1438.
22. Gaesser G. A., Wilson L. A.: Effects of continuous and interval training on the parameters of the power-endurance time relationship for high-intensity exercise. Int J Sports Med 9 (1988): 417-421.
23. Garg L. C., Fretthold D. W.: The effects of acid-base changes on skeletal muscle twitch tension. V can J Physiol Pharmacol 56 (1978): 545–549.
24. Gastin, P. B.: Quantification of anaerobic capacity. Scand J Med Sci Sports 4 (1994): 91–112.
25. Gladden L. B.: Current “anaerobic threshold” controversies. Physiologist 27 (1984): 312.

26. Green S., Dawson B. T., Goodman C., Carey M. F.: Y-intercept of the maximal work- duration relationships and anaerobic capacity in cyclists. *Eur J Appl Physiol* 69 (1994): 550-556.
27. Green S.: Measurement of anaerobic Work Capacities in Humans. *Sports Med* 19 (1995): (1) 32-4.
28. Grosser M., Starischka St.: *Konditionstests*, BLV München-Wien-Zürich (1986).
29. Hagberg J. M.: Physical implications of the lactate threshold. *Int Sports Med* 5 (1984): 106–109.
30. Heck H., Mader A., Schulz H.: Grundlagen der anaeroben Leistungsdiagnostik. *Dt. Zeitung Sportmed* 49 (6) (1998): 39–44.
31. Heck H., Schulz H.: Validitätsprobleme der Critical-Power-Methode nach Monod / Scherrer und abgeleitete Testverfahren. *Dt. Z Sportmed Sonderheft* (1999):27.
32. Hellwig T., Liesen H.; Mader A., Hollmann W.: Möglichkeiten einer sprintspezifischen Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung mit Hilfe der Blutlaktatkonzentration. *Deutsche Z. Sportmed.* 30 (1988): 392-406.
33. Hirakoba K., Maruyama A., Inaki M., Misaka K.: Effect of endurance training on excessive CO₂ expiration due to lactate production in exercise. *Eur J Appl Physiol* 64 (1992): 73-77.
34. Hollmann W., Hettinger Th.: *Sportmedizin Arbeits- und Trainings-grundlagen*. Stuttgart-New York (1990).
35. Housh D. J., Housh T. J., Bange S. M.: A methodological consideration for the determination of critical power and anaerobic work capacity. *Res Q Exerc Sport* 61 (1990): 406-409.
36. Houston M. E., Froese E. A., Valeriote St. P., Green H. J., Ranney D. A.: Muscle performance, morphology and metabolic capacity during strength training and detraining: a one leg model. *Eur J Appl Physiol* 51 (1983): 25-35.
37. Howley E., Basset D. R., Welch H. G.: Criteria for maximal oxygen-uptake. Review and commentary. *Med Sci Sports Exerc* 27 (1995): 1292–1301.
38. Hughson R. L., Orok C. J., Staudt L. E.: A high velocity treadmill running test to assess endurance running potential. *Int J Sports Med* 5 (1984): 23-35.
39. Jenkins D. G., Quigley B. M.: Endurance training enhances critical power. *Med Sci Sports Exerc* (1992):1283-1289.
40. Jenkins D. G., Quigley B. M.: The influence of high-intensity exercise training on the Wlim-Tlim relationship. *Med Sci Sports Exerc* 25 (1993): 275-282.
41. Jeschke D., Lorenz R., Fay H.: Diagnostik der Stoffwechselkapazität bei kurzzeitigen Maximalbelastungen. In *Bundesinstitut für Sportwissenschaft (Hrsg.): BISP Jahrbuch* (1996). Köln (1997): 135-140.

-
42. Jonath U., Haag E.; Krempel R.: Leichtathletik 1 Laufen und Springen. Rororo Reinbeck (1983).
 43. Kavanagh M. F., Jacobs I.: Breath-by-breath oxygen consumption during performance of wingate test. *Can J Sport Sci* 13 (1988): 91-93.
 44. Keul J., Simon G., Berg A., Dickhuth H.-H., Goertler I., Kübel R.: Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle zur Leistungsbewertung und Trainingsgestaltung. *Tsch. Z. Sportmed.* 30 (7) (1979): 212-218.
 45. Kindermann W.: Laufbandergometrie zur Leistungsdiagnostik im Spitzensport. In: Franz. I. W., Mellerowicz H., Noack W. (Hrsg.): *Training und Sport zur Prävention in der technischen Umwelt*. Springer Verlag, Berlin (1985): 68-80.
 46. Kindermann W., Keul J., Huber G.: Physical exercise after induced alkalosis (bicarbonate or trice buffer). *Eur J Appl Phys* 37 (1977): 197-204.
 47. Kindermann W., Schnabel A.: Verhalten der anaeroben Ausdauer bei 400 m-Mittelstrecken- und Langstreckenläufern. *Dt. Z Sportmed* 31 (1980): 225.
 48. Kruse-Jares, J. D.: *Laboratoriumsmedizin, Klinische Chemie und Hämatologie*. Wut Verlag Lünen (1987).
 49. Lentner C.: *Geigy Scientific Tables-Volume 5: Heart and Circulation*. Ciba-Geigy. Basel (1990): 209-203.
 50. Lorenz R., Brieke D., Jeschke D., Filadoro: Bestimmung der alaktaziden Kapazität mittels wiederholter Maximalsprints auf dem Laufband. In Liesen H., Weiß M., Baum M.: *Regulation- und Reparaturmechanismen*. 33. Deutscher Sportärztekongreß Paderborn (1993). Deutscher Ärzte-Verlag: 203-206.
 51. Linnarsson D.: Dynamics of pulmonary gas exchange and heart rate at start and end of exercise. *Acta Physiol. Scand. Suppl.* 415 (1974): 1-68.
 52. Mader A., Heck H.: A theory of the metabolic origin of anaerobic threshold. *Int J Sports Med* 7 (1986): 45-65.
 53. Mader A.: Eine Theorie zur Berechnung der Dynamik und des steady state von Phosphorylierungszustand und Stoffwechselaktivität der Muskelzelle als Folge des Energiebedarfs. *Habilitationsschrift*, Köln (1984).
 54. Mader A., Liesen H., Heck H., Phillipi H., Rost R., Schürich P.; Hollmann W.: Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. *Sportarzt und Sportmedizin* (1976) 27 (4): 80-88, 27 (5): 109-112.
 55. Margaria R., Edwards H. T., Hill D. B.: The possible mechanisms of contracting and paying the oxygen debt and the role of the lactic acid in muscular contradiction. *Am J Physiol* 106 (1993): 689-715.
 56. McKenzie D. C., Parkhouse W. S., Hearst W. E.: Anaerobic performance characteristics of elite Canadian 800 meter runners. *Can J Appl Sport Sci* 7 (3) (1982): 158-160.

-
57. McNaughton L. R.: Sodium bicarbonate ingestion and its effects on anaerobic exercise of various durations. *J Sports Sci* 10 (5) (1992): 425–435.
 58. Meyer T., Kindermann W.: Die maximale Sauerstoffaufnahme. *Dt. Zeitung für Sportmedizin* 50 (1999): 285–286.
 59. Monod H, Scherrer J.: Work capacity of a synergetic muscular group. *Ergonomics* (1965): 329–338.
 60. Moritani T., Nagata A., Devries H. A.: Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics* (1981): 24-350.
 61. Nebelsick-Gullett L. J., Housh T. J., Johnson G. O. et al.: A comparison between methods of measuring anaerobic work capacity. *Ergonomics* 31 (1988): 1413-1419.
 62. Nevill M. E., Boobis L. H., Brooks S., Williams C.: Effect of training on muscle metabolism during treadmill sprinting. *J Appl Physiol* 67 (1989): 2376-2382.
 63. Parkhouse W. S., McKenzie D. C., Hochacka P. W., Ovalle W. K.: Buffering capacity of deproteinized human vastus lateralis muscle. *J Appl Physiol* (1985): 14–17.
 64. Poole D. C., Ward S. A., Whipp B. J.: The effects of training on the metabolic and respiratory profile of high-intensity cycle ergometer exercise. *Eur J Appl Physiol* 59 (1990): 421-429.
 65. Roberts A. D., Billeter R., Howald H.: Anaerobic muscle enzyme changes after interval training. *Int J Sports Med* 3 (1982): 18-21.
 66. Röcker K.: Die Breath-by-Breath-Analyse von $^{13}\text{CO}_2$ zur Bewertung der Kinetik des Energiestoffwechsels. Habilitationsschrift. Universität Tübingen-Medizinische Fakultät (1999), Poliklinik Abteilung Sportmedizin.
 67. Röcker K., Steinacker J. M., Stauch M.: Transcutaneous monitoring of pCO_2 for the noninvasive determination of the anaerobic threshold. *Med. Sci Sports Exerc* Vol. 22, Nr. 2 Suppl. (1990): 54 und 321.
 68. Röcker K., Striegel H., Freund T., Dickhuth H.-H.: Relative functional buffering capacity in 400 meter-runners, long-distance runners and untrained individuals. *Eur J Appl Physiol* 68 (1994): 430–434.
 69. Sahlin K.: Muscle fatigue and lactic acid accumulation. *Acta Physiol Scand Suppl* 556 (1986): 83-91.
 70. Schmidt R. F., Thews G.: *Physiologie des Menschen*, Springer (27. Auflage 1997).
 71. Schnabel A., Kindermann W.: Assessment of anaerobic capacity in runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 52 (1983): 42–46.
 72. Serresse O., Lortie G., Bouchard C., Boulay M. R.: Estimation of the contribution of the various energy systems during maximal work of short duration. *Int J Sports Med* 9 (1988): 456–460.

-
73. Sharp R. L., Costill D. L., Fink W. J., King D. S.: Effects of eight weeks of bicycle ergometer sprint training on human muscle buffer capacity. *Int J Sports Med* 7 (1986): 13–17.
 74. Simoneau J. A., Lortie G., Boulay M. R., Marcotte M., Thibault M. C., Bouchard C.: Inheritance of human skeletal muscle and anaerobic capacity adaptation to high-intensity intermittent training. *Int J Sports Med* (1986): 167-171.
 75. Späth H: Spline Algorithmen zur Konstruktion glatter Kurven und Flächen. R. Oldenburg Verlag München. 4. Auflage (1986).
 76. Späth H.: Eindimensionale Spline-Interpolisations-Algorithmen. R. Oldenburg Verlag, München, Wien (1990).
 77. Spriet L. L.: Anaerobic Metabolism during high-intensity exercise. *Can J. Physiol Pharmacol* 70 (1) (1992): 157-165.
 78. Spurway, N. C.: Aerobic exercise, anaerobic exercise and the lactate threshold. *Br Med Bull* 48 (3) (1992): 56–591.
 79. Stegmann H., Kindermann W, Schnabel A.: Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. *Int. J Sports Med.* 2(1981): 160-165.
 80. Steinacker J. M.; Röcker K.: Transcutaneous monitoring of pO₂ and pCO₂ during running –a noninvasive determination of gas transport-. In: Huch A., Huch R. (Hrsg): Continuous transcutaneous monitoring. Pl. Press, Basel, New York (1987): 61-66.
 81. Striegel H.: Die nichtinvasive Bestimmung der funktionellen Pufferkapazität im Mehrstufentest. Dissertationsschrift Universität Tübingen. Medizinische Fakultät, Poliklinik Abt. Sportmedizin (1996).
 82. Sutton J. R., Jones N. L., Toews C. J.: Effect of pH on muscle glycolysis during exercise. *Clin Sci* 61 (1981): 331–338.
 83. Thews G., Mutschler E., Vaupel P.: Hormonelles System. Angaben und Wirkungsweisen der Hormone. *Med. Monatszeitschrift Pharm.* 11(12) (1988): 395-400.
 84. Trivedi B., Danford W. H.: Effect of pH on the kinetics of frog muscle phosphofructokinase. *J Biol Chem* 241 (1966): 4110–4221.
 85. Vandewalle H., Vautier J. F., Kachouri M., Lechevalier J. M., Monod H.: Work-exhaustion time relationships and the critical power concept. *J Sports Med Phys Fitness* 37 (1997): 89-102.
 86. Vandewalle H., Peres G., Monod H.: Standard anaerobic exercise tests. *Sports Medicine* 4 (1987): 268–289.
 87. Wank V., Frick U., Schmidtbleicher D.: Vergleichende Betrachtung der Bewegungsmuster beim Laufen auf dem Laufband und auf der Bahn. *Leistungssport* 1 (1998): 48–53.

-
88. Wassermann K., Beaver W. L., Whipp B. J.: Gas exchange theory and the lactic acidosis (anaerobic) threshold. *Circulation* 81 (1 Suppl.) (1990): II 14-30.
 89. Wassermann K., McIlroy M. B.: Detection of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *Am J Cardiol* 14 (1964): 844–852.
 90. Wassermann K., Whipp B. J., Koyle S. N., Beaver W. L.: Anaerobic Threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol* 35 (1973): 236–243.
 91. Wassermann K., Whipp B. J., Oren A., Casaburi R.: Humoral control of ventilation during exercise in man. In *Advances in Physiological Sciences. Respiration, Hutas L.; Debreczeni L. A., Budapest: Akad. Kiado, vol. 10 (1981): p.285-297.*
 92. Wassermann K.: Determinants and detection of anaerobic threshold and consequences of exercise above it. *Circulation* 76 (6.2) (1987): VI 29–39.
 93. Wassermann K.: The anaerobic threshold measurement to evaluate exercise performance. *Am Rev respir Dis Suppl* 129 (1984): 35–40.
 94. Weber K. T., Janicki J. S.: *Cardiopulmonary Exercise Testing: Physiologic Principles and Clinical Correlates.* WB Saunders Co., Philadelphia (1986): p 184.
 95. Weicker H., Strobel M.: *Biochemisch physiologische Grundlagen und ihre sportartspezifische Bedeutung.* Gustav-Fischer-Verlag Stuttgart-Jena-New York (1994).
 96. Whipp B. J.: The hyperpnea of muscular exercise. *Exercise Sports Sci. Review* 5 (1977): 295-311.
 97. Whipp B. J., Davis J. A., Wassermann K.: Ventilatory control of the “isocapnic buffering” region in rapidly-incremental exercise. *Respir. Physiol.* 76 (3) (1989): 357-367.
 98. Whipp B. J., Huntsman D. J., Storer T., Lamarra N., Wasserman K.: A constant which determines the duration of tolerance to high-intensity work. *Fed Proc* 41 (1982): 1591.
 99. Whipp B. J., Ward S. A.: Ventilatory control dynamics during muscular exercise in man. *Int J Sports Med* 1 (1980): 146.
 100. Yano T.: The differences in CO₂ kinetics during incremental exercise among sprinters, middle and long distance runners. *Jpn. J. Physiol.* 37 (1987): 369–378
 101. Yano T., Asano K., Nomura T., Matsuzaka A., Hirakoba K.: Kinetics of CO₂ during incremental exercise. *Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med.* (1984): 201–210.
 102. Yoshida T., Fukaba Y.: Control of breathing during exercise. *Ann. Physiol. Anthropol.* 11(5) (1992): 479-493.

ANHANG

1.1 Tabellen

Tab. 15: Anthropometrische Daten der untersuchten Probanden. AT, P1- P10: 100-400 m-Läufer; AeT, P1- P10: Langstreckenläufer; UT, P1- P10: Untrainierte bzw. unspezifisch Trainierte.

AT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Alter (Jahre)	27	20	19	28	22	18	18	29	18	31
Gewicht (kg)	80	85	74	83,5	84	78	65	73	65	72
Größe (cm)	180	190	178	185	201	186	178	180	172	179
Bestzeit 100m (s)	10,55	10,93	11,17	10,73	10,9	11,12	11,04	11,12	11,49	11,13
Bestzeit 200m (s)	20,88	21,8	22,19	21,56	22,21	22,38	21,86	22,43	23,21	22,18
Bestzeit 400m (s)	48,8	47,75	49,18	48,7	49,73	49,1	47,94	50,9	50,5	49,3

AeT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Alter (Jahre)	33	29	35	33	34	31	34	28	23	25
Gewicht (kg)	65	69	79	77	75	62	78	68	70,5	71
Größe (cm)	174	174	179	182	182	169	189	176	173	177
Bestzeit Marathon (h:min)	02:45	02:44	02:38	03:00	02:40	02:43	02:41	02:45	02:54	03:00

UT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Alter (Jahre)	22	21	22	25	23	24	19	24	18	32
Gewicht (kg)	69	79	85	76	70	85	64	74	70	82
Größe (cm)	178	169	178	186	179	189	183	178	177	188

Tab. 16: *Schnelligkeitstest. Maximalgeschwindigkeiten der untersuchten Probanden. AT, P1- P10: 100-400 m-Läufer; AeT, P1- P10: Langstreckenläufer; UT, P1- P10: Untrainierte bzw. unspezifisch Trainierte.*

AT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
v max (km/h)	32,18	32,45	32,81	31,73	33	32,4	33,33	32,35	31,7	32,04

AnT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
v max (km/h)	26,87	26,09	26,06	25,83	27,18	26,83	28,72	27,25	28,96	28,02

UT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
v max (km/h)	28,98	27,5	28,8	28,73	27,77	29,8	29,35	28,63	30,41	28,35

Tab. 17: Rampentest. Maximale Sauerstoffaufnahmen, maximale Sauerstoffaufnahme pro kg Körpergewicht und Geschwindigkeiten bei Erreichen der maximalen Sauerstoffaufnahme. AT, P1- P10: 100-400 m-Läufer; AeT, P1- P10: Langstreckenläufer; UT, P1- P10: Untrainierte bzw. unspezifisch Trainierte.

AT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
VO_{2max} (ml/min)	3508	5267	5000	3266	4672	4826	4561	4072	3569	4022
VO_{2max} (ml/min /kg)	43,85	61,97	67,57	39,12	55,61	61,88	70,16	55,78	54,91	55,87
km/h bei VO_{2max}	21,9	21,5	22	18,1	19,9	19	20	19,5	17,8	20,1

AnT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
VO_{2max} (ml/min)	3711	4040	4537	4380	4596	4220	5633	4400	3961	4923
VO_{2max} (ml/min/ kg)	57,09	58,55	57,44	56,88	61,28	68,06	72,21	64,71	56,18	69,34
km/h bei VO_{2max}	18,2	18,9	19,3	20,7	17,9	19,4	21,1	19,3	18,7	18,9

UT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
VO_{2max} (ml/min)	3479	3085	3992	4589	4036	4532	3805	3820	4129	4431
VO_{2max} (ml/min /kg)	50,42	39,05	46,97	60,39	57,66	53,31	59,46	51,62	58,99	54,03
km/h bei VO_{2max}	17,6	14,2	15,6	17,8	17,7	17,1	18,3	15	18,1	18,6

Tab. 18: Mehrstufentest. Ergebnisse der Leistungs-, Laktat- und Herzfrequenzdiagnostik. AT, P1- P10: 100-400 m-Läufer; AeT, P1- P10: Langstreckenläufer; UT, P1- P10: Untrainierte bzw. unspezifisch Trainierte

AT	VO _{2max} (ml/min)	VO _{2max} (ml/min/kg)	km/h bei VO _{2max}	Laktat vor Belastung (mmol/l)	Laktat an der LT (mmol/l)	Laktat an der IAS (mmol/l)	Laktat bei Aus- belastung (mmol/l)	Laktat am RCP (mmol/l)	Laktat LT - RCP (mmol/l)
P1	3565,26	44,56575	13,3	3,2	2,7	4,2	9,33	8,8	6,1
P2	5230	61,52941	16,7	1,6	1,7	3,2	11,49	5,2	3,5
P3	5192,89	70,17419	15,3	0,75	2	3,5	7,97	6,4	4,4
P4	4148,68	49,68479	14,8	2,92	3,5	5	10,91	7,3	3,8
P5	4768,42	56,7669	15,2	1,11	2,7	4,2	11,24	6	3,3
P6	4795,79	61,48449	14	1,12	2,4	3,9	8,16	5,75	3,35
P7	4701,58	72,332	17,3	1,07	2,1	3,6	10,96	3,9	1,8
P8	4215,26	57,74329	16,5	2,31	1,6	3,1	9,86	3,3	1,7
P9	3854,21	59,29554	14,3	1,92	1,5	3	7,92	3,8	2,3
P10	4002,3	55,5875	15,5	0,68	1,5	3	8,67	3	1,5

Tab. 19: Mehrstufentest. Ergebnisse der Leistungs-, Laktat- und Herzfrequenzdiagnostik. AT, P1- P10: 100-400 m-Läufer; AeT, P1- P10: Langstreckenläufer; UT, P1- P10: Untrainierte bzw. unspezifisch Trainierte

AT	v an LT (km/h)	v an IAS (km/h)	v am RCP (mmol/l)	v bei Aus- belastung (km/h)	IAS in % RCP	Herzfrequenz vor Be- lastung (1/min)	Herzfrequenz an der IAS (1/min)	Herzfrequenz an LT (1/min)	Herzfrequenz am RCP (1/min)	Herzfrequenz bei Aus- be- lastung (1/min)
P1	9,21	11,4	13,9	14,67	82,014	104	178	170	186	188
P2	9,71	13,03	14	17,33	93,071	105	186	165	192	203
P3	9,35	12,45	14,6	15,33	85,274	81	184	170	191	194
P4	9,24	11,58	13,3	15	87,068	86	166	129	152	182
P5	8,54	11,26	13	16	86,615	132	185	174	190	200
P6	8,43	10,95	11,8	14	92,797	79	168	148	173	181
P7	8,91	12,55	13,1	17,33	95,802	74	195	162	197	211
P8	8,06	11,22	11,5	17	97,565	97	170	147	172	195
P9	8,43	11,31	12,1	15	93,471	85	173	150	178	193
P10	7,87	12,32	12	18	102,67	123	168	146	167	182

Tab. 20: Mehrstufentest. Ergebnisse der Leistungs-, Laktat- und Herzfrequenzdiagnostik. AT, P1- P10: 100- 400m Läufer; AeT, P1- P10: Langstreckenläufer; UT, P1- P10: Untrainierte bzw. unspezifisch Trainierte

AeT	VO2 max (ml/min)	VO2 max (ml/min/kg)	km/h bei VO2 max	Laktat vor Belastung (mmol/l)	Laktat an der LT (mmol/l)	Laktat an der IAS (mmol/l)	Laktat bei Ausbelastung (mmol/l)	Laktat am RCP (mmol/l)	Laktat LT - RCP (mmol/l)
P1	3802,36	58,49785	15,8	1,02	1,1	2,6	9,83	2,9	1,8
P2	4294,21	62,23493	17	0,73	0,8	2,3	7,64	1,73	0,93
P3	4330,79	54,82013	17,8	1,62	0,5	2	7,58	1,2	0,7
P4	4334,47	56,29182	16	2,52	1,4	2,9	7,44	2,2	0,8
P5	4600	61,33333	17	1,28	1	2,5	5,86	1,85	0,85
P6	4856,05	78,32339	17,9	2,25	1,6	3,1	11,63	2,6	1
P7	5534,21	70,95141	17,2	2,68	0,9	2,4	7,92	1,9	1
P8	4817,5	70,84559	18,5	0,76	0,7	2,2	8,42	1	0,3
P9	3914,21	55,52071	17,3	1,35	1,2	2,7	9,58	2,52	1,32
P10	4652,63	65,53	17,3	1,32	1,3	2,8	8,46	1,8	0,5

Tab. 2.1: Mehrstufentest. Ergebnisse der Leistungs-, Laktat- und Herzfrequenzdiagnostik. AT, P1- P10: 100-400 m-Läufer; AeT, P1- P10: Langstreckenläufer; UT, P1- P10: Untrainierte bzw. unspezifisch Trainierte

AnT	v an LT (km/h)	v an IAS (km/h)	v am RCP (mmol/l)	v bei Aus- belastung (km/h)	IAS in % RCP	Herz- frequenz vor Belastung (1/min)	Herz- frequenz an der IAS (1/min)	Herz- frequenz an LT (1/min)	Herz- frequenz am RCP (1/min)	Herz- frequenz bei Ausbe- lastung (1/min)
P1	9,8	12,8	13	16,67	98,462	106	160	137	161	184
P2	11,02	14,98	14	18	107	66	179	155	173	195
P3	10,98	15,19	13,8	18,67	110,07	80	183	147	173	202
P4	10,8	14,9	13,9	18	107,19	101	180	156	176	194
P5	10,21	13,76	12,7	17	108,35	89	160	145	156	168
P6	12,51	15,31	14,8	18,67	103,45	121	195	180	192	207
P7	12,49	16,01	15,3	19,33	104,64	87	182	168	180	187
P8	10,34	15,23	12,5	18,67	121,84	80	164	130	146	183
P9	10,98	14,22	14	18	101,57	78	182	157	182	200
P10	9,94	14,58	12,4	18	117,58	103	171	146	161	178

Tab. 22: Mehrstufentest. Ergebnisse der Leistungs-, Laktat- und Herzfrequenzdiagnostik. AT, P1- P10: 100-400 m-Läufer; AeT, P1- P10 Langstreckenläufer; UT, P1- P10: Untrainierte bzw. unspezifisch Trainierte

UT	VO ₂ max (ml/min)	VO ₂ max (ml/min/kg)	km/h bei VO ₂ max	Laktat vor Belastung (mmol/l)	Laktat an der LT (mmol/l)	Laktat an der IAS (mmol/l)	Laktat bei Ausbelastung (mmol/l)	Laktat am RCP (mmol/l)	Laktat LT - RCP (mmol/l)
P1	3524,47	51,07928	15,3	4,25	2,7	4,2	13,14	5,3	2,6
P2	3392,63	42,94468	12	1,16	2,5	4	12,46	4	1,5
P3	4371,05	51,42412	13,2	0,73	0,8	2,3	7,78	2,76	1,96
P4	4526,32	59,55684	14,6	2,33	2,2	3,7	10,31	3,3	1,1
P5	4082,61	58,323	13,3	1,19	2,4	3,9	11,59	4,8	2,4
P6	4378,95	51,51706	13,6	2,73	3,1	4,6	8,93	8	4,9
P7	3724,74	58,19906	14,6	3,07	3,4	4,9	10,06	5	1,6
P8	4022,37	54,35635	14,3	1,35	2,5	4	10,11	6	3,5
P9	3706,58	52,95114	14	1,47	1,9	3,4	4,54	4,05	2,15
P10	4746,32	57,88195	15,9	0,78	1,6	3,1	9,67	3,6	2

Tab. 23: Mehrstufentest. Ergebnisse der Leistungs-, Laktat- und Herzfrequenzdiagnostik. AT, P1- P10: 100-400 m-Läufer; AeT, P1- P10: Langstreckenläufer; UT, P1- P10: Untrainierte bzw. unspezifisch Trainierte

UT	v an LT (km/h)	v an IAS (km/h)	v am RCP (mmol/l)	v bei Ausbe- lastung (km/h)	IAS in % RCP	Herz- frequenz vor Be- lastung (1/min)	Herz- frequenz an der IAS (1/min)	Herz- frequenz an LT (1/min)	Herz- frequenz am RCP (1/min)	Herz- frequenz bei Aus- be- lastung (1/min)
P1	9,8	12,03	12,7	16,67	94,724	108	165	155	168	184
P2	7,15	9,63	9,7	13,33	99,278	85	171	158	171	200
P3	7,42	9,28	10	13,33	92,8	91	160	135	171	204
P4	7,89	10,79	10,2	14,67	105,78	90	162	142	157	181
P5	8,53	10,92	11,8	15,33	92,542	81	174	147	182	201
P6	9,16	11,45	13,6	14	84,191	92	182	167	194	197
P7	9,54	11,73	12	15	97,75	110	181	171	183	200
P8	9,09	11,37	12,8	15	88,828	87	172	161	176	185
P9	9,41	12,66	13,5	14	93,778	102	187	167	189	191
P10	8,2	11,97	12,6	16,67	95	104	186	157	189	201

Tab.24: Sprinttestserie. Relative Pufferkapazität in % und anaerobe Kapazität in kJoule. AT, P1-P10: 100-400 m-Läufer; AeT, P1- P10: Langstreckenläufer; UT, P1- P10: Untrainierte bzw. unspezifisch Trainierte.

AT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
relFP (%)	33,74	30,64	35,96	30,53	34,31	28,56	31,98	29,91	30,33	34,42
an-aerobe Kapazität (kJ)	4,18	4,63	4,76	4,48	4,9	3,29	3,47	3,45	3,89	4,12

AeT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
relFP (%)	24,62	21,29	20,43	22,3	19,61	15,47	18,37	17,28	21,57	19,84
an-aerobe Kapazität (kJ)	1,91	2,29	1,94	2,31	1,87	0,7	1,24	1,19	1,58	2,97

UT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
relFP (%)	22,83	26,29	25,8	22,65	27,71	32,65	20,5	28,98	30,3	34,92
an-aerobe Kapazität (kJ)	2,16	3,25	3,2	2,75	3,21	4,27	2,18	3,28	4,02	3,41

1.2 Studienprotokolle

Eberhard-Karls-Universität
Tübingen
Medizinische Klinik
Abteilung Sportmedizin
Ärztl. Dir.: Prof. Dr. H.-H. Dickhuth

72074 Tübingen
Hölderlinstraße 11
Telefon 07071/2986493
Fax 07071/295162

ANAMNESE

Studie „Anaerobic“

Name, Vorname: _____

Adresse: _____

Telefon: _____ Fax: _____ Email: _____

Geburtsdatum: _____ Alter: _____ Größe: _____ Gewicht: _____

Vitalkapazität: _____

Probandennummer: _____

Testgruppe: ()K: Kontrollgruppe Sportstudenten, Freizeitsportler

()L: Langstreckenläufer > 1500m

()S: Sprinter 100 m, 200 m, 400 m, 110 mH, 400 mH

Kontrollgruppe: früherer Sport (Umfang, Dauer, Art):

Momentane sportliche Aktivität (Umfang, Art):

Übrige: Anzahl der Trainingsjahre in der Hauptsportart:

Trainingseinheiten pro Woche:

Trainingsstunden pro Woche:

Km/h pro Woche:

Nebensportarten:

Trainingspausen im letzten ½ Jahr (Zeitpunkt, Dauer, Ursache):

Bestzeiten: 100 m 200 m 400 m 800 m 1500 m

5000 m 10000 m Marathon

Sonstiges

Krankheiten/Allergien/Medikamente:

Ich bin über Belastungsart und Umfang meiner Probandentätigkeit aufgeklärt worden.

Ort, Datum

Unterschrift

Eberhard-Karls-Universität
Tübingen
Medizinische Klinik
Abteilung Sportmedizin
Ärztl. Dir.: Prof. Dr. H.-H. Dickhuth

72074 Tübingen
Hölderlinstraße 11
Telefon 07071/2986493
Fax 07071/295162

PROTOKOLL

Studie „Anaerobic“

Probandennummer: _____

Rampentest Beginn bei 4 km/h; Inkrement: 2 km/h, Stufendauer: 30 s;
Laufbandsteigung: 1,5 %

Datum/ Zeit: Parameter: -Atemgase-Spirometrie (Online Aufzeichnung:
einschließlich 1 min Vorlauf und 3 min Nachlauf;
Speicherung der Parameter auf Datenträger)
_____ Herzfrequenz/min und Leistung in km/h (Registrierung der
Daten mit Hilfe von Polar und Para Graphics)

Dateinamen: _____

Stufe	Leistung (km/h)	Herzfrequenz/min (vgl. Para Graphics)	Atemgase (Spirometrie)
Ruhe	0		
1	4		
2	6		
3	8		
4	10		
5	12		
6	14		
7	16		
8	18		
9	20		
10	22		
11	24		
12	26		
13	28		
14	30		
15	32		
3'	0		

Probandennummer: _____

Schnelligkeitstest: 15 m Anlauf \Rightarrow Lichtschranke 1 \Rightarrow 15 m Messstrecke \Rightarrow Lichtschranke 2 \Rightarrow Auslauf (ggf. Weichbodenmatte als Bande).

Datum/Zeit: _____ Parameter: Strecke in m, Zeit in s, Geschwindigkeit in km/h sowie m/s; 3 Versuche pro Probanden bei 5 min Pause
(Datenregistrierung mit Messsoftware Metior, Stuttgart).

Testnummer	Zeit (s)	Geschwindigkeit (km/h)	Geschwindigkeit (m/s)
1			
2			
3			

Probandennummer: _____

Zwischen Rampentest und Mehrstufentest 1 h Pause

Mehrstufentest

Beginn bei 6 km/h, Inkrement: 2 km/h; Stufendauer: 3 min; Pause zwischen den Stufen: 1 min
 Laufbandsteigung: 1,5 %

Datum/ Zeit:

Parameter:-Atemgase-Spirometrie (Online Aufzeichnung: einschließlich 1 min Vorlauf und 3 min Nachlauf, Speicherung der Parameter auf Datenträger)

- Herzfrequenz/min und Leistung in km/h
- Laktat, pH aus Blutgasanalyse

Dateinamen: _____

Stufe	Leistung (km/h)	Hf/min	Atemgase (Spirome.)	Laktat (mmol/l)	pH
Ruhe	0				
1	6				
2	8				
3	10				
4	12				
5	14				
6	16				
7	18				
8	20				
9	22				
10	24				
11	26				
12	28				
13	30				
3'	0				

Probandennummer: _____

Maximalsprintserie Belastungen (jeweils 2-3 Belastungen pro Tag bei 1h Pause; Gesamtzahl der Belastungen abhängig von Typ L, S, K und individuellem Leistungsvermögen.
Belastung 1: Geschwindigkeit bei der aus Rampentest gewonnenen $VO_{2max} + 2$ km/h; Belastung 2: Belastung 1+ 2 km/h; Belastung 3: Belastung 1 +4 km/h; Belastung 4: Belastung 1+6 km/h etc.

Datum/Uhrzeit: _____
 Laufbandsteigung 1 %
 Parameter: -Herzfrequenz/min und Leistung in km/h;
 -Belastungsdauer in min bzw. in sek; -Laktat

	Belastung 1	Belastung 2	Belastung 3	Belastung 4	Belastung 5	Belastung 6
Geschwindigkeit (km/h)						
Belastungsdauer (min)						
Beschleunigungsdauer (s)						
Hf in Ruhe						
Hf nach Belastung/min						
Ruhelaktat						
Laktat +1						
Laktat +3						
Laktat +6						
Laktat +9						
Laktat +12						
Laktat +15						

Eventuell Untersuchungstag 4:

Untersuchungstag 4:

	Belastung 1	Belastung 2	Belastung 3	Belastung 4	Belastung 5	Belastung 6
Geschwindigkeit (km/h)						
Belastungsdauer (min)						
Beschleunigungsdauer (s)						
Hf in Ruhe						
Hf nach Belastung/ min						
Ruhelaktat						
Laktat +1						
Laktat +3						
Laktat +6						
Laktat +9						
Laktat +12						
Laktat +15						

EBERHARD-KARLS-UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Medizinische Klinik

Abteilung Sportmedizin

Ärztl. Dir.: Prof.Dr. H.-H. Dickhuth

Wir führten einen Mehrstufentest auf dem Laufband (Stufendauer 3 min) durch:

Leistung [km/h]	Herzfrequenz [1/min]	Laktat [mmol/l]
0.00	81	0.75
6.00	138	1.56
8.00	161	1.77
10.00	175	2.24
12.00	183	4.04
14.00	189	5.34
15.33	194	7.97

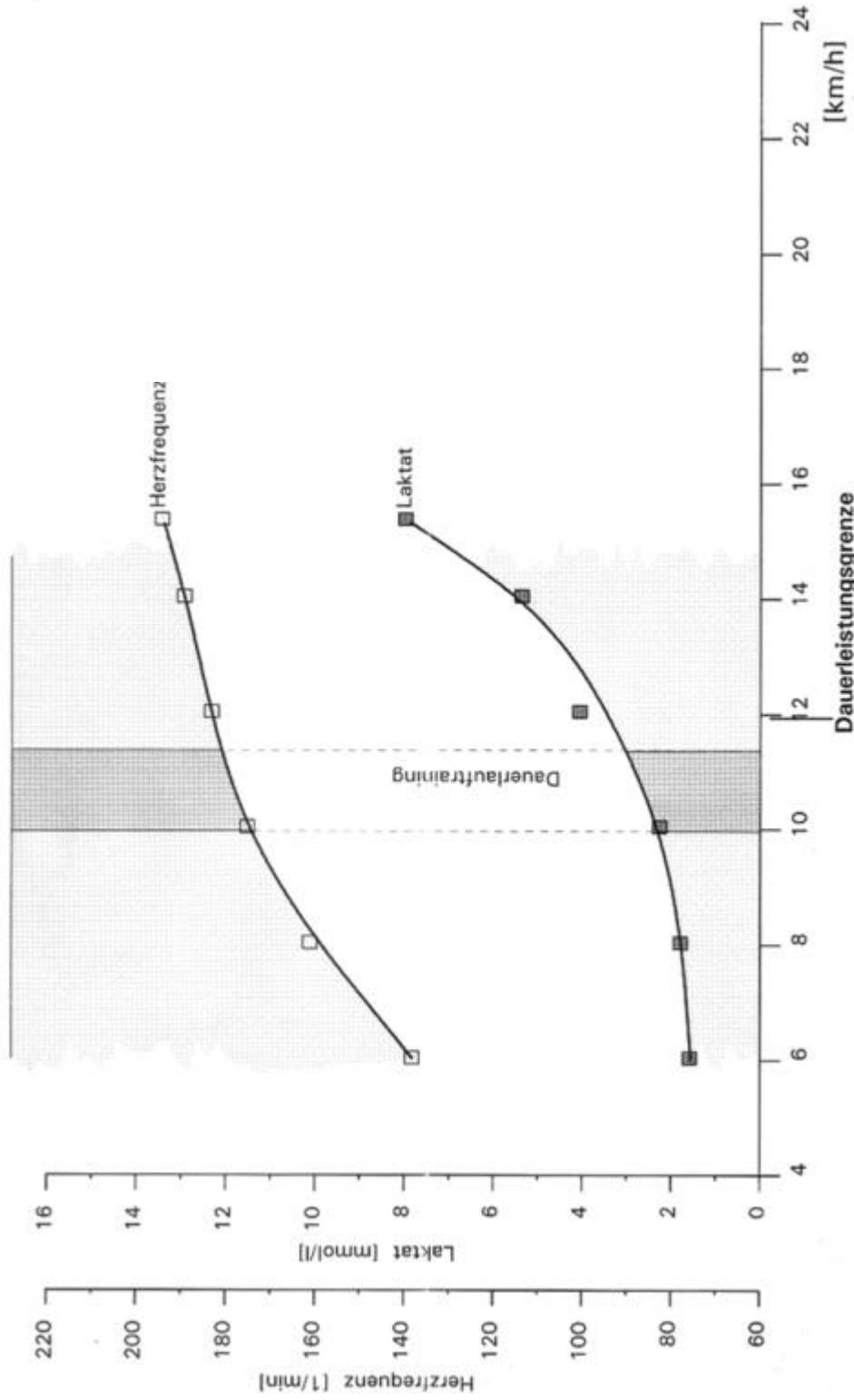
Hieraus errechnen sich folgende Werte für die Trainingssteuerung und Leistungsdiagnostik:

Leistung an der Dauerleistungsgrenze: **11.93 km/h (3.31 m/s)**
 Dies entspricht einer 1000m-Zeit von **5:01 min**
 Herzfrequenz an der Dauerleistungsgrenze: **182/min**

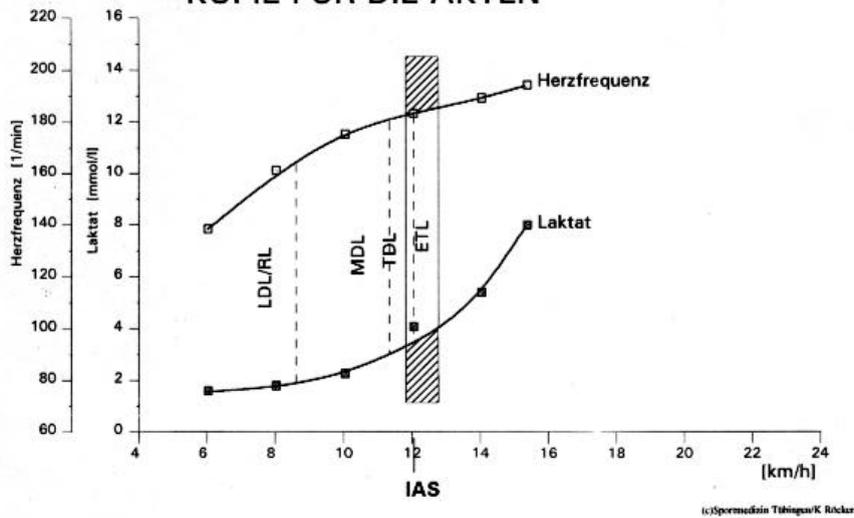
Relativ zu diesen Kennwerten lassen sich Trainingsintensitätsempfehlungen für Dauertraining angeben:

Individuelle Belastungsempfehlungen:	Lauftempo pro 1000m	Herzfrequenz [1/min]
	[m/s]	
Dauerlauf:	5:16 min - 6:01 min	174 - 180

Laktatleistungskurve



KOPIE FÜR DIE AKTEN



EBERHARD-KARLS-UNIVERSITÄT TÜBINGEN
Medizinische Klinik
 Abteilung Sportmedizin
 Ärztl. Dir.: Prof. Dr. H.-H. Dickhuth

Wir führten einen Mehrstufentest auf dem Laufband [Stufendauer 3 min, Laufbandsteigung 2%] durch:

Leistung [km/h]	Herzfrequenz [1/min]	Laktat [mmol/l]
0.0	81	0.75
6.0	138	1.56
8.0	161	1.77
10.0	175	2.24
12.0	183	4.04
14.0	189	5.34
15.3	194	7.97

Hieraus errechnen sich folgende Werte für die Trainingssteuerung und Leistungsdiagnostik:

Leistung an der Dauerleistungsgrenze (IAS): **11.93 km/h (3.35 m/s)**
 Dies entspricht einer 1000m-Zeit von **5:01 min**
 Herzfrequenz an der Dauerleistungsgrenze (IAS): **182/min**
 Leistung bei 4mmol/l Laktat: **12.73 km/h (3.54 m/s)**
 Dies entspricht einer 1000m-Zeit von **4:42 min**
 Herzfrequenz bei 4mmol/l Laktat: **185/min**

Relativ zu diesen Kennwerten lassen sich Trainingsintensitätsempfehlungen für verschiedene Trainingsformen im aeroben Bereich angeben:

Individuelle Belastungsempfehlungen:		Lauftempo pro 1000m	Herzfrequenz [1/min]
	Abk.		
Extensive Tempoläufe:	ETL	4:42 min - 5:04 min	182 - 185
Tempodauerlauf:	TDL	4:58 min - 5:17 min	180 - 183
Mittlerer Dauerlauf:	MDL	5:17 min - 6:57 min	164 - 180
Regenerativer und langer Dauerlauf:	LDL	langsamer als 6:57 min	unter 164

Medizinische Klinik

Abteilung Sportmedizin

Ärztl. Dir.: Prof.Dr. H.-H. Dickhuth

Untersuchungstag

Leichtathletik Langsprint-400m

Ausgabe zusätzlicher Rechen­daten der Ergometrie auf dem Laufband.

NUR FÜR DIE KRANKENAKTE UND DEN INTERNEN GEBRAUCH

	-	16.9.2098	Änderung
Körpergewicht	0.0	74.0	+0.0 kg
Aerobe Schwelle (LT)	0.00	8.62	+0.00 km/h
Laktatkonzentration an der aeroben Schwelle (LT)	0.0	1.9	+0.0 mmol/l
Herzfrequenz an der aeroben Schwelle (LT)	0	164	+0 /min
LT in Prozent der IAS	0.00	72.24	+0.00 %
IAS	0.00	11.93	+0.00 km/h
Laktatkonzentration an der IAS	0.0	3.4	+0.0 mmol/l
Herzfrequenz an der IAS	0	182	+0 /min
IAS in Prozent der Maximalleistung	0.00	77.80	+0.00 %
1000m-Zeit der IAS		5:01 min	
Marathonzeit an der IAS		3:31:52 h	

DANKSAGUNG

Zuvorderst will ich Herrn Professor Dr. med. H.-H. Dickhuth für die freundliche Überlassung des Themas dieser Dissertation, seine hilfreiche Unterstützung in inhaltlichen, ideellen und materiellen Fragen herzlichen Dank sagen.

Ganz besonderer Dank gebührt Herrn Dr. med. H. Striegel, Institut für Sportmedizin, Universität Tübingen, für seine intensive Betreuung und Unterstützung. Seine Ratschläge zur inhaltlichen und gestalterischen Ausführung dieser Arbeit waren mir stets von sehr großem Wert. Herrn Dr. F. Emde möchte ich ebenso für die Mitarbeit bei den Versuchen danken.

Einen ebenfalls wesentlichen Anteil am Zustandekommen der Arbeit tragen alle Probanden, die sich bereit erklärt hatten, bei den Untersuchungen teilzunehmen.

Des Weiteren möchte ich mich noch bei Marion und Michael für Ihre Unterstützung danken. Sie standen mir in allen Lagen mit Rat und Tat zur Seite.

Nicht zuletzt will ich auch Herrn PD Dr. med. F. Mayer, Herrn Dr. med. A. Nieß, Herrn Dr. med. K. Röcker, Herrn Dr. med. T. Horstmann, Herrn PD Dr. med. H.-C. Heitkamp und Frau P. Schumacher Frau L. Opavski und Herrn J. Lambeck, Institut für Sportmedizin, für Ihre Mitarbeit und Unterstützung danken. Ohne Ihre Kooperation hätte die Arbeit in dieser Form sicherlich nicht entstehen können.

CURRICULUM VITAE

Nicole Ploog

15.08.1975

geboren in Ruit, Ostfildern

Eltern: Frauke Ploog, geb.: Vyrobal

Lehrerin

Klaus Ploog

Professor für Chemie, Humboldt Universität Berlin

eine Schwester: Dominique

1982-1986

Besuch der Grundschule in Stuttgart-Botnang

1986-1995

Besuch des Friedrich-Eugens-Gymnasium in Stuttgart

1995

Zulassung zum Studium der Humanmedizin an der
Universite´-Rene´-Descartes, Paris.

1996

Weiterführung des Studiums an der Eberhard-Karls-
Universität, Tübingen

1998

Ärztliche Vorprüfung

1998

Famulatur auf dem Gebiet der Sportmedizin

1999

Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

1999/2000

Famulaturen auf dem Gebiet der Allgemeinmedizin, der
Orthopädie und der Unfallchirurgie

2001

Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

2001-2002

Praktisches Jahr

Innere Medizin: Zürcher Höhenklinik Davos

Chirurgie: Robert-Bosch-Krankenhaus Stuttgart

Anästhesie: Robert-Bosch-Krankenhaus Stuttgart

26.11.2002

Dritter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung