

# UNIVERSITÄT HAMBURG

FACHBEREICH BEWEGUNGSWISSENSCHAFT  
FACHSPRECHERIN PROF. DR. GABRIELE KLEIN

## Überprüfung der Zusammenhänge des Anstiegsverhaltens von Laktat und Katecholaminen im Rahmen eines Stufentests

---

### **Dissertation**

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin an  
der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

vorgelegt von:

Simon Blatzheim  
aus Düren

**Hamburg**  
**2011**

**(wird von der Medizinischen Fakultät ausgefüllt)**

**Angenommen von der  
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg am: 09.08.2011**

**Veröffentlicht mit Genehmigung der  
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.**

**Prüfungsausschuss, der/die Vorsitzende: Prof. Dr. K. –M. Braumann**

**Prüfungsausschuss, zweite/r Gutachter/in: PD Dr. K. Sydow**

**Prüfungsausschuss, dritte/r Gutachter/in: Prof. Dr. K. Püschel**

# I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis .....	3
II.	Abkürzungsverzeichnis.....	6
III.	Tabellenverzeichnis.....	7
IV.	Abbildungsverzeichnis.....	8
1.	Einleitung.....	9
1.1.	Laktat.....	9
1.1.1.	Physiologische Mechanismen .....	9
1.1.2.	Diagnostische Verfahren zur Schwellenbestimmung .....	12
1.1.2.1.	Mader.....	12
1.1.2.2.	Stegmann.....	13
1.1.2.3.	Dickhuth .....	14
1.1.2.4.	Geiger-Hille .....	15
1.1.2.5.	Braumann .....	15
1.1.3.	Validierungsmessung .....	16
1.2.	Das vegetative Nervensystem .....	17
1.3.	Katecholamine .....	18
1.3.1.	Physiologische Mechanismen .....	19
1.3.2.	Katecholamine im Zusammenhang mit Laktat.....	21
1.4.	Ziel der Untersuchung .....	23

2.	Material und Methoden .....	24
2.1.	Probanden .....	24
2.2.	Doppelstufentest.....	25
2.2.1.	Erster Teil.....	26
2.2.2.	Erholungsphase zwischen Belastungsphasen .....	26
2.2.3.	Zweiter Teil zur Senkenbestimmung .....	27
2.3.	Physiologische Parameter .....	28
2.3.1.	Katecholamine.....	28
2.3.2.	Laktat.....	29
2.3.3.	Herzfrequenz.....	30
2.4.	Dauertest.....	32
2.5.	Statistik .....	34
3.	Ergebnisse.....	35
3.1.	Probanden .....	35
3.2.	Auswertung Doppelstufentest.....	36
3.2.1.	Belastung .....	36
3.2.2.	Schwelle.....	36
3.2.2.1.	Laktat .....	37
3.2.2.2.	Katecholamine .....	38
3.2.2.2.1.	Adrenalin .....	39
3.2.2.2.2.	Noradrenalin.....	41
3.3.	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	43

4.	Diskussion .....	47
4.1.	Interpretation der Ergebnisse .....	47
4.2.	Vergleich mit anderen Autoren .....	51
4.3.	Methodenkritik .....	54
4.4.	Überprüfung der Fragestellung.....	57
5.	Zusammenfassung .....	59
6.	Anhang .....	60
6.1.	Kurvenmaske Stufentest.....	60
6.2.	Kurvenmaske Dauertest .....	61
6.3.	Untersuchungsbogen.....	62
6.4.	Checkliste Stufentest.....	63
6.5.	Stufentestkurven.....	64
7.	Literatur.....	69
8.	Danksagung.....	75
9.	Lebenslauf .....	76
10.	Eidesstattliche Erklärung.....	77

## II. Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ADP	Adenosindiphosphat
ADR	Adrenalin
ATP	Adenosintriphosphat
BMI	Body Mass Index = Gewicht (in kg)/Quadratmeter der Körpergröße (in cm)
ca.	circa
et al.	et altera
HF	Herzfrequenz
HRV	Heart Rate Variability (Herzfrequenzvariabilität)
iANS	individuelle anaerobe Schwelle
KG	Körpergewicht
i.v.	Intravenös
kg	Kilogramm
LLK	Laktatleistungskurve
max.	Maximum
maxLASS	maximales Laktat-Steady-State
min.	Minimum
ml	Milliliter
mmol/l	milliMol pro Liter
MW	Mittelwert
NAD	Noradrenalin
ng/l	Nanogramm pro Liter
RQ	Respiratorischer Quotient
SD	Standardabweichung
Tab.	Tabelle
TE	Trainingseinheit
W	Watt Leistung
Watt/kg KG	Watt pro Kilogramm Körpergewicht
$W_{\max}$	maximale Wattleistung
z. B.	zum Beispiel

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Studienprotokoll ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 2 Anthropometrische Daten der Probanden ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Tabelle 3 Zusammenfassung der Einzelwerte an der validierten Schwelle und an den Katecholaminschwellen ..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

## IV. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Anteile am Gesamtenergieumsatz .....	11
Abbildung 2	Beispiel Maderschwelle .....	13
Abbildung 3	Beispiel Stegmannschwelle .....	14
Abbildung 4	Beispiel Dickhuthschwelle .....	15
Abbildung 5	Beispiel Senke.....	16
Abbildung 6	Katecholaminsynthese .....	18
Abbildung 7	Adrenozeptor Signaltransduktion .....	20
Abbildung 8	Beispiel Doppelstufentestkurvenverlauf (Adrenalin-Laktat) .....	27
Abbildung 9	Beispiel Katecholaminkurve .....	29
Abbildung 10	Beispiel Laktatkurve .....	30
Abbildung 11	Herzfrequenzkurve Senkentest und Dauertest Proband 12 .....	31
Abbildung 12	Laktatanstieg bei validiertem und überschwelligem Dauertest .....	33
Abbildung 13	Vergleich Schwellenkonzepte.....	37
Abbildung 14	Mittelwertskurve Laktat (venös und kapillar).....	38
Abbildung 15	Vergleich der Leistung an der berechneten Schwelle .....	39
Abbildung 16	Mittelwertskurve Adrenalin .....	40
Abbildung 17	AdrenalinKonzentration an der validierten und der berechneten Schwelle in % der maximal gemessenen Konzentration .....	41
Abbildung 18	Mittelwertskurve Noradrenalin .....	42
Abbildung 19	NoradrenalinKonzentration an der validierten und der berechneten Schwelle in % der maximal gemessenen Konzentration .....	42
Abbildung 20	Mittelwertskurven Stufentest .....	44

# 1. Einleitung

## 1.1. Laktat

Laktat bezeichnet das Anion der  $\alpha$ -Hydroxy-Propionsäure und ist auch bekannt als Milchsäure. Es hat die Formel  $\text{CH}_3\text{-HCOH-COO}^-$ . Milchsäure kommt in zwei Formen vor, die nach ihrer Ausrichtung als D- oder L-Form (Fischer-Projektion) benannt wird. Laktat ist im menschlichen Körper ein Produkt der anaeroben Glykolyse.

Die Laktatbestimmung ist aus der heutigen sportwissenschaftlichen Arbeit mit Leistungssportlern nicht mehr wegzudenken und erhält auch zunehmend Einzug in den Bereich des Breitensports und den Gesundheitssport. Es wird genutzt um den Sportlern Trainingsempfehlungen in ihrem individuellen Trainingsbereich mit an die Hand zu geben. Durch die Berechnung der individuellen anaeroben Schwelle (iANS) anhand der Laktatbestimmung wird dies möglich. Über die letzten Jahre haben sich unterschiedliche Schwellenkonzepte zur Berechnung entwickelt.

### 1.1.1. Physiologische Mechanismen

Die Energiebereitstellung im menschlichen Körper erfolgt durch verschiedene Stoffwechselsysteme. Die Ausdauer der Muskelzelle besteht hauptsächlich aus dem aeroben Stoffwechselweg des Zitronensäurezyklus. Durch körperliche Aktivität, insbesondere beim Sport, erhöht sich der Energiebedarf der Muskelzellen im Körper. Neben dem aeroben Stoffwechsel ist auch der anaerobe Stoffwechsel für die Produktion von Energie während einer Belastung zuständig. Mit steigender Intensität kommt es, proportional zum Leistungsanstieg, zur vermehrten Bildung von Laktat, weil der anaerobe Stoffwechselweg vermehrt für die Energieproduktion zuständig ist. Der Hauptfaktor der gemessenen Laktatkonzentration ist die Fähigkeit des Körpers das Laktat zu eliminieren. Ein weiterer entscheidender Faktor ist das Vorhandensein unterschiedlicher Muskelfasertypen. Je mehr weiße, also schnell kontrahierende, Muskelfasern vom Typ II b vorhanden sind, umso geringer ist die Fähigkeit Energie über die aerobe Kohlenhydrat- und Fettverbrennung zu gewinnen was zu einem stärkeren Anstieg von Laktat im Blut und im Muskel führt (8).

Als Grundlage für Energiegewinnung im menschlichen Körper dient Adenosintriphosphat (ATP) das in Adenosindiphosphat (ADP) gespalten wird. Dabei reicht das dau-

erhaft vorhandene ATP in den einzelnen Zellen lediglich in einem Zeitraum von circa (ca.) 10 Sekunden für einige wenige maximale Muskelkontraktionen (44).

Ist dieser Vorrat aufgebraucht, muss ATP vom Körper selbst hergestellt werden. Hierzu dienen ihm der aerobe Fettabbau, welcher bei niedriger Belastung und über einen sehr langen Zeitraum aufrechterhalten werden kann (allerdings ist der Energieumsatz hier sehr gering), und die Kohlenhydratverwertung (Glykolyse), die bei steigender Intensität einsetzt.

Nach der Glykolyse gibt es zwei Wege zur weiteren Verarbeitung des hierbei entstandenen Pyruvats. Unter aeroben Bedingungen geht es mit der oxidativen Decarboxylierung und dem Zitratzyklus, die beide in den Mitochondrien stattfinden, weiter und unter anaeroben Bedingungen mit der Bildung von Laktatdehydrogenase. Das Endprodukt des anaeroben Weges ist Laktat. Der wesentlich effizientere Weg ist der aerobe, da beim anaeroben Weg lediglich knapp 3 % (21) der gesamten Energie eines Glukosemoleküls freigesetzt werden.

Das Laktat entsteht dabei aus Pyruvat und  $\text{NADH} + \text{H}^+$  und bietet somit einen Pool für Pyruvat, welches später, sobald wieder genügend Sauerstoff vorhanden ist, zurückverwandelt wird. Allerdings hat der vermehrte Anfall von  $\text{H}^+$  einen Abfall des pH-Wertes zur Folge (54), was wiederum zur Hemmung bestimmter Enzyme, die zur Energiegewinnung benötigt werden, führt (55). Abbildung 1 zeigt den zunehmenden Verbrauch an Glykogen zur Energiegewinnung bei steigender Intensität.

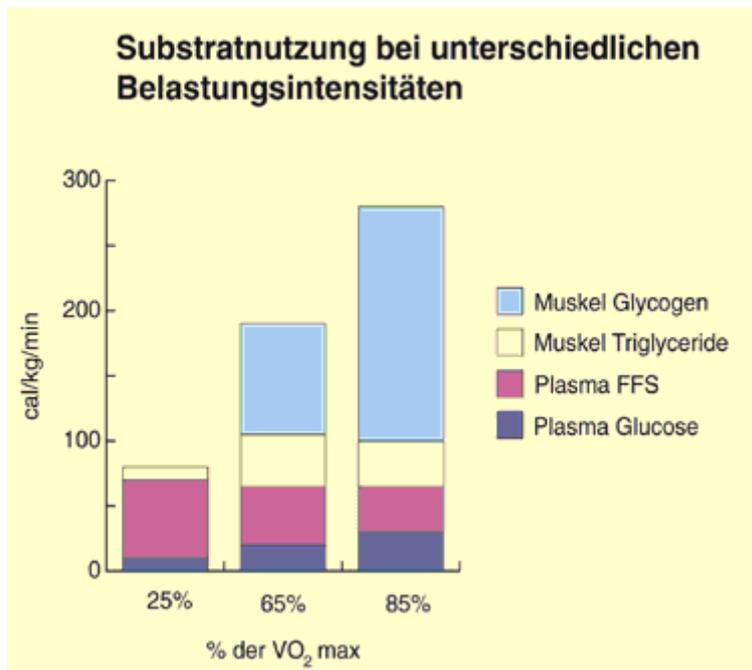


Abbildung 1: Anteile am Gesamtenergieumsatz (26; 42)

Der Herzmuskel kann Laktat, besonders bei großen Anstrengungen, wieder zu Pyruvat umwandeln und dieses direkt als neue Energiequelle nutzen. Es deckt dabei bis zu 60 % des Energiebedarfs ab (16).

Der Hauptanteil (ca. 50 %) des in der Muskelzelle produzierten Laktats wird durch die Glukoneogenese zu Glykogen in der Erholungsphase umgewandelt, wobei lediglich 10 % in der Leber abgebaut werden (3; 44). Bei gleichmäßiger Produktion und Abbau halten sich die aerobe und anaerobe Energiegewinnung die Waage und man spricht vom Laktat-Steady-State (LASS). Auch andere Gewebe, wie das Gehirn oder die Haut produzieren Laktat. Ein geringer Teil des Laktats wird über die Nieren eliminiert, wobei ca. 90 % metabolisiert und die restlichen 10 % über den Urin ausgeschieden werden. Diese Prozesse laufen alle gleichzeitig ab und führen so zu der Konzentration an Laktat, die im Blut gemessen werden kann (8). Hierfür soll die Minderdurchblutung der laktateliminierenden Organe durch die Ausschüttung von Katecholaminen mitverantwortlich (8; 10) ein.

Durch sogenanntes „Trainieren mit Luft“, bei dem die Energiegewinnung hauptsächlich durch Verbrennung von Kohlenhydraten und Fetten abläuft, ist es möglich das Herz-Kreislauf-System, Lunge und den Stoffwechsel zu trainieren um durch die effizientere Sauerstoffnutzung leistungsfähiger zu sein. Hierbei wird aus dem Zitronen-

säurezyklus (aerobe Energiegewinnung) mehr Energie gewonnen. Training oberhalb des LASS trainiert die Laktattoleranz und dadurch Schnelligkeitsausdauer (4).

Die Laktatleistungsdiagnostik bietet Sportlern die Möglichkeit, ihre individuelle Trainingsintensität unter Berücksichtigung der eigenen muskulären Anlagen und des aktuellen Trainingszustandes bestmöglich anzupassen, indem bei steigender Intensität in regelmäßigen Abschnitten Proben zur Bestimmung des Laktatwerts genommen werden.

Zur Darstellung der Laktatleistungskurve (LLK) und zur Bestimmung des maximalen Laktat-Steady-State (maxLASS) werden die abgenommenen Laktatwerte in ein Koordinatensystem eingetragen. Hierbei wird auf der x-Achse die jeweilige Belastungszeit oder Belastungsstufe und auf der y-Achse die Konzentration in 100 % des maximal erreichten Wertes eingetragen. Dabei zeigt die Kurve meist einen typisch flachen Verlauf im niedrigen Intensitätsbereich und steigt dann zunehmend mit erhöhter Intensität an.

#### 1.1.2. Diagnostische Verfahren zur Schwellenbestimmung

Der Begriff der individuell anaeroben Schwelle (iANS) bezeichnet den Punkt an dem es zu einem „steady state“, also einem Gleichgewichtszustand zwischen Laktatproduktion und -elimination kommt. Es ist der Punkt an dem die größtmögliche Belastungsintensität ohne zunehmende Übersäuerung durch vermehrte Laktatbildung aufrecht erhalten werden kann (32).

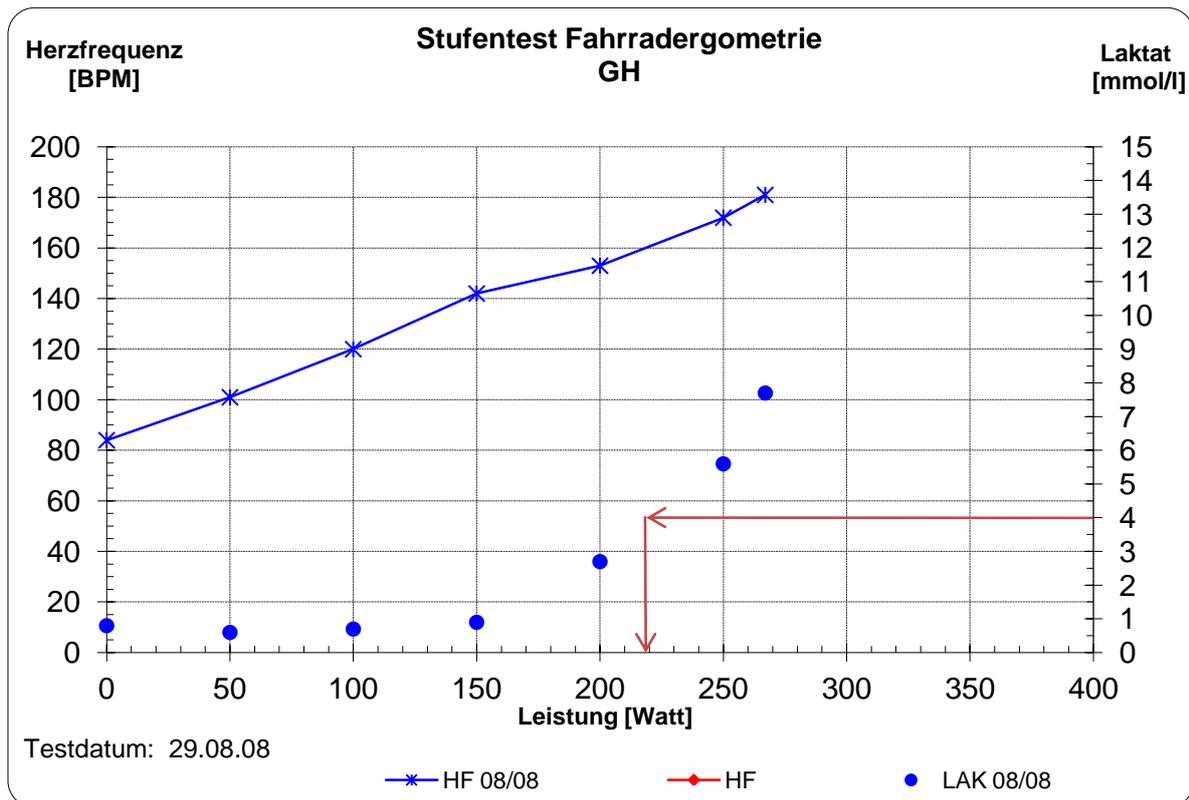
##### 1.1.2.1. Mader

Mader et al. (et al.) führten Ende der 70er Jahre den genauen Begriff der aeroben-anaeroben Schwelle ein. Dieser beschreibt einen Bereich in dem die aerobe Energiebereitstellung zu einem anaeroben, und somit teilweise laktiziden, Stoffwechsel umschlägt. Genau an diesem Punkt herrscht noch ein Gleichgewicht zwischen Laktatproduktion und Laktatelimination, ein so genannter Steady-State.

Bei seinen Untersuchungen fand er heraus, dass diese Schwelle im Mittel bei 4 mmol/l lag. Somit definierte er eine fixe Schwelle (32). Allerdings ist heute bekannt, dass diese fixe Schwelle nur bedingte Aussagekraft besitzt, da sie sehr stark davon abhängig ist, wie lange die Stufendauer beim Stufentest ist (ob beispielsweise drei

oder fünf Minuten). Hinzu kommen noch weitere individuelle Unterschiede, wie beispielsweise die Zusammensetzung aus unterschiedlichen Fasertypen und die vorhandene Glykogenkonzentration.

Nichts desto trotz war Mader einer der Ersten, der den Begriff der aero-anaeroben Schwelle prägte und versuchte, ihn anhand von Laktatleistungstests zu bestimmen.



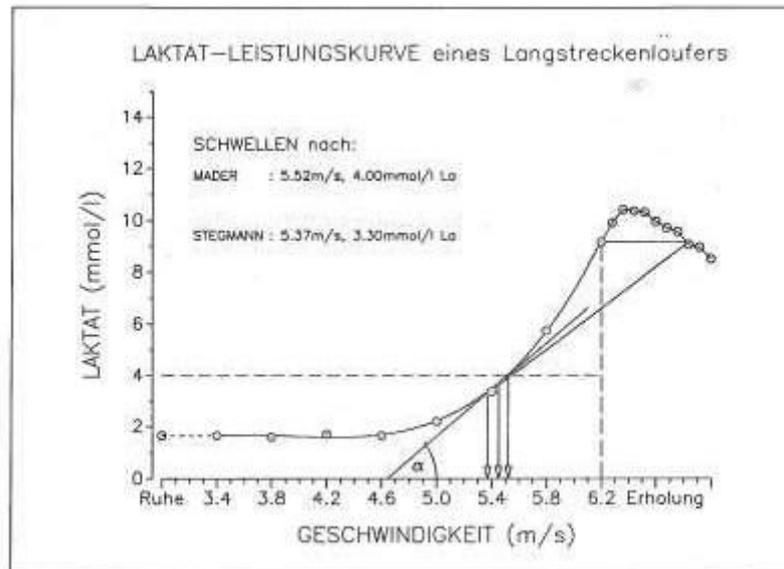
**Abbildung 2: Beispiel Maderschwelle**

### 1.1.2.2. Stegmann

1981 versuchten Stegmann et al. die von Mader definierte Schwelle und deren Bestimmung weiter zu verbessern. Um dies zu verdeutlichen sprach man nun von der Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle (iANS).

Stegmann et al. gehen davon aus, dass die Laktatelimination zu Beginn und in Bereichen einer geringen Laktatproduktion noch eine erhebliche Zunahme erfahren kann bis sie einen Maximalpunkt erreicht. Aus diesem Grund ist die Betrachtung der Erholungsphase für die Bestimmung dieser Schwelle essentiell und zieht eine Bestimmung der Laktatwerte in der Nachbelastungsphase nach sich.

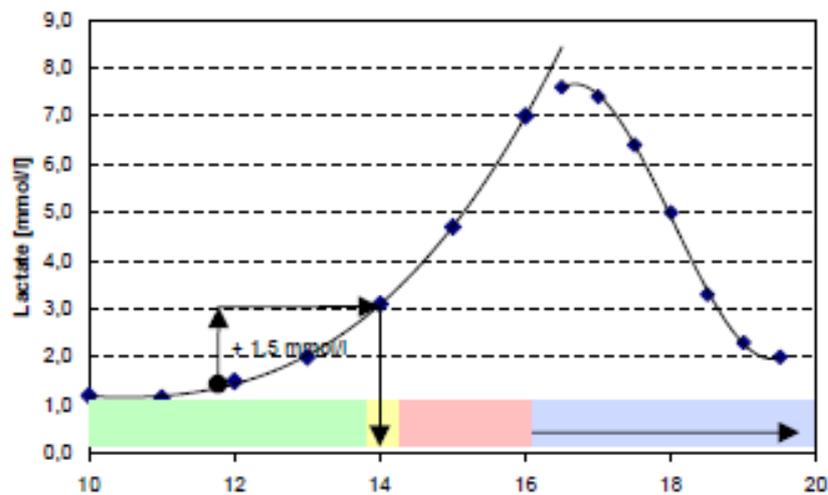
Sind die Nachbelastungswerte wieder gleich mit dem Abbruchwert des Stufentests wird in diesem Modell eine Tangente an die Laktatkurve gelegt. Der Schnittpunkt ist gleichbedeutend mit der iANS (50; 51).



**Abbildung 3: Beispiel Stegmannschwelle (50)**

### 1.1.2.3. Dickhuth

Dickhuth et al. konzipierten 1991 ein unter anderem speziell für Läufer entwickeltes Schwellenkonzept um die iANS zu bestimmen. Hierbei sollte die iANS möglichst genau dadurch bestimmt werden, in dem man, ausgehend vom individuellen Basislaktatwert, oder auch minimales Laktatequivalent (Lak/VO<sub>2</sub>/kg) genannt, zu diesem Basislaktatwert 1,5 mmol/l addiert. Aus diesem Grund wird das Schwellenkonzept 1,5 mmol/l-Methode genannt (14).



**Abbildung 4: Beispiel Dickhuthschwelle (37)**

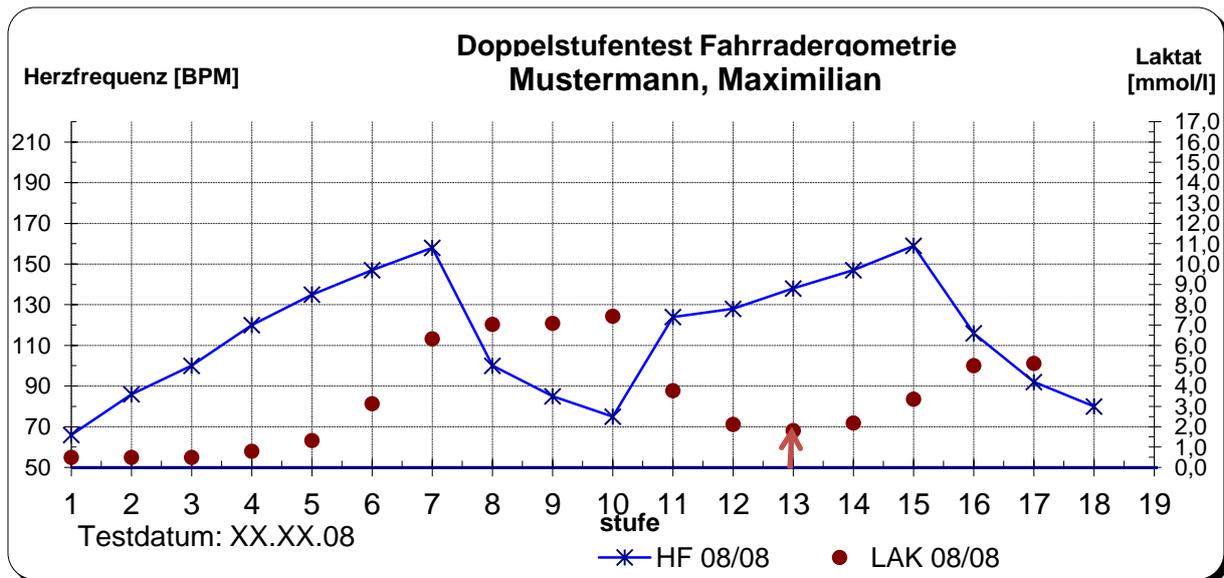
#### 1.1.2.4. Geiger-Hille

Das Geiger-Hille-Laufbandmodell berechnet die iANS am Punkt der maximalen Kurvenkrümmung, welcher als biologischer Umschlagpunkt im Metabolismus des Muskels angesehen wird. Dieser Punkt kann mathematisch in der Laktatkurve berechnet werden.

#### 1.1.2.5. Braumann

1989 führten Braumann et al. einen Stufentest mit Schwimmern, Basketballspielern sowie Mittel- und Langstreckenläufern durch. Dabei wurde vor dem Beginn des Stufentests durch eine maximale Kurzzeitbelastung eine möglichst hohe Milchsäurekonzentration im Blut erzeugt. Bei Beginn des Stufentests überwiegt zunächst noch die Laktateliminierung die Laktatbildung, so dass es zu einem Abfall der Laktatwerte kommt. Mit zunehmendem Anstieg der Belastung verschiebt sich dieses Verhältnis wieder zu Gunsten der vermehrten Laktatbildung und es kommt erneut zum Anstieg. Der tiefste Punkt entspricht dem maximalen Laktat Steady State (maxLASS) (9; 20; 53) wie in Abbildung 5 gezeigt wird (roter Pfeil).

Bei den Untersuchungen wurde eine bereits früher untersuchte Methode von Davis et al. (12; 13) zur Bestimmung der maxLASS weiter modifiziert.



**Abbildung 5: Beispiel Senke**

### 1.1.3. Validierungsmessung

Zur Validierung der jeweiligen iANS werden mehrere Dauerbelastungen mit unterschiedlichen Belastungsintensitäten durchgeführt, um diese möglichst exakt bestimmen zu können. Hierbei wird eine Gesamtbelastung von 30 Minuten pro einzelner Dauerbelastung durchgeführt, bei der in regelmäßigen Abständen (alle drei Minuten) Blut zur Bestimmung der Laktatkonzentration abgenommen wird (9; 23; 24; 45).

Dabei wird die erbrachte Leistung, bei der während der letzten 20 Minuten des Dauertests die Laktatkonzentration nicht um mehr als 1 mmol/l ansteigt (22), als die tatsächliche iANS angesehen.

Um diese Schwelle genau zu bestimmen sind mindestens zwei Testungen pro Proband vonnöten. Ein Test muss dabei um mehr als 1 mmol/l in den letzten 20 Minuten oberhalb der iANS liegen, so dass die Testung mit dem 5 % geringeren Widerstand und weniger als 1 mmol/l Anstieg als der validierte Test angesehen werden kann. Dabei sind 5 % durchaus eine probate Anzahl (5).

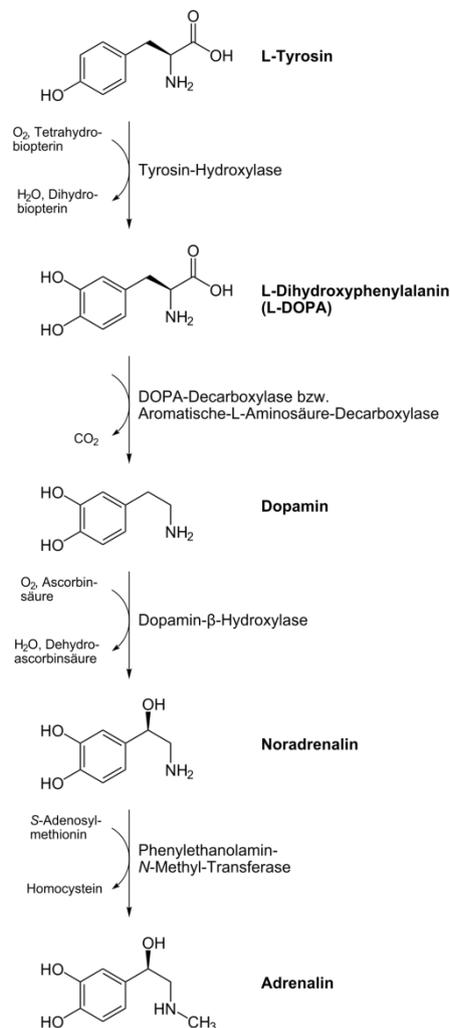
## **1.2. Das vegetative Nervensystem**

Das vegetative Nervensystem, auch autonomes Nervensystem genannt, ist für automatisch ablaufende Regulationsmechanismen des Körpers verantwortlich. Diese Mechanismen sind vom Menschen lediglich indirekt beeinflussbar. Durch das vegetative Nervensystem kontrolliert werden beispielsweise Herzschlag, Blutdruck, Atmung, Stoffwechsel, Schweißdrüsen, innere Augenmuskeln (Pupillenreaktion) und Verdauung.

Unterteilt wird das vegetative Nervensystem nach funktionellen und anatomischen Gesichtspunkten in das parasympathische Nervensystem, das enterische Nervensystem und das sympathische Nervensystem. Zum sympathischen Nervensystem zählen die Katecholamine.

### 1.3. Katecholamine

Zu den Katecholaminen zählen im Wesentlichen die Hormone Adrenalin (ADR) und Noradrenalin (NAD), sowie deren Vorstufe, das Dopamin. Diese Stoffe werden körpereigens zum Großteil in den Nebennierenrinden synthetisiert. Ausgangsstoff zur Synthese ist die Aminosäure Tyrosin, aus der dann in einzelnen Schritten zunächst Dopamin, dann Noradrenalin und im weiteren Verlauf Adrenalin hergestellt wird. (siehe Abbildung (Abb.) 6)



**Abbildung 6: Katecholaminsynthese (1)**

Diese körpereigenen Stoffe wirken an den Alpha- und Betarezeptoren des sympathischen Nervensystems. Sie haben eine stimulierende Wirkung. Pharmazeutisch gesehen sind es Sympathomimetika.

Im Klinikalltag findet die Bestimmung der Katecholamine ihren Platz bei der Diagnostik von Phäochromozytomen, Neuroblastomen und Paragangliomen. Die wichtigste Indikation zur Bestimmung ist der Verdacht auf ein Phäochromozytom (17). Als katecholaminproduzierender neuroendokriner Tumor produzieren 2/3 der Phäochromozytome Adrenalin und Noradrenalin (25)

### 1.3.1. Physiologische Mechanismen

Wie bereits beschrieben besitzen die Katecholamine eine wesentliche Rolle in der sympathischen Impulsfortleitung.

Das sympathische Nervensystem ist im Körper hauptverantwortlich für die Aktivierung bestimmter Prozesse. Noradrenalin wirkt dabei als Transmittersubstanz direkt an den Muskel- und Drüsenzellen. Dabei wird der Transmitterstoff im Neuron synthetisiert und in Vesikeln bis zur Freisetzung in dem neuronalen Spalt gespeichert. Einmal freigesetzt entfaltet es auf der anderen Seite des synaptischen Spalts seine Wirkung bevor es aus der Synapse wieder aufgenommen und enzymatische durch Monoaminoxidase inaktiviert wird.

Die Katecholaminsynthese findet allerdings zum größten Teil im Nebennierenrinndenmark statt. Hierbei übermitteln die Katecholamine, die in einem Verhältnis von 80 % Adrenalin und 20 % Noradrenalin, produziert werden, unterschiedliche Wirkungen an unterschiedlichen Orten über unterschiedliche Weisen.

Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Rezeptoren, die bei den Katecholaminen Adrenozeptoren genannt werden, über die diese wirken:  $\alpha$ - und  $\beta$ -Rezeptoren. Diese Rezeptoren gehören zu der Klasse der metabotropen Rezeptoren. Es sind Transmembranproteine, die nach ihrer Aktivierung eine Kaskade in Gang setzen und G-Protein gekoppelt sind.

Die beiden genannten Adrenozeptoren unterteilt man weiterhin in (s. Abb. 7):

- $\alpha_1$ -Adrenozeptoren: Kommen in glatten Muskelzellen und der quergestreiften Herzmuskulatur vor. Aktivierung führt zu einer erhöhten Herzaktivität und zur Vasokonstriktion.
- $\alpha_2$ -Adrenozeptoren: Sind vorwiegend an den präsynaptischen Membranen des sympathischen und parasympathischen Nervensystems zu

finden, aber auch im Fettgewebe. Sie führen zur Hemmung der Transmitterfreisetzung.

- $\beta_1$ -Adrenozeptoren: Kommen hauptsächlich im Myokard, aber auch an der Niere und im Fettgewebe vor. Haben eine erhöhte Affinität zu Adrenalin. Wirkt positiv inotrop (Herzkontraktion wird gesteigert) und positiv chronotrop (Herzfrequenz (HF) wird gesteigert). Zusätzlich wird Renin ausgeschüttet (Renin-Angiotensin-Aldosteron-System  $\rightarrow$  peripherer Blutdruck wird gesteigert).
- $\beta_2$ -Adrenozeptoren: Sind die am häufigsten vorkommenden Adrenozeptoren. Finden sich auf den meisten sympathisch innervierten Organen und in sämtlichen glatten Muskelgeweben. Ihre Aktivierung führt zur Entspannung der glatten Muskulatur. Sie lösen eine Ausschüttung von Insulin im Pankreas durch die Betazellen aus. Die Glykogenolyse und Glukoneogenese werden verstärkt in Gang gesetzt und Kohlenhydrate werden freigesetzt (hierbei kann es zur Hemmung durch  $\alpha_2$ -Adrenozeptoren kommen).

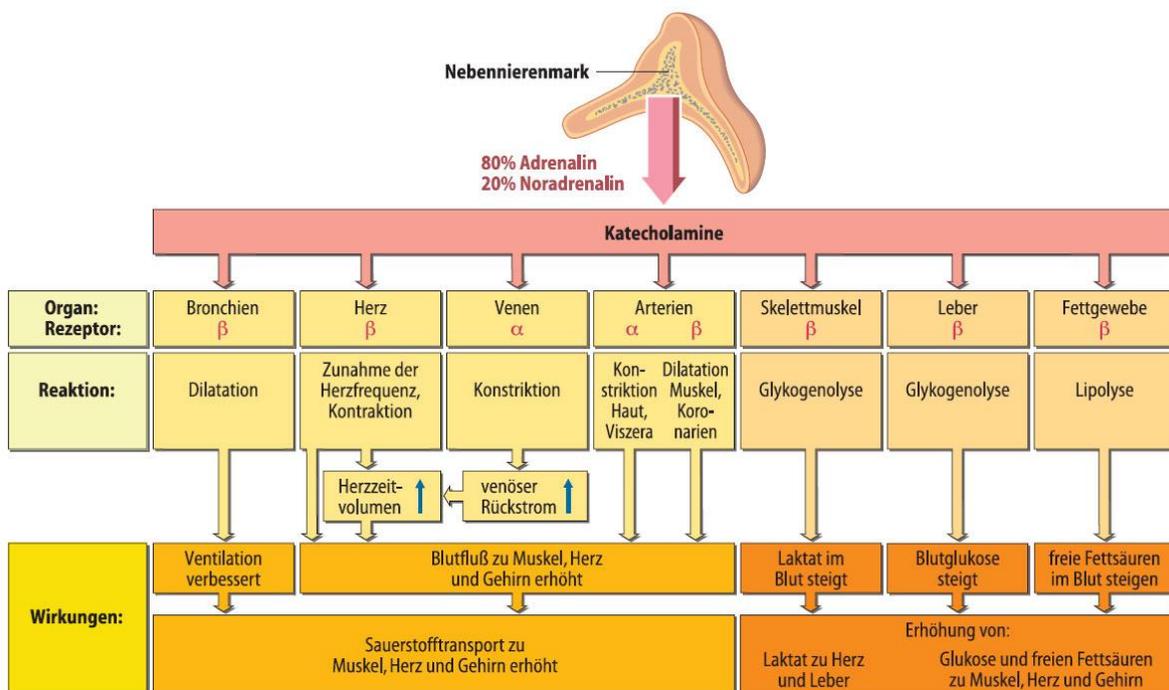


Abbildung 7: Adrenozeptor Signaltransduktion (6)

### 1.3.2. Katecholamine im Zusammenhang mit Laktat

Bei den Versuchen herauszufinden, ob es einen Zusammenhang zwischen den Katecholaminen Adrenalin und Noradrenalin mit der Produktion von Laktat gibt, haben sich zwei unterschiedliche Meinungen herauskristallisiert.

Auf der einen Seite wird dargestellt, dass ein hoher Zusammenhang zwischen den  $\beta$ -Adrenozeptoren und deren Stimulation der Laktatproduktion während körperlicher Anstrengung zu finden ist. So wurde zum Beispiel gezeigt, dass die Infusion von Adrenalin während der Belastung zu einem erhöhten Laktatwert im Blut führt (18; 28). Die Laktatausschüttung bei niedriger Intensität ist nicht abhängig von Adrenalin. Erst bei steigender NoradrenalinKonzentration kommt es zu einer Minderperfusion von laktateliminierenden Organen und somit zu einer erhöhten Laktatkonzentration im Organismus (10).

Laktat zeigte in einigen Studien einen besonders hohen Zusammenhang mit Adrenalin. Dies wird dadurch erklärt, dass Adrenalin die Glykogenolyse in Gang setzt. Dies führt wiederum zur vermehrten Laktatbildung (2; 19; 40; 46; 47; 48; 49; 56). Ein weiteres Argument für einen bestehenden Zusammenhang könnte sein, dass sich Laktat und Adrenalin gleichmäßig bei Belastung verändern, wenn der Glykogenhaushalt vermindert ist (38). Mazzeo et al. stellten außerdem einen Zusammenhang der Biegung der Adrenalin- und der Laktatschwellenkurven fest (34).

In einigen anderen Studien sollte herausgefunden werden, ob das  $\beta$ -Adrenozeptorsystem involviert ist. Dabei wurden die  $\beta$ -Adrenozeptoren blockiert, was zu einem verminderten Laktatwert führte (2; 19; 27; 41). Aus diesem Grund wird das  $\beta$ -Adrenozeptorsystem als ein wesentlicher Faktor der Laktatbildung während der Belastung angesehen (49).

Ziel anderer Untersuchungen war es, Laktat- und Katecholaminschwellen zu vergleichen. Die Studie von Chwalbinska et al. war angelegt um herauszufinden, ob es ein Schwellenphänomen und einen Zusammenhang zwischen Katecholaminen, Laktat und dem Human Growth Hormone (HGH) gibt (11). Dabei wurde festgestellt, dass sowohl die absoluten, wie auch die relativen Werte von Adrenalin, Noradrenalin und Laktat nahezu identisch sind. So kam man zu dem Schluss, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass neuronale afferente Signale von Muskelrezeptoren in der Aktivie-

nung von Katecholaminausschüttung mitwirken (11; 30; 35). Hierbei zeigte sich in einer Studie, dass die Noradrenalinschwelle immer vor der Laktatschwelle und vor der Adrenalinschwelle gelegen hat (15).

Die zweite Meinung vertritt die Theorie, dass nicht die Katecholamine zur Ausschüttung von Laktat verantwortlich sind, sondern dass der veränderte pH-Wert, der durch die vermehrte Produktion von Laktat sinkt, eher verantwortlich für die Produktion von Katecholaminen ist (35; 43). Der niedrige pH-Wert soll zu einer sympathischen Stimulation führen, die dann zusammen mit anderen, bisher unbekanntem Faktoren, die Ausschüttung der Katecholamine steigert (34; 36).

Weltman et al. untersuchte die Studien, in denen gezeigt wurde, dass zwischen Adrenalin und Laktat ein hoher Zusammenhang besteht (31; 33; 34; 38; 43). Hierbei stellte er fest, dass Adrenalin und die Laktatschwelle als abhängige Variablen in den Berechnungen betrachtet wurden und nicht als unabhängige. Aus diesem Grund können die Ergebnisse dieser Arbeiten, laut Weltman et al., nicht den Zusammenhang zwischen Laktatschwelle und der Übereinstimmung mit den Katecholaminwerten genügend darstellen (56).

Stainsby et al. zeigte in seiner Arbeit außerdem, dass Adrenalin wesentlich schneller eliminiert wird als Noradrenalin und dass Adrenalin zusätzlich eine maximale Effektdosis hat, ab der es nicht mehr auf die Laktatproduktion einwirken kann (48).

#### **1.4. Ziel der Untersuchung**

Auf dem Gebiet der Erforschung von Zusammenhängen zwischen Laktat und Katecholaminen bei körperlicher Anstrengung wurden in den vergangenen nun mehr fast 30 Jahren viele Versuche unternommen diese Zusammenhänge näher zu erörtern.

Mit dieser Arbeit soll die Hypothese überprüft werden inwieweit sich diese Zusammenhänge bestätigen oder gegebenenfalls auch widerlegen lassen und ob daraus Konsequenzen für die Trainingssteuerung abgeleitet werden können. Falls tatsächlich ein Zusammenhang der Katecholamin- und Laktatkurve besteht, dann ist es vielleicht auch möglich, über den Verlauf der Laktatkurve den Zustand des vegetativen Nervensystems abzubilden. Im Rahmen von Störungen des vegetativen Nervensystems könnte somit der Verlauf der Laktatkurve gegebenenfalls Aufschlüsse darüber liefern inwieweit das vegetative Nervensystem bereits beansprucht beziehungsweise (bzw.) gefährdet ist. Bei Sportlern spielt der Zustand des vegetativen Nervensystems besonders dann eine Rolle, wenn es darum geht, ein etwaiges Übertraining zu diagnostizieren. Selbst die Möglichkeit, den Zustand des Übertrainings und einen daraus folgenden Leistungseinbruch zu verhindern wäre zuverlässiger möglich. Die Laktatmessung könnte noch wertvoller für die Trainingsplangestaltung werden.

Ein besonderes Augenmerk ist darauf gelegt worden, dass die unterschiedlichen Messmethoden mit den tatsächlichen, wahren Schwellen verglichen wurden. Hierzu ist jede einzelne Schwelle durch mehrere Testungen validiert worden um ein möglichst exaktes Ergebnis zu erzielen. Herauszufinden galt, welche Schwellenbestimmungsmethode Ergebnisse liefert, die am zuverlässigsten die tatsächliche Schwelle widerspiegeln.

Aus diesem Grund kam das Design des vorangehenden Laktatsenkentests, mit an mehreren aufeinander folgenden Tagen durchgeführten Dauertests zur Validierung der im Senkentest ermittelten Schwellen, zustande.

Um bei der Auswertung möglichst vergleichbare Ergebnisse zwischen Männern und Frauen, die unterschiedliche Belastungsmaxima erreichten, zu haben, sind die erreichten Maximalwerte während der Belastung mit 100 % gleichgesetzt worden. Hiervon wird sich eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse versprochen.

## **2. Material und Methoden**

### **2.1. Probanden**

Für die hier vorliegende Arbeit wurden die Daten zwischen August und Dezember 2008 am Institut für Sport- und Bewegungsmedizin in Hamburg erhoben. Um möglichst allgemein aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, wurden Leistungssportler von vornherein für die Versuche ausgeschlossen und ein möglichst homogenes Feld von Freizeitsportlern ausgesucht.

Insgesamt nahmen 24 Probanden, 12 weibliche und 12 männlichen Probanden, an den Versuchen teil. Alle Probanden sind über die bevorstehenden Testungen sowie deren anonymisierte Auswertung aufgeklärt worden und haben ihr schriftliches Einverständnis gegeben.

Zu Beginn wurde von jedem Probanden Körpergröße und Gewicht ermittelt und nach der momentanen Trainingshäufigkeit zur Evaluierung des Trainingszustandes befragt. Eine körperliche Untersuchung zum Ausschluss eines gesundheitlichen Risikos sowie zur Abklärung weiterer Ausschlussfaktoren wie Koffeinaufnahme durch Kaffee oder ähnliche Getränke und eine schwere körperliche Belastung in den vergangenen 24 Stunden wurde daran angeschlossen.

Die Probanden wurden darauf hingewiesen, dass während des Zeitraums der Testungen auf vermehrtes Training und/oder außergewöhnliches Training zu verzichten ist.

## 2.2. Doppelstufentest

Zur Bestimmung der aeroben-anaeroben Schwelle kam ein Doppelstufentest zur Anwendung. Dieser Test besteht aus zwei Belastungsphasen, die unmittelbar aufeinander folgen. Hierbei soll es während der zweiten Belastungsphase zunächst zu einem weiteren Abfall der Laktatwerte kommen, um dann ab einem bestimmten Punkt wieder anzusteigen. Dieser tiefste Punkt soll dann am exaktesten die Schwelle wiedergeben. Der erste Belastungsteil ist zudem ausschlaggebend für die weiteren Modelle zur Bestimmung der iANS. Nach Abschluss des Doppelstufentests fanden, mit jeweils mindestens einem Tag Pause, die anschließenden Dauertests zur Validierung der ermittelten Schwelle statt. Der weitere Vorteil dieses Tests besteht darin, dass die weiter unten aufgeführten Messmethoden mit dem ersten Teil des Doppelstufentests mitbestimmt werden konnten. So konnten mehrere iANS-Bestimmungen miteinander verglichen werden um die bestmöglichen zum Vergleich mit den Katecholaminschwellen zu benutzen.

Vor Beginn des Doppelstufentests bekommen die Probanden eine Venenverweilkannüle gelegt, um während der Belastung auf dem Fahrradergometer (LODE Excalibur Sport, Groningen, Niederlande) die Blutabnahme zur Bestimmung der Katecholaminwerte aus der Kubitalvene durchführen zu können. In einem weiteren Schritt werden die Elektroden zur Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität (HRV) mittels VICARDIO (getemed, Teltow) angebracht. Als dritter und letzter Schritt vor der Belastung bekommen alle Probanden eine Maske zur Bestimmung der spirometrischen Daten (Quark b<sup>2</sup> COSMED, Italien) während der Belastungs- und Erholungsphasen aufgesetzt.

Zusätzlich zu den objektiven Parametern die erhoben wurden, sollten die Probanden alle drei Minuten während der Belastung anhand der Borg-Skala ihre subjektive Einschätzung über ihren Ermüdungszustand wiedergeben.

Tabelle 1 zeigt nachfolgend, zu welchen Zeitpunkten bestimmte Parameter gemessen beziehungsweise abgenommen worden sind.

**Tabelle 1: Studienprotokoll**

Zeit in Minuten	Phase	HRV	Laktat kapillar	Laktat venös	Katecholamine	HF	Borg	Respiratorischer Quotient
20	Ruhephase	x		x	x	x		
	Fahrradergometer	x	x	x	x	x		x
	1. Teil	x	x	x	x	x	x	x
alle 3 min bis Abbruch								
1	Erholung		x	x	x	x		x
3	Erholung		x	x	x	x		x
5	Erholung	x	x	x	x	x		x
	2. Teil	x	x	x	x	x	x	x
alle 3 min bis Abbruch								
1	Erholung		x	x	x	x		x
3	Erholung		x	x	x	x		x
5	Erholung	x	x	x	x	x		x
20	Ruhephase	x	x	x	x	x		

### 2.2.1. Erster Teil

Der Stufentest beginnt mit einer dreiminütigen Aufwärmphase bei 50 W. Der Widerstand des Fahrradergometers erhöht sich jede Minute computergesteuert um 16,73 W, so dass nach jeweils drei Minuten die Leistungssteigerung 50 W (Watt) beträgt.

Die Probanden sind dazu angehalten, bis zur vollkommenen Ausbelastung zu fahren.

### 2.2.2. Erholungsphase zwischen Belastungsphasen

Bei Signalisierung des Probanden den Test abubrechen, wird der Fahrradergometer manuell auf 50 W eingestellt, damit sich dieser locker ausfahren kann. Nach drei Minuten wird ihm die Möglichkeit eingeräumt, sich gänzlich, also ohne Widerstand des Fahrradergometers, zu erholen. Nach weiteren drei Minuten beginnt der zweite Teil des Doppelstufentests. Somit hat jeder Proband zwischen den beiden Testteilen insgesamt sechs Minuten aktive Erholungszeit. Während dieser sechs Minuten wird nach einer, drei und fünf Minuten Blut zur Bestimmung der Erholungswerte und für die Bestimmung der Schwelle nach Stegmann abgenommen.

### 2.2.3. Zweiter Teil zur Senkenbestimmung

Der zweite Teil des Doppelstufentests beginnt bei der Hälfte der zuvor erreichten maximalen Wattleistung ( $W_{max}$ ). Das entspricht zum Beispiel einer Wattzahl von 125 W zu Beginn bei zuvor erreichten 250 W. Die Belastung wird um 8,37 W jede Minute gesteigert und somit alle drei Minuten um 25 W.

Die Probanden werden dazu angehalten, bis zur vollkommenen Ausbelastung zu fahren, weil der Punkt erreicht werden muss, an dem die Laktatkonzentration im kapillaren Blut wieder ansteigt.

Nach dem Erreichen der subjektiven maximalen Anstrengung beginnt eine erneute aktive Erholungsphase die dieses Mal fünf Minuten beträgt. Nach Abschluss der fünfminütigen Pause steigen die Probanden vom Fahrrad.

Wie eine visuell gezeichnete Grafik über den gesamten Testverlauf aussieht, zeigt Abb. 8 anhand der Beispielkurven für Adrenalin und das kapillar gemessene Laktat. Sie zeigt den Abfall der beiden Parameter in der Erholungsphase und den darauf folgenden Wiederanstieg bei Beginn der zweiten Belastungsphase.

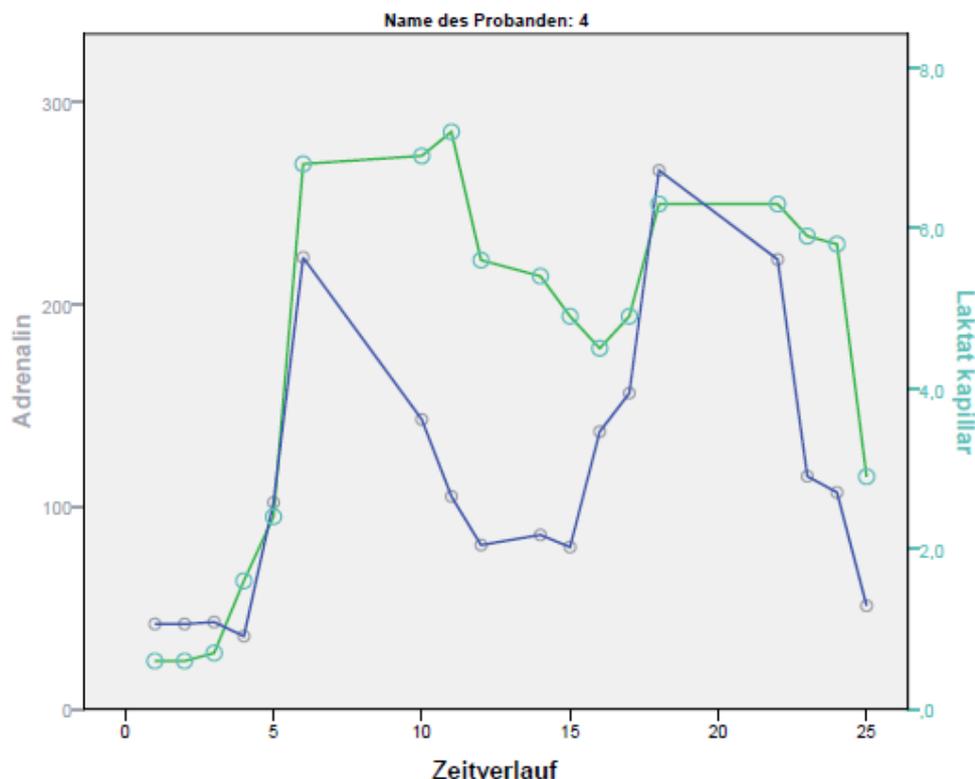


Abbildung 8: Beispiel Doppelstufentestkurvenverlauf (Adrenalin-Laktat)

## 2.3. Physiologische Parameter

Anhand der nachfolgenden objektiven Testverfahren sind die Schwellen der einzelnen Probanden berechnet worden. Sie wurden zudem verwendet um eventuelle Übereinstimmungen mit der subjektiven Wahrnehmung der einzelnen Probanden anhand der Borg-Skala herauszufinden.

### 2.3.1. Katecholamine

Die Katecholamine werden nach den jeweiligen Ruhephasen, nach drei Belastungsminuten und in Ruhe auf dem Fahrradergometer vor Beginn der jeweiligen Testung durchgeführt. Während der Erholungsphasen werden nach einer, drei und fünf Minuten Blutproben entnommen.

Die venöse Blutabnahme erfolgt durch die zuvor gelegte Venenverweilkanüle in der Kubitalvene. Während der Belastung ist darauf zu achten, den Arm des Probanden möglichst gestreckt zu lagern um den bestmöglichen Abfluss zu gewährleisten. Das Abnahmeröhrchen zur Bestimmung der Katecholamine muss mindestens bis zur Hälfte gefüllt werden.

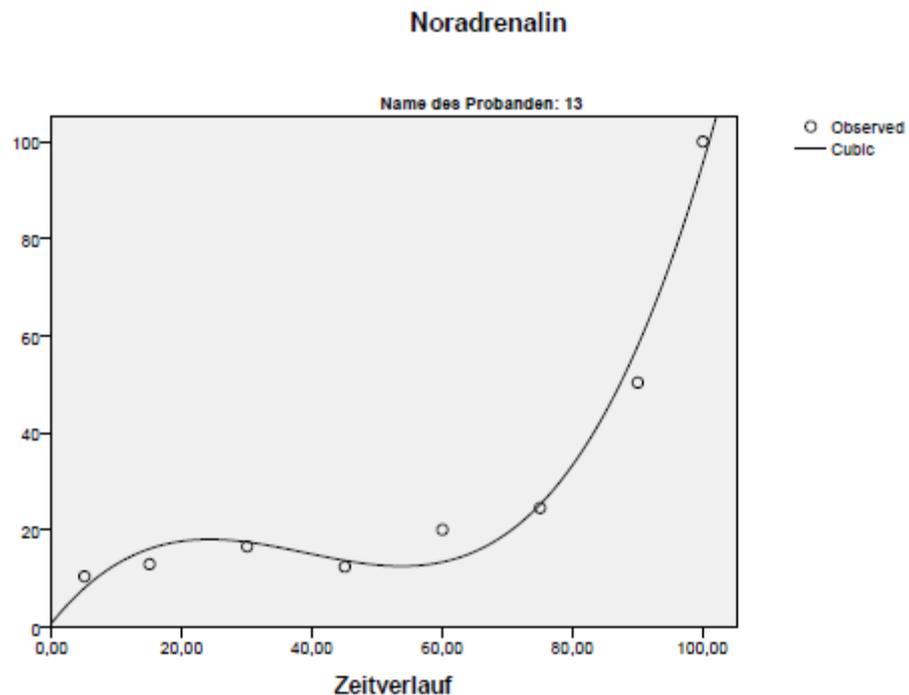
Die Blutanalyse erfolgt mittels eines Hochleistungsflüssigkeitschromatographen (high performance liquid chromatography-HPLC)-Komplettkits der Firma Recipe ClinRep® Diagnostik bei der LADR GmbH in Geesthacht. Hier wird das Blut zur Evaluierung vorbereitet. Der Prozess läuft dabei wie folgt ab: Bei der Extraktion werden 1 ml Plasma und 50 µl Internen Standards (IS) auf das Probenvorbereitungssäulchen aufgetragen. Dies wird daraufhin drei Mal mit 1 ml Waschlösung gewaschen.

Das Produkt wird anschließend mit 120 µl Elutionsreagenz eluiert bevor von dem gesammelten Eluat 40 µl zur HPLC-Analyse injiziert werden (39).

Die Ergebnisse sind umgehend vom Labor zur Verfügung gestellt worden um ausgewertet zu werden. Die Nachweisgrenze der Katecholamine liegt bei diesem Gerät bei 5 ng/l.

Abschließend wird jedem Probanden 10 ml Natriumchlorid-Lösung injiziert um einem möglichen Volumenverlust und einem daraus resultierenden Blutdruckabfall, sowie einer Verstopfung durch Blutkoagel in der Venenverweilkanüle vorzubeugen.

Zur Aufarbeitung der Kurven wurden diese mathematisch berechnet (s. 2.5 Statistik). Hierbei sind die maximal erreichten absoluten Werte während der Belastung mit 100 % gleichgesetzt worden und anhand dieses Wertes alle anderen Prozentwerte berechnet worden (s. Abb. 9).



**Abbildung 9: Beispiel Katecholaminkurve**

Der Zeitverlauf ist hierbei ebenfalls in 100 % angegeben, um alle Probanden besser miteinander vergleichen zu können, da diese unterschiedlich lange und somit auch eine unterschiedliche Wattzahl getreten haben.

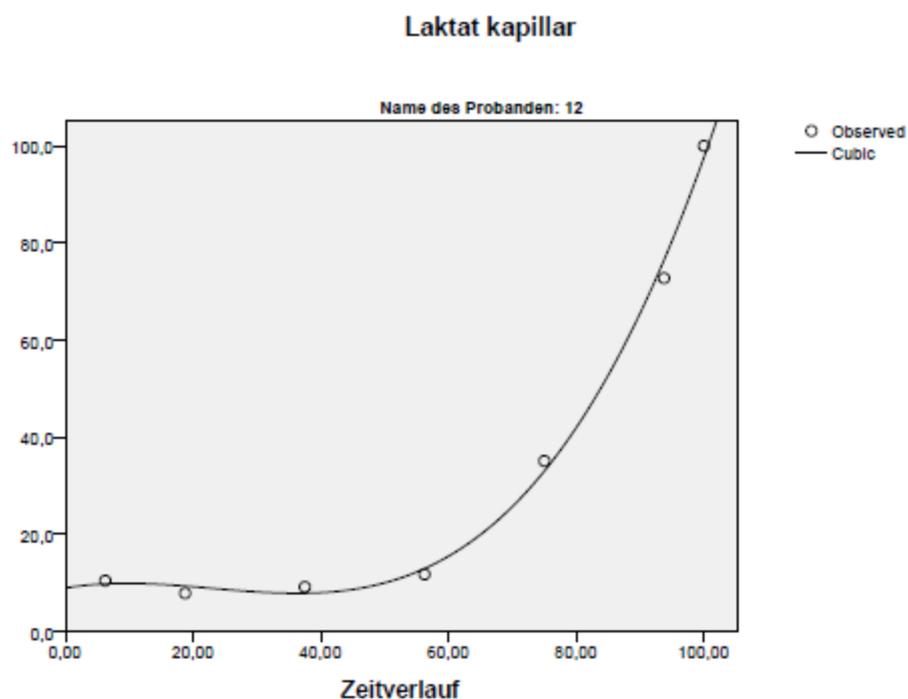
### 2.3.2. Laktat

Das Laktat wird kapillar aus dem rechten oder linken Lobulus auriculæ gewonnen. Die Entnahmestelle des kapillaren Blutes wird mit Cutasept® desinfiziert und mit einem Tupfer getrocknet um zu verhindern, dass Schweiß und/oder Desinfektionsmittel mit dem abgenommenen Blut vermischt werden. Der Lobulus auriculæ wird mit einer Lanzette angestochen und der erste Tropfen Blut wird mit einem neuen Tupfer abgewischt. Der zweite Tropfen Blut wird mit 30 mm end-to-end-Kapillaren (20 µl) gewonnen. Die Kapillare wird ohne Lufteinschluss vollständig gefüllt und in einem Eppendorfgefäß abgelegt, welches dann sofort kräftig geschüttelt wird. Das Eppendorfgefäß ist mit einer Glukose-/Laktat-Hämolyse­lösung (Hersteller EKF-DIAGNOSTIC)

gefüllt, wodurch die Erythrozyten lysieren und eine zusätzliche Laktatbildung ausgeschlossen werden kann.

Das Laktatmessgerät EBIO PLUS/Eppendorf aus Hamburg bzw. BIOSEN C\_Line/EKF-DIAGNOSTIC analysiert die Proben enzymatisch-amperometrisch.

Die Laktatkurven sind auf dem gleichen Weg berechnet worden wie die Katecholamin kurven. Der höchste Wert während der Belastung, der hier in allen Fällen die Abbruchstufe war, ist gleich 100 % gesetzt worden und alle anderen Werte sind daran ausgerechnet worden um dann die Kurve zu berechnen. Ein Beispiel zeigt Abb. 10.



**Abbildung 10: Beispiel Laktatkurve**

Wie bei den Katecholamin kurven ist der Zeitverlauf und damit verbunden die maximal getretene Wattleistung zum besseren Vergleich der Probanden ebenfalls auf 100 % umgerechnet worden.

### 2.3.3. Herzfrequenz

Die Herzfrequenz wird während der Ruhephasen über ein Herzfrequenzvariabilität (Heart-Rate-Variability HRV)-Messgerät bestimmt und aufgezeichnet. Während der Belastung kommt eine Polar-Pulsuhr zum Einsatz, mit der permanent die HF gemessen wird. Die Ablesung erfolgt immer zeitgleich mit der kapillaren Laktatgewinnung.

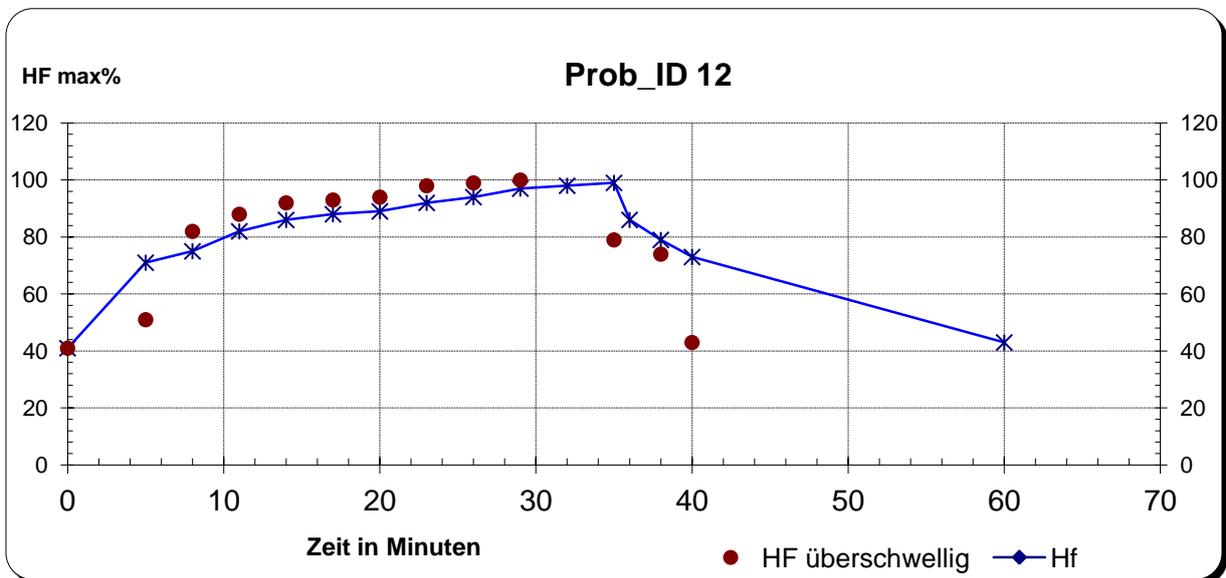
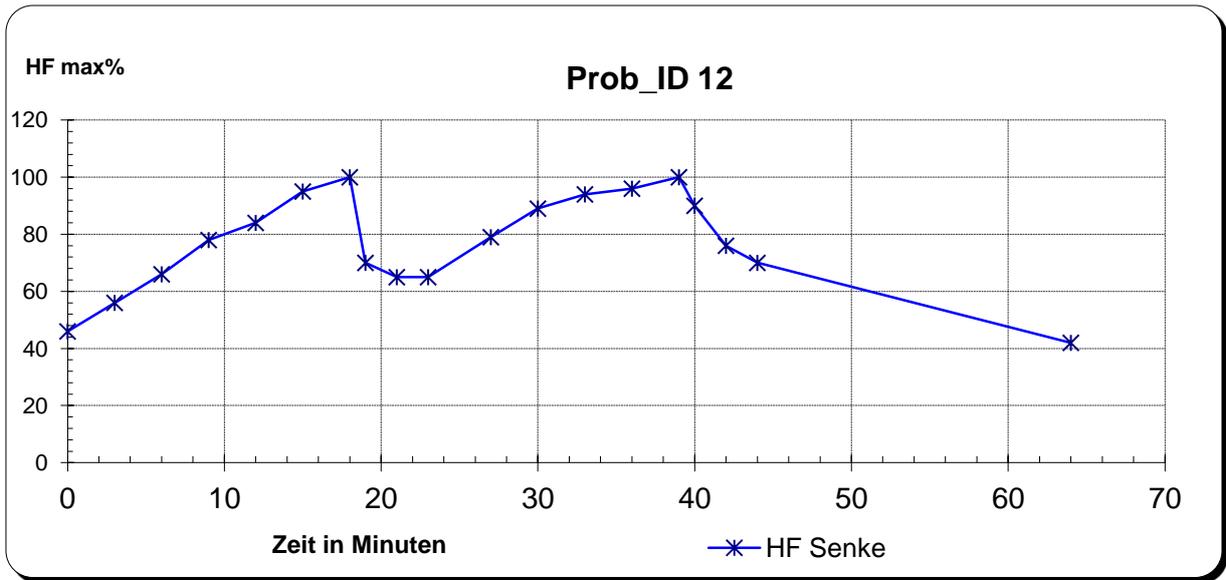


Abbildung 11: Herzfrequenzkurve Senkentest und Dauertest Proband 12

## 2.4. Dauertest

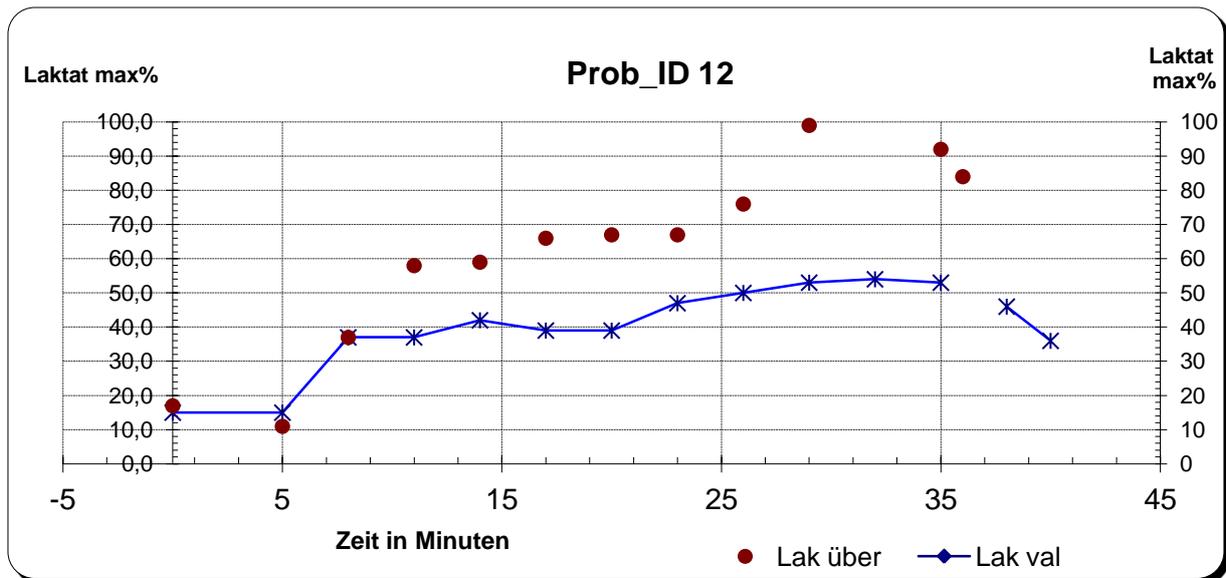
Die Überprüfung der Schwelle erfolgt im weiteren Verlauf durch einen Dauertest um unter anderem herauszufinden, welche der durchgeführten Methoden zur Schwellenbestimmung am ehesten die tatsächliche iANS widerspiegelt.

Der erste Dauertest wird spätestens innerhalb der nächsten zwei Tage nach dem Doppelstufentest durchgeführt. Der Dauertest dient zur Validierung der zuvor berechneten iANS.

Die Probanden durchlaufen dieselbe Vorbereitung wie zuvor beim Doppelstufentest. Danach fahren sich die Probanden fünf Minuten bei 50 W warm, um dann manuell auf ihre errechnete Wattzahl eingestellt zu werden. Die Probanden sollen nun 30 Minuten bei gleichbleibendem Widerstand treten. Während dieser 30 Minuten werden alle drei Minuten HF und Laktat bestimmt. Nach 10, 20 und 30 Minuten wird zusätzlich venöses Blut zur Bestimmung der Katecholaminwerte abgenommen.

Die Erholungs- und Ruhephase nach dem Dauertest wiederholt sich genauso wie beim vorangegangenen Doppelstufentest.

Voraussetzung zur Validierung der iANS ist, dass mindestens zwei Dauertests vorhanden sind. Einer von beiden muss überschwellig sein. Überschwellig wird ein Dauertest gewertet, wenn die Laktatkonzentration zwischen der 10. und 30. Minute im kapillaren Blut um mehr als 1 mmol/l ansteigt (s. Abb. 12, Abbruch bei Minute 30 des überschwelligen Tests). Sobald ein Test als überschwellig gewertet wird, wird der nachfolgende Dauertest, der mit mindestens einem Tag Pause angeschlossen wird, mit 5 % weniger Widerstand erneut durchgeführt.



**Abbildung 12: Laktatanstieg bei validiertem und überschwelligem Dauertest**

Somit kann bis auf eine 5 %-Genauigkeit die iANS bei jedem Probanden bestimmt werden. Bei den Dauertests sollten die Probanden anhand der Borg-Skala eine subjektive Auskunft darüber geben, wie sie sich selber von der Ausbelastung her fühlen. Dies erfolgte genau wie beim Stufentest.

## 2.5. Statistik

Die mathematische Berechnung der Stufentestkurven für die Laktat und Katecholaminwerte wurde mit einem Polynom 3° ( $f(x) = konst. + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3$ ) (29; 52) durch das Statistikprogramm SPSS 16.0 for Windows berechnet. Dieses Programm wurde ebenfalls für das Erstellen der deskriptiven Statistik und der Einzelgrafiken verwendet.

Weitere grafische Darstellungen sind mit dem Programm Microsoft® Office Excel 2007 erstellt worden. Mit diesem Programm ist ebenfalls der Punkt der maximalen Kurvenkrümmung (Geiger-Hille) benutzt worden. Dazu kam folgende Formel zum Einsatz:

$$x = \frac{1}{15b_3^2} \cdot \left( -5b_2b_3 \pm \sqrt{5 \cdot \sqrt{2b_2^2b_3^2 - 6b_1b_3^3 \pm 3b_3^2 \cdot \sqrt{b_2^4 - 6b_1b_2^2b_3 + 5b_3^2 + 9b_1^2b_3^2}}} \right)$$

Wobei  $b_1$ ,  $b_2$  und  $b_3$  identisch mit denen des Polynoms 3° sind.

Zur besseren Beurteilung der unterschiedlich erzielten maximalen Wattleistung sind, wie oben bereits erwähnt, bei jedem Probanden die maximal erreichten Werte gleich 100 % gesetzt worden. Somit sind die Kurven untereinander besser zu vergleichen, da nicht jeder Proband die gleiche maximale Wattleistung besitzt.

Bei den anderen Parametern (Laktat, Adrenalin und Noradrenalin) ist die gleiche Methode eingesetzt worden, um alle berechneten Kurven besser in ein und demselben Grafen darzustellen. Hier ist der jeweils maximal erreichte Wert während des ersten Belastungstests gleich 100 % gesetzt und alle anderen Werte dementsprechend daran berechnet worden.

Die so errechneten Kurven sind zunächst zur visuellen Betrachtung bei jedem Probanden in einen Graphen gezeichnet worden. Die unterschiedlichen iANS-Bestimmungsschemata sind nach den einzelnen Schwellenkonzepten, die in der Einleitung aufgeführt sind, berechnet.

Die Berechnung der Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) ist ebenfalls mit dem Programm Microsoft® Office Excel 2007 erfolgt.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Probanden

Alle Probanden sind vor jeder Testung eingehend untersucht worden, ob Faktoren wie Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems, der Atemwege oder generelle Infektzeichen vorliegen, die gegen eine körperliche Belastung sprechen.

Niemand musste aufgrund körperlicher Fitness, mangelhaften Gesundheitszustands oder anderer Ausschlusskriterien, wie Aufnahme von Koffein am Testtag und am Vortag oder extensiven Trainings, ausgeschlossen werden. In Tabelle 2 sind die anthropometrischen Daten der Probanden aufgeführt.

**Tabelle 2: Anthropometrische Daten der Probanden**

	<b>Alter</b>	<b>Größe</b>	<b>Gewicht</b>	<b>Body Mass Index (BMI)</b>	<b>Anzahl TE</b>
weiblich n = 12	26,6 ± 2,3	170,8 ± 6,3	63,6 ± 6,8	21,8 ± 2,2	3,3 ± 2,4
männlich n = 12	27,7 ± 5,3	183,5 ± 4,1	81,0 ± 6,9	23,5 ± 2,0	2,3 ± 1,1
Gesamt n = 24	27,1 ± 4,0	177,1 ± 8,3	72,3 ± 11,2	22,7 ± 2,2	2,8 ± 1,9

## 3.2. Auswertung Doppelstufentest

Die beim Doppelstufentest erhobenen Daten sind zunächst in eine Tabelle eingefügt worden. Eine Grafik wurde erstellt und diese entstandene Kurve wird visuell ausgewertet. Dabei sind die unterschiedlichen Schwellenkonzepte zum Einsatz gekommen, um einen gleichzeitigen Vergleich mit der Braumann-Schwelle zu erzielen.

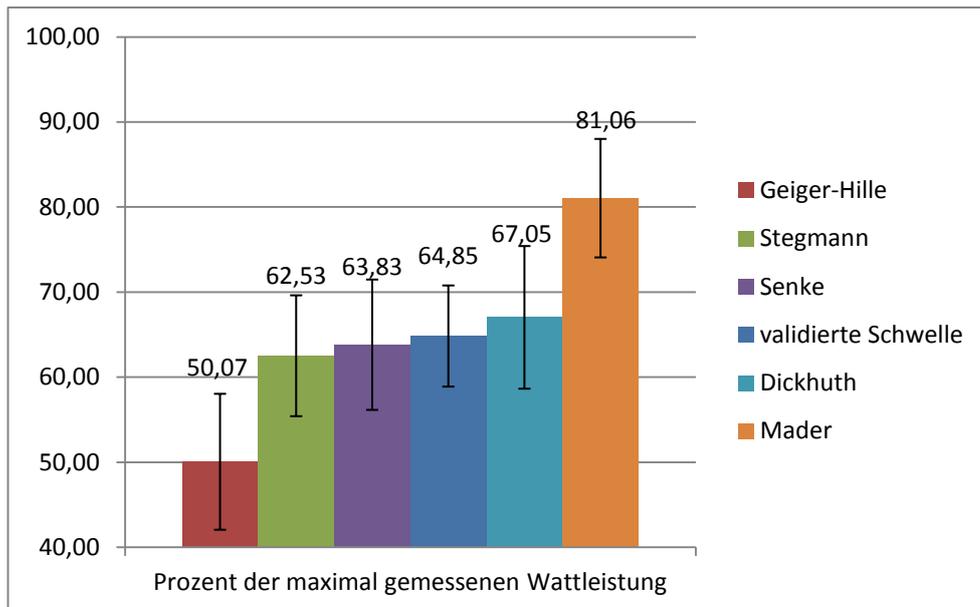
Die Einschätzung der subjektiven Ausbelastung nach Borg (0 = gar keine Anstrengung bis 20 = vollkommene Ausbelastung) (7) ergab während des ersten Teils des Stufentests einen Wert von 19,4 ( $\pm 0,7$ ), während des zweiten Teils 18,9 ( $\pm 1,0$ ), beim überschwelligen Dauertest 18,4 ( $\pm 1,1$ ), beim Dauertest an der Schwelle 17,0 ( $\pm 2,1$ ) und an der validierten Schwelle während des Senkentests 14,7 ( $\pm 2,2$ ).

### 3.2.1. Belastung

Das Laktat stieg im Mittel innerhalb des Beginns des Stufentests von 0,8 mmol/l ( $\pm 0,2$  mmol/l) auf MW 9,7 mmol/l ( $\pm 2,2$  mmol/l) in der dritten Nachbelastungsminute an. Bei den Katecholaminen kam es zu einem Anstieg von MW 62,3 ng/l ( $\pm 32,9$ ) auf MW 318,4 ng/l ( $\pm 40,4$ ) in der Abbruchstufe für Adrenalin und für Noradrenalin von MW 292,2 ng/l ( $\pm 141,8$ ) auf MW 2416,3 ng/l ( $\pm 289,0$ ) ebenfalls in der Abbruchstufe. Bei der getretenen Watt/kg Körpergewicht (KG)-Zahl wurden im Maximum (max.) im Mittel 3,7 Watt/kg KG ( $\pm 0,5$  Watt/kg KG) bewegt.

### 3.2.2. Schwelle

Die Schwellenkonzepte nach Stegmann, Dickhuth, Braumann sowie das Geiger-Hille-Modell werden mit den Ergebnissen des Dauertests, also der exakten Schwelle, verglichen. Die hierfür genutzten ursprünglichen Werte sind zunächst in Prozent der maximal erbrachten Leistung umgerechnet worden, um dann daraus die Vergleiche zwischen den einzelnen Methoden zu ziehen. In Abbildung 13 wird dargestellt, wie viel Prozent der maximal erbrachten Leistung die Probanden im Mittel an den einzelnen Schwellen erbracht haben. Bei der validierten Schwelle sind es 64,9 % ( $\pm 6,0$ ) ihrer maximal erbrachten Wattleistung.

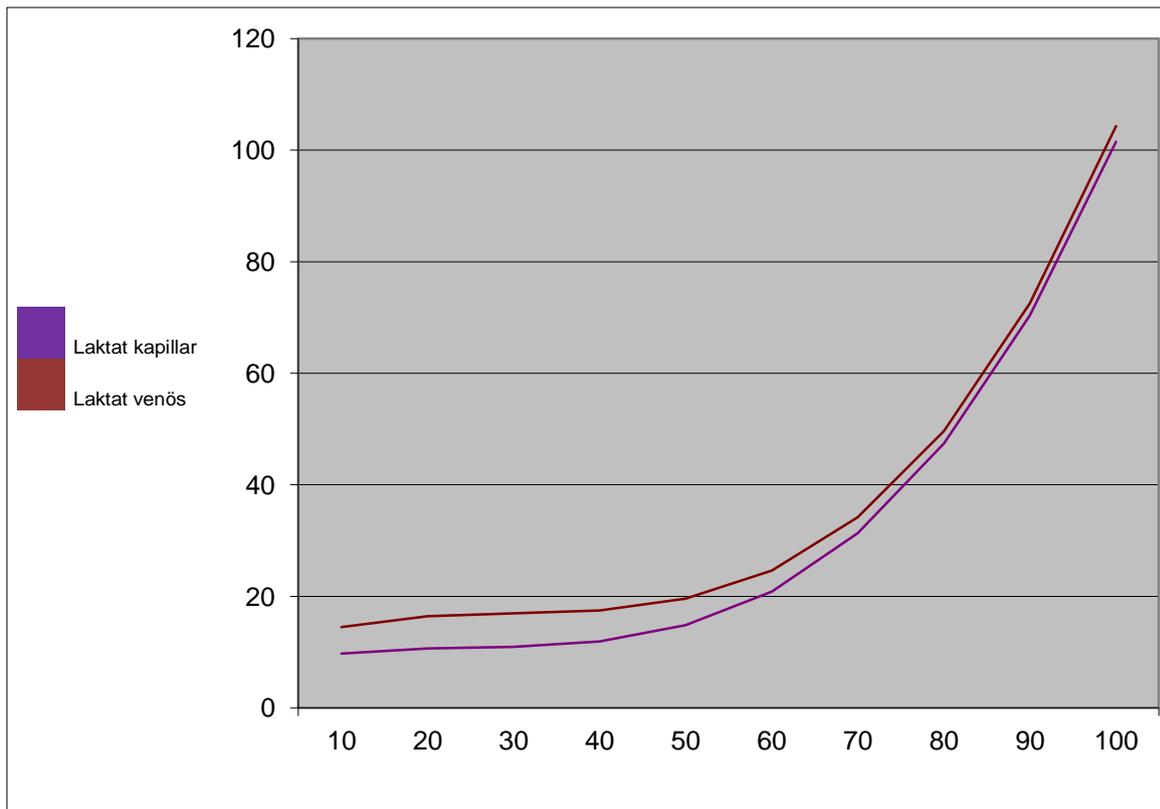


**Abbildung 13: Vergleich Schwellenkonzepte**

Der validierten Schwelle kommen die Modelle nach Stegmann (62,5 %;  $\pm 7,1$ ) und Dickhuth (67,1 %;  $\pm 8,4$ ) sehr nahe. Am exaktesten berechnet die Bestimmung nach der Senken-Methode/Braumann (63,8 %;  $\pm 7,7$ ) die validierte Schwelle.

### 3.2.2.1. Laktat

Bei der Betrachtung der Mittelwertskurve für Laktat (s. Abb. 14) ist deutlich zu erkennen, dass Laktat zunächst eine etwas längere Plateauphase hat um dann sehr zügig exponentiell anzusteigen. Außerdem ist der venös gemessene Wert im Mittel stets höher als der kapillare.



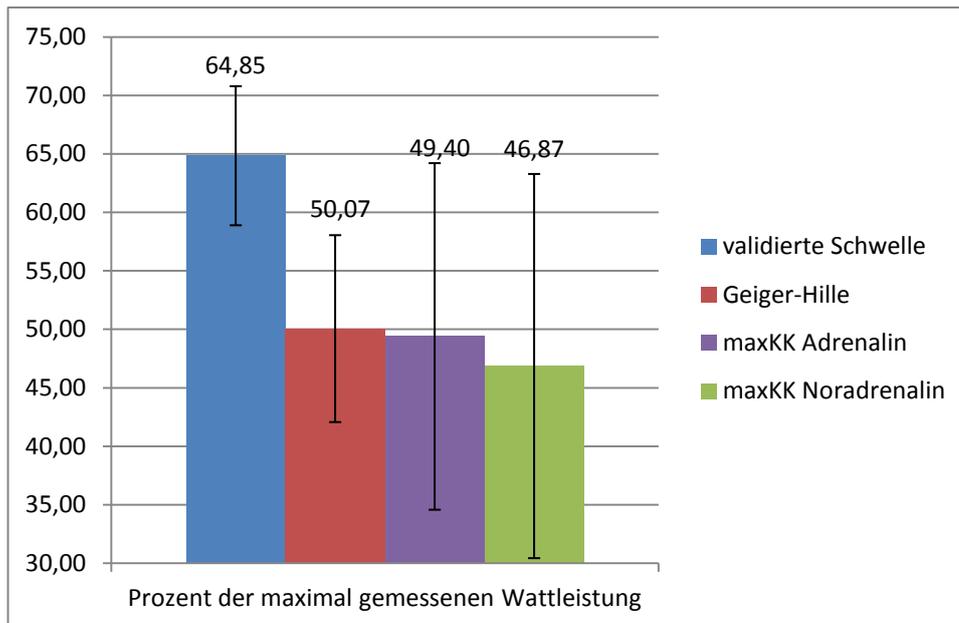
**Abbildung 14: Mittelwertskurve Laktat (venös und kapillar)**

An der Schwelle erreichten die Probanden 25,6 % ( $\pm 7,2$ ) des maximal gemessenen Laktatwerts.

Hierbei lag bei den absolut gemessenen Werten während des ersten Teils der gemessene kapillare Laktatanteil bei 8,6 mmol/l ( $\pm 2,0$ ) und der gemessene venöse Laktatanteil bei 9,0 mmol/l ( $\pm 2,1$ ). Beim zweiten Teil des Stufentest stieg das Laktat nicht mehr so hoch an. Hier war der kapillare Anteil 6,6 mmol/l ( $\pm 2,2$ ) und der venöse bei 8,1 mmol/l ( $\pm 3,1$ ), allerdings nur noch mit einem  $n = 20$  (kapillar) und  $n = 16$  (venös), weil einige Probanden den zweiten Stufentest nicht mehr beginnen konnten bzw. die Braunüle zukoaguliert war und kein Blut mehr abgenommen werden konnte.

### 3.2.2.2. Katecholamine

Die Katecholaminschwellen sind nach dem Modell von Geiger-Hille berechnet worden. Das Ergebnis der Berechnung vom Punkt der maximalen Kurvenkrümmung (maxKK) ist in Abbildung 15 dargestellt. Auch hier zeigt sich wie viel Prozent der maximal erbrachten Leistung die Probanden im Mittel an den errechneten Kurvenkrümmungsmaxima erzielt haben.



**Abbildung 15: Vergleich der Leistung an der berechneten Schwelle**

Das Ergebnis zeigt, dass die Werte der Katecholamine geringer ausfallen als es die tatsächliche Schwelle ist. Die Adrenalin-Schwelle wird bei 49,4 % ( $\pm 14,8$ ) und die Noradrenalin-Schwelle bei 46,9 % ( $\pm 16,4$ ) der maximalen Wattleistung erreicht.

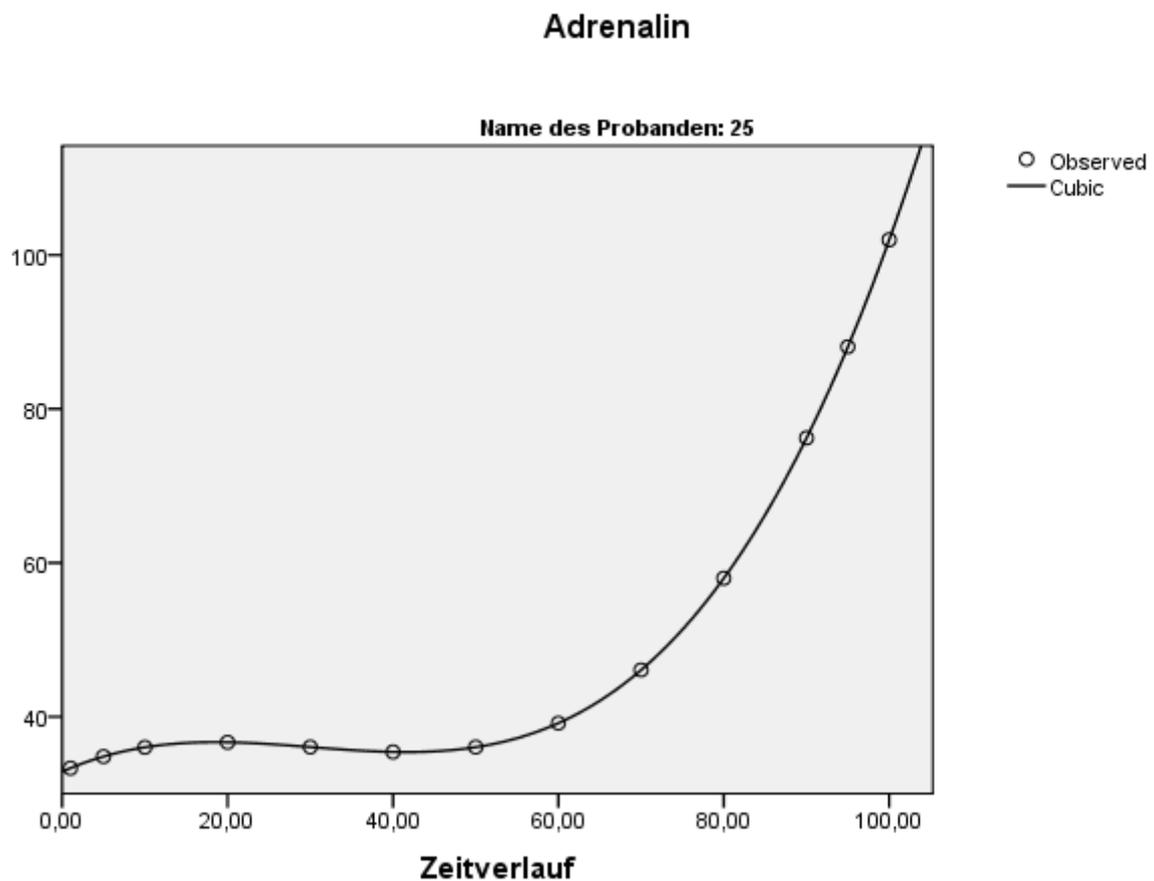
Bei den absoluten Werten während des ersten Stufentests zur Abbruchzeit sind im Mittel bei Adrenalin Werte von 324 ng/l ( $\pm 196$  ng/l) und bei Noradrenalin 2389 ng/l ( $\pm 1441$  ng/l) gemessen worden. Beim Adrenalin sind im Minimum (min.) 77 ng/l und im Maximum 796 ng/l. Beim Noradrenalin wurden im Minimum bei Abbruch 831 ng/l und im Maximum 2388 ng/l gemessen.

Beim zweiten Teil des Stufentests fällt der Mittelwert für Noradrenalin im Vergleich zum ersten Teil genau wie die Laktatwerte ab (MW 1742 ng/l;  $\pm 873$  ng/l). Adrenalin hingegen steigt minimal im Mittel auf 326 ng/l ( $\pm 235$  ng/l) an. Das n ist lediglich 16 und auch die Werte schwanken in einem großen Bereich (ADR min. 65 ng/l und max. 1043 ng/l; NAD min. 13 ng/l und max. 3963 ng/l)

#### 3.2.2.2.1. Adrenalin

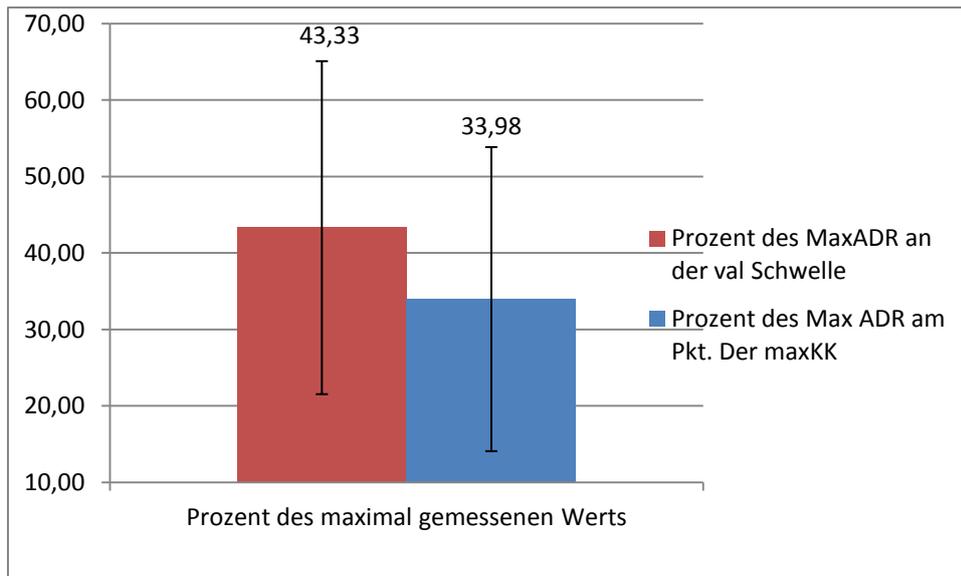
Die Mittelwertskurve für Adrenalin zeigt einen eindeutigen Verlauf (s. Abb. 16). Adrenalin steigt zunächst leicht an, bevor es wieder leicht abnimmt um dann bei gesteigerter Wattleistung kontinuierlich anzusteigen.

Die berechnete Adrenalin Schwelle wird bei einem Wert von 49,4 % ( $\pm 14,8$ ) (s. Abb. 15) der maximal erbrachten Leistung berechnet.



**Abbildung 16: Mittelwertskurve Adrenalin**

Adrenalin hat an diesem Punkt 34,3 % ( $\pm 19,9$ ) der maximal gemessenen Adrenalin-konzentration erreicht. An der validierten Schwelle sind es 43,3 % ( $\pm 21,8$ ) der maximal gemessenen Adrenalin-konzentration (s. Abb. 17).



**Abbildung 17: AdrenalinKonzentration an der validierten und der berechneten Schwelle in % der maximal gemessenen Konzentration**

#### 3.2.2.2.2. Noradrenalin

Die Mittelwertskurve für Noradrenalin zeigt einen eindeutigen Verlauf (s. Abb. 18). Hier ist zu erkennen, dass Noradrenalin, ganz ähnlich dem Laktat, zunächst eine Plateauphase durchläuft um dann im späteren Verlauf kontinuierlich anzusteigen. Genau wie Adrenalin erreicht die Noradrenalincurve die berechnete Schwelle wesentlich früher als die validierte. Bei Noradrenalin wird dieser Punkt bei 46,9 % ( $\pm 16,4$ ) der maximal erbrachten Leistung erreicht.

## Noradrenalin

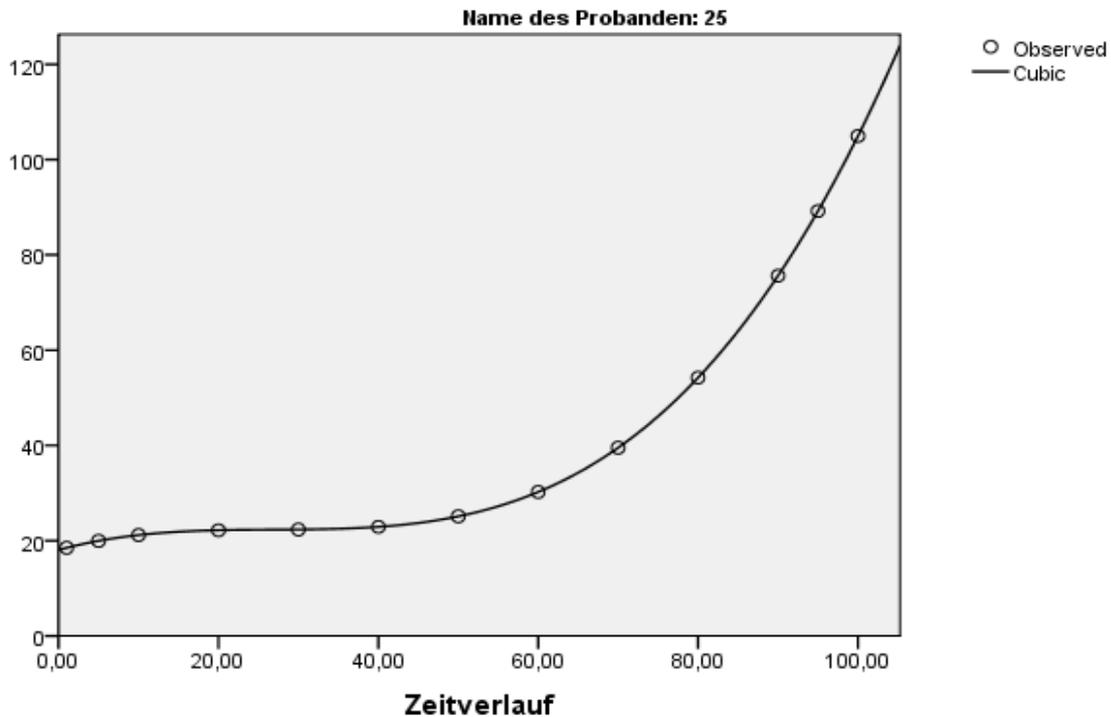


Abbildung 18: Mittelwertskurve Noradrenalin

Noradrenalin hat an der errechneten Schwelle 23,3 % ( $\pm 9,7$ ) der maximal gemessenen Noradrenalkonzentration erreicht. An der validierten Schwelle sind es bereits 37,1 % ( $\pm 14,9$ ). Abbildung 19 beschreibt dies.

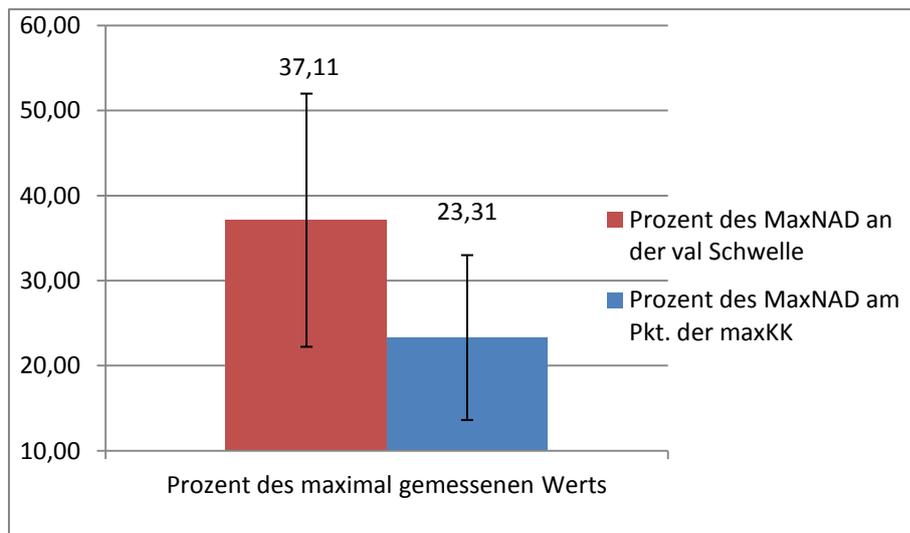


Abbildung 19: Noradrenalkonzentration an der validierten und der berechneten Schwelle in % der maximal gemessenen Konzentration

### 3.3. Zusammenfassung der Ergebnisse

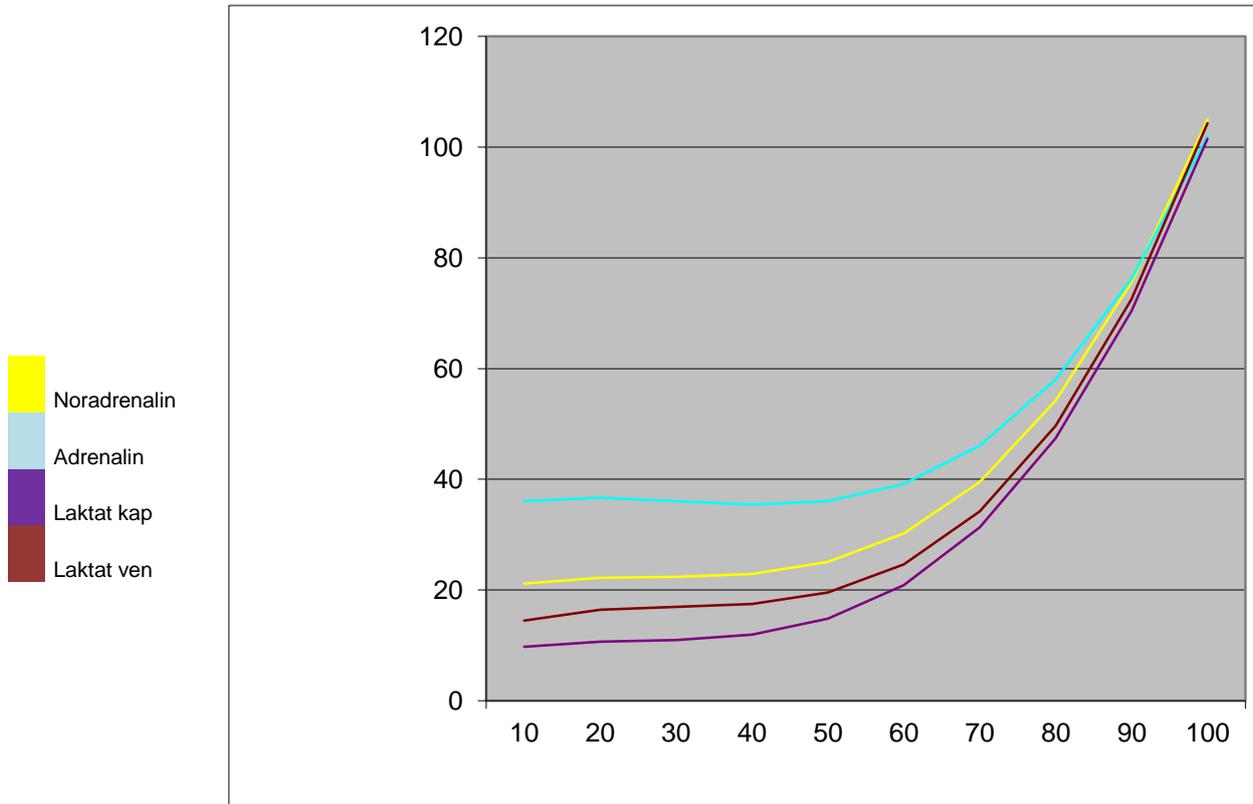
Bei visueller Betrachtung der Kurvenverläufe haben alle Messparameter (Laktat, Adrenalin und Noradrenalin) einen sehr ähnlichen Verlauf. Es beginnt mit einer Plateauphase und kommt dann im weiteren Verlauf zu einem exponentiellen Anstieg der Messparameter.

Die Betrachtung der Abbildungen 13 und 15 zeigt, dass die berechneten Schwellen nach dem Modell von Geiger-Hille deutlich vor dem Punkt der validierten Schwelle liegen. Dabei weichen die errechneten Werte nach dem Geiger-Hille-Modell (Adrenalin, Noradrenalin und Laktat) kaum voneinander ab.

Abbildung 13 zeigt, dass die Schwellenbestimmung nach der Senkenmethode am wenigsten von der validierten Schwelle abweicht, alle Methoden aber sehr dicht beieinanderliegen.

Die Ergebnisse der Auswertung der Borg-Skala zeigen, dass sich alle Probanden bis zum Ende des Tests subjektiv vollkommen erschöpft haben. Die Werte an der validierten Schwelle korrelieren zwar nicht signifikant mit den gemessenen Katecholaminwerten, aber es ist doch ein deutlicher Trend in Richtung einer Übereinstimmung der Messparameter zu erkennen (Borg und ADR = 0,176; Borg und NAD = 0,75).

Abbildung 20 zeigt noch einmal in der Zusammenfassung den Verlauf der jeweiligen Mittelwertskurven für den ersten Teil des Senkentests. Dazu sind in Tabelle 3 die einzelnen Werte für jeden Probanden noch einmal zusammengefasst.



**Abbildung 20: Mittelwertskurven Stufentest**

**Tabelle 3: Zusammenfassung der Einzelwerte an der validierten Schwelle und an den Katecholaminschwellen**

P_ID	LakK	LakK %	ADR	val ADR %	ADR %	NAD	val NAD %	NAD %	% Leistung val	Watt/kg KG
1	2,6	34,61	115	74,86	33,83	720	45,46	18,82	70,00	2,33
2	2,1	17,91	160	52,75	45,12	550	37,17	23,15	67,57	3,21
3	2,3	22,05	175	31,36	23,16	640	34,10	25,36	64,26	2,71
4	1,9	25,74	80	28,25	17,89	610	28,23	20,12	70,00	2,19
5	2,5	39,65	90	65,81	40,39	600	43,50	23,98	78,67	2,95
6	2,0	28,66	200	26,48	7,60	650	26,71	10,42	74,29	3,47
7	1,9	16,13	110	87,75	90,28	450	61,42	32,00	63,20	2,63
8	2,1	25,95	85	28,27	25,93	800	26,73	22,01	63,33	2,24
9	2,0	25,35	120	18,59	12,63	610	25,20	23,13	58,50	2,05
10	1,7	18,89							70,00	2,88
11	3,1	32,32	190	32,03	30,50	840	35,21	25,75	67,20	2,21
12	1,7	23,02	165	73,62	48,35	1600	51,96	12,32	67,79	2,62
13	1,4	9,33	130	26,12	25,60	600	12,92	13,47	58,26	2,03
14	2,1	26,18	120	49,60	31,41	390	43,32	26,26	67,14	2,67
15	2,1	19,43	90	12,85	13,53	1000	36,02	19,66	57,50	1,80
16	2,5	24,43	50	17,12	9,21	650	17,79	19,05	52,50	1,81
17	1,5	15,79	85	68,09	67,14	550	18,16	18,28	57,96	2,27
18	1,7	33,89	70	73,30	63,61	550	27,36	21,79	68,40	2,80
19	2,7	27,96	200	32,22	20,90	1350	30,43	20,43	61,50	2,37
20	2,4	28,27	72	38,44	28,11	970	66,37	41,65	67,50	2,20
21	2,3	25,33							62,80	2,28
22	2,3	23,44	75	27,54	27,16	536	34,05	33,43	59,93	1,90
23	2,0	29,71	245	43,25	39,33	2154	64,63	10,36	67,50	2,13
24	2,7	34,52	74	44,86	45,76	1263	49,73	51,38	60,71	2,27
Min	1,40	9,33	50,00	12,85	7,60	390,00	12,92	10,36	52,50	1,80
Max	3,10	39,65	245,00	87,75	90,28	2154,00	66,37	51,38	78,67	3,47
MW	2,16	25,65	122,77	43,33	33,97	821,95	37,11	23,31	64,71	2,40
SD	0,42	7,19	53,33	21,78	20,30	426,90	14,88	9,69	6,10	0,44
n=	<b>22</b>	<b>22</b>								

P\_ID Probanden-ID  
LakK Laktatkonzentration an der validierten Schwelle in mmol/l  
LakK % Laktatkonzentration an der validierten Schwelle in Prozent der maximal gemessenen Konzentration  
ADR Adrenalinkonzentration an der Schwelle in pmol  
val ADR % Adrenalin gemessen an gesamt erbrachter maximaler Ausschüttung in % an der validierten Schwelle  
ADR % Schwelle Adrenalin gemessen an gesamt erbrachter maximaler Ausschüttung in %  
NAD Noradrenalinkonzentration an der Schwelle in pmol

val NAD %	Noradrenalin gemessen an gesamt erbrachter maximaler Ausschüttung in % an der validierten Schwelle
NAD %	Schwelle Noradrenalin gemessen an gesamt erbrachter maximaler Ausschüttung in %
% Leistung val	Leistung an der validierten Schwelle gemessen an gesamt erbrachter maximaler Leistung in %
Watt/kg KG	Leistung an der validierten Schwelle in Watt/kg KG

## 4. Diskussion

### 4.1. Interpretation der Ergebnisse

Um möglichst aussagekräftige Resultate zu erzielen ist ein ausgewogenes Probandenkollektiv zusammengestellt worden (Alter, Geschlecht, Größe, Gewicht, Trainingszustand und BMI), dass in etwa eine gleiche Altersgruppe in ähnlichem Trainingszustand untersucht werden konnte (s. Tabelle 2).

Wichtig für die spätere Auswertung der Leistungsanalyse und zum Vergleich der unterschiedlichen Messparameter war, dass sich die Probanden vollständig ausbelasten um eine aussagekräftige Auswertung bei der Schwellenbestimmung und dem Anstiegsverhalten treffen zu können. Anhand der objektiven Daten, die durch die Laktatmessung (Maximalwerte: 8,6 mmol/l ( $\pm 2,0$ )) bestimmt wurden, konnte ziemlich sicher gesagt werden, dass sich die Probanden maximal belastet haben. Als subjektiver Messparameter zeigten die Daten mithilfe der Borg-Skala (19,4 ( $\pm 0,7$ )), dasselbe, so dass ein guter Vergleich möglich war.

Bei allen Messparametern kam es dabei im Verlauf der Stufentestung zu einem signifikanten Anstieg. Hieraus konnten bei den darauf folgenden Analysen gute Aussagen über das Anstiegsverhalten und die erreichten Maximalwerte der Probanden getroffen werden. Somit haben sich die Kurvenverläufe sehr gut darstellen und vergleichen lassen. Beispielsweise zeigte die Laktatkurve eine sehr lange Plateauphase bevor es zu einem Anstieg der Werte kam. Die Adrenalincurve zeigte als einzige einen zunächst ansteigenden Verlauf, der kurzfristig wieder abfiel um erneut, und dann endgültig, anzusteigen. Der genaue Grund für dieses Anstiegsverhalten konnte allerdings bei den Tests nicht weiter dargestellt werden. Ansonsten verlaufen die Kurven, wie Abbildung 20 zeigt, sehr ähnlich.

Bei der Auswertung der einzelnen Kurvenverläufe und Schwellenkonzepte ist festzustellen, dass einige der untersuchten Schwellenkonzepte sehr weit von der validierten Schwelle abweichen, wohingegen andere wie Stegmann, Braumann (Senke) und Dickhuth wesentlich exakter die tatsächliche Schwelle der Probanden berechnen. Hierbei werden im Durchschnitt bei der Schwellenbestimmung nach Stegmann 2,3 % der maximal erreichten Leistung während des Stufentests zu wenig berechnet. Die iANS liegt niedriger als sie tatsächlich ist. Im Durchschnitt ergeben sich bei Brau-

mann (Senke) Werte von 1,0 % und bei Dickhuth von 2,2 % über dem eigentlichen Wert.

Mit dieser Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass die genaueste Art und Weise der iANS-Bestimmung mit der Braumann/Senken-Methode erfolgt, wobei Dickhuth und Stegmann nicht unwesentlich weit davon abweichen.

Projiziert man diese Ergebnisse auf die berechneten Adrenalin- und Noradrenalin-schwellen stellt sich eine große Differenz zwischen diesen und der tatsächlichen Schwelle dar. Adrenalin erreicht seinen Schwellenwert bereits bei 49,4 % der maximal erreichten Leistung in Watt und liegt damit 15,5 % unterhalb der eigentlich möglichen Leistung, die durch die validierte Schwelle errechnet worden ist. Noradrenalin hat diesen Punkt noch ein bisschen früher, nämlich bei 46,9 %, also 18,0 % weniger als der tatsächliche Wert. Daraus lässt sich schließen, dass die Katecholaminkurven wesentlich früher beginnen zu steigen und somit auch die Konzentration der beiden Substanzen wesentlich früher beginnt zu reagieren als dies Laktat tut.

Aus diesem Ergebnis lässt sich allerdings nicht genau ableiten, dass die Katecholamine ihren Schwellenwert tatsächlich wesentlich früher haben als dies bei Laktat der Fall ist, denn die genannten Abweichungen entsprechen in etwa der Abweichung des Geiger-Hille-Modells, das die Schwelle 14,8 % der maximal erbrachten Leistung unterhalb der tatsächlichen Schwelle errechnet. Somit ist davon auszugehen, dass die eigentlichen Schwellen beim Vergleich der Katecholamine und des Laktats um einiges näher beisammen sind, da es in etwa der gleiche Abstand zur tatsächlichen Schwelle ist. Unterstützend dazu ist die visuelle Betrachtung der Kurvenverläufe, die nahezu identisch sind. Die Katecholamine haben jedoch ein Anstiegsverhalten, das ein bisschen früher beginnt als dies bei Laktat der Fall ist.

Aufgrund des Produktions- und Abbauverhaltens der Katecholamine konnte kein Bestimmungsverfahren, das die iANS genauer beschreiben würde, angewendet werden. Die Methoden nach Braumann, Dickhuth und Stegmann konnten daher nicht angewendet werden. Zur Bestimmung der Katecholaminschwelle wurde aus diesem Grund auf das Modell nach Geiger-Hille zurückgegriffen, da es die einzige Methode der untersuchten Schwellenkonzepte ist, die sich auf diese Kurven anwenden lässt und nicht auf der Basis vom Abbau der untersuchten Parameter basiert.

Betrachtet man nun die erstellten Kurven mit denen diese Werte berechnet werden, zeigt sich ganz klar, dass in den meisten Fällen die Katecholamincurven etwas eher ansteigen (siehe dazu auch Punkt 3.1.2.2.1. und 3.1.2.2.2.). Der entscheidendste und auffälligste Punkt ist allerdings, dass die maximal erbrachte Wattleistung am Punkt der maximalen Kurvenkrümmung von Adrenalin, Noradrenalin und Laktat (Geiger-Hille) nahezu identisch sind. Wodurch von einem Zusammenhang zwischen Adrenalin, Noradrenalin und Laktat ausgegangen werden kann.

Auffällig bei der Untersuchung war, dass die Werte beim Adrenalin (min. 77 ng/l und max. 796 ng/l) und beim Noradrenalin (min. 831 ng/l und max. 2388 ng/l) sehr stark variieren und trotz des ausgeglichenen Probandenkollektivs kaum einheitlich waren. Bei Adrenalin wurde während des gesamten Tests generell eine höhere Konzentration gemessen, was damit zusammenhängt, dass Adrenalin ein Abbild der körperlichen Belastung und Noradrenalin ein Abbild der psychischen Belastung ist. Bereits vor Beginn des Tests erreicht Adrenalin 38 % des maximal erreichten Werts, wohingegen Laktat zu Beginn lediglich 18 % an der Gesamtausschüttung erreicht. Dies setzt sich so über die Belastung hinweg fort. Die Noradrenalincurve verläuft in dieser Hinsicht wesentlich „dichter“ an der Laktatcurve, liegt aber dafür bei den berechneten Schwellen noch weiter von der validierten Schwelle entfernt als die Adrenalinschwelle, bei der dieser Zeitpunkt eher übereinstimmt. An diesem Punkt wird besonders deutlich, warum zum besseren Vergleich die maximal erreichten Werte bei jedem einzelnen Probanden auf 100 % normiert worden sind.

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchung ist, dass im zweiten Teil des Doppelstufentests ähnliche Maximalwerte für die Parameter Adrenalin, Noradrenalin und der HF erreicht wurden wie dies bereits beim ersten Teil des Senkentests der Fall war. In der Tendenz zeigt sich allerdings, dass bei Noradrenalin und der HF im ersten Teil des Tests höhere Werte erreicht werden. Bei Laktat und dem prozentual erreichten Anteil der Gesamtleistung sind deutliche Unterschiede zu Gunsten des ersten Testabschnitts vorhanden. Hier liegen die MW beim zweiten Durchgang mit 6,4 mmol/l ( $p < 0,0001$ ) und 80 % ( $p < 0,0001$ ) des maximal erreichten Wertes signifikant unterhalb des ersten Teils. Auch bei der Auswertung der Borg-Skala fiel dieser Unterschied zu Gunsten einer höheren Belastungsintensität während des ersten Teils des Senkentests auf (während des ersten Teils 19,4 ( $\pm 0,7$ ) und während des zweiten Teils 18,9 ( $\pm 1,0$ )).

Das führt zu dem Schluss, dass mit den uns bekannten und hier angewendeten Berechnungsmethoden für die Laktatschwelle die Katecholaminschwelle nicht auf die gleiche Art und Weise bestimmt werden kann. Mit den bekannten Laktatschwellenbestimmungsmethoden errechnet man eine Katecholaminschwelle die bei höheren Werten liegt als es tatsächlich der Fall ist. Legt man nämlich die visuelle Betrachtung der Kurvenverläufe zu Grunde, zeigt dies eindeutig einen früheren, zeitversetzten Anstieg der Katecholaminwerte. Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Katecholamine, und hier eher das Adrenalin, dafür verantwortlich sind, dass es über die Fortleitung des  $\beta$ -Adrenozeptorsystems zu einem Anstieg der Laktatwerte kommen könnte. Ursachen dafür wäre eine gesteigerte Glykolyse zusammen mit einer Vasokonstriktion der Gefäße.

Bedeutsam ist dies besonders bei der Übertragung auf den Gesundheitssport, bei dem ein hoher Faktor an Stress, für den ein hoher Anteil der Katecholamine spricht, vermieden werden sollte. Somit sollte gerade im Gesundheitssport Training mit erhöhten Laktatwerten vermieden werden.

## 4.2. Vergleich mit anderen Autoren

Weltman et al. hatten bereits festgestellt, dass es nicht mit den üblichen Methoden für die iANS-Bestimmung möglich ist, die Katecholaminschwelle zu bestimmen und mangelte dies auch in einigen anderen Arbeiten an (56). Auch diese Arbeit kommt zu dem Schluss, dass mit den uns bekannten und hier angewendeten Berechnungsmethoden für die Laktatschwelle die Katecholaminschwelle nicht auf die gleiche Art und Weise bestimmt werden kann. Mit den bekannten Laktatschwellenbestimmungsmethoden errechnet man eine Katecholaminschwelle die bei höheren Werten liegt als es tatsächlich der Fall ist. Nimmt man nämlich die visuelle Betrachtung der Kurvenverläufe (s. Anhang) zu Grunde, zeigt dies eindeutig einen früheren, zeitversetzten, Anstieg der Katecholaminwerte und einen nahezu identischen Kurvenverlauf (17 von 24 oder 70,8 %). Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Katecholamine, und hier eher das Adrenalin, dafür verantwortlich sind, dass es über die Fortleitung des  $\beta$ -Adrenozeptorsystems zu einem Anstieg der Laktatwerte kommen könnte.

Dass es zu einem Laktatanstieg durch die Stimulation der Katecholamine am  $\beta$ -Adrenozeptorsystem und somit zu einer Vasokonstriktion der Gefäße kommt, hatten schon Versuche von Gaesser et al. und Jansen et al. gezeigt, indem sie Adrenalininfusionen gaben und es daraufhin zu einem Anstieg der Laktatwerte im Blut kam (18; 28). Zur Unterstützung dieser Theorie wurden Versuche durchgeführt bei denen die  $\beta$ -Adrenozeptoren blockiert wurden und so zu einem niedrigerem Laktatwert führten (2; 19; 27; 41). Dies könnte der Grund dafür sein, dass die Katecholaminkurven dem Laktat immer ein bisschen voraus sind und das  $\beta$ -Adrenozeptorsystem ein wesentlicher Faktor der Laktatbildung während der Belastung ist, was Stainsby et al. bereits bei ihren an Hunden durchgeführten Versuchen zeigten (49).

Warum allerdings die Adrenalinwerte zu Beginn der Untersuchung im Verhältnis zum Laktat doch deutlich erhöht sind und dennoch keinen Einfluss auf die Laktatwerte haben, ist mit der Theorie von Chudalla et al. zu erklären, dass es erst bei höheren Adrenalinkonzentrationen zur Minderperfusion der laktateliminierenden Organe kommt, was ein weiterer Grund für die steigende Laktatkonzentration sein könnte (10). Zusätzlich bilden sicherlich die psychischen Grundvoraussetzungen, wie erhöhter Stress im Alltag, ebenfalls einen entscheidenden Faktor für diese erhöhten Werte.

Zwar wichen die gemessenen Werte zu Beginn der Belastungsphase zwischen Adrenalin und Laktat weiter voneinander ab als Noradrenalin und Laktat, aber im weiteren Verlauf der Belastungsphase glichen sich diese Werte an, so dass an der berechneten Schwelle Adrenalin wesentlich näher an der iANS lag als Noradrenalin. So zeigte sich im Verlauf, dass Adrenalin wesentlicheren Einfluss auf das Anstiegsverhalten der Laktatkonzentration nimmt als dies Noradrenalin tut. Dieses Verhalten war bereits von verschiedenen anderen Autoren (2; 19; 40; 46; 47; 48; 49; 56) beschrieben worden. Dazu passt ebenfalls die Studie von Podolin et al. die zeigte, dass sich Laktat und Adrenalin bei Belastung gleichermaßen verhalten (38), allerdings führte er seine Studie mit reduziertem Glykogenhaushalt durch.

Unterstützend dazu sind einige andere Untersuchungen, die Laktat- und Katecholaminschwellen verglichen haben und feststellten, dass sowohl die absoluten, als auch die relativen Werte von Adrenalin, Noradrenalin und Laktat nahezu identisch sind. So kam man zu dem Schluss, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass neuronale afferente Signale von Muskelrezeptoren bei der Aktivierung von Katecholaminausschüttung mitwirken (11; 30; 35). Hierbei zeigte sich in einer Studie, dass die Noradrenalin-schwelle immer vor der Laktatschwelle und vor der Adrenalin-schwelle gelegen hat (15). Dies konnte in dieser Studie nicht ganz bestätigt werden, weil hier die Adrenalin-schwelle immer vor der Noradrenalin-schwelle lag. Auch fielen sehr große Schwankungen von Proband zu Proband bei den gemessenen Katecholaminwerten auf.

Im Gegensatz zu der Aussage, dass die Katecholamine die Laktatproduktion wesentlich beeinflussen steht die zweite Meinung, die die Theorie vertritt, dass nicht die Katecholamine zur Ausschüttung von Laktat verantwortlich sind, sondern dass der veränderte pH-Wert, der durch die vermehrte Produktion von Laktat sinkt, eher verantwortlich für die Produktion von Katecholaminen ist (35; 43). Der niedrige pH-Wert soll zu einer sympathischen Stimulation führen, die dann zusammen mit anderen, bisher unbekanntem Faktoren, die Ausschüttung der Katecholamine steigert (34; 36). Wenn dies allerdings der Fall sein sollte, dann müssten die Katecholamine auf einen Anstieg des Laktat reagieren und somit zeitlich versetzt nach dem Laktat ansteigen und ebenfalls nach dem Laktat ihr Maximum erreichen. Da es bei den gemessenen Werten aber genau gegensätzlich ist, dass die Katecholamine dem Laktat voraus sind und die Katecholamine auch früher in der Erholungsphase wieder abfallen, ist diese Theorie nicht zu unterstützen. Durch die herbeigeführte Minderperfusion der

laktateliminierenden Organe kommt es zu dem leicht verzögerten Abbau des Laktat, der dem raschen Abbau des Adrenalin folgt.

Eingangs wurde erwähnt, dass Mazzeo et al. einen Zusammenhang zwischen der Kurvenkrümmung der Adrenalin- und der Laktatschwellenkurven feststellten (34). Allerdings konnte das leider nicht belegt werden, denn der Punkt der Krümmung bei den Adrenalincurven lag gemessen an der maximal erbrachten Leistung immer bei niedrigeren Werten als dies bei Laktat der Fall war. Auch gab es zwei Probanden (Proband 7 und 17) die kaum eine Veränderung ihrer Adrenalinwerte zeigten.

### 4.3. Methodenkritik

Das größte Problem bei der Auswertung der vorhandenen Daten stellt sich in der Diskrepanz zwischen den visuell offensichtlich nahezu identisch verlaufenden Kurven und den mathematisch berechneten Werten dar. Diese Unterschiede stellen sich nach der Berechnung als viel größer dar, als man es nach erstem Betrachten vermuten würde. Ein weiteres Problem bestand zwischen dem Zusammenhang der mathematischen Berechnung der einzelnen Kurvenverläufe. Es war kein Problem die einzelnen Kurven für den ersten Abschnitt des Senkentests durchzuführen. Dahingegen war es nicht möglich eine Formel zu finden, die einen aussagekräftigen Kurvenverlauf für beide Teile des Senkentests dargestellt hätte. So mussten die Werte für die Berechnung der Schwelle nach der Senkenmethode mit visuell erstellten Kurven dargestellt werden, was ebenfalls für die Stegmann-Schwelle gilt.

Einige der Probanden konnten ihren zweiten Teil des Stufentests nicht komplettieren, weil sie beim ersten Teil schon ausbelastet waren, so dass sie den zweiten Teil nicht zu Ende führen konnten. Teilweise liegt dies wohl daran, dass diese Probanden es nicht gewohnt waren hohe körperliche Leistung zu vollbringen. Das Ziel, eine Gruppe ohne Leistungssportler zu haben, um dadurch eine Aussage über die breite Bevölkerung zu erreichen könnte die Ursache dafür gewesen sein. Das ist der Grund, warum es beim zweiten Teil bei Katecholaminen lediglich ein  $n = 21$  gibt und auch die Werte in einem großen Bereich (ADR min. 65 ng/l und max. 1043 ng/l; NAD min. 13 ng/l und max. 3963 ng/l) schwanken. Hinzu kam, dass es bei den Probenentnahmen während den Testungen öfter bei den venösen Blutabnahmen durch die Braunüle das Problem gab, dass beim zweiten Teil der Stufenmessung die venöse Blutabnahme nicht immer funktioniert hat oder manchmal in der kurzen Abnahmezeit zu wenig Blut zur Auswertung in den Röhrchen gelandet ist. Wahrscheinlich sind die Braunülen trotz durchspülen mit Natriumchlorid zu koaguliert oder durch den hohen „laminar-flow“ der Vene saugte sich die Spitze der Braunüle an der Venenwand fest, so dass die Blutabnahme nicht mehr möglich war. Trotzdem konnten die übrigen iANS-Berechnungen vorgenommen und mit dem tatsächlichen Wert der validierten Schwelle verglichen werden. So konnte bei diesen Probanden wenigstens die Aussagekraft über die beste Schwellenbestimmung überprüft werden. Aus diesem Grund könnte überlegt werden, solch eine Testung mit einem reinen ausdauertrainierten Sportlerkollektiv zu wiederholen.

Für ein reines Sportlerkollektiv würde vielleicht auch sprechen, dass die Probanden unterschiedlich mit Belastung umgegangen sind. Manche von ihnen waren es eher gewohnt als andere an ihre körperlichen Grenzen zu gehen. Daher kam bei Einigen der Anstieg des Laktats, und somit auch der Abbruch der Tests, sehr plötzlich. Diejenigen, die Ausdauerleistungen eher gewohnt waren als die anderen haben sich eher noch „gequält“. Dies belegt auch die Auswertung der Borg-Skala, bei der unerfahrene Sportler schon mit einem hohen Ausgangswert nach der ersten Stufe starten und im weiteren Verlauf sehr schnell einen hohen Wert erzielen.

Bei den Probanden 7 und 17 zeigte sich ein sehr ungewöhnlicher Adrenalinverlauf. Die AdrenalinKonzentration hielt sich nahezu über den kompletten Stufentest auf einem ähnlichen Level. Hier wäre es vielleicht interessant herauszubekommen, ob Adrenalin eventuell ein Indikator für Übertraining sein könnte, denn in der Anamnese der zwei Probanden ergab sich, dass in den Wochen vor Beginn der Messungen zu intensiv trainiert wurde, oder ob andere Faktoren dafür verantwortlich bzw. mitverantwortlich sind.

Ein weiterer interessanter Punkt für kommende Studien wäre herauszufinden, ob es gegebenenfalls geschlechtsspezifische Unterschiede bei den Katecholaminmessungen gibt. Viele Autoren beschreiben lediglich ein männliches Probandengut (10; 15; 31; 36; 38). Bei dieser Arbeit wurden ebenfalls Frauen untersucht und um die Unterschiede der Leistungsfähigkeit auszugleichen sind bei der Auswertung die 100 %-Kurven angewendet worden. Interessant wäre in diesem Zusammenhang, ob es bei den Frauen Unterschiede bei den KatecholaminKonzentrationen im Zusammenhang mit dem Zeitpunkt ihres Zyklus gibt (Probandin 6, 9 und 15 zeigten in ihren Adrenalinwerten deutlich niedrigere Konzentrationen). Leider fehlten uns dazu bei dieser Studie die nötigen anamnestischen Daten.

Die hier benutzten und berechneten 100 %-Kurven zeigen bei einigen Probanden einen Anstieg auf über 100 % (s. Anhang) bei den Katecholaminwerten, wenn Laktat noch nicht die 100 % erreicht hat. Der Grund dafür ist, dass diese Probanden zwischen zwei Stufen (eine Stufe = 3 Minuten) abgebrochen haben und somit bei Abbruch nur Laktat abgenommen werden konnte. Da in der 1. Minute nach Abbruch die Katecholaminwerte immer niedriger waren als in der Stufe die dem Abbruch vorausging, sind die Katecholaminwerte der zuletzt gemessenen Stufe = 100 gesetzt wor-

den. Aus diesem Grund kann auch hier nur von einem maximal gemessenen Wert (peak Katecholamine) und nicht vom Maximalwert gesprochen werden.

Diese Studie hat gezeigt, dass zur bestmöglichen Bestimmung der iANS der Senkentest geeignet ist, der durch zwei Dauertests genau validiert werden sollte, um am exaktesten die iANS zu bestimmen. Allerdings muss man direkt einschränken, dass diese Methode mit einem hohen Aufwand verbunden ist und für den praktischen Alltag kaum anzuwenden ist, weil die Art und Weise zeitlich zu aufwändig ist. Beim Laktat gibt es durch die Definition zur Überschwelligkeit beim Dauertest mit einem maximalen Anstieg von 1 mmol/l in den letzten 20 Minuten (22) bereits eine Definition. Eine neue Studie könnte dies bei den Katecholaminen eventuell ebenfalls zeigen. Hier würde sich anbieten den Verlauf der Katecholamine während des Dauertests oberhalb, unterhalb oder genau an der Schwelle zu verfolgen und gleichzeitig mit dem Laktat abzunehmen um eventuell eine ähnliche Definition der Überschwelligkeit wie es beim Laktat der Fall ist zu definieren.

#### 4.4. Überprüfung der Fragestellung

Mit dieser Arbeit sollte die Hypothese überprüft werden, inwieweit sich Zusammenhänge zwischen Laktat und Katecholaminen bei körperlicher Anstrengung bestätigen oder gegebenenfalls auch widerlegen lassen und ob daraus Konsequenzen für die Trainingssteuerung abgeleitet werden können. Auf dem Gebiet der Erforschung dieser Zusammenhänge wurden in den vergangenen nunmehr fast 30 Jahren viele Versuche unternommen dies näher zu erörtern.

Ein direkter Nachweis für einen tatsächlichen Zusammenhang der Katecholamin- und Laktatkurve konnte nicht erbracht werden. Durch die große Übereinstimmung mit dem Geiger-Hille-Modell kann aber zumindest davon ausgegangen werden, dass es einen Zusammenhang gibt. Zusätzlich konnte eine Annäherung der Kurven im Verlauf der Belastung gezeigt werden. Dies geschah allerdings erst bei höheren Belastungsstufen (im Bereich der iANS). Eine Aussage und Interpretation über die Ausgangswerte der Katecholamine und ob anhand dieser ein eventuelles Übertraining festzustellen ist, bleibt unbeantwortet. Dennoch scheinen die Katecholamine eine Art Vorläufer-Funktion des Laktats zu sein.

Ein besonderes Augenmerk ist darauf gelegt worden, dass die unterschiedlichen Messmethoden mit den tatsächlichen, „wahren“ Schwellen verglichen wurden. Hierzu ist jede einzelne Schwelle durch mehrere Testungen validiert worden um ein möglichst exaktes Ergebnis zu erzielen und es konnte mit dieser Arbeit festgestellt werden, dass mit der Senken-Methode die bestmöglichen Ergebnisse erzielt werden.

Um bei der Auswertung möglichst vergleichbare Ergebnisse zwischen Männern und Frauen zu haben, wurden die erreichten Maximalwerte während der Belastung mit 100 % gleichgesetzt, weil unterschiedliche Belastungsmaxima erbracht wurden. Die Werte auf submaximalen Belastungsstufen wurden dann in Bezug zu den 100 Prozent des Maximalwerts gesetzt. Die Auswertung der Daten zeigte eine wesentlich bessere Vergleichbarkeit unter den einzelnen Gruppen (männlich verglichen mit weiblich).

Abschließend konnte gezeigt werden, dass mit den uns bekannten und hier angewendeten Berechnungsmethoden für die Laktatschwelle, die Katecholaminschwelle nicht auf die gleiche Art und Weise bestimmt werden kann. Mit den bekannten Lak-

tatschwellenbestimmungsmethoden errechnet man eine Katecholaminschwelle, die bei höheren Werten liegt als es tatsächlich der Fall ist. Nimmt man nämlich die visuelle Betrachtung der Kurvenverläufe zu Grunde, zeigt dies eindeutig einen zeitlich früheren Anstieg der Katecholaminwerte.

## 5. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird das Anstiegsverhalten der Laktat- und Katecholaminwerte von 24 Probanden während eines Stufentests überprüft. Dabei ist in mehreren Stufentests mit einer anschließenden Validierung mittels Dauertest die genaue iANS bestimmt worden. Zusätzlich konnten so unterschiedliche iANS-Bestimmungsmethoden auf ihre Genauigkeit untersucht werden.

In der aktuellen Literatur gibt es derzeit unterschiedliche Theorien über den Zusammen zwischen Katecholaminen und Laktat. Wo auf der einen Seite die Katecholaminausschüttung als Ursache für den Laktatanstieg gesehen wird (18; 28; 49; 56), gehen andere davon aus, dass durch die Produktion von Laktat der pH-Wert verändert wird. Dies soll dann erst zu der Produktion von Katecholaminen führen (34; 35; 36; 43).

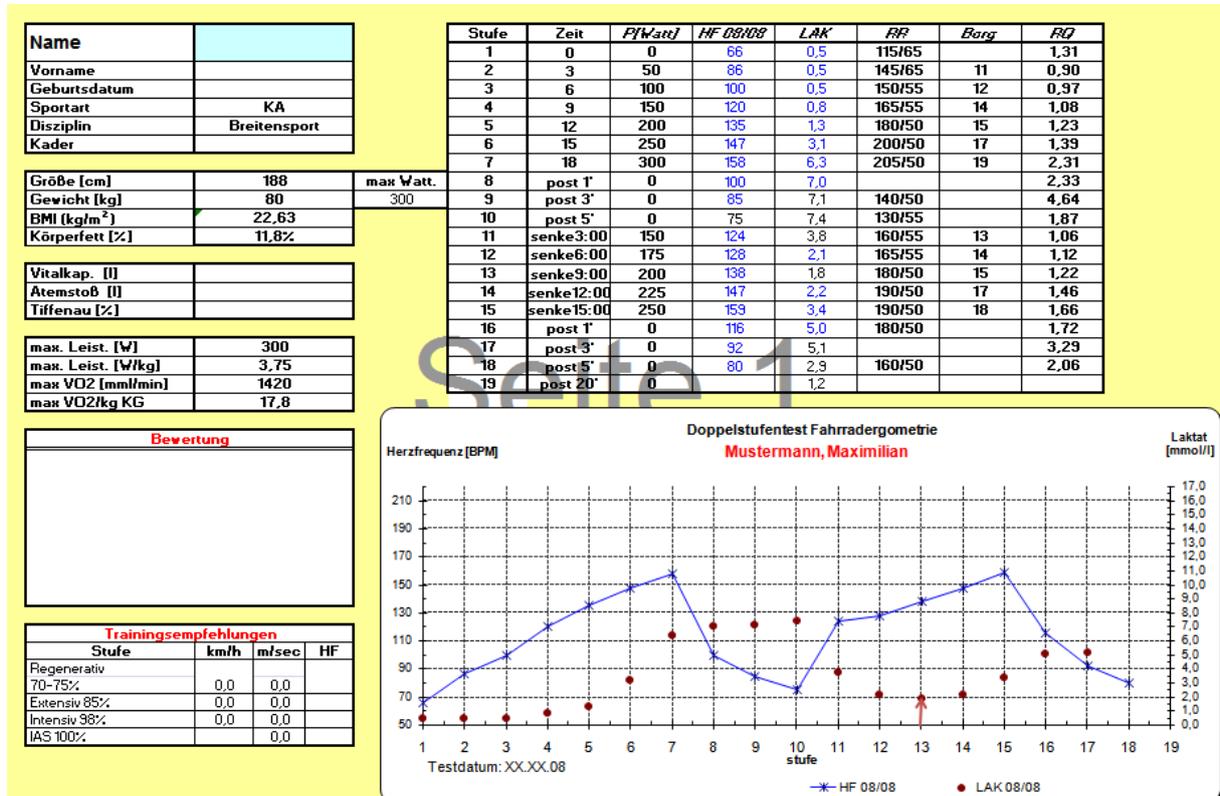
Bei den durchgeführten Tests sind zu Beginn einer jeden Untersuchung die jeweiligen Ruheparameter der Stresshormone Adrenalin für die körperliche Belastung und Noradrenalin für die psychische Belastung verglichen worden. Während des gesamten Tests sind zeitgleich Laktat- und Katecholaminwerte bestimmt worden um eine Aussage über deren Verlauf treffen zu können.

Bei den anschließend ausgewerteten Kurven kam es zu einem eindeutigen visuellen Zusammenhang zwischen den Katecholaminen, besonders dem Adrenalin, und den Laktatwerten. Hier steigen die Katecholaminkurven als Erstes an. Gefolgt von der Laktatkurve. Bei mathematischer und somit genauerer Betrachtung der Messwerte gibt es jedoch einen deutlichen Unterschied zwischen den visuell offensichtlichen Zusammenhängen der einzelnen Kurven. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass ein Zusammenhang besteht und die Katecholamine vor dem Laktat ansteigen.

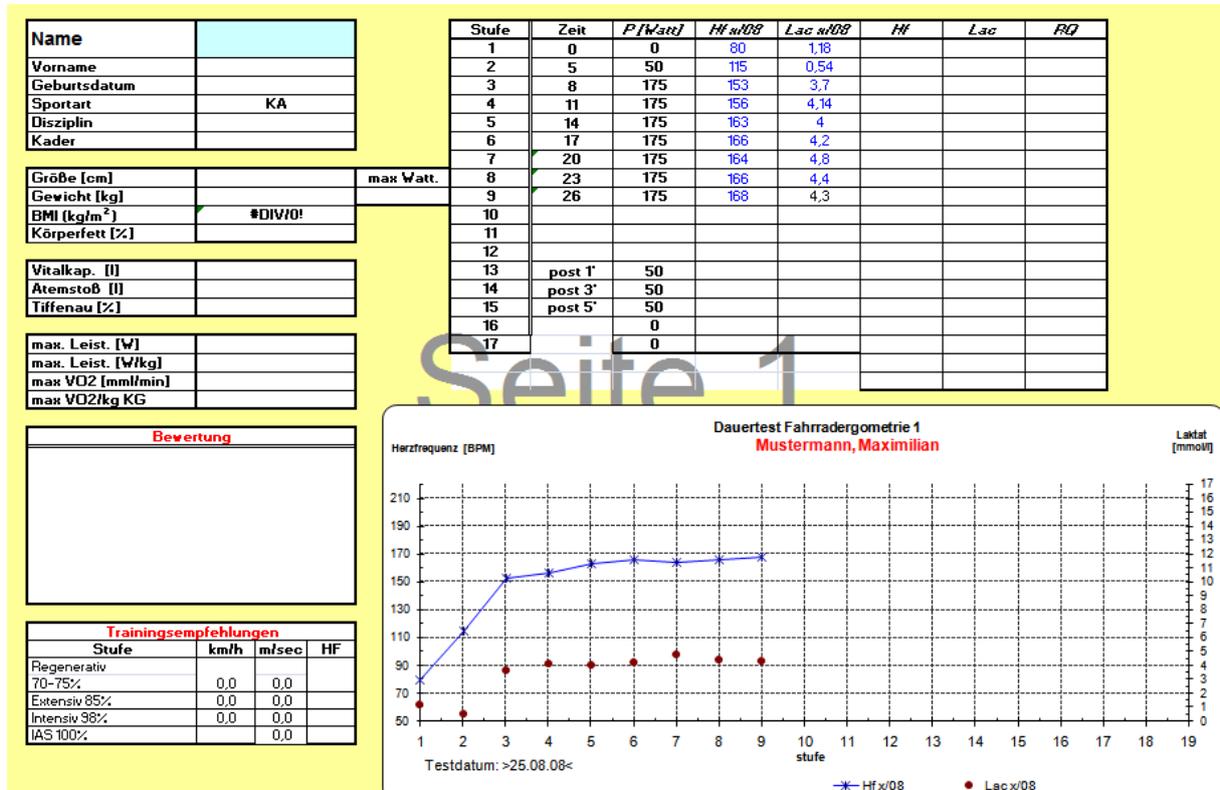
Dies wird insofern auch immer wichtiger in der Bewegungstherapie, weil zu hohe Katecholaminwerte, und damit Stress, vermieden werden sollen. Aus diesem Grund sind niedrigere Laktatwerte erhöhten eindeutig vorzuziehen.

## 6. Anhang

### 6.1. Kurvenmaske Stufentest



## 6.2. Kurvenmaske Dauertest



### 6.3. Untersuchungsbogen

#### Untersuchungsbogen:

Untersuchungsdatum:

Name:

Geburtsdatum:

Infektzeichen:

Größe:

Gewicht:

BMI:

Körperfettanteil:

Hüftumfang:

Taillenumfang:

WHratio:

## 6.4. Checkliste Stufentest

### Checkliste:

**Name:**

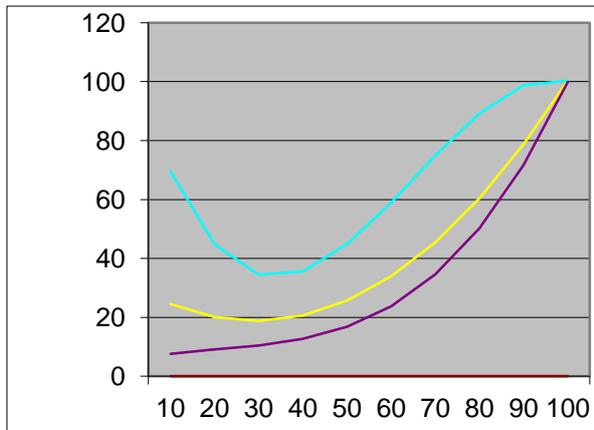
**Geburtsdatum:**

**Untersuchungsdatum:**

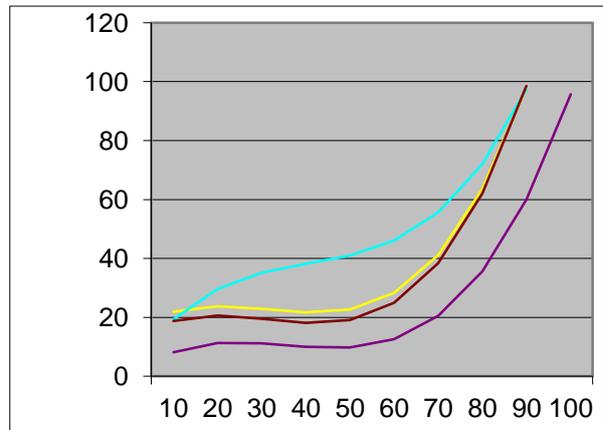
1. Probanden aufgeklärt
2. Einverständnis unterschrieben
3. Anamnesebogen ausgefüllt
4. VAS Stress, SF-36
5. körperlich gesund
6. Körperwerte (Fett etc.)
7. Zugang
8. HRV, Blut, RR Ruhe nach 10 min liegen mit Blut
9. Ruhewerte auf Rad
10. Stufentest (Zeitpunkt des Start am Spirogerät notieren)
11. 10 min nach Testende VAS Stufentest
12. HRV, Blut, Laktat RR Ruhe 20 min nach Testende (nach 10 min liegen mit Blut
13. Blut verschickt
14. Daten übertragen
15. Kurven gezeichnet

## 6.5. Stufentestkurven

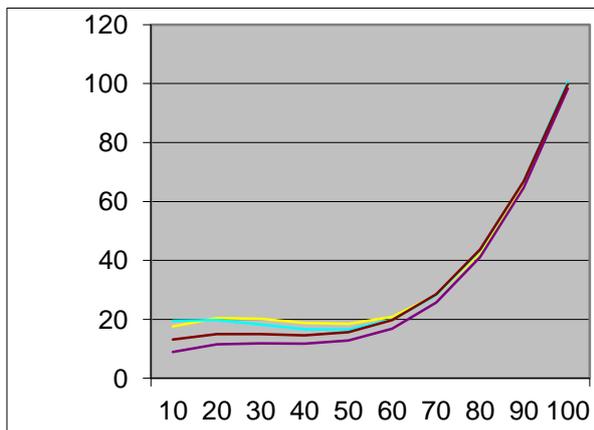
Prob 1:



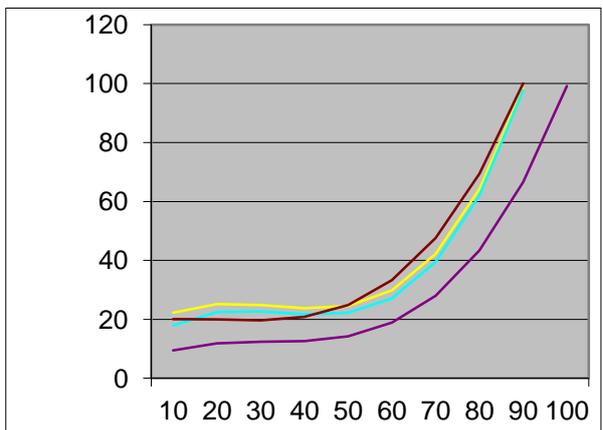
Prob 2:



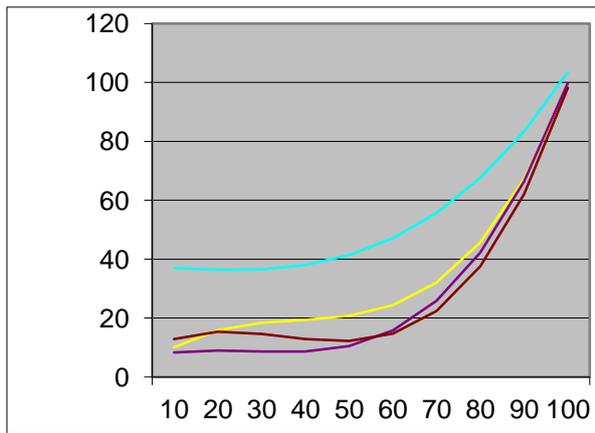
Prob 3:



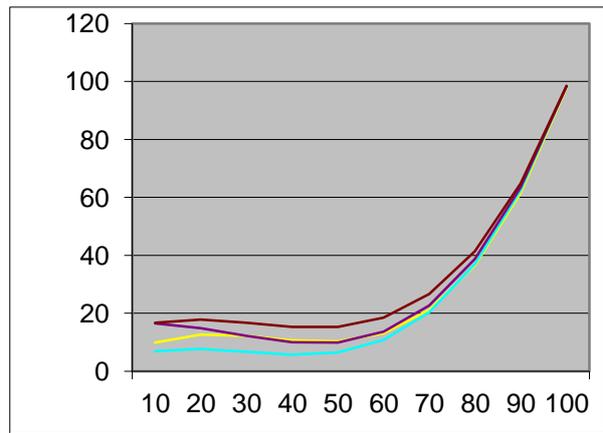
Prob 4:



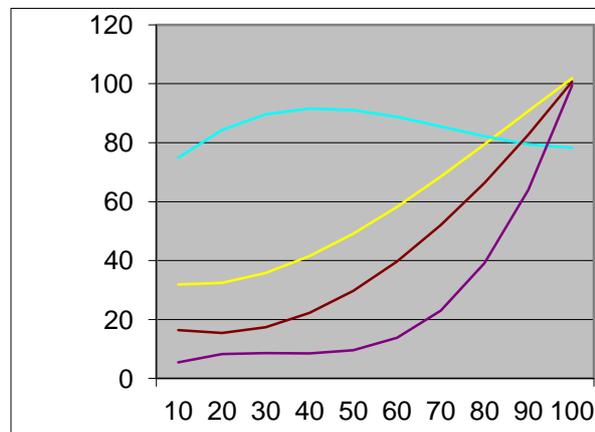
Prob 5:



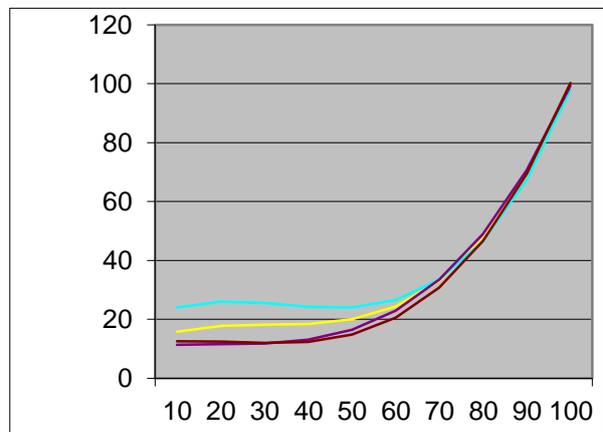
Prob 6:



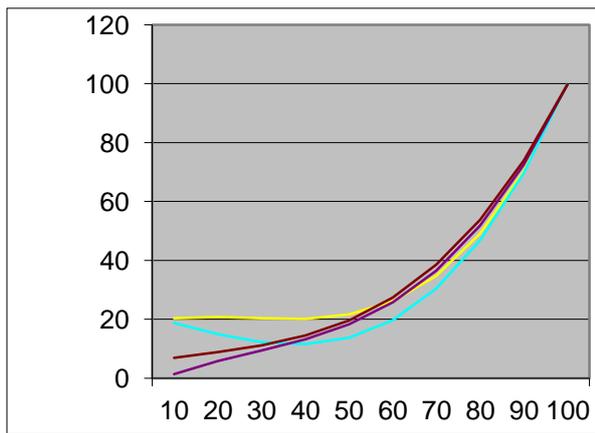
Prob 7:



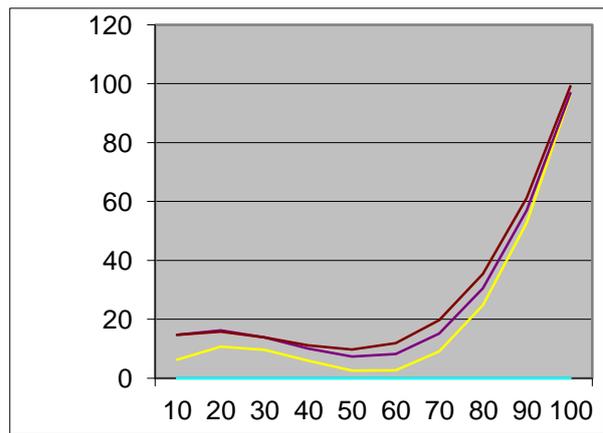
Prob 8:



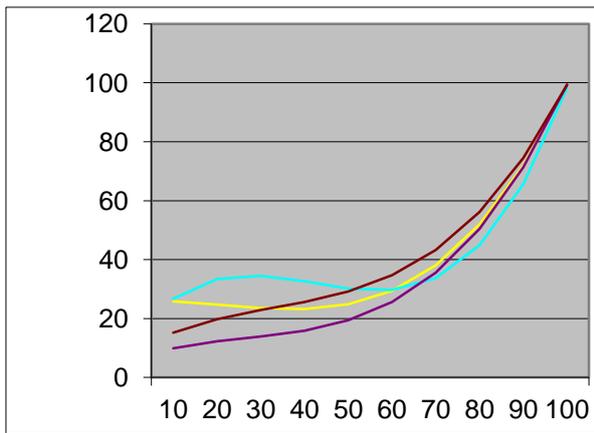
Prob 9:



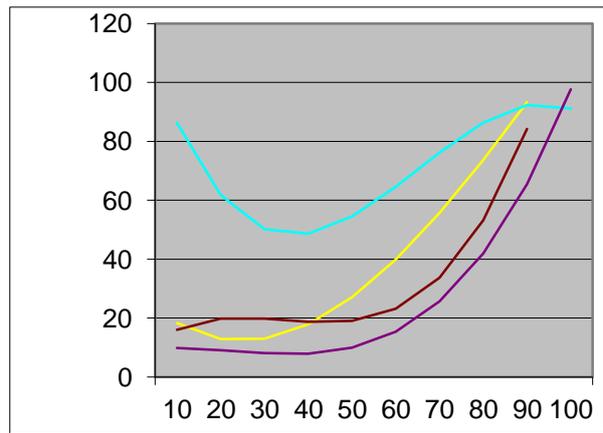
Prob 10:



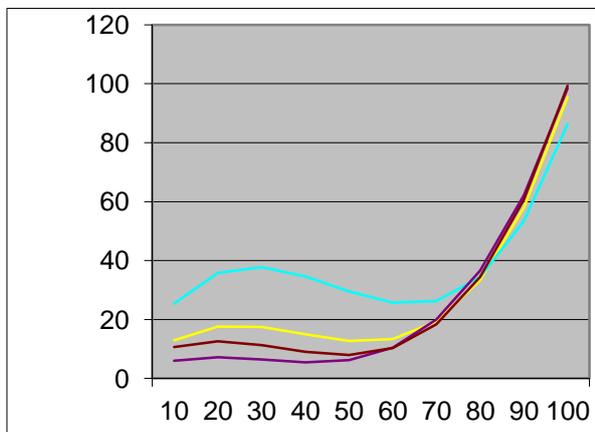
Prob 11:



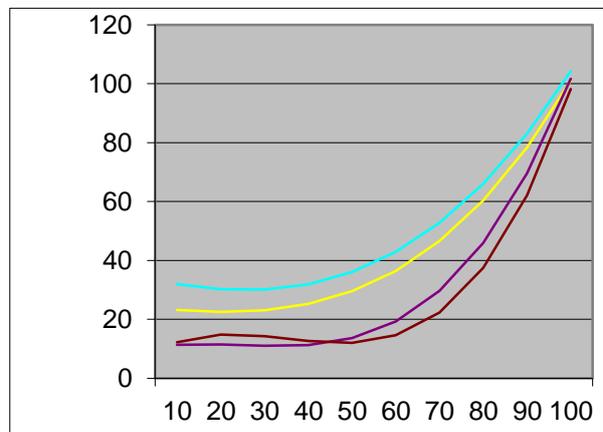
Prob 12:



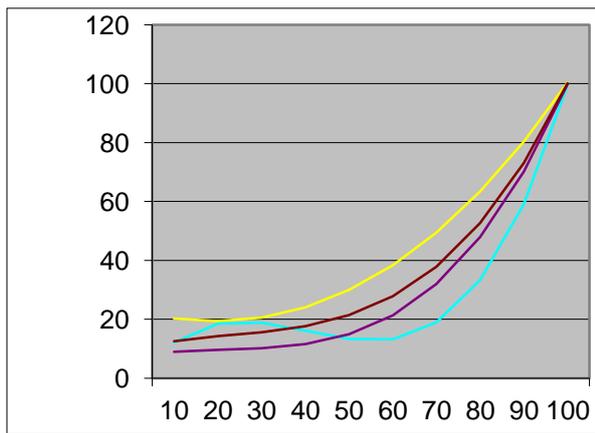
Prob 13:



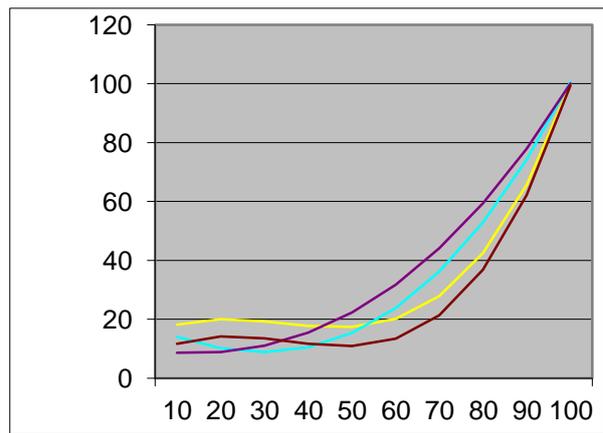
Prob 14:



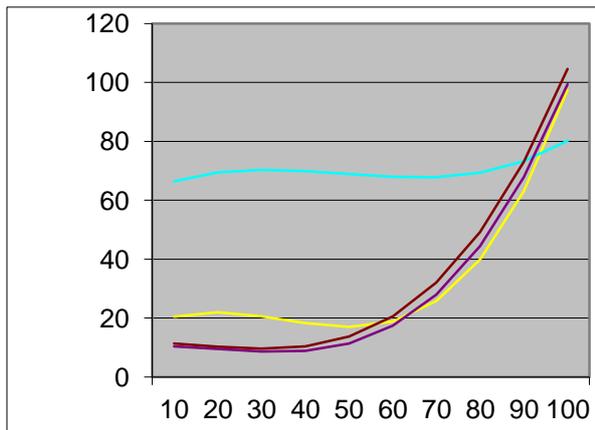
Prob 15:



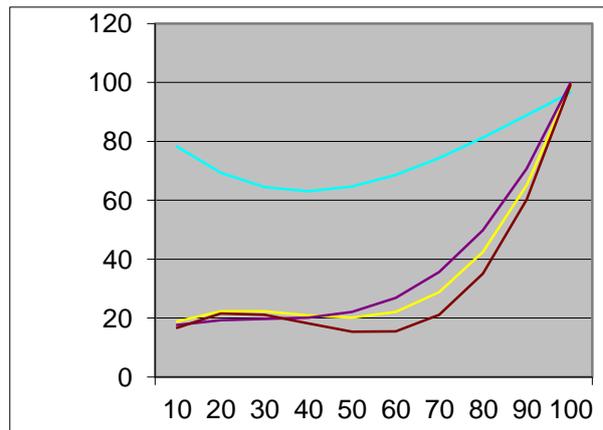
Prob 16:



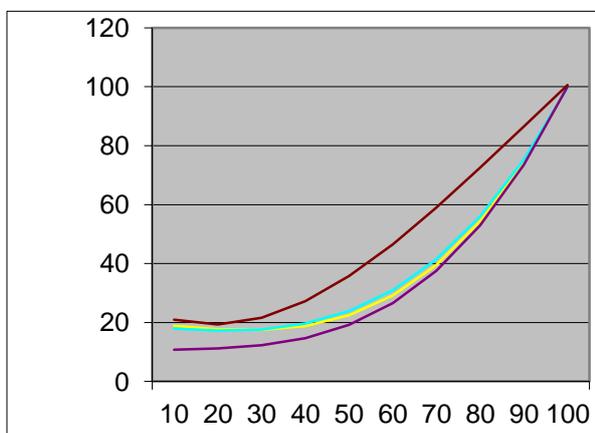
Prob 17:



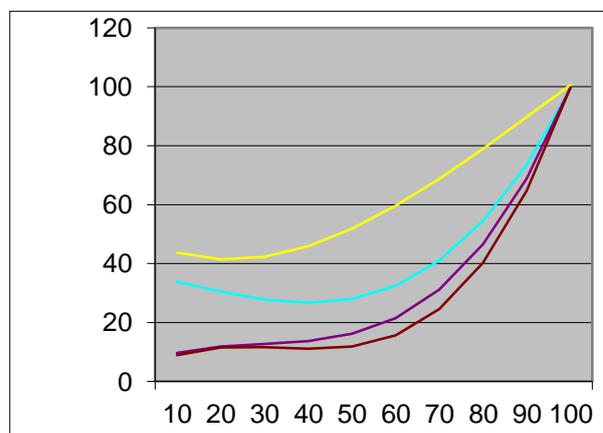
Prob 18:



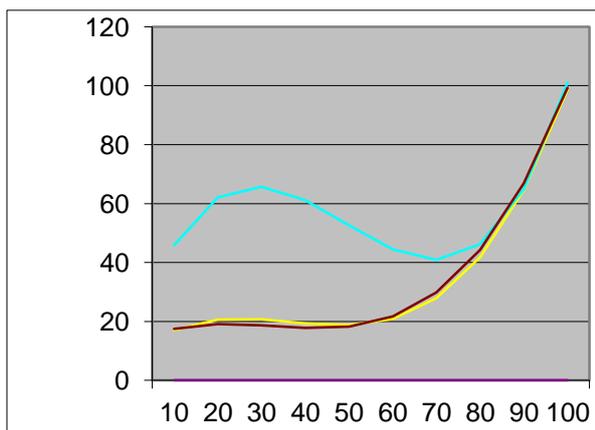
Prob 19:



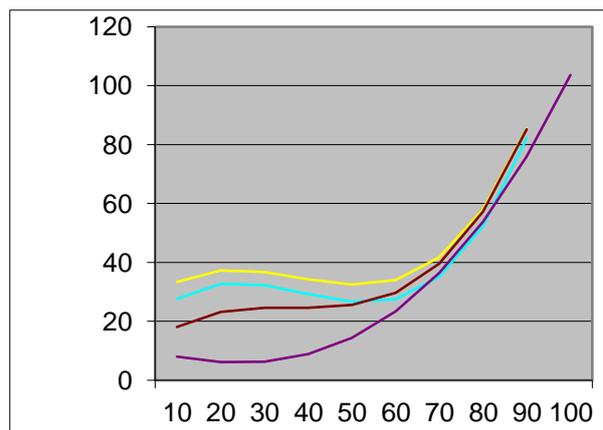
Prob 20:



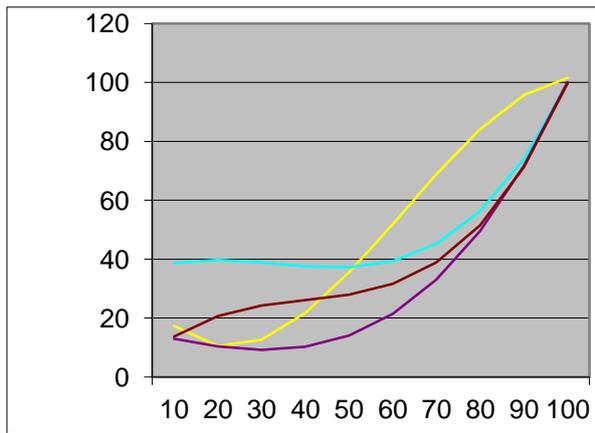
Prob 21:



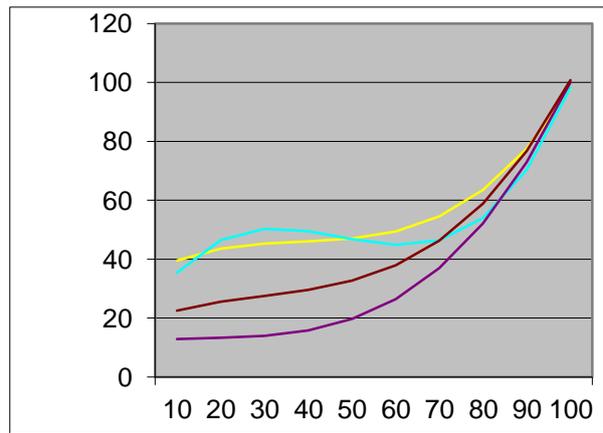
Prob 22:



Prob 23:



Prob 24:



## 7. Literatur

1. *Academic dictionaries and encyclopedias*. kein Datum.  
<http://dic.academic.ru/dic.nsf/dewiki/754714> (Zugriff am 11. 08 2009).
2. **Ahlborg, G.** „Mechanism for glycogenolysis in monoexercising human muscle during and after exercise.“ *Am J Physiol*, 1985: E540-E545.
3. **Astrand PO, Hultman E, Juhlin-Dannfelt A, Reynolds G.** „Journal of applied Physiology.“ *Disposal of lactate during and after strenuous exercise in humans*. Bde. 338-348. Nr. 61. 1986.
4. **Berliner Ärzteverlag GmbH.** *medizinauskunft*. kein Datum.  
[http://www.medizinauskunft.de/artikel.aktiv/fitness/06\\_04\\_kleines\\_sportlexikon.php](http://www.medizinauskunft.de/artikel.aktiv/fitness/06_04_kleines_sportlexikon.php)  
(Zugriff am 14. April 2010).
5. **Billat, V., P. Sirvent, P. M. Lepretre, und J. P. Koralsztein.** „Training effect on performance, substrate balance and blood lactate concentration at maximal lactate steady state in master endurance-runners.“ *Pflugers Arch*, 2004: 875-883.
6. *Biologische Psychologie*. Springer Verlag. kein Datum. <http://www.lehrbuch-psychologie.de:8080/biologischePsychologie/public/dozenten/index.jsp> (Zugriff am 11. 08 2009).
7. **Borg, G.** „Anstrengungsempfinden und körperliche Aktivität.“ *Deutsches Ärzteblatt*, 2004: A1016-A1021.
8. **Braumann, K. M., M. Ziegler, und R. Reer.** „Stellenwert von Laktat zur Leistungsdiagnostik und Trainingsgestaltung im Freizeit- und Fitnesssport.“ *Sportorthopädie - Sporttraumatologie*, 2004: 71-75.
9. **Braumann, K. M., U. Tegtbur, M. W. Busse, und N. Maassen.** „Die "Laktatsenke" - Eine Methode zur Ermittlung der individuellen Dauerleistungsgrenze.“ *deutsche Zeitung für Sportmedizin*, 1991: 240-246.

10. **Chudalla, R., S. Baerwalde, G. Schneider, und N. Maassen.** „Local and systemic effects on blood lactate concentration during exercise with small and large muscle groups.“ *European Journal of Physiology*, 2006: 690-697.
11. **Chwalbinska-Moneta, J., H. Kryzstofiak, A. Ziemba, K. Nazar, und H. Kaciuba-Uscitko.** „Threshold increases in plasma growth hormone in relation to plasma catecholamine and blood lactate concentrations during progressive exercise in endurance-trained athletes.“ *European Journal of Applied Physiology*, 1996: 117-120.
12. **Davis, H. A., B. J. Whipp, N. Lamarra, D. J. Juntzman, M. H. Frank, und K. Wassermann.** „The effect of ramp slope on determination of aerobic parameters from the ramp exercise test.“ *Med Sci Sports exercise*, 1982: 339-343.
13. **Davis, H. A., und G. C. Gass.** „Blood lactate concentrations during incremental work before and after maximum exercise.“ *Eur J Appl Physiol*, 1983: 383-392.
14. **Dickhuth, H. H., M. Huonker, T. Münzel, H. Drexler, A. Berg, und J. Keul.** „Individual Anaerobic Threshold for Evaluation of Competitive athletes and Patients with Left Ventricular Dsyfunction.“ *Advances in Ergometry*, 1991: 173-179.
15. **Dickhuth, H.-H., L. Yin, A. Niess, K. Röcker, F. Mayer, H.-C. Heitkamp, T. Horstmann.** „Ventilatory, Lactate-Derived and Catecholamine Threshold During Incremental treadmill Running: Relationship and Reproducibility.“ *International Journal of Sports Medicine*, 1998: 122-127.
16. **DocCheck Flexikon.** DocCheck Medical Services GmbH. 2006.  
<http://flexikon.doccheck.com/Laktat> (Zugriff am 10. 08 2009).
17. **Dörner, Klaus.** *Klinische Chemie und Hämatologie*. Georg Thieme Verlag, 2006.
18. **Gaesser, G. A., S. A. Ward, V. C. Baum, und B. J. Whipp.** „The effects of infused epinephrine on the "excess" O<sub>2</sub> uptake of heavy exercise in humans (Abstract).“ *FASEB J*, 1992: A1236.

19. **Galbo, H., J. J. Holst, N. J. Christensen, und J. Hilsted.** „Glucagon and plasma catecholamines during beta-receptor blockade in exercising man.“ *J Appl Physiol*, 1976: 855-863.
20. **Griess, M., U. Tegtubur, K. M. Braumann, M. W. Busse, und N. Maassen.** „Eine Methode zur Ermittlung der Dauerleistungsgrenze im Schwimmsport.“ In *Sport - Rettung oder Risiko fuer die Gesundheit? 31. Deutscher Sportärztekongress*, von D. Boening, K. M. Braumann, M. W. Busse, N. Maassen, & W. Schmidt, 418-421. Köln: Dt. Ärzte-Verlag, 1989.
21. **Guyton, A. C., und J. E. Hall.** *Textbook of Medical Physiology*. 2000.
22. **Heck, H.** *Laktat in der Leistungsdiagnostik*. Verlag Karl Hofmann, 1990.
23. **Heck, H., G. Hess, und A. Mader.** „Vergleichende Untersuchung zu verschiedenen Laktatschwellenkonzepten.“ *Dtsche Z Sportmedizin*, 1985: 19-25, 40-52.
24. **Heck, H., und P. Roskopf.** „Die Laktat-Leistungsdiagnostik - valider ohne Schwellenkonzept.“ *TW Sport + Medizin*, 1993: 344-352.
25. **Herold, Gerd.** *Innere Medizin*. Köln: Herold, 2008.
26. **Hottenrott, K., und G. Neumann.** *Dr. Loges*. kein Datum.  
[http://www.loges.de/Fettstoffwechseltraining\\_im\\_Fitness-\\_und\\_Leistungssport](http://www.loges.de/Fettstoffwechseltraining_im_Fitness-_und_Leistungssport) (Zugriff am 20. Februar 2010).
27. **Issekutz, B.** „Effect of b-adrenergic blockade on lactate turnover in exercising dogs.“ *J Appl Physiol*, 1984: 1754-1759.
28. **Jansen, E., P. Hjemdahl, und L. Kaijser.** „Epinephrine induced changes in muscle carbohydrate metabolism during exercise in male subjects.“ *J Appl Physiol*, 1986: 1466-1470.
29. **Keul, J., G. Simon, A. Berg, H. H. Dickhuth, I. Goertler, und R. Kübel.** „Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle uzur Leistungsbewertung und Trainingsgestaltung.“ *Dtsch Z Sportmed*, 1979: 215-218.

30. **Kjaer, M., N. H. Secher, F. W. Bach, S. Sheikh, und H. Galbo.** „Hormonal and metabolic responses to exercise in humans: effect of sensory nervous blockade.“ *Am J Physiol*, kein Datum: E96-E101.
31. **Lehman, M., P. Schmid, und J. Kuel.** „Plasma catecholamine and blood lactate accumulation during incremental exercise.“ *Int J Sports Med*, 1985: 78-81.
32. **Mader, A., H. Liesen, H. Heck, R. Philippi, R. Rost, P. Schürch, W. Hollmann.** „Zur Beurteilung der sportspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor.“ *Sportarzt und Sportmed*, 1976: 80-88, 109-112.
33. **Mazzeo, R. S., P. M. Bender, G. A. Brooks, G. E. Butterfield, B. M. Grooves, J. R. Sutton, E. E. Wolfel, J. T. Reeves.** „Arterial catecholamine response during exercise with acute and chronic high-altitude exposure.“ *Am J Physiol*, 1991: E419-E424.
34. **Mazzeo, R. S., und P. Marshall.** „Influence of Plasma catecholamines on the lactate threshold during graded exercise.“ *american Physiological Society*, 1989: 1319-1322.
35. **McCloskey, D. L., und J. H. Mitchell.** „Reflex cardiovascular and respiratory responses originating in exercise muscle.“ *J Physiol*, 1972: 173-186.
36. **McMorris, T., J. Sproule, S. Draper, R. Child, J. R. Sexsmith, C. D. Forster, J. Pattison.** „The measurement of plasma catecholamine and lactate thresholds: a comparison of methods.“ *European Journal of Applied Physiology*, 2000: 262-267.
37. **mesics.** *mesics GmbH*. kein Datum. <http://www.mesics.de> (Zugriff am 03. 05 2010).
38. **Podolin, D. A., P. A. Munger, und R. S. Mazzeo.** „Plasma catecholamines and lactate response during graded exercise with varied glycogen conditions.“ *American Physiological Society*, 1991: 1427-1433.
39. **RECIPE.** RECIPE Chemicals + Instruments GmbH. 03. 12 2008. [http://www.recipe.de/de/products\\_hplc\\_diagn\\_01000.html](http://www.recipe.de/de/products_hplc_diagn_01000.html) (Zugriff am 24. 07 2009).
40. **Richter, E. A., B. Sonne, N. J. Christensen, und H. Galbo.** „Role of epinephrine for muscular glycogenolysis and pancreatic hormonal secretion in running rats.“ *Am J Physiol*, 1981: E526-E532.

41. **Richter, E. A., N. B. Ruderman, und H. Galbo.** „Alpha and beta adrenergic effects on metabolism in contracting perfused muscle.“ *Acta Physiol Scand*, 1982: 215-222.
42. **Romijn JA, Coyle EF, Sidossis LS, Gastaldelli A, Horowitz JF, Endert E, Wolfe RR.** „Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration.“ *American Journal of Physiology*, 1993, 265 Ausg.
43. **Schneider, D. A., M. E. McGuggin, und G. H. Kaminmori.** „A comparison of the blood lactate and plasma catecholamine thresholds in untrained male subjects.“ *Int J Sports Med*, 1992: 562-566.
44. **Silbernagl, S., und A. Despopoulos.** *Taschenatlas der Physiologie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2001.
45. **Smith, C. G. M., und A. M. Jones.** „The relationship between critical velocity, maximal lactate steady-state velocity and lactate turnpoint velocity in runners.“ *eur j Appl Physiol*, 2001: 19-26.
46. **Spriet, L. L., J. M. Ren, und E. Hultman.** „epinephrine infusion enhances muscle glycogenolysis during prolonged electrical stimulation.“ *J Appl Physiol*, 1988: 1439-1444.
47. **Stainsby, W. N., C. Summers, und G. M. Andrew.** „Plasma catecholamines and their effect on blood lactate and muscle lactate output.“ *american Physiological Society*, 1984: 321-325.
48. **Stainsby, W. N., C. Summers, und P. D. Eitzman.** „Effects of catecholamines on lactic acid output during progressive working contractions.“ *American Physiological Society*, 1985: 1809-1814.
49. **Stainsby, W. N., und G. A. Brooks.** „Control of lactic acid metabolism in contracting muscles during exercise.“ *Exercise Sport Sci Rev*, 1990: 29-63.
50. **Stegmann, H., und W. Kindermann.** „Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle bei unterschiedlich Ausdauertrainierten aufgrund des Verhaltens der Laktatkinetik während der Arbeits- und Erholungsphase.“ *Dtsch Z Sportmed*, 1981: 213-221.

51. **Stegmann, H., W. Kindermann, und A. Schnabel.** „Lactate Kinetics and Individual Anaerobic Threshold.“ *Int J Sports Med*, 1981: 160-165.
  
52. **Steuer, M., V. Höltnke, und E. Jakob.** *Sportmedizin Hellersen*. 2004.  
<http://www.sportkrankenhaus.de/> (Zugriff am 13. 08 2009).
  
53. **Tegtbur, U., M. Griess, K. M. Braumann, M. W. Busse, und N. Maassen.** „Eine neue Methode zur Ermittlung der Dauerleistungsgrenze bei Mittel- und Langstrecklern.“ In *Sport - Rettung oder Risiko für die Gesundheit? 31. Deutscher Sportärztekongress*, von D. Boening, K. M. Braumann, M. W. Busse, N. Maassen, & W. Schmidt, 463-466. Köln: Dt. Ärzte-Verlag, 1989.
  
54. **Weicker, H.** „Interaktion zwischen aerober und anaerober Energieproduktion, Laktatproduktion, Release und Elimination.“ In *Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik*, von D. Clasing, H. Weicker, & D. Böning, 11-25. Stuttgart, 1994.
  
55. **Weineck, J.** *Sportbiologie*. Spitta Verlag, 2000.
  
56. **Weltman, A., C. M. Wood, C. J. Womack, S. E. Davis, J. L. Blumer, J. Alvarez, K. Sauer, G. A. Gaesser.** „Catecholamine and blood lactate responses to incremental rowing and running exercise.“ *American Physiological Society*, 1994: 1144-1149.

## 8. Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. K.-M. Braumann für die Gelegenheit meine Dissertation in seinem Institut anzufertigen bedanken.

Für die Betreuung und Unterstützung während der Durchführung der Belastungstests möchte ich mich bei Herrn Tobias Schmidt bedanken. Er hatte immer zahlreiche Ideen und hilfreiche Tipps bei der Umsetzung der Studie.

Weiterhin danke ich allen Mitarbeitern des Instituts für Sport- und Bewegungsmedizin der Universität Hamburg, die mir bei der Durchführung der Untersuchungen stets zur Seite standen.

Ebenso möchte ich mich bei allen Probanden und denjenigen die direkt und indirekt an der Durchführung der Untersuchungen beteiligt waren bedanken.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie und Freunden, die mich stets, auch in schwierigen Zeiten, immer unterstützt haben.

## 9. Lebenslauf

<b>Ausbildung</b>	1990 – 1994	Grundschule Uhlandstraße St. Augustin/Deutschland
	1994 – 2000	Rhein-Sieg-Gymnasium St. Augustin/Deutschland
	2000 – 2001	DeMatha Catholic Highschool Hyattsville/USA
	2001 – 2003	Rhein-Sieg-Gymnasium (Abitur) St. Augustin/Deutschland
	2004 – 2006	University of Szeged, Ungarn Studium der Humanmedizin Erster Abschnitt d. ärztlichen Prüfung (englischsprachiger Studiengang)
	2006 – 2010	Universitätsklinik Hamburg-Eppendorf (Hauptstudium)
	2009 – 2010	Praktisches Jahr

## 10. Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Unterschrift: .....