

**Diplomarbeit im Studiengang Sportwissenschaft**

**Kardiozirkulatorisches, metabolisches und  
ventilatorisches Verhalten während  
vierstündiger Dauerbelastungen auf dem  
Fahrrad**

vorgelegt von  
Oliver Faude

Das Thema wurde gestellt von:  
Dr. med. T. Meyer  
Prof. Dr. med. W. Kindermann

Institut für Sport- und Präventivmedizin  
Sportwissenschaftliches Institut  
Universität des Saarlandes  
Saarbrücken

Dezember 2002

**Diplomarbeit im Studiengang Sportwissenschaft**

**Kardiozirkulatorisches, metabolisches und  
ventilatorisches Verhalten während  
vierstündiger Dauerbelastungen auf dem  
Fahrrad**

vorgelegt von  
Oliver Faude

Das Thema wurde gestellt von:  
Dr. med. T. Meyer  
Prof. Dr. med. W. Kindermann

Institut für Sport- und Präventivmedizin  
Sportwissenschaftliches Institut  
Universität des Saarlandes  
Saarbrücken

Dezember 2002

<b>I.</b>	<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>II.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>III.</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>IV.</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>V.</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>X</b>

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
1.1	Radspport.....	2
1.1.1	Anforderungsprofil Radspport.....	2
1.1.2	Grundlagen des Radspporttrainings .....	3
1.1.3	Grundlagenausdauertraining im Radspport .....	4
1.2	Ausdauerbelastungen (Physiologie der Ausdauerbelastungen).....	4
1.2.1	Metabolismus bei Ausdauerbelastungen .....	5
1.2.2	Die Ausdauerleistungsfähigkeit.....	7
1.2.2.1	Der aerob-anaerobe Übergang.....	9
1.2.2.2	Bestimmung des aerob-anaeroben Übergangs .....	10
1.2.3	Trainingssteuerung mit Hilfe des aerob-anaeroben Übergangs .....	12
1.3	Ziel der Untersuchung .....	14
<b>2</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>15</b>
2.1	Probandengut und allgemeines Design.....	15
2.2	Eingangsuntersuchungen.....	16
2.2.1	Stufentest .....	16
2.2.2	Rampentest .....	16
2.3	Dauerbelastungen .....	18
2.4	Messmethodik .....	20
2.4.1	Spiroergometrie .....	20
2.4.2	EKG und Herzfrequenzmessung .....	21
2.4.3	Laktat, Glukose.....	21

2.4.4	Katecholamine .....	21
2.4.5	Venöse Blutentnahmen .....	22
2.4.6	Fahrradergometer .....	22
2.4.7	Weitere Messmethoden .....	23
2.5	Statistik und Berechnungen .....	23
<b>3</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>25</b>
3.1	Probandengut .....	25
3.2	Dauertests .....	25
3.2.1	Durchhaltbarkeit .....	26
3.2.2	Leistungsphysiologie, Hämatologie und Hormone .....	28
3.2.3	Energiestoffwechsel und Substrate .....	34
<b>4</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>40</b>
4.1	Methodenkritik .....	40
4.2	Basisintensität für Grundlagenausdauertraining im Radsport .....	42
4.3	Metabolisches und kardiozirkulatorisches Profil .....	44
4.4	Empfehlungen für die Trainingspraxis .....	47
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>50</b>
<b>6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>51</b>

## Abbildungsverzeichnis

- Abb.1:** Beitrag der verschiedenen Formen der Energiebereitstellung bei maximaler Belastung in Abhängigkeit von der Belastungszeit (nähere Erläuterungen im Text; aus: Dickhuth 2000, S.183).
- Abb.2:** Bestimmung der ventilatorischen Schwelle (VT) mittels der V-slope-Methode nach Beaver et al. (1986). Die Bestimmung erfolgt durch Anlegen jeweils einer Regressionsgeraden für den unteren und oberen Teil des  $\dot{V}O_2$ - $\dot{V}CO_2$ -Graphen. Der Schnittpunkt markiert die VT.
- Abb.3:** Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle (IAS) nach der von Stegmann et al. (1981) entwickelten Methode. Durch denjenigen Punkt (B) der Nachbelastungsphase, der dem Laktatwert bei Abbruch (A) entspricht, wird eine Tangente an die Laktatleistungskurve gelegt. Der Berührungspunkt zeigt die Leistungsfähigkeit an der IAS an.
- Abb.4:** Trainingsintensitäten und angestrebte Laktat- und Herzfrequenzbereiche abgeleitet aus einer Laufbandergometrie. Basis für die Vorgaben sind die IAS (100%) und die aerobe Schwelle (hier: 80% IAS). Intensitätskategorien: I = langsamer Dauerlauf; II = mittlerer Dauerlauf; III = Tempodauerlauf; IV = extensiver Tempolauf; V = intensiver Tempolauf; VI = hochintensiver Tempolauf (aus: Dickhuth 2000, S.208).
- Abb.5:** Überblick über das Design dieser Untersuchung (nähere Erläuterungen im Text).
- Abb.6:** Ein Rampen- (links) und ein Stufenprotokoll (rechts), wie sie in dieser Untersuchung verwendet wurden (nähere Erläuterungen im Text).
- Abb.7:** Modell zur Bestimmung der der ventilatorischen Schwelle (VT) entsprechenden Leistung aus einem Rampentest. Da der Leistungsanstieg dem Anstieg der  $\dot{V}O_2$  vorausgeht, muss zur VT-Leistungsbestimmung um  $\tau = 45$  s zurückgerechnet werden (parallel zur x-Achse von Linie b auf Linie a). In diesem Beispiel ergibt eine VT von  $2,8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  somit eine Leistung von 212 W. Modell modifiziert nach Davis et al. (1982).
- Abb.8:** Komplette ausgestattete Versuchsperson auf dem eigenen Fahrrad auf der 400 m-Bahn.
- Abb.9:** Ablauf der Dauertests auf der Leichtathletikbahn. Die roten Pfeile markieren die venösen Blutentnahmen, die großen blauen Pfeile bezeichnen die Abnahmezeitpunkte für die kapillären Blutentnahmen und die kleinen blauen Pfeile markieren die Trinkpausen (nähere Erläuterungen im Text).

- Abb.10:** Abgebrochene (Dreiecke) und vollendete Fahrten (Kreise) ausgedrückt in Relation zur IAS,  $\dot{V}O_{2max}$ ,  $HF_{max}$  und zur  $HF_{IAS}$ . Die roten gestrichelten Linien markieren jeweils die Intensität, unter der alle Fahrten durchgehalten werden konnten (nähere Erläuterungen im Text).
- Abb.11:** Gemittelte SRM-Leistungsmessung während der Dauerbelastungen. 80% IAS lag hochsignifikant höher als 70% IAS und 100% VT ( $p < 0,01$ ).
- Abb.12:** Sauerstoffaufnahme während der Dauerbelastungen. 80% und 70% IAS unterschieden sich hochsignifikant, während für 80% IAS und 100% VT nur ein solcher Trend zu erkennen war ( $p = 0,09$ ).
- Abb.13:** Atemminutenvolumen während der Dauerbelastungen. 80% IAS lag signifikant höher als 70% IAS ( $p < 0,01$ ) und 100% VT ( $p < 0,05$ ).
- Abb.14:** Laktatverhalten während der Dauerbelastungen. Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Intensitäten.
- Abb.15:** Herzfrequenzverhalten während der Dauerbelastungen. 80% IAS lag signifikant höher als 70% IAS ( $p < 0,05$ ). Die Abbruchwerte unterschieden sich signifikant von den Messungen der ersten zwei Stunden.
- Abb.16:** Differenzen des Hämatokrits (Delta Hkt., oben) sowie der Hämoglobinkonzentration (Delta Hb, unten) nach und vor Belastung für die verschiedenen Intensitäten sowie am Kontrolltag. Die belastungsinduzierten Anstiege waren hoch-signifikant ( $p < 0,01$  für alle Intensitäten).
- Abb.17:** Verhalten von Noradrenalin (oben) und Adrenalin (unten) während der Dauerbelastungen. Der Anstieg über die Zeit war jeweils hochsignifikant ( $p < 0,01$ ), wobei keine Unterschiede zwischen den Intensitäten auftraten.
- Abb.18:** Differenz der Kortisolkonzentration nach und vor Belastung für die verschiedenen Intensitäten sowie am Kontrolltag. Für 80% IAS und 100% VT konnte ein tendenzieller Anstieg festgestellt werden ( $p = 0,06$ ). Die Kortisolkonzentration fiel am Kontrolltag hochsignifikant ab ( $p < 0,01$ ).
- Abb.19:** Verhalten des Respiratorischen Quotienten während der Dauerbelastungen. Es gab keine Unterschiede zwischen den Intensitäten. Der Abfall über die Zeit war hochsignifikant ( $p < 0,01$ ).
- Abb.20:** Verhalten des Blutzuckerspiegels während der Dauerbelastungen. Es gab keine Unterschiede zwischen den Intensitäten. Der Abfall über die Zeit war hochsignifikant ( $p < 0,01$ ).

**Abb.21:** Differenz der Triglyceridkonzentration nach und vor Belastung. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Intensitäten bzw. im Vergleich zum Kontrolltag.

**Abb.22:** Differenz der Glycerinkonzentration nach und vor Belastung. Im Vergleich zum Kontrolltag war für alle Bedingungen ein hochsignifikanter Anstieg ( $p < 0,01$ ) zu verzeichnen. Für die verschiedenen Intensitäten bestanden keine Unterschiede.

**Abb.23:** Differenz der Konzentration der freien Fettsäuren nach und vor Belastung. Im Vergleich zum Kontrolltag war für alle Bedingungen ein hochsignifikanter Anstieg ( $p < 0,01$ ) zu verzeichnen. Zwischen den verschiedenen Intensitäten fanden sich keine Unterschiede.

**Abb.24:** Gemittelter halbstündiger Energieverbrauch sowie anteilige Kohlenhydrat- und Fettverbrennung für 70% (oben) und 80% IAS (Mitte) und 100% VT (unten). Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Intensitäten hinsichtlich des gesamten Energieverbrauchs sowie des anteiligen Fettstoffwechsels. Der Anteil der Fettverbrennung am Gesamtenergieverbrauch nahm zum Ende der Belastung für alle Intensitäten hochsignifikant zu ( $p < 0,01$ ).

## II. Tabellenverzeichnis

- Tab.1** Anthropometrische und trainingsanamnestische Daten der Versuchspersonen (HV = Herzvolumen; KF = Körperfettgehalt).
- Tab.2** Leistungsphysiologische Ergebnisse der Eingangsuntersuchungen.
- Tab.3** Die während der Dauertests gefahrenen Intensitäten, ausgedrückt in Prozent der maximalen Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme sowie der Herzfrequenz an der IAS, jeweils als Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung sowie als Minimum und Maximum.
- Tab.4** Trinkmenge, Gesamtpausendauer und Umgebungstemperaturen während der Dauertests (MW  $\pm$  SD). Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Intensitäten.
- Tab.5** Anzahl und Zeitpunkte der Abbrüche für die verschiedenen Intensitäten. Es gab signifikant mehr Abbrüche für 80% IAS als für 70% IAS ( $p < 0,05$ ), wobei für 100% VT nur ein Trend in diese Richtung zu erkennen war ( $p = 0,08$ ).
- Tab.6** Gesamtenergieverbrauch und durchschnittlicher Energieverbrauch pro Stunde während der Dauertests (MW  $\pm$  SD). Es fanden sich keine signifikanten Unterschiede für die verschiedenen Intensitäten.
- Tab.7** Durch Fettverbrennung gewonnene Energie während der ersten und der letzten halben Stunde der Dauertests ausgedrückt in absoluten Zahlen sowie relativ zum gesamten 30minütigen Energieverbrauch (jeweils MW  $\pm$  SD). Der Anteil des Fettstoffwechsels nahm für alle Intensitäten hochsignifikant zu (jeweils  $p < 0,01$ ).



### III. Abkürzungsverzeichnis

A $\ddot{A}$ O <sub>2</sub>	Atemäquivalent für Sauerstoff
Abb.	Abbildung
ADP	Adenosindiphosphat
ATP	Adenosintriphosphat
bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius
ca.	circa
Cat	Katecholamine
cm	Zentimeter
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
d.h.	das heißt
dl	Deziliter
DM	Deutsche Mark
E	Energieverbrauch
EKG	Elektrokardiogramm
et al.	et altera
FFS	freie Fettsäuren
GA	Grundlagenausdauer
Glu	Glukose
h	Stunde
Hb	Hämoglobin
HF	Herzfrequenz
HF <sub>IAS</sub>	Herzfrequenz an der IAS
HF <sub>max</sub>	maximale Herzfrequenz
Hkt.	Hämatokrit
HV	Herzvolumen
IAS	Individuelle Anaerobe Schwelle
KÄ	kalorisches Äquivalent
kcal	Kilokalorien
KF	Körperfettgehalt
kg	Kilogramm

KH	Kohlenhydrate
kJ	Kilojoule
km	Kilometer
KP	Kreatinphosphat
l	Liter
La	Laktat
m	Meter
Max	Maximum
MaxLaSS	maximales Laktat-Steady-State
min	Minute
Min	Minimum
MJ	Megajoule
ml	Milliliter
μl	Microliter
mmol	Millimol
MW	Mittelwert
ng	Nanogramm
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
P	Leistung
P <sub>max</sub>	maximale Leistung
PC	Personal Computer
PoW	Punkt des optimalen Wirkungsgrades der Atmung
RQ	Respiratorischer Quotient
s	Sekunde
s.	siehe
S.	Seite
SD	Standardabweichung
Tab.	Tabelle
TG	Triglyceride
v	Geschwindigkeit
V̇CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxidabgabe
V <sub>E</sub>	Atemminutenvolumen
V̇O <sub>2</sub>	Sauerstoffaufnahme

$\dot{V}O_2\text{max}$	maximale Sauerstoffaufnahme
VT	Ventilatorische Schwelle
W	Watt
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

## IV. Zusammenfassung

Ein Großteil des leistungssportlichen Radtrainings besteht aus mehrstündigen Belastungen bei relativ niedrigen Intensitäten ohne Laktatakkumulation. Es ist allgemein anerkannt, dass submaximale Schwellenmodelle die Leistungsfähigkeit präziser abbilden als maximale Parameter. Ziel dieser Untersuchung war es, eine von Schwellenwerten abgeleitete Intensität zu finden, die über vier Stunden durchgehalten werden kann und somit als Grundlage zur Steuerung des extensiven Radsporttrainings dienen kann. Darüber hinaus sollte ein für derartige Belastungen typisches metabolisches, kardiozirkulatorisches und ventilatorisches Profil erstellt werden.

Es nahmen 12 gut ausdauertrainierte Radfahrer und Triathleten an dieser Studie teil ( $26 \pm 7$  Jahre,  $71 \pm 5$  kg,  $BMI = 22 \pm 1$ ,  $\dot{V}O_2\max = 66 \pm 6 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Diese absolvierten einen Stufentest zur Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle (IAS) nach Stegmann (1981) und einen Rampentest zur Bestimmung der ventilatorischen Schwelle (VT) nach Wasserman (1973). Danach mussten die Probanden drei vierstündige Dauertests auf einer 400 m-Leichtathletikbahn durchführen. Dazu war ihr eigenes Fahrrad mit einem portablen Ergometer ausgestattet, so dass eine kontinuierliche Messung der aktuellen Leistung und der Herzfrequenz möglich war. Die „Kandidatenintensitäten“ waren 70 und 80% IAS sowie 100% VT. Die Testreihenfolge der beiden Eingangs- und der drei Dauertests war jeweils randomisiert. Alle Tests erfolgten mit kontinuierlicher Spiroergometrie. Während der Tests wurden die Konzentrationen von Laktat, Blutglukose sowie den freien Katecholaminen aus dem Kapillarblut bestimmt. Vor und nach den Tests erfolgten venöse Blutentnahmen zur Bestimmung der Konzentrationen von Cortisol, Triglyceriden, Serum-Glycerin, der freien Fettsäuren sowie von Hämatokrit und Hämoglobingehalt.

Alle Fahrten bei 70% IAS konnten beendet werden. 3 von 12 Fahrten an der VT und 5 von 7 Fahrten bei 80% IAS mussten frühzeitig abgebrochen werden. 80 und 70% IAS bzw. 100% VT entsprachen  $206 \pm 15$ ,  $183 \pm 22$  bzw.  $185 \pm 27$  W. Die Intensität an der VT lag im Mittel bei  $71 \pm 5$  % der IAS. Die Unterschiede in den Belastungsintensitäten spiegelten sich im Verhalten der Sauerstoffaufnahme und des Atemminutenvolumens wider. Die Laktatkonzentrationen blieben für alle Intensitäten

im Bereich der Ruhekonzentrationen. Die Herzfrequenz lag für 80% IAS höher als für die beiden anderen Intensitäten und zeigte einen Aufwärtsdrift ab der zweiten Belastungsstunde. Es war eine Hämokonzentration (Hkt. von 42 auf 44%) zu beobachten, und die Stresshormone zeigten einen belastungsinduzierten Anstieg. Der RQ und die Blutglukose-Konzentration zeigten einen signifikanten Abfall, ohne sich für die einzelnen Intensitäten zu unterscheiden. Dagegen kam es bei freien Fettsäuren und Glycerinspiegel zu einem deutlichen Anstieg. Aus der indirekten Kalorimetrie ergab sich eine Zunahme des Fettstoffwechsels von ca. 30% zu Beginn auf 50% des Gesamtenergieverbrauchs am Ende der Belastung. Der durchschnittliche stündliche Energieverbrauch lag bei 800 kcal.

70% der individuellen anaeroben Schwelle hat sich als verlässliche Intensität erwiesen, die vier Stunden auch ohne Substitution von Kohlenhydraten durchgehalten werden und daher als Grundlage zur Steuerung des Grundlagenausdauertrainings im Radsport dienen kann. Derartige Belastungen sind gekennzeichnet durch vermehrte Nutzung des Fettstoffwechsels mit zunehmender Zeitdauer und einen nach ca. 90 Minuten beginnenden Herzfrequenzanstieg. Unter Beachtung dieses Herzfrequenzdrifts kann 80% der Herzfrequenz an der IAS als Grundlage zur Steuerung eines grundlagenausdauerorientierten Fettstoffwechseltrainings herangezogen werden.

„Es gibt eine Wissenschaft vom Siegen. Der Zuschauer sieht die technische Seite des Radsports selten, aber hinter dem prächtigen Regenbogengeglitzer eines Pelotons verbirgt sich die nicht besonders spannende Realität, dass Straßenrennen oft nur durch einen winzigen Geschwindigkeitsvorsprung gewonnen werden, der, lange bevor das Rennen überhaupt gestartet wurde, in einem Leistungslaboratorium oder einem Windkanal oder einem Velodrom herausgetüftelt worden ist.“

Lance Armstrong

# 1 Einleitung

## 1.1 Radsport

Jedes Jahr im Juli zieht die „Tour de France“ – trotz aller Dopingskandale – Millionen Menschen in ihren Bann. Täglich fahren die „Helden der Straße“ durch die Landschaften Frankreichs, kämpfen im Zeitfahren direkt gegeneinander oder erklimmen einsam die Pässe der Pyrenäen oder der Alpen – dort wo die „Tour der Leiden“ entsteht. Diese Anstrengungen machen den Radsport zu einer der beliebtesten und faszinierendsten Ausdauersportarten.

Etappenrennen wie die „Tour de France“ oder auch der „Giro d’Italia“ bzw. die „Vuelta a España“ stellen höchste Anforderungen an die Athleten. Innerhalb von drei Wochen fahren die Sportler ca. 4.000 km mit nur wenigen Ruhetagen. Sie überqueren dabei über 30 Bergpässe (bis zu 2.700 m) bei durchschnittlich 190 km Strecke pro Etappe. Der mittlere tägliche Energieverbrauch beträgt 25,4 MJ bzw. 6.060 kcal (Saris et al. 1989). Um derartige Belastungen durchzustehen, legen die Profis mehr als 30.000 km pro Jahr auf dem Rad zurück (Konopka 2000, S.157; Lucía et al. 2001). Es wird ersichtlich, dass der Radsport extreme Anforderungen an die physische Leistungsfähigkeit der Athleten stellt.

### 1.1.1 Anforderungsprofil Radsport

Das Anforderungsprofil einer Sportart besagt, welche Fähigkeiten und Fertigkeiten in welchem Ausmaß die Gesamtleistung dieser Sportart beeinflussen. Für alle Sportarten von grundlegender Bedeutung sind anthropometrische Merkmale, technische Fertigkeiten, taktische und konditionelle Fähigkeiten, psychische Voraussetzungen sowie materielle und soziale Begebenheiten (Martin et al. 1993, S.25; Zintl 1996, S.77). Das Anforderungsprofil einer Sportart bestimmt die genaue Leistungsstruktur und dementsprechend auch die Trainingssteuerung.

Die physischen Leistungsfaktoren – und hier insbesondere die Ausdauerleistungsfähigkeit – nehmen im Radsport eine dominante Stellung ein.

Lucía et al. (1999) fanden bei einer Untersuchung des Herzfrequenzverhaltens von acht professionellen Radsportlern während der Tour de France, dass bis zu 70% der Gesamtdauer unter 70% der maximalen Sauerstoffaufnahme ( $\dot{V}O_2\text{max}$ ), 23%

zwischen 70 und 90%  $\dot{V}O_2\text{max}$  sowie 7% über 90%  $\dot{V}O_2\text{max}$  gefahren werden. Etwas höhere Intensitäten berichten Fernández-García et al. (2000) bei einer Untersuchung an insgesamt 18 Rennfahrern während der „Vuelta a España“ und der „Tour de France“. Sie beobachteten, dass 40 bis 45% der durchschnittlichen Etappendauer bei über 70%  $\dot{V}O_2\text{max}$  bestritten werden. Nach Lindner (1996, S.136) werden bei Straßen-, Etappen- und Eintagesrennen ca. 60% im „oberen aeroben Bereich“, 30 bis 35% im „aerob-anaeroben Übergangsbereich“ und weniger als 5% im „anaeroben Bereich“ gefahren. Die Wettkampfanforderungen sind dadurch gekennzeichnet, dass – speziell beim Zeitfahren und bei Bergetappen – hohe Intensitäten im Bereich der anaeroben Schwelle lange Zeit durchgehalten werden müssen, dass – bei Zwischensprints oder kurzen Anritten am Berg – kurzzeitig hohe anaerobe Energiereserven mobilisiert werden und dass die dabei entstehenden Stoffwechselprodukte schnell wieder abgebaut werden (Lindner 1996, S.136f). Die Wettkampfdauer liegt meistens zwischen 4 und 6 Stunden (beim Zeitfahren ca. 1 Stunde) und dabei werden vornehmlich oxidative Stoffwechselwege beansprucht (Lucía et al. 2001). Bei Etappenrennen ist zusätzlich eine ausgeprägte Regenerationsfähigkeit von den täglichen Belastungen für die Gesamtleistung ausschlaggebend.

### 1.1.2 Grundlagen des Radsporttrainings

Nach Lindner (1996, S.145ff) müssen die in 1.1.1 beschriebenen physiologischen Anforderungen und Fähigkeiten voll erfasst und durch verschiedene Trainingsbereiche lückenlos angesprochen werden. Er unterscheidet drei Komponenten, die spezifisch trainiert werden müssen: die anaerobe Mobilisationsfähigkeit (z.B. Sprints), der aerob-anaerobe Übergangsbereich (bei Bergetappen und Zeitfahren von entscheidender Bedeutung), sowie die aerobe Leistungsfähigkeit (der Grundlagenausdauerbereich = GA). Das GA-Training stellt den Haupttrainingsbereich des Radsportlers dar. Nach Neumann (1993, S.569) trainieren professionelle Radsportler bis zu 35.000 km pro Jahr in diesem Intensitätsbereich.

Lucía et al. (2001) unterscheiden ähnliche Intensitätsbereiche. Mehr als 77% des gesamten Radtrainings finden demnach bei niedrigen Intensitäten ( $< 65\% \dot{V}O_2\text{max}$ ) statt. Bis zu 15% des Trainings liegen zwischen 65 und 90%  $\dot{V}O_2\text{max}$  und höchstens 8% sind hochintensive Trainingseinheiten. Diese Zahlen belegen die Bedeutung des Grundlagenausdauertrainings im Radsport.



### 1.1.3 Grundlagenausdauertraining im Radsport

Das Grundlagenausdauertraining ist durch hohe Umfänge bei relativ niedrigen Intensitäten gekennzeichnet. Die Blutlaktatwerte bleiben üblicherweise im Bereich der Ruhekonzentrationen.

Ziel ist zum Einen die Entwicklung und Stabilisierung der allgemeinen aeroben Ausdauerfähigkeiten. Dies kann über die Optimierung der aeroben glykolytischen sowie der lipolytischen Stoffwechselwege bzw. über die Kapazitäten des kardio-pulmonalen Systems, d.h. optimale Bereitstellung und Nutzung von Sauerstoff, geschehen. Zum Anderen wird auf eine Verbesserung der Regenerationsfähigkeiten hingearbeitet. Dies kann entweder die Erholung von einer akuten Azidose i.S. eines schnelleren Abbaus oder einer besseren Pufferung des anfallenden Laktats, z.B. bei einem Berganstieg, betreffen oder die Erholung von chronischen Trainings- oder Wettkampfbelastungen, wie z.B. während eines Trainingslagers oder eines mehrtägigen Etappenrennens.

Als Angaben zur Intensitätssteuerung werden in den meisten Radsportlehrbüchern Faustformeln für Herzfrequenzvorgaben, Prozent der maximalen Leistung, der maximalen Herzfrequenz oder der  $\dot{V}O_2\text{max}$  benutzt (Hottenrott und Zülch 1995, S.21+83ff; Konopka 2000, S.127ff; Zintl 1996, S.99ff). Basis der Vorgaben im Grundlagenausdauertraining ist es, einen Laktatwert in einem Bereich zwischen dem Ruhewert und 3 mmol/l zu erreichen (Lindner 1996, S.149).

Meyer et al. (1999) zeigten, dass es problematisch ist, Trainingsvorgaben in Prozent der  $\dot{V}O_2\text{max}$  oder der maximalen Herzfrequenz zu machen, da dies interindividuell zu sehr unterschiedlichen metabolischen Beanspruchungen führen kann. Wesentlich günstiger ist es, die Trainingsbelastungen beispielsweise über die individuelle anaerobe Schwelle (IAS) zu steuern, da auf diese Weise die gewünschten Laktatbereiche verlässlicher erzielt werden können.

## 1.2 **Ausdauerbelastungen (Physiologie der Ausdauerbelastungen)**

Ausdauerbelastungen auf dem Fahrrad erlauben eine exakte Beurteilung der belastungsinduzierten physiologischen Reaktionen im Verhältnis zur tatsächlich erbrachten Leistung. Als Beanspruchungsindikatoren bei derartigen Belastungen

dienen hauptsächlich die Parameter Herzfrequenz, Laktat sowie bestimmte Kennwerte des Gasaustausches.

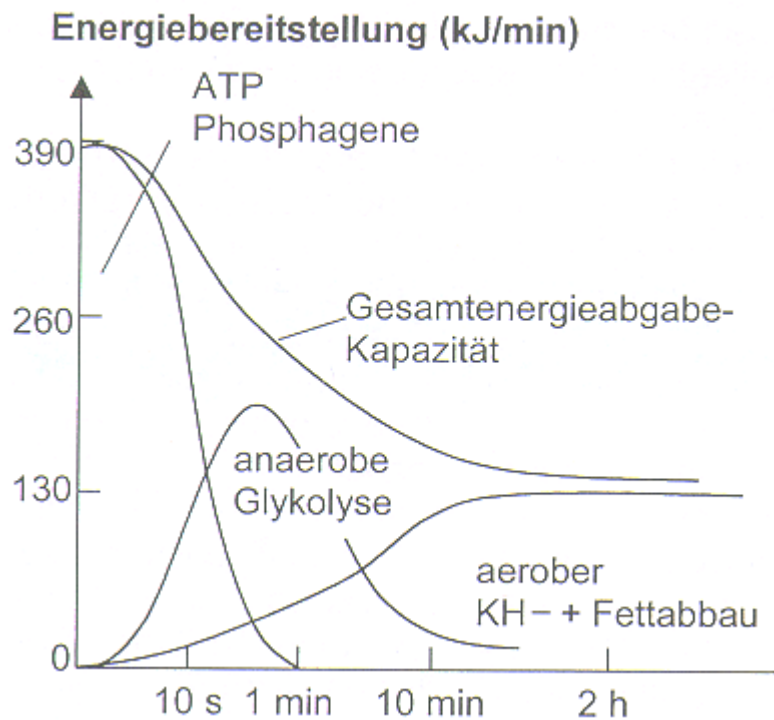
### 1.2.1 Metabolismus bei Ausdauerbelastungen (vgl. Dickhuth 2000 sowie Wilmore und Costill 1999)

Das grundlegende Substrat, aus dem jede Körperzelle Energie gewinnt, ist das Adenosintriphosphat (ATP). Bei der Spaltung von ATP zu Adenosindiphosphat (ADP) und einem Phosphatrest wird Energie frei, die die Muskelzelle zur Krafftentfaltung nutzen kann. ATP ist in begrenzter Menge in jeder Zelle vorhanden, reicht allerdings nur für wenige maximale Muskelkontraktionen. Es kann durch mehrere chemische Vorgänge resynthetisiert werden. Man unterscheidet anaerob (ohne Sauerstoffverbrauch) und aerob (unter Sauerstoffverbrauch) ablaufende Stoffwechselprozesse. Weiterhin differenziert man in anaerob-alaktazide und anaerob-laktazide Energiebereitstellung. Als anaerob-alaktazid bezeichnet man den durch die Kreatinkinase katalysierten Aufbau von ATP aus ADP und Kreatinphosphat (KP). Durch diese Reaktion kann innerhalb kurzer Zeit viel Energie bereitgestellt werden (hohe Energieflussrate). Allerdings sind auch die muskulären KP-Speicher begrenzt, so dass auf diesem Wege nur Energie für etwa 15 s Arbeit bereitgestellt werden kann. Eine geringere Energieflussrate, die aber länger aufrechterhalten werden kann, weist dagegen die anaerobe Glykolyse auf. Man versteht darunter den Abbau von Glukose über Pyruvat zu Milchsäure, welche zu Laktat und Wasserstoffionen dissoziiert. Durch den vermehrten Laktat- und somit auch Protonenanfall kommt es allerdings – bei unzureichender Pufferung – zu einem pH-Abfall und konsekutiver Hemmung der zur Energiegewinnung benötigten Enzyme, so dass die Belastung abgebrochen oder die Intensität verringert werden muss. Diese Form der Energiebereitstellung ist bei Belastungen von 10-90 s Dauer dominant.

Bei länger andauernder Körperarbeit muss die Intensität weiter verringert werden, so dass die sauerstoffverbrauchenden Stoffwechselwege genutzt werden können. Die Energiebereitstellung ist auf diesen Wegen langsamer (niedrigere Flussrate), allerdings stehen wesentlich mehr Vorräte an energiereichen Substraten zur Verfügung. Man unterscheidet bei den aeroben Prozessen zwischen der glykolytischen und der lipolytischen Energiebereitstellung. Dabei läuft die Glykolyse bis zur Stufe des Pyruvats identisch wie beim anaerob-laktaziden Prozess ab. Anstatt der Umwandlung in Laktat wird das Pyruvat nun allerdings in aktivierte Essigsäure (Acetyl-

CoA) umgesetzt und so in den Zitratzyklus und weiter in die Atmungskette eingeschleust. Das im menschlichen Körper gespeicherte Glykogen entspricht einem Energiegehalt von ca. 2.000 kcal (kalkuliert ohne Glukoneogenese), so dass für die aerobe Glykolyse ebenfalls nur ein begrenzter Energievorrat vorhanden ist. Bei maximalen Belastungen bis zu 150 Minuten Dauer ist diese Art der Energiebereitstellung dominant. Für längere Belastungen muss wiederum die Intensität reduziert werden, so dass die noch langsameren lipolytischen Stoffwechselprozesse vermehrt genutzt werden können. Es werden Fette in Form von Triglyceriden zu freien Fettsäuren (FFS) und Glycerin abgebaut. Die FFS werden durch die  $\beta$ -Oxidation zu Acetyl-CoA abgebaut und ebenfalls in Zitratzyklus und Atmungskette eingeschleust. Die Vorräte an Fetten im menschlichen Körper sind kurzfristig nahezu unerschöpflich (~ 70.000 kcal), so dass dynamische Arbeit bei relativ niedrigen Intensitäten, die hauptsächlich den Fettstoffwechsel beanspruchen, über lange Zeit aufrecht erhalten werden kann. In weit geringerem Ausmaß kann der menschliche Körper auch aus Eiweißen Energie gewinnen.

Die energieliefernden Prozesse laufen immer gleichzeitig ab. Wieviel der einzelne Stoffwechselweg zur Gesamtleistung beiträgt, hängt von der Höhe der zu erbringenden Leistung und der Dauer der Arbeit ab. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der einzelnen Stoffwechselprozesse, ihrer zeitlichen Verfügbarkeit und ihres Beitrags am Gesamtenergieumsatz.



**Abb.1: Beitrag der verschiedenen Formen der Energiebereitstellung bei maximaler Belastung in Abhängigkeit von der Belastungszeit (nähere Erläuterungen im Text; aus: Dickhuth 2000, S.183).**

### 1.2.2 Die Ausdauerleistungsfähigkeit

Im Radsport dauern die Wettkämpfe oft mehrere Stunden. Es werden hauptsächlich aerobe Stoffwechselwege beansprucht. Für die Trainingswissenschaft und die Sportmedizin war es daher sehr interessant, ein Maß für die Ausdauerleistungsfähigkeit zu entwickeln. Wichtig für die historische Entwicklung war die Erfindung der Spiroergometrie, also der Messung der Atemgase unter Belastung, sowie die Erkenntnis, dass bei intensiver körperlicher Arbeit im Muskel Laktat gebildet wird.

In den 1920er Jahren entwickelte der spätere Nobelpreisträger A.V. Hill das Konzept der maximalen Sauerstoffaufnahme (Hill und Lupton 1923). Danach existiert eine maximal ausschöpfbare aerobe Kapazität eines Organismus, die die individuelle Ausdauerleistungsfähigkeit begrenzt. In großen heterogenen Bevölkerungsgruppen erlaubt die  $\dot{V}O_2\text{max}$  eine gute Differenzierung zwischen ausdauerstarken und -schwachen Personen. In einer homogenen Gruppe kann es trotz relativ ähnlicher  $\dot{V}O_2\text{max}$  zu deutlichen Unterschieden in der Leistungsfähigkeit kommen, bzw. ähnliche Wettkampfleistungen können mit unterschiedlichen maximalen Sauerstoffaufnahmewerten erreicht werden (Barbeau et al. 1993, Coyle et al. 1988, Meyer et al.

2000, Noakes 1997, Noakes 1998). Weiterhin ist die Messung der  $\dot{V}O_2\text{max}$  vom Belastungsprotokoll und vom Grad der Ausbelastung abhängig, d.h. auch von der individuellen Motivation und Tagesform.

Es wurde daher versucht, Konzepte zu entwickeln, die anhand submaximaler Messungen verschiedener Parameter die Ausdauerleistungsfähigkeit besser beurteilen. Aus solchen Überlegungen entstanden eine Reihe sogenannter „Schwellenkonzepte“.

In den 1950er Jahren entwickelte Hollmann das Modell des „Punktes des optimalen Wirkungsgrades der Atmung“ (PoW; Hollmann 1959), der durch den ersten Anstieg des Atemäquivalents für Sauerstoff ( $\dot{A}\ddot{A}O_2$ ) während ansteigender Belastungen gekennzeichnet ist. Hollmann bezeichnete diese Schwelle auch als „ $O_2$ -Dauerleistungsgrenze“, als diejenige Intensität, die über längere Zeit (~ 90 min) durchgehalten werden kann. Wasserman (Wasserman und McIlroy 1964, Wasserman et al. 1973) entwickelte in den 1960er und 70er Jahren das ebenfalls auf spiroergometrischen Messungen beruhende analoge Konzept der „anaerobic threshold“ (anaerobe Schwelle), das den Punkt des ersten Laktatanstiegs markieren soll.

Hauptsächlich in Deutschland wurden Modelle entwickelt, die die Ausdauerleistungsfähigkeit anhand des submaximalen Verhaltens von Laktat beschreiben. Während kontinuierlich ansteigender Belastungen ist ein exponentieller Anstieg der Blutlaktatkonzentrationen zu beobachten. Mader et al. (1976) legten die aerob-anaerobe Schwelle bei einem fixen Laktatwert von  $4 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  hauptsächlich aus zwei Gründen fest: Erstens ist bei konstanten Belastungen, die in den ersten Belastungsminuten zu höheren Laktatwerten führen, ein kontinuierlicher weiterer Anstieg der Laktatkonzentration und daher ein früher Abbruch der Belastung zu beobachten. Und zweitens entspricht ein Laktatspiegel von ca.  $4 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  derjenigen Intensität, die als die Grenze des reinen Ausdauertrainings über längere Zeit im Ausdauersport gesehen wird.

In der Folge wurde allerdings beobachtet, dass diese über längere Zeit gerade noch erträglichen Laktatkonzentrationen interindividuell deutlich variierten und dass konstante Belastungen, die an der im Stufentest ermittelten  $4 \text{ mmol}$ -Schwelle durchgeführt wurden, zu deutlich höheren Azidosen und somit zu einem frühen Belastungsabbruch führten (z.B. Oyono-Enguelle et al. 1990, Stegmann und

Kindermann 1982). Danach wurde international eine Fülle von Schwellenkonzepten entwickelt (vgl. Heck 1991, S.108ff), die eine individualisierte Bestimmung der anaeroben Schwelle erlauben sollten. Manche Autoren versuchten dies durch Festlegung eines festen Tangentenwinkels an den ansteigenden Schenkel der Laktatleistungskurve (Keul et al. 1979, Simon et al. 1981) oder durch Addition eines fixen Wertes zur Basislaktatkonzentration (Dickhuth et al. 1988, Simon 1986). Stegmann et al. (1981) entwickelten eine Methode, die auch den Verlauf der Laktatkonzentration in der Erholungsphase nach Belastung berücksichtigt. Auf dieses Modell wird im Folgenden näher eingegangen.

Aufgrund der großen Anzahl an veröffentlichten Schwellenkonzepten, die größtenteils anaerobe Schwelle genannt wurden, entstand eine erhebliche begriffliche Verwirrung, die auch zu z.T. widersprüchlichen Studienergebnissen führte (zur Entwicklung und zur Vielfalt der Schwellenkonzepte siehe auch Coen (1997, S.7ff) und Heck (1991, S.108ff)). Ein Versuch diese begriffliche Verwirrung zu klären, unternahm Kindermann et al. (1979) mit der Einführung des „aerob-anaeroben Übergangs“. Mit Hilfe dieses Begriffs, der im Folgenden näher beschrieben wird, soll die in dieser Untersuchung verwendete Terminologie erläutert werden.

#### 1.2.2.1 Der aerob-anaerobe Übergang

Bei einer Analyse der verschiedenen Schwellenkonzepte kommt man zu dem Ergebnis, dass es sich im Grunde nahezu ausschließlich um zwei verschiedene Punkte handelt (Kindermann et al. 1979, McLellan 1987). Daher entwickelten Kindermann et al. (1979) das Konzept des „aerob-anaeroben Übergangs“. Dieser Bereich geht von der aeroben bis zur anaeroben Schwelle und bezeichnet den Übergang von nahezu rein aerobem Metabolismus zu vermehrtem anaeroben Stoffwechsel mit kontinuierlichem Laktatanstieg.

Als aerobe Schwelle (im Folgenden synonym auch als ventilatorische Schwelle =  $V_T$  bezeichnet) wird der erste Anstieg der Blutlaktatkonzentration über den Ruhewert bezeichnet. Diese entspricht dem PoW sowie der „anaeroben Schwelle“ nach Wasserman und ist somit auch respiratorisch über den ersten nichtlinearen Anstieg des Atemminutenvolumens ( $V_E$ ) im Verhältnis zur  $\dot{V}O_2$  zu ermitteln. Die aerobe Schwelle liegt je nach Leistungsstand zwischen 40 und 60% der  $\dot{V}O_{2max}$  (McLellan 1987).

Die obere Grenze des aerob-anaeroben Übergangs bildet die anaerobe Schwelle (im Folgenden als individuelle anaerobe Schwelle = IAS bezeichnet). Diese ist definiert als das maximale Blutlaktat-Steady-State (MaxLaSS), also diejenige Intensität, bei der Laktatproduktion und Laktatelimination gerade noch im Gleichgewicht stehen (Coen 1997, S.9; Heck 1991, S.15 und 23f). Dies bedeutet, dass nur geringfügig höhere Dauerbelastungen zu einer kontinuierlichen Laktatakkumulation und vorzeitigem Belastungsabbruch führen. Die anaerobe Schwelle liegt im Allgemeinen in einem Bereich von 70 bis 80% der  $\dot{V}O_2\text{max}$  (Coen 1997, S. 9).

### 1.2.2.2 Bestimmung des aerob-anaeroben Übergangs

#### *i. Bestimmung der aeroben Schwelle*

Aufgrund der natürlichen Schwankungen der Laktatkonzentrationen im Basisbereich ist es problematisch, den ersten Anstieg der Blutlaktatkonzentration über die im Stufentest ermittelte Laktatleistungskurve exakt zu bestimmen (Meyer et al. 2000). Bei genügend hoher zeitlicher Auflösung der Messwerte lässt sich der erste Laktatanstieg einfacher über die Analyse der Atemgase nach der von Wasserman und seinem Arbeitskreis eingeführten Methode bestimmen (Wasserman et al. 1973):

Bei rein aerober Energiegewinnung verhält sich die Menge des benötigten Sauerstoffs proportional zum anfallenden Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). Somit ergibt sich bei steigender Belastung eine lineare Beziehung zwischen diesen Größen. Die bei der anaeroben Glykolyse anfallende Milchsäure dissoziiert im Blut zu Laktat und Wasserstoffionen. Letztere werden vorwiegend durch Bicarbonat gepuffert, wobei Wasser und Kohlendioxid entstehen. Dieses zusätzlich anfallende „nicht metabolische“  $\text{CO}_2$  wird abgeatmet, so dass es mit dem ersten Anstieg der Blutlaktatkonzentration zu einem überproportionalen Anstieg der Kohlenstoffdioxidabgabe ( $\dot{V}\text{CO}_2$ ) – und aufgrund des zusätzlichen Atemstimulus auch des Atemminutenvolumens – im Verhältnis zur  $\dot{V}O_2$  kommt. Beaver et al. (1986) haben die V-slope-Methode entwickelt, die eben diesen „Knick“ im  $\dot{V}\text{CO}_2$ - $\dot{V}O_2$ -Graphen bestimmt. Diese Methode ist in Abbildung 2 veranschaulicht und wurde in der vorliegenden Arbeit zur Bestimmung der aeroben Schwelle benutzt.

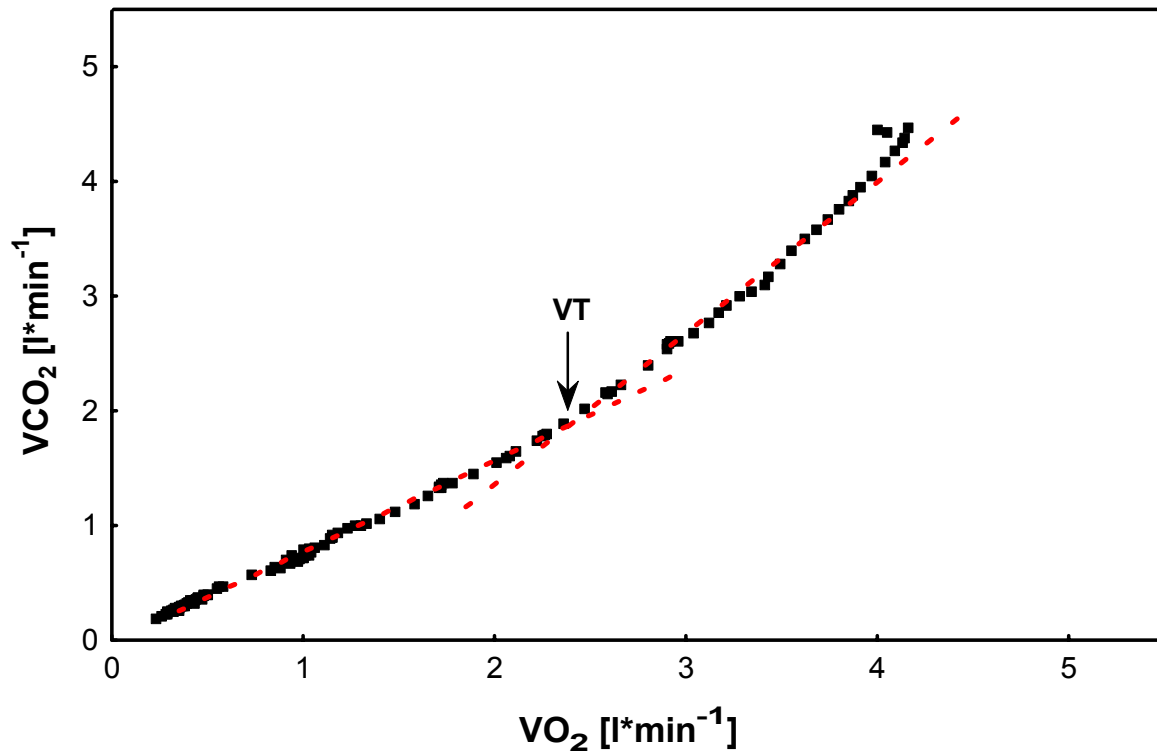


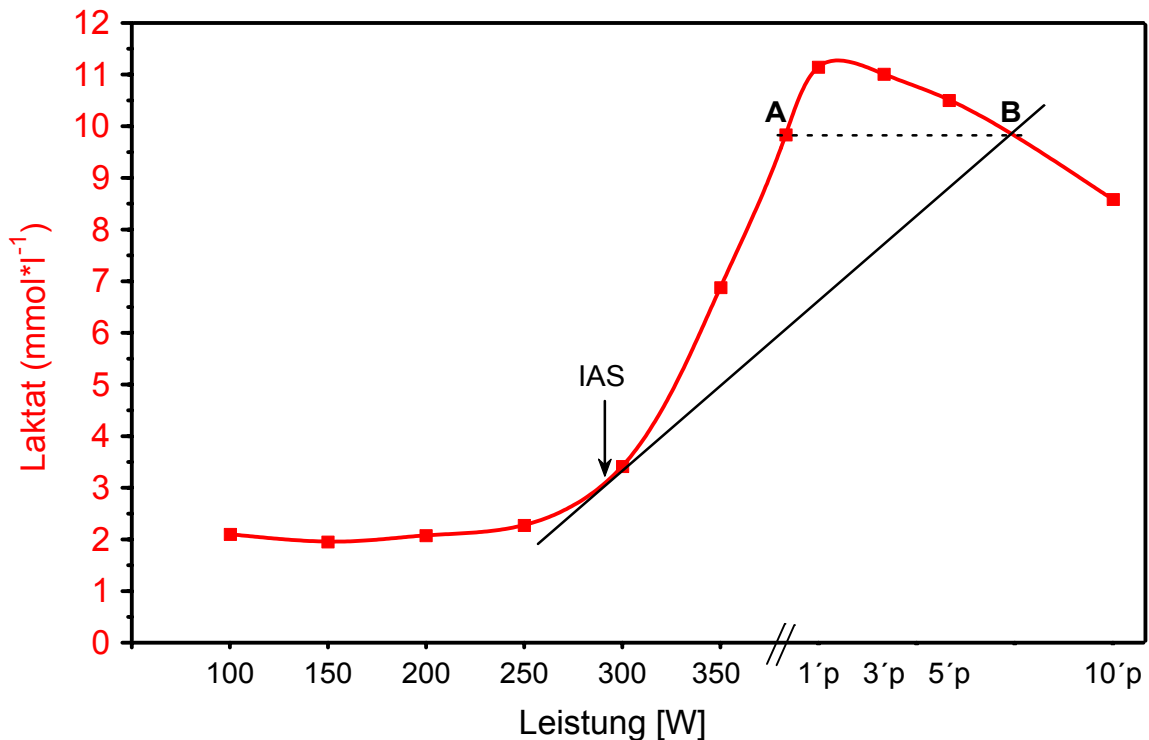
Abb.2: Bestimmung der ventilatorischen Schwelle (VT) mittels der V-slope-Methode nach Beaver et al. (1986). Die Bestimmung erfolgt durch Anlegen jeweils einer Regressionsgeraden für den unteren und oberen Teil des  $\dot{V}O_2$ - $\dot{V}CO_2$ -Graphen. Der Schnittpunkt markiert die VT.

## ii. Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle

Der Goldstandard zur Bestimmung des MaxLaSS sind mehrere konstante Belastungen unterschiedlicher Intensität mit Laktatmessungen (Heck 1991, S.23; Stockhausen et al. 1994, S. 73). Die höchste Belastungsintensität, bei der die Laktatkonzentration gerade noch konstant bleibt, entspricht dem MaxLaSS bzw. der IAS (Stegmann et al. 1981, Urhausen et al. 1993). Diese Methode ist allerdings sehr aufwendig und daher für die Praxis nicht relevant. Das Problem besteht darin, die IAS aus einem einfachen Routine-Belastungstest zu bestimmen.

In dieser Arbeit wird für diese Aufgabe die von Stegmann et al. (1981) konzipierte und in Abbildung 3 dargestellte Methode verwendet. Neben der Laktatleistungskurve wird auch der Laktatabbau in der Nachbelastungsphase zur Schwellenbestimmung berücksichtigt. Mit Hilfe dieses Modells kann das MaxLaSS in ausreichender Genauigkeit abgeschätzt werden (McLellan und Jacobs 1993, Urhausen et al. 1993).





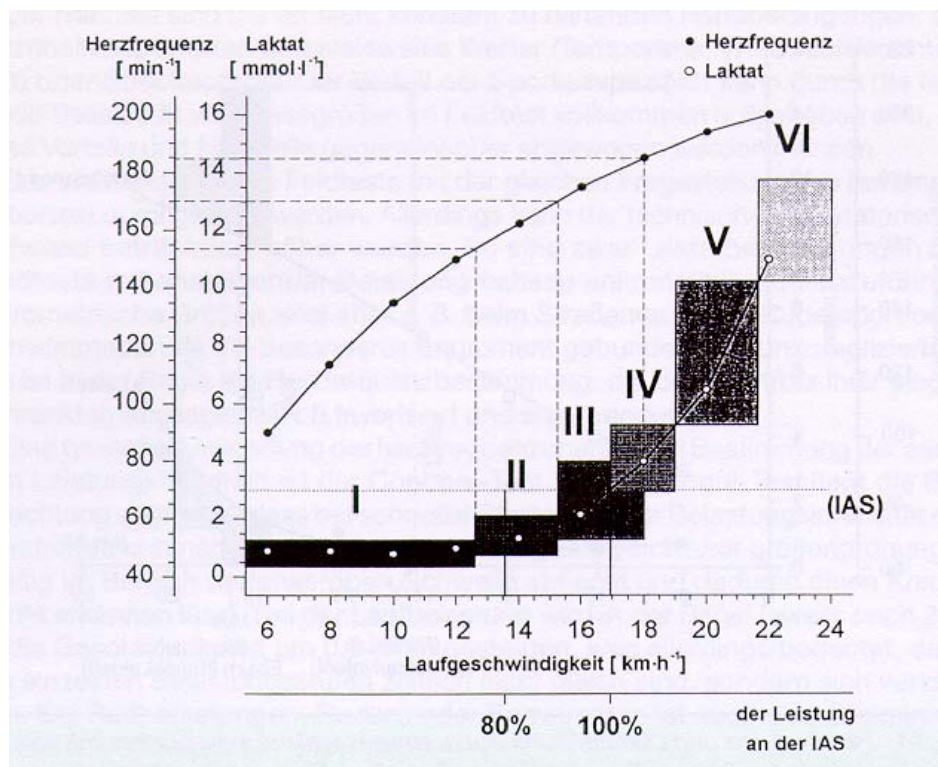
**Abb.3:** Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle (IAS) nach der von Stegmann et al. (1981) entwickelten Methode. Durch denjenigen Punkt (B) der Nachbelastungsphase, der dem Laktatwert bei Abbruch (A) entspricht, wird eine Tangente an die Laktatleistungskurve gelegt. Der Berührungspunkt zeigt die Leistungsfähigkeit an der IAS an.

### 1.2.3 Trainingssteuerung mit Hilfe des aerob-anaeroben Übergangs

Die Erfassung des Ist-Zustandes der Leistungsfähigkeit eines Sportlers, also eine Leistungsdiagnostik, sollte immer die Grundlage für die weitere Gestaltung des Trainings im Leistungssport sein, um die angestrebte Wettkampfleistung zu erreichen (Martin et al. 1993, S.261f; Zintl und Eisenhut 2001, S.158). Im Ausdauersport ist es von Bedeutung, die erwünschten Beanspruchungen für das Herz-Kreislauf-System und den Stoffwechsel im Training genau einzuhalten. Der aerob-anaerobe Übergang gibt nicht nur Auskunft über den aktuellen Leistungsstand des Sportlers, sondern er erlaubt darüber hinaus Intensitätsfestlegungen für das weitere Training.

Dickhuth entwickelte in seiner Arbeitsgruppe ein Modell, mittels dessen aus der Laktatleistungskurve und dem aerob-anaeroben Übergang gezielt Trainingsintensitäten und angestrebte Laktatbereiche für Läufer ermittelt werden können (Abbildung 4). Die aerobe Schwelle ist demnach ein Anhaltspunkt zur Steuerung von langsamen Dauerläufen bei Laktatkonzentrationen im Basisbereich. Die individuelle

anaerobe Schwelle hingegen entspricht der Intensität eines Tempodauerlaufs ( $\sim 4 \text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  Laktat). Höhere Intensitäten eignen sich zur Durchführung von Intervalltrainingsprogrammen und Tempoläufen. Coen hat den Nutzen der IAS zur Trainingssteuerung im Mittel- und Langstreckenlauf untersucht und entsprechende Trainingsempfehlungen erarbeitet (vgl. Coen et al. 1991 sowie Coen 1997, S.89f). Aufgrund der deutlich längeren Trainingszeiten im Radsport und der unterschiedlichen muskulären Beanspruchungen sind diese Prozentangaben allerdings nicht ohne weiteres zu übertragen.



**Abb.4:** Trainingsintensitäten und angestrebte Laktat- und Herzfrequenzbereiche abgeleitet aus einer Laufbandergometrie. Basis für die Vorgaben sind die IAS (100%) und die aerobe Schwelle (hier: 80% IAS). Intensitätskategorien: I = langsamer Dauerlauf; II = mittlerer Dauerlauf; III = Tempodauerlauf; IV = extensiver Tempolauf; V = intensiver Tempolauf; VI = hochintensiver Tempolauf (aus: Dickhuth 2000, S.208).

Nach Lucía et al. (2001) liefert die aerobe Schwelle die Intensität für lang andauerndes niedrig-intensives Radsporttraining, das ohne wesentlichen Anstieg des Blutlaktats über die Ruhewerte durchgeführt wird. Aufgrund der theoretischen Überlegungen zur ventilatorischen Schwelle und der oben für den Lauf beschriebenen Ableitungen wurden in dieser Untersuchung 70 und 80% der IAS sowie 100% der VT

als „Intensitätskandidaten“ für lang andauernde niedrig-intensive Trainingseinheiten im Radsport ausgewählt.

### **1.3 Ziel der Untersuchung**

Diese Untersuchung war der erste Teil einer über zwei Jahre angelegten Studie, in deren Verlauf der Einfluss einer Kohlenhydratsubstitution auf die physiologischen und immunologischen Reaktionen während vierstündiger Dauerbelastungen auf dem Fahrrad untersucht werden sollte.

Im Rahmen dieses Studienteils sollten drei Aspekte untersucht werden:

1. Vorrangiges Ziel war die Bestimmung einer individualisierten Basisintensität für den zweiten Studienteil bzw. für mehrstündiges Ausdauertraining, die auch ohne Substitution von Kohlenhydraten über vier Stunden durchgehalten werden kann. Die untersuchten Intensitäten wurden von den beschriebenen submaximalen Schwellen – der IAS und der VT – abgeleitet.
2. Weiterhin sollte ein kardiozirkulatorisches, metabolisches und ventilatorisches Profil derartiger Ausdauerbelastungen erstellt und eventuelle Unterschiede zwischen den Intensitäten herausgearbeitet werden.
3. Es sollten Anweisungen erarbeitet werden, die direkt in der Trainingspraxis im Radsport umgesetzt werden können.

Als Arbeitshypothesen dienten:

H<sub>1</sub>: Die ventilatorische Schwelle markiert eine interindividuell äquivalente Intensität für vierstündige Ausdauerbelastungen auf dem Fahrrad.

H<sub>2</sub>: Derartige Ausdauerbelastungen beanspruchen in großem Maße den Fettstoffwechsel.

## 2 Methodik

### 2.1 *Probandengut und allgemeines Design*

Die Durchführung der praktischen Arbeiten zur vorliegenden Arbeit fand von April bis Oktober 1999 statt. Die Laboruntersuchungen wurden im Institut für Sport- und Präventivmedizin der Universität des Saarlandes und die Feldtests auf der 400 m-Leichtathletikbahn des Landessportverbandes des Saarlandes in Saarbrücken durchgeführt. Die Probanden erhielten als Aufwandsentschädigung für die komplette Teilnahme an der Studie 300,- DM.

Insgesamt nahmen zwölf männliche, gut ausdauertrainierte Radfahrer (n=9) und Triathleten (n=3) an der Studie teil. Nachdem die Probanden schriftlich das Einverständnis zur Teilnahme an der Studie gegeben hatten, erhielten sie eine komplette sportmedizinische Gesundheitsuntersuchung bestehend aus einer Sport- und Gesundheitsanamnese, einer körperlichen Untersuchung, einer Echokardiographie, einer Blutuntersuchung sowie einem Ruhe- und Belastungs-EKG (während des fahrradergometrischen Stufentests). Aufnahmekriterium war eine Leistungsfähigkeit von mindestens  $3,0 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$  an der IAS.

Zuerst mussten alle Versuchspersonen in randomisierter Reihenfolge zwei Eingangstests auf dem Fahrradergometer absolvieren: einen Stufentest zur Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle nach Stegmann et al. (1981) sowie einen Rampentest zur Bestimmung der ventilatorischen Schwelle nach Wasserman et al. (1973).

Anschließend mussten alle Probanden drei vierstündige konstante Dauerbelastungen auf ihrem eigenen Fahrrad bei drei verschiedenen Intensitäten durchführen. Das Rad war jeweils mit einem portablen Leistungsmessgerät (SRM-System) ausgestattet. Die Testreihenfolge wurde wiederum randomisiert. Sowohl Eingangstests als auch die Dauerbelastungen erfolgten mit kontinuierlicher Spiroergometrie. Zwischen den Eingangstests musste mindestens ein Tag, zwischen den Dauertests mindestens zwei Tage liegen. Alle Tests sollten innerhalb von vier Wochen absolviert werden. Dies konnte in zwei Fällen nicht eingehalten werden. Die Ergebnisse dieser Tests zeigten allerdings keine vom generellen Trend abweichenden Ergebnisse. Eine Übersicht des Studiendesign ist in Abbildung 5 gegeben.

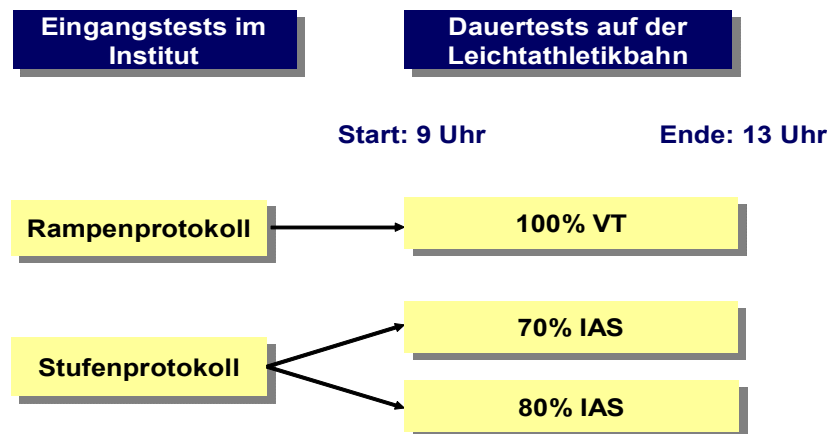


Abb.5: Überblick über das Design dieser Untersuchung (nähere Erläuterungen im Text).

## 2.2 *Eingangsuntersuchungen*

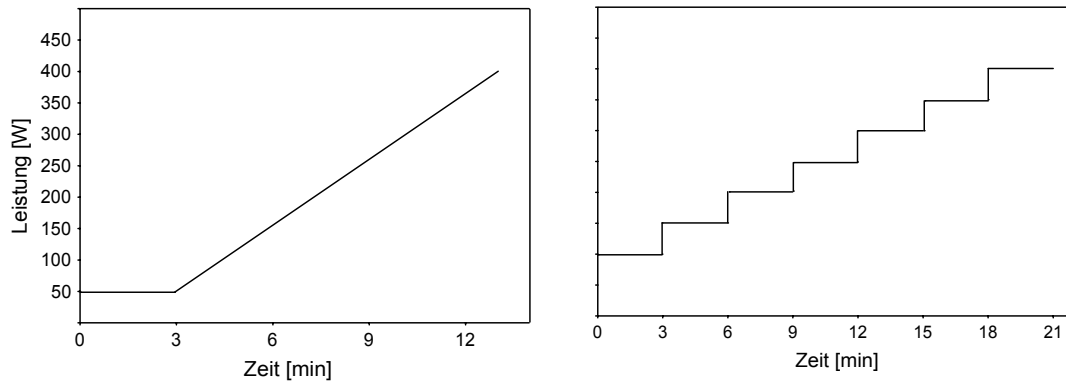
### 2.2.1 Stufentest

Zur Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle wurde ein stufenförmig ansteigendes Testprotokoll gewählt. Die Eingangsstufe lag bei 100 W. Alle drei Minuten wurde um 50 W gesteigert. Die Belastung dauerte bis zur subjektiven Erschöpfung. Die Herzfrequenz wurde mittels eines EKGs kontinuierlich gemessen und zum Ende jeder Stufe aufgezeichnet. Laktat wurde in Ruhe, zum Ende jeder Stufe, bei Abbruch sowie 1, 3, 5 und 10 Minuten nach Ende der Belastung gemessen. Aus der sich ergebenden Laktatleistungskurve wurde die IAS nach dem Modell von Stegmann et al. (1981; s. 1.2.2.2) von einem erfahrenen Untersucher zeichnerisch bestimmt. Die Laktatleistungskurve wurde auf Millimeterpapier aufgetragen, wobei 1 cm auf der y-Achse einem Laktatwert von  $1 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$  und 1 cm auf der x-Achse der Zeit von 1 min entsprach.

### 2.2.2 Rampentest

Zur Bestimmung spiroergometrischer Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit, insbesondere der ventilatorischen Schwelle, eignen sich am besten kontinuierlich ansteigende Belastungen, sogenannte Rampenprotokolle. Dadurch erhält man – im Gegensatz zu stufenweise ansteigenden Belastungen – einen stetigen Anstieg der

$\dot{V}O_2$  und  $\dot{V}CO_2$ , so dass eine präzisere Bestimmung des „Knickpunktes“ ermöglicht wird. In Abbildung 6 sind ein Rampen- und ein Stufenprotokoll, wie sie in dieser Untersuchung benutzt wurden, gegenübergestellt.



**Abb.6: Ein Rampen- (links) und ein Stufenprotokoll (rechts), wie sie in dieser Untersuchung verwendet wurden (nähere Erläuterungen im Text).**

Begonnen wurde mit einer dreiminütigen Aufwärmphase bei 50 W. Anschließend wurde die Leistung kontinuierlich bis zur subjektiven Erschöpfung gesteigert. Die Dauer des Anstiegs sollte ca. zehn Minuten betragen (Buchfuhrer et al. 1983). Daher wurde auf Grundlage des Körpergewichts und der Rennerfahrung die Steigung des Protokolls zwischen 30 und 40  $W \cdot \text{min}^{-1}$  gewählt<sup>1</sup>. Die Herzfrequenz wurde mittels eines Polar Sporttesters gemessen und minütlich aufgezeichnet. In Ruhe, nach 3 Minuten 50 W sowie im weiteren Verlauf minütlich bis zum Abbruch wurde auch Laktat gemessen.

Die ventilatorische Schwelle wurde mittels V-slope-Methode nach Beaver et al. (1986; s. 1.2.2.1) von zwei unabhängigen Untersuchern bestimmt. McLellan (1987) weist darauf hin, dass es bei der Bestimmung der VT zu falsch zu hohen Werten kommen kann, wenn anstatt des möglicherweise bei gut ausdauertrainierten Athleten verwischten ersten Anstiegs der zweite „Knick“ am respiratorischen Kompensationspunkt bestimmt wird. Daher wurde die Plausibilität der Bestimmung anhand der im Rampentest ermittelten Laktatwerte sowie des  $\dot{A}\ddot{O}_2$  überprüft.

<sup>1</sup> Bei einem Probanden betrug die Steigung 25  $W \cdot \text{min}^{-1}$ . Diese Belastung dauerte 12 min und führte nicht bis zur vollen Erschöpfung (Maximalwerte:  $La = 5,33$ ;  $HF = 173 \text{ min}^{-1}$ ;  $RQ = 1,03$ ;  $\dot{A}\ddot{O}_2 = 31,0$ ).

Bei einem rampenförmig ansteigenden Belastungsprotokoll eilt der Leistungsanstieg aufgrund der Zeitdauer des Gastransports zum Gewebe und zurück dem Anstieg der Sauerstoffaufnahme etwas voraus. Nach einem Modell von Davis et al. (1982) beträgt dieser Zeitunterschied nahezu konstant 45 Sekunden, so dass man zur Bestimmung der Leistung an der ventilatorischen Schwelle denjenigen Wert nehmen muss, der 45 Sekunden vor dem tatsächlichen Auftreten der VT liegt. Eine modifizierte Form dieses Modells ist in Abbildung 7 dargestellt.

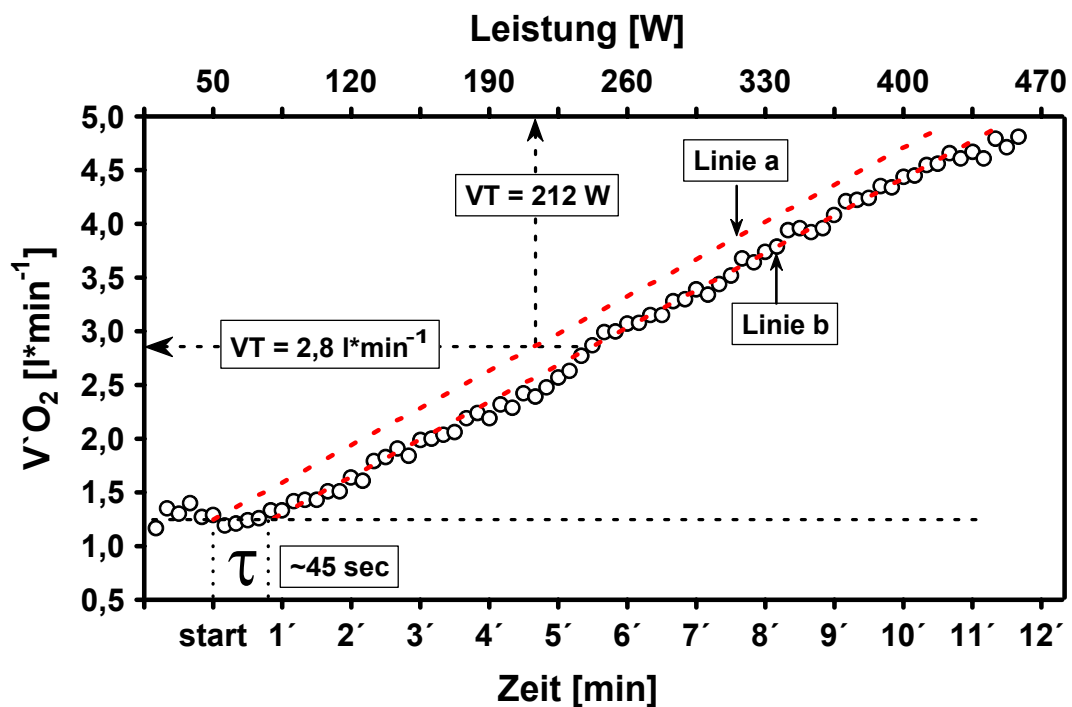


Abb.7: Modell zur Bestimmung der der ventilatorischen Schwelle (VT) entsprechenden Leistung aus einem Rampentest. Da der Leistungsanstieg dem Anstieg der  $\dot{V}O_2$  vorausseilt, muss zur VT-Leistungsbestimmung um  $\tau = 45$  s zurückgerechnet werden (parallel zur x-Achse von Linie b auf Linie a). In diesem Beispiel ergibt eine VT von  $2,8$  l\*min<sup>-1</sup> somit eine Leistung von 212 W. Modell modifiziert nach Davis et al. (1982).

### 2.3 Dauerbelastungen

Die vierstündigen Dauerbelastungen fanden auf einer 400 m-Tartanbahn von 9<sup>00</sup> bis 13<sup>00</sup> Uhr statt. Die Probanden benutzten ihr eigenes Fahrrad, das mit einem mobilen Ergometer (SRM-System) ausgestattet war. Hiermit ist eine kontinuierliche Erfassung der Leistung, der Herzfrequenz (mittels eines Polargurtes), der Trittfrequenz und der Geschwindigkeit möglich. Zusätzlich erfolgte eine stetige Messung von Atemgas-

parametern. Das Spiroergometriesystem war in einem Rucksack auf dem Rücken des Probanden befestigt. In Abbildung 8 ist eine komplett ausgestattete Versuchsperson zu sehen. Das gesamte Spiroergometriesystem (MetaMax I, Akku, Rucksack) wiegt 3 kg. Die metabolischen und kardiozirkulatorischen Reaktionen auf Belastung werden durch das Tragen nicht in relevantem Ausmaß beeinträchtigt (Coen et al. 1999, Reiser et al. 2000).

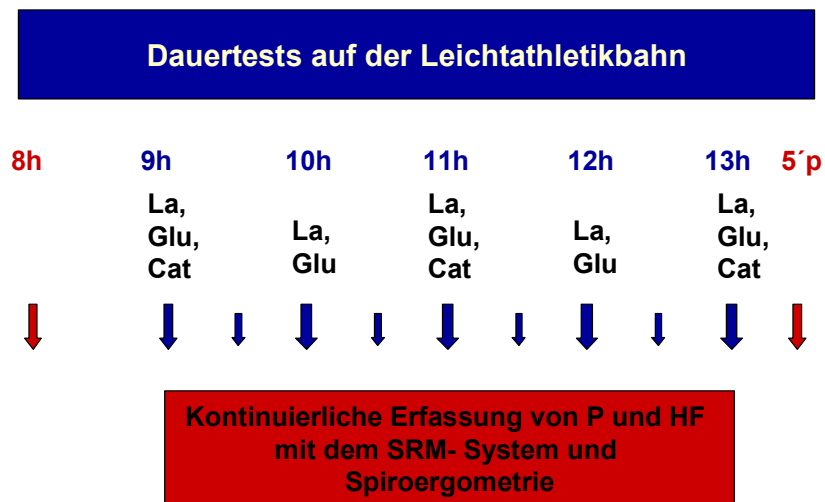


**Abb.8: Komplett ausgestattete Versuchsperson auf dem eigenen Fahrrad auf der 400 m-Bahn.**

Alle 30 Minuten konnten die Probanden kurz anhalten, um zu trinken. Die Trinkmenge war nicht vorgegeben, wurde aber mittels eines Messbechers genau gemessen und notiert. Die Umgebungstemperatur (im Schatten) wurde ebenfalls stündlich notiert. Vor Belastung, stündlich sowie bei Abbruch wurde aus dem Ohrläppchen kapillär Blut entnommen zur Bestimmung der Laktat- und der Glukosekonzentration. Vor Belastung, nach zwei Stunden und bei Abbruch wurde zusätzlich Kapillarblut entnommen zur Bestimmung der freien Katecholamine Adrenalin und Noradrenalin. Aufgrund der Pausen betrug die Gesamtfahrzeit nicht exakt vier Stunden. Um 8<sup>00</sup> Uhr und 5 Minuten nach Belastungsabbruch erfolgte eine venöse Blutentnahme zur Bestimmung der Blutkonzentrationen von Kortisol, freien Fettsäuren, Glycerin, Triglyceriden sowie des Hämoglobingehalts und des Hämatokrits. Die Probanden



erschieden zusätzlich an einem Kontrolltag zu den genannten Uhrzeiten für venöse Blutentnahmen. Der genaue Versuchsablauf einschließlich Blutentnahmen und Pausen ist in Abbildung 9 dargestellt.



**Abb.9:** Ablauf der Dauertests auf der Leichtathletikbahn. Die roten Pfeile markieren die venösen Blutentnahmen, die großen blauen Pfeile bezeichnen die Abnahmezeitpunkte für die kapillären Blutentnahmen und die kleinen blauen Pfeile markieren die Trinkpausen (nähere Erläuterungen im Text).

Alle Probanden wurden dazu angehalten, sich am Morgen vor den Dauerbelastungen und am Kontrolltag gleich zu ernähren sowie am Tag vorher nicht intensiv bzw. lang zu trainieren.

## 2.4 Messmethodik

### 2.4.1 Spiroergometrie

Alle Tests erfolgten mit kontinuierlicher Spiroergometrie. Es wurde das System MetaMax I (Cortex Biophysik, Leipzig, Deutschland) verwendet. Die Probanden atmeten durch eine Hans-Rudolph-Gesichtsmaske, auf die ein Mundstück mit einem Triple-V-Volumensensor zur Messung des Ausatemvolumens aufgesetzt wird. In einer Mischkammer (30 ml) wird Expirationsluft gesammelt und alle 10 Sekunden werden die Konzentrationen von Sauerstoff (Zirkoniumzelle) und Kohlendioxid (Infrarotmethode) gemessen. Gleichzeitig erfolgt eine Bestimmung der Temperatur- und

Luftdruckverhältnisse, um die gewonnenen Werte für  $\dot{V}O_2$  und  $\dot{V}CO_2$  auf standardisierte Normwerte umzurechnen. Anhand der Differenz zu den vor dem Test gemessenen Umgebungsluftkonzentrationen der beiden Gase sowie des Ventilationsvolumens können die  $\dot{V}O_2$  und  $\dot{V}CO_2$  sowie der RQ errechnet werden. Die Daten werden im Logger des Geräts gespeichert und können sowohl „Online“ dargestellt als auch zu einem späteren Zeitpunkt mit der zugehörigen Software ausgewertet werden.

Das System wurde regelmäßig nach Angaben des Herstellers mit Hilfe eines Kontrollgases (12,32%  $O_2$ ; 5,05%  $CO_2$ ) geeicht.

#### 2.4.2 EKG und Herzfrequenzmessung

Vor dem Stufentest wurde in Ruhe ein 12-Kanal-EKG (Brustwand- und Extremitätenableitungen; Recomed, Hellige, Freiburg, Deutschland) aufgezeichnet. Die Herzfrequenz wurde während des Stufentests aus dem mitgeschriebenen 6-Kanal-EKG bestimmt. In den Rampen- und Dauertests erfolgte die Herzfrequenzmessung mittels eines Pulsgurtes (Polar, Finnland) und des zugehörigen Empfängers.

#### 2.4.3 Laktat, Glukose

Die Blutentnahmen zur Bestimmung der Laktat- und Glukosekonzentrationen erfolgten aus dem mit Finalgon<sup>®</sup> forte hyperämisierten und mit Desinfektionsmittel gesäuberten Ohrläppchen. Dazu wurde eine 20  $\mu$ l end-to-end Kapillare mit einem Tropfen Blut gefüllt und in ein Töpfchen mit 1 ml Hämolyselösung entleert. Die Bestimmung erfolgte enzymatisch-amperometrisch (Super GL, Fa. Rolf Greiner Biochemica, Flacht, Deutschland).

#### 2.4.4 Katecholamine

Zur Bestimmung der freien Katecholamine Adrenalin und Noradrenalin wurde ebenfalls aus dem hyperämisierten Ohrläppchen Kapillarblut in eine 300  $\mu$ l Monovette entnommen. Die Proben wurden nach der Entnahme sofort auf Eis gelagert, zentrifugiert und bei  $-40^\circ\text{C}$  eingefroren. Die Bestimmung erfolgte radioenzymatisch aus dem Plasma, wobei sämtliche Proben einer Versuchsperson in einem Versuchsansatz gemessen wurden.

#### 2.4.5 Venöse Blutentnahmen

Die Bestimmung von Hämatokrit und Hämoglobingehalt erfolgte aus dem Plasma mittels eines Coulter-Counter-Systems (Sysmex Microcellcounter, Modell K-1000, Medical Electronics, Japan).

Die Konzentrationen von Kortisol, Triglyceriden, Glycerin und freien Fettsäuren wurden im Serum bestimmt. Dieses wurde nach den Tests bei  $-25^{\circ}\text{C}$  eingefroren. Alle Proben eines Probanden wurden auch hier in einem Versuchsansatz gemessen. Kortisol wurde mittels Chemolumineszenz bestimmt. Die Bestimmung der Glycerin- bzw. der Triglyceridkonzentrationen erfolgte mittels eines enzymatischen UV-Tests mit dem halbautomatischen Vitalab 100S (Fa. Merck, Darmstadt, Deutschland) bzw. mit einem enzymatischen Farbttest (GPO-PAP) vollautomatisch (Vitalab-Selectra, Fa. Merck, Darmstadt, Deutschland). Die Konzentration der FFS wurde mit dem Photometer 1101M (Fa. Eppendorf, Saarbrücken, Deutschland) gemessen.

#### 2.4.6 Fahrradergometer

##### *i. Lode-Ergometer:*

Die Eingangsuntersuchungen wurden im Sitzen auf einem elektronisch gebremsten, drehzahlunabhängigen Ergometer der Firma Lode (Excalibur Supersport, Groningen, Niederlande) durchgeführt. Das Ergometer verfügt über einen Rennlenker und einen Rennsattel. Die Probanden stellten das Ergometer auf ihre individuellen Gegebenheiten ein und benutzten ihre eigenen Pedalen.

##### *ii. SRM-System:*

Zur Intensitätskontrolle während der vierstündigen Dauerbelastungen wurde an das probandeneigene Rad ein mobiles Ergometer (SRM-System, Professional Version; Schoberer Radmesstechnik, Jülich-Welldorf, Deutschland) angebracht. Hiermit ist eine kontinuierliche Erfassung der Leistung, der Geschwindigkeit, der Herzfrequenz und der Trittfrequenz möglich. Die auf das Pedal ausgeübte Kraft wird über in der Kurbel montierte Dehnmessstreifen erfasst. Somit gehen ungünstige Bedingungen, z.B. Gegenwind, rauhe Bodenbeschaffenheit oder niedriger Reifendruck, direkt in die Messung ein und können die Ergebnisse nicht verfälschen. Zusammen mit der Trittschwindigkeit kann die erbrachte physikalische Leistung (= Drehmoment x Winkel-

geschwindigkeit) errechnet und in einem am Lenker angebrachten Computer gespeichert und auf einem Display angezeigt werden. Die gespeicherten Daten können im Nachhinein mittels der zugehörigen Software am PC gelesen und ausgewertet werden. Die Vergleichbarkeit der Leistungsanzeige der beiden hier eingesetzten Ergometer wurde in einer Untersuchung von (Reiser et al. 2000) physiologisch über das Verhalten von Herzfrequenz und  $\dot{V}O_2$  bestätigt.

#### 2.4.7 Weitere Messmethoden

In Ruhe sowie auf jeder Belastungsstufe bis 250 W während des Stufentests wurde der Blutdruck nach Riva-Rocci ermittelt. Der Körperfettgehalt wurde über die Messung der Hautfaltendicke mit einer Caliperzange nach der 10-Punkt-Methode vorgenommen (Parizkova und Buzkova 1971). Die Bestimmung der Herzgröße erfolgte mittels 1- bzw. 2-dimensionaler Echokardiographie (Dickhuth et al. 1983).

### 2.5 **Statistik und Berechnungen**

Als  $\dot{V}O_{2max}$  wurde der Mittelwert der drei höchsten aufeinanderfolgenden Werte im höheren der beiden Eingangstests genommen.

Die kontinuierlich während der Dauertests gemessenen Parameter ( $\dot{V}O_2$ ,  $V_E$ , RQ, P, HF) wurden unter Ausschluss möglicher Artefakte (visuelle Bewertung) halbstündlich gemittelt.

Aus dem RQ wurde unter Zuhilfenahme der Umrechnungstabelle von Stegemann (1984, S.60) ein Algorithmus zur Bestimmung des zugehörigen kalorischen Äquivalents (in  $\text{kJ} \cdot \text{l}^{-1}$ ) abgeleitet:

$$\rightarrow k\ddot{A} = 19,586 + 5,15 (RQ - 0,7).$$

Somit konnte der halbstündliche Energieverbrauch (in kJ) über die Formel

$$\rightarrow E = k\ddot{A} * \dot{V}O_2 * 30min \text{ ermittelt werden.}$$

Der anteilige Fettverbrauch ergab sich aus der Formel

$$\rightarrow \%Fett = 468,6 (1 - RQ) / (5,047 (RQ - 0,707) + 4,686 (1 - RQ)) \text{ (Geigy 1960).}$$

Die mathematischen und statistischen Berechnungen erfolgten computergestützt mit dem Programm Statistica (Version 5, Edition '97).

Alle intervallskalierten Daten sind als Mittelwerte und Standardabweichungen (MW  $\pm$  SD) dargestellt. Die meisten Variablen waren normalverteilt (Kolmogoroff-Smirnov-Test), so dass für die statistische Auswertung parametrische Testverfahren zur Anwendung kamen. Unterschiede zwischen den verschiedenen Intensitäten bzw. Veränderungen über die Zeit wurden mittels zweifaktorieller ANOVA mit den Faktoren Intensität x Zeitpunkt getestet. Bei signifikanten Effekten wurden post-hoc detaillierte Berechnungen mittels Scheffé-Test durchgeführt. Unterschiede in den Testbedingungen für die Intensitäten wurden mit einem gepaarten t-Test geprüft. Signifikante Unterschiede hinsichtlich der Anzahl der Abbrüche wurden mit dem Cochran's Q-Test ermittelt.

Das  $\alpha$ -Signifikanzniveau wurde auf  $p < 0,05$  gesetzt. Bei einem Wert von  $0,05 \leq p < 0,10$  wird von einem tendenziellen Verhalten ausgegangen.

Im Folgenden bedeuten:

+	$p < 0,05$	signifikant
++	$p < 0,01$	hoch signifikant

### 3 Ergebnisse

#### *Probandengut*

Alle Probanden waren körperlich gesund, so dass aus medizinischer Sicht nichts gegen eine Teilnahme an der Studie sprach. In den Tabellen 1 (Anthropometrie und Trainingsanamnese) und 2 (Leistungsphysiologie) ist eine Beschreibung des Probandenguts gegeben.

**Tab.1 Anthropometrische und trainingsanamnestische Daten der Versuchspersonen (HV = Herzvolumen; KF = Körperfettgehalt).**

	<b>Alter</b> [Jahre]	<b>Größe</b> [cm]	<b>Gewicht</b> [kg]	<b>HV</b> [ml*kg <sup>-1</sup> ]	<b>KF</b> [%]	<b>Trainings- umfang</b> [Stunden pro Woche]	<b>Trainings- alter</b> [Jahre]
<b>MW</b>	<b>25,8</b>	<b>178,9</b>	<b>70,7</b>	<b>13,9</b>	<b>11,6</b>	<b>10,8</b>	<b>6,5</b>
<b>± SD</b>	<b>± 6,9</b>	<b>± 5,1</b>	<b>± 5,1</b>	<b>± 1,6</b>	<b>± 3,8</b>	<b>± 3,2</b>	<b>± 3,3</b>

**Tab.2 Leistungsphysiologische Ergebnisse der Eingangsuntersuchungen.**

	<b>P<sub>max</sub></b> [W]	<b>HF<sub>max</sub></b> [min <sup>-1</sup> ]	<b>VO<sub>2</sub>max</b> [l*min <sup>-1</sup> ]	<b>VO<sub>2</sub>max</b> [ml*min <sup>-1</sup> *kg <sup>-1</sup> ]	<b>VT</b> [l*min <sup>-1</sup> ]	<b>IAS</b> [W]	<b>IAS</b> [W*kg <sup>-1</sup> ]
<b>MW</b>	<b>365</b>	<b>191</b>	<b>4,62</b>	<b>65,6</b>	<b>2,47</b>	<b>261</b>	<b>3,71</b>
<b>± SD</b>	<b>± 35</b>	<b>± 12</b>	<b>± 0,39</b>	<b>± 5,8</b>	<b>± 0,31</b>	<b>± 32</b>	<b>± 0,48</b>

- **Dauertests**

Die Leistungen bei 70%, 80% IAS und 100% VT betragen im Durchschnitt  $183 \pm 22$ ,  $206 \pm 15$  bzw.  $185 \pm 27$  W. Dabei entsprach die ventilatorische Schwelle  $71 \pm 5\%$  der IAS (Streuung von 64 bis 79%). Bei vier Probanden unterschieden sich die Intensitäten an der VT und bei 70% IAS um weniger als 3 W, so dass in Anbetracht der Messgenauigkeit des SRM-Systems ( $\pm 2\%$ , ergo ca. 4 W) nur eine Fahrt durchgeführt wurde. In Tabelle 3 sind die gefahrenen Intensitäten in Prozent der maximalen Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme sowie relativ zur Herzfrequenz an der IAS ausgedrückt.

**Tab.3 Die während der Dauertests gefahrenen Intensitäten, ausgedrückt in Prozent der maximalen Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme sowie der Herzfrequenz an der IAS, jeweils als Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung sowie als Minimum und Maximum.**

		70% IAS	80% IAS	100% VT
% HF <sub>max</sub>	MW $\pm$ SD	72 $\pm$ 5	78 $\pm$ 8	73 $\pm$ 6
	Min - Max	63 - 78	64 - 86	63 - 81
% V $\dot{O}_2$ max	MW $\pm$ SD	59 $\pm$ 6	66 $\pm$ 6	60 $\pm$ 5
	Min - Max	53 - 74	57 - 75	51 - 67
% HF <sub>IAS</sub>	MW $\pm$ SD	82 $\pm$ 4	91 $\pm$ 6	84 $\pm$ 7
	Min - Max	77 - 88	84 - 100	74 - 93

Die Bedingungen, unter denen die Feldtests stattfanden, unterschieden sich nicht für die verschiedenen Intensitäten (Tabelle 4).

**Tab.4 Trinkmenge, Gesamtpausendauer und Umgebungstemperaturen während der Dauertests (MW  $\pm$  SD). Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Intensitäten.**

	70% IAS	80% IAS	100% VT
Trinkmenge [ml]	1783 $\pm$ 952	2150 $\pm$ 1325	1853 $\pm$ 898
Pausendauer [min]	19,6 $\pm$ 3,6	21,9 $\pm$ 6,0	21,4 $\pm$ 4,3
Temperatur [°C]	18,3 $\pm$ 3,0	20,3 $\pm$ 1,8	19,4 $\pm$ 2,2

### 3.1.1 Durchhaltbarkeit

Von den ersten 7 Probanden konnten nur 2 die Belastung bei 80% IAS bis zum Ende durchhalten. Daher kam diese Intensität nicht mehr als Basisintensität für den

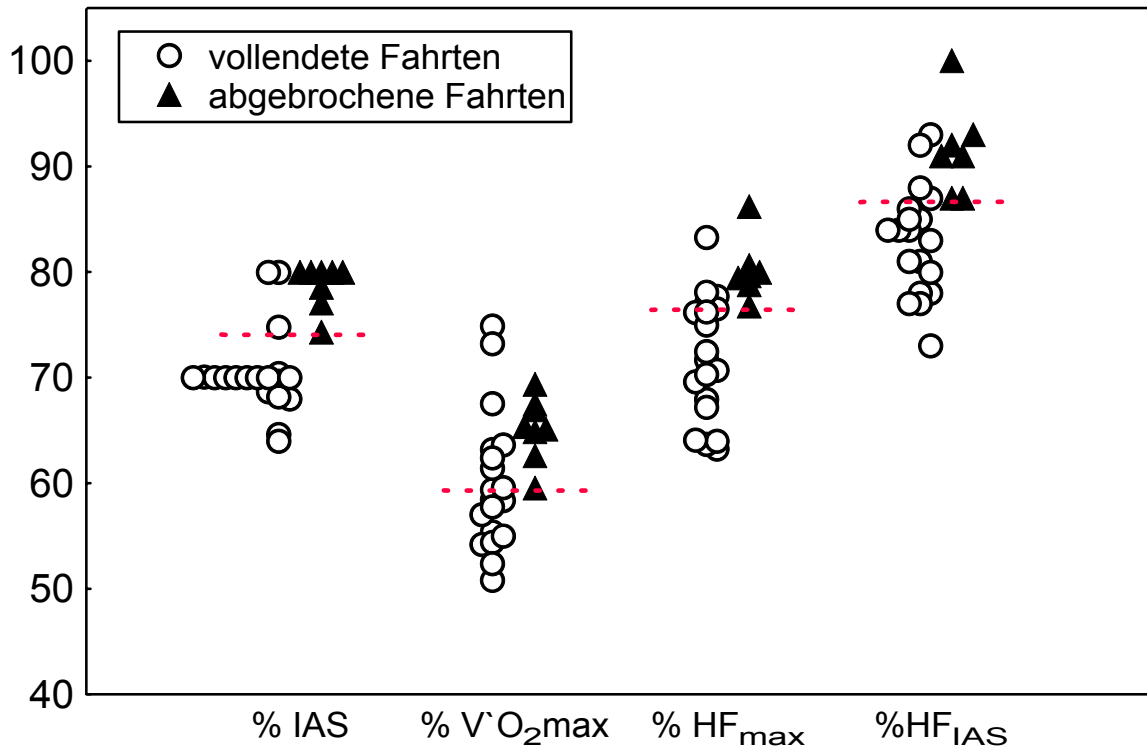
zweiten Studienteil bzw. mehrstündiges Ausdauertraining in Frage und wurde aus ökonomischen Gründen nicht weiter untersucht. Die Belastung an der ventilatorischen Schwelle musste in 3 von 12 Fällen vorzeitig abgebrochen werden, während bei 70% IAS alle Fahrten vollendet werden konnten (Tabelle 5).

**Tab.5 Anzahl und Zeitpunkte der Abbrüche für die verschiedenen Intensitäten. Es gab signifikant mehr Abbrüche für 80% IAS als für 70% IAS ( $p < 0,05$ ), wobei für 100% VT nur ein Trend in diese Richtung zu erkennen war ( $p = 0,08$ ).**

	70% IAS	80% IAS	100% VT
<b>Anzahl</b>	---	5 (von 7)	3 (von 12)
<b>Zeitpunkt [min]</b>	---	168, 171, 177, 206, 230	193, 198, 205

Abbildung 10 zeigt einen Vergleich zwischen vorzeitig abgebrochenen und vollendeten Fahrten im Verhältnis zur IAS,  $\dot{V}O_2\text{max}$ ,  $HF_{\text{max}}$  und zur  $HF_{\text{IAS}}$ . Die Fahrten bei 100% VT, die abgebrochen werden mussten, lagen bei 74, 77 und 79% IAS und gehörten somit zu den höchsten Intensitäten, wenn diese in Prozent der IAS ausgedrückt werden. Unter 74% IAS konnten alle Fahrten über vier Stunden durchgehalten werden, darüber waren es nur drei Fahrten. Somit kann in Relation zur IAS eine Grenze gezogen werden, über der die Wahrscheinlichkeit, dass die Leistung durchgehalten werden kann, sehr gering ist. Dies ist deutlich schwerer, wenn die Intensitäten in Prozent der  $\dot{V}O_2\text{max}$  angegeben werden. Die abgebrochenen Fahrten lagen zwischen 60 und 69%  $\dot{V}O_2\text{max}$ . Über 60%  $\dot{V}O_2\text{max}$  konnten immerhin noch 9 Tests beendet werden. Wenn die Intensitäten in Prozent  $HF_{\text{max}}$  ausgedrückt werden, liegt diese Grenzlinie bei 77%  $HF_{\text{max}}$ . Darüber konnten nur noch vier Fahrten vollendet werden. Angaben in Prozent der Herzfrequenz an der IAS lassen ebenfalls eine gute Differenzierung zwischen durchhaltbaren und zu hohen Intensitäten zu. Nur drei Fahrten, die über 87%  $HF_{\text{IAS}}$  lagen, konnten durchgehalten werden.

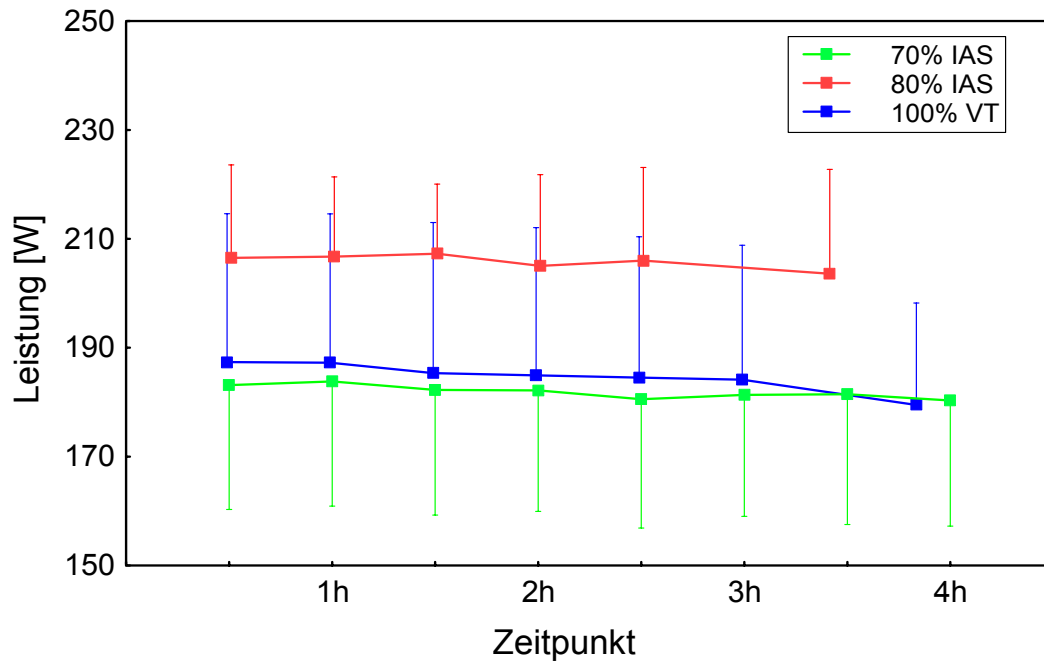




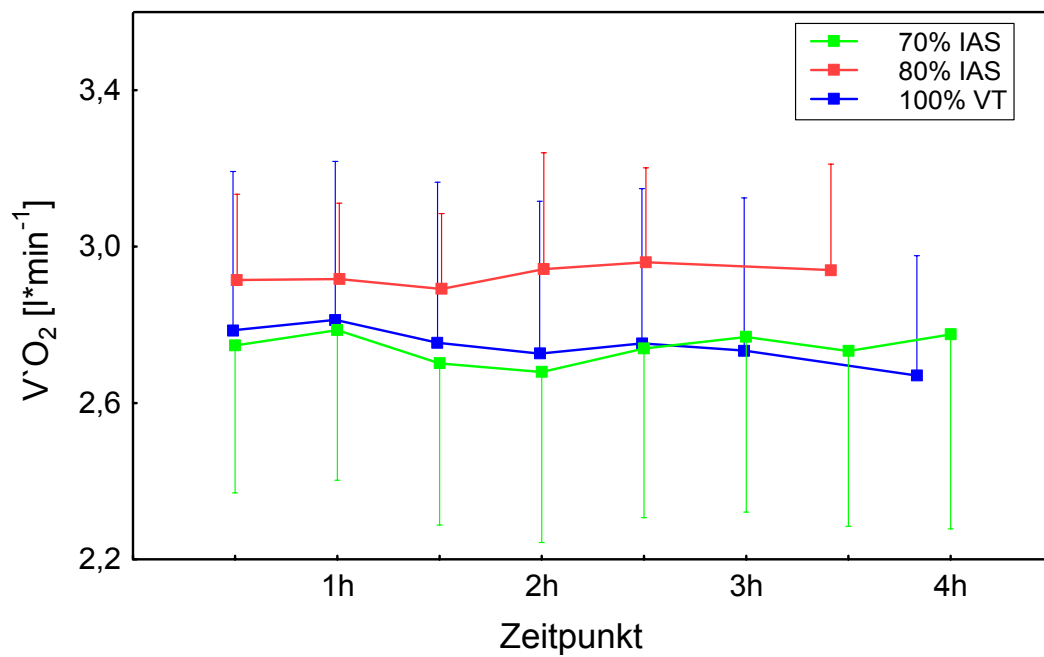
**Abb.10:** Abgebrochene (Dreiecke) und vollendete Fahrten (Kreise) ausgedrückt in Relation zur IAS, V'O<sub>2</sub>max, HF<sub>max</sub> und zur HF<sub>IAS</sub>. Die roten gestrichelten Linien markieren jeweils die Intensität, unter der alle Fahrten durchgehalten werden konnten (nähere Erläuterungen im Text).

### 3.1.2 Leistungsphysiologie, Hämatologie und Hormone

Abbildung 11 gibt die gemittelten SRM-Leistungsmessungen für die verschiedenen Intensitäten wieder. Die erbrachte physikalische Leistung spiegelt sich im Verhalten von V'O<sub>2</sub> und V<sub>E</sub> wieder (Abbildung 12 und 13). Die Laktatkonzentrationen blieben bei allen Fahrten im Bereich der Ruhekonzentrationen (Abbildung 14). Für die Herzfrequenz zeigte sich ein signifikanter Anstieg ab der zweiten Belastungsstunde (Abbildung 15).



**Abb.11: Gemittelte SRM-Leistungsmessung während der Dauerbelastungen. 80% IAS lag hochsignifikant höher als 70% IAS und 100% VT ( $p < 0,01$ ).**



**Abb.12: Sauerstoffaufnahme während der Dauerbelastungen. 80% und 70% IAS unterschieden sich hochsignifikant, während für 80% IAS und 100% VT nur ein solcher Trend zu erkennen war ( $p = 0,09$ ).**

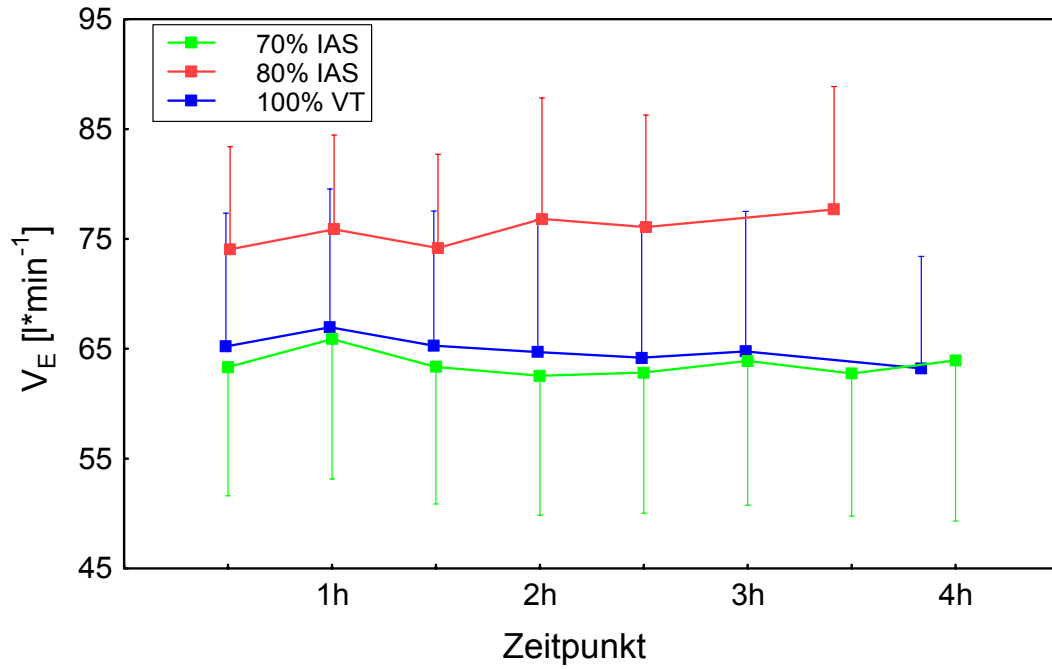


Abb.13: Atemminutenvolumen während der Dauerbelastungen. 80% IAS lag signifikant höher als 70% IAS ( $p < 0,01$ ) und 100% VT ( $p < 0,05$ ).

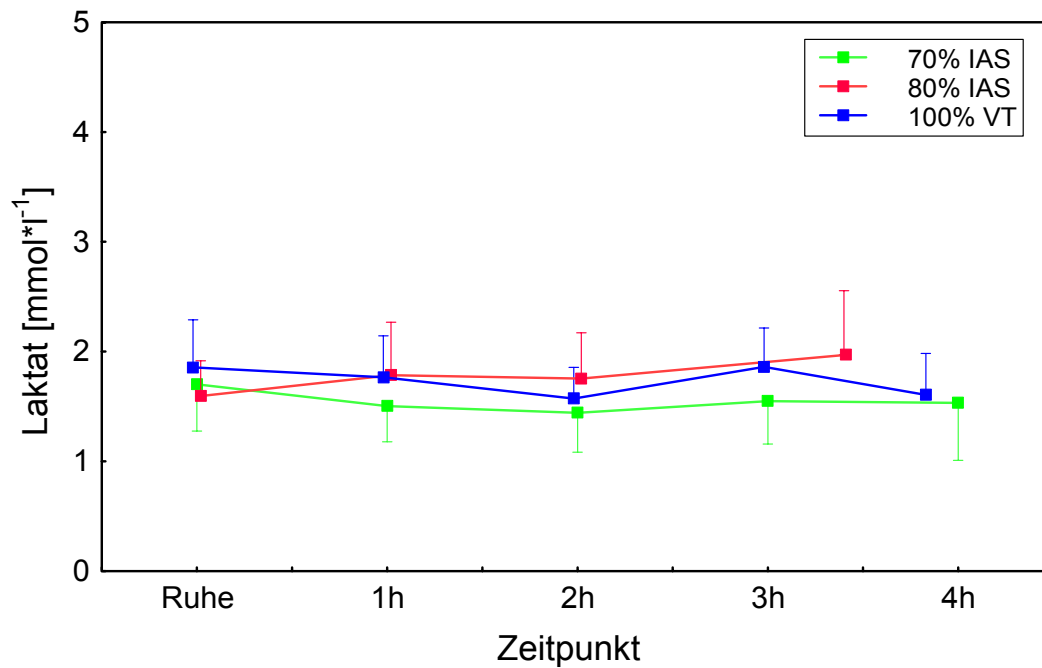
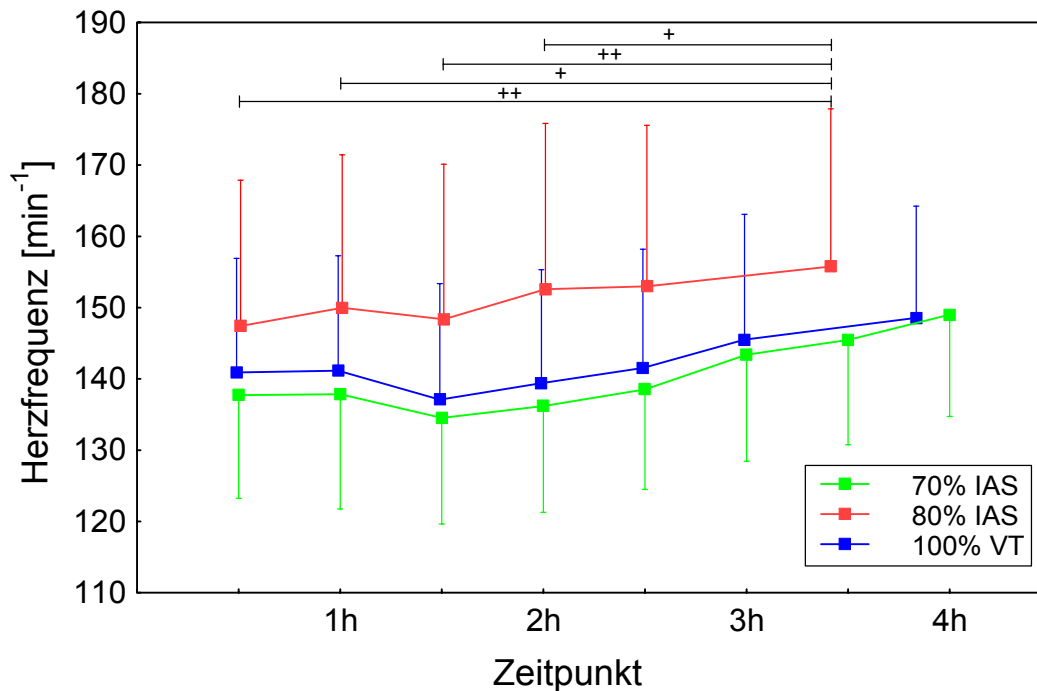


Abb.14: Laktatverhalten während der Dauerbelastungen. Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Intensitäten.



**Abb.15: Herzfrequenzverhalten während der Dauerbelastungen. 80% IAS lag signifikant höher als 70% IAS ( $p < 0,05$ ). Die Abbruchwerte unterschieden sich signifikant von den Messungen der ersten zwei Stunden.**

Für alle Intensitäten zeigte sich im Vergleich zum Kontrolltag ein belastungsinduzierter Anstieg des Hämatokrits und der Hämoglobinkonzentrationen (Abbildung 16). Die freien Katecholamine stiegen linear auf ca. das Doppelte des Ausgangswertes an (Abbildung 17). Die Serumkonzentrationen von Kortisol zeigten absolut nur einen leichten Anstieg. Im Vergleich zum Kontrolltag lagen die Konzentrationen bei Abbruch allerdings deutlich höher (Abbildung 18). Dies ist durch die circadiane Rhythmik der Kortisolfreisetzung mit Höchstwerten am frühen Morgen und dem Tiefpunkt am späten Abend zu erklären (Silbernagl und Despopoulos 1991, S.261). Somit kam es relativ zu einem belastungsinduzierten Anstieg der Kortisolkonzentrationen, der für 80% der IAS am deutlichsten ausfiel.

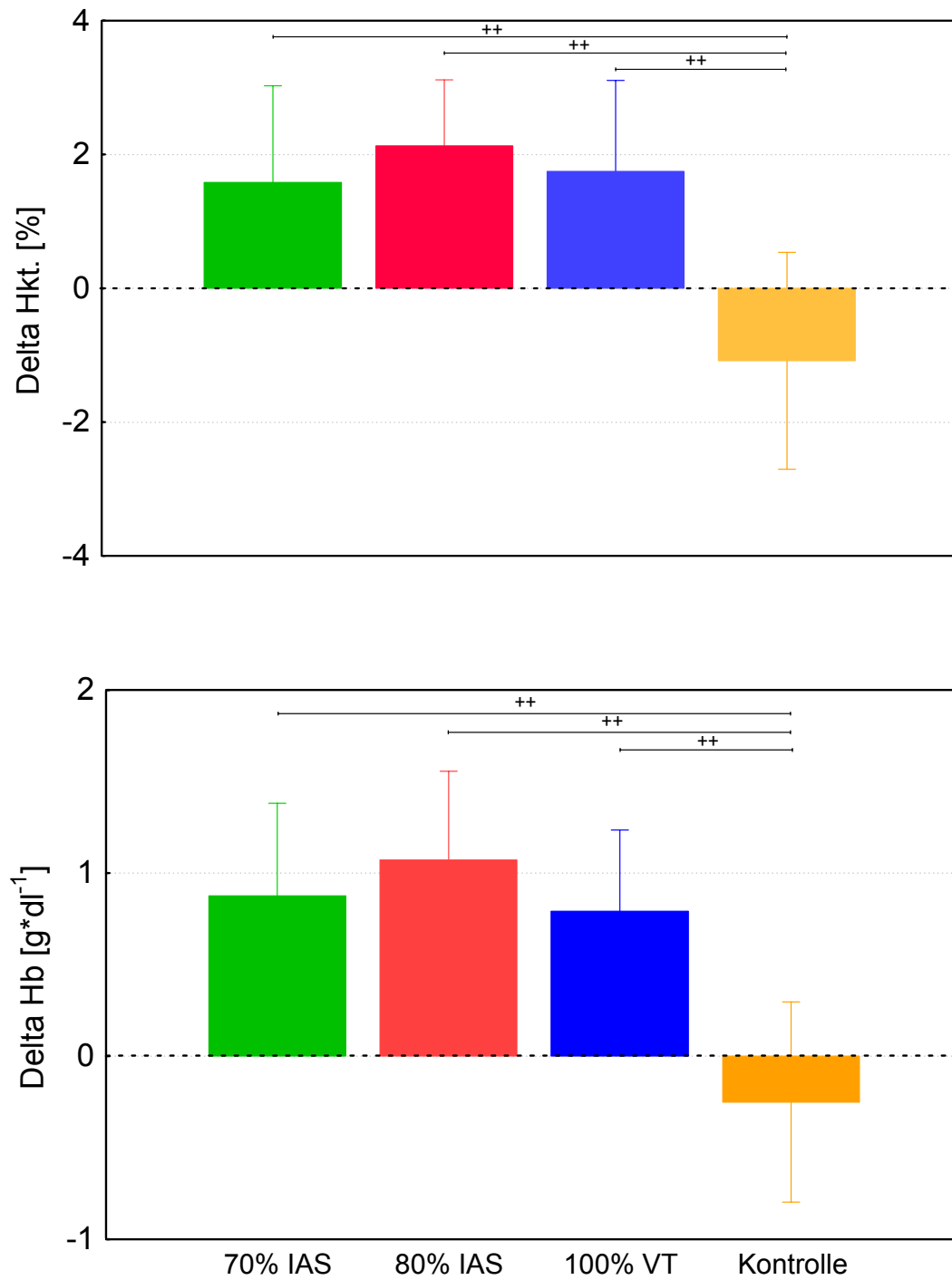


Abb.16: Differenzen des Hämatokrits (Delta Hkt., oben) sowie der Hämoglobinkonzentration (Delta Hb, unten) nach und vor Belastung für die verschiedenen Intensitäten sowie am Kontrolltag. Die belastungsinduzierten Anstiege waren hochsignifikant ( $p < 0,01$  für alle Intensitäten).

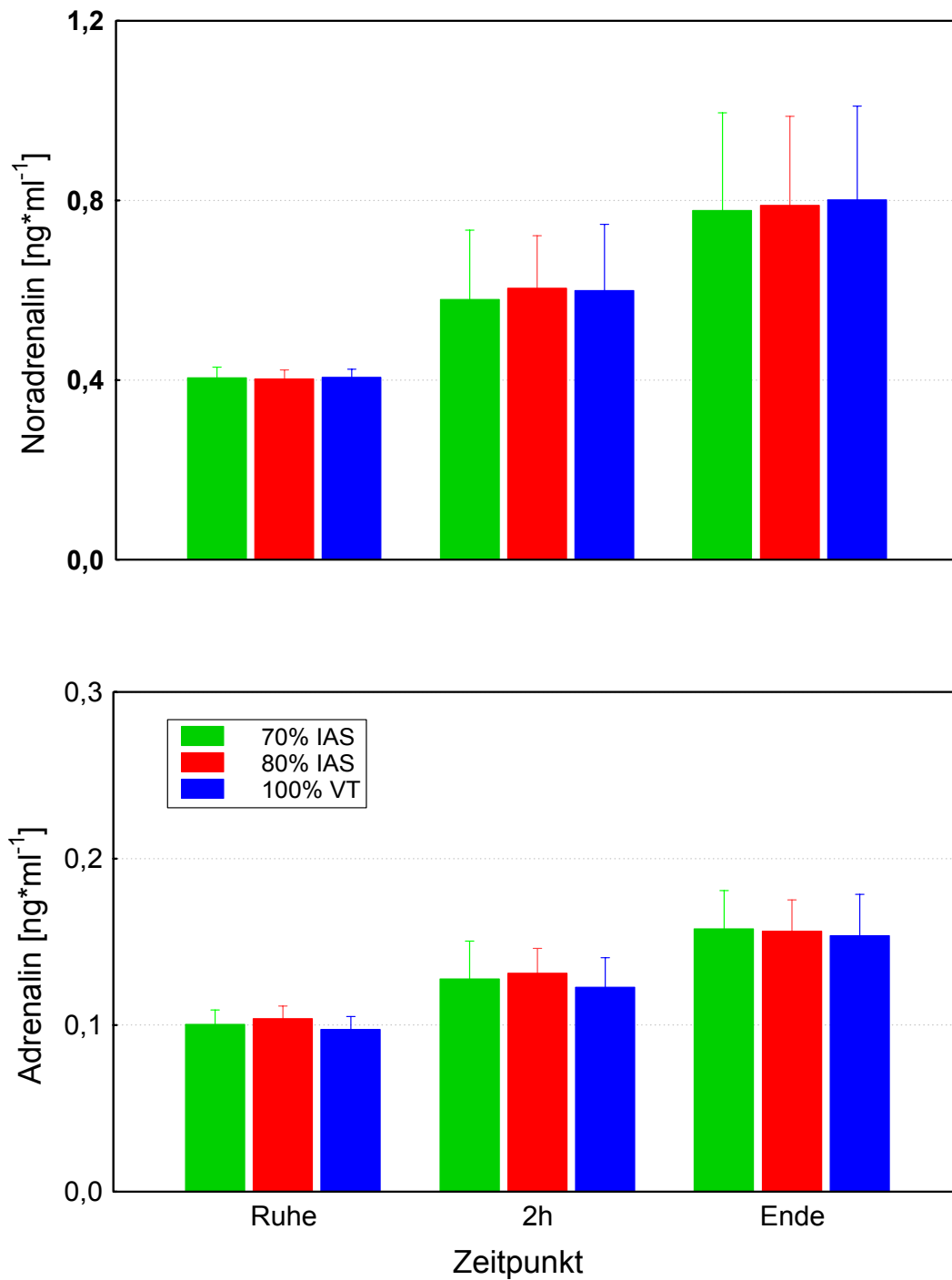
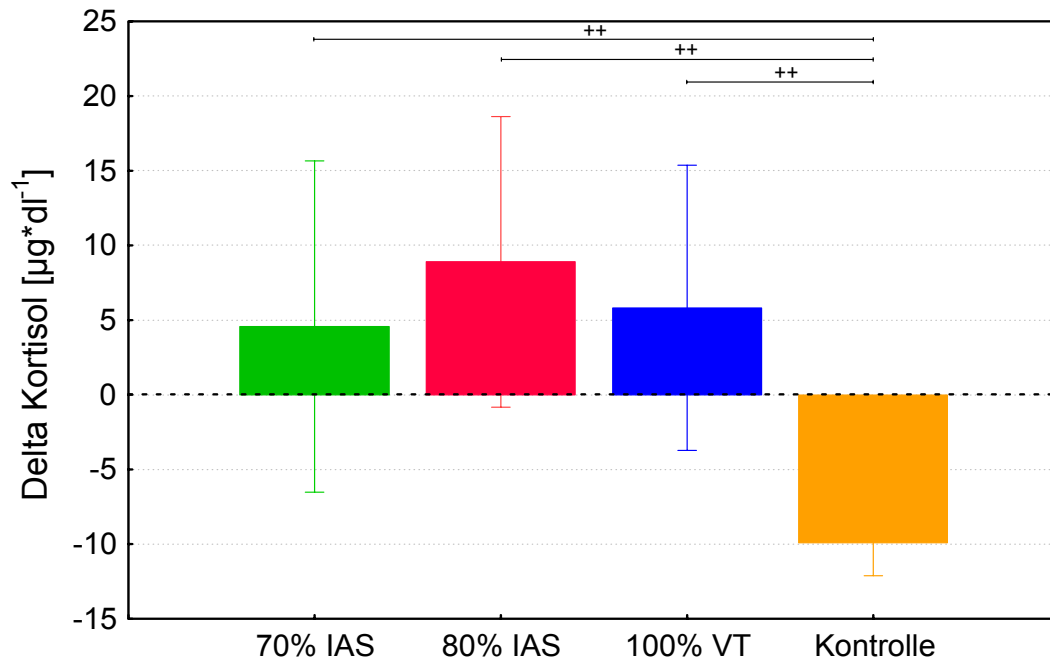


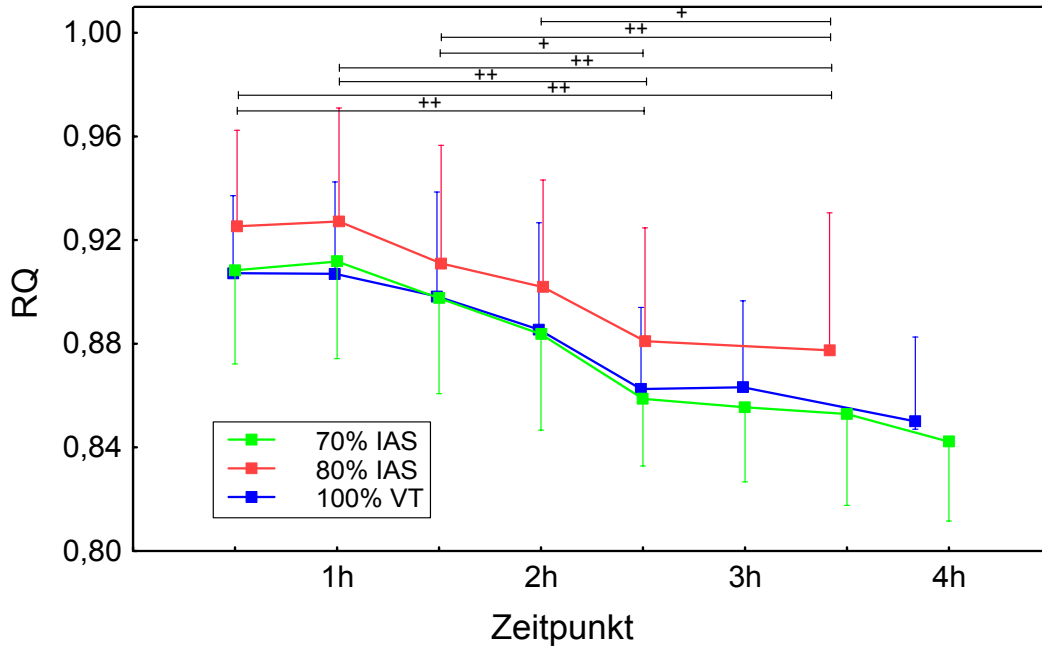
Abb.17: Verhalten von Noradrenalin (oben) und Adrenalin (unten) während der Dauerbelastungen. Der Anstieg über die Zeit war jeweils hochsignifikant ( $p < 0,01$ ), wobei keine Unterschiede zwischen den Intensitäten auftraten.



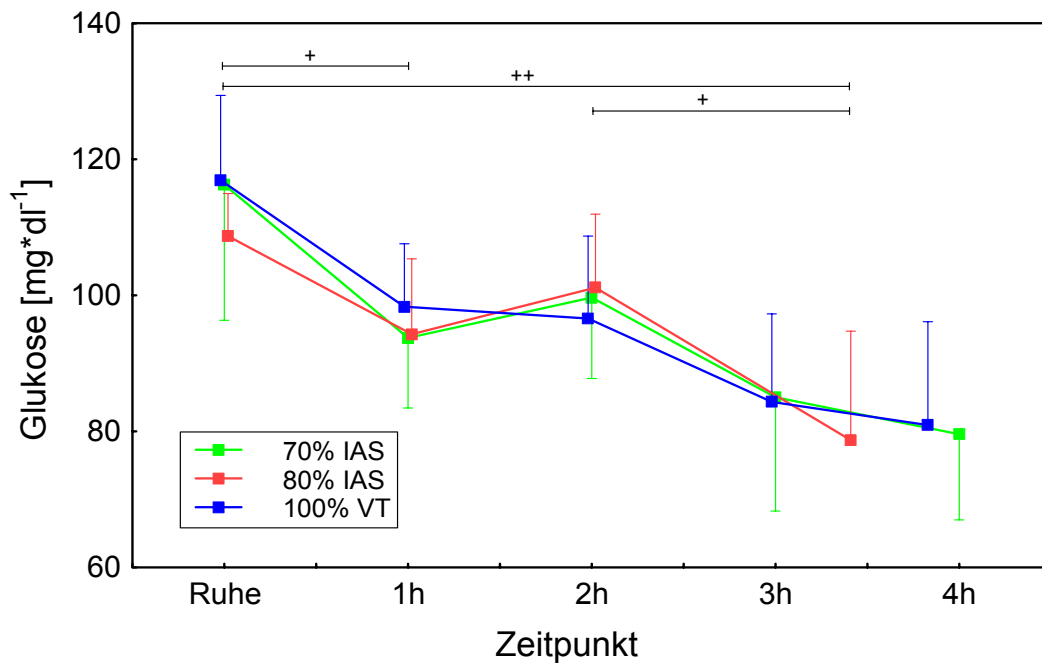
**Abb.18:** Differenz der Kortisolkonzentration nach und vor Belastung für die verschiedenen Intensitäten sowie am Kontrolltag. Für 80% IAS und 100% VT konnte ein tendenzieller Anstieg festgestellt werden ( $p = 0,06$ ). Die Kortisolkonzentration fiel am Kontrolltag hochsignifikant ab ( $p < 0,01$ ).

### 3.1.3 Energiestoffwechsel und Substrate

Der Respiratorische Quotient sowie die Blutglukosekonzentrationen unterschieden sich nicht für die verschiedenen Intensitäten, zeigten aber einen signifikanten Abfall über die Zeit (Abbildung 19 und 20). Während die Konzentrationen der Triglyceride unter allen Bedingungen nahezu konstant blieben (Abbildung 21), konnten für das Serumglycerin sowie für die freien Fettsäuren deutliche Anstiege im Vergleich zum Kontrolltag nachgewiesen werden (auf das 10- bzw. 20-fache; Abbildung 22 und 23). Hierbei zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Intensitäten.



**Abb.19:** Verhalten des Respiratorischen Quotienten während der Dauerbelastungen. Es gab keine Unterschiede zwischen den Intensitäten. Der Abfall über die Zeit war hochsignifikant ( $p < 0,01$ ).



**Abb.20:** Verhalten des Blutzuckerspiegels während der Dauerbelastungen. Es gab keine Unterschiede zwischen den Intensitäten. Der Abfall über die Zeit war hochsignifikant ( $p < 0,01$ ).



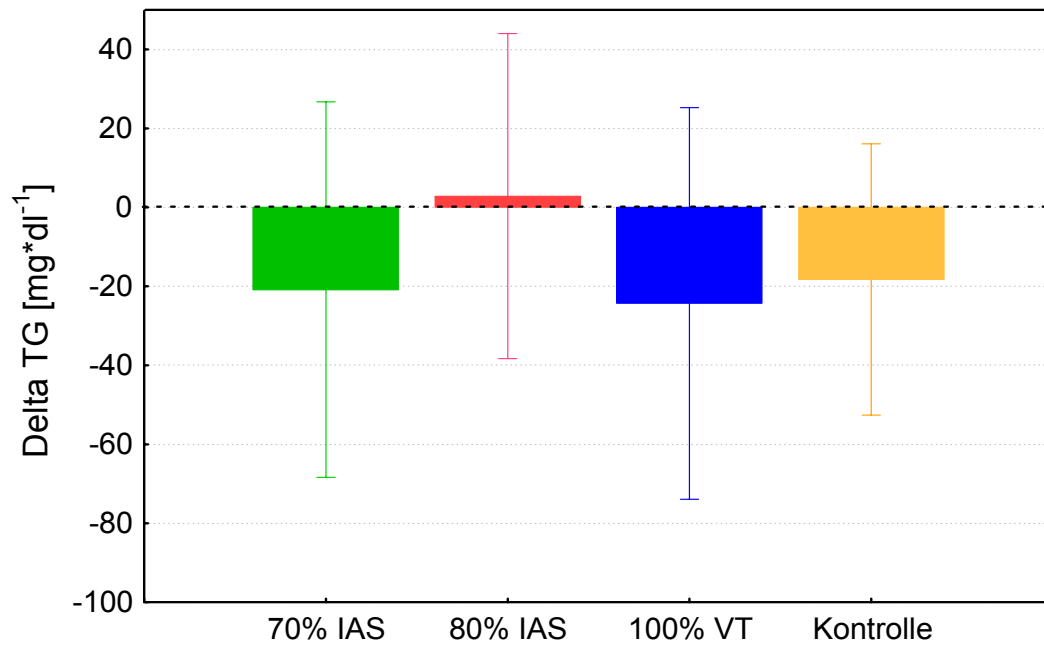


Abb.21: Differenz der Triglyceridkonzentration nach und vor Belastung. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Intensitäten bzw. im Vergleich zum Kontrolltag.

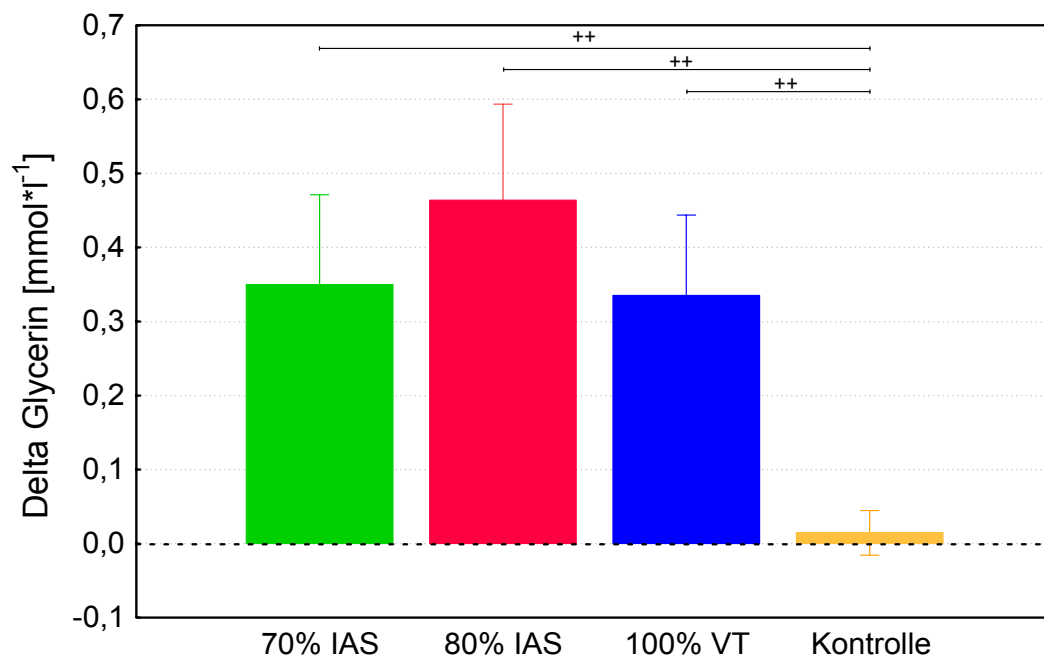
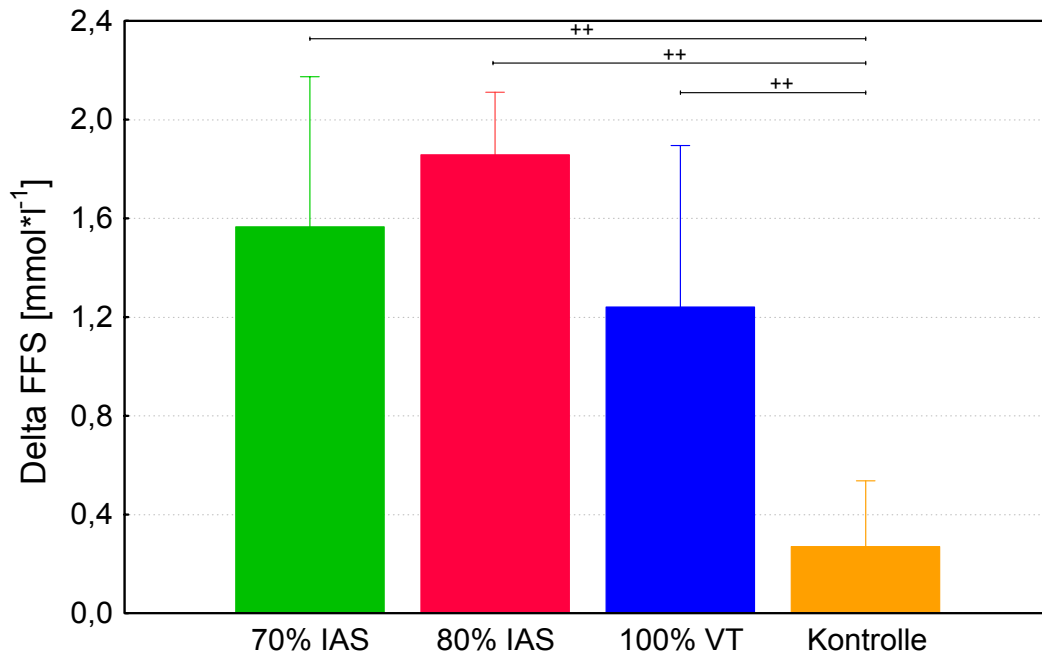
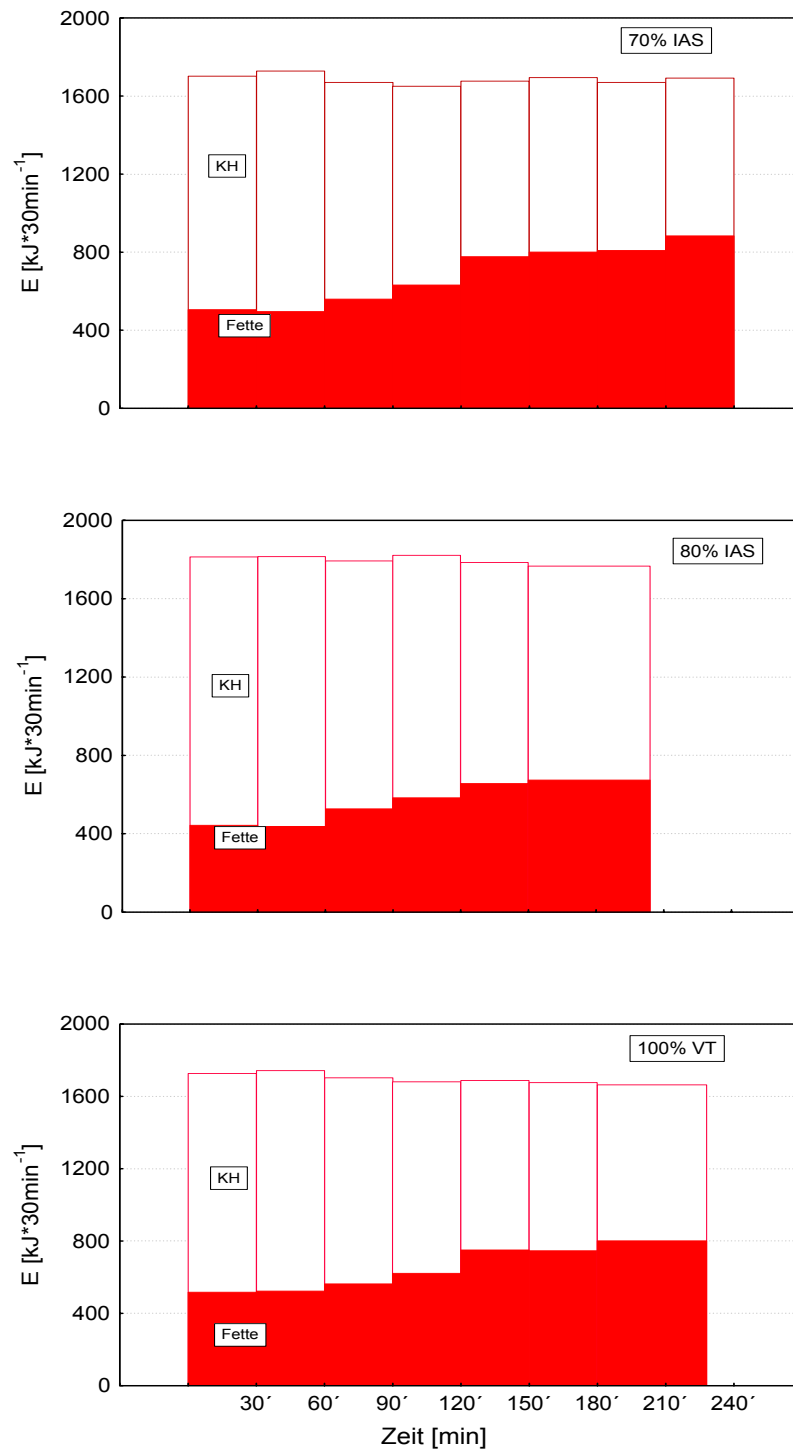


Abb.22: Differenz der Glycerinkonzentration nach und vor Belastung. Im Vergleich zum Kontrolltag war für alle Bedingungen ein hochsignifikanter Anstieg ( $p < 0,01$ ) zu verzeichnen. Für die verschiedenen Intensitäten bestanden keine Unterschiede.



**Abb.23:** Differenz der Konzentration der freien Fettsäuren nach und vor Belastung. Im Vergleich zum Kontrolltag war für alle Bedingungen ein hochsignifikanter Anstieg ( $p < 0,01$ ) zu verzeichnen. Zwischen den verschiedenen Intensitäten fanden sich keine Unterschiede.

Die pro Zeiteinheit verbrauchte Energie blieb über die Belastungsdauer konstant, wobei sich für alle Intensitäten eine kontinuierliche Zunahme des Fettstoffwechsels zeigte (Abbildung 24).



**Abb.24:** Gemittelter halbstündiger Energieverbrauch sowie anteilige Kohlenhydrat- und Fettverbrennung für 70% (oben) und 80% IAS (Mitte) und 100% VT (unten). Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Intensitäten hinsichtlich des gesamten Energieverbrauchs sowie des anteiligen Fettstoffwechsels. Der Anteil der Fettverbrennung am Gesamtenergieverbrauch nahm zum Ende der Belastung für alle Intensitäten hochsignifikant zu ( $p < 0,01$ ).

In Tabelle 6 sind der gesamte sowie der durchschnittliche stündliche Energieverbrauch zusammengefasst. Tabelle 7 gibt die Absolutbeträge sowie den relativen Anteil des Fettstoffwechsel am Gesamtenergiebetrag während der ersten und der letzten 30 Minuten der Belastung wieder.

**Tab.6 Gesamtenergieverbrauch und durchschnittlicher Energieverbrauch pro Stunde während der Dauertests (MW  $\pm$  SD). Es fanden sich keine signifikanten Unterschiede für die verschiedenen Intensitäten.**

	<b>70% IAS</b>	<b>80% IAS</b>	<b>100% VT</b>
<b>Gesamtenergieverbrauch [kJ]</b>	13483 $\pm$ 2070	11988 $\pm$ 2242	12847 $\pm$ 1207
<b>Energieverbrauch pro Stunde [kJ*h<sup>-1</sup>]</b>	3369 $\pm$ 515	3515 $\pm$ 658	3352 $\pm$ 314

**Tab.7 Durch Fettverbrennung gewonnene Energie während der ersten und der letzten halben Stunde der Dauertests ausgedrückt in absoluten Zahlen sowie relativ zum gesamten 30minütigen Energieverbrauch (jeweils MW  $\pm$  SD). Der Anteil des Fettstoffwechsels nahm für alle Intensitäten hochsignifikant zu (jeweils  $p < 0,01$ ).**

	<b>70% IAS</b>	<b>80% IAS</b>	<b>100% VT</b>
<b>Fettverbrennung erste 30 min [kJ]</b>	507 $\pm$ 218	444 $\pm$ 243	515 $\pm$ 163
<b>Fettverbrennung letzte 30 min [kJ]</b>	884 $\pm$ 260	675 $\pm$ 256	800 $\pm$ 184
<b>Anteil Fettverbrennung erste 30 min [%]</b>	29,8 $\pm$ 12,0	24,2 $\pm$ 12,2	31,4 $\pm$ 10,4
<b>Anteil Fettverbrennung letzte 30 min [%]</b>	52,1 $\pm$ 10,5	38,3 $\pm$ 14,3	47,0 $\pm$ 11,1

## 4 Diskussion

Diese Studie war der erste Teil einer zweijährigen Untersuchung, in deren Verlauf der Einfluss einer Kohlenhydratsubstitution auf leistungsphysiologische und immunologische Parameter während vierstündiger Dauerbelastungen getestet werden sollte. Ziel dieses ersten Teils war es, eine Intensität zu finden, die ohne Gabe von Kohlenhydraten verlässlich über vier Stunden durchgehalten werden kann und somit als Basisintensität für den zweiten Studienteil sowie für extensives Grundlagenausdauertraining im Radsport dienen kann. Zudem sollten ein kardiozirkulatorisches, metabolisches und ventilatorisches Profil solcher Belastungen erstellt sowie Empfehlungen für die Trainingspraxis abgeleitet werden.

Es hat sich gezeigt, dass 70% der individuellen anaeroben Schwelle eine verlässliche Intensität ist, die vier Stunden ohne Substitution mit Kohlenhydraten durchgehalten werden und daher als Grundlage zur Steuerung des Grundlagenausdauertrainings im Radsport dienen kann. Ab der zweiten Belastungsstunde konnte eine vermehrte Nutzung des Fettstoffwechsels sowie ein kontinuierlicher Anstieg der Herzfrequenz beobachtet werden. Unter Beachtung dieses Herzfrequenzdrifts kann durchschnittlich 82% der Herzfrequenz an der IAS als Grundlage zur Steuerung eines grundlagenausdauerorientierten „Fettstoffwechseltrainings“ herangezogen werden.

### 4.1 Methodenkritik

Diese Studie stellte für die Versuchspersonen, die an insgesamt 10 Tagen am Institut erscheinen mussten, einen erheblichen Aufwand dar, so dass nur eine relativ geringe Gesamtzahl von 12 Probanden rekrutiert werden konnte. Bei 80% IAS wurden insgesamt nur 7 Fahrten durchgeführt, und in 4 Fällen bestand eine Übereinstimmung zwischen 70% IAS und 100% VT. Somit ergaben sich unterschiedliche bzw. teilweise geringe Endzahlen für die Intensitäten, so dass die statistischen Vergleiche mit Vorsicht interpretiert werden müssen.

In der Praxis des Ausdauerleistungssports ist es üblich, im Labor ermittelte leistungsdiagnostische Daten zur Steuerung des täglichen Trainings zu benutzen. Es ist dabei zu beachten, dass die physiologischen Beanspruchungsreaktionen vielfältigen Einflüssen wie z.B. Temperatur-, Wetter-, Wind- und Bodenverhältnissen oder indivi-

dueller Tagesform unterliegen können. Da diese Studie zum Teil im Labor sowie auch unter Feldtestbedingungen durchgeführt wurde, sind diese Faktoren auch bei der Beurteilung der aktuellen Studienergebnisse zu beachten. Die Umweltbedingungen unterschieden sich im Mittel nicht für die verschiedenen Intensitäten. Zwei Probanden fuhren allerdings einmal im Regen, wobei sich die Ergebnisse dieser Fahrten nicht vom allgemeinen Trend unterschieden.

Das Studiendesign wurde so angelegt, dass eine Beurteilung einer simulierten, mehrstündigen extensiven Trainingseinheit auf dem Fahrrad unter standardisierten Feldtestbedingungen vorgenommen werden kann. Der Einsatz des SRM-Ergometers erlaubt eine exakte Vorgabe und Kontrolle der zu erbringenden Leistung. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Probanden keine Tretpausen einlegen konnten, da sie kontinuierlich die geforderte Leistung erbringen mussten. Dies ist bei normalen Trainingsfahrten sicherlich die Ausnahme, da durch eine Geländeprofilierung automatisch Intensitätswechsel und Erholungsphasen vorkommen. Dadurch kann die „erlebte“ Beanspruchung höher ausgefallen sein, als dies unsere Messungen ausdrücken. Auch der monotone Ablauf der Dauertests – die Probanden fuhren über 200 Runden auf der Leichtathletikbahn im Kreis – entspricht nicht einem Radtraining und muss bei der Beurteilung der Abbruchgründe in Betracht gezogen werden.

Im Gegensatz zu den Belastungen bei 70 und 80% IAS lagen die Sauerstoffaufnahmewerte bei den Dauerfahrten an der ventilatorischen Schwelle deutlich über den im Rampentest ermittelten VT-Werten. Diese Differenz betrug im Mittel 290 ml. Unter Anwendung der vom American College of Sports Medicine ermittelten durchschnittlichen Steigung der Sauerstoffleistungskurve von  $10,8 \text{ ml} \cdot \text{W}^{-1}$  (Swain 2000) entspricht diese Differenz einer Leistung von 27 W, was wiederum einer Zeit von 46 Sekunden im Rampentest entspricht. Es war bei diesen Differenzen allerdings eine große Streubreite zu beobachten (von -30 bis 590 ml). Bei den drei abgebrochenen Fahrten bei 100% VT lagen diese Differenzen bei 590, 490 und 420 ml, entsprechend einer Leistung von 55, 45 bzw. 39 W. Die nach Abzug dieser Beträge resultierenden Wattzahlen liegen für alle drei Probanden unter dem Wert für 70% IAS, also einer Intensität, die alle sicher durchstehen konnten. Aufgrund dieser Ergebnisse und der zu beobachtenden großen Varianz ist es daher fraglich, ob das hier verwendete und von Davis et al. (1982) propagierte Modell (s. 2.2.2) zur

Ermittlung der Leistung an der ventilatorischen Schwelle aus einem Rampentest benutzt werden kann. Ergebnisse einer auf diesen Beobachtungen aufbauenden Studie erhärten diese Vermutung. Die durchschnittliche Zeit, die zur Ermittlung der VT-Leistung aus einem Rampentest heranzuziehen ist, liegt hier im Mittel bei 85 Sekunden, wobei ebenfalls eine große Streubreite von 38 bis 144 Sekunden beobachtet wurde (Faude et al. 2001). Sinnvoller scheint eine Ableitung der zur VT gehörenden Leistung aus steady-state-Bedingungen, wie es z.B. in diesen Intensitätsbereichen aus einem Stufentest (mit langer Stufendauer) möglich wäre.

#### **4.2 Basisintensität für Grundlagenausdauertraining im Radsport**

Die ventilatorische Schwelle markiert den ersten Anstieg des Blutlaktatspiegels über die Basiskonzentration (Wasserman et al. 1990) und erscheint daher theoretisch als eine sinnvolle Intensität zur Steuerung des Grundlagenausdauertrainings im Radsport. Die individuelle anaerobe Schwelle als Maß für das maximale Laktat-steady-state ist als Grundlage der Trainingssteuerung bei Läufern schon ausführlich untersucht (z.B. Coen 1997 sowie Coen et al. 1991) und wird in der leistungssportlichen Praxis dementsprechend genutzt. Sie ist im Leistungsspektrum bei höheren Intensitäten als die VT anzusiedeln (s. 1.2.2.1). Daher wurden 70% und 80% der IAS als weitere „Intensitätskandidaten“ in dieser Studie untersucht.

70% IAS war die einzige Intensität, die von allen Probanden über vier Stunden durchgehalten werden konnte und ist somit diejenige Intensität, die als Basisintensität zur Steuerung des Grundlagenausdauertrainings für Radfahrer von regionalem Niveau herangezogen werden kann. Diese Intensität entspricht im Mittel einer Sauerstoffaufnahme von 59%  $\dot{V}O_2\text{max}$ . Dieses Ergebnis ist in Übereinstimmung mit der Auffassung von Lucía et al. (2001), wonach das Grundlagenausdauertraining im Radsport, das ca. 80% des gesamten Trainingsumfangs umfasst, bei unter 65%  $\dot{V}O_2\text{max}$  stattfindet. Die Mehrzahl der Fahrten bei 80% der IAS mussten frühzeitig abgebrochen werden, so dass diese Intensität als Basisintensität für den zweiten Studienteil bzw. für das Grundlagenausdauertraining nicht in Frage kommt. Eine Beurteilung der ventilatorischen Schwelle erscheint aus den unter 4.1 genannten Gründen nicht sinnvoll. Daher muss die erste Arbeitshypothese vorerst unbeantwortet bleiben.

Bei den frühzeitig abgebrochenen Fahrten gaben fast alle Probanden eine allgemeine Erschöpfung als Abbruchgrund an. Eine Versuchsperson klagte über mit einem sogenannten „Hungerast“ vereinbare Beschwerden. Eine Erschöpfung der Glykogenreserven und somit ungenügende Resynthetisierung von ATP über die Glykolyse ist in diesem Falle als Ermüdungsursache nicht auszuschließen, obwohl der Blutzuckerspiegel noch keine „kritischen“ Werte ( $86 \text{ mg} \cdot \text{dl}^{-1}$ ) erreicht hatte.

Es wurden keine Muskelbiopsien durchgeführt, um eine tatsächliche Glykogenverarmung der Arbeitsmuskulatur nachzuweisen. Eine hypoglykämisch bedingte „zentrale Ermüdung“ scheint als verantwortlicher Faktor für die Abbrüche ebenfalls möglich (Blutglukosekonzentrationen zwischen  $58$  und  $88 \text{ mg} \cdot \text{dl}^{-1}$  bei vorzeitigem Abbruch). Da das Gehirn außerhalb von Hungerphasen nur Kohlenhydrate verstoffwechseln kann, könnte eine Abnahme des Blutzuckerspiegels beispielsweise zu zentral bedingten Koordinationsverschlechterungen und daraus folgend zu bewegungstechnischen Defiziten führen. Dadurch beeinflusste neural-periphere Faktoren könnten die Ermüdung noch steigern (Shephard 1993, S.41). Verschlechterungen in der Bewegungsökonomie könnten zu einem Anstieg der Sauerstoffaufnahme i.S. einer erhöhten „inneren Beanspruchung“ führen. Derartige Anstiege der  $\dot{V}O_2$  konnten in dieser Untersuchung allerdings nicht nachgewiesen werden. Ebenfalls nicht auszuschließen sind psychologisch bedingte Abbrüche, etwa im Sinne von – durch die Monotonie des „Rundendrehens“ bedingten – Motivationsproblemen.

Bei zwei Probanden war ein Laktatanstieg auf  $3$  bzw.  $2,58 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$  zu beobachten. Alle anderen Parameter verhielten sich bei diesen beiden Versuchspersonen nicht entgegen dem allgemeinen Trend. Es wurden keine pH-Messungen durchgeführt, so dass eine Aussage über den Grad der Azidose nicht getroffen werden kann. Allerdings ist eine Einschränkung der an der Energiegewinnung beteiligten Enzyme und somit eine Azidose als Ermüdungsursache bei diesen Laktatwerten eher unwahrscheinlich.

Es kann vermutet werden, dass eine Substitution mit einem kohlenhydratreichen Getränk, wie es in der Radsportpraxis durchaus üblich ist, die Belastungszeit verlängern oder aber die durchhaltbare Intensität erhöhen kann. Davis et al. (1992) konnten zeigen, dass bei Fahrten mit ca.  $68\% \dot{V}O_{2\text{max}}$  ( $\sim 2 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$  Laktat) die Belastungszeit von durchschnittlich  $190$  auf  $235$  Minuten verlängert werden konnte,



wenn anstatt eines Placebogetränks eine Kohlenhydratlösung verabreicht wurde. Angus et al. (2000) fanden, dass die Zeit, um eine gegebene Menge an Arbeit ( $35 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) zu verrichten, durch Kohlenhydratsubstitution von 178 (Placebo) auf 166 (Verum) Minuten reduziert werden konnte. Ziel dieser Studie war allerdings eine individualisierte Basisintensität zu finden, die auch unter ungünstigen nutritiven Bedingungen noch durchgehalten werden kann. Auf dieser Grundlage können weiterführende Untersuchungen, z.B. hinsichtlich des Einflusses einer Kohlenhydratsubstitution (wie es im zweiten Studienteil angedacht war) und daraus resultierender Modifikationen der Belastungsintensitäten, durchgeführt werden.

#### **4.3      *Metabolisches und kardiozirkulatorisches Profil***

Aus dem Laktatverhalten wird ersichtlich, dass die Energie für diese lang andauernden Belastungen nahezu ausschließlich über aerobe Stoffwechselwege gewonnen wird. Es ist eine Verschiebung von hauptsächlich aerob glykolytischer Stoffwechsellage zu Beginn der Belastung auf vermehrt aerob lipolytische Stoffwechselwege gegen Ende der Belastung zu beobachten.

Schon Costill (1970) konnte bei 6 Läufern zeigen, dass der RQ während zweistündiger Laufbelastungen bei ca. 60%  $\dot{V}O_2\text{max}$  von 0,88 auf 0,80 abfiel. Daraus folgte er eine Verschiebung von 61% Kohlenhydrat- und 39% Fettverbrennung in den ersten 10 Minuten zu 67% Fett- und 33% Kohlenhydratoxidation am Ende der Belastung. Brisswalter et al. (2000) beschreiben ebenfalls einen kontinuierlichen Abfall des RQ unter Placebo-Bedingungen während zweistündiger Ausdauerläufe bei 81%  $\dot{V}O_2\text{max}$ , der unter Kohlenhydratgabe nicht zu beobachten war. Davis et al. (1992) konnten eine ähnliche Verschiebung im Energiestoffwechsel während drei- bis vierstündiger Fahrradbelastungen unter Placebobedingungen zeigen, wie sie in der vorliegenden Studie auftrat. Während Substitution mit Kohlenhydraten blieben die Blutzuckerspiegel konstant, und der Anstieg der FFS war weniger ausgeprägt, wobei der RQ dennoch leicht abfiel.

Die multifaktorielle Regulation des Glukose- und Fettstoffwechsels ist ein komplexes Geschehen und noch nicht bis ins Detail geklärt. Allerdings scheint es einen Zusammenhang in dem Sinne zu geben, dass eine vermehrte Verfügbarkeit des einen Substrats die Nutzung des anderen Substrats hemmt (Jeukendrup et al. 1998). Die Verschiebung hin zum Fettstoffwechsel während langandauernder Belastungen ist

dann durch eine Glykogenentleerung, die reduzierte Blutzuckerkonzentration und die deutlich erhöhte Konzentration an freien Fettsäuren erklärbar. Durch Kohlenhydrat-substitution könnte somit diese Verschiebung zum Teil abgeschwächt werden. Zusätzlich zur verminderten Glukoseverfügbarkeit sind die Konzentrationsanstiege der freien Katecholamine und des Kortisols als Gründe für die Steigerung der Lipolyse bei solch langandauernden Belastungen zu sehen. Diese Hormone üben dabei einen stimulierenden Einfluss auf die Lipolyse aus, wobei der Anteil des Kortisols erst bei Belastungen über 60%  $\dot{V}O_2\text{max}$  von Bedeutung ist (Kindermann 1987). Weitere wichtige Hormone für die Regulation des Energiestoffwechsels, wie z.B. Insulin und Wachstumshormon (STH), sind in dieser Untersuchung nicht gemessen worden. Nach Kindermann (1987) verhalten sich diese Hormone bei lang andauernder aerober Arbeit gegenläufig. Insulin fällt demnach leicht ab, so dass der Abbau von Speicherfetten nicht gehemmt wird, und STH steigt mit zunehmender Dauer an, um die Bereitstellung von Glukose und Fettsäuren zu sichern.

Optimal ausgeprägte Energiestoffwechselwege, insbesondere des Fettstoffwechsels, sind im Ausdauersport von entscheidender Bedeutung für die Leistungsfähigkeit. Eine möglichst große Nutzung der Fettoxidation spart Glykogen für die entscheidenden Phasen eines Wettkampfs (Noakes 1991). Lucía et al. (1998) kommen zu der Auffassung, dass eine stärkere Nutzung der Fettverbrennung bei allen Belastungsintensitäten einer der wichtigsten Unterschiede zwischen professionellen Radsportlern und leistungsstarken Amateuren ist. Ein Ziel von Ausdauertraining ist daher, bei gleicher Belastungsintensität zu einer Erhöhung des über Fette bereitgestellten Energieanteils beizutragen. Dies kann nach Jeukendrup et al. (1998) über folgende Adaptationsmechanismen geschehen: Anstieg der oxidativen Enzyme und der Mitochondrienzahl und verbesserte Mobilisation freier Fettsäuren aus den Adipozyten sowie deren Transport in die Muskelzelle. Ein Training, das den Fettstoffwechsel in großem Maße beansprucht, wie es die in dieser Studie gewählten Intensitäten tun, wird für besonders geeignet erachtet, entsprechende Anpassungen hervorzurufen (Jeukendrup und Achten 2001). Diese Annahme wird unterstützt durch die Aussage von Jeukendrup et al. (1998), dass die höchsten absoluten Beiträge der Lipolyse zum Energiestoffwechsel bei Belastungen zwischen 50 und 70%  $\dot{V}O_2\text{max}$  liegen. In einer aktuellen Untersuchung fanden Achten et al. (2002), dass die Intensität, bei der die Fettoxidationsrate maximal ist, bei 64%  $\dot{V}O_2\text{max}$  liegt.

Neben den Verschiebungen im Energiestoffwechsel kommt es während vierstündiger Dauerbelastungen auf dem Fahrrad ab der zweiten Belastungsstunde zu einem kontinuierlichen Anstieg der Herzfrequenz um durchschnittlich 9,3 Schläge bis zum Ende der Belastung. Allerdings war bei manchen Athleten kein Anstieg zu beobachten, wohingegen Andere am Ende mehr als 20 Schläge mehr aufwiesen als zu Beginn des Tests. Mehrere Ursachen sind für diesen Herzfrequenz-Drift in Betracht zu ziehen. Zum Einen ist ein linearer, im Vergleich zu intensiveren Belastungen allerdings gering ausgeprägter Anstieg der freien Katecholamine zu beobachten, so dass mit zunehmender Dauer ein verstärkter sympathischer Herzfrequenzantrieb zu erwarten ist. Auch eine mit der Zeit ansteigende Körperkerntemperatur ist laut Coyle und Gonzáles-Alonso (2001) als Grund für einen Anstieg des Herzfrequenzantriebs anzunehmen. Klassisch wird hier eine Weitstellung der Hautgefäße – zur besseren Temperaturregulation – mit konsekutivem Abfall des Schlagvolumens in Folge des verminderten zentralen Blutvolumens als Ursache für den Herzfrequenz-Drift diskutiert (Coyle und González-Alonso 2001, Kindermann 1987). Während lang andauernder Belastungen kommt es durch Flüssigkeitsverschiebungen in den Extravasalraum und vermehrtes Schwitzen zu einer Verringerung des Blutvolumens und somit einer leichten Hämokonzentration, so dass der venöse Rückstrom und dadurch das Schlagvolumen vermindert sind. Dies kann durch eine Erhöhung der Herzfrequenz zur Aufrechterhaltung des Herzzeitvolumens ausgeglichen werden. Tatsächlich konnte in dieser Studie eine geringfügige Hämokonzentration nachgewiesen werden. Es wurden allerdings keine Gewichtsvergleiche vor und nach Belastung durchgeführt, um eventuelle Flüssigkeitsverluste durch vermehrtes Schwitzen zu dokumentieren. Nielsen (1993, S.295) beschreibt Flüssigkeitsverluste von bis zu 1,5 l pro Stunde unter ähnlichen Temperaturbedingungen bei Marathonläufern, die bei 80% der  $\dot{V}O_2\text{max}$  liefen. Bei einer durchschnittlichen Trinkmenge von ca. 2 l über vier Stunden in der aktuellen Untersuchung ist es daher denkbar, dass belastungsinduzierte Flüssigkeitsverluste nicht vollständig ausgeglichen werden konnten und somit eine leichte Abnahme des Blutvolumens ebenfalls zum kontinuierlichen Herzfrequenzanstieg beitrug. Die Trinkmenge war in dieser Studie nicht standardisiert, so dass es große interindividuelle Unterschiede gab. Es konnte allerdings kein signifikanter Zusammenhang zwischen Trinkmenge und Herzfrequenzanstieg gefunden werden ( $r = -0,33$ ). Montain und Coyle (1992) fanden, dass der Anstieg der Körperkerntemperatur und der Herzfrequenz sowie der Abfall des

Schlagvolumens proportional zum Grad des Flüssigkeitsverlusts sind. Coyle und Gonzáles-Alonso (2001) sind der Ansicht, dass der Herzfrequenzdrift während Dauerbelastungen bei moderaten Intensitäten (50 bis 75%  $\dot{V}O_2\text{max}$ ) durch eine Interaktion zwischen dem Anstieg des sympathischen Herzfrequenzantriebs, der steigenden Körpertemperatur sowie des reduzierten Schlagvolumens aufgrund des gesunkenen Blutvolumens bedingt ist.

#### **4.4 Empfehlungen für die Trainingspraxis**

Durch fahrradergometrische Testverfahren ist es möglich, exakte Beziehungen zwischen der physikalisch erbrachten Leistung und physiologischen Beanspruchungsgrößen, wie z.B. der Herzfrequenz, der Blutlaktatkonzentration und Parametern des Gasaustausches herzustellen. Anhand solcher Relationen kann die Leistungsfähigkeit eines Athleten ermittelt und daraus wiederum können Trainingsbereiche abgeleitet werden, die die für das Training gewünschten Beanspruchungen induzieren. Mittels moderner Entwicklungen wie dem SRM-System ist es möglich, die Leistung während des Trainings zu messen und somit Leistungsbereiche als Referenzintensitäten vorzugeben (Kettmann und Huber 1994, S.70). Immer mehr der weltbesten Athleten benutzen zur Kontrolle ihres Trainings derartige Systeme.

Als geeignete Intensität für lang andauerndes niedrig-intensives Grundlagenausdauertraining kann 70% der Leistung an der IAS gewählt werden. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass dies nur gilt, wenn keine Kohlenhydrate verabreicht werden. 70% IAS ist somit als eine Mindestintensität zu sehen, bei der mit zunehmender Zeitdauer vermehrt die Fettverbrennung zur Energiegewinnung genutzt wird und die somit als geeignete Intensität für ein Fettstoffwechseltraining gesehen werden kann.

Die Vorgabe einer Referenzleistung ist allerdings an die technische Voraussetzung eines ambulant einsetzbaren Ergometers gebunden. Diese Möglichkeit ist noch nicht weit verbreitet und für ambitionierte Amateursportler meistens ökonomisch nicht sinnvoll. Im Ausdauersport werden zur Intensitätskontrolle hauptsächlich zwei Parameter herangezogen, das Laktatverhalten und die Herzfrequenz (Coen 1997, S.87; Kindermann und Urhausen 1989). Bei den hier untersuchten Intensitäten konnten – bei insgesamt im Bereich der Ruhewerte angesiedelten Messungen – keine Unterschiede in den Blutlaktatkonzentrationen gefunden werden, so dass Laktatentnahmen keine sinnvolle Methode zur Differenzierung geeigneter Intensitäten im

Grundlagenausdauertraining des Radsports darstellen. Auch Coen (1997, S.87f) konnte für Läufer zeigen, dass die Trennschärfe des Parameters Laktat im Bereich des niedrig-extensiven Ausdauertrainings sehr gering ist. Für derartige Trainingsintensitäten eignet sich vielmehr der – auch leichter zu messende – Parameter Herzfrequenz. Lucía et al. (2000) fanden, dass die Herzfrequenzen an der aeroben und anaeroben Schwelle während einer Saison im Gegensatz zur entsprechenden physikalischen Leistung relativ konstant blieben. Dies macht häufige diagnostische Testverfahren zur Anpassung an die während eines Trainingsjahres sich ändernde Leistungsfähigkeit u.U. überflüssig, wenn die Trainingsvorgaben sich an Herzfrequenzbereichen orientieren.

Durchschnittlich 82% des Wertes an der IAS betrug die Herzfrequenz während der ersten zwei Stunden bei 70% IAS. Diese Werte variierten zwischen 77 und 88%. Zusätzlich ist das Herzfrequenzverhalten z.B. von Umweltbedingungen abhängig und unterliegt individuellen Schwankungen. Die Vorgabe einer Trainingsherzfrequenz für lange Trainingseinheiten im GA-Bereich ist somit unter Berücksichtigung individueller Besonderheiten, der Trinkgewohnheiten, der Umweltbedingungen sowie einem gewissen Maß an Erfahrung durchaus sinnvoll. Zusätzlich muss der Herzfrequenzanstieg ab der zweiten Stunde, der allerdings ebenfalls eine große interindividuelle Varianz aufweist, beachtet und die Intensität dementsprechend angepasst werden.

Obwohl in entsprechenden Lehrbüchern noch oft Trainingsangaben in Prozent maximaler Parameter zu finden sind, ist es heutzutage nahezu unbestritten, dass submaximale Schwellenwerte wesentlich bessere Indikatoren für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit und die Ableitung daraus resultierender Trainingsempfehlungen sind (Bishop et al. 1998, Coyle et al. 1988, Meyer et al. 1999, Roecker et al. 1998, Weltman et al. 1990). Auch diese Untersuchung liefert einen indirekten Hinweis darauf, dass die Abschätzung, ob eine Intensität durchgehalten werden kann und somit für das Training in Frage kommt, besser gelingt, wenn submaximale Kennwerte herangezogen werden (Abb.10). Wenn 70% IAS in Prozent maximaler Parameter angegeben wird, ist außerdem eine große Streubreite (63 bis 78%  $HF_{max}$  bzw. 53 bis 74%  $\dot{V}O_2max$ ) zu beobachten. Es ist allerdings wesentlich einfacher und weniger aufwendig anstatt der IAS die maximale Herzfrequenz zu bestimmen und somit zur Steuerung des Trainings einzusetzen. Für diesen Fall kann 72%  $HF_{max}$  als Vorgabe für das Grundlagenausdauertraining dienen. Man muss hier allerdings die große

---

interindividuelle Streuung beachten. Zusätzlich müssen auch hier die zuvor erwähnten Einschränkungen für Herzfrequenzvorgaben beachtet werden.

## 5 Schlussfolgerungen

Im Hinblick auf die unter 1.3 genannten Studienziele lassen sich die Ergebnisse folgendermaßen zusammenfassen:

70% der individuellen anaeroben Schwelle ist eine Intensität, die auch ohne Substitution von Kohlenhydraten sicher über mindestens vier Stunden von Radfahrern und Triathleten regionalen Niveaus durchgehalten werden kann. Dieser Wert kann somit als Basisintensität zur Steuerung des lang andauernden, extensiven Grundlagenausdauertrainings im Radsport dienen.

Derartige Trainingseinheiten sind gekennzeichnet durch nahezu rein aerobe Energiebereitstellung, geringfügig zunehmende sympathische Aktivität, durch einen ab der zweiten Belastungsstunde kontinuierlichen Herzfrequenzanstieg und eine zunehmend vermehrt über den Fettstoffwechsel (bis ca. 50% des Gesamtbedarfs) abgedeckte Energiebereitstellung. Der durchschnittliche stündliche Energieverbrauch liegt bei ca. 3400 kJ bzw. 800 kcal.

Die exakteste Methode zur Vorgabe von Trainingsintensitäten ist die physikalische Angabe einer Zielleistung. Da diese Möglichkeit, z.B. mittels SRM-System, im ambitionierten Amateur- und Breitensport für die meisten Athleten ökonomisch nicht sinnvoll ist, kann eine Herzfrequenzvorgabe unter Beachtung des Herzfrequenzdrifts von ca. 10 Schlägen in der vierten Belastungsstunde das Mittel der Wahl darstellen. 72% der maximalen Herzfrequenz bzw. – bei Zuhilfenahme einer Laktatdiagnostik – 82% der Herzfrequenz an der IAS können zur Intensitätssteuerung der ersten zwei Stunden des Grundlagenausdauertrainings herangezogen werden.

Es muss allerdings offen bleiben, inwiefern die hier abgeleiteten Trainingsempfehlungen bei Substitution mit Kohlenhydraten nach oben korrigiert werden müssen.

## 6 Literatur

- Achten J, Gleeson M, Jeukendrup AE (2002)** Determination of the exercise intensity that elicits maximal fat oxidation. *Med Sci Sports Exerc* 34: 92-97
- Angus D, Hargreaves M, Dancy J, Febbraio M (2000)** Effect of carbohydrate or carbohydrate plus medium-chain triglyceride ingestion on cycling time trial performance. *J Appl Physiol* 88: 113-119
- Armstrong L, Jenkins S (2000)** *Tour des Lebens – Ich besiegte den Krebs und gewann die Tour de France*. Gustav Lübke Verlag, Bergisch Gladbach, S.81
- Barbeau P, Serresse O, Boulay M (1993)** Using maximal and submaximal aerobic variables to monitor elite cyclists during a season. *Med Sci Sports Exerc* 25: 1062-1069
- Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ (1986)** A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* 60: 2020-2027
- Bishop D, Jenkins DG, Mackinnon LT (1998)** The relationship between plasma lactate parameters,  $W_{peak}$  and cycling performance in women. *Med Sci Sports Exerc* 30: 1270-1275
- Brisswalter J, Hauswirth C, Vercruyssen F, Collardeau M, Vallier J, Lepers R, Goubalt C (2000)** Carbohydrate ingestion does not influence the change in energy cost during a 2-h run in well-trained triathletes. *Eur J Appl Physiol* 81: 108-113
- Buchfuhrer MJ, Hansen JE, Robinson TE, Sue DY, Wasserman K, Whipp BJ (1983)** Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. *J Appl Physiol* 55: 1558-1564
- Coen B, Schwarz L, Urhausen A, Kindermann W (1991)** Control of training in middle- and long-distance running by means of the individual anaerobic threshold. *Int J Sports Med* 12: 519-524



- Coen B (1997)** Individuelle anaerobe Schwelle - Methodik und Anwendung in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung leichtathletischer Laufdisziplinen. Sport und Buch Strauss, Köln
- Coen B, Gietzen S, Meyer T, Kindermann W (1999)** Influence of a portable spirometer on performance diagnostic parameters in long-distance runners. *Int J Sports Med* 20: S26
- Costill D (1970)** Metabolic responses during distance running. *J Appl Physiol* 28: 251-255
- Coyle EF, Coggan AR, Hopper MK, Walters TJ (1988)** Determinants of endurance in well-trained cyclists. *J Appl Physiol* 64: 2622-2630
- Coyle EF, González-Alonso J (2001)** Cardiovascular drift during prolonged exercise: new perspectives. *Exerc Sports Sci Rev* 29: 88-92
- Davis JA, Whipp BJ, Lamarra N, Huntsman DJ, Frank MH, Wasserman K (1982)** Effect of ramp slope on determination of aerobic parameters from the ramp exercise test. *Med Sci Sports Exerc* 14: 339-343
- Davis JM, Bailey SP, Woods JA, Galiano FJ, Hamilton MT, Bartoli WP (1992)** Effects of carbohydrate feedings on plasma free tryptophan and branched-chain amino acids during prolonged cycling. *Eur J Appl Physiol* 65: 513-519
- Dickhuth H-H, Nause A, Steiger J, Bonzel T, Keul J (1983)** Two-dimensional echocardiographic measurements of left ventricular volume and stroke volume of endurance-trained athletes and untrained subjects. *Int J Sports Med* 4: 21-26
- Dickhuth H-H, Wohlfahrth B, Hildebrand D, Rokitzki L, Huonker M, Keul J (1988)** Jahreszeitliche Schwankungen der Ausdauerleistungsfähigkeit von hochtrainierten Mittelstreckenläufern. *Dtsch. Z. Sportmed.* 39: 346-353
- Dickhuth H-H (2000)** Einführung in die Sport- und Leistungsmedizin. Hofmann, Schorndorf

- Faude O, Meyer T, Kindermann W (2001)** Work rates at ventilatory threshold during ramp versus constant load exercise. In: Mester J, King G, Strüder H, Tsolakidis E, Osterburg A European College of Sport Science: Book of abstracts of the 6<sup>th</sup> annual congress of the European College of Sport Science, 15<sup>th</sup> congress of the German Society of Sport Science. Sport und Buch Strauss, Köln: 267
- Fernández-García B, Pérez-Landaluce J, Rodríguez-Alonso M, Terrados N (2000)** Intensity of exercise during road race pro-cycling competition. Med Sci Sports Exerc 32: 1002-1006
- Geigy J (1960)** Documenta Geigy. Wissenschaftliche Tabellen. Novartis Pharma, Wehr
- Heck H (1991)** Laktat in der Leistungsdiagnostik. Hofmann, Schorndorf
- Hill AV, Lupton H (1923)** Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. Q J Med 16: 135-171
- Hottenrott K, Zülch M (1995)** Ausdauerprogramme. Rowohlt, Reinbek
- Jeukendrup A, Saris W, Wagenmakers A (1998)** Fat metabolism during exercise: a review. Part II: regulation of metabolism and the effects of training. Int J Sports Med 19: 293-302
- Jeukendrup A, Achten J (2001)** Fatmax: a new concept to optimize fat oxidation during exercise? Eur J Sport Sci 1: 1-5
- Kettmann S, Huber G (1994)** Laktatleistungskurven beim Straßenradsport. In: Clasing D, Weicker H, Böning D Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. Fischer, Stuttgart Jena New York: 65-70
- Keul J, Simon G, Berg A, Dickhuth H-H, Goertler I, Kübel R (1979)** Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle zur Leistungsbewertung und Trainingsgestaltung. Dtsch. Z. Sportmed. 30: 212-218

- Kindermann W, Simon G, Keul J (1979)** The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol* 42: 25-34
- Kindermann W (1987)** Metabolismus und hormonelles Verhalten bei aerober und anaerober Muskelarbeit. In: Rieckert H *Sportmedizin - Kursbestimmung*. Springer, Berlin Heidelberg New York: 741-756
- Kindermann W, Urhausen A (1989)** Möglichkeiten einer hormonellen Trainingssteuerung. In: Böning D, al. *e Sport - Rettung oder Risiko für die Gesundheit?* Deutscher Ärzte-Verlag, Köln: 297-304
- Konopka P (2000)** *Radsport*. BLV, München Wien Zürich
- Lindner W (1996)** *Straßenradsport*. In: Weiss C *Handbuch Radsport*. BLV, München Wien Zürich, pp 117-220
- Lucía A, Pardo J, Durántez A, Hoyos J, Chicharro JL (1998)** Physiological Differences Between Professional and Elite Road Cyclists. *Int J Sports Med* 19: 342-348
- Lucía A, Hoyos J, Carvajal A, Chicharro JL (1999)** Heart rate response to professional road cycling: the Tour de France. *Int J Sports Med* 20: 167-172
- Lucía A, Hoyos J, Pérez M, Chicharro JL (2000)** Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1777-1782
- Lucía A, Hoyos J, Chicharro JL (2001)** Physiology of professional road cycling. *Sports Med* 31: 325-337
- Mader A, Liesen H, Heck H, Philippi H, Rost R (1976)** Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. *D Z Sportmed* 27: 80-112
- Martin D, Carl K, Lehnertz K (1993)** *Handbuch Trainingslehre*. Hofmann, Schorndorf

- McLellan TM (1987)** The anaerobic threshold: concept and controversy. *Austr J Sci Med Sport* 19: 3-8
- McLellan TM, Jacobs I (1993)** Reliability, reproducibility and validity of the individual anaerobic threshold. *Eur J Appl Physiol* 67: 125-31
- Meyer T, Gabriel HHW, Kindermann W (1999)** Is determination of exercise intensities as percentages of  $VO_{2max}$  or  $HR_{max}$  adequate? *Med Sci Sports Exerc* 31: 1342-1345
- Meyer T, Urhausen A, Kindermann W (2000)** Rationaler Einsatz der Spiroergometrie in der Leistungsdiagnostik. In: Engelhardt M, Franz B, Neumann G, Pfützner A Internationales Triathlon-Symposium: Xanten 1999. Czwalina, Hamburg: 81-94
- Montain S, Coyle E (1992)** Influence of graded dehydration on hyperthermia and cardiovascular drift during exercise. *J Appl Physiol* 73: 1340-1350
- Neumann G (1993)** Radsport. In: Shephard R, Astrand P-O *Ausdauer im Sport*. Deutscher Ärzte-Verlag, Köln
- Nielsen B (1993)** Die Bedeutung von Ernährung, Flüssigkeitszufuhr und Vitamineinnahmen vor, während und nach Ausdauerbelastungen. In: Shephard R, Astrand P-O *Ausdauer im Sport*. Deutscher Ärzte-Verlag, Köln: 288-300
- Noakes T (1991)** *Lore of running*. Human Kinetics, Champaign
- Noakes TD (1997)** 1996 J.B. Wolffe Memorial Lecture. Challenging beliefs: ex Africa semper aliquid novi. *Med Sci Sports Exerc* 29: 571-590
- Noakes TD (1998)** Maximal oxygen uptake: "classical" versus "contemporary" viewpoints: a rebuttal [comment]. *Med Sci Sports Exerc* 30: 1381-1398
- Oyono Enguelle S, Heitz A, Marbach J, Ott C, Gartner M, Pape A, Vollmer JC, Freund H (1990)** Blood lactate during constant-load exercise at aerobic and anaerobic thresholds. *Eur J Appl Physiol* 60: 321-30

- Parizkova J, Buzkova P (1971)** Relationship between skinfold thickness measured by Harpenden caliper and densitometric analysis of total body fat in men. Hum. Biol. 43: 16-21
- Reiser M, Meyer T, Kindermann W, Daus R (2000)** Transferability of workload measurements between three different types of ergometer. Eur J Appl Physiol 82: 245-249
- Roecker K, Schotte O, Niess AM, Horstmann T, Dickhuth HH (1998)** Predicting competition performance in long-distance running by means of a treadmill test. Med Sci Sports Exerc 30: 1552-1557
- Saris W, van Erp-Baart M, Brouns F, Westerterp K, ten Hoor F (1989)** Study on food intake and energy expenditure during extreme sustained exercise: the Tour de France. Int J Sports Med 10: S26-S31
- Shephard R (1993)** Allgemeine Grundlagen. In: Shephard R, Astrand P-O Ausdauer im Sport. Deutscher Ärzte-Verlag, Köln: 35-47
- Silbernagl S, Despopoulos A (1991)** Taschenatlas der Physiologie. Thieme, Stuttgart New York
- Simon G, Berg A, Dickhuth H-H, Simon A, Keul J (1981)** Bestimmung der anaeroben Schwelle in Abhängigkeit von Alter und von der Leistungsfähigkeit. Dtsch. Z. Sportmed. 32: 7-14
- Simon G (1986)** Trainingssteuerung im Schwimmsport. Dtsch. Z. Sportmed. 37: 376-379
- Stegemann J (1984)** Leistungsphysiologie. Buch, Thieme, Stuttgart New York
- Stegmann H, Kindermann W, Schnabel A (1981)** Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. International Journal of Sports Medicine 2: 160-165
- Stegmann H, Kindermann W (1982)** Comparison of prolonged exercise tests at the individual anaerobic threshold and the fixed anaerobic threshold of 4 mmol/l lactate. Int J Sports Med 3: 105-110

- Stockhausen W, Maier J, Tinsel J, Deus U, Lychatz S, Keul J (1994)** Laktatkinetik und Leistungsdiagnostik beim Radsport. In: Clasing D, Weicker H, Böning D Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. Fischer, Stuttgart Jena New York: 71-79
- Swain DP (2000)** Energy cost calculations for exercise prescriptions - an update. Sports Med 30: 17-22
- Urhausen A, Coen B, Weiler B, Kindermann W (1993)** Individual anaerobic threshold and maximum lactate steady state. International Journal of Sports Medicine 14: 134-139
- Wasserman K, McIlroy MB (1964)** Detecting the Threshold of Anaerobic Metabolism in Cardiac Patients During Exercise. Am J Cardiol 14: 844-852
- Wasserman K, Whipp BJ, Koyal SN, Beaver WL (1973)** Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. Journal of Applied Physiology 35: 236-243
- Wasserman K, Beaver WL, Whipp BJ (1990)** Gas exchange theory and the lactic acidosis (anaerobic) threshold. Circulation 81: II-14 - II-30
- Weltman A, Snead D, Seip R, Schurrer R, Weltman J, Rutt R, Rogol A (1990)** Percentages of maximal heart rate, heart rate reserve and VO<sub>2</sub>max for determining endurance training intensity in male runners. Int J Sports Med 11: 218-222
- Wilmore JH, Costill DL (1999)** Physiology of sport and exercise. Human Kinetics, Champaign
- Zintl F (1996)** Trainingslehre. In: Weiss C Handbuch Radsport. BLV, München Wien Zürich, pp 73-116
- Zintl F, Eisenhut A (2001)** Ausdauertraining: Grundlagen, Methoden, Trainingssteuerung. BLV, München Wien Zürich

## Eidesstattliche Erklärung

„Hiermit erkläre ich, Oliver Faude, an Eides Statt, dass ich die vorliegende und mit meinem Namen gekennzeichnete Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt habe.“

Saarbrücken, 02.12.2002

Oliver Faude