

**Aus der Medizinischen Universitätsklinik und Poliklinik Tübingen
Abteilung V, Sportmedizin
(Schwerpunkt: Leistungsmedizin, spezielle Prävention, spezielle
Rehabilitation)**

**Validität individueller Belastungsvorgaben aus der
laktatbasierten Leistungsdiagnostik im Hinblick auf das
Laktatverhalten im Schwellentraining von Mittel- und
Langstreckenläufern**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen**

**vorgelegt von
Karus, Benedikt**

2021

Dekan: Professor Dr. B. Pichler

1. Berichterstatter: Professor Dr. A. Nieß

2. Berichterstatter: Professor Dr. A. Grimm

Tag der Disputation: 14.10.2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Fragestellungen	1
1.1	Entwicklung der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik.....	1
1.2	Leistungsphysiologie	3
1.2.1	Anaerob-alkalotazide Energiebereitstellung	3
1.2.2	Anaerob-laktazide Energiebereitstellung	4
1.2.3	Aerobe Energiebereitstellung	4
1.3	Laktatleistungsdiagnostik	6
1.3.1	Methodik der laktatbasierten Leistungsdiagnostik	6
1.3.2	Bedeutung der laktatbasierten Leistungsdiagnostik bei der Charakterisierung der laufspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit.....	8
1.4	Fragestellungen der Dissertation	11
2	Material und Methoden.....	12
2.1	Studiendesign.....	12
2.2	Probandenrekrutierung und Ein- / Ausschlusskriterien	13
2.3	Probandenkollektiv	15
2.4	Diagnostik im Ergometrielabor	19
2.4.1	Sportmedizinische Eingangsuntersuchung.....	19
2.4.2	Mehrstuftentest zur Bestimmung der Laufgeschwindigkeit an der IAS und der Laufgeschwindigkeit im Dauertest.....	19
2.4.3	Rampentest zur Bestimmung der respiratorischen Schwellenwerte.....	21
2.4.4	Dauertest	23
2.5	Verfahren zur Datenerhebung im Dauertest	26
2.5.1	Bestimmung der Laktatkonzentration im Kapillarblut.....	26
2.5.2	Messung der Herzfrequenz	26
2.5.3	Spiroergometrie im Einlaufen	26
2.5.4	Borg-Skala-Erhebung im Tempodauerlauf	27

2.6	Statistische Auswertung	28
2.7	Übersicht verwendeter Geräte und Materialien	29
3	Ergebnisse	31
3.1	Ergebnisse anthropometrische Daten	31
3.2	Ergebnisse der leistungsdiagnostischen Untersuchungen	32
3.2.1	Ergometrieergebnisse im Mehrstufentest	32
3.2.2	Ergometrie- und Spirometrieergebnisse im Rampentest	36
3.3	Ergometrie- und Spirometrieergebnisse im Dauertest	41
4	Diskussion	62
4.1	Diskussion der Charakterisierung der Läufer in Mittel- und Langstreckler im Mehrstufentest und Rampentest	66
4.2	Diskussion der Ergebnisse im Dauertest des gesamten- und des in Mittel- und Langstreckler unterteilten Probandenkollektivs	70
4.3	Unterteilung des Probandenkollektivs in hoch- und niedrig- Laktat-Gruppe sowie Vergleich und Diskussion deren Ergebnisse im Dauertest	73
4.4	Diskussion der Daten aus der Borg-Skala-Erhebung	77
4.5	Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse im Hinblick auf die Fragestellungen der Arbeit	80
4.6	Diskussion zu Methoden und Studienlimitationen	85
4.7	Schlussfolgerung	87
5	Zusammenfassung	90
5.1	Einleitung und Fragestellungen	90
5.2	Material und Methoden	90
5.3	Ergebnisse	91
5.4	Diskussion / Schlussfolgerung	92
6	Literaturverzeichnis	93
7	Erklärung zum Eigenanteil	98

8	Danksagung	99
9	Anhang.....	100
9.1	Anhang 1: Anschreiben via E-Mail zur Probanden-Rekrutierung	100
9.2	Anhang 2: Probandeninformation und Einverständniserklärung	103
9.3	Anhang 3: Klinischer Probandenfragebogen.....	113
9.4	Anhang 4: Trainingsprotokoll zur Trainingsdokumentation	117
9.5	Anhang 5: Gehr's schwäbische Laugenbrezel, Zutaten	118

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beanspruchung der aeroben- und anaeroben Energiebereitstellung in Abhängigkeit der Dauer einer jeweils maximalen Leistung	3
Abbildung 2:	Energiegewinnung, Schema	5
Abbildung 3:	Laktatleistungskurve (LLK) und Herzfrequenzkurve	7
Abbildung 4:	Studiendesign	13
Abbildung 5:	Testprotokoll Untersuchungstag 1, Teil 1 - MST	21
Abbildung 6:	Testprotokoll Untersuchungstag 1, Teil 2 - RT	22
Abbildung 7:	Testprotokoll Untersuchungstag 2 - DT	23
Abbildung 8:	Anthropometrische Daten des in M und L, sowie \uparrow und \downarrow unterteilten Probandenkollektivs	31
Abbildung 9:	Verlauf der absoluten Laktatwerte des gesamten Probandenkollektivs zu ZP 0 bis 4 im DT	42
Abbildung 10:	Verhältnis von HF-TDL avg. zu HF-IAS in % des gesamten Probandenkollektivs zu ZP 3 im DT	44
Abbildung 11:	Borg-Qualitäten des gesamten Probandenkollektivs zu ZP 1 bis 4 im DT	46
Abbildung 12:	Korrelation zwischen Borg-Qualitäten des gesamten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT	48
Abbildung 13:	Korrelation zwischen dem Verhältnis von HF-TDL avg. zu HF-IAS in % des gesamten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT	49
Abbildung 14:	Korrelation zwischen dem Laktat am LT und an der IAS des gesamten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT	50
Abbildung 15:	Korrelation zwischen Borg-Qualitäten des in M und L unterteilten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT	54

Abbildung 16:	Korrelation zwischen dem Verhältnis von HF-TDL avg. zu HF-IAS in % des in M und L unterteilten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT	55
Abbildung 17:	Korrelation zwischen dem Laktat am LT und an der IAS des in M und L unterteilten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT	56
Abbildung 18:	Korrelation zwischen Borg-Qualitäten des in \uparrow und \downarrow unterteilten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT	60
Abbildung 19:	Korrelation zwischen dem Verhältnis von HF-TDL avg. zu HF-IAS in % des in \uparrow und \downarrow unterteilten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT	61
Abbildung 20:	Korrelation zwischen dem Laktat am LT und an der IAS des in \uparrow und \downarrow unterteilten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Charakteristik des gesamten Probandenkollektivs I Anthropometrische Daten, Trainingsdaten und persönliche Bestleistungen (PB)	16
Tabelle 2:	Charakteristik des in M und L unterteilten Probandenkollektivs I Anthropometrische Daten, Trainingsdaten und persönliche Bestleistungen (PB)	17
Tabelle 3:	Charakteristik des in \uparrow und \downarrow unterteilten Probandenkollektivs I Anthropometrische Daten	18
Tabelle 4:	Prozedere DT	25
Tabelle 5:	Übersicht verwendeter Geräte	29
Tabelle 6:	Übersicht verwendeter Materialien	30
Tabelle 7:	Ergometrieergebnisse im MST des gesamten Probandenkollektivs	33
Tabelle 8:	Ergometrieergebnisse im MST des in M und L unterteilten Probandenkollektivs	34
Tabelle 9:	Ergometrieergebnisse im MST des in \uparrow und \downarrow unterteilten Probandenkollektivs	35
Tabelle 10:	Spiroergometrieergebnisse im RT des gesamten Probandenkollektivs	37
Tabelle 11:	Ergometrieergebnisse im RT des in M und L unterteilten Probandenkollektivs	38
Tabelle 12:	Spirometrieergebnisse im RT des in M und L unterteilten Probandenkollektivs	39
Tabelle 13:	Ergometrieergebnisse im RT des in \uparrow und \downarrow unterteilten Probandenkollektivs	40
Tabelle 14:	Spirometrieergebnisse im RT des in \uparrow und \downarrow unterteilten Probandenkollektivs	41
Tabelle 15:	Spiroergometrieergebnisse im EL und TDL des gesamten Probandenkollektivs	43

Tabelle 16:	Borg-Qualitäten im EL und TDL des gesamten Probandenkollektivs	45
Tabelle 17:	Spiroergometrieergebnisse im EL und TDL des in M und L unterteilten Probandenkollektivs	51
Tabelle 18:	Borg-Qualitäten im EL und TDL des in M und L unterteilten Probandenkollektivs	52
Tabelle 19:	Spiroergometrieergebnisse im EL und TDL des in ↑ und ↓ unterteilten Probandenkollektivs	57
Tabelle 20:	Borg-Qualitäten im EL und TDL des in ↑ und ↓ unterteilten Probandenkollektivs	58

Abkürzungsverzeichnis

↑	Gruppe mit hohem Laktat im DT ($\geq 4,5$ mmol/l)
↓	Gruppe mit niedrigem Laktat im DT ($< 4,5$ mmol/l)
A \ddot{A} CO ₂	Atemäquivalent für Kohlenstoffdioxid
A \ddot{A} O ₂	Atemäquivalent für Sauerstoff
ADP	Adenosindiphosphat
AL	Auslaufen
ARGE BaWü	Arbeitsgemeinschaft der Leichtathletikverbände Baden und Württemberg
AT	Anaerobic Threshold
ATP	Adenosintriphosphat
AZ	Allgemeinzustand
bpm	beats per minute (Herzschläge pro Minute; HF)
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
d. h.	das heißt
DLV	Deutscher Leichtathletik Verband
DT	Dauertest
EKG	Elektro-Kardio-Gramm
EL	Einlaufen
EPO	Erythropoetin
FR-Fasern	Fast-/Fatigue-Resistent-Fasern
FT-Fasern	Fast-Twitch-Fasern
h	Stunde
H ₂ O	Wasser
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
Hb	Hämoglobin

HF	Herzfrequenz [1/min.]
HFavg.	Herzfrequenz average (Durchschnitt)
HFmax.	maximale Herzfrequenz [1/min.]
HFres.	Herzfrequenzreserve [1/min.]
Hkt	Hämatokrit
HZV	Herzzeitvolumen
i. d. R.	in der Regel
i. R.	im Rahmen
IAS	Individuelle Anaerobe Schwelle [km/h]
k. A.	keine Angabe
kg	Kilogramm
km/h	Kilometer pro Stunde
L	Langstreckler
LAmx.	maximale Blutlaktatkonzentration [mmol/l]
LASSmax.	maximales Laktat-Steady-State [mmol/l]
LDH	Laktatdehydrogenase
LLK	Laktatleistungskurve
LT	Lactate Threshold (Beginn Laktat-Anstieg)
M	Mittelstreckler
Max.	Maximum
MD	Median
min.	Minute
Min.	Minimum
ml	Milliliter
mmol/l	Millimol pro Liter
MST	Mehrstufentest
MW	Arithmetischer Mittelwert
O ₂	Sauerstoff
P	Phosphat
p	p-Wert / Signifikanzwert

PB	Persönliche Bestleistung
r	Korrelationskoeffizient nach Pearson
RCP	Respiratorischer Kompensationspunkt
RQ	Respiratorischer Quotient (V_{CO_2}/V_{O_2})
RR	Blutdruck (manuelle Messung nach Riva-Rocci mittels pneumatischer Manschette am Oberarm) [mmHg]
RT	Rampentest
s. o.	siehe oben
s. u.	siehe unten
SD	Standardabweichung
sek.	Sekunde
sog.	sogenannte
ST-Fasern	Slow-Twitch-Fasern
T	Körpertemperatur (Messung mittels Ohrthermometer) [°C]
TDL	Tempodauerlauf
u. a.	und andere
usw.	und so weiter
V	Laufgeschwindigkeit [km/h]
vBA	(peripher-) venöse Blutabnahme
V_{CO_2}	Kohlenstoffdioxidabgabe [l/min.]
vgl.	vergleiche
$V_{max.}$	maximale Laufgeschwindigkeit [km/h]
VO_2	Sauerstoffaufnahme [l/min.]
$VO_{2max.}$	maximale Sauerstoffaufnahme(-fähigkeit) [l/min.] oder [ml/kg KG/min.]
vs.	versus / gegen(übergestellt)
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
ZP	Zeitpunkt (0 - 5)

1 Einleitung und Fragestellungen

1.1 Entwicklung der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik

Laufen ist die natürlichste Form der Fortbewegung des Menschen. War das Laufen einst nur Mittel zum Zweck (Nahrungsbeschaffung, Flucht), so belegen Überlieferungen aus der Antike, dass bereits vor über 2000 Jahren das Laufen als Wettbewerb praktiziert worden ist. Schnell wurde klar, wer häufiger, intensiver und länger lief, verbesserte damit seine Sprint- und Ausdauerleistungsfähigkeit, was im Sinne eines Trainings das Wettkampfergebnis verbesserte.

R. Föhrenbach nennt dies die wesentlichen externen Größen der sportlichen Belastung (Trainingsumfang, -intensität, -häufigkeit und Art der Belastung), die jedoch erst in Zusammenschau mit den internen Veränderungen des Organismus (biochemische, morphologische und physiologische Adaptationsvorgänge) die Grundlage sportlichen Trainings impliziert (Föhrenbach, 1986). Die Wechselwirkungen dieser beiden Seiten zu analysieren und deren Einfluss auf die sportliche Leistungsfähigkeit zu überprüfen und zu objektivieren ist laut Föhrenbach die „*Aufgabe der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik*“ (Föhrenbach, 1986).

Die *Geburtsstunde der Sportmedizin* wird in das Jahr 1789 datiert. Damals führten die französischen Chemiker A. L. Lavoisier und A. Seguin Gasstoffwechseluntersuchungen am ruhenden und quantifiziert belasteten Menschen durch (JP, 1992). Erst 1911 war es im nächsten Schritt der Schotte Douglas, der einen nach ihm benannten Sack konstruierte, mit dem stichprobenweise expiratorische Atemvolumina und deren Zusammensetzung gemessen werden konnten (Douglas, 1911). Basierend auf Douglas' Untersuchungen entdeckte der englische Nobelpreisträger Hill 1924 die maximale Sauerstoffaufnahme-fähigkeit ($VO_2\text{max.}$). In der Zwischenzeit waren durch die deutschen Ärzte Speck (1883 erstes Drehkurbelergometer) und Zuntz (1889 erstes Laufbandergometer) die ersten Ergometer entwickelt worden (Hollmann, 2006, Zuntz N, 1889; 18:1-156).

1929 war es der deutsche Medizinprofessor Knipping, der mit seiner Arbeitsgruppe in Hamburg durch Kombination von Spirometrie und Ergometrie das erste Spiroergometer erschuf (Knipping, 1929); der „*Beginn der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik*“ (Hollmann/Strüder/Predel/Tagarakis, 2006). Damit war es möglich geworden die Leistungsfähigkeit eines Sportlers, sowie die körperliche Fitness kardio-pulmonal Erkrankter anhand spirometrischer Messungen bei definierter Belastung objektiv zu erheben.

Im Rahmen des technischen Fortschritts wurden in den 1960er Jahren zudem die EKG-Aufzeichnung während Ergometrie – zur Früherkennung von Koronarinsuffizienz – und offene Spirometriesysteme eingeführt (Hollmann/Strüder/Predel/Tagarakis, 2006).

Die $VO_2max.$ war lange Jahre der entscheidende diagnostische Parameter in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik. Ihre Bestimmung erforderte jedoch eine physiologische Ausbelastung der Athleten. Diese ist jedoch nicht nur von der tatsächlichen Leistungsfähigkeit eines Sportlers, sondern auch von dessen Motivation und den Rahmenbedingungen, die im Labor meist nicht mit dem Wettkampf vergleichbar sind, abhängig. Bei kardio-pulmonal schwer kranken Patienten ist sie aufgrund einer drohenden Dekompensation zudem in der Regel kontraindiziert. Deshalb führte Hollmann 1959 den Begriff des „*aerob-anaeroben Übergangs*“ ein, in dem er bei submaximalen Belastungen arterielle Laktatbestimmungen vornahm und so Rückschlüsse auf die metabolischen Vorgänge im Organismus ziehen und damit dessen aerobe Dauerleistungsfähigkeit bestimmen konnte (Hollman, 1959).

Aufgrund des messmethodisch geringeren Aufwandes und der methodisch geringeren Unsicherheiten im Vergleich zur Spirometrie setzte sich die *laktatbasierte Leistungsdiagnostik* in den folgenden Jahren weltweit als *Standard- und Kernverfahren der sportmedizinischen Arbeit* durch (Röcker and Dickhuth, 1996).

1.2 Leistungsphysiologie

Sportliche Leistung beruht in erster Linie auf dem Zusammenspiel von Kontraktion und Relaxation der Skelettmuskulatur. Die dafür notwendige Energie wird aus der Spaltung von *Adenosintri-phosphat (ATP)* zu *Adenosindiphosphat (ADP)* und *Phosphat (P)* gewonnen. Da die in der Skelettmuskelzelle gespeicherten ATP-Vorräte lediglich für wenige Kontraktionen ausreichen (de Marées and Heck, 2002), stehen verschiedene weitere Wege zur Energiebereitstellung zur Verfügung, die bei maximaler Beanspruchung – je nach Leistung und Leistungsdauer (vgl. Abbildung 1) – unterschiedlich durchlaufen und im Folgenden kurz beschrieben werden.

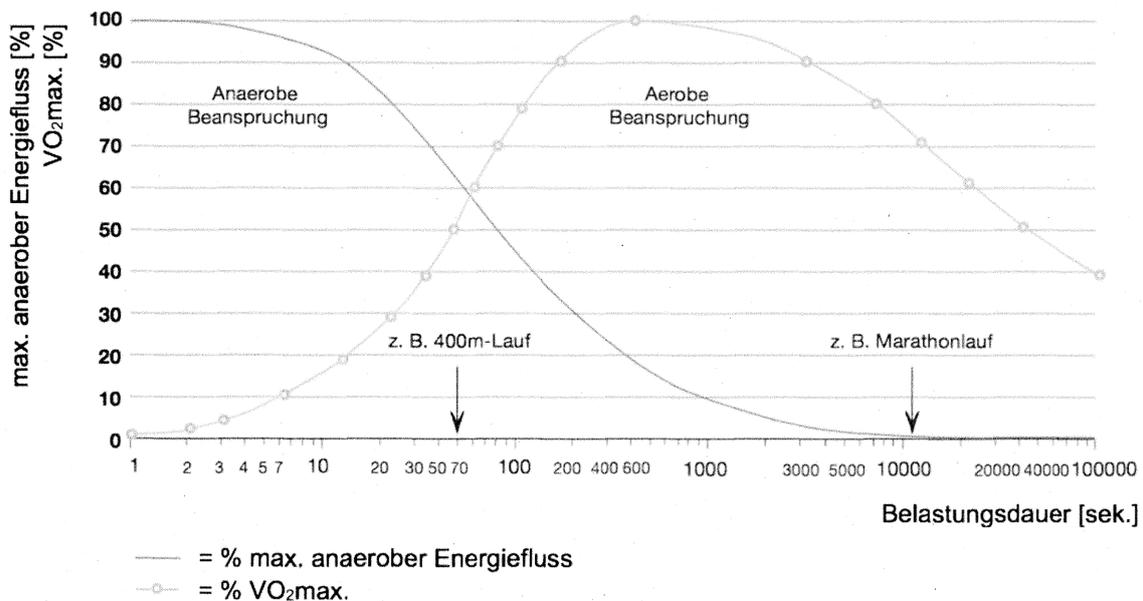


Abbildung 1: Beanspruchung der aeroben- und anaeroben Energiebereitstellung in Abhängigkeit der Dauer einer jeweils maximalen Leistung (modifiziert aus: Sport- und Präventivmedizin – Metabolische Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung in der Sportmedizin; Röcker *et al.*, 2010)

1.2.1 Anaerob-alkalotazide Energiebereitstellung

Sind die muskeleigenen ATP-Vorräte aufgebraucht muss ATP regeneriert werden. Dazu wird ADP mit dem Phosphat aus im Zytosol lokalisierten Kreatinphosphatspeichern, katalysiert durch das Enzym Kreatinkinase, rephosphoryliert (Klinke, 2003). Diese Energiebereitstellung benötigt *keinen Sauerstoff*

(*anaerob*) und produziert *kein Laktat (alaktazid)*, steht bei maximaler Belastung allerdings auch nur 10-15 Sekunden zur Verfügung (Gekle et al., 2010) und hat daher lediglich für Sprintdistanzen Relevanz.

1.2.2 Anaerob-laktazide Energiebereitstellung

Sind auch die Kreatinphosphatspeicher der Muskelzellen aufgebraucht so wird mittels *anaerober Glykolyse* im Muskel gespeichertes Glykogen ebenfalls im Zytosol der Zellen direkt zu Pyruvat verstoffwechselt, wodurch ATP entsteht. Pyruvat wird unter Sauerstoffmangel weiter zu Milchsäure abgebaut, die in Laktat und H^+ -Ionen dissoziiert. Aufgrund der Übersäuerung (Azidose) und der damit eingeschränkten zellulären Funktion kann über diesen Weg für maximal 2-3 Minuten Energie bereitgestellt werden (Gekle et al., 2010), weshalb dieses System vor allem für Mittelstreckler von Bedeutung ist.

1.2.3 Aerobe Energiebereitstellung

Durch die zeitlich verzögerte Anpassung der Ventilation und Steigerung des Herzzeitvolumens (HZV), als physiologische Antwort auf eine körperliche Belastung, wird in den Skelettmuskelzellen wieder genügend Sauerstoff (O_2) zur Verfügung gestellt. Damit wird die *aerobe Glykolyse* – der wichtigste Weg der Energiebereitstellung für Ausdauerleistungen – und die *Fettsäureoxidation* in Gang gesetzt. Dabei werden zunächst Muskelglykogen und Blutglukose zu Pyruvat verstoffwechselt, welches anschließend durch Decarboxylierung zu *Acetyl-CoA* weiterverarbeitet wird. Im weiteren Verlauf werden auch freie Fettsäuren im Rahmen der Lipolyse in der β -Oxidation unter Anwesenheit von O_2 (aerob) zu *Acetyl-CoA* gespalten. *Acetyl-CoA* ist Ausgangssubstrat für den im Mitochondrium lokalisierten *Citratzyklus*, welcher im Rahmen mehrerer enzymatischer Umbauprozesse $NADH + H^+$ und $FADH_2$ liefert, was in der anschließenden *Atmungskette* viel Energie in Form von ATP erzeugt (= oxidative Phosphorylierung). Dabei fallen Wasser (H_2O) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) als Stoffwechselendprodukte an, die über die Nieren (H_2O), bzw. die Atmung (CO_2) ausgeschieden werden können (vgl. Abbildung 2).

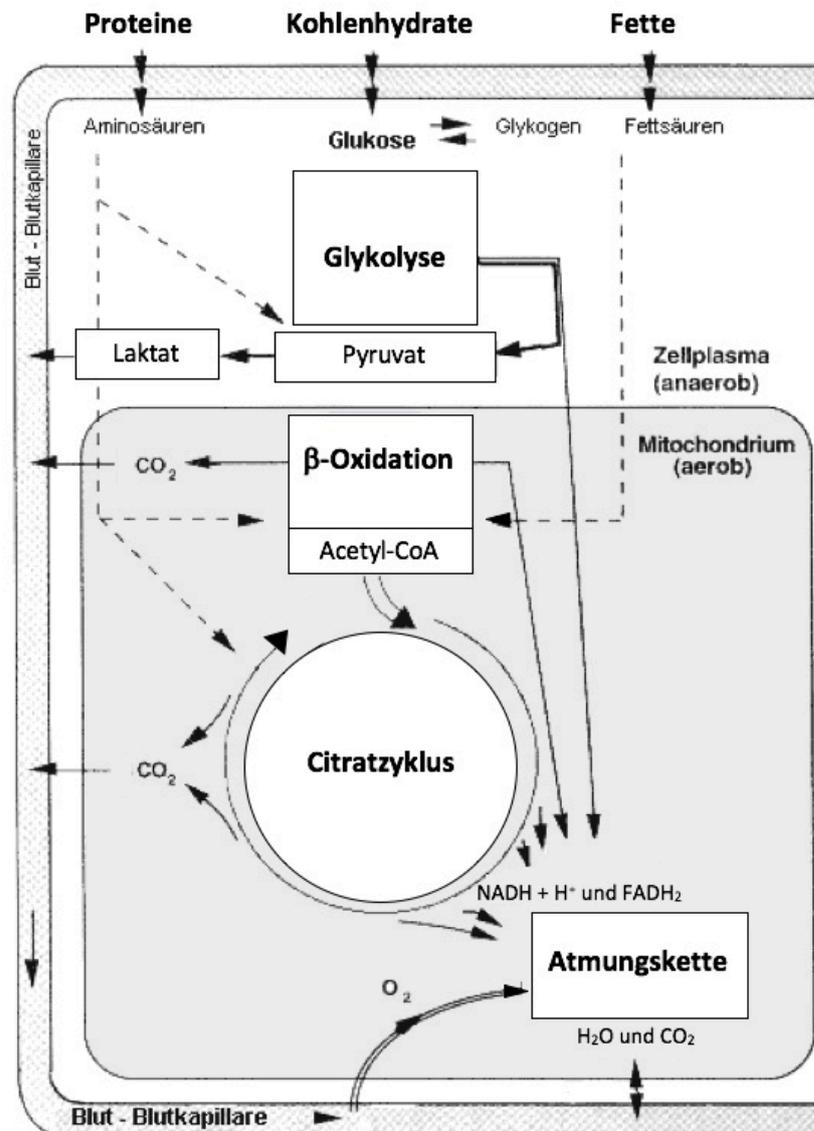


Abbildung 2: Energiegewinnung, Schema
(modifiziert aus: sportunterricht.de)

Übersteigt die Belastung und damit der muskuläre ATP-Bedarf jedoch die $VO_2max.$, so wird Pyruvat wiederum zu Laktat abgebaut (vgl. 1.2.2). Es kommt somit erneut zur Anreicherung von Laktat und damit zur Übersäuerung des Gewebes/Organismus, was in einer mit der Belastungsdauer zunehmenden Einschränkung, bis hin zum Erliegen dessen Funktionsfähigkeit (= Abbruch der Belastung) mündet. Das bedeutet, dass *bei hohen Intensitäten der Laktattoleranz* (Pufferkapazität und Laktatelimination in Leber, nichtbelastetem Skelett- und Herzmuskel) eine *wichtige und leistungslimitierende Rolle* zukommt.

1.3 Laktatleistungsdiagnostik

1.3.1 Methodik der laktatbasierten Leistungsdiagnostik

Bei der laktatbasierten Leistungsdiagnostik wird versucht mittels Bestimmung der Blutlaktatkonzentration den Übergangsbereich zwischen aerober- und anaerober Energiebereitstellung darzustellen. Dazu werden im Rahmen von *Mehrstufentests* – in der Regel auf dem Fahrrad- oder Laufbandergometer – bei stufenweiser konstanter Zunahme der Belastung regelmäßig nach jeder Stufe kapilläre Blutproben abgenommen und daraus die Plasma-Laktatkonzentration bestimmt (vgl. 2.5.1). Die einzelnen Laktatwerte werden mit den korrespondierenden Herzfrequenzwerten (HF) in ein zweidimensionales Koordinatensystem eingetragen und zur sogenannten Laktat-Leistungskurve (LLK) und Herzfrequenzkurve verbunden (siehe Abbildung 3).

In der Anfangsphase der Belastung (submaximal) erfolgt die Energiebereitstellung über aerobe Wege (alaktazid). Mit zunehmender Leistung reichert sich aufgrund anaerober Stoffwechselwege Laktat in den Skelettmuskelzellen an und tritt dann ins Blut über. Dieser Punkt des minimalen Quotienten aus Laktatkonzentration und Laufgeschwindigkeit bzw. der Beginn des Anstiegs der Laktatkurve wird als *Lactate Threshold (LT)* bezeichnet. Werden die Pufferkapazität und maximale Laktateliminationsleistung des Körpers überschritten steigt die Blutlaktatkonzentration überproportional an, es kommt zur subjektiven Erschöpfung und damit zum Abbruch der Belastung.

Für Ausdauersportler ist es entscheidend, eine höchstmögliche Leistung im aeroben-/submaximalen Belastungsbereich möglichst lange aufrecht erhalten zu können. Diese Dauerleistungsgrenze wurde 1976 von Mader *et al.* bei einer Blutlaktatkonzentration von 4 mmol/l festgelegt und als „*aerob-anaerobe Schwelle*“ bezeichnet (Mader *et al.*, 1976). Sie ist gleichbedeutend mit der höchsten Belastung, bei der Laktatproduktion und -elimination gerade noch im Gleichgewicht sind, was als „*maximales Laktat-Steady-State*“ (*LASSmax.*) bezeichnet wird (Heck and Rosskopf, 1993).

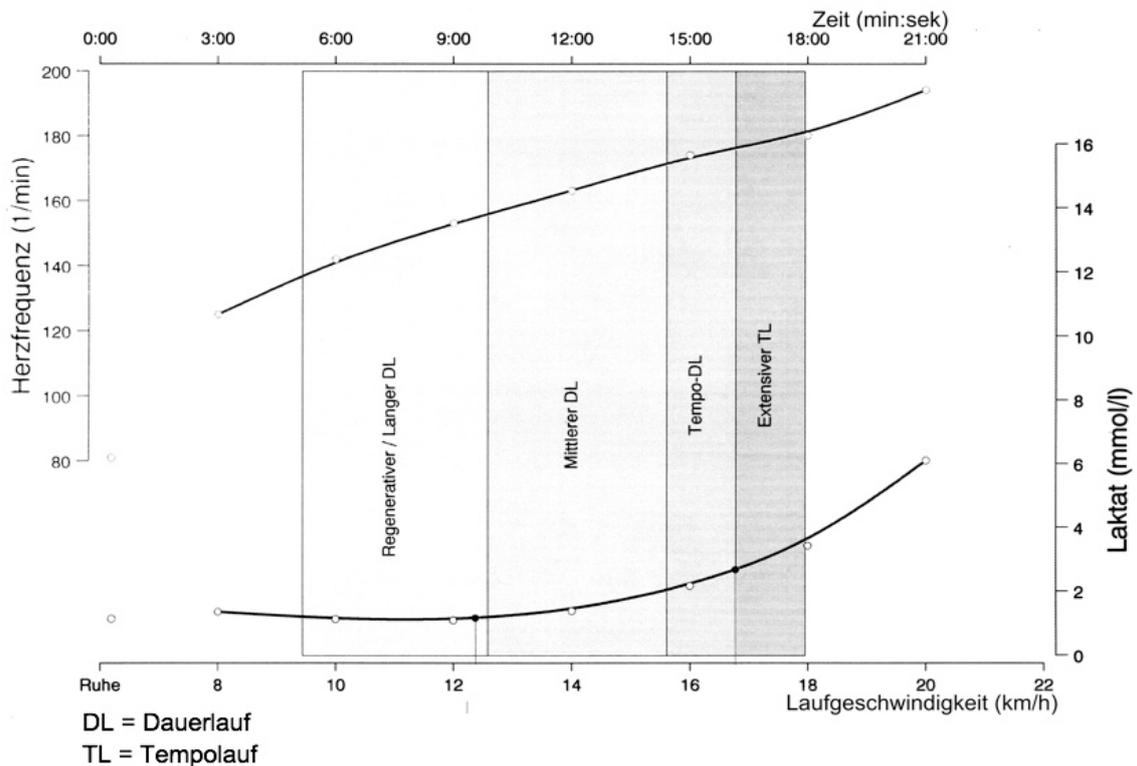


Abbildung 3: Laktatleistungskurve (LLK) und Herzfrequenzkurve

Im Laufe der Jahre entwickelten sich diverse Schwellenkonzepte, die letztlich alle das Ziel verfolgen die Ausdauerleistungsfähigkeit eines Sportlers zu objektivieren und damit seinen aktuellen Leistungsstand zu erfassen. Auf dieser Basis können im weiteren Verlauf optimale Trainingsbereiche bzw. Laufgeschwindigkeiten zur Trainingssteuerung vorgegeben und Wettkampfleistungen prognostiziert werden.

Aufgrund vermeintlich zu großer Belastungen für Athleten mit hoher Ausdauerleistungsfähigkeit wurde die fixe 4 mmol-Schwelle jedoch zugunsten der „Individuell-Anaeroben-Schwelle“ (IAS) verlassen (Stegmann and Kindermann, 1982).

In der vorliegenden Studie wurde die IAS nach Dickhuth *et al.* verwendet, die als Laufgeschwindigkeit bei einer Laktatkonzentration + 1,5 mmol oberhalb der Konzentration des LT definiert ist (Dickhuth et al., 1991).

1.3.2 Bedeutung der laktatbasierten Leistungsdiagnostik bei der Charakterisierung der laufspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit

Mit Hilfe der laktatbasierten Leistungsdiagnostik wird der *Ist-Wert* eines Athleten erhoben. Die sportmedizinische Leistungsdiagnostik hat neben der Erhebung des aktuellen Leistungsstandes jedoch folgende weitere Ziele (Maier et al., 2016):

- Beurteilung der Leistungsentwicklung
- Optimierung der Trainingssteuerung
- Prognose des Leistungspotentials

Dies sind die wesentlichen Gründe, weshalb die laktatbasierte Leistungsdiagnostik heutzutage eine zentrale Rolle im Regelkreis der Trainingssteuerung spielt.

Aufgrund der unterschiedlichen Wettkampfdistanzen und der damit verbundenen unterschiedlichen Belastungszeiten werden an die Athleten im Mittel- und Langstreckenlauf unterschiedliche disziplinspezifische Anforderungsprofile (*Soll-Wert*) hinsichtlich ihrer Ausdauerleistungsfähigkeit gestellt.

Durch die Bestimmung von LT und IAS lassen sich unterschiedliche Trainings- bzw. Laktatbereiche in Form von Geschwindigkeits- und Herzfrequenzangaben (in %-IAS) ansteuern (Coen et al., 1991). Im Bereich unterhalb des LT sollten regenerative- und lange Belastungen erfolgen (ausschließlich aerob). Zwischen LT und IAS, im aerob-anaeroben Übergangsbereich, sollten mittlere Belastungen bis hin zu Tempoausdauerbelastungen stattfinden. Langstreckenläufer befinden sich dabei bereits im wettkampfspezifischen Trainingsbereich. Oberhalb der IAS, im anaeroben Bereich, sollte extensives Tempotraining mit Umfängen unterhalb der Wettkampfdistanz (v. a. bei Mittelstrecklern) erfolgen.

Röcker *et al.* zeigten, dass die IAS „*der stärkste Prädiktor der spezifischen Leistungsfähigkeit für längere Laufdistanzen ist*“ und damit, in Bezug auf die

Prognose des Leistungspotentials, „eine breite Spanne von verschiedenen Wettkampfdistanzen mit vergleichsweise hoher Genauigkeit vorhergesagt werden kann“ (Röcker et al., 1997). Laut Röcker et al. misst die IAS „primär die aerob-oxidative Leistungsfähigkeit“, welche als „wesentliche Größe für die Ausprägung in den Ausdauersportarten gilt“ (Röcker et al., 1997, Coyle, 1995).

Bei genauerer Betrachtung wird allerdings klar, dass die Bestimmung der IAS mittels Laktat – einer eigentlich primär glykolytisch-anaerob determinierten Variablen – einer *indirekten* Ermittlung der aerob-oxidativen Ausdauerleistungsfähigkeit entspricht.

Mit Abnahme der Laufstrecke tritt die IAS zudem in den Hintergrund und hat beispielsweise für die 1.500 m Wettkampfdistanz bereits eine geringere Relevanz (Röcker et al., 1997). Bei diesen kürzeren Laufdistanzen, die in der Regel der Mittelstrecke zugeordnet werden, rücken hingegen „die *Maximalmesswerte* (*Vmax.*, *HFmax.* und *LAmx.*) als *Prädiktoren*“ (Röcker et al., 1997) der anaerob-laktaziden Leistungsfähigkeit in den Vordergrund (Green, 1994). In der Praxis der aktuellen sportmedizinischen Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung spielen sie aber nach wie vor nur eine untergeordnete Rolle (vgl. Kapitel 1.1).

Außerdem zeigten Röcker et al. bereits bei der Betrachtung von Ruhelaktatwerten – auch bei ausdauertrainierten Wettkampfsportlern – eine *hohe interindividuelle Variabilität* (im Einzelfall Werte zwischen 0,4 und 3,5 mmol/l) (Röcker et al., 1997), die durch diverse Faktoren wie Ernährung (Bergström et al., 1967), Vorbelastung und der jeweiligen Muskelfaserbeteiligung (Brooks, 1985) bedingt sein kann.

Die Nutzung von Belastungsvorgaben aus einer leistungsdiagnostischen Untersuchung zur Ansteuerung der geplanten Belastungsintensität und damit einer definierten metabolischen Belastungsreaktion ist weit verbreitet. Dabei werden die Ergebnisse der Leistungsdiagnostik genutzt, um vermeintlich individuelle

Vorgaben in Form von Laufgeschwindigkeits- und/oder Herzfrequenzbereichen zu geben. Gegenüber der ausschließlich über das subjektive Belastungsempfinden gesteuerten Belastungsintensität („*self-paced*“) soll dieses Verfahren ein genaueres Erreichen einer gewünschten metabolischen Belastungsreaktion unterstützen.

Scharhag-Rosenberger *et al.* wiesen jedoch nach, dass die metabolische Belastungsreaktion bei einem höheren, jedoch jeweils identischen Prozentsatz der $VO_2max.$ individuell zunehmend mehr variiert. Dies äußert sich vor allem in einer größeren Streubreite der Laktatantwort und einer größeren Zahl frühzeitiger Belastungsabbrüche (Scharhag-Rosenberger *et al.*, 2010). Darüber hinaus beschreiben diverse andere Autoren z. T. erhebliche individuelle Unterschiede in der metabolischen Reaktion (Blutlaktatkonzentration) auf definierte Belastungsreize (in %-HFmax., %-HFres., $VO_2max.$) sowohl bei Sportlern mit moderater als auch hoher anaerober Ausdauerleistungskapazität (Katch *et al.*, 1978; Weltman *et al.*, 1989; Weltman *et al.*, 1990; Meyer *et al.*, 1999).

Die Ursache eines *interindividuell differenten Laktatverhaltens* bei einer auf der Grundlage leistungsdiagnostischer Ergebnisse vorgegebenen Belastungsintensität ist unklar. Denkbar wäre, dass ein unterschiedlicher Trainingszustand der Ausdauerleistungsfähigkeit eine Rolle spielt. Möglich erscheint auch, dass die Intensitätsvorgaben bei Mittel- und Langstreckenläufern, deren Trainingsinhalte sich nicht nur im Laufkilometerumfang unterscheiden und die i. d. R. auch eine unterschiedlich ausgeprägte anaerobe Kapazität aufweisen, zu einem differenten Laktatverhalten bei formal gleichen Trainingsbelastungen führen.

Des Weiteren ist zu vermuten, dass sich das differente Laktatverhalten auch im *subjektiven Belastungsempfinden* widerspiegelt. So zeigt sich zumindest unter stufenförmig zunehmender Belastungsintensität im Mehrstufentest ein Zusammenhang zwischen dem Laktatverhalten und dem mittels sogenannter *Borg-Skala* erfassten subjektiven Belastungsempfinden (RPE-Werte, siehe Kapitel 2.4.4) (Scherr *et al.*, 2013).

1.4 Fragestellungen der Dissertation

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Stoffwechselprodukt *Laktat* als Marker für die Ausdauerleistungsfähigkeit im aerob-anaeroben Übergangsbereich *aussagekräftig* zu sein scheint. In der Trainingssteuerung kann, unter Nutzung der laktatbasierten Leistungsdiagnostik, zur Vorgabe definierter und damit standardisierter Belastungsvorgaben jedoch eine relevante *interindividuelle Variabilität* in der Laktatantwort resultieren. In der vorliegenden Studie wurde vor, während und nach einer definierten, IAS-Laktat-basierten Tempodauerlaufbelastung (TDL) die metabolische Antwort im Plasma mittels Bestimmung des Laktats im Kapillarblut untersucht.

Dabei wurden folgende Fragestellungen formuliert:

- Fragestellung 1:
Zeigt sich bei der Ansteuerung einer *definierten, gleichen relativen Belastungsintensität* (TDL bei 105 % der zuvor ermittelten IAS) bei Mittel- und Langstreckenläufern eine *vergleichbare* Laktatantwort im Kapillarblut?
- Fragestellung 2:
Lässt sich eine mögliche *höhere* individuelle Variabilität der metabolischen Antwort im Plasma durch die bestrittene Hauptwettkampfstrecke (Mittel- vs. Langstreckenläufer) erklären?
- Fragestellung 3:
Lässt sich eine mögliche *höhere* individuelle Variabilität der Laktatantwort im Kapillarblut durch leistungsdiagnostische- bzw. spiroergometrische Befunde oder die bestrittene Hauptwettkampfstrecke (Mittel- vs. Langstreckenläufer) erklären?
- Fragestellung 4:
Zeigen Läufer, die bei gleicher relativer Belastungsintensität in einer Dauerbelastung (TDL bei 105 % der zuvor ermittelten IAS) ein *höheres* Laktatprofil aufweisen, ein dazu passendes *höheres* subjektives Belastungsempfinden?

2 Material und Methoden

2.1 Studiendesign

Für Studienteil III des Projekts „*Optimierung von Training und Wettkampf: Belastungs- und Anpassungsmanagement im Spitzensport*“, um den es in dieser Arbeit geht, liegt, gemäß den Richtlinien der Deklaration von Helsinki, ein positives Votum der Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Eberhard-Karls-Universität Tübingen vor (*Ethikantrag: 098/2013BO1*).

In dieser Studie (Studiendesign siehe Abbildung 4) wurden gut trainierte Mittel- und Langstreckenläufer an *Untersuchungstag 1* zunächst einer laktatbasierten Leistungsdiagnostik in Form eines laufbandergometrischen Mehrstufentests (*MST*) zur Bestimmung der Laufgeschwindigkeit an der individuellen anaeroben Schwelle (*IAS*) und einem anschließenden Rampentest (*RT*) zur Erfassung der maximalen Sauerstoffaufnahmefähigkeit ($VO_{2max.}$) mittels Spiroergometrie unterzogen.

Drei bis maximal zehn Tage später absolvierten die Athleten an *Untersuchungstag 2* eine standardisierte Laufbandbelastung als Dauertest (*DT*) mit einer konstant gehaltenen Laufgeschwindigkeit. Diese wurde für jeden Probanden bei 105 % seiner zuvor im *MST* bestimmten *IAS* festgelegt. Der *DT* diente der Erfassung der *metabolischen Stressantwort* auf einen Belastungsreiz gleicher relativer Belastungsintensität (105 % *IAS*). Dazu wurden bei den Läufern vor und nach der Belastung venöse Blutproben entnommen.

Diese Belastungstests fanden nach einem ersten Trainingsaufbau im Herbst und Winter 2014/2015 zwischen November und März statt. Danach wurden die Athleten gebeten im weiteren Saisonverlauf ihr Training auf standardisierten Bögen zu dokumentieren (siehe Anhang 4).

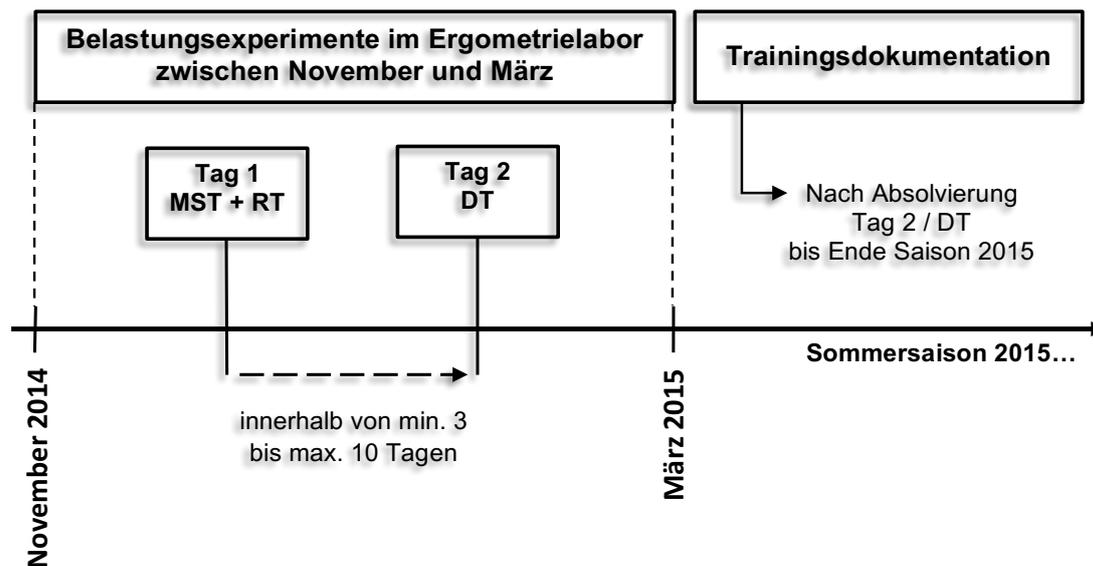


Abbildung 4: Studiendesign

2.2 Probandenrekrutierung und Ein- / Ausschlusskriterien

Die Rekrutierung des Probandenkollektivs erfolgte mit Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft „*Lauf*“ der Leichtathletikverbände Baden und Württemberg (ARGE BaWü). Sie stellte Listen mit den Kontaktdaten der aktuellen A-, B-, C-, und L-Kaderathleten des Deutschen Leichtathletik Verbandes (DLV) und der ARGE BaWü zur Verfügung. Zusätzlich erfolgte die Rekrutierung über persönliche Kontakte meinerseits zu deutschen Spitzenläufern.

Durch die Rekrutierungsmaßnahme wurden 26 Athleten via E-Mail in einem Anschreiben (siehe Anhang 1) über die Inhalte und Ziele des Studienteils III des Projekts „*Optimierung von Training und Wettkampf: Belastungs- und Anpassungsmanagement im Spitzensport*“ informiert und konnten anschließend per Einverständniserklärung (siehe Anhang 2) über ihre Teilnahme entscheiden.

Die kontaktierten Athleten erfüllten unserer Einschätzung nach – anhand ihrer Wettkampfleistungen und ihrer allgemeinen Leistungsentwicklung der vergangenen Jahre – die im Folgenden aufgeführten *Einschlusskriterien*.

Eingeschlossen wurden alle mit der Studie einverständenen Probanden, die folgende Kriterien erfüllten:

- Schriftliche Einwilligung zur Teilnahme durch den Probanden nach vorheriger mündlicher und schriftlicher Aufklärung über die Inhalte und Ziele der Studie
- Männliches Geschlecht und Volljährigkeit bei Studieneintritt
- Kaderzugehörigkeit (A-, B-, C- oder L-Kader) oder äquivalente Wettkampfleistungen
- Laufspezifische Ausdauerleistungsfähigkeit ($VO_2\text{max.} > 60 \text{ ml/kg/min.}$; Laufgeschwindigkeit an der IAS $> 16,0 \text{ km/h}$)

Alle Probanden mussten vor Studieneintritt einen standardisierten klinischen Fragebogen (siehe Anhang 3) beantworten und erhielten im Anschluss eine sportmedizinische Eingangsuntersuchung, wobei folgende Befunde zum *Studienausschluss* führten:

- Bekannte Abhängigkeiten (Nikotin, Alkohol, Drogen)
- Akute oder chronische Erkrankungen des Bewegungsapparates, die zu einer gesundheitlichen Gefährdung des Probanden während der Messungen führen könnten
- Akute oder chronische internistische Erkrankungen, vor allem Erkrankungen des kardio-vaskulären Systems, die zu einer gesundheitlichen Gefährdung des Probanden während der Messungen führen könnten
- Höhengedächtnis $> 1.500 \text{ m ü.N.N.}$ in den vergangenen vier Wochen vor Studieneintritt

2.3 Probandenkollektiv

Das *finale Probandenkollektiv* mit vollständig absolviertem Dauertest (DT), welches in die statistische Auswertung eingeschlossen wurde, umfasste $n = 20$ Athleten. Bei den *spiroergometrischen Daten* reduzierte sich das Kollektiv auf definitiv $n = 18$ Athleten. Die unter *Einschränkung* eingeschlossenen Probanden und „drop-outs“ sind im Folgenden detailliert aufgelistet:

- unter Einschränkung eingeschlossen: (+ 4 Athleten) *IAS-Laufgeschwindigkeit aus MST lediglich 15,5 bis 15,7 km/h, Einschlusskriterien (IAS > 16,0 km/h) formal nicht erfüllt, aufgrund Spezialisierung auf reinen Mittelstreckenlauf und durchweg hoher VO₂max.-Werte (65,0 bis 66,0 ml/kg KG/min.) nach Rücksprache mit leitendem Prüfarzt Athleten trotzdem eingeschlossen.*
- drop-outs, -1 Athlet: (n = 20) *Abbruch TDL nach 22 min. i. R. DT, aufgrund Allgemeininfekt. Auslaufen (AL) + restliche Messungen absolviert.*
- drop-outs, -1 Athlet: (n = 19) *Technische Probleme i. R. RT. Keine Spiroergometriedaten vorhanden.*
- -1 Athlet: (n = 18) *Kein RT bzw. keine Ausbelastung, aufgrund Allgemeininfekt eine Woche zuvor. Keine Spiroergometriedaten vorhanden. Nur MST, da seit 2 Tagen kein Fieber mehr und aktuell guter AZ.*

Die *Probandencharakteristika* des gesamten Kollektivs sind in Tabelle 1 dargestellt.

Zur exakteren Auswertung wurde das Probandenkollektiv außerdem in *Mittel- (M) und Langstreckler (L)* unterteilt. Die Hauptwettkampfstrecken 800 m, 1.500 m und 3.000 m Hindernis wurden dabei der Mittelstrecke zugeordnet. Die 5.000 m, 10.000 m und Halbmarathon der Langstrecke. Eine genaue Gegenüberstellung der jeweiligen Charakteristika ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 1: Charakteristik des gesamten Probandenkollektivs | Anthropometrische Daten, Trainingsdaten und persönliche Bestleistungen (PB)

Gesamt: n = 20		MW	± SD
Anthropometrische Daten			
Alter [Jahre]		24,7	± 3,9
Größe [cm]		181,3	± 6,9
Gewicht [kg]		68,7	± 6,8
BMI [kg/m ²]		20,8	± 1,0
Körperfett [%]		8,7	± 2,2
Bauchumfang [cm]		78,6	± 3,3
relatives Herzvolumen [ml/kg KG]		14,1	± 1,1
IAS [km/h]		16,7	± 0,7
VO ₂ max. [ml/kg KG/min.] (n = 18)		67,8	± 2,9
Trainingsdaten			
Leistungsorientiertes Lauftraining [Jahre]		9,3	± 4,0
Trainingskilometer pro Woche [km] (anamnestisch aus der vorherigen Saison)		88,0	± 27,3
Trainingskilometer pro Woche [km] (MW der ersten 12 Wochen der Erhebung nach dem DT)		85,6	± 38,8
PB			
800 m [min.]	(n = 16)	01:54,35	± 00:03,71
1.500 m [min.]	(n = 19)	03:52,89	± 00:04,95
3.000 m Hindernis [min.]	(n = 3)	09:05,78	± 00:24,33
5.000 m [min.]	(n = 14)	14:58,06	± 00:34,57
10.000 m [min.]	(n = 5)	30:50,85	± 01:00,53
Halbmarathon [min.]	(n = 6)	69:47,83	± 03:05,46

Tabelle 2: Charakteristik des in M und L unterteilten Probandenkollektivs | Anthropometrische Daten, Trainingsdaten und persönliche Bestleistungen (PB)

Gesamt: n = 20		M: n = 12 MW ± SD	L: n = 8 MW ± SD	p-Werte: < 0,05 = signifikant
Anthropometrische Daten				
Alter [Jahre]		24,6 ± 4,5	24,8 ± 3,2	0,929
Größe [cm]		182,3 ± 6,5	179,9 ± 7,7	0,476
Gewicht [kg]		69,4 ± 6,5	67,7 ± 7,6	0,607
BMI [kg/m ²]		20,8 ± 0,9	20,9 ± 1,1	0,979
Körperfett [%]		8,7 ± 2,4	8,8 ± 2,0	0,968
Bauchumfang [cm]		79,2 ± 3,5	78,3 ± 3,2	0,569
relatives Herzvolumen [ml/kg KG]		13,9 ± 1,1	14,3 ± 1,0	0,394
IAS [km/h]		16,4 ± 0,7	17,3 ± 0,5	0,006*
VO ₂ max. [ml/kg KG/min.] (n = 12 M bzw. n = 6 L)		67,4 ± 2,8	68,6 ± 3,3	0,413
Trainingsdaten				
Leistungsorientiertes Lauftraining [Jahre]		9,0 ± 3,7	9,6 ± 4,6	0,743
Trainingskilometer / Woche [km] (anamnestisch aus der vorherigen Saison)		71,3 ± 12,6	113,1 ± 23,7	< 0,0001*
Trainingskilometer / Woche [km] (MW erste 12 Wochen der Erhebung nach DT)		66,1 ± 26,6	114,9 ± 36,5	0,003*
PB				
800 m [min.] (n = 12/4)		01:53,40 ± 00:03,72	01:57,20 ± 00:01,86	0,074
1.500 m [min.] (n = 12/7)		03:51,77 ± 00:05,40	03:54,81 ± 00:03,64	0,206
3.000 m Hi. [min.] (n = 3/0)		09:05,78 ± 00:24,33	-	-
5.000 m [min.] (n = 6/8)		15:26,87 ± 00:32,28	14:36,45 ± 00:15,16	0,002*
10.000 m [min.] (n = 0/5)		-	30:50,85 ± 01:00,53	-
Halbmarath. [min.] (n = 0/5)		-	68:55,40 ± 02:29,58	-

Weiter wurde das Probandenkollektiv anhand der maximalen Laktatwerte im DT zu Zeitpunkt 3 in eine *hoch-* (↑) und eine *niedrig-* (↓) *Laktat-Gruppe* unterteilt. Der *Cut-off* lag bei *4,5 mmol/l*, was aus Abbildung 9 bzw. Kapitel 3.3 hervorgeht. Die genaue Gegenüberstellung der jeweiligen Charakteristika ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Charakteristik des in ↑ und ↓ unterteilten Probandenkollektivs | Anthropometrische Daten

Gesamt: n = 20	↑: n = 9 MW ± SD	↓: n = 11 MW ± SD	p-Werte: < 0,05 = signifikant
Anthropometrische Daten			
Alter [Jahre]	25,2 ± 1,3	24,2 ± 1,2	0,569
Größe [cm]	179,9 ± 2,3	182,5 ± 2,1	0,412
Gewicht [kg]	68,1 ± 2,3	69,2 ± 2,1	0,729
BMI [kg/m ²]	21,0 ± 0,3	20,7 ± 0,3	0,529
Körperfett [%]	9,4 ± 0,7	8,2 ± 0,6	0,236
Bauchumfang [cm]	78,9 ± 1,1	78,8 ± 1,0	0,912
relatives Herzvolumen [ml/kg KG]	14,2 ± 0,4	14,0 ± 0,3	0,744
IAS [km/h]	17,0 ± 0,2	16,5 ± 0,2	0,153
VO ₂ max. [ml/kg KG/min.] (n = 7 ↑ bzw. n = 11 ↓)	68,9 ± 1,1	67,1 ± 0,9	0,198

2.4 Diagnostik im Ergometrielabor

2.4.1 Sportmedizinische Eingangsuntersuchung

Alle Untersuchungen und Tests erfolgten im Ergometrielabor der Abteilung für Sportmedizin des Universitätsklinikums Tübingen. Die Räumlichkeiten sind vollklimatisiert auf 20-24 °C bei 40-50 % relativer Luftfeuchtigkeit.

Zu Beginn von Untersuchungstag 1 durchliefen die Probanden, vor den laufbandergometrischen Belastungstests (MST und RT), eine sportmedizinische Eingangsuntersuchung. Diese umfasste zunächst die Überprüfung der Ein- und Ausschlusskriterien anhand des zuvor ausgefüllten standardisierten klinischen Fragebogens (siehe Anhang 3). Darin wurden anamnestische Fragen zu Stoffwechsel- und kardio-vaskulären Erkrankungen, sowie zu Verletzungen und Erkrankungen des muskulo-skelettalen Systems gestellt. Weiter wurden Angaben zur allgemeinen Infektanfälligkeit und zur Belastungsverträglichkeit erhoben. Außerdem erfolgte eine Trainingsanamnese und die Erfassung der aktuellen persönlichen Bestleistungen (PB). Anschließend wurden die anthropometrischen Daten erhoben. Die Körperfettmessung erfolgte dabei mittels Kalipometrie anhand der 3-Falten-Formel nach Lohman (Lohman, 1981). Zuletzt erfolgte eine ausführliche körperliche Untersuchung, sowie ein Ruhe-EKG, eine manuelle Blutdruckmessung mittels Manschette an beiden Oberarmen und eine Echokardiographie.

2.4.2 Mehrstufentest zur Bestimmung der Laufgeschwindigkeit an der IAS und der Laufgeschwindigkeit im Dauertest

Die Probanden wurden dazu angehalten am Tag vor den laufbandergometrischen Tests lediglich ein moderates Training in Form eines maximal 60-minütigen Dauerlaufs im GA1-Bereich (Grundausdauer 1) zu absolvieren, um die Vergleichbarkeit der Testergebnisse zu gewährleisten.

An *Untersuchungstag 1 (MST und RT)* erfolgten die Tests in *nicht nüchternem* Zustand.

Den Athleten wurde zunächst ein 12-Kanal-EKG zur kontinuierlichen Messung der Herzfrequenz angelegt und das rechte Ohrläppchen – zur Förderung der Hautdurchblutung vor Gewinnung der kapillären Blutproben zur Bestimmung der Laktatkonzentration – mit Finalgon® Crème eingerieben.

Der erste Teil des Testprotokolls an Untersuchungstag 1 bestand aus einem standardisierten MST auf dem Laufbandergometer (siehe Abbildung 5). Zu Beginn wurden in Ruhe via EKG die Herzfrequenz, sowie mittels Manschette am Oberarm der Blutdruck und durch Entnahme einer kapillären 20 µl Blutprobe aus dem hyperämisierten Ohrläppchen ein Ausgangslaktatwert bestimmt. Die Messung der Blutlaktatkonzentration erfolgte mittels enzymatisch-amperometrischer Technologie (Details siehe Kapitel 2.5.1).

Aufgrund des im Labor fehlenden Luftwiderstandes wurde das Laufband auf 1% Steigungswinkel voreingestellt, da dieser etwa die gleiche Gegenkraft wie der sonst übliche Luftwiderstand in laufsportspezifischen Geschwindigkeitsbereichen erzeugt (Jones and Doust, 1996).

Mit 8 km/h Laufgeschwindigkeit starteten die Athleten dann die erste Belastungsstufe. Nach jeweils drei-minütiger Stufendauer erfolgte ein kurzer Stopp des Laufbandes zur Abnahme einer kapillären Blutprobe zur Bestimmung der aktuellen Laktatkonzentration. Anschließend wurde die Laufgeschwindigkeit je Stufe um 2 km/h erhöht.

Da wir für das gesamte Probandenkollektiv mit einer Laufgeschwindigkeit an der IAS im Bereich von 16 bis 18 km/h rechneten wurde der MST mit einem definierten Ende nach der 20 km/h-Stufe limitiert, um eine vorzeitige Ausbelastung der Athleten zu vermeiden. Ein Athlet beendete den MST aufgrund peripherer Erschöpfung bereits vorzeitig nach einer Minute Laufzeit bei 20 km/h. Alle anderen Athleten liefen die 20 km/h-Stufe wie geplant über drei Minuten durch.

Eine- und fünf Minuten nach Ende des MST erfolgte erneut eine Blutdruckmessung am Oberarm. Drei Minuten nach Ende des MST wurde zudem noch eine kapilläre Blutprobe zur Laktatbestimmung abgenommen. Anschließend hatten die Athleten 60 Minuten Pause, in der sie nach Belieben trinken und essen durften.

Aus dem Verlauf der stufenweise gemessenen Laktatkonzentrationen wurde die Laufgeschwindigkeit an der IAS nach Dickhuth *et al.* bestimmt (Dickhuth *et al.*, 1991; Dickhuth *et al.*, 1999). Die Laufgeschwindigkeit für den TDL i. R. des DT an Untersuchungstag 2 wurde auf 105 % der im MST ermittelten Laufgeschwindigkeit an der IAS festgelegt.

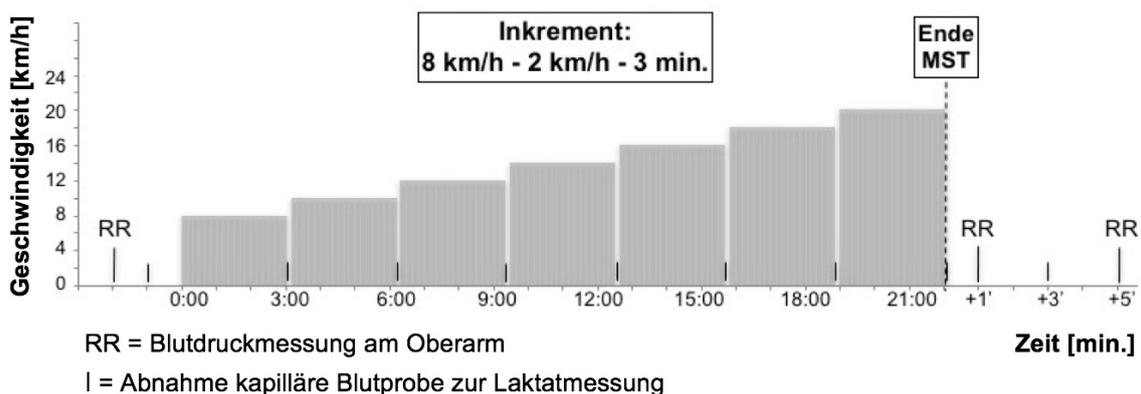


Abbildung 5: Testprotokoll Untersuchungstag 1, Teil 1 - MST

2.4.3 Rampentest zur Bestimmung der respiratorischen Schwellenwerte

Im zweiten Teil des Testprotokolls an Untersuchungstag 1 hatten die Athleten einen RT auf dem Laufbandergometer zu absolvieren (siehe Abbildung 6). Die Herzfrequenzmessung erfolgte wieder kontinuierlich über eine 12-Kanal-EKG-Ableitung. Zusätzlich wurde den Probanden eine über Mund und Nase dichtsitzende Atemmaske angelegt, wodurch i. R. einer *Spiroergometrie* (vgl. auch Kapitel 2.5.3) sowohl die Atemvolumina, als auch die expiratorischen O₂- und CO₂-Werte mittels „*Breath-by-breath-Methode*“ (Beaver *et al.*, 1981) kontinuierlich bei jedem Atemzug gemessen wurden. Daraus konnten dann die Sauer-

stoffaufnahme (VO_2), der respiratorische Quotient (RQ), die Atemäquivalente für O_2 und CO_2 ($A\ddot{A}O_2$ bzw. $A\ddot{A}CO_2$), sowie die spiroergometrischen Schwellenwerte „Anaerobic Threshold“ (AT) und „Respiratorischer Kompensationspunkt“ (RCP) bestimmt und über interne Algorithmen des Gerätes automatisch errechnet werden.

Der AT-Punkt (auch VT bzw. VT1 = Ventilatorische Schwelle 1) ist mit dem LT-Punkt der laktatbasierten Leistungsdiagnostik, also dem Übergang vom aeroben- zum gemischt aerob-anaeroben Bereich, vergleichbar und entspricht dem ersten überproportionalen Anstieg der Ventilation. Er darf *nicht* mit der laktatbasierten anaeroben Schwelle verwechselt werden, die in der Regel bei höherer Intensität liegt.

Der RCP (auch VT2 = Ventilatorische Schwelle 2) liegt in der Regel etwas verzögert zur IAS und kennzeichnet etwa das Ende des aerob-anaeroben Bereichs und entspricht dem zweiten überproportionalen Anstieg der Ventilation (Kindermann, 2004; Scharhag-Rosenberger, 2010).

Zunächst erfolgte abermals – nach Hyperämisierung mittels Finalgon® Crème – durch Abnahme einer kapillären Blutprobe aus dem Ohrläppchen die Bestimmung des Ruhelaktatwertes. Die kontinuierliche Laufbandsteigerung wurde wieder auf 1 % voreingestellt.

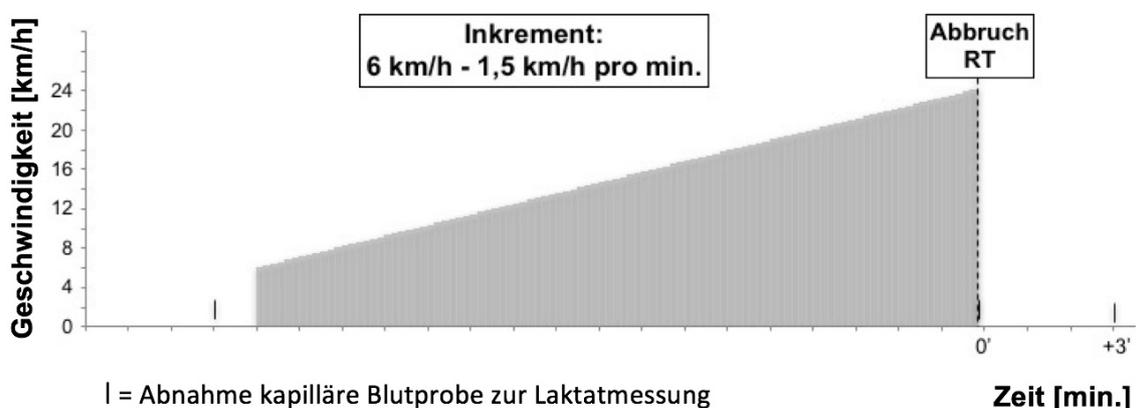


Abbildung 6: Testprotokoll Untersuchungstag 1, Teil 2 - RT

Mit einer Laufgeschwindigkeit von 6 km/h starteten die Athleten dann den RT. Im Verlauf steigerte sich die Laufgeschwindigkeit kontinuierlich um 1,5 km/h pro Minute. Dabei wurde explizit die *maximale Ausbelastung* der Athleten bis zu deren peripherer Erschöpfung angestrebt.

Mittels der kontinuierlichen Spirometrie- und EKG-Ableitung wurde die maximale Sauerstoffaufnahme ($VO_2\text{max.}$), sowie die maximale Herzfrequenz (HFmax.) und die maximale Laufgeschwindigkeit ($V\text{max.}$) zur Bestimmung der maximalen Abbruchleistung ermittelt.

2.4.4 Dauertest

Laut Studiendesign sollte *Untersuchungstag 2* mindestens drei Tage, jedoch maximal zehn Tage nach *Untersuchungstag 1* stattfinden (vgl. Abbildung 4). Außerdem sollten die Probanden am Vortag wiederum lediglich ein moderates Training in Form eines maximal 60-minütigen Dauerlaufs im GA1-Bereich absolvieren. Das Testprotokoll an *Untersuchungstag 2* sah eine Einlaufphase (EL) von 15 min., den DT in Form eines TDLs über 30 min. und eine Auslaufphase (AL) von 15 min. auf dem Laufbandergometer vor (siehe Abbildung 7). Der TDL sollte mit einer Laufgeschwindigkeit von 105 % der im MST ermittelten Laufgeschwindigkeit an der IAS absolviert werden.

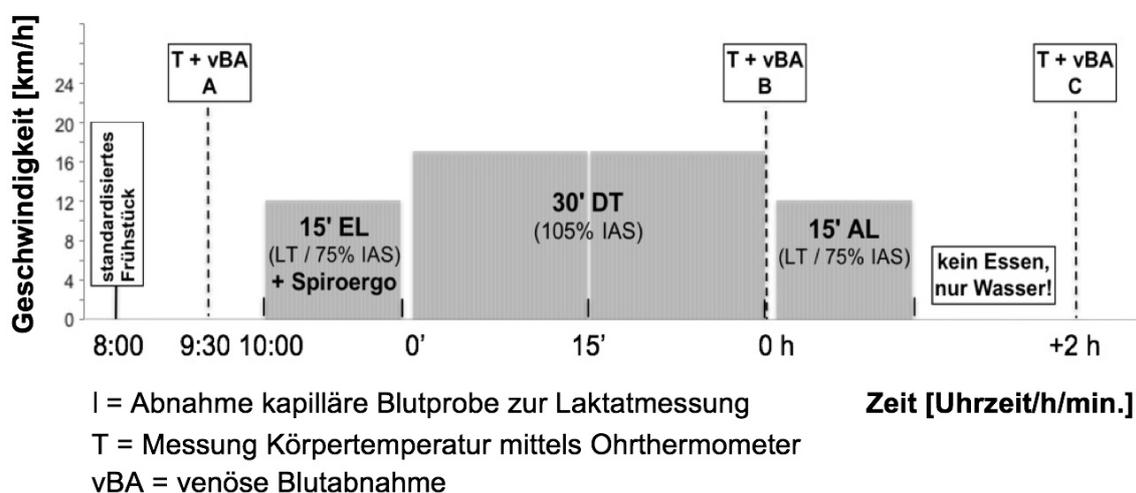


Abbildung 7: Testprotokoll Untersuchungstag 2 - DT

Die Athleten wurden gebeten sich am Morgen von Untersuchungstag 2 *nüchtern* im Ergometrielabor einzufinden. Um 8:00 Uhr erhielten die Probanden dort ein standardisiertes Frühstück in Form von zwei Brezeln ohne Beilage oder Aufstrich („*Gehr's schwäbische Laugenbrezel*“, Zutaten siehe Anhang 5) (Bäckerei Gehr). Weiterhin wurden die Athleten dazu angehalten während der gesamten Testphase an Untersuchungstag 2 lediglich stilles oder mit Kohlensäure versetztes Mineralwasser ohne jegliche Zusätze – wie z. B. Säfte oder Geschmacksstoffe – zu trinken, um die Zufuhr jeglicher anderer Energiequellen zu vermeiden.

Zur Erleichterung der Datenverarbeitung wurden 6 *Zeitpunkte (ZP 0-5)* während des DT definiert. ZP 0 = vor EL, ZP 1 = Ende EL, ZP 2 = 15' TDL, ZP 3 = Ende TDL, ZP 4 = Ende AL, ZP 5 = +2 h nach Ende TDL (vgl. Tabelle 4).

Kurz vor Beginn der EL-Phase und direkt nach Beendigung der AL-Phase wurde mittels Standwaage das Körpergewicht der Athleten – lediglich bekleidet in der bei den Belastungstests getragenen Laufshorts – erhoben, sodass die *Differenz des Körpergewichts* i. R. des DT ermittelt werden konnte. Dazwischen (EL, DT, AL) durften die Athleten keine Flüssigkeit zu sich nehmen.

Zu ZP 0, ZP 3 und ZP 5 wurden den Athleten peripher-venös Blutproben abgenommen, welche für spezielle Metabolomics-Messungen und eine allgemeine Blutbildanalyse verwendet wurden. Die daraus gewonnenen Daten sind jedoch Gegenstand weiterführender Arbeiten.

Das weitere detaillierte Prozedere im DT kann Abbildung 7 und Tabelle 4 entnommen werden.

Die allgemein bei der sportmedizinischen Eingangsuntersuchung, sowie im Ergometrielabor und bei der nachfolgenden Probenaufbereitung verwendeten Geräte und Materialien in der Übersicht können Tabelle 5 und Tabelle 6 entnommen werden.

Tabelle 4: Prozedere DT

Zeit [Uhrzeit, h, min.]	08:00	09:30	10:00 (ZP 0)	10:15 (ZP 1)	0'	10'	15' (ZP 2)	20'	30' (= 0 h) (ZP 3)	0'	15' (ZP 4)	Pause	+2 h (ZP 5)
75% IAS (EL, AL)													
105% IAS (TDL)													
vBA (A, B, C) peripher, i.d.R. aus rechter Kubitalvene		A							B				C
Spiroergometrie													
HF-Messung alle 5 min (12-Kanal-EKG)													
HF-Messung alle 5 min. (Pulsuhr)													
kapilläre BA zur Laktatbestimmung			X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Erhebung Borg-Skala			X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Messung Körpergewicht		X										X	
Messung Körpertemperatur		X							X	X	X		X
Standardisiertes Frühstück	X												
Kein Wasser, keine Nahrung													
Nur Wasser													

2.5 Verfahren zur Datenerhebung im Dauertest

2.5.1 Bestimmung der Laktatkonzentration im Kapillarblut

Zur Bestimmung der momentanen Laktatkonzentration wurde mittels Glaskapillare zu jedem definierten Zeitpunkt eine kapilläre 20 µl Blutprobe aus dem hyperämisierten rechten Ohrläppchen der Probanden abgenommen und anschließend in ein Eppendorf Safe-Lock Tube gegeben, welches eine vorproportionierte hämolysierende Lösung enthält.

Die Laktatmessung erfolgte *enzymatisch-amperometrisch* mit dem Biosen S-Line Laktat-Analyzer. Dabei wird das in der Blutprobe enthaltene L-Laktat mit Sauerstoff durch das Enzym Laktatoxidase zu Pyruvat und Wasserstoffperoxid (H₂O₂) oxidiert. Das entstandene H₂O₂ diffundiert an eine Platinelektrode, wird an dieser abermals oxidiert und gibt dabei Elektronen frei, die als Spannung gemessen werden. Dieser resultierende Strom ist proportional zur Laktatkonzentration. Die genaue Berechnung erfolgt über geräteinterne Algorithmen.

2.5.2 Messung der Herzfrequenz

Während der EL-Phase des DT erfolgte die Herzfrequenzmessung mittels *kontinuierlicher 12-Kanal-EKG-Ableitung*. Um den Laufkomfort der Probanden zu erhöhen wurde die Herzfrequenz während TDL und AL-Phase des DT nur noch mittels Brustgurt via Pulsuhr gemessen, jedoch weiterhin *kontinuierlich*. Für die Datenerhebung und -auswertung wurden während dem gesamten DT die momentanen Herzfrequenzwerte alle 5 min. notiert (vgl. Tabelle 4).

2.5.3 Spiroergometrie im Einlaufen

Wie bereits im RT (vgl. Kapitel 2.4.3) erfolgte auch während dem EL im DT eine *Spiroergometrie*. In der „*sportmedizinischen Leistungsdiagnostik wird die Spiroergometrie in erster Linie zur Objektivierung der aeroben Leistungsfähigkeit eingesetzt*“, so Friedmann-Bette 2011 in der Deutschen Zeitschrift für Sportmedizin (Friedmann-Bette, 2011).

Den Probanden wurde daher wieder eine über Mund und Nase dichtsitzende Atemmaske angelegt. Mittels „*Breath-by-breath-Methode*“ (Beaver et al., 1981) wurden wiederum kontinuierlich bei jedem Atemzug mittels Volumensensoren die Atemvolumina, sowie über einen dünnen Absaugschlauch und die sich daran anschließenden Gassensoren des Spirometrieegeräts die expiratorischen O₂- und CO₂-Werte gemessen.

Beim EL war nun jedoch das Ziel über die *indirekte Kalorimetrie* „unter Anwendung der *stöchiometrischen Gleichungen für die Glukoseoxidation bzw. die β -Oxidation der freien Fettsäuren von der VO₂ und dem RQ* (vgl. Kapitel 2.4.3) auf den *Energieverbrauch*“ der Athleten zurückzuschließen (Friedmann-Bette, 2011). Für die Datenverarbeitung wurden dabei die Atemvolumina der letzten 5 min. der EL-Phase gemittelt.

2.5.4 Borg-Skala-Erhebung im Tempodauerlauf

Außerdem wurde im TDL zu definierten Zeitpunkten das *Belastungsempfinden*, also die *subjektive Empfindung*, wie anstrengend die vorgegebene Leistung für die Athleten ist, erhoben.

Dazu wurde die „*15-items Borg-Skala*“ (auch *RPE-Skala = Ratio of Perceived Exertion*), benannt nach ihrem Entwickler G. Borg, einem emeritierten schwedischen Professor für Wahrnehmungs- und Psychophysik des Psychologischen Instituts der Universität Stockholm (Schweden), verwendet (BORG, 1982). Es handelt sich dabei um eine „*Schätzskala*“, wobei die geschätzte subjektive Beanspruchung linear mit der physikalischen Leistung ansteigt, wodurch diese Skala eine zuverlässige und valide Methode zur Quantifizierung einer subjektiven Belastungsempfindung darstellt. Das Belastungsempfinden ist somit eine „*Ergänzung zu physiologischen Messgrößen*“, wie den oben genannten Laktatwerten, Herzfrequenzen und Atemvolumina (Borg, 2004).

Die Athleten wurden vor dem DT über die Skala und deren Erhebung informiert. Während der Belastung hing die Skala gut sichtbar auf Augenhöhe vor den auf

dem Laufbandergometer laufenden Athleten. Zu den oben genannten, vordefinierten Zeitpunkten wurden die Athleten dann befragt und sollten die momentan subjektiv empfundene Belastung in drei Kategorien bewerten:

1. Belastung „Allgemein“
2. Belastung „Beine/Muskulatur“
3. Belastung „Atmung/Puls“

Es konnten jeweils ganze Zahlenwerte zwischen 6 = „überhaupt nicht anstrengend“ und 20 = „maximal vorstellbar anstrengend“ angegeben werden, wobei die Probanden lediglich die entsprechende Zahl nennen sollten.

Die im TDL nach 10 min., 20 min. und am Ende, nach 30 min. Laufzeit, genannten Zahlenwerte wurden für die Datenerhebung und -verarbeitung addiert und zu *einem* Zahlenwert für den gesamten TDL gemittelt.

2.6 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit *JMP®* Version 13.1.0 (SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA).

Es wurde ein *Signifikanzniveau* von $\alpha = 0,05$ (= *p-Wert*) festgelegt. Werte $< 0,1$ wurden bereits als „*tendenziell signifikant*“ bezeichnet. Die Beurteilung der Messdaten auf *Normalverteilung* erfolgte mit dem „*Shapiro-Wilk-Test*“ (Shapiro et al., 1968). Bei normalverteilten Daten wurde der *Korrelationskoeffizient nach Pearson* (*r*) bestimmt.

Zur statistischen Berechnung der Standardabweichungen, Mediane, sowie Minima und Maxima wurde eine *Verteilungsanalyse* durchgeführt. Die Berechnung der Mittelwerte, sowie der *p-* und *r-Werte* erfolgte mittels *einfaktorier Varianzanalyse (ANOVA)*.

2.7 Übersicht verwendeter Geräte und Materialien

Tabelle 5: Übersicht verwendeter Geräte

Gerätebezeichnung	Hersteller	Beschreibung / Verwendung
iE33	Philips Medical Systems DMC GmbH Hamburg, Deutschland	Sonographiegerät mit Herzultraschallsonde Echokardiographie
custo cardio 100 BT	custo med GmbH Ottobrunn, Deutschland	12-Kanal-EKG Messung der Herzfrequenz (MST, RT, EL)
Polar FT1 Trainingscomputer	Polar Electro Oy Kempele, Finnland	Pulsuhr und Brustgurt Messung der Herzfrequenz (TDL, AL)
Quasar 5.0	h/p/cosmos sports & medical GmbH Nussdorf-Traunstein, Deutschland	Laufband sämtliche Belastungstests
Biosen S-Line, Laktat-Analyzer	EKF Diagnostics Holdings plc Cardiff, Großbritannien	Messung der Laktatkonzentration im Kapillarblut
MetalLyzer 3B-R2	Cortex Biophysik GmbH Leipzig, Deutschland	Spirometer Spiroergometrie (RT, EL)
MPT 300K100M	KERN & SOHN GmbH Balingen-Frommern, Deutschland	Standwaage Messung des Körpergewichts
Genius™ 2 Tympanic Thermometer	Medtronic plc Dublin, Irland	Ohrthermometer Messung der Körpertemperatur
Hettich Universal / K2S	Hettich-Zentrifugen GmbH & Co. KG Tuttlingen, Deutschland	Kühl-Zentrifuge mit Ausschwingrotor Zentrifugation der peripher-venösen Blutproben

Tabelle 6: Übersicht verwendeter Materialien

Material	Hersteller	Menge je Proband	Beschreibung / Verwendung
Finalgon® Crème (4 mg/g Nonivamid + 25 mg/g Nicoboxil)	Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG Ingelheim, Deutschland	je nach Bedarf	Hyperämisierung des Ohrläppchens vor Abnahme der kapillären Blutproben
Gehr's schwäbische Laugenbrezel	Bäckerei Gehr GmbH Tübingen, Deutschland	2	standardisiertes Frühstück
Pur-Zellin	Paul Hartmann AG Heidenheim, Deutschland	je nach Bedarf	keimarme Zellstoffpuffer Abnahme kapilläre- und peripher-venöse Blutproben
Lanzetten	-	mindestens 3	sterile Metallanzetten; Punktion des Ohrläppchens
Glaskapillaren	-	mindestens 17	20 µl Glaskapillare; Abnahme kapillärer Blutproben
Eppendorf Safe-Lock Tubes 1,5 ml	Eppendorf AG Hamburg, Deutschland	mindestens 63	Mikroreaktionsgefäße; Konservierung kapilläre Blutproben und aufbereitete peripher-venöse Blutproben
Venofix + Adapter	B. Braun Melsungen AG Melsungen, Deutschland	mindestens 3	Venenpunktionsbesteck zur vBA
S-Monovette 7,5 ml Z Serum mit Gerinnungsaktivator, weiß	Sarstedt AG & Co. KG Nümbrecht, Deutschland	3	Blutabnahmeröhrchen Serum-Alliquots
S-Monovette 9 ml Z Serum mit Gerinnungsaktivator, rot	Sarstedt AG & Co. KG Nümbrecht, Deutschland	3	Blutabnahmeröhrchen EDTA-Plasma-Alliquots
S-Monovette 2,7 ml Z Serum mit Gerinnungsaktivator, rot	Sarstedt AG & Co. KG Nümbrecht, Deutschland	3	Blutabnahmeröhrchen EDTA-Plasma-Differential-Blutbild
S-Monovette 2,7 ml FE Fluorid EDTA/Glukose, gelb	Sarstedt AG & Co. KG Nümbrecht, Deutschland	3	Blutabnahmeröhrchen NaF-Plasma-Alliquots

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse anthropometrische Daten

Eine tabellarische Übersicht der anthropometrischen Daten, sowie der Trainingsdaten und persönlichen Bestleistungen – sowohl des gesamten als auch des in Mittel- und Langstreckler unterteilten Probandenkollektivs – bieten Tabelle 1 und Tabelle 2 im Kapitel 2.3. Im Folgenden werden lediglich die relevanten anthropometrischen Größen zur Beurteilung der Homogenität des Probandenkollektivs, unterteilt in Mittel- (M) und Langstreckler (L), sowie hoch- (↑) und niedrig (↓) Laktat-Gruppe, ausgewertet (siehe Abbildung 8).

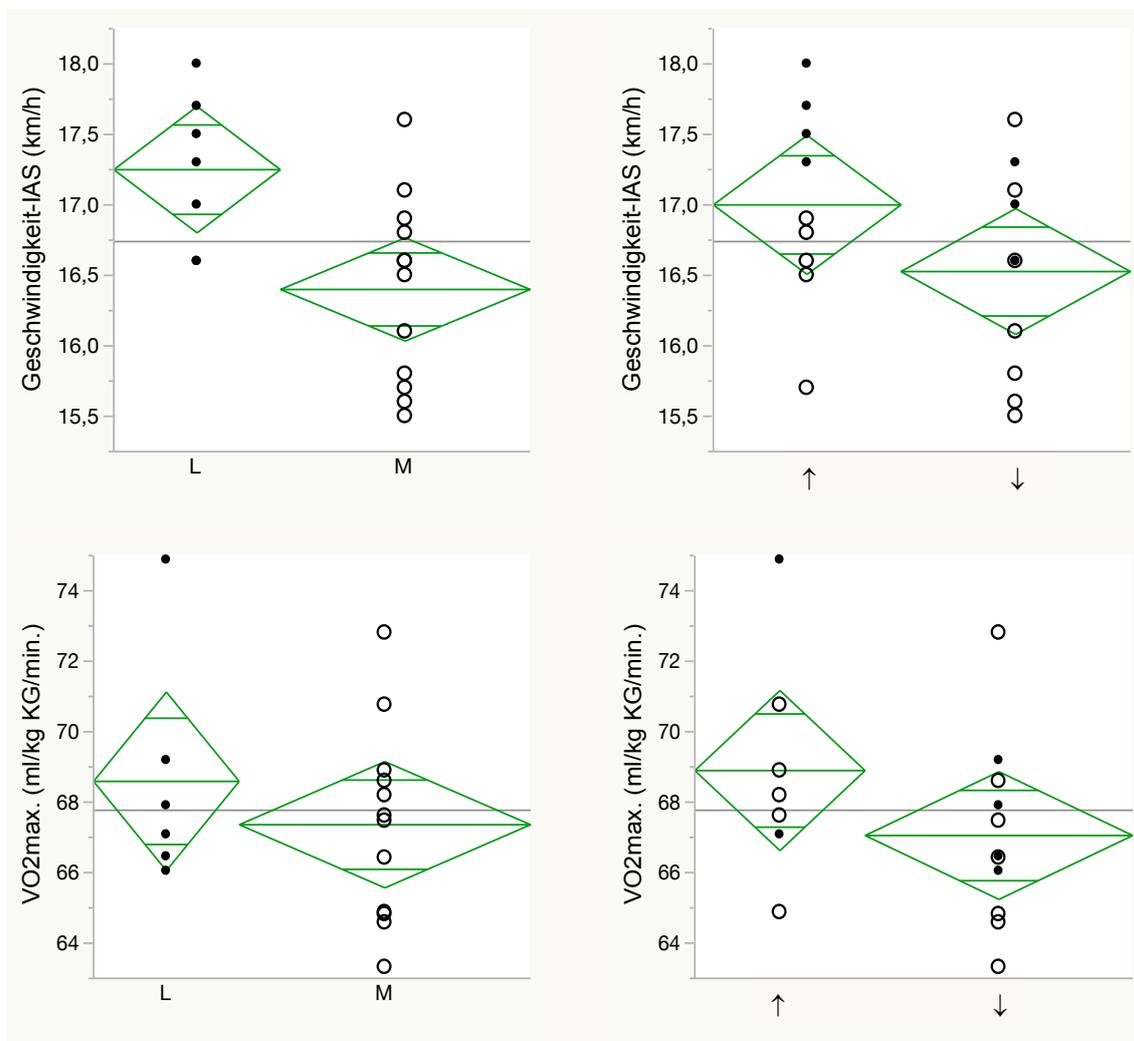


Abbildung 8: Anthropometrische Daten des in M und L, sowie ↑ und ↓ unterteilten Probandenkollektivs
 o = M | • = L

Hinsichtlich der anthropometrischen Daten stellen sich die Gruppen der Mittel- und Langstreckler als homogene Probandenkollektive dar. So gibt es keinen statistisch signifikanten Unterschied in der Körperkonstitution (Größe, Gewicht, BMI, Körperfett und Bauchumfang), sowie im Alter und der VO_{2max} .

Statistisch *signifikant* unterscheiden sich die beiden Gruppen jedoch in der Laufgeschwindigkeit an der IAS ($p = 0,006^*$). Während die Mittelstreckler eine Geschwindigkeit von 16,4 km/h an der IAS erreichten, waren die Langstreckler im Durchschnitt 0,9 km/h schneller ($MW_L = 17,3$ km/h) (vgl. Abbildung 8).

3.2 Ergebnisse der leistungsdiagnostischen Untersuchungen

Während sämtlicher leistungsdiagnostischer Tests wurden die Messwerte für die HF und die Borg-Skala jeweils *unmittelbar vor* den definierten Zeitpunkten, die spirometrischen Werte *direkt am* definierten Zeitpunkt und die Laktatwerte *unmittelbar nach* dem definierten Zeitpunkt (Stillstand des Laufbandes) erhoben.

3.2.1 2Ergometrieergebnisse im Mehrstufentest

An Untersuchungstag 1 wurden die Athleten einem laktatbasierten Mehrstufentest (MST) unterzogen. Daraus erfolgte die Ermittlung der IAS, sowie der zeitspezifischen HF- und Laktatwerte. Die durchschnittlich berechneten Werte des gesamten Probandenkollektivs sind in Tabelle 7 dargestellt.

Der Mittelwert (MW) der Laufgeschwindigkeit an der IAS des gesamten Probandenkollektivs betrug 16,7 km/h. Die zu diesem Zeitpunkt erhobenen Mittelwerte für HF und Laktat betragen 171/min. und 2,37 mmol/l. Die Laufgeschwindigkeit von 105 % der IAS, welche als spätere Laufgeschwindigkeit des TDL i. R. des DT festgelegt worden ist, wurde aus den jeweiligen IAS-Werten extrapoliert. Die Maximalwerte für Laktat und HF sind *nur bedingt* als Maximalwerte zu betrachten, da der MST standardisiert nach der 20 km/h-Stufe – was in der Regel *keine* Ausbelastung der Athleten bedeutete – abgebrochen wurde.

Tabelle 7: Ergometrieergebnisse im MST des gesamten Probandenkollektivs

(MW ± SD) (MD) (Min. / Max.)					
Gesamt: n = 20					
Zeitpunkt	Ruhe	LT	IAS	105%-IAS	Max.
Laktat kapillär [mmol/l]	0,85 ± 0,20	0,87 ± 0,27	2,37 ± 0,27		6,68 ± 1,53
	0,81	0,83	2,33	-	6,82
	0,51 / 1,21	0,58 / 1,61	2,08 / 3,11		4,32 / 10,25
HF [1/min.]	65 ± 11	142 ± 11	171 ± 10		187 ± 10
	66	142	172	-	188
	44 / 86	121 / 163	150 / 187		167 / 203
v [km/h]		12,4 ± 0,7	16,7 ± 0,7	17,6 ± 0,8	<i>standardisiert bei 20 km/h</i>
	-	12,5	16,7	17,5	
		10,9 / 14,0	15,5 / 18,0	16,3 / 18,9	

In der Auswertung der erhobenen Ergometriedaten wurde das Probandenkollektiv im Folgenden in *Mittel- und Langstreckler* unterteilt. Tabelle 8 zeigt die durchschnittlich ermittelten Werte in Ruhe, am LT sowie an der IAS für jede der beiden Gruppen.

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, geht daraus die *signifikant* höhere Laufgeschwindigkeit an der IAS der Langstreckler im Vergleich zu den Mittelstrecklern hervor ($MW_L = 17,3 \text{ km/h}$; $MW_M = 16,4 \text{ km/h}$; $p = 0,006^*$).

Außerdem zeigte sich ein *signifikanter* Unterschied in der Ruheherzfrequenz. Die Langstreckler hatten eine im Durchschnitt um 8 bpm niedrigere HF als die Mittelstreckler ($MW_L = 60/\text{min.}$; $MW_M = 68/\text{min.}$; $p = 0,044^*$).

Einen weiteren *signifikanten* Unterschied lieferten die nach der 20 km/h-Stufe des MST erhobenen „maximalen“ Laktatwerte im kapillären Blut. Diese lagen bei den Mittelstrecklern im Durchschnitt fast 1,5 mmol/l höher als bei den Langstrecklern ($MW_M = 7,23 \text{ mmol/l}$; $MW_L = 5,85 \text{ mmol/l}$; $p = 0,045^*$). Ebenso bei den absoluten Maximalwerten lagen die Mittelstreckler fast 3 mmol/l höher als die Langstreckler (Laktat $\text{max.}_M = 10,25 \text{ mmol/l}$; Laktat $\text{max.}_L = 7,44 \text{ mmol/l}$).

Tabelle 8: Ergometrieergebnisse im MST des in M und L unterteilten Probandenkollektivs

M: n = 12 L: n = 8		p-Werte: < 0,05 = signifikant				(MW ± SD) (MD) (Min. / Max.)
Zeitpunkt		Ruhe	LT	IAS	105%-IAS	Max.
Laktat kapillär [mmol/l]	M	0,88 ± 0,23	0,92 ± 0,28	2,42 ± 0,28		7,23 ± 1,58
		0,83	0,86	2,36	-	7,08
		0,51 / 1,21	0,58 / 1,61	2,08 / 3,11		4,32 / 10,25
	L	0,81 ± 0,17	0,78 ± 0,24	2,28 ± 0,24		5,85 ± 1,04
		0,78	0,73	2,23	-	5,54
		0,55 / 1,14	0,58 / 1,33	2,08 / 2,83		4,42 / 7,44
	p	0,442	0,255	0,255	-	0,045*
HF [1/min.]	M	68 ± 11	142 ± 8	170 ± 7		187 ± 9
		68	142	172	-	187
		54 / 86	132 / 156	160 / 178		171 / 197
	L	60 ± 10	142 ± 15	172 ± 14		187 ± 13
		66	141	173	-	190
		44 / 69	121 / 163	150 / 187		167 / 203
	p	0,044*	0,961	0,703	-	0,979
v [km/h]	M		12,2 ± 0,5	16,4 ± 0,7	17,2 ± 0,7	<i>standardisiert bei 20 km/h</i>
			12,4	16,6	17,4	
			10,9 / 12,9	15,5 / 17,6	16,3 / 18,5	
	L		12,7 ± 0,8	17,3 ± 0,5	18,1 ± 0,5	<i>standardisiert bei 20 km/h</i>
			12,5	17,3	18,2	
			11,6 / 14,0	16,6 / 18,0	17,4 / 18,9	
	p	-	0,152	0,006*	0,006*	-

Neben der Unterteilung in die Subgruppen „Mittel- und Langstreckler“ erfolgte weiterhin eine Differenzierung der erhobenen Daten in eine *hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe*. Für deren Einteilung wurde retrospektiv ein *Cut-off-Wert von 4,5 mmol/l* bei den maximal gemessenen Laktatwerten zu Zeitpunkt 3 (ZP 3) im DT festgelegt (vgl. Kapitel 2.3 und Tabelle 3). In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der ergometrischen Basisdaten (Ruhe-, LT-, IAS und Max.-Werte, sowie errechnete 105 %-IAS-Werte), aufgeteilt in diese beiden Subgruppen, aufgelistet.

Tabelle 9: Ergometrieergebnisse im MST des in ↑ und ↓ unterteilten Probandenkollektivs

		p-Werte: < 0,05 = signifikant				(MW ± SD) (MD) (Min. / Max.)
↑: n = 9 ↓: n = 11						
Zeitpunkt		Ruhe	LT	IAS	105%-IAS	Max.
Laktat kapillär [mmol/l]	↑	0,87 ± 0,19	0,89 ± 0,36	2,39 ± 0,36		6,48 ± 1,38
		0,81	0,82	2,32	-	6,80
		0,55 / 1,14	0,58 / 1,61	2,08 / 3,11		4,42 / 9,05
	↓	0,83 ± 0,22	0,85 ± 0,18	2,35 ± 0,18		6,84 ± 1,67
		0,78	0,83	2,33	-	7,00
		0,51 / 1,21	0,58 / 1,20	2,08 / 2,70		4,32 / 10,25
p	0,760	0,738	0,738	-	0,621	
HF [1/min.]	↑	68 ± 11	146 ± 11	175 ± 8		189 ± 8
		67	141	176	-	194
		50 / 86	134 / 163	160 / 186		171 / 196
	↓	62 ± 11	139 ± 9	168 ± 10		184 ± 11
		61	143	167	-	184
		44 / 81	121 / 149	150 / 187		167 / 203
p	0,233	0,121	0,098	-	0,256	
v [km/h]	↑	-	12,6 ± 0,7	17,0 ± 0,7	17,9 ± 0,7	<i>standardisiert bei 20 km/h</i>
			12,5	16,9	17,7	
			11,7 / 14,0	15,7 / 18,0	16,5 / 18,9	
	↓	-	12,2 ± 0,5	16,5 ± 0,7	17,4 ± 0,7	<i>standardisiert bei 20 km/h</i>
			12,3	16,6	17,4	
			10,9 / 12,9	15,5 / 17,6	16,3 / 18,5	
p	-	0,157	0,153	0,153	-	

Die statistische Auswertung ergab *keine signifikanten* Unterschiede hinsichtlich der erhobenen Messwerte in Ruhe, am LT und an der IAS. Die absoluten Werte der hoch-Laktat-Gruppe lagen allerdings über denen der niedrig-Laktat-Gruppe, wenn auch *nie signifikant*. Lediglich bei der HF an der IAS wurden bei der hoch-Laktat-Gruppe im Durchschnitt *tendenziell signifikant* höhere Werte gemessen als bei der niedrig-Laktat-Gruppe ($MW_{HF-IAS \uparrow} = 175/\text{min.}$; $MW_{HF-IAS \downarrow} = 168/\text{min.}$; $p = 0,098$).

Bei der abschließenden 20 km/h-Stufe im MST wurden von beiden Gruppen im Durchschnitt Maximal-Laktatwerte deutlich über dem festgelegten Cut-off-Wert erreicht, jedoch *ohne signifikanten* Unterschied ($MW_{\uparrow} = 6,48$ mmol/l; $MW_{\downarrow} = 6,84$ mmol/l; $p = 0,621$). Überraschenderweise war der Mittelwert der hoch-Laktat-Gruppe sogar geringer als der der niedrig-Laktat-Gruppe. Zudem wurde der höchste absolute Laktatwert sogar in der niedrig-Laktat-Gruppe erzielt (Laktat_{max.} 10,25 mmol/l).

3.2.2 Ergometrie- und Spirometrieergebnisse im Rampentest

Im Anschluss an den MST wurden die Probanden dem Rampentest (RT) unterzogen. Dabei wurden die *tatsächlichen* Maximalwerte ermittelt, da die *Zielvorgabe* für die Athleten eine subjektiv *vollständige Ausbelastung* war. Die ermittelten spiroergometrischen Durchschnittswerte an den definierten Zeitpunkten „AT“ und „Max.“ sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Die Laufgeschwindigkeit an der AT lag im Durchschnitt bei 15,3 km/h bei einer HF von durchschnittlich 159/min. Die maximale Laufgeschwindigkeit lag im Mittel bei 23,4 km/h (HF 187/min.) und die individuell absolut maximal erreichte Laufgeschwindigkeit bei 25,1 km/h bei einer maximalen HF von 205/min.

Weiter wurde die maximale Sauerstoffaufnahme-fähigkeit (VO₂max.) des gesamten untersuchten Probandenkollektivs erhoben. Die VO₂max. lag im Durchschnitt bei 4,652 Liter O₂ pro Minute. Unter Berücksichtigung des Körpergewichts errechnete sich ein Wert von 67,77 ml/kg KG/min.

Tabelle 10: Spiroergometrieergebnisse im RT des gesamten Probandenkollektivs

Gesamt: n = 18		(MW ± SD) (MD) (Min. / Max.)
Zeitpunkt	AT	Max.
Laktat kapillär [mmol/l]	-	12,08 ± 2,13 11,99 7,43 / 15,93
HF [1/min.]	159 ± 11 158 143 / 178	187 ± 9 188 173 / 205
V [km/h]	15,3 ± 1,3 15,1 13,3 / 17,7	23,4 ± 0,8 23,5 22,2 / 25,1
VO₂ [l/min.]	3,504 ± 0,449 3,498 2,823 / 4,340	4,652 ± 0,484 4,612 3,780 / 5,535
VO₂ [ml/kg KG/min.]	51,16 ± 5,56 50,42 38,80 / 59,49	67,77 ± 2,90 67,54 63,32 / 74,88
RQ (VCO₂ / VO₂) (Max. = bei VO₂max.)	0,94 ± 0,06 0,94 0,83 / 1,04	1,26 ± 0,07 1,26 1,11 / 1,38

Analog zur Auswertung des MST wurden die ermittelten Daten des RT ebenfalls hinsichtlich der Subgruppen *Mittel- und Langstreckler* untersucht. In Tabelle 11 sind die im RT gemessenen Ergometriedaten, in Tabelle 12 die spirometrischen Messwerte aufgelistet.

Es zeigte sich, dass die Langstreckler im Durchschnitt *signifikant* höhere Laufgeschwindigkeiten am AT als die Mittelstreckler ($MW_L = 16,4$ km/h; $MW_M = 14,8$ km/h; $p = 0,01^*$) erzielten. Dennoch waren sowohl die HF am AT (MW_L und $MW_M = 159$ /min.), als auch die gemittelten Laufgeschwindigkeiten bei maximaler Ausbelastung nahezu identisch ($MW_L = 23,3$ km/h; $MW_M = 23,4$ km/h).

Tabelle 11: Ergometrieergebnisse im RT des in M und L unterteilten Probandenkollektivs

M: n = 12 L: n = 6		p-Werte: < 0,05 = signifikant	(MW ± SD) (MD) (Min. / Max.)
Zeitpunkt		AT	Max.
Laktat kapillär [mmol/l]	M	-	12,33 ± 2,51 13,06 7,43 / 15,93
		-	11,58 ± 1,09 11,58 10,26 / 13,28
	L	-	11,58 ± 1,09 11,58 10,26 / 13,28
		-	11,58 ± 1,09 11,58 10,26 / 13,28
	p	-	0,502
HF [1/min.]	M	159 ± 11 158 143 / 175	188 ± 8 189 175 / 200
		159 ± 12 156 149 / 178	184 ± 12 183 173 / 205
	L	159 ± 12 156 149 / 178	184 ± 12 183 173 / 205
		159 ± 12 156 149 / 178	184 ± 12 183 173 / 205
	p	0,988	0,395
V [km/h]	M	14,8 ± 1,1 14,7 13,3 / 17,4	23,4 ± 0,8 23,5 22,2 / 25,1
		16,4 ± 1,0 16,5 14,9 / 17,7	23,3 ± 0,7 23,2 22,5 / 24,3
	L	16,4 ± 1,0 16,5 14,9 / 17,7	23,3 ± 0,7 23,2 22,5 / 24,3
		16,4 ± 1,0 16,5 14,9 / 17,7	23,3 ± 0,7 23,2 22,5 / 24,3
	p	0,010*	0,817

In Bezug auf die spirometrischen Messwerte des RT (siehe Tabelle 12) erreichten die Langstreckler – unter Berücksichtigung des Körpergewichts – am AT tendenziell *signifikant* höhere VO₂-Werte als die Mittelstreckler (MW_L = 54,60 ml/kg KG/min.; MW_M = 49,44 ml/kg KG/min.; p = 0,061).

Bei maximaler Ausbelastung fanden sich nach der statistischen Auswertung *keine* Unterschiede in den durchschnittlich ermittelten VO₂- und RQ-Werten, sowie der Laufgeschwindigkeiten (V) an der VO₂max.

Tabelle 12: Spirometrieergebnisse im RT des in M und L unterteilten Probandenkollektivs

M: n = 12 L: n = 6		p-Werte: < 0,05 = signifikant	(MW ± SD) (MD) (Min. / Max.)
Zeitpunkt		AT	Max.
VO₂ [l/min.]	M	3,417 ± 0,399	4,672 ± 0,454
		3,373	4,755
		2,914 / 3,999	3,780 / 5,287
	L	3,676 ± 0,532	4,612 ± 0,584
		3,817	4,453
p	2,823 / 4,340	3,923 / 5,535	
	p	0,262	0,812
VO₂ [ml/kg KG/min.]	M	49,44 ± 5,56	67,36 ± 2,75
		49,16	67,54
		38,80 / 59,49	63,32 / 72,81
	L	54,60 ± 4,01	68,59 ± 3,28
		55,63	67,49
p	47,53 / 58,31	66,04 / 74,88	
	p	0,061	0,413
V an VO₂max. [km/h]	M	-	22,2 ± 1,0
		-	22,2
		-	20,9 / 23,5
	L	-	22,7 ± 0,9
		-	22,8
p	-	21,5 / 23,9	
	p	-	0,291
RQ (VCO ₂ / VO ₂) (Max. = bei VO ₂ max.)	M	0,94 ± 0,06	1,25 ± 0,07
		0,95	1,25
		0,83 / 1,04	1,11 / 1,34
	L	0,93 ± 0,07	1,27 ± 0,08
		0,93	1,27
p	0,83 / 1,03	1,16 / 1,38	
	p	0,820	0,582

Bei der im Anschluss durchgeführten Subgruppen-Untersuchung in *hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe* konnten *keine* statistisch nachweisbaren Unterschiede hinsichtlich Laufgeschwindigkeit und HF am AT, sowie maximaler Laufgeschwindigkeit und HF gezeigt werden (vgl. Tabelle 13).

Tabelle 13: Ergometrieergebnisse im RT des in \uparrow und \downarrow unterteilten Probandenkollektivs

		p-Werte: < 0,05 = signifikant		(MW \pm SD) (MD) (Min. / Max.)
		\uparrow : n = 7 \downarrow : n = 11		
Zeitpunkt		AT	Max.	
Laktat kapillär [mmol/l]	\uparrow	-	12,16 \pm 2,12	13,28
			8,49 / 14,14	
	\downarrow	-	12,03 \pm 2,24	11,80
			7,43 / 15,93	
	p	-	0,908	
HF [1/min.]	\uparrow	162 \pm 13	189 \pm 11	
		167	188	
		143 / 178	175 / 205	
	\downarrow	158 \pm 9	186 \pm 9	
153		187		
		149 / 175	173 / 200	
	p	0,419	0,543	
v [km/h]	\uparrow	15,3 \pm 1,5	23,4 \pm 0,6	
		14,9	23,4	
		13,3 / 17,7	22,6 / 24,3	
	\downarrow	15,4 \pm 1,2	23,4 \pm 0,9	
15,4		23,5		
		13,5 / 17,4	22,2 / 25,1	
	p	0,871	0,836	

Ein ähnliches Ergebnis lieferte die differenzierte Auswertung der spirometrischen Messwerte. So betrug die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_2 max.) in Bezug auf das Körpergewicht im Mittel 68,90 ml/kg KG/min. in der hoch-Laktat-Gruppe und 67,05 ml/kg KG/min. in der niedrig-Laktat-Gruppe (vgl. Tabelle 14), was *keinen* signifikanten Unterschied bedeutete.

Tabelle 14: Spirometrieergebnisse im RT des in ↑ und ↓ unterteilten Probandenkollektivs

		p-Werte: < 0,05 = signifikant		(MW ± SD) (MD) (Min. / Max.)
		AT	Max.	
VO₂ [l/min.]	↑	3,511 ± 0,271	4,663 ± 0,377	
		3,401	4,521	
		3,198 / 3,944	4,253 / 5,222	
	↓	3,499 ± 0,547	4,644 ± 0,559	
		3,595	4,696	
		2,823 / 4,340	3,780 / 5,535	
p		0,957	0,937	
VO₂ [ml/kg KG/min.]	↑	52,16 ± 6,26	68,90 ± 3,19	
		50,60	68,19	
		43,49 / 59,49	64,87 / 74,88	
	↓	50,52 ± 5,29	67,05 ± 2,60	
		50,24	66,45	
		38,80 / 57,02	63,32 / 72,81	
p		0,558	0,198	
RQ (VCO ₂ / VO ₂) (Max. = bei VO ₂ max.)	↑	0,95 ± 0,06	1,28 ± 0,06	
		0,94	1,28	
		0,88 / 1,03	1,20 / 1,38	
	↓	0,93 ± 0,06	1,24 ± 0,08	
		0,94	1,23	
		0,83 / 1,04	1,11 / 1,34	
p		0,609	0,259	

3.3 Ergometrie- und Spirometrieergebnisse im Dauertest

Nach Ermittlung der standardisierten Leistungsparameter wurde zwischen dem 2. und 10. Tag nach der Leistungsdiagnostik (Untersuchungstag 1 mit MST und RT) ein *30-minütiger Tempodauerlauf (TDL)* mit einer Laufgeschwindigkeit von *105 % der im MST ermittelten IAS-Laufgeschwindigkeit* durchgeführt. In den folgenden Tabellen und Abbildungen werden die Auswertung der Ergometrie- und Spirometrieergebnisse dargestellt. Spirometrische Daten wurden nur während der EL-Phase zur Bestimmung des RQ-Wertes erhoben. In den Abbildungen sind die Mittelstreckler jeweils als schwarze Kreise mit weißer Füllung (o), die Langstreckler als komplett schwarz ausgefüllte Kreise (●) dargestellt.

In Abbildung 9 ist zunächst der *Verlauf der absoluten Laktatwerte* im DT (EL + TDL + AL) des *gesamten Probandenkollektivs* zu den charakteristischen Zeitpunkten 0 bis 4 – also in Ruhe, nach dem EL, nach 15 min. TDL, nach 30 min. TDL und nach dem AL (vgl. Tabelle 4) – graphisch dargestellt. Jede Linie entspricht dabei dem Laktatverlauf eines einzelnen Probanden.

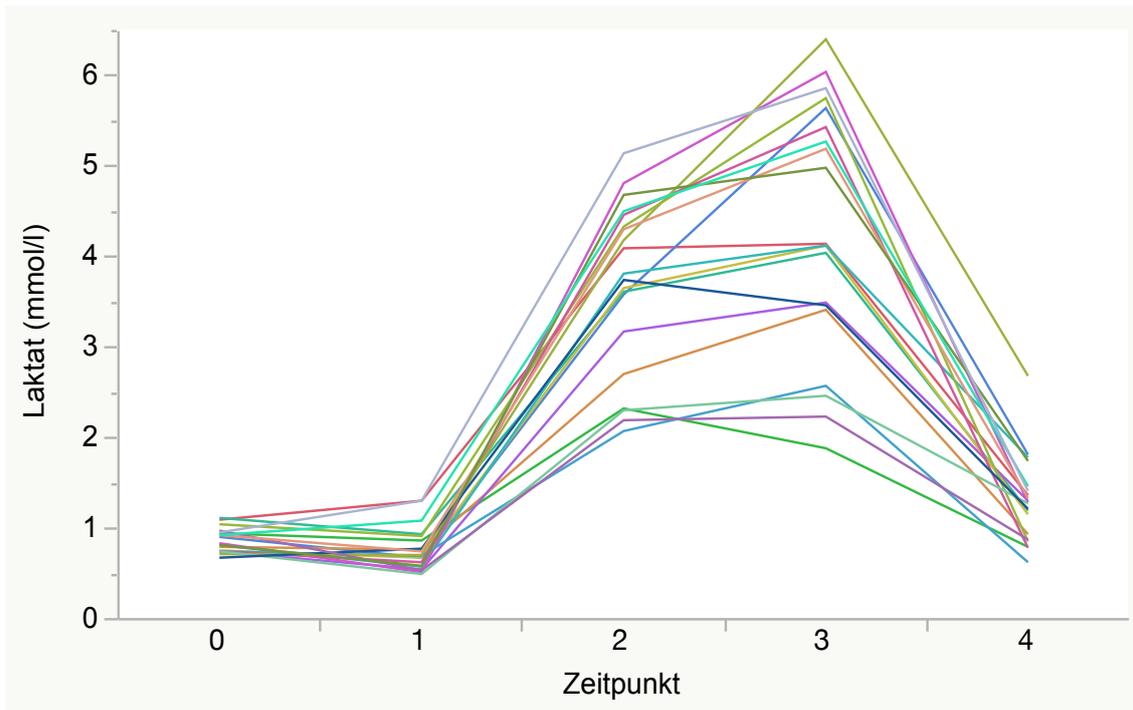


Abbildung 9: Verlauf der absoluten Laktatwerte des gesamten Probandenkollektivs zu ZP 0 bis 4 im DT

Daraus geht hervor, dass bereits zur Hälfte des TDL (ZP 2) die Plasma-Laktatwerte bei allen Probanden deutlich anstiegen. Zum Ende des TDL nach 30 min. (ZP 3) erreichten die meisten Probanden ihren Höchstwert. Interessanterweise erreichten etwa die Hälfte der Probanden ihre höchste Laktatkonzentration um 5 mmol/l oder mehr, die andere Hälfte um 4 mmol/l oder weniger. Im Bereich von 4 bis 5 mmol/l erreichte *kein* Athlet seinen Spitzenwert. Darin liegt die Implementierung des *Cut-off bei 4,5 mmol/l* begründet, der zur Unterteilung in eine „hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe“ führte (vgl. Kapitel 2.3 und Tabelle 3). Zum Ende des AL verzeichneten alle Probanden wiederum einen gleichmäßigen Abfall der Plasma-Laktatkonzentration.

In Tabelle 15 sind die durchschnittlichen *spiro- und ergometrischen Messwerte* aus EL und TDL für das *gesamte Probandenkollektiv* aufgelistet.

Nach 15-minütigem EL mit der im MST ermittelten Laufgeschwindigkeit am LT-Punkt (ca. 75 % der IAS-Laufgeschwindigkeit) ergab sich ein durchschnittlicher RQ von 0,97. Die HF am Ende der EL-Phase entsprach im Durchschnitt 83,8 % der HF an der IAS.

Im darauffolgenden TDL stiegen die kapillären Laktatwerte bei allen Probanden bereits zu nach 15 min. Belastungsdauer (ZP 2) *stark* an und nahmen im weiteren Verlauf bis zum Ende des TDL nach 30 min. Belastungsdauer (ZP 3) nur noch *leicht* zu, was definitionsgemäß einem *Laktat-Steady-State* (vgl. Kapitel 4.2) entsprach ($MW_{\text{Laktat-TDL ZP 3 ges.}} = 4,33 \text{ mmol/l}$).

Tabelle 15: Spiroergometrieergebnisse im EL und TDL des gesamten Probandenkollektivs

	(MW ± SD) (MD) (Min. / Max.)		
Zeitpunkt	EL	15 min. TDL	Ende TDL
Gesamt: n = 20			
RQ (VCO₂ / VO₂)	0,97 ± 0,04 0,97 0,91 / 1,04	<i>keine Spirometrie im TDL</i>	
Laktat kapillär [mmol/l]	0,77 ± 0,24 0,71 0,50 / 1,31	3,69 ± 0,94 3,79 2,08 / 5,15	4,33 ± 1,38 4,14 1,89 / 6,41
Differenz Laktat (Basis / Ende TDL) [mmol/l]	-	-	3,47 ± 1,37 3,34 0,94 / 5,69
HF / HF-IAS [%]	83,8 ± 4,1 82,9 75,7 / 92,0	-	106,1 ± 2,5 106,6 101,6 / 110,7
HFavg. (über 30' TDL) [1/min.]	-	-	174 ± 10 174 154 / 194

Die Herzfrequenzen im TDL lagen im Durchschnitt 6,1 % über den Herzfrequenzen an der IAS im MST. Die durchschnittliche Herzfrequenz (HFavg.) über den 30-minütigen TDL wurde gemittelt aus den alle 5 Minuten erhobenen HF-Werten. Diese HFavg. lag – betrachtet auf das gesamte Probandenkollektiv – im Mittel bei 174/min. Dabei kam es jedoch zu einer erheblichen Streuung über rund 12 %-Punkte (vgl. Abbildung 10).

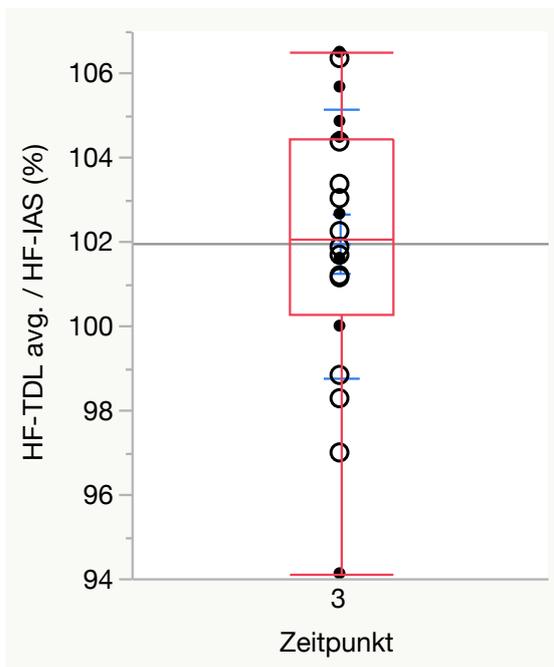


Abbildung 10: Verhältnis von HF-TDL avg. zu HF-IAS in % des gesamten Probandenkollektivs zu ZP 3 im DT
 o = M | • = L

Um während der Belastung das *subjektive Belastungsempfinden* zu ermitteln wurde die *Borg-Skala* (vgl. Kapitel 2.5.4) verwendet. Zur Differenzierung wurden dabei die drei Subkategorien „Allgemein“, „Beine/Muskulatur“, sowie „Atmung/Puls“ abgefragt. In Tabelle 16 sind die erhobenen Daten im EL und während des TDL des *gesamten Probandenkollektivs* aufgelistet.

Sowohl beim EL als auch während des TDL gaben die Athleten in allen drei erfassten Qualitäten im Mittel und Maximum *vergleichbare* Werte an. Lediglich in der Kategorie „Beine/Muskulatur“ wurde die Belastung im TDL im Mittel um etwas mehr als einen halben Punkt anstrengender empfunden ($MW_{\text{Borg-Skala Beine/Muskulatur}} = 16,4$; $MW_{\text{Borg-Skala allgemein und Atmung/Puls}} = 15,9$ bzw. $15,8$).

Tabelle 16: Borg-Qualitäten im EL und TDL des gesamten Probandenkollektivs

Gesamt: n = 20		(MW ± SD) (MD) (Min. / Max.)	
		EL	Ende TDL
Borg-Skala Allgemein	9,7 ± 1,9	15,9 ± 1,7	
	9,5	16,0	
	6,0 / 14,0	13,0 / 19,0	
Borg-Skala Beine / Muskulatur	9,7 ± 2,3	16,4 ± 1,6	
	10,0	17,0	
	6,0 / 14,0	13,0 / 19,0	
Borg-Skala Atmung / Puls	9,9 ± 2,0	15,8 ± 1,9	
	9,5	15,5	
	7,0 / 14,0	12,0 / 19,0	

Der Verlauf der *Borg-Qualitäten* ist in Abbildung 11 graphisch dargestellt. Auch darin wird der stetige und vergleichbare Verlauf von ZP 1 bis 4 (Ende EL bis Ende AL) in allen drei erfassten Qualitäten deutlich.

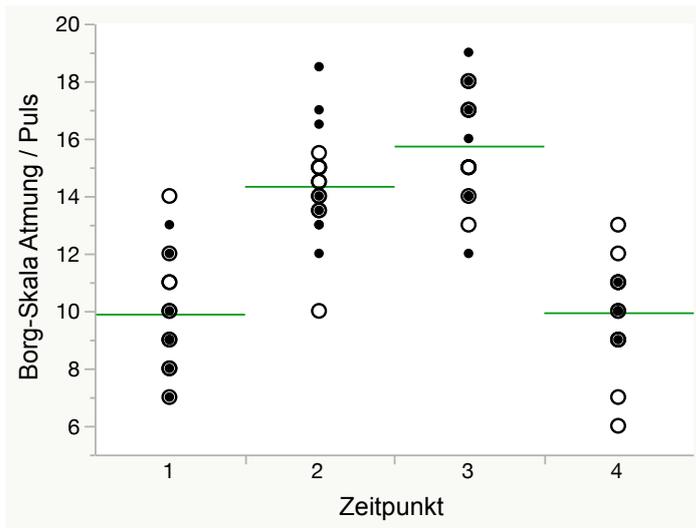
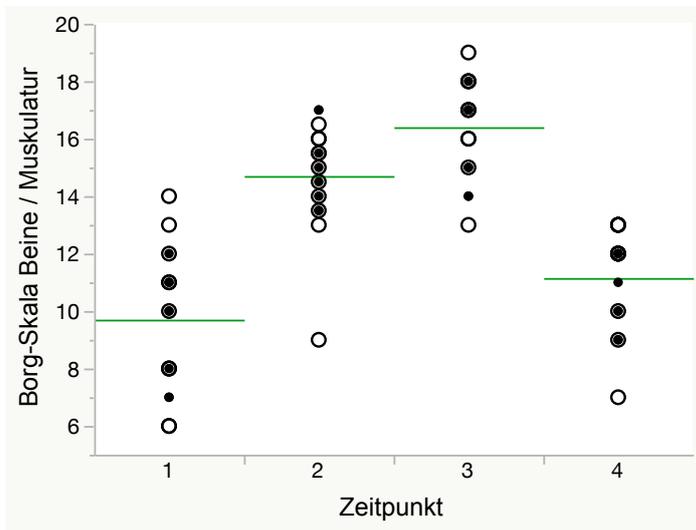
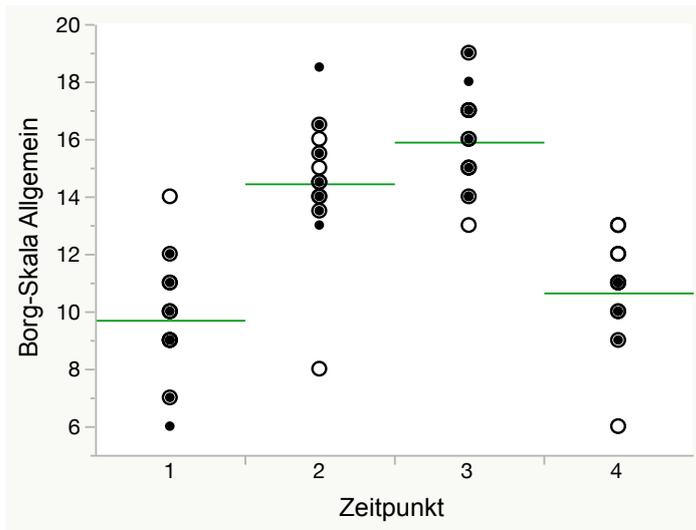


Abbildung 11: Borg-Qualitäten des gesamten Probandenkollektivs zu ZP 1 bis 4 im DT
 o = M | • = L

Abbildung 12 stellt die jeweilige Borg-Qualität in Korrelation zu den Differenz-Laktatwerten des *gesamten Probandenkollektivs* zu ZP 3 (Ende TDL) im DT dar.

Bei den Differenz-Laktatwerten handelt es sich um die Differenz des Laktatwertes an einem bestimmten Zeitpunkt zum Basis-Laktat zu ZP 0, also in Ruhe, vor Beginn des EL.

Die statistische Auswertung ergab, dass in allen erhobenen Kategorien ein *signifikanter* Zusammenhang zwischen dem subjektiven Belastungsempfinden und den zeitlich dazu gehörenden Differenz-Laktatwerten besteht ($p_{\max.} = 0,0002^*$). Am ausgeprägtesten zeigte sich diese Korrelation in der Qualität „Atmung/Puls“ ($r = 0,74$).

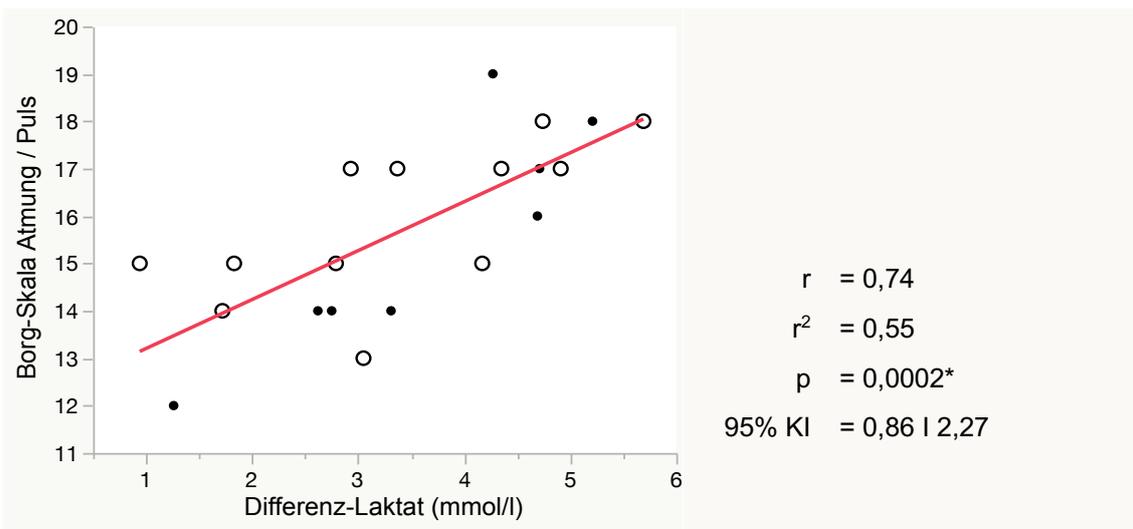
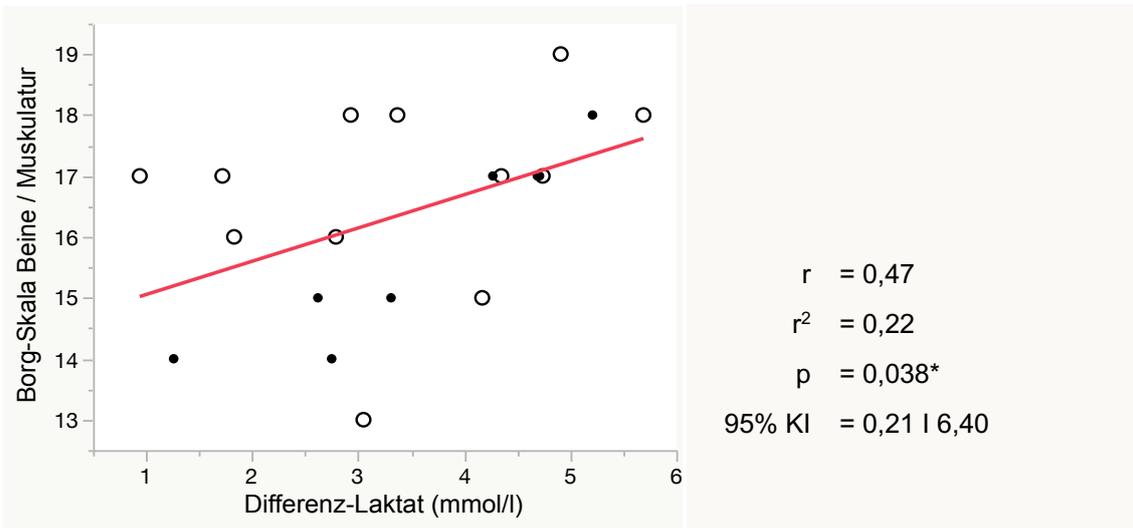
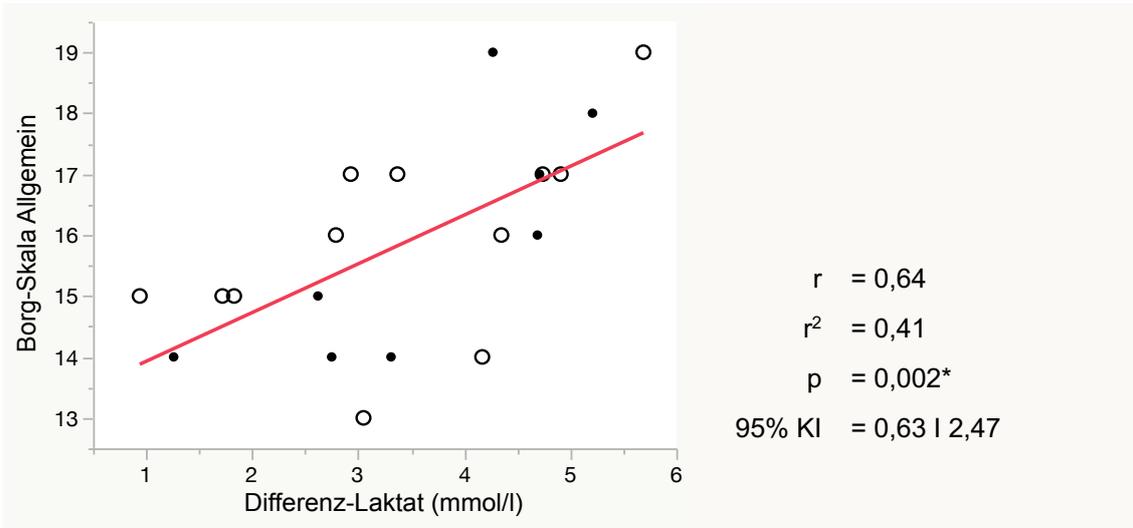


Abbildung 12: Korrelation zwischen Borg-Qualitäten des gesamten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT
 o = M | • = L

Nicht nur das subjektive Belastungsempfinden, sondern auch die HF-TDL avg. im Verhältnis zur HF an der IAS korrelierte *signifikant* mit den Differenz-Laktatwerten des *gesamten Probandenkollektivs* zu ZP 3 (Ende TDL) im DT ($p = 0,034^*$; $r = 0,48$) (siehe Abbildung 13).

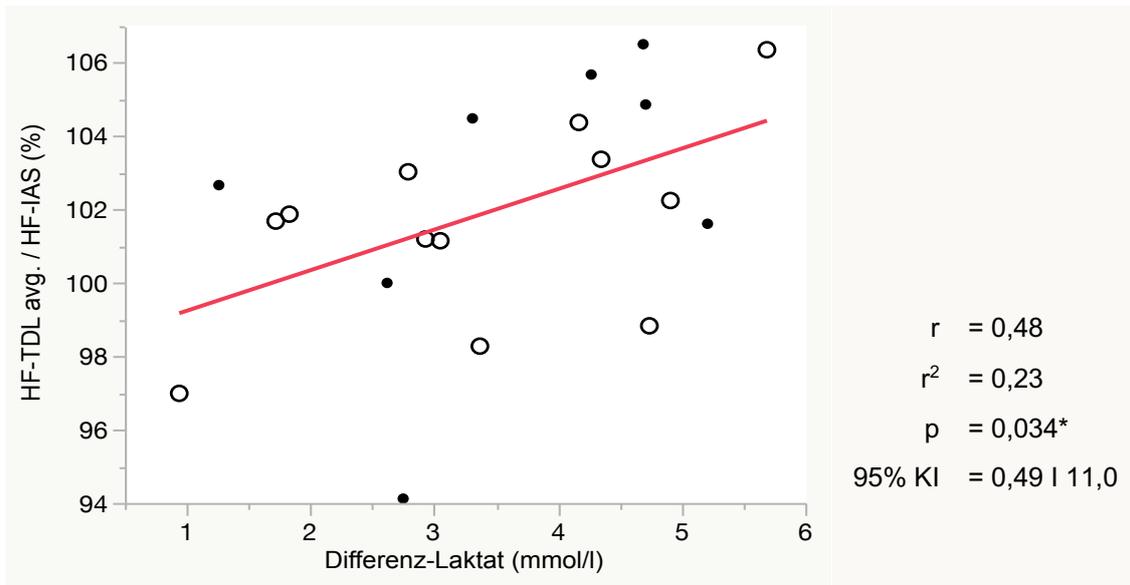


Abbildung 13: Korrelation zwischen dem Verhältnis von HF-TDL avg. zu HF-IAS in % des gesamten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT
o = M | • = L

In Abbildung 14 sind die Korrelationen der Laktatwerte am LT und an der IAS mit den Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 (Ende TDL) im DT des *gesamten Probandenkollektivs* dargestellt.

Es ergab sich zwar eine Regressionsgerade mit leicht positivem Anstieg, jedoch *ohne* signifikante Korrelation ($r = 0,19$; $p = 0,422$).

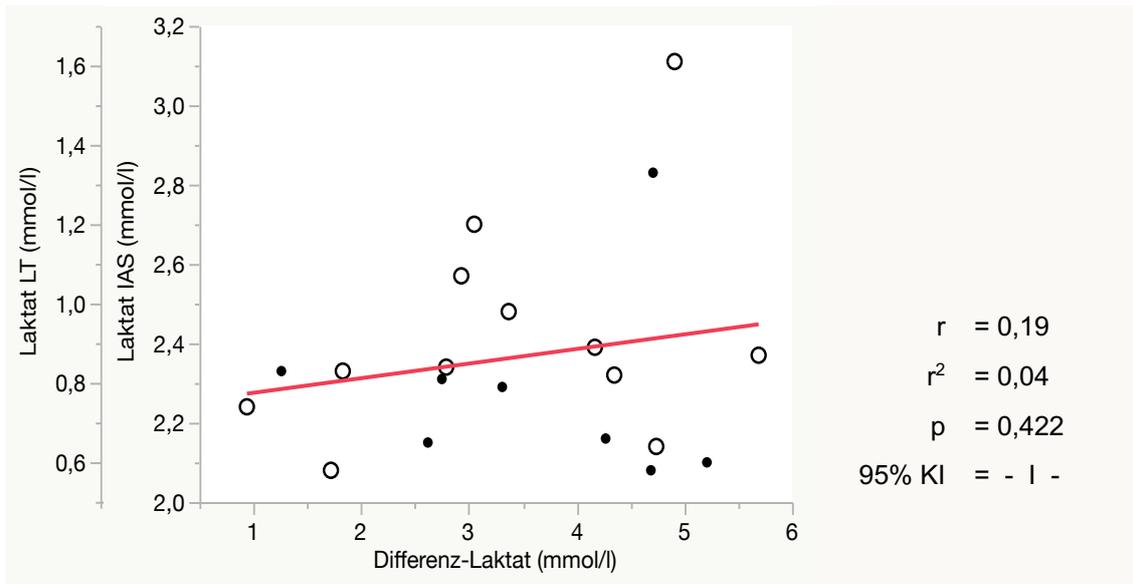


Abbildung 14: Korrelation zwischen dem Laktat am LT und an der IAS des gesamten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT
o = M | • = L

Die Subgruppenanalyse der *spiro- und ergometrischen Messwerte* aus EL und TDL für das in *Mittel- und Langstreckler* differenzierte Probandenkollektiv ist in Tabelle 17 aufgelistet.

Nach 15-minütigem EL ergaben sich für Mittel- und Langstreckler vergleichbare RQ-Werte *ohne* signifikanten Unterschied ($MW_M = 0,98$; $MW_L = 0,96$; $p = 0,164$).

Anders verhielt es sich mit den ermittelten Laktatwerten nach dem EL. Während die Mittelstreckler im Durchschnitt *signifikant* höhere Werte von 0,85 mmol/l aufwiesen, wurden bei den Langstrecklern im Mittel nur 0,66 mmol/l ($p = 0,042^*$) gemessen.

In Bezug auf alle weiteren erhobenen Leistungsparameter ergaben sich *keine* signifikanten Unterschiede zwischen Mittel- und Langstrecklern im EL und TDL. Auch die Laktatwerte im TDL blieben *ohne* signifikanten Unterschied annähernd identisch.

Tabelle 17: Spiroergometrieergebnisse im EL und TDL des in M und L unterteilten Probandenkollektivs

M: n = 12 L: n = 8		p-Werte: < 0,05 = signifikant		(MW ± SD) (MD) (Min. / Max.)
Zeitpunkt		EL	15 min. TDL	Ende TDL
RQ (VCO₂/VO₂)	M	0,98 ± 0,04	<i>keine Spirometrie im TDL</i>	
		0,97		
	0,91 / 1,04			
	0,96 ± 0,03			
L	0,95	<i>keine Spirometrie im TDL</i>		
	0,92 / 1,01			
	p	0,164	-	-
Laktat kapillär [mmol/l]	M	0,85 ± 0,27	3,67 ± 0,98	4,25 ± 1,45
		0,75	3,71	4,14
	0,50 / 1,31	2,08 / 5,15	1,89 / 6,41	
	0,66 ± 0,14	3,73 ± 0,94	4,47 ± 1,35	
L	0,61	4,07	4,67	
	0,52 / 0,92	2,20 / 4,82	2,24 / 6,05	
	p	0,042*	0,882	0,734
Differenz Laktat (Basis / Ende TDL) [mmol/l]	M	-	-	3,37 ± 1,44
		-	-	3,21
	-	-	0,94 / 5,69	
	0,66 ± 0,14	3,73 ± 0,94	4,47 ± 1,35	
L	-	-	3,60 ± 1,35	
	-	-	3,79	
	p	-	-	1,26 / 5,21
				0,726
HF / HF-IAS [%]	M	85,1 ± 3,9	-	105,8 ± 2,4
		84,3		105,5
	80,5 / 92,0	103,0 / 110,4		
	81,9 ± 3,9	106,6 ± 2,8		
L	81,7	-	107,2	
	75,7 / 87,1	-	101,6 / 110,7	
	p	0,094	-	0,468
HFavg. TDL [1/min.]	M	-	-	173 ± 8
		-	-	171
	-	-	161 / 184	
	176 ± 14	-	178	
L	-	-	178	
	-	-	154 / 194	
	p	-	-	0,524

In Tabelle 18 sind die *Borg-Qualitäten* im EL und TDL des in *Mittel- und Langstreckler* differenzierten Probandenkollektivs aufgelistet.

In *keiner* der drei erfassten Qualitäten ergaben sich sowohl im EL als auch im TDL signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. Es fiel jedoch auf, dass die *Mittelstreckler* die Belastung im Durchschnitt *stets anstrengender*, bzw. mindestens genauso anstrengend wie die Langstreckler empfanden.

Tabelle 18: Borg-Qualitäten im EL und TDL des in M und L unterteilten Probandenkollektivs

M: n = 12 L: n = 8		p-Werte: < 0,05 = signifikant	(MW ± SD) (MD) (Min. / Max.)
Zeitpunkt		EL	Ende TDL
Borg-Skala Allgemein	M	10,1 ± 1,8	15,9 ± 1,6
		10,0	16,0
		7,0 / 14,0	13,0 / 19,0
	L	9,1 ± 2,0	15,9 ± 2,0
		9,0	15,5
6,0 / 12,0		14,0 / 19,0	
p		0,272	0,959
Borg-Skala Beine / Muskulatur	M	9,8 ± 2,6	16,8 ± 1,6
		10,5	17,0
		6,0 / 14,0	13,0 / 19,0
	L	9,5 ± 1,9	15,9 ± 1,6
		10,0	16,0
7,0 / 12,0		14,0 / 18,0	
p		0,762	0,242
Borg-Skala Atmung / Puls	M	10,1 ± 2,0	15,9 ± 1,6
		11,8	16,0
		7,0 / 14,0	13,0 / 18,0
	L	9,6 ± 2,0	15,5 ± 2,4
		9,0	15,0
7,0 / 13,0		12,0 / 19,0	
p		0,624	0,646

Abbildung 15 stellt die jeweilige Borg-Qualität in Korrelation zu den Differenz-Laktatwerten des in *Mittel- und Langstreckler* differenzierten Probandenkollektivs zu ZP 3 (Ende TDL) im DT dar.

Dabei lieferten lediglich die Langstreckler in *allen* erhobenen Bereichen in Abhängigkeit der Differenz-Laktatwerte *signifikante* Korrelationen ($p_{\max.} = 0,025^*$ und $r_{\min.} = 0,77$). Am deutlichsten wurde dies in der Kategorie „Beine/Muskulatur“ ($r = 0,94$).

Bei den Mittelstrecklern korrelierte hingegen nur die Kategorie „Atmung/Puls“ in Abhängigkeit der Differenz-Laktatwerte *signifikant* ($p = 0,015^*$). In der Kategorie „Allgemein“ korrelierten die angegebenen Werte *tendenziell signifikant* ($p = 0,058$; $r = 0,56$). In der Kategorie „Beine/Muskulatur“ korrelierten die erhobenen RPE-Werte der Mittelstreckler *nicht* signifikant mit deren Differenz-Laktatwerten ($p = 0,402$; $r = 0,27$).

Auffallend ist dabei der steilere Verlauf der Regressionsgeraden der Langstreckler (rot, gepunktet) im Vergleich zu denen der Mittelstreckler (blau, gestrichelt).

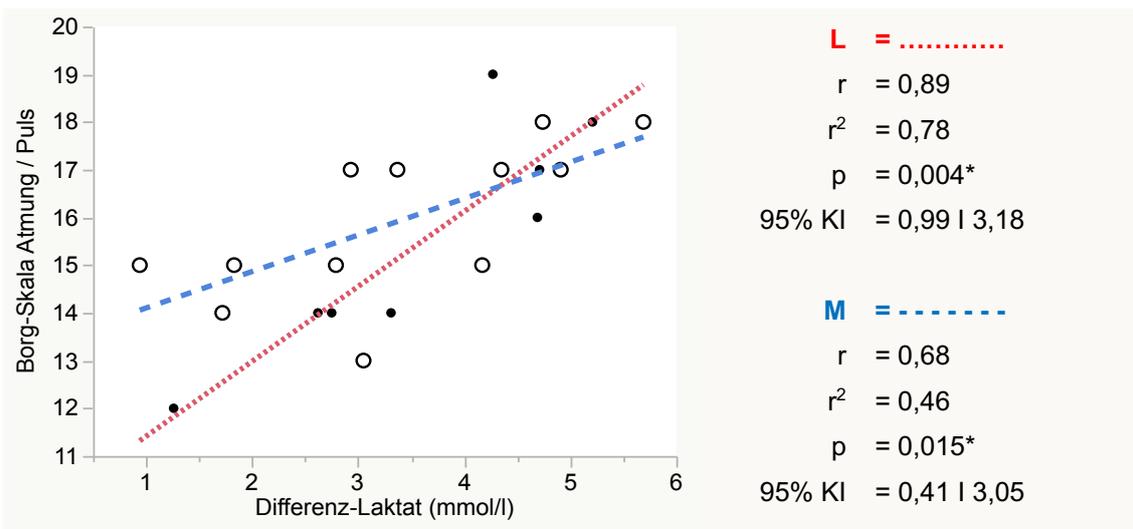
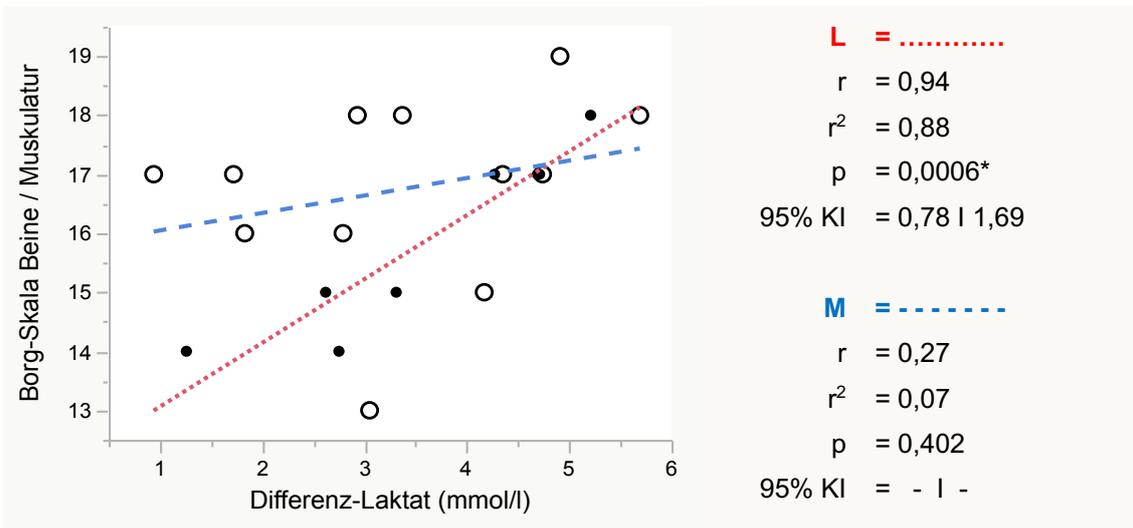
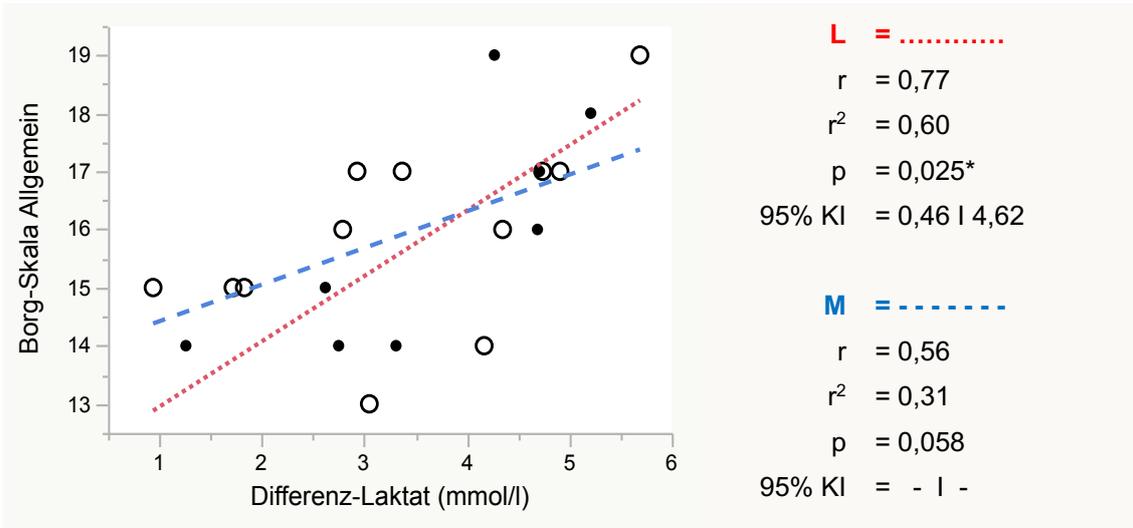


Abbildung 15: Korrelation zwischen Borg-Qualitäten des in M und L unterteilten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT
 o = M | • = L

Bei der Unterteilung des Probandenkollektivs in *Mittel- und Langstreckler* korrelierte – im Vergleich zur Korrelation für das gesamte Probandenkollektiv (vgl. Abbildung 13) – die HF-TDL avg. im Verhältnis zur HF an der IAS *nur* bei den Mittelstrecklern *tendenziell signifikant* mit den Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 (Ende TDL) im DT ($p_M = 0,074$; $r_M = 0,53$), was Abbildung 16 entnommen werden kann. Währenddessen ergab sich bei den Langstrecklern *keine* signifikante Korrelation ($p_L = 0,287$; $r_L = 0,43$).

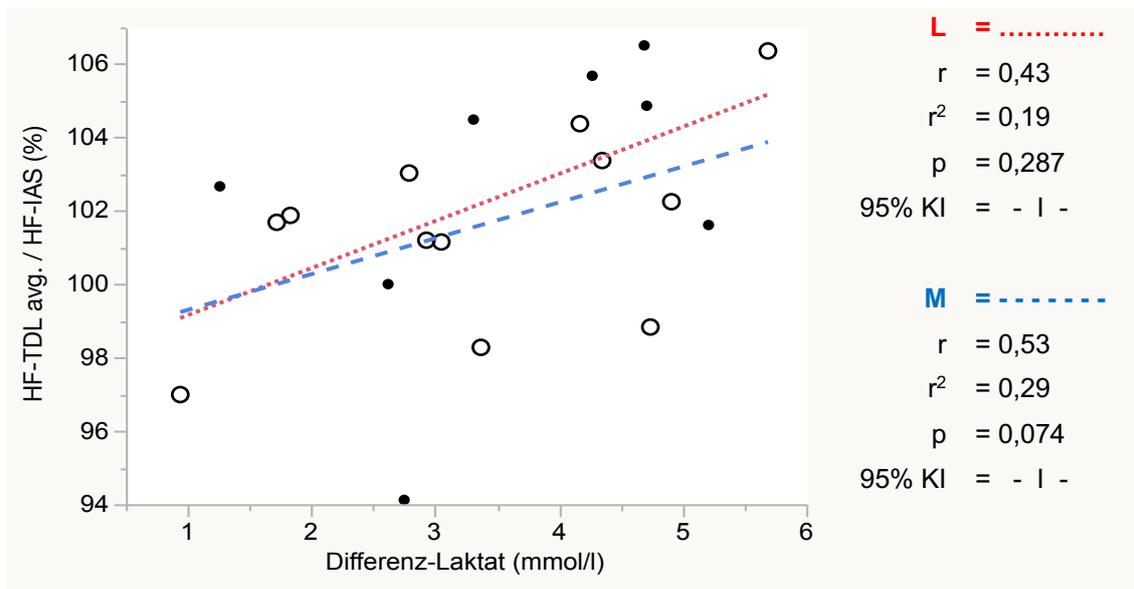


Abbildung 16: Korrelation zwischen dem Verhältnis von HF-TDL avg. zu HF-IAS in % des in M und L unterteilten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT
 ○ = M | • = L

In Abbildung 17 sind die Korrelationen der Laktatwerte am LT und an der IAS mit den Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 (Ende TDL) im DT des in *Mittel- und Langstreckler* differenzierten Probandenkollektivs dargestellt.

Auch bei dieser Unterteilung ergab sich *keine* signifikante Korrelation. Auffallend ist hier der verhältnismäßig steile Verlauf der Regressionsgerade der Mittelstreckler im Vergleich zur Regressionsgerade der Langstreckler, die nahezu horizontal verläuft ($r_M = 0,34$; $r_L = 0,0019$).

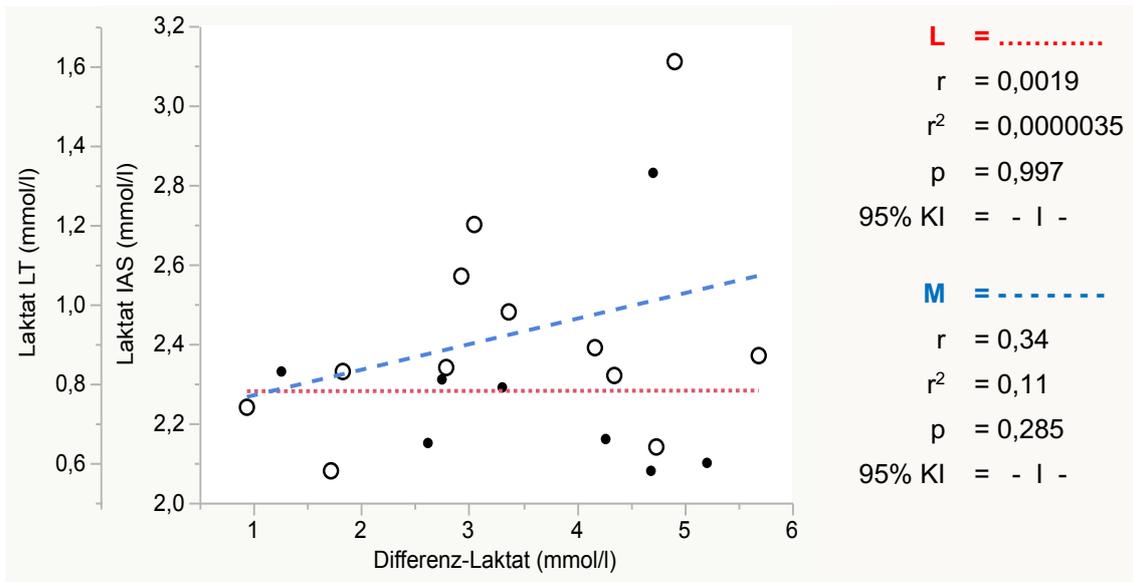


Abbildung 17: Korrelation zwischen dem Laktat am LT und an der IAS des in M und L unterteilten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT
 o = M | • = L

Im Folgenden werden die Auswertungen der Subgruppen *hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe* vorgestellt. In Tabelle 19 sind die *spiro- und ergometrischen Messwerte* aus EL und TDL aufgelistet.

Nach 15-minütigem EL ergaben sich für die hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe nahezu identische RQ-Werte *ohne* signifikanten Unterschied ($MW_{\uparrow} = 0,97$; $MW_{\downarrow} = 0,98$; $p = 0,649$).

Im Hinblick auf die gemessenen Laktatwerte wurden im TDL – wie zu erwarten – sowohl absolut als auch hinsichtlich der Differenz zu den Ausgangskonzentrationen *signifikant* höhere Werte für die hoch- im Vergleich zur niedrig-Laktat-Gruppe gemessen ($MW_{\uparrow \text{absolut bzw. Diff.}} = 5,63 \text{ mmol/l bzw. } 4,75 \text{ mmol/l}$; $MW_{\downarrow \text{absolut bzw. Diff.}} = 3,28 \text{ mmol/l bzw. } 2,42 \text{ mmol/l}$; $p = < 0,0001^*$). Ebenso zeigten sich bei den HF-Werten während des TDL im Verhältnis zur jeweiligen HF-IAS und bei den durchschnittlichen absoluten HF-Werten statistisch *signifikante* Unterschiede ($p_{\text{HF-TDL/HF-IAS}} = 0,018^*$ bzw. $p_{\text{HFavg.-TDL}} = 0,002^*$), wobei in der hoch-Laktat-Gruppe im Mittel deutlich höhere absolute Herzfrequenzen gemessen wurden als in der niedrig-Laktat-Gruppe ($MW_{\uparrow} = 182/\text{min.}$; $MW_{\downarrow} = 168/\text{min.}$).

Tabelle 19: Spiroergometrieergebnisse im EL und TDL des in ↑ und ↓ unterteilten Probandenkollektivs

↑: n = 9 ↓: n = 11		p-Werte: < 0,05 = signifikant			(MW ± SD) (MD) (Min. / Max.)
Zeitpunkt		EL	15 min. TDL	Ende TDL	
RQ (VCO₂ / VO₂)	↑	0,97 ± 0,04	<i>keine Spirometrie im TDL</i>		
		0,96 0,91 / 1,02			
	↓	0,98 ± 0,04			
		0,98 0,92 / 1,04			
p		0,649	-	-	
Laktat kapillär [mmol/l]	↑	0,80 ± 0,26	4,45 ± 0,44	5,63 ± 0,45	
		0,71 0,52 / 1,31	4,47 3,59 / 5,15	5,65 4,99 / 6,41	
	↓	0,75 ± 0,23	3,07 ± 0,76	3,28 ± 0,84	
		0,70 0,50 / 1,31	3,18 2,08 / 4,10	3,47 1,89 / 4,15	
p		0,638	0,0001*	< 0,0001*	
Differenz Laktat (Basis / Ende TDL) [mmol/l]	↑	-	-	4,75 ± 0,48	
		-	-	4,71 4,17 / 5,69	
	↓	-	-	2,42 ± 0,84	
		-	-	2,75 0,94 / 3,37	
p		-	-	< 0,0001*	
HF / HF-IAS [%]	↑	83,5 ± 4,5	-	103,8 ± 2,5	
		84,8 75,7 / 88,6		104,4 98,8 / 106,5	
	↓	84,1 ± 3,9		100,5 ± 3,0	
		82,1 80,1 / 92,0		101,2 94,1 / 104,5	
p		0,785	-	0,018*	
HFavg. TDL [1/min.]	↑	-	-	182 ± 9	
		-	-	184 167 / 194	
	↓	-	-	168 ± 8	
		-	-	169 154 / 181	
p		-	-	0,002*	

In Tabelle 20 sind die *Borg-Qualitäten* im EL und TDL des in *hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe* differenzierten Probandenkollektivs aufgelistet.

Die Auswertung ergab, dass die Belastung während dem EL von beiden Gruppen in allen drei erfassten Qualitäten vergleichbar und *ohne* signifikanten Unterschied empfunden wurde. Hingegen empfand die hoch-Laktat-Gruppe die Belastung im TDL in *allen* drei erfassten Qualitäten *signifikant* und deutlich anstrengender als die niedrig-Laktat-Gruppe (MW_{\uparrow} Allgemein - Beine/Muskulatur - Atmung/Puls = 17,0 - 17,2 - 17,2; MW_{\downarrow} Allgemein - Beine/Muskulatur - Atmung/Puls = 15,0 - 15,7 - 14,5; $p_{\text{Allgemein - Beine/Muskulatur - Atmung/Puls}} = 0,006^* - 0,034^* - 0,0004^*$).

Tabelle 20: Borg-Qualitäten im EL und TDL des in \uparrow und \downarrow unterteilten Probandenkollektivs

Zeitpunkt		p-Werte: < 0,05 = signifikant		(MW \pm SD)
				(MD)
				(Min. / Max.)
\uparrow : n = 9				
\downarrow : n = 11				
Zeitpunkt		EL	Ende TDL	
Borg-Skala Allgemein	\uparrow	9,7 \pm 1,5	17,0 \pm 1,6	
		9,0	17,0	
		7,0 / 12,0	14,0 / 19,0	
	\downarrow	9,7 \pm 2,2	15,0 \pm 1,3	
		10,0	15,0	
6,0 / 14,0		13,0 / 17,0		
p		0,945	0,006*	
Borg-Skala Beine / Muskulatur	\uparrow	9,4 \pm 2,2	17,2 \pm 1,1	
		10,0	17,0	
		6,0 / 12,0	15,0 / 19,0	
	\downarrow	9,9 \pm 2,5	15,7 \pm 1,7	
		10,0	16,0	
6,0 / 14,0		13,0 / 18,0		
p		0,668	0,034*	
Borg-Skala Atmung / Puls	\uparrow	10,0 \pm 2,1	17,2 \pm 1,2	
		9,0	17,0	
		7,0 / 13,0	15,0 / 19,0	
	\downarrow	9,8 \pm 2,0	14,5 \pm 1,5	
		10,0	14,0	
7,0 / 14,0		12,0 / 17,0		
p		0,844	0,0004*	

Abbildung 18 stellt die jeweilige Borg-Qualität in Korrelation zu den Differenz-Laktatwerten des in *hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe* differenzierten Probandenkollektivs zu ZP 3 (Ende TDL) im DT dar.

Dabei ergab sich lediglich für die *hoch-Laktat-Gruppe* im Bereich „Beine/Muskulatur“ eine *signifikante* Abhängigkeit. Im Bereich „Allgemein“ zeigte sich zumindest eine *tendenziell signifikante* Abhängigkeit von den Differenz-Laktatwerten der hoch-Laktat-Gruppe, was sich auch im deutlich steileren Regressionsgeradenverlauf (rot, gepunktet) zeigt ($p_{\text{Beine/Muskulatur}} = 0,042^*$; $r_{\text{Beine/Muskulatur}} = 0,69$ bzw. $p_{\text{Allgemein}} = 0,096$; $r_{\text{Allgemein}} = 0,59$).

In der *niedrig-Laktat-Gruppe* ergab sich in *keiner* der drei erfassten Borg-Qualitäten ein signifikanter Zusammenhang mit deren Differenz-Laktatwerten.

Auch bei der Subgruppenanalyse von *hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe* korrelierte – im Vergleich zur Korrelation für das gesamte Probandenkollektiv (vgl. Abbildung 13) – die HF-TDL avg. im Verhältnis zur HF an der IAS *nicht* signifikant mit den Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 (Ende TDL) im DT, was Abbildung 19 entnommen werden kann.

Die prozentualen Herzfrequenzen der hoch-Laktat-Gruppe lagen im Durchschnitt deutlich über denen der niedrig-Laktat-Gruppe, was durch die höher verlaufende Regressionsgerade der hoch-Laktat-Gruppe (rot, gepunktet) dargestellt wird.

In Abbildung 20 sind die Korrelationen der Laktatwerte am LT und an der IAS mit den Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 (Ende TDL) im DT des in *hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe* differenzierten Probandenkollektivs dargestellt.

Auch bei dieser Unterteilung ergab sich *keine* signifikante Korrelation, wobei jedoch die Regressionsgerade der hoch-Laktat-Gruppe flacher und tiefer verläuft als die der niedrig-Laktat-Gruppe.

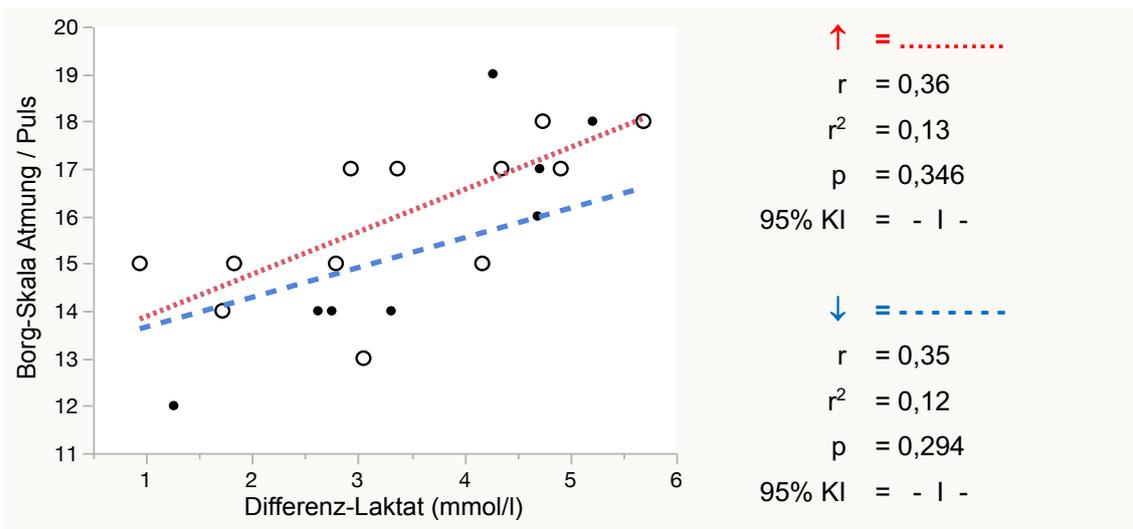
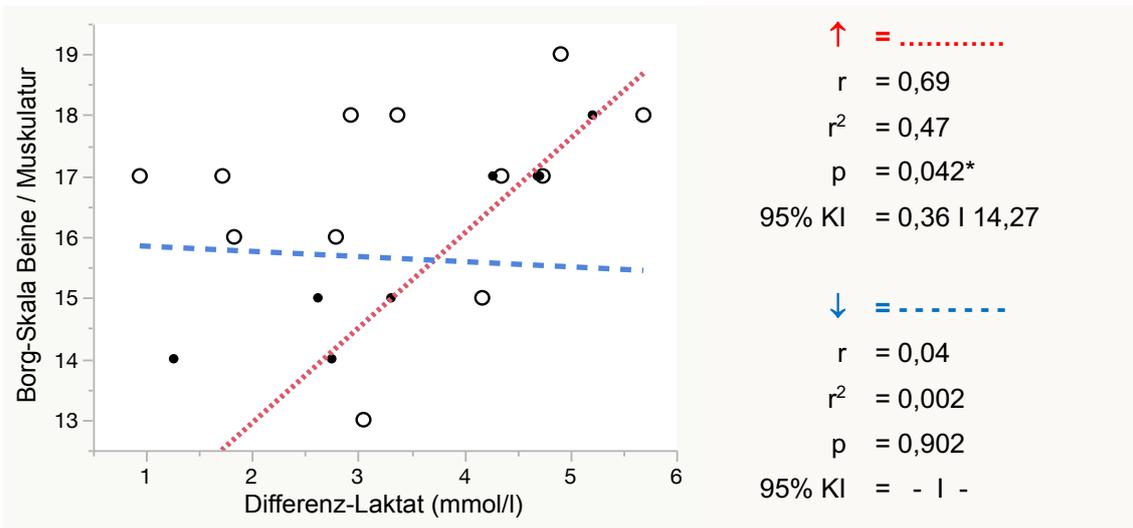
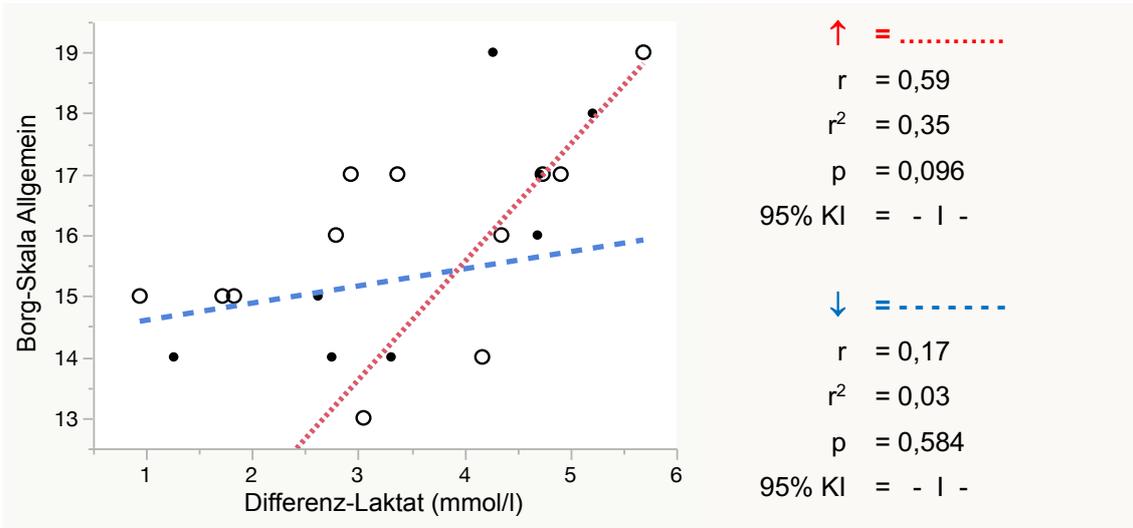


Abbildung 18: Korrelation zwischen Borg-Qualitäten des in ↑ und ↓ unterteilten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT
 o = M | • = L

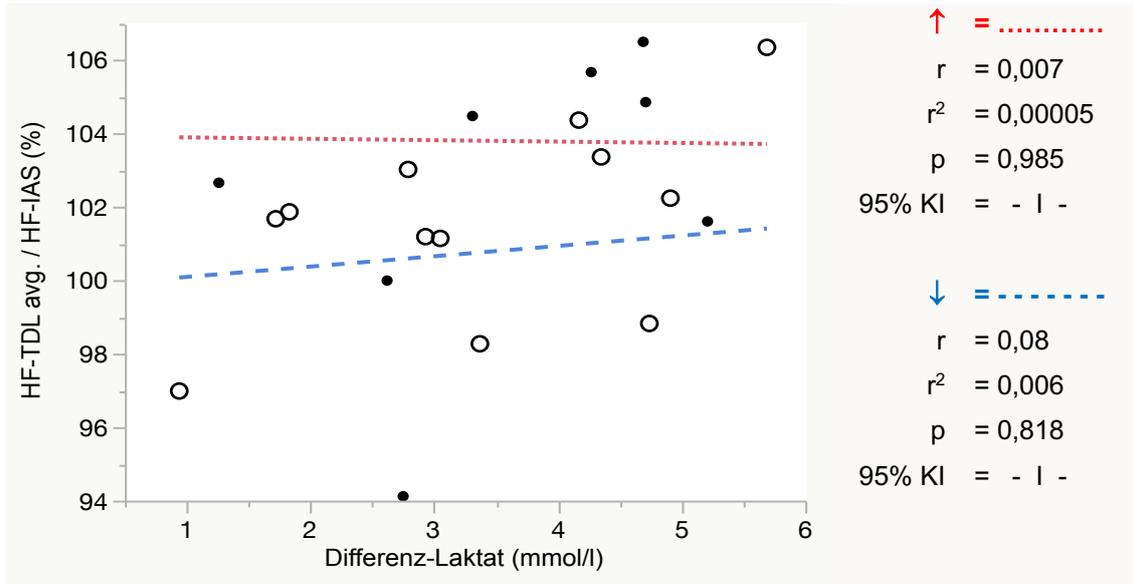


Abbildung 19: Korrelation zwischen dem Verhältnis von HF-TDL avg. zu HF-IAS in % des in ↑ und ↓ unterteilten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT
 o = M | • = L

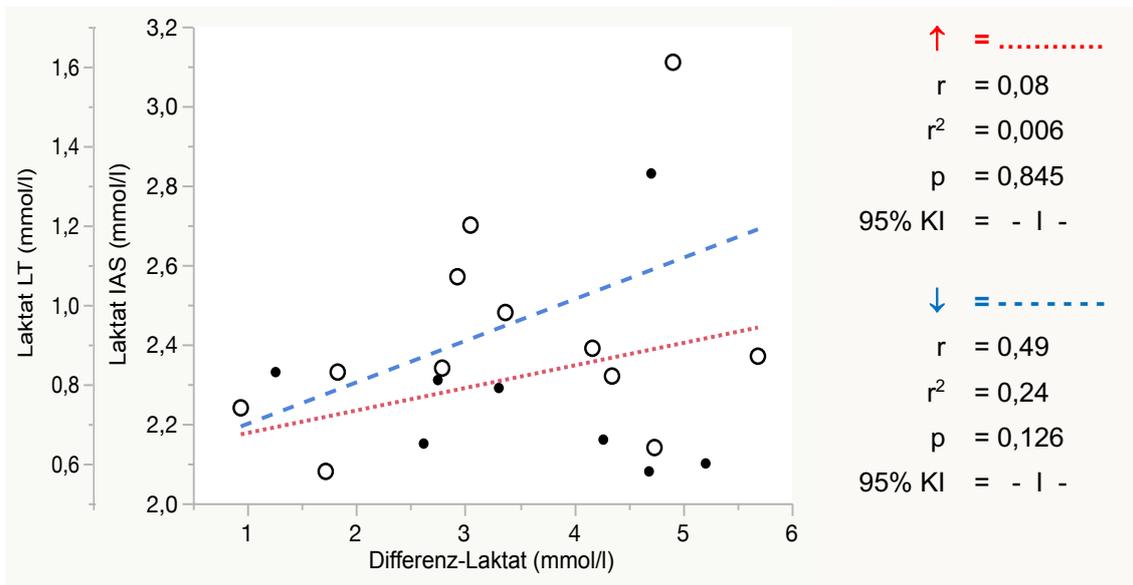


Abbildung 20: Korrelation zwischen dem Laktat am LT und an der IAS des in ↑ und ↓ unterteilten Probandenkollektivs und deren Differenz-Laktatwerten zu ZP 3 im DT
 o = M | • = L

4 Diskussion

Zur Einleitung in diese Diskussion möchte ich den O-Ton einer ehemaligen Deutschen Spitzen-Mittelstreckenläuferin in Bezug auf die derzeit standardmäßigen leistungsdiagnostischen Tests zitieren: „[...] *Der Laktattest ist für Mittelstrecklerinnen und Mittelstreckler absolut unbrauchbar und nicht aussagekräftig. Im Gegenteil: Unwissende junge Athletinnen und Athleten werden durch diese Tests einfach nur verunsichert und demoralisiert.*“

Hinter diesen Emotionen – die leicht als Schuldzuweisung an die Wissenschaft verstanden werden könnten, wohl aber möglicherweise auch ein „Anwenderproblem“ darstellen – verbirgt sich jedoch vermutlich auch ein Quantum Wahrheit.

Wie viele junge Kaderathletinnen und -athleten wurde auch diese Mittelstrecklerin von ihrem Verband gedrängt, sich einer jährlichen leistungsdiagnostischen Routineuntersuchung mittels Laktat-Mehrstufentest zu unterziehen. Für ihre weitere Trainingsplanung und -steuerung hat sie dabei *keinen* persönlichen Benefit gezogen. Der Test attestierte ihr lediglich wiederkehrend ihre scheinbar mangelnde Ausdauerleistungsfähigkeit, die jedoch – wenn überhaupt – in äußerst geringem Maße einen prädiktiven Wert für ihre Wettkämpfe als 800 m-Läuferin hatte. Auch die aus der IAS abgeleiteten Dauerlaufgeschwindigkeiten hatten für ihre Trainingssteuerung *keine* Konsequenz, da in ihrem Mittelstreckentraining Dauerläufe eine untergeordnete Rolle spielten.

Auch anhand mündlicher Berichte von Deutschen 1.500 m- und 5.000 m Kaderläufern, sowie aus eigener Erfahrung als 3.000 m Hindernis-Läufer, kann ich bestätigen, dass die von den laktatbasierten leistungsdiagnostischen Untersuchungen abgeleiteten Laufgeschwindigkeitsempfehlungen subjektiv *selten* direkten Einfluss auf die Trainingssteuerung und damit die konkret im Training gelaufenen Tempi haben.

Es handelt sich also scheinbar *doch nicht* um ein reines Problem der Anwender, sondern um eine *fragliche individuelle Validität der laktatbasierten Leistungsdiagnostik* im Hinblick auf das Schwellentraining *im Alltag* der Athleten.

Genau dieser Punkt scheint der *kritische* Aspekt der heutigen Leistungsdiagnostik zu sein. Wie bereits in Kapitel 1.3 erläutert bildet die IAS nach Dickhuth *et al.* (Dickhuth et al., 1991) – oder auch andere Schwellenkonzepte – scheinbar den aerob-anaeroben Übergang und damit die Dauerleistungsgrenze ab. Mittelstreckenrennen über 800 m und 1.500 m werden im Leistungssport jedoch bei Geschwindigkeiten *deutlich* über dieser Dauerleistungsgrenze gelaufen. Selbst im Hinblick auf 5.000 m- und 10.000 m-Rennen, die allgemein der Langstrecke zugeordnet werden, kommt es aufgrund von taktischen Rennverläufen und Tempowechseln während der Rennen zu keiner konstanten Dauerbelastung, weshalb auch für Langstrecklerinnen und Langstreckler in diesem Bereich – v. a. in der Endphase der Rennen – die *anaerob-laktazide Leistungsfähigkeit* ein *wichtiger Schlüssel zum Erfolg* zu sein scheint.

Dennoch ist unstrittig, dass die *aerobe Ausdauerleistungsfähigkeit mit zunehmender Streckenlänge* die Varianz der Wettkampfleistung in einem doch *beträchtlichen* Maße erklärt (vgl. Röcker et al., 1997).

Die aus der laktatbasierten Leistungsdiagnostik ermittelten Trainingsvorgaben anhand der IAS haben somit eigentlich *nur* den Anspruch die *aerobe* Ausdauerleistungsfähigkeit isoliert von anderen Fähigkeiten zu reflektieren. Möglicherweise scheint diese jedoch im Schwellentraining von Spitzenathleten mit *abnehmender* Wettkampfstreckenlänge (v. a. im Mittelstreckenlauf, z. T. aber auch im Langstreckenbereich, s. o.) an Bedeutung zu verlieren. Diese Vermutung wird auch bereits durch eine Arbeit von A. M. Nieß 1993 beschrieben. Wobei i. R. einer Längsschnittstudie zu *„Leistungsdiagnostik, Trainingsbelastungen und Wettkampfleistungen bei Mittel- und Langstreckenläufern“* gezeigt wurde, dass *„die alleinige Entwicklung einer hohen aeroben Kapazität zu einer optimalen Wettkampfleistung jedoch nicht ausreichte, da diese mit Hilfe der zu-*

sätzlichen Energiebereitstellung durch (anaerob-)laktazide Stoffwechselprozesse ermöglicht wird“. Und „dieser Einfluss mit abnehmender Streckenlänge zunahm“ (Niess, 1993).

Dass es in diesen Hochleistungssportbereichen eine „*enorme interindividuelle Variabilität in der Laktatkinetik*“ gibt, wurde bereits 2003 durch Van Hall *et al.* bei der Laktatdiagnostik in unterschiedlichen Muskelgruppen bei hochtrainierten Skilangläufern bei submaximalen Intensitäten von 76 % der jeweiligen VO₂max. gezeigt (Van Hall *et al.*, 2003). Weiter beschrieben Messonnier *et al.* 2013 beim Vergleich von trainierten Radsportlern und Untrainierten eine „*deutlich größere Laktatvariabilität an LT von trainierten Radsportlern, als von Untrainierten*“ (Messonnier *et al.*, 2013).

Die Ursache hierfür ist bislang *nicht* zielführend erklärt und unterliegt möglicherweise individuellen Unterschieden, z. B. auf der Ebene sogenannter Laktat-Pyruvat-Transporter-Proteine (Thomas *et al.*, 2011), die den bidirektionalen transmembranösen Austausch von Laktat zwischen verschiedenen Kompartimenten unterstützen.

Es stellt sich an dieser Stelle also eher die Frage auf welcher Ebene, bzw. über welche Faktoren und Signalkaskaden entsprechende Marker – wie beispielsweise die im Kapillarblut messbare Laktatkonzentration – angesteuert werden, die möglicherweise die individuelle Anpassung auf eine körperliche Belastung induzieren.

Dabei ist bekannt, dass eine körperliche Belastung in Form eines Trainingsreizes einen komplexen Stimulus darstellt, der aus mechanischen-, metabolischen-, sowie neuronalen- und hormonellen Faktoren besteht. Diese Faktoren lösen eine Reihe von Veränderungen in der Homöostase einer rekrutierten Muskelzelle aus. Diese werden von spezifischen Sensormolekülen erfasst und aktivieren ihrerseits entsprechende Signalkaskaden, die letztlich auf mitochondrialer Ebene die Genexpression regulieren und damit die Trainingsadaptation

induzieren, was M. Flück 2006 als „funktionelle-, strukturelle- und molekulare Plastizität der Skelettmuskulatur von Säugern“ beschrieb (Flück, 2006).

Diese Plastizität anzusteuern hat sich die sportmedizinische Leistungsdiagnostik quasi indirekt zum Ziel gesetzt. Mit zunehmender wissenschaftlicher Erkenntnis wird jedoch klar, dass diese *individuelle* Ansteuerung multifaktoriell bedingt ist und somit differente metabolische Stressreaktionen im Training wohl auch differente Aktivierungen entsprechender Signalkaskaden zur Trainingsadaptation induzieren.

In der vorliegenden Arbeit war daher das Ziel die Validität individueller Belastungsvorgaben anhand der laktatbasierten IAS bei der Ansteuerung von metabolischen Belastungsintensitäten im Schwellentraining von Mittel- und Langstreckenläufern zu überprüfen.

Die in der Studie eingeschlossenen Probanden wurden daher zunächst den herkömmlichen leistungsdiagnostischen Tests (*MST* mit Laktatmessung im Kapillarblut und *RT* mit Spirometrie) zur Bestimmung der *metabolischen- und respiratorischen Schwellenwerte (IAS und AT bzw. VO₂max.)* unterzogen (vgl. Kapitel 2.4.2 und 2.4.3).

Im weiteren Verlauf absolvierten sie einen standardisierten *DT inklusive TDL* mit vordefinierter – in Abhängigkeit der zuvor bestimmten IAS – *gleicher relativer Belastungsintensität*, i. R. dessen vor, während und nach Belastung die *kapillären Laktatkonzentrationen* gemessen wurden (vgl. Kapitel 2.4.4). Ebenso erfolgte eine Analyse des *Herzfrequenzverhaltens* und eine Abfrage des *subjektiven Belastungsempfindens mittels Borg-Skala* zu vordefinierten Zeitpunkten.

Weiterhin wurden vor, direkt nach Ende der Belastung und 2 h später venöse Blutabnahmen durchgeführt, um auch mögliche Veränderungen und Variabilitäten auf zellulärer-, mikrometabolischer- und genetischer Ebene im Blut zu

identifizieren, was jedoch Gegenstand weiterführender Arbeiten ist. In dieser Arbeit bleibt der Fokus auf der Validität der herkömmlichen Laktatleistungsdiagnostik.

Wegen der in der Literatur bereits bekannten Problematik bei der Definition der *relativ gesehen „gleichen“ Belastungsintensität* entschieden wir uns, in dieser Studie eine Laufgeschwindigkeit von 105 % der zuvor bestimmten jeweiligen IAS als *gleiche* relative Belastung der Athleten zu definieren.

Wurden anfangs noch Prozentwerte der $VO_2\text{max.}$ oder der maximalen HF zur Festlegung einer gleichen relativen Belastungsintensität herangezogen, gab es bald diverse Autoren, die es bevorzugten, die Belastung in Relation zur IAS oder zu anderen Schwellenparametern zu setzen (vgl. Mann et al., 2013). Allerdings ergaben sich auch dabei z. T. enorme interindividuelle Schwankungen in den Laktatkinetiken bei *eigentlich* „gleicher“ relativer Belastungsintensität, was Meyer *et al.* bereits 1999 (Meyer et al., 1999) und Scharhag-Rosenberger *et al.* 2010 (Scharhag-Rosenberger et al., 2010) eindrücklich aufzeigten.

4.1 Diskussion der Charakterisierung der Läufer in Mittel- und Langstreckler im Mehrstufentest und Rampentest

Im Hinblick auf die erhobenen anthropometrischen Daten kann das gesamte Probandenkollektiv als homogen betrachtet werden (vgl. Kapitel 2.3). Dabei wurden die Wettkampfdistanzen 800 m, 1.500 m und 3.000 m Hindernis der Mittelstrecke, die 5.000 m, 10.000 m und Halbmarathon der Langstrecke zugeordnet.

Im MST (vgl. Kapitel 2.4.2) wurden sowohl in *Ruhe* als auch am *LT nahezu identische* Laktatwerte und Laufgeschwindigkeiten der Mittel- und Langstreckler gemessen. An der *IAS* erzielten die *Langstreckler* hingegen eine *signifikant höhere Laufgeschwindigkeit*, was für eine *bessere Ausdauerleistungsfähigkeit* der Langstreckler spricht. Ein weiterer Beleg für eine bessere Ausdauerleistungsfä-

higkeit als charakteristisches Merkmal von Langstrecklern gegenüber Mittelstrecklern findet sich im RT (vgl. Kapitel 2.4.3). An der dabei ermittelten *respiratorischen Schwelle (AT)* erreichten die *Langstreckler* ebenfalls eine *signifikant höhere Laufgeschwindigkeit*.

Diese Unterschiede können durch folgende anatomische und physiologische Aspekte erklärt werden. Anatomisch ist wichtig zu beachten, dass sich die quergestreifte Skelettmuskulatur aus zwei bzw. drei Muskelfasertypen zusammensetzt:

- Typ I-Fasern = Slow-Twitch-Fasern (ST-Fasern)
- Typ IIa-Fasern = Fast-/Fatigue-resistent-Fasern (FR-Fasern)
- Typ IIb-Fasern = Fast-Twitch-Fasern (FT-Fasern)

ST- und FR-Fasern sind langsam zuckende, ausdauernde und gegen Ermüdbarkeit resistente Fasern. Sie besitzen einen hohen Anteil an Mitochondrien und Myoglobin für die sauerstoffabhängige Energiegewinnung von ATP mittels oxidativer Phosphorylierung (vgl. Kapitel 1.2.3). *FT-Fasern* sind schnell zuckende Fasern. Die kurzfristige und schnelle Energiebereitstellung erfolgt dabei mittels (anaerober) Glykolyse, weshalb die FT-Fasern einen hohen Anteil an Laktatdehydrogenase (LDH) zum Abbau des anfallenden Pyruvats aufweisen.

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen Mittel- und Langstrecklern ist der prozentuale Anteil an ST- und FT-Fasern der Skelettmuskulatur. *Mittelstreckler* verfügen über einen hohen Anteil an FT-Fasern. *Langstreckler* hingegen verfügen über einen hohen Anteil an ST-Fasern. Die Faserverteilung variiert individuell und ist größtenteils genetisch determiniert. Durch gezieltes Training kann jedoch die Umwandlung von einem Fasertyp in einen anderen getriggert und damit eine für die entsprechende Wettkampfdistanz „*günstigere*“ Faserverteilung erreicht werden (vgl. Simoneau et al., 1986).

Der prozentual höhere Anteil anaerob-laktazid arbeitender FT-Fasern der *Mittelstreckler* könnte deren früheren und steileren Anstieg der Laktatwerte im MST, sowie das frühere Erreichen des AT im RT im Vergleich zu den Lang-

strecklern erklären. Ob dies auf unser Probandenkollektiv jedoch tatsächlich zutrifft, kann nicht nachgewiesen werden, da den Athleten in diesem Studienteil *keine* Muskelbiopsien entnommen wurden.

Ein weiterer charakteristischer Unterschied zwischen Mittel- und Langstrecklern ist ihre *Sauerstoffaufnahme*fähigkeit. In der Leistungsdiagnostik wird in der Regel die *maximale Sauerstoffaufnahme*fähigkeit ($VO_{2max.}$) als weiteres Maß für die Ausdauerleistungsfähigkeit bestimmt. Die $VO_{2max.}$ repräsentiert die maximale Leistungsfähigkeit der sogenannten „*Sauerstoffkette*“. Diese besteht aus drei Komponenten:

1. Atmung / Ventilation
2. Transport / Herz-Kreislaufsystem
3. Muskuläre Verwertung

Atmung bzw. Ventilation sind durch die Alveolarfläche der Lunge *genetisch determiniert*, durch Training *nicht* steigerbar und limitieren daher die $VO_{2max.}$

Der O_2 -Transport und somit das Sauerstoffangebot im Muskel hängt zum einen vom *Herzzeitvolumen (HZV)*, also dem Produkt aus Schlagvolumen und Herzfrequenz, ab. Das Schlagvolumen lässt sich in geringem Maße durch Training (Sportlerherzbildung = konzentrische Herzmuskelhypertrophie) steigern. Die HF als zweiter, das HZV definierender Parameter, ist bei Maximalbelastung ebenfalls limitiert und physiologisch *nicht* weiter steigerbar.

Zum anderen hängt das Sauerstoffangebot von der Anzahl der roten Blutkörperchen (Erythrozyten), welche sich im *Hämatokritwert (Hkt)* widerspiegelt, und der darin enthaltenen Menge an *sauerstoffbindendem Hämoglobin (Hb)* ab. Die Trainingseffekte hierauf sind ebenso begrenzt. Eine Möglichkeit der Optimierung dieser Parameter besteht in Höhenttraining. Durch den in der Höhenluft *relativen* Sauerstoffmangel kommt es zu einer reaktiven, kompensatorischen Ausschüttung des endogenen Hormons Erythropoetin (EPO), welches die Synthese von Erythrozyten induziert und somit zu einem höheren Hkt- und Hb-Gehalt und damit zu einer größeren Anzahl an Sauerstoffträgern führt.

Die *muskuläre Sauerstoff- und Glukoseverwertung* ist von der Faserverteilung und damit in erster Linie von der Mitochondriendichte der Muskelfasern abhängig (oxidativ/aerob arbeitende ST-Fasern vs. anaerob/glykolytisch arbeitende FT-Fasern, s.o.).

Ein Großteil der Komponenten, die zur Sauerstoffaufnahme-fähigkeit beitragen, sind letztlich genetisch determiniert. Durch Ausdauertraining kann jedoch das Herzzeitvolumen gesteigert, sowie die Muskelfaserverteilung zugunsten der ST-Fasern verändert werden, was in einer vergrößerten $VO_2max.$ resultiert.

In Relation auf das Körpergewicht erzielten die vorwiegend ausdauertrainierten *Langstreckler* im RT am AT zwar *tendenziell signifikant* höhere Sauerstoffaufnahme-Werte als die *Mittelstreckler*, die gemessenen *maximalen Werte* ($VO_2max.$) waren *hingegen nahezu identisch*, was widersprüchlicher Weise für eine gleiche Ausdauerleistungsfähigkeit von Mittel- und Langstrecklern sprechen würde. Nüchtern betrachtet haben Mittel- und Langstreckler jedoch einfach *nur* eine gleiche *oxidative Kapazität*, welche in Form der $VO_2max.$ belegt wird.

Der frühere Laktatanstieg und die damit verbundene *signifikant* geringere IAS-Laufgeschwindigkeit der Mittelstreckler lässt sich hingegen durch deren höheren anaerob/glykolytischen Metabolismus, bzw. die frühere Rekrutierung von in diesem Sinne arbeitenden FT-Fasern erklären.

Dies lässt wiederum die Vermutung zu, dass Ausdauertraining mit höheren Trainingskilometerumfängen die IAS (metabolische Kapazität) stärker verbessern kann als die $VO_2max.$ (oxidative Kapazität).

Trotz der Belege für eine bessere Ausdauerleistungsfähigkeit von Langstrecklern gegenüber Mittelstrecklern kam es *bei maximaler Ausbelastung* im RT zu *ähnlichen* maximalen Laufgeschwindigkeiten, sowie *ähnlichen* Ergebnissen der übrigen ermittelten Parameter; VO_2- , RQ-, Laktat- und HF-Werte.

Die *nahezu identische* maximale Laufgeschwindigkeit kann durch den vermeintlich höheren prozentualen Anteil an FT-Fasern bei den Mittelstrecklern im Vergleich zu den Langstrecklern erklärt werden, da im anaeroben Maximalbereich die FT-Fasern aufgrund ihrer ausgeprägten Möglichkeit zur anaerob glykolytischen Energiebereitstellung trotz mangelnder O₂-Versorgung weiterhin adäquate Kontraktionen liefern. Somit werden im letzten, komplett anaerob-laktaziden Abschnitt des RT kurzzeitig gleich hohe, bzw. in Relation sogar höhere maximale Laufgeschwindigkeiten bei den Mittelstrecklern ermöglicht.

Zusammenfassend ergibt sich daraus die Erkenntnis, dass für *Langstreckenläufer* die Laufgeschwindigkeiten an IAS, AT oder VO₂max. – also ihre *aerobe* Ausdauerleistungsfähigkeit – als wichtige Faktoren ihrer allgemeinen Leistungsfähigkeit herangezogen werden können. Bei *Mittelstreckenläufern* rückt die aerobe Ausdauerkomponente jedoch in den Hintergrund. Wie bereits vermutet scheint bei ihnen die *anaerobe* (Ausdauer-)Leistungsfähigkeit, welche jedoch bislang in den routinemäßigen Leistungsdiagnostiktests *nicht* erhoben wird, eine wesentlichere Rolle zu spielen. Eventuell würde sich das Ganze noch verschärfen, würde man auch die 5.000 m Wettkampfdistanz, bei der doch regelhaft in der Endphase des Rennens im anaeroben Bereich gelaufen wird, der Mittelstrecke zuordnen.

4.2 Diskussion der Ergebnisse im Dauertest des gesamten- und des in Mittel- und Langstreckler unterteilten Probandenkollektivs

Zur Aufzeichnung der Laktatkinetik während dem Dauertest wurde zu charakteristischen Zeitpunkten (in Ruhe, nach dem EL, nach 15 min. TDL, nach 30 min. TDL und nach dem AL) die Laktatkonzentration im Plasma durch Abnahme kapillärer Blutproben am Ohrläppchen bestimmt.

Nach der 15-minütigen Einlaufphase mit einer Laufgeschwindigkeit von 75 % der IAS-Laufgeschwindigkeit (entspricht Laufgeschwindigkeit an LT) blieben die Laktatwerte bei allen Probanden auf niedrigem Niveau konstant (= rein aerober

Stoffwechsel). Im Mittel sanken die Laktatkonzentrationen nach dem EL im Vergleich zu den Messungen in Ruhe sogar noch etwas ab, was auf die zu Beginn einer Belastung überproportional in Gang gesetzten Stoffwechselabbauprozesse in der Muskulatur zurückzuführen ist, wodurch *initial mehr Laktat abgebaut als produziert* wird. Die Laktatmittelwerte nach dem EL im DT waren trotz *theoretisch gleicher* Belastungsintensität *niedriger* als die Mittelwerte der LT-Laktatkonzentrationen im MST.

In der darauffolgenden Belastungsphase in Form des TDL mit einer konstanten Laufgeschwindigkeit von 105 % der IAS-Laufgeschwindigkeit stiegen die Laktatkonzentrationen im Plasma bei allen Probanden – wie zu erwarten – bereits bei der ersten Messung nach 15 min. Laufzeit (ZP 2) deutlich an. Am Ende des TDL nach 30 min. Laufzeit (ZP 3) blieben die Laktatwerte im Sinne eines *Steady-State* bei $\pm 0,5$ bis 1 mmol/l konstant, was dafürspricht, dass der *aerob-anaerober Übergangsbereich wie gewünscht angesteuert* wurde.

Das „*maximale Laktat-Steady-State*“ (LASSmax.) ist definiert als Laktatanstieg von maximal 1 mmol/l über die letzten 20 min. bzw. 0,5 mmol/l über die letzten 10 min. einer konstanten 30-minütigen Belastungsintensität (Urhausen et al., 1993). Wie bereits in Kapitel 1.3.1 beschrieben handelt es sich beim LASSmax. um den *Grenzbereich zwischen rein aerober- zu teils anaerober Energiebereitstellung*. *Laktatproduktion und -abbauleistung* des Körpers sind in diesem Leistungsbereich *gerade noch im Gleichgewicht (= Steady-State)*.

Dieses Steady-State entspricht der Intensität im Schwellenbereich, die man – bezogen auf das Ausdauertraining von Läuferinnen und Läufern – bei einem TDL idealerweise anzusteuern versucht. Um diese Intensität zu identifizieren müsste daher zunächst – wie auch in unserem Testsetting – ein herkömmlicher MST absolviert werden, um daraus annähernd die Laufgeschwindigkeit im Ausdauerleistungsgrenzbereich ermitteln zu können. Anschließend müssten weitere DTs mit TDLs im Bereich dieser Laufgeschwindigkeit folgen. Nach jedem Test müsste dabei die Laufgeschwindigkeit – anhand der vorherigen Laktatki-

netiken – minimal gesteigert oder reduziert werden, bis sich letztlich ein *definitives Laktat-Steady-State* über die gesamte Belastungsdauer einstellt.

Da diese Methode der Ermittlung des optimalen Ausdauerleistungsbereichs *in der Praxis viel zu aufwändig* wäre, wurden *stattdessen* diverse sogenannte *Schwellenkonzepte* entwickelt (z. B. IAS nach *Dickhuth et al.* (Dickhuth et al., 1991), IAS nach *Stegmann und Kindermann* (Stegmann and Kindermann, 1982), 4-mmol/l-Schwelle nach *Mader et al.* (Mader et al., 1976)), um mit nur *einem einzigen* Test die optimalen individuellen Trainingsbereiche festlegen bzw. vorhersagen zu können.

Vergleicht man nun die TDL-Laktatwerte aus dem DT mit denen an der IAS im MST, so müssten diese aufgrund der definierten Laufgeschwindigkeit von 105% der IAS-Laufgeschwindigkeit *oberhalb* der ermittelten IAS-Laktatwerte liegen. Geht man aufgrund der physiologischen Laktatkinetik von einem kontinuierlichen Laktatanstieg aus, so müssten die Werte aus dem TDL bereits nach 15min. Belastungsdauer *deutlich* höher liegen und im Verlauf *noch weiter* ansteigen.

Bei unseren Ergebnissen zeigte sich, dass es tatsächlich bei der Mittelung der Daten *aller Läufer* in den ersten 15 min. zu einem Anstieg der Laktatkonzentrationen kam. Zwischen ZP 2 und 3 stellte sich dann jedoch ein *Laktat-Steady-State* ein ($MW_{\text{Laktat-TDL ZP 3 ges.}} = 4,33 \text{ mmol/l}$), allerdings auf einem *deutlich höheren Niveau* als an der IAS im MST ($MW_{\text{Laktat-IAS ges.}} = 2,37 \text{ mmol/l}$).

Bei differenzierterer Betrachtung der Laktatwerte des in *Mittel- und Langstreckler* unterteilten Probandenkollektivs zeigte sich, dass sich sowohl bei den Mittel- als auch bei den Langstrecklern im TDL zwischen ZP 2 und 3 ein Laktat-Steady-State einstellte. Auch dieses *Steady-State* lag bei beiden Gruppen wiederum auf einem *deutlich höheren Niveau* als die ermittelten Laktatwerte an der IAS im MST.

Geht man davon aus, dass es sich dabei um das LASSmax., also den aerob-anaeroben Übergangsbereich, handelte, so könnte man mutmaßen, dass in diesem Bereich auch die IAS liegen müsste. Da der Mittelwert der Laktatwerte an der IAS des *gesamten Probandenkollektivs* jedoch knapp *2 mmol/l tiefer* lag (s. o.), weichen unsere Ergebnisse *deutlich* von den theoretischen Überlegungen und den bislang etablierten Ermittlungen der IAS ab.

Es stellt sich somit die Frage, welchen *Punkt* des aerob-anaeroben Schwellenbereichs die IAS dann *tatsächlich* abbildet und ob es in diesem Bereich möglicherweise interindividuelle (scheinbar z. T. große) Unterschiede gibt, wie es bereits 2003 in der Variabilität von Laktatkinetiken bei submaximalen Intensitäten der VO_{2max} . durch Van Hall *et al.* (Van Hall et al., 2003) und an LT 2013 durch Messonnier *et al.* (Messonnier et al., 2013) beschrieben wurde (vgl. Einführung Diskussion Kapitel 4).

4.3 Unterteilung des Probandenkollektivs in hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe sowie Vergleich und Diskussion deren Ergebnisse im Dauertest

Betrachtet man den Verlauf der absoluten Laktatwerte *aller Probanden* (Mittel- und Langstreckler) im TDL (vgl. Abbildung 9) so fällt auf, dass sich *zwischen 4 und 5 mmol/l* ein Bereich befindet, in den *keine Messergebnisse* fallen. Die statistische Auswertung bestätigte diese Lücke, was es uns ermöglichte, unter Definition eines *Cut-offs von 4,5 mmol*, das Probandenkollektiv in eine sogenannte „*hoch- und eine niedrig-Laktat-Gruppe*“ zu unterteilen (vgl. Kapitel 2.3 und Tabelle 3).

Bei differenzierter Betrachtung der Laktatwerte des in *hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe* unterteilten Probandenkollektivs zeigte sich, dass sich *nur* für die *niedrig-Laktat-Gruppe* ein *Laktat-Steady-State* einstellte ($Differenz_{Laktat-ZP2 \text{ zu } ZP3} \downarrow = 0,21 \text{ mmol/l}$). Weiter fiel auf, dass sich dieses Laktat-Steady-State lediglich *0,72 mmol/l* (an ZP 2) bzw. *0,93 mmol/l* (an ZP 3) über ihrem Laktat-Mittelwert an der

IAS im MST befand und damit die IAS der niedrig-Laktat-Gruppe im Bereich des Laktat-Steady-State lag. Sie entspricht allerdings sicher *nicht* ihrem LASS-max.

Die *hoch-Laktat-Gruppe* hingegen wies sowohl nach 15 min. TDL als auch nach 30 min. am Ende des TDL *signifikant* höhere Laktatwerte, als die niedrig-Laktat-Gruppe auf. Die *Differenz von > 1 mmol* zwischen ZP 2 und 3 ($Differenz_{Laktat-ZP2 \text{ zu } ZP3 \uparrow} = 1,18 \text{ mmol/l}$) wird als Beleg angesehen, dass sich in der *hoch-Laktat-Gruppe kein Laktat-Steady-State* einstellte. Ihre TDL-Laktatwerte lagen zudem *sehr* deutlich über ihren IAS-Mittelwerten aus dem MST ($Differenz_{Laktat-ZP2 \text{ bzw. } ZP3 \uparrow \text{ zu } IAS \uparrow} = 2,06 \text{ mmol/l}$ bzw. $3,24 \text{ mmol/l}$). Bei diesen Probanden lag die IAS (wenn überhaupt) direkt am Übergang zum rein anaeroben Bereich. Im TDL liefen die Probanden bei 105 % der IAS-Laufgeschwindigkeit somit *deutlich* im anaeroben Bereich, was sich in den im Verlauf überproportional steigenden Laktatwerten niederschlug.

Hingegen wurden an der *IAS im MST* für die Probanden *beider* Gruppen, der hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe, *erstaunlicherweise nahezu identische* Laktatwerte gemessen ($MW_{Laktat-IAS \uparrow} = 2,39 \text{ mmol/l}$; $MW_{Laktat-IAS \downarrow} = 2,35 \text{ mmol/l}$; $p = 0,738$).

Betrachtet man die *Zusammensetzung* der hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe genauer, so ist wichtig zu erwähnen, dass sich die *Langstreckler* mit jeweils 4 Läufern *gleichmäßig* auf die hoch- und die niedrig-Laktat-Gruppe verteilten. Bei den *Mittelstrecklern* hingegen fanden sich *erstaunlicherweise 7 von 12 Läufern*, also über die Hälfte, in der *niedrig-Laktat-Gruppe*. Unter der oben bereits beschriebenen Annahme einer höheren anaerob-glykolytischen Aktivität aufgrund einer überwiegend FT-Faser-haltigen Muskulatur bei den Mittelstrecklern, hätte man wohl eher davon ausgehen können, dass sich prozentual mehr Mittelstreckler in der hoch-Laktat-Gruppe befinden.

Somit wird deutlich, dass eine *definierte Intensitätsvorgabe auf Grundlage der zuvor bestimmten IAS* sowohl bei einem Teil der Mittel-, als auch Langstreckenläufer zu einer *unterschiedlichen Laktatkinetik im TDL* führt. Bei nicht korrigierter Umsetzung einer solchermaßen vorgegebenen Belastungsintensität kann dies in beiden Laufdisziplinen zu einer *Verfehlung* des tatsächlich angestrebten metabolischen Belastungsprofils führen, zumindest was das Laktatverhalten betrifft.

Insofern ist die Validität einer ausschließlich aus der IAS-Bestimmung gewonnenen Belastungsvorgabe für ein Schwellentraining sowohl bei Mittel- als auch bei Langstreckenläufern in Frage zu stellen.

Wünschenswert wäre es daher, wenn es gelänge, unter Nutzung *weiterer* leistungsdiagnostischer Variablen im Sinne einer Prädiktorenanalyse die zu erwartende Laktatkinetik im Vorfeld besser einschätzen zu können. Unsere umfangreiche leistungsdiagnostische- und spiroergometrische Vordiagnostik zielte genau darauf ab.

Bei der Auswertung der erhobenen Daten konnte jedoch sowohl zwischen den Herzfrequenz-, Laktatwerten und erreichten Laufgeschwindigkeiten an LT, IAS und Max. im MST, als auch den im RT gemessenen Herzfrequenz-, Laktat-, VO₂-Werten und Laufgeschwindigkeiten an AT und Max. *kein* Zusammenhang zur Laktatkinetik im DT hergestellt werden. Somit konnten aus diesen zusätzlichen leistungsdiagnostischen- und spiroergometrischen Befunden *keine* Variablen identifiziert werden, die sich für eine punktgenaue Präzisierung der IAS-basierten Belastungsvorgabe anbieten würden.

Aus diesem Grund gestaltet sich in der Praxis die Nutzung weiterer, unter Laborbedingungen erhobener, leistungsdiagnostischer- und spiroergometrischer Variablen zur Präzisierung der Belastungsvorgaben für einen TDL wohl eher schwierig.

Ein sinnvoller und nutzbarer Ansatz zur Feinjustierung bzw. Korrektur der beispielsweise IAS-basierten Belastungsintensität bietet dabei möglicherweise das kontinuierliche, tägliche Monitoring weiterer *objektiver*- (Witterung, Außen- und Körpertemperatur, Wind, Streckenprofil, (Ruhe-)Herzfrequenz, etc.) und *subjektiver* (Borg-Skala, Tagesform, Gesundheitszustand, etc.) Belastungsreaktionen während dem Training.

Neben signifikanten Unterschieden in den Laktatverläufen der hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe zeigten sich lediglich in *einem* weiteren objektivierbaren Basisparameter, der *relativen und absoluten Herzfrequenz*, *signifikante* Unterschiede ($p_{\text{HF-TDL/HF-IAS}} = 0,018^*$ bzw. $p_{\text{HFavg.-TDL}} = 0,002^*$). In der *hoch-Laktat-Gruppe* wurden dabei im Mittel *deutlich* höhere *absolute* Herzfrequenzen als in der niedrig-Laktat-Gruppe gemessen ($MW_{\uparrow} = 182/\text{min.}$; $MW_{\downarrow} = 168/\text{min.}$), was auf eine vermeintlich höhere kardiozirkulatorische Beanspruchung der hoch-Laktat-Gruppe zurückzuführen ist.

Diese Unterschiede in den Herzfrequenzprofilen während des DT lassen vermuten, dass Probanden, die im TDL beispielsweise bei *streng konstanter* HF von 105 % der IAS-Herzfrequenz gelaufen wären, möglicherweise auch ein differentes Laktatprofil gezeigt hätten. So hätte die *niedrig-Laktat-Gruppe* höchstwahrscheinlich *höhere* Laufgeschwindigkeiten und damit unvermeidlich auch *höhere* Laktatwerte erzielt, die dann möglicherweise deren anaeroben Grenzbereich bzw. das LASSmax. widerspiegelt hätten.

Somit könnte der Wert der *Herzfrequenzsteuerung* als Ergänzung zu einem initialen Laufgeschwindigkeitsbereich (z. B. aus einer laktatbasierten IAS) in der *variablen* Anpassung an sowohl *äußerliche, objektive* Gegebenheiten wie Witterung, Temperatur, Wind und Streckenprofil, als auch *subjektive, „innere“* Bedingungen wie Borg-Skala, Tagesform und Gesundheitszustand, im Sinne eines „*self-paced*“ Trainings, bestehen. Zu beachten bliebe jedoch, dass auch die Herzfrequenz *nur* als *Korrekturfaktor* gesehen werden dürfte, da auch sie durch anderweitige Veränderungen von Körpertemperatur, Hydrierungszustand

des Athleten, etc. – unabhängig von der tatsächlichen metabolischen Beanspruchung – beeinflusst werden kann und somit auch *keinen* absolut sicheren Parameter darstellt.

Scheint die *Herzfrequenz* also als zusätzliche individuelle und objektivierbare Größe eine Hilfestellung im Sinne einer *Korrekturvariablen* zu bieten, so besitzt möglicherweise auch das subjektive Belastungsempfinden eine entsprechende Bedeutung, die im Folgenden diskutiert werden soll.

4.4 Diskussion der Daten aus der Borg-Skala-Erhebung

Im DT wurden zu definierten Zeitpunkten die subjektive Belastungsempfindung anhand der Borg-Skala (RPE-Werte) erhoben. Die Werte nach 15 min. und 30min. TDL wurden dabei gemittelt und somit zu einem Gesamtwert für den TDL zusammengefasst.

Die „15-items Borg-Skala“ – auch RPE-Skala (= Rating of Perceived Exertion) genannt – dient bei sportlichen Belastungstests der „*linearen Quantifizierung der subjektiv wahrgenommenen körperlichen Anstrengung*“ (BORG, 1982). Entwickelt wurde die Borg-Skala von dem Schweden G. Borg, emeritierter Professor für Wahrnehmungs- und Psychophysik an der Fakultät für Psychologie der Universität Stockholm, Schweden.

In unserer Studie sollten die Athleten die subjektiv empfundene Belastung dabei in drei Kategorien/Qualitäten bewerten:

1. Belastung „Allgemein“
2. Belastung „Beine/Muskulatur“
3. Belastung „Atmung/Puls“

Es konnten jeweils ganze Zahlenwerte zwischen 6 = „überhaupt nicht anstrengend“ und 20 = „maximal vorstellbar anstrengend“ angegeben werden.

Bereits für das *gesamte Probandenkollektiv* ergaben sich für die RPE-Werte in allen drei erhobenen Qualitäten *signifikante* Zusammenhänge mit den Differenz-Laktatwerten im DT. Dies entspricht früheren Ergebnissen bei stufenförmig ansteigenden Belastungen, die einen Zusammenhang zwischen der kardiozirkulatorischen-, sowie der metabolischen Belastung und dem subjektiven Belastungsempfinden aufzeigen konnten (Held and Marti, 1999; Chen et al., 2002; Scherr et al., 2013).

Allerdings scheint dieser Zusammenhang mit zunehmender Belastungsdauer abzunehmen. So konnten Seiler und Sjursen bei gut trainierten Läufern innerhalb von 4 sich in der Belastungsdauer unterscheidenden „Hochintensitäts-Intervalltrainings“ (1, 2, 4, oder 6 min. Belastungsdauer) unter „self-paced-Bedingungen“ (selbstgewählte Laufgeschwindigkeit anhand äußerer- und innerer Gegebenheiten, vgl. Kapitel 1.3.2 und 4.3) zwar konstante Blut-Laktatkonzentrationen, jedoch mit Zunahme der Belastungsdauer auch stetig steigende RPE-Werte bei der Erhebung der subjektiven Belastungsempfindung aufzeigen (Seiler and Sjursen, 2004). Dies würde jedoch für eine mit der Belastungsdauer zunehmende Divergenz, zwischen der subjektiv empfundenen und der tatsächlich metabolisch bestehenden Belastung sprechen.

Während der Dauerbelastung innerhalb dieser Studie (30 min. TDL) erklärten die erhobenen Borg-Skalen des *gesamten Probandenkollektivs* dennoch zu 41% in der Belastungsqualität „Allgemein“ und sogar zu 55 % in der Belastungsqualität „Atmung/Puls“ die Varianz in deren Laktatanstieg (Prozentwerte entsprechen r_2 -Werten der Regressionsgeraden in Abbildung 12).

Bei der differenzierten Betrachtung des in *hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe* unterteilten Probandenkollektivs empfand die *hoch-Laktat-Gruppe* die Belastung im TDL – wie zu erwarten – in *allen* drei erfassten Borg-Qualitäten *signifikant* und deutlich anstrengender als die Probanden der *niedrig-Laktat-Gruppe* (vgl. Tabelle 20). Die deutlich höheren Plasma-Laktatwerte der hoch-Laktat-Gruppe führten in diesem Fall unabhängig davon, dass sowohl Mittel- und Langstreckler

(wobei tatsächlich prozentual mehr Langstreckler) die Gruppe bildeten, zu einer subjektiv anstrengenderen Belastungsempfindung. Dies zeigte sich auch im *signifikanten* Zusammenhang der Qualität „Beine/Muskulatur“ und dem immerhin *tendenziell signifikanten* Zusammenhang der Qualität „Allgemein“ mit den Differenz-Laktatwerten im TDL (vgl. Abbildung 18). In der *niedrig-Laktat-Gruppe* zeigte sich in *keiner* der drei erfassten Borg-Qualitäten ein signifikanter Zusammenhang.

Somit lässt sich anhand der Zusammenhänge der Ergebnisse aus der Borg-Skala-Erhebung postulieren, dass neben der *Herzfrequenz*, als mögliche individuelle „Korrekturvariable“ (vgl. Kapitel 4.3), scheinbar auch die *subjektive Belastungsempfindung* in Form der RPE-Werte möglicherweise zur Feinjustierung von individuellen Belastungsvorgaben im Schwellentraining von Mittel- und Langstreckenläufern im Sinne eines „*self-paced*“ Trainings herangezogen werden können.

Bei der gesonderten Betrachtung des Zusammenhangs von subjektivem Belastungsempfinden und der Laktatentwicklung im DT zwischen dem in *Mittel- und Langstreckler* unterteilten Probandenkollektiv ergaben sich für die *Langstreckler* zu ZP 3 (Ende TDL) in *allen* drei erhobenen Belastungsqualitäten *signifikante* Korrelationen. Steigende Laktatwerte haben bei den Langstrecklern somit anscheinend direkten (proportionalen) Einfluss auf deren subjektives Belastungsempfinden, was sich graphisch in den steil ansteigenden Regressionsgeraden widerspiegelt (vgl. Abbildung 15).

Bei den *Mittelstrecklern* zeichneten sich *deutlich* flachere Regressionsgeraden ab, die in der Qualität „Atmung/Puls“ in *signifikantem* Zusammenhang und in der Qualität „Allgemein“ in *tendenziell signifikantem* Zusammenhang mit deren Differenz-Laktatwerten standen. Die Qualität „Beine/Muskulatur“ hingegen korrelierte *nicht* mit den Differenz-Laktatwerten.

Der flachere Verlauf der Regressionsgeraden der Mittelstreckler lässt vermuten, dass Athleten dieser Disziplin *Belastungen, bzw. Trainingseinheiten mit hohen Plasma-Laktatwerten eher „gewohnt“* sind als Langstreckler. Ein Laktatanstieg hat bei den Mittelstrecklern scheinbar nur einen minimalen Einfluss auf deren subjektives Belastungsempfinden. Gerade in hohen Intensitätsbereichen nehmen die Mittelstreckler die zunehmende Übersäuerung des Organismus zwar subjektiv wahr, was sich an *signifikanten bzw. tendenziell signifikanten* Zusammenhängen der Qualitäten „Atmung/Puls“ und „Allgemein“ zeigt. Vor allem die Qualität „Beine/Muskulatur“, also der Hauptbildungsort des Laktats, korreliert jedoch erstaunlicherweise *nicht signifikant* mit den Differenz-Laktatwerten.

Dies könnte ein Hinweis für eine *bessere* Laktat-Toleranz der Mittelstreckler im Vergleich zu den Langstrecklern sein und somit ein weiterer charakteristischer Unterschied zwischen diesen beiden Gruppen. In diesem Sinne könnte man weiter mutmaßen, dass bei Mittelstrecklern möglicherweise der Plasma-Laktatwert wiederum an Zuverlässigkeit als Parameter der Belastungsintensität und Belastungsempfindung verliert.

4.5 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse im Hinblick auf die Fragestellungen der Arbeit

Im TDL stiegen die kapillären Laktatwerte bei den Mittel- und Langstrecklern sowohl nach 15 min. als auch am Ende, nach 30 min. Belastungsdauer annähernd gleich und *ohne signifikanten Unterschied* zwischen diesen beiden Gruppen an. Bei der Ansteuerung einer *definierten, gleichen relativen Belastungsintensität* (in unserer Studie TDL mit einer Laufgeschwindigkeit von 105 % der zuvor ermittelten IAS-Laufgeschwindigkeit) kommt es somit bei Mittel- und Langstreckenläufern zu einer *vergleichbaren* Laktatantwort im Kapillarblut. Fragestellung 1 der Arbeit (siehe Kapitel 1.4) kann somit *bestätigt* werden.

Da sich zwischen Mittel- und Langstrecklern sowohl in den RQ-Werten aus dem EL ($MW_{EL-RQ\ M} = 0,98 \pm 0,04$; $MW_{EL-RQ\ L} = 0,96 \pm 0,03$; $p = 0,164$), als auch in den Laktatwerten am Ende des TDL ($MW_{TDL-Laktat\ ZP\ 3\ M} = 4,25 \pm 1,45$ mmol/l; $MW_{TDL-Laktat\ ZP\ 3\ L} = 4,47 \pm 1,35$ mmol/l; $p = 0,734$) und in den Differenzlaktatwerten ($MW_{TDL-Laktat-Diff.\ ZP\ 3\ M} = 3,37 \pm 1,44$ mmol; $MW_{TDL-Laktat-Diff.\ ZP\ 3\ L} = 3,60 \pm 1,35$ mmol/l; $p = 0,726$) *keine signifikanten* Unterschiede zeigten, ist anhand der bestrittenen Hauptwettkampfstrecke (Mittel- vs. Langstreckenläufer) *keine* höhere Variabilität der metabolischen Antwort im Plasma (und auch in den spirometrisch erfassten Messwerten) in einer dieser beiden Gruppen zu erklären. Fragestellung 2 der Arbeit (siehe Kapitel 1.4) kann somit *nicht bestätigt* werden.

Trotz der statistisch (bezogen auf Mittelwerte und p-Werte) vergleichbaren Laktatantworten im TDL bei der Unterteilung des Probandenkollektivs in Mittel- und Langstreckler fällt auch in unserer Studie doch eine *individuell große Streubreite* der einzelnen absoluten Laktatkinetiken auf, was in der Folge zur weiteren Unterteilung des Probandenkollektivs in eine *hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe* (vgl. Kapitel 3.3) führte.

Diese hohe individuelle Variabilität im Laktatverhalten bei an sich gleicher relativer Belastungsintensität (105 % der zuvor bestimmten Laktat-basierten IAS-Laufgeschwindigkeit) ist in der Literatur bekannt (vgl. Einführung Diskussion Kapitel 4, sowie (Meyer et al., 1999; Van Hall et al., 2003; Scharhag-Rosenberger et al., 2010; Messonnier et al., 2013).

Geht man aufgrund der unterschiedlichen Trainingsschwerpunkte von der Hypothese einer allgemein *besseren* Ausdauerleistungsfähigkeit der Langstreckler aus, so hätte man wohl damit gerechnet, dass sich die hoch-Laktat-Gruppe überwiegend aus Mittelstrecklern zusammensetzt, die eine extensive Ausdauerbelastung in Form eines TDL möglicherweise weniger gewohnt sind als die Langstreckler. Dem war jedoch *nicht* so. Die Läufer waren annähernd gleich auf die hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe verteilt. Die individuelle Variabilität in den Laktatkinetiken weist somit *keinen* Bezug zur bestrittenen Hauptwettkampfstre-

cke auf. Dieser Sachverhalt wurde so bislang *nicht* untersucht und stellt somit eine *neue Erkenntnis* dar.

Bei Betrachtung der leistungsdiagnostischen- und spiroergometrischen Befunde aus MST und RT in Bezug auf die hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe zeigten sich ebenfalls ähnliche Messwerte *ohne* signifikanten Unterschied für die IAS-Laufgeschwindigkeit ($MW_{\uparrow \text{ bzw. } \downarrow} = 17,0 \text{ bzw. } 16,5 \text{ km/h}$; $p = 0,153$) und die relativen Sauerstoffaufnahmewerte (VO_2) ($MW_{VO_2-AT \uparrow \text{ bzw. } \downarrow} = 52,16 \text{ bzw. } 50,52 \text{ ml/kg KG/min.}$; $p = 0,558$ und $MW_{VO_2max. \uparrow \text{ bzw. } \downarrow} = 68,90 \text{ bzw. } 67,05 \text{ ml/kg KG/min.}$; $p = 0,198$). Lediglich die HF der hoch-Laktat-Gruppe war an der IAS *tendenziell signifikant höher* als die der niedrig-Laktat-Gruppe ($MW_{HF-IAS \uparrow \text{ bzw. } \downarrow} = 175 \text{ bzw. } 168/\text{min.}$; $p = 0,098$), was für eine – zu erwartende – *höhere* kardiozirkulatorische Beanspruchung der Athleten der hoch-Laktat-Gruppe spricht.

Die individuelle Variabilität in den Laktatkinetiken lässt sich somit auch *nicht* durch leistungsdiagnostische- oder spiroergometrische Befunde erklären. Auch dieser Sachverhalt stellt eine *neue Erkenntnis* dar.

Fragestellung 3 der Arbeit (siehe Kapitel 1.4) kann somit ebenfalls *nicht bestätigt* werden.

Das subjektive Belastungsempfinden, welches mittels der 15-items Borg-Skala (RPE-Skala) erfasst wurde, korrelierte hingegen *signifikant* in allen drei erfassten Qualitäten („Allgemein“; „Beine/Muskulatur“; „Atmung/Puls“) mit den Differenzlaktatwerten des gesamten Probandenkollektivs zu ZP 3 ($p_{max.} = 0,0002^*$; $r_{max.} = 0,74$). Und auch bei der Subgruppenanalyse der hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe ergaben sich in allen drei erfassten Qualitäten *signifikante* Unterschiede zwischen den beiden Gruppen ($p_{Borg-Skalen \ max.} = 0,0004^*$). Die Athleten der hoch-Laktat-Gruppe empfanden zu ZP 3 die subjektive Belastung somit *stets signifikant anstrengender* als die Athleten der niedrig-Laktat-Gruppe.

Das bedeutet, dass die individuelle Variabilität in den Laktatkinetiken mit dem subjektiven Belastungsempfinden *korreliert* und Läufer, die bei gleicher relativer

Belastungsintensität (105 % der zuvor bestimmten Laktat-basierten IAS-Laufgeschwindigkeit) ein *höheres* Laktatprofil aufweisen, ein dazu passendes *höheres* subjektives Belastungsempfinden zeigen.

Fragestellung 4 der Arbeit (siehe Kapitel 1.4) kann somit *bestätigt* werden.

Letztendlich spiegeln also höhere Plasma-Laktatwerte wahrscheinlich tatsächlich eine höhere Beanspruchung der Athleten wider. Demnach kann eine *alleinige* Orientierung der Belastungsintensität an einer *fixen* Prozentzahl der IAS-Laufgeschwindigkeit in einem TDL-Training zu einer *individuell nicht korrekten Belastungsvorgabe* führen. Diese Schlussfolgerung gilt allerdings nur, solange die Belastungsintensität während des TDL *konstant* gehalten und *keine* Tempowechsel zugelassen werden.

Entspricht aber ein Schwellentraining in Form eines TDL im Alltag von Mittel- und Langstreckenläufern normalerweise überhaupt einer *absolut konstanten* Dauerbelastung? Wohl kaum.

Allein schon die in Kapitel 4.3 erwähnten äußeren, objektiven Gegebenheiten wie Witterung, Temperatur, Wind und Streckenprofil führen während der Belastung i. d. R. zu gewissen Schwankungen der Laufgeschwindigkeit um eine *im Vorfeld angestrebte oder vorgegebene* durchschnittliche Laufgeschwindigkeit, was natürlich auch für das Erreichen einer im Vorfeld angestrebten / vorgegebenen Ziel-Strecke oder Ziel-Gesamtlaufzeit zutrifft. Hinzu kommen dann noch die „inneren“, subjektiven Gegebenheiten des Athleten wie Tagesform und Gesundheitszustand. Alle diese Faktoren beeinflussen mehr oder weniger auch die Psyche des Athleten und bilden so ein komplexes Gesamtkonstrukt, aus dessen sich eine letztlich erbrachte (Trainings-)Leistung zusammensetzt.

Diesbezüglich zeigten Lander *et al.* spannende Unterschiede bei einer submaximalen Dauerbelastung auf einem Ruder-Ergometer mit entweder vorgegebener *konstanter* Geschwindigkeit oder anhand der subjektiven Belastung *selbst gewählter* („*self-paced*“) Geschwindigkeit bei letztlich *gleicher* Gesamtin-

tensität der Belastung (Lander et al., 2009). Dabei fiel auf, dass die untersuchten Probanden im „self-paced“ Modus *trotz gleicher* Durchschnitts- bzw. Gesamtleistung *signifikant niedrigere* Post-Belastungslaktatwerte, Körpertemperatur und EMG-Aktivität (EMG = Elektromyographie = Messmethode zur Erfassung der physiologischen elektrischen Muskelaktivität) in den hauptsächlich geforderten Muskelgruppen (Musculus biceps brachii und Musculus vastus lateralis) aufwiesen, was für eine „*signifikant geringere metabolische Belastung*“ der Probanden spricht.

Die Autoren erklären diesen Unterschied mit der Möglichkeit des Athleten die (subjektive) Anstrengung kontinuierlich über Feedback- und Feedforward-Mechanismen zu modifizieren, als Reaktion auf eine sich ständig verändernde Homöostase im Inneren des Organismus. Diese „*bewusste Entscheidung beruhe dabei auf unbewussten physiologischen Feedbacks von peripheren Rezeptoren*“ (z. B. Blut-pH / Laktatkonzentration, Anstieg im Streckenprofil, etc.). Eine vorgegebene *fixe* Belastung hingegen „*minimiere die Möglichkeiten des Athleten (selbstbestimmt) auf bewusste Zeichen der Erschöpfung (durch beispielsweise Anpassung der Laufgeschwindigkeit) zu reagieren*“, so die Autoren (Lander et al., 2009).

„Self-paced“ Trainingsbedingungen scheinen somit die *Autonomie* des Athleten zu fördern und sich dadurch auch günstig auf die *Effektivität und Ökonomie* der Trainingsbelastung auszuwirken.

Bestätigt wird dies auch durch eine Arbeit von Niess *et al.*, die die Validität der IAS im Hinblick auf ihren Bezug zum Laktatverhalten während *extensiver Tempolaufbelastungen* – also Belastungen im anaeroben Bereich, oberhalb des Schwellenbereichs – bei 21 Kaderathleten aus dem Mittel- und Langstreckenlauf beleuchtet hat (Niess et al., 1999). Dabei zeigte sich, dass in der retrospektiven prozentualen Einordnung der bei den Tempoläufen *selbst gewählten* Laufgeschwindigkeiten („self-paced“) in Relation zur IAS-Laufgeschwindigkeit eine *engere* Beziehung zu den ermittelten Laktatwerten vorlag.

Die Autoren erwähnen jedoch, dass sich die IAS nur „als Orientierungspunkt für individuelle Laufgeschwindigkeitsvorgaben zur Ansteuerung gewünschter Ziel-laktatbereiche“ eignet (Niess et al., 1999).

In der Folge wäre somit anhand der labortechnisch ermittelten Laktat-basierten absoluten IAS-Laufgeschwindigkeit für das *individuelle* tägliche Training der Athleten wohl besser ein *Intensitätsbereich* (z. B. 95 bis 105 % der IAS-Laufgeschwindigkeit) vorzugeben und das Tempo *während* der Belastung mittels momentaner HF und subjektivem Belastungsempfinden (Borg-Skala) (gemäß Kapitel 4.3 und 4.4) nachzujustieren, was in der Praxis ja auch oft so gemacht wird.

4.6 Diskussion zu Methoden und Studienlimitationen

Die Datenerhebung der vorliegenden Studie erfolgte zwischen November 2014 und März 2015. Es wurden bewusst die Herbst- und Wintermonate gewählt, da sich die meisten Athleten in dieser Zeit in der Aufbauphase befinden, welche vorwiegend durch Ausdauertrainingseinheiten im Schwellenbereich geprägt ist. Dennoch muss davon ausgegangen werden, dass sich der Trainingszustand der Athleten über einen Zeitraum von vier Monaten doch *relevant* verändert. Eine konzentriertere Datenerhebung, also die Testung *aller* Probanden innerhalb eines Zeitraums von vier Wochen wäre daher wünschenswert. Aufgrund beschränkter Laufbandergometerkapazität der Abteilung für Sportmedizin der Medizinischen Klinik des Universitätsklinikums Tübingen war dies während dem parallel regulär weiterlaufenden Routinebetrieb *nicht* umsetzbar. Weiter gestaltete sich dadurch auch das Terminmanagement mit den Probanden für je zwei Untersuchungstage innerhalb von mindestens 3, jedoch maximal 10 Tagen (vgl. Kapitel 2.1 Studiendesign) z. T. schwierig.

Mit einer Anzahl von 21 Probanden war das Kollektiv zudem verhältnismäßig *klein*. Saisonal bedingte Schwankungen des Trainingszustandes haben daher vermutlich einen *nicht unerheblichen* Einfluss auf die Ergebnisse. Es handelte

sich bei den Athleten zwar nicht um absolute Spitzenläufer, jedoch lag die Mindestanforderung einer IAS-Laufgeschwindigkeit von mindestens 16 km/h recht hoch. Auch gestaltete sich die Probandenrekrutierung eher schwierig. Die Motivation der Athleten seitens der Verbände war gering. Außerdem gab es im direkten Einzugsgebiet der Universität Tübingen nur wenige Athleten, die die Einschlusskriterien unserer Einschätzung nach erfüllten. Beim Versuch weitere Kaderathleten aus anderen Bundesländern zu rekrutieren zeigte sich, dass zwei zeitlich voneinander getrennte Untersuchungstage bei weiter Anreise für die Athleten unpraktikabel und zu aufwändig war.

Zur besseren Verwertbarkeit der Daten wurden weiterhin *nur männliche Läufer* in die Studie eingeschlossen. Aufgrund der regelhaft stärkeren endogenen Hormonschwankungen wurden keine weiblichen Läuferinnen eingeschlossen. Bei der Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse ist dies jedoch von Nachteil.

Die Testprotokolle der Studie an sich wurden unter hoch standardisierten Bedingungen absolviert. Die Räumlichkeiten waren stets gleich temperiert und es wurden jeweils das gleiche Laufbandergometer verwendet. An Untersuchungstag 2 wurde noch dazu die Energiezufuhr mittels einheitlichen Frühstück vor Belastung standardisiert und der DT konsequent exakt 2 h später um 10 Uhr vormittags gestartet. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse war diese strikte Standardisierung sicherlich sinnvoll.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die *Psyche*. Auch Leistungssportler sind Menschen, deren *Tagesform* gewissen Schwankungen unterliegt. Diese sind leider nicht vorhersehbar oder messbar.

Durch die standardisierten Bedingungen im Ergometrielabor konnten externe Einflussfaktoren wie Wind und Wetter eliminiert werden, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse natürlich aufwertet. Andererseits wird dadurch wiederum die Übertragbarkeit der Ergebnisse in den Trainingsalltag der Athleten gemindert.

Nicht zuletzt verändert sich beim Laufen auf dem Laufband im Vergleich zum Laufen auf Tartan oder Asphalt auch die Biomechanik. Wank *et al.* stellten bereits bei geringen Laufgeschwindigkeiten erhebliche Veränderungen der Knie- und Hüftgelenkwinkel fest, die zu veränderter Kraftübertragung führen (Wank *et al.*, 1998).

4.7 Schlussfolgerung

Der MST bestätigte die allgemeine Annahme einer *besseren* aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit von Langstrecklern gegenüber Mittelstrecklern, was sich an der *signifikant höheren* Laufgeschwindigkeit an der IAS der Langstreckler zeigte und durch deren eher ausdauerlastiges Training und die damit verbundene Muskelfaserverteilung zu erklären ist.

Im DT zeigte sich bei der Ansteuerung einer *leicht überschwellig definierten, gleichen relativen Belastungsintensität* (TDL bei 105 % der IAS) jedoch ein *ähnliches* Laktatverhalten bei Mittel- und Langstrecklern (*Fragestellung 1*). Anhand der bestrittenen Hauptwettkampfstrecke (Mittel- vs. Langstrecke) lässt sich daher *keine* erhöhte Variabilität in den metabolischen- oder spirometrischen Messwerten erklären (*Fragestellung 2*).

Die auffallend *hohe individuelle Streubreite* der einzelnen *absoluten* Laktatkinetiken bei an sich gleicher relativer Belastungsintensität ist in der Literatur bekannt. Die daraus resultierende Unterteilung des Probandenkollektivs in eine hoch- und niedrig-Laktat-Gruppe zeigte jedoch auch *keinen* Bezug zur bestrittenen Hauptwettkampfstrecke, da sich Mittel- und Langstreckler annähernd gleich auf diese beiden Gruppen verteilten. Auch durch leistungsdiagnostische- oder spiroergometrische Befunde lässt sich retrospektiv diese individuelle Variabilität in den Laktatkinetiken *nicht* erklären (*Fragestellung 3*).

Hingegen das *Herzfrequenzverhalten* und die *subjektive Belastungsempfindung* (*Borg-Skala*) korrelierten *signifikant* mit der individuellen Variabilität der Laktatkinetiken im TDL, wobei Athleten mit *höherem* Laktatprofil auch eine dazu passende *höhere* subjektive Belastung empfanden und *höhere* durchschnittliche Herzfrequenzwerte zeigten (*Fragestellung 4*).

Man kann daher festhalten, dass diese Athleten mit *höheren* Plasma-Laktatwerten tatsächlich auch einer *höheren* Beanspruchung ausgesetzt waren. Das wird auch durch einen Teil der Metabolomics-Messungen, die aus den in dieser Studie erfassten venösen Blutproben der Probanden erhoben wurden, gestützt (z. B. höhere Konzentrationen von Metaboliten des Citratzyklus, Pyruvat, etc.). Neben dem gängigen Laktat wäre es daher sinnvoll weitere Stoffwechselmetabolite mittels dieser Metabolomics-Methode auf ihre Eignung als ergänzende metabolische Variablen in der Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung zu prüfen. Die detaillierte Auswertung und Interpretation dieser Daten sind jedoch Gegenstand weiterführender Arbeiten.

Abschließend kann man somit schlussfolgern, dass eine *alleinige* Orientierung der Belastungsintensität an einer *fixen* Prozentzahl der IAS-Laufgeschwindigkeit in einem *leicht überschwelligem TDL-Training* sowohl bei *Mittel- als auch bei Langstrecklern* zu einer *individuell nicht korrekten Belastungsvorgabe* führen kann. *Insofern ist die Validität einer ausschließlich aus der IAS-Bestimmung gewonnenen Belastungsvorgabe für ein Schwellentraining von Mittel- und Langstreckenläufern in Frage zu stellen, da sie hinsichtlich einer gleichen metabolischen Beanspruchung der Athleten nicht „punktgenau“ vorgegeben werden kann.*

In der Praxis sollte daher zur Ansteuerung einer gewünschten Belastungsintensität immer ein *Intensitätsbereich* (z. B. 95 – 105 % der IAS) zugelassen werden, innerhalb dessen über *„self-paced-Strategie“* mittels *subjektivem Belastungsempfinden* (*Borg-Skala*) und *Herzfrequenzkontrolle* unter Berücksichti-

gung der „äußeren“ und „inneren“ täglichen *Gegebenheiten* nachjustiert werden kann.

Diese „self-paced“ Trainingsbedingungen scheinen sich außerdem positiv auf die *Autonomie* der Athleten auszuwirken und dadurch auch die *Effektivität und Ökonomie* der Trainingsbelastung günstig zu beeinflussen.

5 Zusammenfassung

5.1 Einleitung und Fragestellungen

Im Laufsport existieren seit Jahren *lediglich* laktatbasierte Tests zur sportmedizinischen Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung. Der Stellenwert der im Blutplasma ermittelten Laktatwerte wird jedoch gerade für Hochleistungssportler zunehmend *kritisch diskutiert*. Bereits unterschiedliche Studien weisen in diesen Leistungsbereichen auf eine *große interindividuelle Variabilität* in den Laktatkinetiken hin. In der vorliegenden Arbeit wurde versucht diese Variabilität, unter Berücksichtigung *unterschiedlicher Wettkampfdistanzen* (Mittel- vs. Langstreckenläufer), im Hinblick auf das *Laktatverhalten im Schwellentraining* dieser Athleten zu belegen. Konkret wurde dabei die *Validität einer individuellen, gleichen relativen Belastungsintensitätsvorgabe anhand der laktatbasierten IAS im Rahmen einer submaximalen Dauerbelastung* überprüft. Die zentrale Fragestellung bezog sich dabei auf die Ansteuerung einer interindividuell *gleichen metabolischen Belastung*, bzw. die Identifikation der Faktoren, die möglicherweise zu einer unterschiedlichen Belastungsreaktion der Athleten führen.

5.2 Material und Methoden

Die Datenerhebung erfolgte mittels laufbandergometrischer Tests, denen 12 *Mittelstreckler (M)* und 9 *Langstreckler (L)* an jeweils zwei Untersuchungstagen unterzogen wurden.

Untersuchungstag 1 beinhaltete eine allgemeine sportmedizinische Eingangsuntersuchung, einen laktatbasierten *Mehrstufentest (MST)* zur Bestimmung der *Individuell Anaeroben Schwelle (IAS)* und einen *Rampentest (RT)* mit Spiroergometrie zur Erfassung der *respiratorischen Schwellenwerte (AT und VO₂max.)*.

Untersuchungstag 2 wurde min. 3 bis max. 10 Tage später durchgeführt. Die Probanden erhielten zunächst ein standardisiertes Frühstück. Anschließend erfolgte ein *Dauertest (DT) mit 30 min. Tempodauerlauf (TDL)* mit individuell gleicher relativer Belastungsintensität (*Laufgeschwindigkeit von 105% der IAS*). Zu

vordefinierten Zeitpunkten (ZP) erfolgten kapilläre Blutabnahmen zur Bestimmung der Plasma-Laktatwerte und peripher-venöse Blutabnahmen für eine allgemeine Blutbildanalyse und spezielle Metabolomics-Messungen (Gegenstand weiterführender Arbeiten). Zudem wurde die subjektive Belastungsempfindung mittels *Borg-Skala* erhoben.

5.3 Ergebnisse

Im DT war beim Verlauf der absoluten Laktatkinetiken des gesamten Probandenkollektivs zunächst die *große* Streuung der Laktatwerte vor allem zu ZP 3 (Ende TDL) über gut 4,5 mmol/l auffallend. Daraus resultierte retrospektiv die Differenzierung des Probandenkollektivs in eine *hoch-* (↑) *und niedrig-* (↓) *Laktat-Gruppe*, wobei der *Cut-off-Wert bei 4,5 mmol/l* gewählt wurde. In den leistungsdiagnostischen- und spiroergometrischen Befunden aus MST und RT ergaben sich bei ↑ und ↓ ähnliche Messwerte *ohne* signifikante Unterschiede in der IAS-Laufgeschwindigkeit oder der VO₂-Werte und somit *kein* prädiktiver Wert für das oben genannte individuell variable Laktatverhalten im DT.

Hingegen die durchschnittlichen Herzfrequenzen (HF) im TDL im Verhältnis zur HF-IAS zeigten einen *signifikant* nachweisbaren Zusammenhang zu den Differenz-Laktatwerten des gesamten Probandenkollektivs zu ZP 3. Und auch *alle* drei Borg-Qualitäten korrelierten zu den entsprechenden Erhebungszeitpunkten *signifikant* mit den Differenz-Laktatwerten des gesamten Probandenkollektivs. Wie zu erwarten wurde bei der Differenzierung des Probandenkollektivs in ↑ und ↓ der TDL von ↑ in *allen* drei Borg-Qualitäten *signifikant anstrengender* empfunden als von ↓ und auch die durchschnittlichen und relativen Herzfrequenzen waren bei ↑ *signifikant höher* als bei ↓.

Bei der Differenzierung des Probandenkollektivs in M und L lieferten lediglich die L in *allen* erhobenen Borg-Qualitäten in Abhängigkeit der Differenz-Laktatwerte zu ZP 3 im TDL *signifikante* Zusammenhänge, wobei die Korrelationsgeraden der L jeweils *steiler* verliefen als die der M.

5.4 Diskussion / Schlussfolgerung

Im leicht überschwelligen TDL mit *gleicher relativer* Belastungsintensität zeigte sich ein *ähnliches* Laktatverhalten bei M und L und damit *keine* durch die bestrittene Hauptwettkampfstrecke oder durch leistungsdiagnostische Vorbefunde erklärable Variabilität. Auch die auffallend *hohe* Streubreite der *absoluten* Laktatkinetiken im TDL zeigte *keinen* Bezug zur Hauptwettkampfstrecke (M vs. L) und auch die weiteren leistungsdiagnostischen- und spiroergometrischen Befunde aus MST und RT (IAS-Laufgeschwindigkeiten, VO₂-Werte) konnten das individuelle Verhalten der Laktatverläufe *nicht* erklären.

Das *individuelle Herzfrequenzverhalten* und die *subjektive Belastungsempfindung* hingegen wiesen *signifikante* Zusammenhänge zu dieser Variabilität auf. Die alleinige Orientierung an einer *fixen* Prozentzahl der IAS kann somit zu einer – bei Betrachtung des Laktatverhaltens – *individuell inkorrekten* Belastungsvorgabe führen, weshalb die *Validität* einer *ausschließlich laktatbasierten Intensitätsvorgabe* im Schwellentraining von M und L *in Frage zu stellen* ist. Es sollte daher stets ein *Intensitätsbereich* angegeben werden, der mittels subjektivem Belastungsempfinden und HF-Kontrolle vom Athleten selbst („*self-paced*“) nachjustiert werden kann.

Bei Betrachtung der Borg-Skala-Erhebung in Abhängigkeit der Differenz-Laktatwerte im TDL sind außerdem die *steiler* verlaufenden Regressionsgeraden der L im Vergleich zu den M auffallend. Steigende Laktatwerte scheinen bei den L direkten Einfluss auf deren subjektives Belastungsempfinden zu haben. Die M hingegen scheinen hohe Laktatwerte *eher „gewohnt“* zu sein, was eine *bessere* Laktat-Toleranz der M vermuten lässt, bzw. möglicherweise der Plasma-Laktatwert bei den M an Zuverlässigkeit als Parameter der Belastungsintensität und Belastungsempfindung verliert.

6 Literaturverzeichnis

BÄCKEREI GEHR, G. *Zutaten Gehr's schwäbische Laugenbrezel* [Online]. Available: <http://www.baeckerei-gehr.de/gehr-backwaren/kleingebaeck/gehrs-brezel/> [cited 2017-09-12].

BEAVER, W. L., LAMARRA, N. & WASSERMAN, K. 1981. Breath-by-breath measurement of true alveolar gas exchange. *Journal of Applied Physiology*, 51, 1662-1675.

BERGSTRÖM, J., HERMANSEN, L., HULTMAN, E. & SALTIN, B. 1967. Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiologica*, 71, 140-150.

BORG, G. 2004. Anstrengungsempfinden und körperliche Aktivität. *Deutsches Ärzteblatt*, 101, 1016-1021.

BORG, G. A. V. 1982. Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14, 377-381.

BROOKS, G. A. 1985. Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Medicine and science in sports and exercise*, 17, 22-31.

CHEN, M. J., FAN, X. & MOE, S. T. 2002. Criterion-related validity of the Borg ratings of perceived exertion scale in healthy individuals: a meta-analysis. *Journal of sports sciences*, 20, 873-899.

COEN, B., URHAUSEN, A., SCHWARZ, L. & KINDERMANN, W. 1991. Trainingssteuerung ausgewählter Tempolaufprogramme im Mittel- und Langstreckenlauf. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 42, 492-498.

COYLE, E. F. 1995. Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exercise and sport sciences reviews*, 23, 25-63.

DE MARÉES, H. & HECK, H. 2002. Sportphysiologie (9., vollständig überarbeitete und erweiterte Aufl.). *Köln: Sport und Buch Strauss*.

DICKHUTH, H.-H., HUONKER, M., MÜNZEL, T., DREXLER, H., BERG, A. & KEUL, J. 1991. Individual Anaerobic Threshold for Evaluation of Competitive Athletes and Patients with Left Ventricular Dysfunction. In: BACHL, N., GRAHAM, T. E. & LÖLLGEN, H. (eds.) *Advances in Ergometry*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

DICKHUTH, H. H., YIN, L., NIESS, A., ROCKER, K., MAYER, F., HEITKAMP, H. C. & HORSTMANN, T. 1999. Ventilatory, lactate-derived and catecholamine thresholds during incremental treadmill running: relationship and reproducibility. *Int J Sports Med*, 20, 122-127.

DOUGLAS, C. G. 1911. A method for determining the total respiratory exchange in man.

- FLÜCK, M. 2006. Functional, structural and molecular plasticity of mammalian skeletal muscle in response to exercise stimuli. *Journal of Experimental Biology*, 209, 2239-2248.
- FÖHRENBACH, R. 1986. Leistungsdiagnostik, Trainingsanalyse und -steuerung bei Läuferinnen und Läufern verschiedener Laufdisziplinen. Hartung-Gorre Verlag, Konstanz.
- FRIEDMANN-BETTE, B. 2011. Die Spiroergometrie in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 62, 10.
- GEKLE, M., WISCHMEYER, E., GRÜNDER, S., PETERSEN, M. & SCHWAB, A. 2010. Taschenlehrbuch Physiologie. Georg Thieme Verlag.
- GREEN, S. 1994. A definition and systems view of anaerobic capacity. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 69, 168-173.
- HECK, H. & ROSSKOPF, P. 1993. Die Laktat-Leistungsdiagnostik—valider ohne Schwellenkonzepte. *TW Sport+ Medizin*, 5, 344-352.
- HELD, T. & MARTI, B. 1999. Substantial influence of level of endurance capacity on the association of perceived exertion with blood lactate accumulation. *International journal of sports medicine*, 20, 34-39.
- HOLLMAN, W. The relationship between pH, lactic acid, potassium in the arterial and venous blood and the ventilation. Panamerican Congress for Sports Medicine. Chicago, 1959.
- HOLLMANN, W. 2006. Herz und Sportmedizin—historische Entwicklungen und Perspektiven. *Herz Kardiovaskuläre Erkrankungen*, 31, 500-506.
- HOLLMANN/STRÜDER/PREDEL/TAGARAKIS 2006. Spiroergometrie - Kardiopulmonale Leistungsdiagnostik des Gesunden und Kranken. Stuttgart: Schattauer GmbH.
- JONES, A. M. & DOUST, J. H. 1996. A 1% treadmill grade most accurately reflects the energetic cost of outdoor running. *J Sports Sci*, 14, 321-7.
- JP, P. 1992. The experimental methods of the first investigation of the gas metabolism of humans during rest and work (AL Lavoisier, A Seguin). An attempt at a critical explanation [dissertation, in German]. *Cologne University Medical Faculty*.
- KATCH, V., WELTMAN, A., SADY, S. & FREEDSON, P. 1978. Validity of the relative percent concept for equating training intensity. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 39, 219-227.
- KINDERMANN, W. 2004. Anaerobe Schwelle. *Dtsch Z Sportmed*, 55, 161-162.
- KLINKE, R. 2003. Silbernagl S: Lehrbuch der Physiologie. Thieme Stuttgart.

KNIPPING, H. 1929. Die Untersuchung der Ökonomie von Muskelarbeit bei Gesunden und Kranken. *Research in Experimental Medicine*, 66, 517-534.

LANDER, P. J., BUTTERLY, R. J. & EDWARDS, A. M. 2009. Self-paced exercise is less physically challenging than enforced constant pace exercise of the same intensity: influence of complex central metabolic control. *British Journal of Sports Medicine*, 43, 789-795.

LOHMAN, T. G. 1981. Skinfolde und Körperdichte und ihre Beziehung zum Körperfett: eine Übersicht. *Hum Biol*, 53, 181-225.

MADER, A., LIESEN, H., HECK, H., PHILIPPI, H., SCHÜRCH, P. & HOLLMANN, W. 1976. Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. *Sportarzt und Sportmedizin*, 24, 80-88, 109-112.

MAIER, T., GROSS, M., TRÖSCH, S., STEINER, T., MÜLLER, B., BOURBAN, P., SCHÄFER, C., HÜBNER, K., WEHRLIN, J. & TSCHOPP, M. 2016. Manual Leistungsdiagnostik. Qualitätsentwicklung Sportmed Swiss Olympic. Bundesamt für Sport BASPO
Eidgenössische Hochschule für Sport Magglingen EHSM.

MANN, T., LAMBERTS, R. P. & LAMBERT, M. I. 2013. Methods of prescribing relative exercise intensity: physiological and practical considerations. *Sports medicine*, 43, 613-625.

MESSONNIER, L. A., EMHOFF, C.-A. W., FATTOR, J. A., HORNING, M. A., CARLSON, T. J. & BROOKS, G. A. 2013. Lactate kinetics at the lactate threshold in trained and untrained men. *Journal of Applied Physiology*, 114, 1593-1602.

MEYER, T., GABRIEL, H. H. & KINDERMANN, W. 1999. Is determination of exercise intensities as percentages of VO₂max or HRmax adequate? *Medicine and science in sports and exercise*, 31, 1342-1345.

NIESS, A., RÖCKER, K., BAUMANN, I., STRIEGEL, H. & DICKHUTH, H. 1999. Laktatverhalten bei extensiven Tempolastbelastungen unter Flachland- und moderaten Höhenbedingungen. *Leistungssport*, 29, 49-53.

NIESS, A. M. 1993. *Leistungsdiagnostik, Trainingsbelastungen und Wettkampfleistungen: eine Längsschnittuntersuchung bei Mittel- und Langstreckenläufern*. Uitgever niet vastgesteld.

RÖCKER, K. & DICKHUTH, H. 1996. Spiroergometrische Meßgrößen in der sportartspezifischen Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung. *Leistungssport*, 6, 44-48.

RÖCKER, K., SCHOTTE, O., NIESS, A., HEITKAMP, H. C. & DICKHUTH, H. H. 1997. Laufbandtestdaten und Wettkampfprognosen für den Langstreckenlauf. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 9, 315-323.

SCHARHAG-ROSENBERGER, F. 2010. Spiroergometrie zur ausdauerleistungsdiagnostik. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 61, 146-147.

SCHARHAG-ROSENBERGER, F., MEYER, T., GÄSSLE, N., FAUDE, O. & KINDERMANN, W. 2010. Exercise at given percentages of VO₂max: Heterogeneous metabolic responses between individuals. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13, 74-79.

SCHERR, J., WOLFARTH, B., CHRISTLE, J. W., PRESSLER, A., WAGENPFEIL, S. & HALLE, M. 2013. Associations between Borg's rating of perceived exertion and physiological measures of exercise intensity. *European journal of applied physiology*, 113, 147-155.

SEILER, S. & SJURSEN, J. E. 2004. Effect of work duration on physiological and rating scale of perceived exertion responses during self - paced interval training. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 14, 318-325.

SHAPIRO, S. S., WILK, M. B. & CHEN, H. J. 1968. A comparative study of various tests for normality. *Journal of the American statistical association*, 63, 1343-1372.

SIMONEAU, J., LORTIE, G., BOULAY, M., MARCOTTE, M., THIBAUT, M. & BOUCHARD, C. 1986. Inheritance of human skeletal muscle and anaerobic capacity adaptation to high-intensity intermittent training. *International journal of sports medicine*, 7, 167-171.

STEGMANN, H. & KINDERMANN, W. 1982. Comparison of prolonged exercise tests at the individual anaerobic threshold and the fixed anaerobic threshold of 4 mmol·L⁻¹ lactate. *International journal of sports medicine*, 3, 105-110.

THOMAS, C., BISHOP, D. J., LAMBERT, K., MERCIER, J. & BROOKS, G. A. 2011. Effects of acute and chronic exercise on sarcolemmal MCT1 and MCT4 contents in human skeletal muscles: current status. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*.

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.

VAN HALL, G., JENSEN-URSTAD, M., ROSDAHL, H., HOLMBERG, H.-C., SALTIN, B. & CALBET, J. A. 2003. Leg and arm lactate and substrate kinetics during exercise. *American Journal of Physiology-Endocrinology And Metabolism*, 284, E193-E205.

WANK, V., FRICK, U. & SCHMIDTBLEICHER, D. 1998. Vergleichende Betrachtung der Bewegungsmuster beim Laufen auf dem Laufband und auf der Bahn. *Leistungssport*, 1, 48-53.

WELTMAN, A., SNEAD, D., SEIP, R., SCHURRER, R., WELTMAN, J., RUTT, R. & ROGOL, A. 1990. Percentages of maximal heart rate, heart rate reserve and VO₂max for determining endurance training intensity in male runners. *International journal of sports medicine*, 11, 218-222.

WELTMAN, A., WELTMAN, J., RUTT, R., SEIP, R., LEVINE, S., SNEAD, D., KAISER, D. & ROGOL, A. 1989. Percentages of maximal heart rate, heart rate reserve, and VO₂peak for determining endurance training intensity in sedentary women. *International journal of sports medicine*, 10, 212-216.

ZUNTZ N, L. C. U. M. V. H. O. 1889; 18:1-156. Untersuchungen über den Stoffwechsel des Pferdes bei Ruhe und Arbeit. *Landwirtschaftliche Jahrbücher*.

7 Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der Abteilung für Sportmedizin der Medizinischen Klinik des Universitätsklinikums Tübingen unter Betreuung von Prof. Dr. med. Andreas M. Nieß durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte als Teilprojekt im Rahmen der vom Bundesinstitut für Sportwissenschaft finanzierten Studie „Optimierung von Training und Wettkampf: Belastungs- und Anpassungsmanagement im Spitzensport“ unter Mitarbeit der beiden weiteren sportmedizinischen Studienzentren der Universitäten Gießen (Prof. Dr. F. C. Mooren) und Ulm (Prof. Dr. J. M. Steinacker).

Sämtliche Versuche und Untersuchungen im Rahmen der Studie, bis auf die sportmedizinische Eingangsuntersuchung, wurden nach Einarbeitung durch Diplom Sportwissenschaftler Patrick Schneeweiß (Leiter des Ergometrielabors) von mir eigenständig durchgeführt.

Ich versichere, das Manuskript selbstständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Rhazüns, den 21. Januar 2021



Benedikt Karus

8 Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. Andreas M. Nieß danke ich herzlich für die Möglichkeit, diese Arbeit in der Abteilung für Sportmedizin der Medizinischen Klinik des Universitätsklinikums Tübingen durchführen zu können, sowie für die gewinnbringenden Anregungen während meiner Promotionszeit.

Des Weiteren danke ich Herrn Diplom Sportwissenschaftler P. Schneeweiß für die Einarbeitung im Bereich der Laufbandergometrie, sowie die vielen Tipps bei der praktischen Durchführung der Tests im Ergometrielabor und den kompetenten Support bei technischen Problemen.

Ein großer Dank gilt den Athleten, den Probanden, ohne sie wäre diese Studie nicht zu Stande gekommen.

Abschließend und am Meisten danke ich meiner Frau, die so viel Geduld mit mir hatte und meinem ersten Sohn, sowie E. Camenisch und M. & M. Quirici, die dieser Arbeit eine zeitliche Limitation verschafft haben.

9 Anhang

9.1 Anhang 1: Anschreiben via E-Mail zur Probanden-Rekrutierung

Betreff: Läufer für Studie im Rahmen meiner Dr.-Arbeit gesucht

Lieber _____,

im Rahmen meines Medizinstudiums an der Universität in Tübingen, habe ich vergangenen Sommer in der Abteilung Sportmedizin mit meiner Promotion (Dr.-Arbeit) begonnen.

Darin geht es – wie sollte es anders auch sein – um Läufer.

Da der Körper unterschiedlich auf einen definierten Belastungsreiz reagiert, ist das **Ziel** unserer Studie, im Blut von Sportlern **neue Messparameter (Marker)** zu **finden, die eine optimierte Trainingssteuerung im Leistungssport zulassen und dabei der Individualität des Athleten gerecht werden**. Dabei gehen wir davon aus, dass zwischen dem individuellen Muster der Belastungs- bzw. Stressreaktion auf einen definierten Trainingsreiz und der Leistungs-entwicklung, aber auch dem Auftreten unerwünschter Ereignisse wie Übertraining, Infekte, Verletzungen etc. einer Athletenkarriere ein Zusammenhang besteht.

Der Ablauf der Studie sieht, nach einem derzeitigen ersten Trainingsaufbau, **Leistungstests an zwei separaten Tagen** im Zeitraum zwischen November und Februar und eine sich daran **anschließende Langzeiterfassung der Leistungsentwicklung und des Gesundheitsstatus mittels Onlinefragebogen** vor.

1. Tag:

Körperliche Untersuchung, Ruhe-EKG, Echokardiographie (Ultraschalluntersuchung des Herzens), Leistungsdiagnostik. Dabei soll anhand eines Mehrstufentests mittels kapillärer Blutabnahme am Ohrläppchen (nur je 20 Mikroliter zur Laktatbestimmung) die individuelle anaerobe Schwelle (IAS) ermittelt werden. Nach einer 60-minütigen Regenerationsphase soll dann anhand eines Rampentests mittels Spirometrie (Atemmaske zur Erfassung der Atemgase) die maximale Sauerstoffaufnahme (VO₂max.) bestimmt werden. Zielgrößen sind eine IAS im Bereich von $\geq 16 \text{ km/h} = 3:45 \text{ min./km}$ und eine VO₂max. von $\geq 60 \text{ ml/kg/min}$.

Zeitaufwand Tag 1 gesamt ca. 3 h.

2. Tag:

Drei bis max. 10 Tage nach der Leistungsdiagnostik soll eine standardisierte Trainingsbelastung in Form eines Tempodauerlaufs (Dauertest) erfolgen. Dabei sollen die Athleten um 8:00 Uhr nüchtern im Labor (Sportmedizin Tübingen) erscheinen. Dort bekommen sie ein stan-

standardisiertes Frühstück. Um 9:30 Uhr erfolgt eine erste venöse Blutabnahme (etwa 22 ml = vier Blutabnahmeröhrchen). Um 10 Uhr soll der Dauertest mit einer 15-minütigen Einlaufphase beginnen. Danach wird die Geschwindigkeit auf 105 % der zuvor ermittelten IAS angehoben. (Bsp.: IAS = 16,0 km/h -> 105 % = 16,8 km/h = 3:35 min./km)

Diese Geschwindigkeit sollte für 30 min. beibehalten werden (= Tempodauerlauf). Direkt danach erfolgt eine zweite venöse Blutabnahme (etwa 22 ml). Anschließend folgt eine 15-minütige Auslaufphase. Die dritte und letzte venöse Blutabnahme soll 2 h nach Ende des Tempodauerlaufs erfolgen (gegen 13 Uhr). In dieser Zeit sollen die Athleten keine zusätzliche Nahrung (feste Kost) einnehmen.

Während der gesamten Belastungszeit erfolgt eine Aufzeichnung der Herzfrequenz. Zusätzlich werden kapilläre Blutproben zur Laktatbestimmung vor Belastungsbeginn, nach dem Einlaufen, während des Tempodauerlaufs (1 x bei 15 min.), am Ende der 30-minütigen Belastung, sowie nach dem Auslaufen am Ohrläppchen entnommen.

Zeitaufwand Tag 2 gesamt ca. 5 h.

Persönliche Vorteile:

Durch die Teilnahme an dieser Studie wird deine individuelle Leistungsfähigkeit überprüft. Mit den Ergebnissen der Leistungsdiagnostik lässt sich deine Trainingsplanung weiter optimieren. Möglicherweise können auch die studien-spezifischen Ergebnisse (Marker, Fragebogenergebnisse) deine Trainings- und Belastungsgestaltung verbessern.

Sollte ich nun dein Interesse geweckt haben, so bitte ich dich, deine Trainerin oder deinen Trainer zu informieren und mit ihr/ihm zu besprechen, wie und wann sich die Laufbandtests in deinen Trainingsplan einbauen lassen. Ich denke die Tests passen gut in das allgemeine Grundlagentraining eines Mittel- bzw. Langstreckenläufers und sollten aufgrund der Belastung als wirkliche Trainingseinheiten betrachtet werden.

Bitte gib mir anschließend recht bald Rückmeldung per E-Mail oder Telefon, sodass wir Termine vereinbaren können. Wir brauchen etwa 2-3 Wochen Vorlaufzeit von der Terminvereinbarung bis zu Untersuchungstag 1.

Diese Studie erfolgt im Auftrag des Bundes Instituts für Sportwissenschaften (BISP). Daher wird sie auch durch den Deutschen Leichtathletik Verband (DLV) und die Landesverbände (BLV/WLV) unterstützt und befürwortet. Dementsprechend können sich **Kaderathleten** die Leistungsdiagnostik im Rahmen der Studie auch **als ihre Jahreshauptuntersuchung / Kader-routineuntersuchung** bestätigen lassen.

Umkleide- und Duschkmöglichkeiten sind vor Ort vorhanden. Die Zeit zwischen den Tests kann zum Lernen, Lesen etc. genutzt werden.

Für eine finanzielle Aufwandsentschädigung ist gesorgt.

Ich freue mich auf deine Rückmeldung und werde dir bei Interesse noch nähere Infos zukommen lassen.

Vielen Dank.

Mit sportlichen Grüßen

Benedikt Karus

P.S. Bitte gib mir auch kurz Rückmeldung (ohne Angabe von Gründen), falls du an der Studie nicht teilnehmen willst bzw. kannst.

9.2 Anhang 2: Probandeninformation und Einverständniserklärung



UNIVERSITÄTS
KLINIKUM
TÜBINGEN



Universitätsklinikum Tübingen - Medizinische Klinik - Abteilung Sportmedizin
Hoppe-Seyler-Str. 6 · 72076 Tübingen

Ärztlicher Direktor
Prof. Dr. med. A. Nieß
Telefon: 0 70 71 - 29 8 64 93
Fax: 0 70 71 - 29 250 28
E-Mail: andreas.niess@med.uni-tuebingen.de

Probandeninformation

zur Studie:

Optimierung von Training und Wettkampf

Belastungs- und Anpassungsmanagement im Spitzensport

Studienteil III

**Evaluation der Nutzbarkeit der in Studienteil I ermittelten Marker-Matrixsysteme
als Prädiktor der Leistungsentwicklung und des Beanspruchungsempfindens**

Sehr geehrter Herr _____,

Probanden-Nr.: _____

Sie sind eine Person, die sich aus unserer ärztlichen Sicht für die Teilnahme an der o.g. Studie, welche derzeit an unserer Institution durchgeführt wird, in besonderem Maße eignet. Wir bieten Ihnen deshalb die Teilnahme an dieser Studie an und möchten Sie im Folgenden über diese Studie informieren und gegebenenfalls, Ihr Interesse und Einverständnis vorausgesetzt, um die Teilnahme an dieser Studie bitten.

1. Worum geht es in dieser Studie?

Die individuelle Antwort auf ein Trainingsprogramm variiert sehr stark. Während einige Sportler besonders gut auf ein entsprechendes Programm reagieren, kann es bei anderen zu nur sehr geringen Trainingseffekten kommen, obwohl sie das gleiche Programm absolvieren. Ebenso zeigt sich eine größere individuelle Variabilität (Streubreite) im Hinblick auf das Auftreten unerwünschter Ereignisse wie Übertraining, Infekte oder Verletzungen.

Dies kann genetische Hintergründe haben. Weiterhin kann eine Ursache darin liegen, dass der Körper unterschiedlich auf einen definierten Belastungsreiz reagiert und die Stressantwort variabel ausfällt. Ziel der dreiteiligen Studie ist es, im Blut und im Muskel von Sportlern neue Messparameter zu finden, die eine optimierte Trainingssteuerung im Leistungssport zulassen und dabei der Individualität des Sportlers gerecht werden.

In zwei vorausgegangenen Studienteilen wurde eine Matrix generiert, die Marker aus unterschiedlichen Bereichen der biologischen Reaktion des menschlichen Körpers auf einen Belastungsreiz beinhaltet. Im Weiteren werden diese Marker derzeit in einer realen Trainingssituation zunächst bei untrainierten Probanden evaluiert.

Der dritte Studienteil, **für den Sie sich als möglicher Proband gemeldet haben**, hat nun das Ziel, die Übertragung der Erkenntnisse aus den Studienteilen I und II, sowie die nun zusätzlich erhobenen Ergebnisse, in die leistungssportliche Trainingsplanung und -überwachung zu ermöglichen.

Hierbei soll das prädiktive (vorhersagende) Potenzial der Markersysteme in Hinblick auf die kurzfristige Leistungsentwicklung und den Gesundheitsstatus von Ausdauersportlern untersucht werden.

Dies geschieht unter der Annahme, dass zwischen dem individuellen Muster der Belastungs- bzw. Stressreaktion auf einen definierten Trainingsreiz und der Leistungsentwicklung, aber auch dem Auftreten unerwünschter Ereignisse (Übertraining, Infekte, Verletzungen) während einer Athletenkarriere ein Zusammenhang besteht.

2. Wie ist der Ablauf der Studie und was muss ich bei der Teilnahme beachten?

Der Studienteil III besteht aus drei Teilen, einer eingangs durchgeführten Leistungsdiagnostik, einer typischen standardisierten Trainingsbelastung (Tempodauerlauf) und einer fragebogenbasierten Erhebung.

Belastungsuntersuchung:

Die vorgesehene Belastungsuntersuchung (Tempodauerlauf) soll nach einer im Herbst erfolgten Trainingspause nach dem ersten Trainingsaufbau zwischen den Monaten November und Februar durchgeführt werden.

Drei bis max. 10 Tage vor der eigentlichen Dauerbelastung findet zunächst eine körperliche Untersuchung statt, die der anwesende Arzt durchführen wird. Im Anschluss daran erfolgt ein laufbandergometrischer Mehrstufentest (MST) zur Bestimmung der Laufgeschwindigkeit an der individuellen anaeroben Schwelle (IAS). Hierbei messen wir Ihre Herzfrequenz und es wird Ihnen nach jeder Stufe des Tests am Ohrläppchen eine geringe Menge an kapillärem Blut (nur jeweils 20 µl) abgenommen, um die Höhe der Belastung anhand der Übersäuerung der Muskulatur (Laktatbildung) feststellen zu können. Der MST wird dabei nicht bis zur Ausbelastung durchgeführt, wobei jedoch in der Regel das komplette Absolvieren der 20 km/h-Stufe vorgegeben werden muss. Nach einer 60-minütigen Pause wird ein Rampentest (RT) mit Spiroergometrie durchgeführt, welcher der Messung der maximalen Sauerstoffaufnahme ($\text{VO}_2\text{max.}$) dient. Am Tag vor dem MST soll das Training nur in Form eines Dauerlaufs im GA1-Bereich mit einer maximalen Dauer von 60 min. absolviert werden. Wenn Sie alle Einschlusskriterien erfüllen, werden Sie in die Studie aufgenommen.

Zum eigentlichen Dauertest (Wank et al.) sollten Sie um 8:00 Uhr nüchtern im Labor erscheinen, wo Sie dann ein standardisiertes Frühstück von uns bekommen. Um 9:30 Uhr erfolgt eine venöse Blutabnahme, bei der etwa 22 ml Blut entnommen werden. Um 10 Uhr beginnt die Dauerbelastung auf dem Laufband, zunächst für 15 min. bei der Laufgeschwindigkeit, die zuvor im MST an der lactate threshold (LT) bestimmt worden war (normalerweise um 75 % der IAS). Während dieser Einlaufphase erfolgt eine kontinuierliche spiroergometrische Aufzeichnung der Atemvolumina und -gase. Mit den damit gewonnenen Rohdaten (VO_2 , VCO_2) wird der Energieumsatz sowie die Fett- und Kohlenhydratutilisation via indirekter Kalorimetrie errechnet.

Nach dieser 15-minütigen Einlaufphase wird das Laufband kurz gestoppt, die Atemmaske abgenommen und dann die Geschwindigkeit auf 105% der IAS angehoben. Diese Geschwindigkeit sollten die Athleten dann für 30 min. beibehalten. Direkt nach Ende dieses Tempodauerlaufs erfolgt eine erneute venöse Blutabnahme (etwa 22 ml). Anschließend folgt eine 15-minütige Auslaufphase (AL) bei einer dem LT entsprechenden Laufgeschwindigkeit (um 75% der IAS). Die letzte venöse Blutabnahme (etwa 22 ml) ist 2 Stunden nach Ende des Tempodauerlaufs vorgesehen. Bis dahin sollten die Athleten keine zusätzliche Nahrung (feste Kost) einnehmen.

Während der gesamten Belastungszeit erfolgt eine Aufzeichnung der Herzfrequenz. Die Abnahme kapillärer Blutproben zur Bestimmung des Laktats erfolgt vor Belastungsbeginn, nach Ende der Warmlaufphase, während (nach 15 min.) und am Ende der 30-minütigen Tempodauerlaufbelastung, sowie nach Beendigung der 15-minütigen Auslaufphase.

In der Anamnese vorgenommene- und fragebogenbasierte Erhebungen:

Eingangs der Untersuchung erfolgt im Rahmen der Anamnese eine Erhebung der Basisdaten unter Miteinbeziehung der Trainingsanamnese und Erfassung Ihrer bisherigen Wettkampfleistungen. Hierbei werden auch Fragen zur generellen Belastungsverträglichkeit, Anfälligkeit für Übertraining, der Häufigkeit von Infekten, Erkrankungen und Verletzungen des Halte- und Bewegungsapparates gestellt. Von Ihnen benötigt werden auch die in den letzten beiden Jahren erhobenen leistungsdiagnostischen Ergebnisse (als Daten reichen Laufgeschwindigkeit und Herzfrequenz an der individuellen anaeroben Schwelle ober bei 3 bzw. 4 mmol/l Laktat), die sie möglichst zur ersten Untersuchung mitbringen sollten.

Nach den Belastungsuntersuchungen erfolgt über die weitere Saison hinweg eine wöchentliche Dokumentation Ihres Trainings (Umfang in Kilometern pro Woche, Anzahl an Trainingseinheiten in den Bereichen GA1, GA2, EB und intensives Training bzw. Wettkampbelastung), der leistungsdiagnostischen Daten, der Wettkampfleistungen sowie möglicher unerwünschter Vorkommnisse wie Übertraining, Infekte und Verletzungen. Dabei wird ihre jeweils aktuelle Belastungsverträglichkeit und die Abfrage möglicher Symptome des Übertrainings mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens (EBF-Sport) vorgenommen, den sie wöchentlich, immer am Donnerstag früh vor dem ersten Training ausfüllen sollten (Dauer ca. 5-10 min.).

3. Bringt mir die Teilnahme persönliche Vorteile?

Durch die Teilnahme an dieser Studie werden Ihr Gesundheitszustand und Ihre individuelle Leistungsfähigkeit überprüft. Mit den Ergebnissen der Leistungsdiagnostik lässt sich Ihre Trainingsplanung weiter unterstützen. Möglicherweise können auch die studienspezifischen Ergebnisse (Marker, Ergebnisse des EBF-Fragebogens) Ihre Trainings- und Belastungsgestaltung verbessern.

4. Welche möglichen Risiken und Belastungen sind zu beachten?

Um das Risiko von unerwarteten Zwischenfällen bei Belastung zu minimieren, wird vor Beginn der Studie die Voruntersuchung mit Ihnen durchgeführt, um Ihre Sporttauglichkeit festzustellen. Sollte es während des Belastungstests trotzdem zu Übelkeit oder Schwindel kommen, wird der Test umgehend abgebrochen.

Bei der Blutentnahme sind die Risiken vergleichbar mit den Blutentnahmen, die Sie vielleicht schon von Ihrem Hausarzt oder Krankenhaus kennen. Außer einem kurzen Schmerz beim Einstich der Nadel kann es gelegentlich zu einer leichten Einblutung mit nachfolgendem Bluterguss („blauer Fleck“) kommen, der innerhalb weniger Tage verschwindet. Andere Risiken der Blutentnahme wie Infektion, Entzündung der Blutgefäße oder Verletzung von benachbartem Gewebe und Nerven infolge des Nadeleinstichs sind sehr selten und bei geschultem Personal so gut wie ausgeschlossen.

Während der gesamten Dauer des Belastungstests sind Ihr Prüfarzt und ein wissenschaftlicher Mitarbeiter anwesend, die den Testablauf permanent überwachen und bei Bedarf sofort eingreifen und die notwendigen Maßnahmen treffen.

Bitte teilen Sie den Mitarbeitern der Prüfstelle alle Beschwerden, Erkrankungen oder Verletzungen mit, die im Verlauf der wissenschaftlichen Studie auftreten.

5. Wer darf an dieser Studie teilnehmen?

Sie können an dieser Studie nur dann teilnehmen, wenn Sie vollständig gesund und uneingeschränkt sporttauglich sind, keine Abhängigkeiten (Nikotin, Alkohol, Drogen) haben, in den letzten 4 Wochen vor dem in der Studie geplanten Belastungstest keinen Höhenaufenthalt hatten. Die Abfrage nach diesen Ausschlusskriterien erfolgt im Rahmen der Erstuntersuchung.

6. Wie geht man mit meinen persönlichen Daten um?

Die Durchführung des Forschungsvorhabens erfordert es, dass von Ihnen personenbezogene Daten, insbesondere Angaben über Ihre Gesundheit, erhoben, aufgezeichnet und verarbeitet werden. Die erhobenen Daten werden für die wissenschaftliche Auswertung und Überwachung des Forschungsvorhabens sowie für die Archivierung der Ergebnisse verwendet.

Die Erhebung, Verarbeitung, Weitergabe und Speicherung der Daten unterliegt strengen spezialgesetzlichen Bestimmungen, die restriktiv eingehalten werden. Dementsprechend erfolgt eine Weitergabe und Einsichtnahme Ihrer personenbezogenen Daten nur durch die zur Verschwiegenheit verpflichteten Mitarbeiter der Einrichtungen, welche die Studie durchführen. Insbesondere eine Veröffentlichung der Daten in wissenschaftlichen Publikationen erfolgt nur, wenn zuvor jeder Bezug zu Ihrer Person unkenntlich gemacht worden ist, entweder durch Anonymisierung oder durch Verwendung eines anderen Namens, also eines Pseudonyms.

7. Was geschieht mit meinen Blutproben?

Ihre Blutproben werden ausschließlich für Laboruntersuchungen im Rahmen dieser Studie verwendet. Dafür werden sowohl das Blutplasma als auch die zellulären Bestandteile Ihrer Blutprobe herangezogen. Etwas Restmaterial wird spätestens bei Abschluss der Studie, spätestens jedoch nach fünf Jahren vernichtet. Die Speicherung der Daten erfolgt zunächst am Untersuchungszentrum, an dem die Untersuchungen der Studie durchgeführt wurden. In Ihrem Falle ist dies die Abteilung Sportmedizin am Universitätsklinikum in Tübingen. Im Verlauf der Datenauswertung erfolgt eine gemeinsame Betrachtung der Studienergebnisse, was bedeutet, dass die Daten auch an den beiden anderen Studienstandorten Gießen und Ulm gespeichert werden. Die Speicherdauer der Daten beträgt 10 Jahre.

8. Besteht Versicherungsschutz?

Für das Vorhaben (Blutentnahme) sind Sie über die Betriebshaftpflichtversicherung des behandelnden Arztes und des Instituts für Sportmedizin versichert. Bitte beachten Sie, dass Sie bei Auftreten einer Gesundheitsschädigung, wenn sie Folge des Forschungsvorhabens sein könnte, gehalten sind, diesen Schaden zunächst der die Studie durchführenden Einrichtung, in diesem Falle der Abteilung Sportmedizin am Universitätsklinikum Tübingen, unverzüglich zu melden. In einem solchen Fall sind Sie zudem gehalten, zweckmäßige Maßnahmen zu treffen, die der Aufklärung der Ursache und des Umfangs des eingetretenen Schadens und der Minderung dieses Schadens dienen. Eine Haftungsbegrenzung besteht jedoch im Hinblick auf die Anfahrtswege, für die Sie selbst verantwortlich sind.

9. Kann ich meine Teilnahme jederzeit beenden?

Wenn Sie aus dem Forschungsvorhaben ausscheiden möchten, können Sie Ihre Einwilligung jederzeit und ohne Angabe von Gründen widerrufen. Durch den Widerruf entstehen Ihnen keinerlei Nachteile.

Unter gewissen Umständen ist es aber auch möglich, dass der Prüfarzt oder der für die Studie Verantwortliche entscheidet, Ihre Teilnahme an der wissenschaftlichen Prüfung vorzeitig zu beenden, ohne dass Sie auf die Entscheidung Einfluss haben. Die Gründe hierfür können z.B. sein:

- Ihre weitere Teilnahme an der wissenschaftlichen Studie ist ärztlich nicht mehr vertretbar;
- es wird die gesamte wissenschaftliche Studie abgebrochen

10. An wen wende ich mich bei weiteren Fragen?

Sie haben stets die Gelegenheit die folgenden Prüfarzte bei Fragen zu kontaktieren:

OA Prof. Dr. med. Christof Burgstahler / Telefon: 07071-29-85160

OA Dr. med. Jochen Hansel / Telefon: 07071-29-85161

Prof. Dr. med. A. Nieß / Telefon: 07071-29-86493

Einverständniserklärung

zur Studie

Optimierung von Training und Wettkampf

Belastungs- und Anpassungsmanagement im Spitzensport

Studienteil III

Evaluation der Nutzbarkeit der in Studienteil I ermittelten Marker-Matrixsysteme als Prädiktor der Leistungsentwicklung

Ich, _____ geb. am _____, Probanden-Nr.: _____
wurde von meinem Arzt über Wesen, Bedeutung, Tragweite sowie über die mit der Teilnahme
an der Studie verbundenen Risiken und den möglichen Nutzen der oben genannten Studie auf-
geklärt.

Ich hatte ausreichend Zeit, mich zur Teilnahme an dieser Studie zu entscheiden und weiß, dass
die Teilnahme an dieser klinischen Prüfung **vollkommen freiwillig** ist. Ich weiß, dass ich jeder-
zeit und **ohne Angaben von Gründen diese Zustimmung widerrufen kann**, ohne dass sich
dieser Entschluss nachteilig auf die spätere Behandlung durch meinen Arzt auswirken wird.

Ich bin darüber unterrichtet worden, dass die Untersuchungsergebnisse außer in der persönli-
chen Krankenakte auch auf einem sogenannten Prüfbogen festgehalten werden, der anstatt
des Namens nur mit einer anonymen Kennziffer versehen ist. Ich stimme der Weitergabe der
anonymisierten Daten an Dritte zu.

Ich habe eine Kopie der Probandeninformation und dieser Einverständniserklärung erhalten.

Ich erkläre hiermit meine freiwillige Teilnahme an dieser Studie.

Ort und Datum

Unterschrift des Probanden

Ort und Datum

Unterschrift des aufklärenden Arztes

1 Exemplar Arzt

1 Exemplar Proband

Einverständniserklärung:

zur molekularbiologischen Analyse und Aufbewahrung von Untersuchungsmaterial

Ich erkläre mich einverstanden, dass aus meiner entnommenen EDTA-Blutprobe das Erbmaterial DNA isoliert und auf genetische Veränderungen (Mutationen) untersucht werden kann. Ich wurde informiert, dass diese Blutprobe am Uniklinikum in Tübingen untersucht wird. Ich stimme außerdem zu, dass ein Teil dieses Untersuchungsmaterials aufbewahrt wird, um die entsprechenden Ergebnisse später überprüfen zu können. Die Blutprobe und das Erbmaterial werden ausschließlich für diesen Zweck verwendet. Weitere Zwecke sind nur nach einer erneuten Einwilligung zulässig.

Hiermit erkläre ich gleichzeitig, dass ich über die Aussagekraft und möglichen Konsequenzen der angeforderten Untersuchung von meinem Arzt aufgeklärt worden bin. Soweit sich im Rahmen der Analysen Erkenntnisse über andere Krankheiten der betreffenden Person bzw. der Familie zeigen, möchte wie folgt informiert werden (bitte ankreuzen):

- Information über sämtliche genetische Befunde

- Information ausschließlich über der den Studienteilnehmer
und seine Familie relevanten genetischen Befunde

- Keinerlei Information über die genetischen Befunde

Das Untersuchungsmaterial wird maximal fünf Jahre aufbewahrt und dann vernichtet. Zugriff auf die gelagerten Proben haben nur die Mitarbeiter der Abteilung Sportmedizin am Universitätsklinikum Tübingen und die später mit der Analyse befassten Wissenschaftler. Es erfolgt keine Weitergabe an Dritte oder Verwendung zu einem anderen Zweck als dem oben beschriebenen.

Alle Angaben, die ich gemacht habe, sowie alle Ergebnisse der Untersuchung unterliegen der ärztlichen Schweigepflicht. Sie werden nur an die behandelnden Ärzte, nicht aber an Dritte weitergegeben. Um Befunde für spätere Rückfragen und für Qualitätskontrollen verfügbar zu machen, müssen sie EDV-mäßig verarbeitet und gespeichert werden. Zugriff auf diese Daten haben nur berechnigte Mitarbeiter des Tübinger Universitätsklinikums im Rahmen ihrer dienstlichen Aufgaben.

Diese Einwilligung erfolgt freiwillig. Ich kann diese jederzeit widerrufen. Im Fall des Widerrufs wird das Untersuchungsmaterial vernichtet und die EDV-gespeicherten Daten gelöscht.

Bitte Patientenetikett aufkleben oder in Blockschrift ausfüllen:

Name: _____

Vorname: _____

Untersuchungsindikation: _____

Ort/Datum: _____

Unterschrift Patient: _____

Unterschrift Arzt: _____

9.3 Anhang 3: Klinischer Probandenfragebogen



Optimierung von Training und Wettkampf Belastungs- und Anpassungsmanagement im Spitzensport

Klinischer Probandenfragebogen

Name: _____

Datum: _____

Familien-Anamnese (Mutter, Vater, Geschwister, Großeltern)

- 1) Liegt / Lag bei einem Verwandten eine Herz-(Kreislauf) Erkrankung vor ja nein
(z.B. Bluthochdruck)?

Wenn ja, wer? _____

Wenn ja, welche? _____

- 2) Starb ein Familienmitglied durch eine Herzerkrankung? ja nein

Wenn ja, wer? _____

In welchem Alter? _____ Jahre

Wenn Ursache bekannt, welche? _____

- 3) Ist ein Familienmitglied zuckerkrank (Diabetes mellitus)? ja nein

Wenn ja, wer? _____

In welchem Alter? _____ Jahre

- 4) Ist ein Schlaganfall aufgetreten? ja nein

Wenn ja, bei wem? _____

In welchem Alter? _____ Jahre

Optimierung von Training und Wettkampf
Belastungs- und Anpassungsmanagement im Spitzensport

Eigene Vorgeschichte / Krankheitsanamnese

5) Welche der nachfolgenden Kinderkrankheiten sind bekannt / durchgemacht?

Masern Keuchhusten Mumps Scharlach

Röteln Windpocken Sonstige _____

6) Hatten Sie schon eine Operation? ja nein

Wenn ja, welche / wann? _____

7) Hatten Sie Brüche und / oder Unfälle? ja nein

Wenn ja, welche / wann? _____

8) Sind Ihnen Allergien bekannt? ja nein

Wenn ja, welche? _____

Jetzige Beschwerden und Erkrankungen

9) Haben Sie momentan gesundheitliche Beschwerden? ja nein

Wenn ja, welche / wann? _____

10) Hatten Sie in den letzten 3 Wochen einen Infekt / Erkältung? ja nein

11) Ist eine der folgenden Gefäß- oder Herzkrankheiten bei Ihnen bekannt? ja nein

Akuter Myokardinfarkt, Instabile Angina pectoris, Herzrhythmusstörungen mit Symptomatik und/oder eingeschränkter Hämodynamik, Aortenstenose, Herzinsuffizienz, Akute Lungenembolie, Akute Myokarditis, Akute Perikarditis, Aortendissektion, Hauptstammstenose, Klappenerkrankungen mäßigen Schweregrades, Bekannte Elektrolytstörungen, Tachy- oder Bradyarrhythmie, Ausflussbahnobstruktion, AV-Blockierungen

Wenn ja, welche / seit wann? _____

Optimierung von Training und Wettkampf
Belastungs- und Anpassungsmanagement im Spitzensport

- 12) Leiden Sie unter Herzschmerzen (Enge im Brustkorbbereich)? ja nein
- 13) Leiden Sie unter Atembeschwerden? ja nein
 Atemnot Husten Auswurf
- 14) Haben Sie Bluthochdruck? ja nein
Wenn ja, wie hoch / seit wann? _____
- 15) Haben Sie irgendwelche der folgenden Beschwerden? ja nein
 Schlafstörungen beim Wasserlassen
 Appetitmangel Verstopfung
 Gewichtsverlust in den letzten 4 Wochen (> 2 kg)
 Sonstiges _____
- 16) Welche der sogenannten Risikofaktoren bestehen bei Ihnen? keine
 Rauchen Fettstoffwechselstörung
 Übergewicht Zuckerkrankheit
 Alkohol, wenn ja was / wie oft _____
- 17) Welche Impfungen haben Sie erhalten?
 Tetanus, zuletzt am _____
 Masern Keuchhusten
 Windpocken Tuberkulose
 Hepatitis A Hepatitis B
 Sonstige _____

Optimierung von Training und Wettkampf
Belastungs- und Anpassungsmanagement im Spitzensport

18) Nehmen Sie regelmäßig Medikamente ein? ja nein

Wenn ja, welche? _____

19) Nehmen Sie regelmäßig Nahrungsergänzungsmittel oder z.B. Kreatin ein? ja nein

Wenn ja, welche? _____

Orthopädische und sportbezogene Fragen

20) Ist in den letzten 2 Jahren eines der folgenden Symptome aufgetreten ja nein

(wenn dieses beim Lauftraining / Wettkampf aufgetreten ist bitte mit
„!!!“ markieren)

Ohnmacht beim Sport? Wenn ja, wann? _____

Schwindel beim Sport? Wenn ja, wann? _____

Herzschmerzen beim/nach dem Sport? Wenn ja, wann? _____

Herzstolpern beim/nach dem Sport? Wenn ja, wann? _____

ungewöhnliche Luftnot beim Sport? Wenn ja, wann? _____

21) Fühlen Sie sich unsicher bei körperlichen Belastungen? ja nein

22) Haben Sie momentan Beschwerden an Muskeln / Gelenken / Bändern? ja nein

Wenn ja, wo? _____

23) Haben Sie eine der folgenden orthopädischen Erkrankungen? ja nein

progrediente Instabilität der WS, Missbildungen der WS, Osteoporose, Bandscheibenvorfall,
Skoliosen der Wachstumsphase

9.4 Anhang 4: Trainingsprotokoll zur Trainingsdokumentation

Trainingsprotokoll														
Probanden-Nr.:						Name:						Monat:		
Legende:	TE	Trainingseinheiten					EL / AL WA SA BAL / KA WK	Einlaufen / Auslaufen					 	
	RDL	regenerativer Dauerlauf						Wettkampfausdauer (400er, 600er, 1.000er, etc.)						
	DL 1	mittlerer Dauerlauf						Schnelligkeitsausdauer (100er, 150er, 200er, etc.)						
	DL 2	schneller Dauerlauf						Berganläufe / Kraftausdauer						
	TDL	Tempodauerlauf						Wettkampf						
KW/Datum (Mo - So)	TE gesamt	Gesamt (km)	Dauerläufe (km)		EL / AL (km)	Tempoläufe (km)		WK (km)	Alternativ (min.)					
			RDL	DL 1	DL 2	TDL	WA	SA	BAL / KA	Rad	Schwimmen	Sonstiges		
Symptome von Übertraining, Infekt, Grippe, Krankheit, Verletzung:														
KW/Datum (Mo - So)	TE gesamt	Gesamt (km)	Dauerläufe (km)		EL / AL (km)	Tempoläufe (km)		WK (km)	Alternativ (min.)					
			RDL	DL 1	DL 2	TDL	WA	SA	BAL / KA	Rad	Schwimmen	Sonstiges		
Symptome von Übertraining, Infekt, Grippe, Krankheit, Verletzung:														
KW/Datum (Mo - So)	TE gesamt	Gesamt (km)	Dauerläufe (km)		EL / AL (km)	Tempoläufe (km)		WK (km)	Alternativ (min.)					
			RDL	DL 1	DL 2	TDL	WA	SA	BAL / KA	Rad	Schwimmen	Sonstiges		
Symptome von Übertraining, Infekt, Grippe, Krankheit, Verletzung:														
KW/Datum (Mo - So)	TE gesamt	Gesamt (km)	Dauerläufe (km)		EL / AL (km)	Tempoläufe (km)		WK (km)	Alternativ (min.)					
			RDL	DL 1	DL 2	TDL	WA	SA	BAL / KA	Rad	Schwimmen	Sonstiges		
Symptome von Übertraining, Infekt, Grippe, Krankheit, Verletzung:														

9.5 Anhang 5: Gehr's schwäbische Laugenbrezel, Zutaten

Web Page:

<http://www.baeckerei-gehr.de/gehr-backwaren/kleingebaeck/gehrs-brezel/>

Zugriff am 12.09.2017

Gehr's Brezel



Gehr's schwäbische Laugenbrezel

Die schmeckt !

In vielen Verkaufsstellen wird die Echte Gehr Brezel den ganzen Tag frisch für Sie gebacken.

Natürlich gibt's auch mehrmals am Tag die Brezel direkt aus der Backstube - gebacken wie früher - direkt auf der Herdplatte.

Dem einen schmeckt die Backstubenbrezel besser, dem anderen die in der Verkaufsstelle gebackene. Also für jeden die richtige dabei...

Backtage

Mo - Di - Mi - Do - Fr - Sa - So

Zutaten

Bio Weizenmehl, Bio Sonnenblumenöl, Hefe, Salz, Weizengrieß, Weizenmalzmehl, Molkepulver, Roggenmalzmehl, Sojamehl, Guarkernmehl, Enzyme, Emulgator: Mono- / Diglycerid, Ascorbinsäure, Zucker