

**Analyse physiologischer Gesetzmäßigkeiten
zu den Themenbereichen „Ausbelastungskriterien“ und
„Nachbelastungsverhalten“ anhand der Ergebnisse aus-
dauerleistungsdiagnostischer Untersuchungen am Institut
für Sport und Sportwissenschaft des Karlsruher Instituts
für Technologie (KIT) im Zeitraum 2007-2010**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER PHILOSOPHIE
(Dr. phil.)

von der Fakultät für Geistes- und Sozialwissenschaften des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

DISSERTATION

von

Rainer Neumann
aus Heidelberg

Dekan: Prof. Dr. Andreas Böhn

1. Gutachter: Prof. Dr. Klaus Bös
2. Gutachter: PD Dr. Achim Bub

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Mai 2013

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit, aus der die Daten über mehrere Jahre ermittelt wurden und teilweise aus aufwändigen Teilstudien zusammensetzt, ist ohne die Unterstützung verschiedener Personen undenkbar. Mein erster Dank gilt daher meinen Betreuern Dr. Sascha Härtel sowie Prof. Dr. Klaus Bös und PD Dr. Achim Bub für die sehr hilfreichen Anregungen, inhaltlichen Vorschläge und Korrekturen. Besonderen Dank verdienen auch Christoph Platzek, Dr. Anne Focke, Steffen Schmidt, Lars Schlenker, Claudia Karger und Florian Engel, die mich immer wieder motivierten und mir mit zahlreichen Tipps zur Seite standen. Dies gilt auch für Prof. Dr. Alexander Woll, Dr. Gerda Strutzenberger, Janina Krell, Birte von Haaren, Caro Braun und Claire Kutzner.

Die Umsetzung der Untersuchungen wäre nicht ohne die Abteilung für Leistungsdiagnostik am Institut für Sport und Sportwissenschaft des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) möglich gewesen, die mir für meine Untersuchungen sowohl die Probanden als auch die notwendige sportmedizinische Einrichtung und Gerätschaften zur Verfügung stellte. Hervorgehoben seien hier vor allem Prof. Dr. Klaus Bös (Institutsleiter von 1999-2012), Prof. Dr. Alexander Woll (aktueller Institutsleiter), Dr. Sascha Härtel (Abteilungsleiter) und die zahlreichen Studierenden, die ich im Rahmen verschiedener Studienarbeiten betreute und die mir in verschiedenen Formen zuarbeiteten. Erwähnt seien hier Kristina Brandt, Stefan Altmann, Sabrina Benzinger, Hans Schmidt und Christian Lamred.

Nicht zuletzt gilt der Dank meinen Kolleginnen und Kollegen apl. Prof. Dr. Swantje Scharenberg, Dr. Thorsten Stein, Dr. Dietmar Blicher, Dr. Michaela Knoll, Dr. Gunther Kurz und Berthold Kremer für den moralischen Beistand in der Zeit bis zur Fertigstellung dieser Arbeit. Ein besonderes Dankeschön richte ich abschließend an meine Familie für Ihr Verständnis sowie für die immerwährende Unterstützung, ohne die diese Arbeit niemals zustande gekommen wäre.

Rainer Neumann

Karlsruhe, April 2013

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	5
1.1	Zielsetzung.....	7
1.2	Aufbau der Arbeit.....	8
2	THEORETISCHE GRUNDLAGEN	10
2.1	Leistungsdiagnostik	10
2.1.1	Belastungsverfahren in der Ausdauerleistungsdiagnostik	10
2.1.1.1	Entwicklung der Leistungsdiagnostik	10
2.1.1.2	Methoden der Trainingssteuerung im Ausdauersport	12
2.1.1.3	Belastungsmessungen unter standardisierten Bedingungen	17
2.1.2	Untersuchungsmethoden	22
2.1.2.1	Laktatdiagnostik	22
2.1.2.2	Spiroergometrie.....	23
2.2	Forschungsstand	26
2.2.1	Ausbelastungskriterien.....	26
2.2.1.1	Maximale Sauerstoffaufnahme.....	27
2.2.1.2	Respiratorischer Quotient	30
2.2.1.3	Atemäquivalent	32
2.2.1.4	Atemminutenvolumen	33
2.2.1.5	Laktatkonzentration.....	33
2.2.1.6	Herzfrequenz.....	35
2.2.1.7	Zusammenfassende Betrachtung der Ausbelastungskriterien	39
2.2.2	Nachbelastungsverhalten.....	41
2.2.2.1	Spiroergometrische Parameter	41
2.2.2.2	Laktatkonzentration.....	45
2.2.2.3	Herzfrequenz.....	51
2.2.2.4	Zusammenfassende Betrachtung des Nachbelastungsverhaltens.....	56
3	DATENANALYSE	61
3.1	Methodik	61
3.1.1	Messsysteme und Messtechnik	61
3.1.2	Statistische Auswertung.....	65
3.1.3	Gesamtstichprobe	66
3.1.4	Methodenkritik.....	69
3.2	Ausbelastungskriterien	71
3.2.1	Laufbandergometrie	72
3.2.1.1	Analyse der Herzfrequenz in der Ausbelastung	73
3.2.1.2	Analyse der Laktatkonzentrationen in der Ausbelastung	74
3.2.1.3	Analyse der maximalen Sauerstoffaufnahme in der Ausbelastung	75
3.2.1.4	Analyse des respiratorischen Quotienten in der Ausbelastung	76
3.2.1.5	Analyse des Atemäquivalents in der Ausbelastung.....	77
3.2.1.6	Analyse des Atemminutenvolumens in der Ausbelastung.....	77
3.2.1.7	Zusammenhänge	78
3.2.1.8	Übersicht der analysierten Ausbelastungsparameter auf dem Laufbandergometer.....	79

3.2.2	Fahrradergometrie	81
3.2.2.1	Analyse der Herzfrequenz in der Ausbelastung	83
3.2.2.2	Analyse der Laktatkonzentrationen in der Ausbelastung	84
3.2.2.3	Analyse der maximalen Sauerstoffaufnahme in der Ausbelastung	85
3.2.2.4	Analyse des respiratorischen Quotienten in der Ausbelastung	85
3.2.2.5	Analyse des Atemäquivalents in der Ausbelastung.....	86
3.2.2.6	Analyse des Atemminutenvolumens in der Ausbelastung.....	87
3.2.2.7	Zusammenhänge	88
3.2.2.8	Übersicht der analysierten Ausbelastungsparameter auf dem Fahrradergometer	88
3.2.3	Vergleich Laufband- und Fahrradergometrie in der Ausbelastung	90
3.2.4	Diskussion und Fazit zu Ausbelastungskriterien.....	99
3.3	Nachbelastungsverhalten	117
3.3.1	Laufbandergometrie	118
3.3.1.1	Analyse der Herzfrequenz in der Nachbelastung	119
3.3.1.2	Analyse der Laktatkonzentrationen in der Nachbelastung	126
3.3.1.3	Analyse der absoluten Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung.....	128
3.3.1.4	Analyse des respiratorischen Quotienten in der Nachbelastung	130
3.3.1.5	Übersicht der Parameter in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer	132
3.3.2	Fahrradergometrie	134
3.3.2.1	Analyse der Herzfrequenz in der Nachbelastung	136
3.3.2.2	Analyse der Laktatkonzentrationen in der Nachbelastung	143
3.3.2.3	Analyse der absoluten Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung.....	145
3.3.2.4	Analyse des respiratorischen Quotienten in der Nachbelastung	147
3.3.2.5	Übersicht der Parameter in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer.....	148
3.3.3	Vergleich Laufband- und Fahrradergometrie in der Nachbelastung.....	150
3.3.4	Diskussion und Fazit zum Nachbelastungsverhalten	153
4	ABSCHLIEßENDE ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	159
	LITERATURVERZEICHNIS	166
	TABELLENVERZEICHNIS	178
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	185
	ABKÜRZUNGEN	187
	ANHANG	190
I	Kundendatenerfassung mit Risikofragebogen (Par-Q)	190
II	Einverständniserklärung	191
III	Belastungsbogen Laufbandergometrie (exemplarisch 6-2-3)	192
IV	Belastungsbogen Fahrradergometrie (exemplarisch 50-50-3).....	193
V	Ergebnisse der einzelnen Belastungsprotokolle (TP 1, 2 und 3) auf dem Fahrradergometer	194
VI	Curriculum Vitae	208
VII	Erklärung.....	212

1 EINLEITUNG

„Mäßige körperliche Bewegung, neue Gegenstände und die alten von einer neuen Seite, mehr bedarf es nicht zum Wohlbefinden des Leibes und der Seele“. Goethe (1749-1832), von dem dieser Leitsatz stammt, ist bei Leibe nicht der erste, doch vielleicht die bekannteste Persönlichkeit, welche Bewegung als essenziellen Bestandteil eines funktionierenden Lebens auffasst. War Goethes Denken über physikalische Vorgänge noch stark vom Geist der Naturphilosophie geprägt und integriert in ein uns heute nicht selten höchst spekulativ anmutendes System naturwissenschaftlicher Gesetze, so überlebte die formulierte Erkenntnis auf das Heraufziehen moderner, empirischer Untersuchungsmethoden: Betrachtet man seitdem „die alten“ Gegenstände auch „von einer neuen Seite“, so blieb doch die Einsicht bestehen, dass von sportlicher Betätigung eine gesundheitsfördernde Wirkung ausgehe. Sie ist, mittlerweile hinreichend durch Studien belegt (vgl. u.a. Buskies & Boeckh-Behrens, 1996, S. 11f.; Hollmann & Hettinger, 2000, S. 568).

Im prosaischen Ton der Gegenwart liest sich das wie folgt: *„Die beste Pflegeversicherung ist regelmäßige körperliche Bewegung zum Erhalt der körperlichen Leistungsfähigkeit und der Gesundheit!“* (Richard Rost, 1992). So wie, humorvoll gewendet: *„Gäbe es heute keinen Sport, müsste er aus gesundheitlichen Gründen erfunden werden.“* (Wildor Hollmann, 1993).

Leistungsdiagnostische Untersuchungen ermöglichen die Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit sowie die Einschätzung der Belastbarkeit bei verminderter Leistungsfähigkeit, d.h. beispielsweise bei kardiopulmonale Leistungsbeeinträchtigungen. Zusätzlich kann der Effekt von Training bei Leistungssportlern, Breitensportlern als auch bei Gesundheitssportlern (Sporttreibenden der Prävention und Rehabilitation) quantitativ und qualitativ erfasst werden (vgl. u.a. Heck, 1990, S. 13, Hottenrott, 2010, S. 67f, Dick-

huth, Röcker, Gollhofer, König & Mayer, 2011, S. 219; S. 234). Die sportmedizinische Leistungsdiagnostik wird meist in Form von Ergometrien (Labor) auf dem Laufband- oder dem Fahrradergometer teilweise auch als Feldtest durchgeführt. Im Laufe der Entwicklungen in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik haben sich in den letzten Jahrzehnten viele unterschiedliche Gesetzmäßigkeiten bzw. Standards herauskristallisiert.

So gilt beispielsweise die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) als Standardkriterium zur Beurteilung der aeroben Ausdauer. Die VO_{2max} ist definiert als „die größte O_2 -Aufnahme pro Minute, die bei dynamischer Arbeit unter Einsatz möglichst großer Muskelgruppen durch den gesamten Körper aufgenommen werden kann“ (Hollmann, Strüder, Predel & Tagarakis, 2006, S. 74). Hierbei ist es wichtig in maximale Sauerstoffaufnahme und maximal erreichte Sauerstoffaufnahme (VO_{2peak}) zu unterscheiden. Diese VO_{2peak} ist kein absoluter Wert und hängt sehr stark von der Mitarbeit des Probanden ab (vgl. Löllgen, 2005, S. 286). Unklar ist jedoch das Kriterium der Ausbelastung (vgl. Röcker & Dickhuth, 1996, S. 45). Es existiert keine einheitliche Abgrenzung der VO_{2max} zur VO_{2peak} , d.h. der Sauerstoffaufnahme bei Testabbruch ohne Vorliegen einer Ausbelastung.

In Anbetracht dieser Schwierigkeit bietet sich die Herzfrequenz (Hf) als zusätzlicher, wenngleich nicht einziger Parameter an. In diesem Zusammenhang wurden Schätzformeln entwickelt, welche die Trainingsherzfrequenz / maximale Herzfrequenz (Hf_{max}) betreffen (vgl. Härtel, 2006, S. 29). Im deutschsprachigen Raum wird die Formel 220 minus Lebensalter (220-LA) häufig als Richtwert für die Hf_{max} angewandt. Viele Patienten und Sportler orientieren sich an solchen Schätzformeln, die sich aus der VO_{2max} oder der Hf_{max} erschließen lassen. Dies kann allerdings zu einer deutlichen Unter- bzw. Überforderung im Training der Patienten und Sportler führen, welche negative gesundheitliche Auswirkungen nach sich ziehen kann.

Zudem fokussiert ein Großteil der Untersuchungen zur Ausdauerleistungsdiagnostik den Verlauf physiologischer Parameter während der Belastungsphase. Nur wenige konzentrieren sich auf die Phasen der Erholung und Nachbelastung. Hierin könnte jedoch eine nichtinvasive Methode zur Bestimmung der Ausdauerleistungsfähigkeit untersucht werden.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass zahlreiche Untersuchungen keine Ausbelastungssituation erfordern. So kann in vielen Fällen anhand submaximaler Kenngrößen (metabolische und ventilatorische Schwellen) das für die jeweilige Fragestellung notwendige Ergebnis bestimmt werden. Es obliegt also einer sorgfältigen Prüfung des Studien- bzw. Testleiters im Vorfeld, ob eine Ausbelastungssituation wirklich herbeigeführt werden soll bzw. muss.

1.1 Zielsetzung

Diese Problematik der Verwendung leistungsdiagnostischer Parameter zur Bestimmung einer Ausbelastung in zahlreichen Studien sowie die Möglichkeit die Ausdauerleistungsfähigkeit anhand des Nachbelastungsverhaltens beurteilen zu können war Anlass dieser Arbeit.

Das Institut für Sport und Sportwissenschaft (IfSS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) verfügt über eine eigene leistungsdiagnostische Abteilung. Diese führt alle physiologischen Untersuchungen in Lehre, Forschung und Dienstleistung durch. Dabei wird die gesamte Bandbreite von Reha-Patienten, Untrainierten, Breiten- und Freizeitsportlern bis hin zu Leistungssportlern jeder Altersklasse abgedeckt. In dieser Arbeit wurden nur „gesunde“ Probanden berücksichtigt, die den in deutscher Version modifizierten Risikofragebogen „Physical Activity Readiness-Questionnaire“ (Par-Q) (Canadian Society for Exercise Physiology, 2012) bestanden, d.h. alle Fragen mit „nein“ beantwortet haben (vgl. Anhang I). Alle Untersuchungen wurden auf Grundlage von aktuellen wissenschaftlichen Standards und unter Verwendung modernster Messapparaturen durchgeführt.

Zur Überprüfung von Gesetzmäßigkeiten zu Ausbelastungskriterien bzw. zum Nachbelastungsverhalten gibt es nur wenig Literatur, keine einheitlichen Standards und kaum generalisierbare Ergebnisse – und das, obwohl jene Kriterien zur Einschätzung der (Aus-)Belastung herangezogen werden. Sie ermöglichen darüber hinaus eine standardisierte Bestimmung des Nachbelastungsverhaltens. Die leitende Fragestellung hinsichtlich des Nachbelastungsverhaltens lautet: Besteht eine Korrelation zwischen dem Nachbelastungsverhalten und der Ausdauerleistungsfähigkeit?

Aus den oben genannten Sachverhalten ergeben sich folgende Fragenkomplexe:

1. Welche Ausbelastungskriterien existieren, die einen Untersuchungsabbruch als Ausbelastung definieren? Welche Parameter können für die Analyse der Ausbelastungsphase zu Rate gezogen werden? Welche Standards gibt es hinsichtlich der Beurteilung körperlicher Ausbelastung? Lassen sich einheitliche Standards hinsichtlich der Auswahl der Parameter definieren?
2. Welche Parameter können für die Analyse der Nachbelastungsphase zu Rate gezogen werden? Wie gestaltet sich der typische Verlauf physiologischer Parameter in der Nachbelastungsphase und welche Faktoren beeinflussen diesen Verlauf? Ermöglicht die Betrachtung des Nachbelastungsverhaltens eine Aussage über die (aerobe) Ausdauerleistungsfähigkeit?

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in vier Hauptkapitel untergliedert.

Das erste Hauptkapitel beinhaltet die Einleitung, welche zunächst die Problemstellung des Themas physiologischer Gesetzmäßigkeiten erläutert. Zudem werden die Zielsetzung (Kapitel 1.1) und der Aufbau der Arbeit (Kapitel 1.2) in diesem Hauptkapitel beschrieben.

Das zweite Hauptkapitel deckt die theoretischen Grundlagen ab, die die Basis für diese Arbeit bilden. Darunter fällt Kapitel 2.1, welches sich mit der Leistungsdiagnostik im Allgemeinen befasst. Hierbei wird zunächst auf die Belastungsverfahren in der Ausdauerleistungsdiagnostik (Kapitel 2.1.1) mit ihrer historischen Entwicklung eingegangen. Der historische Überblick (Kapitel 2.1.1.1) der in der empirischen Untersuchung angewandten Testverfahren soll den Leser für das Thema sensibilisieren. Die Methoden der Trainingssteuerung im Ausdauersport (Kapitel 2.1.1.2) und die Belastungsmessungen unter standardisierten Bedingungen (Kapitel 2.1.1.3) leiten weiter in die Thematik ein. Schließlich führen die in dem Kapitel 2.1.2 aufgezählten Untersuchungsmethoden der Laktatdiagnostik (Kapitel 2.1.2.1) und Spiroergometrie (Kapitel 2.1.2.2) direkt zu den Forschungsfragen, da sie die Daten liefern,

mit denen die Ergebnisse der Datenanalyse berechnet wurden. Das letzte Kapitel der theoretischen Grundlagen legt den Forschungsstand zu den Gesetzmäßigkeiten von Ausbelastungskriterien (Kapitel 2.2.1) sowie den Gesetzmäßigkeiten des Nachbelastungsverhalten (Kapitel 2.2.2) anhand von kardiorespiratorischen, kardiozirkulatorischen und metabolischen Parameter dar. Dabei werden Studien von verschiedenen Autoren, die sich mit diesen Thematiken beschäftigten, vorgestellt.

Im dritten Hauptkapitel wird die Datenanalyse der eigenen durchgeführten empirischen Untersuchungen zu den in den theoretischen Grundlagen behandelten Zielsetzungen dargestellt. Zunächst erfolgt hierbei in Kapitel 3.1 die Beschreibung der Untersuchungsmethodik. Die Methodik wiederum wird in vier weitere Kapitel aufgeteilt. Das erste Unterkapitel 3.1.1 befasst sich mit den verwendeten Messsystemen und der Messtechnik. In Unterkapitel 3.1.2 wird auf die Vorgehensweise der statistischen Auswertung eingegangen. Anschließend erfolgt die Betrachtung der Gesamtstichprobe in Unterkapitel 3.1.3, bei der die Stichprobe hinsichtlich Untersuchungen auf dem Laufband- und dem Fahrradergometer unterteilt wird. Das letzte Unterkapitel 3.1.4 der Methodik beschäftigt sich mit der Methodenkritik.

Die Kapitel 3.2 Ausbelastungskriterien und Kapitel 3.3 Nachbelastungsverhalten befassen sich mit der Darstellung der Ergebnisse. Hierbei wird jeweils zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie kardiozirkulatorische, metabolische und kardiorespiratorische Parameter unterschieden. Am Ende der beiden Kapitel erfolgt ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der Laufband- und Fahrradergometrie sowie eine Zusammenfassung und Fazit. Dabei wird die Ausgangssituation geschildert, die Ergebnisse mit den genannten Studien verglichen und es werden die wichtigsten Erkenntnisse beschrieben.

Eine Zusammenfassung aller im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studien und der daraus resultierenden Erkenntnisse mit einem abschließenden Fazit und Ausblick bilden den Inhalt des dritten Hauptkapitels. Außerdem fließen persönliche Eindrücke und Erfahrungen in dieses Kapitel mit ein.

Das Literatur-, Tabellen- und Abbildungsverzeichnis, die Abkürzungen sowie der Anhang schließen diese Arbeit ab.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1 Leistungsdiagnostik

Um die Fragestellungen über Ausbelastungskriterien, vor allem der VO_{2max} und der Hf_{max} , sowie das Nachbelastungsverhalten zu klären, ist es notwendig die Grundvoraussetzungen der Leistungsdiagnostik zu kennen. Ein zentraler Punkt ist das Belastungsverfahren in der Ausdauerleistungsdiagnostik. Ein zweiter wichtiger Faktor sind die Untersuchungsmethoden der Laktatdiagnostik und der Spiroergometrie, die den physiologischen Einblick liefern, um die Leistungsfähigkeit von Patienten bzw. Sportlern einzuschätzen.

2.1.1 Belastungsverfahren in der Ausdauerleistungsdiagnostik

Hierunter fällt zuerst ein historischer Überblick zu der Entwicklung der Leistungsdiagnostik. Wesentliche Bestandteile von Belastungsverfahren sind die Methoden der Trainingssteuerung im Ausdauersport und die Belastungsmessungen unter standardisierten (Labor-) Bedingungen auf dem Laufband bzw. Fahrradergometer.

2.1.1.1 Entwicklung der Leistungsdiagnostik

Als Pioniere der Funktions- und Leistungsdiagnostik gelten Lavoisier & Seguin, in dem sie anhand einer Gesichtsmaske den menschlichen Gasstoffwechsel bereits 1789 bei vermutlich dosiertem Gewichtheben zu messen versuchten. Weitere Untersuchungen bezüglich des Gasstoffwechselverhaltens führten Prout 1813, Hirn 1855, Smith 1856 und Pettenkofer & Voigt 1866 durch (vgl. Tittel, Arndt & Hollmann, 1993, S. 21; Hollmann et al., 2006, S. 2). Neben den Untersuchungen des Gasstoffwechsels wurden zunehmend die Parameter des Energiestoffwechsels im Blut untersucht. Besondere Aufmerksamkeit galt hierbei den direkten Metaboliten des Energiestoffwechsels Laktat und Pyruvat. Die Entdeckung des Muskellaktats im Jahr 1807 wird Berzelius zugeschrieben. Er beobachtete, dass die Muskulatur sauer reagier-

te. Erst 30 Jahre später gelang es ihm die so genannte „Fleisch-Milchsäure“ als Folge der Muskelbelastung zuzuordnen. Schließlich fand Hermann 1867 heraus, dass die „Fleisch-Milchsäure“ als Spaltprodukt im chemischen Prozess überwiegend bei anaerober Arbeit entsteht (vgl. Heck 1990, S. 13f). Die ersten arbeitsphysiologischen Studien jedoch stammen aus dem Ende des 19. Jahrhunderts. Der hessische Arzt Speck entwickelte 1883 das erste Ergometer im Sinne heutiger Definition. Diese Drehkurbelarbeit im Stehen nutze Speck, um die ausgeatmete Luftzusammensetzung am Belastungsende zu analysieren. Weitere Arbeitsversuche der Franzosen Hanriot & Richet 1886 und dem Österreicher Gaertner 1887 verfeinerten das Ergometer. Schließlich konstruierte 1889 der Berliner Professor Zuntz das erste Laufband, das ursprünglich für Arbeitsversuche am Pferd bestimmt war und in der physiologischen Diagnostik eine verbesserte Untersuchung von Herz und Kreislauf ermöglichte. 1896 entwickelte der Franzose Bouny das erste Fahrradergometer und ein Jahr später 1897 untersuchten die Amerikaner Atwater & Benedict die ersten Probanden auf einem dosierbaren Fahrradergometer (vgl. Hollmann et al., 2006, S. 2ff.).

Anfang des 20. Jahrhunderts (1911) kam der schottische Physiologe Douglas auf die Idee die Ausatemluft in einem Sack zu sammeln und nachträglich zu analysieren. Nach ihm wurde auch die sogenannte Douglas-Sack-Methode benannt, die sich sowohl für Feld- als auch für Laboruntersuchungen bis in die heutige Gegenwart bewährt hat. Die Spiroergometrie, also die Atemgasanalyse unter Belastung, wurde in den Jahren 1924 bis 1929 durch Knipping & Brauer in der Universitätsklinik Hamburg entwickelt und war ursprünglich für medizinische Anwendungsgebiete gedacht. In diesem Zusammenhang untersuchte Hill 1924 und Herbst 1928 die Beziehung zwischen Sauerstoffaufnahme und Laktat unter Belastung und in der Erholungsphase. Das Ergebnis zeigte, dass extrem hohe Belastungsanforderungen bei gesunden Menschen nur möglich sind, wenn sie ein Sauerstoffdefizit eingehen und von nachfolgender Sauerstoffversorgung zehren. Sie prägten somit die Begriffe der maximalen Sauerstoffaufnahme und des Sauerstoffdefizites (vgl. Heck 1990, S. 13f, Heck & Schulz 2002, Hollmann et al., 2006, S. 7f, S. 28, S. 74). Deshalb gilt laut Hollmann et al. (2006, S.8) das Jahr 1929 als Geburtsstunde der klinischen Leistungsdiagnostik. Für eine Weiterentwick-

lung sind die Skandinavier Asmussen, Christensen & Nielsen in den 1930er und 1940er Jahren verantwortlich, indem sie mit Trekkurbelarbeit in liegender und sitzender Position das Verhalten des Gasstoffwechsels und die Herz-Kreislauf-Reaktion mit unterschiedlich dosierter Arbeit untersuchten. Astrand, der Schüler Christensens, führte diese Forschung ab Ende der 1940er Jahre fort. Laut Hollmann et al. (2006, S. 11) „[...] gelang der Spiroergometrie der eigentliche Durchbruch als Routinemethode für klinische Untersuchungen in Europa erst in den 1950er Jahren, in den USA ca. 20 Jahre später“. Erheblichen Anteil hatte die Arbeitsgruppe um Bolt, Valentin & Venrath, die 1954 in der medizinischen Universitätsklinik Köln spiographische Atmungs- und Gasstoffwechselformen sitzend auf einem der damals 12 existierenden Fahrradergometer in Deutschland durchführte. Weitere systematische und ergometrische Belastungen von Athleten in Deutschland führte Mellerowicz in Berlin während der 50er Jahre durch. Aufgrund seiner Arbeit wurde die Spiroergometrie 1979 eine objektive Messmethode mit dem Anspruch auf Genauigkeit, Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit anhand der Testgütekriterien Reliabilität, Validität und Objektivität (vgl. Mellerowicz & Maidorn 1979, Hollmann & Hettinger 2000, S. 563). Zusätzlich setzte sich ab Mitte der 1970er Jahre, vor allem aber mit der Beschreibung der 4 mmol/l-Laktat-Schwelle durch Mader, Liesen, Heck, Philippi, Rost, Schürch & Hollmann im Jahre 1976, immer mehr das Messprinzip zur Bestimmung der Laktatkonzentration durch (vgl. Heck, 1990, S. 15)

In den letzten 30 Jahren wurden zahlreiche Untersuchungen hinsichtlich der körperlichen Leistungsfähigkeit von Kindern und Jugendlichen, Reha- und Gesundheitssportlern, Untrainierten, Trainierten sowie Hochleistungssportlern mittels der Laktatdiagnostik und/oder der Spiroergometrie durchgeführt, u.a. von Rieckert, 1981, Szögy et al., 1984, Shepard & Åstrand, 1993, Hollmann & Hettinger, 2000, Härtel, 2006.

Laut Hollmann et al. (2006, S. 17) ist die Kombination aus Laktatmessung und Spiroergometrie in der Belastungsdiagnostik der Goldstandard.

2.1.1.2 Methoden der Trainingssteuerung im Ausdauersport

Trainingssteuerung wird laut Hohmann, Lames & Letzelter (2002, S. 159) definiert als „die gewichtete kurz-, mittel- und langfristige Abstimmung und

Ausführung aller Planungs-, Trainings-, Kontroll- und Lenkungsmaßnahmen eines Trainingsprozesses zur Erreichung der Trainingsziele“.

Die Steuerung der Trainingsintensität ist hierbei ein wesentlicher Bestandteil. Um Überbelastung und gesundheitliche Schäden vorzubeugen, bedarf es, vor allem im Freizeit- und Gesundheitssport, einer zuverlässigen Bestimmung und Kontrolle der Belastungsintensität. Laut Buskies & Boeckh-Behrens (1996, S. 26) werden diesbezüglich in der täglichen Praxis am häufigsten die Methoden des *subjektiven Belastungsempfinden*, der Steuerung über die *Atmung* sowie über die *Herzfrequenz* und der Steuerung mit Hilfe der *Laktatkonzentration* im Blut und der *Spiroergometrie* angewandt.

Die Methode des *subjektiven Belastungsempfinden* erfolgt anhand von Schätzskaleten, wie die Borg-Skala. Die sogenannte RPE-Skala (ratings of perceived exertion) nach Borg & Noble (1974, S. 131-153) stellt eine valide Methode zur Belastungseinschätzung dar. Sie basiert auf „psychophysikalischen und psychologischen Prinzipien und Experimenten“ (Borg, 2004, S. A1016) und orientiert sich an der Herzfrequenz. Diese 15-stufige Skala (siehe Tabelle 1) von 6 bis 20, analog zur Herzfrequenz von 60 bis 200 Schlägen/min war bereits mehrfach Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen (vgl. u.a. Buskies, Kläger, Riedel, 1992, S. 248, Buskies, Liesner, Zieschang, 1993, S. 568, Krueger, Moyna, Robertson, Perik, Meckes, Millich, Monroe-Wise & Thompson, 2000, S. 171).

Tabelle 1: Die RPE-Skala zur Einschätzung des Belastungsempfinden (nach Borg & Noble, 1974, S. 131-153)

6	
7	Sehr, sehr leicht
8	
9	Sehr leicht
10	
11	Leicht
12	
13	Etwas anstrengend
14	
15	Anstrengend
16	
17	Sehr anstrengend
18	
19	Sehr, sehr anstrengend
20	

Laut Heitkamp, Vogt, Venter, Hipp, Furian & Horstmann (2003, S. 166) stellt die Borg-Skala die „beste Möglichkeit der Orientierung des präventiven Ausdauertrainings“ dar.

Der Vorteil dieser Methode der subjektiven Belastungssteuerung ist der geringe apparative Aufwand und die problemlose Verwendbarkeit während des Trainings (vgl. Buskies & Boeckh-Behrens, 1996, S. 32).

Eine weitere Methode ist die Orientierung an der *Atmung*. Tipps wie „Laufen ohne zu Schnaufen“ (Buskies & Boeckh-Behrens, 1996, S. 33) können bereits einen sehr guten Richtwert für die Intensität liefern. Schon etwas genauer ist der 4 Schritt-Rhythmus bzw. der 3 Schritt-Rhythmus. Hierbei wird auf 4 (bzw. 3) Schritte eingeatmet und auf 4 (bzw. 3) weiteren Schritten ausgeatmet (vgl. Buskies & Boeckh-Behrens, 1996, S. 32). Auch zu dieser Methode der Belastungssteuerung über die Atmung gibt es zahlreiche wissenschaftliche Studien (vgl. u.a. Jablonski, Liesen & Hollmann, 1987, S. 34, Buskies et al., 1992, S. 248, Buskies et al., 1993, S. 568, Krueger et al., 2000, S. 171). Der Vorteil liegt auch hier auf der Hand. Es gibt keinen apparativen Aufwand, die Methode ist jederzeit während des Trainings anwendbar und die Gefahr der Überlastung ist sehr gering.

Die wohl am häufigsten angewandte Methode zur Trainingssteuerung ist die *Herzfrequenz*. Es scheint, dass immer mehr Gesundheits-, Breiten- und Freizeitsportler ihre Trainingsintensität mittels Herzfrequenzmessgeräte steuern. Anhand eines solchen Herzfrequenzmessers ist eine ständige Kontrolle, auch während der Belastung, möglich. Bei den Sportlern, die ihre Herzfrequenz noch am Handgelenk, Hals oder am Herz direkt messen, kann es zu erheblichen Herzfrequenzabweichungen aufgrund von zu hohem Abfall der Herzfrequenz und der zu späten Messung nach der Belastung kommen. An sich ist es hierbei fast unmöglich eine fortwährende Kontrolle während der Belastung zu gewährleisten (vgl. Buskies & Boeckh-Behrens, 1996, S. 26ff.). Zudem können verschiedene Faktoren, wie Alter, Geschlecht, Trainingszustand, meteorologische und topografische Gegebenheiten sowie eine Medikamenteneinnahme die Herzfrequenz beeinflussen (vgl. u.a. Israel, 1982, S. 34, S. 70 und S. 120, Lagerstrøm & Graf, 1986, S. 22, Edwards, 2001, S.

107ff., Graf & Rost, 2001, S. 93, Löllgen, 2005, S. 3 und S. 22f., Hollmann et al., 2006, S. 95).

Zur Bestimmung der Trainingsherzfrequenz ist es ideal, einen Laktatstufentest und/oder eine spiroergometrische Untersuchung zu absolvieren, bei denen über die ermittelte aerobe und anaerobe Schwelle die optimale Trainingsherzfrequenz bestimmt werden kann (vgl. Dickhuth et al., 2011, S. 241ff.). Auf diese Methoden wird in diesem Absatz nicht weiter eingegangen, da der folgende Abschnitt und das Kapitel 2.1.2 sich näher mit dieser Thematik auseinandersetzen.

Laut Härtel (2006, S. 29) ist die Benutzung von Herzfrequenzformeln eine einfache, nichtinvasive und kostengünstige Variante, um Leistungsuntersuchungen zu umgehen. Einige ausgewählte Formeln zur Berechnung der Trainingsherzfrequenz im Bereich „Laufen“ bezüglich Ausdauersport, die im Laufe der Jahre von verschiedenen Autoren publiziert wurden sind in folgender Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Formeln zur Berechnung der Trainingsherzfrequenz im Bereich „Laufen“ (vgl. Härtel, 2006, S. 29)

Formel	Herkunft bzw. Autor	Bemerkungen
170 - Lebensalter	BAUM, 1971	---
180 - Lebensalter	BAUM, 1971	für sportliches Training
180 - Lebensalter + 5 je Lebensjahrzehnt über 30	LIESEN ET AL., 1979	---
170 - $\frac{1}{2}$ Lebensalter \pm 10	SCHMITH & ISRAEL, 1983	---
$(220 - \frac{1}{2} \text{ Lebensalter}) \times 65 \%$	LAGERSTRØM & GRAF, 1986	wenig bis untrainierte Läufer
200 - Lebensalter	KINDERMANN & ROST, 1991	nur für Läufer
$Hf_{\text{Ruhe}} + (Hf_{\text{max}} - Hf_{\text{Ruhe}}) \times \text{Int.-faktor}$	KARVONEN ET AL., 1957	setzt Messung/Schätzung von Hf_{Ruhe} und Hf_{max} voraus

Diese Formeln sind auch heute noch in der Literatur zu finden, auch wenn Kritikpunkte dazu geäußert wurden. Entscheidend ist, dass es sich bei den Vorgaben, lediglich um statistische Mittelwerte handelt, die nur als groben Richtwert dienen und eine Überlastung ausschließen können (vgl. Buskies, 1998, S. 78).

Abbildung 1 verdeutlicht, dass eine sehr große Abweichung der Herzfrequenz an der anaeroben Schwelle bei 1423 getesteten Probanden und der

Formel „200 minus Lebensalter“, welche für die anaerobe Schwelle steht, existiert. Im Einzelfall beträgt die Abweichung der Herzfrequenz von bis zu 50 Schlägen pro Minute. Solche Formeln sind, aufgrund der schlechten Reliabilität hinsichtlich der physiologische Streubreite in der leistungsdiagnostischen Ergometrie kaum anwendbar (vgl. Dickhuth et al., 2011, S. 241).

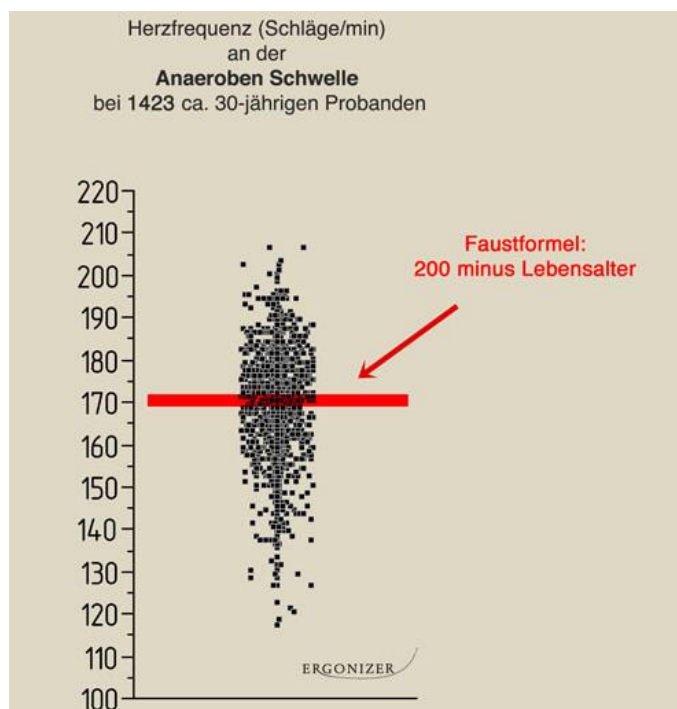


Abbildung 1: Abweichung der Herzfrequenz an der anaeroben Schwelle bei 1423 getesteten Probanden und der Formel „200 minus Lebensalter“ (Quelle: ergonizer.de/trainingssteuerung.html)

Die Steuerung der Intensität mittels *Laktatbestimmung* bzw. *Spiroergometrie* stellt sicherlich die aussagekräftigste Methode mit dem höchsten Grad an Wissenschaftlichkeit dar. Zugleich ist sie jedoch auch mit einem hohen apparativen Aufwand verbunden und zudem aus finanziellen sowie zeitlichen Gründen für den Gesundheits-, Freizeit- und Breitensport eher unüblich. Dennoch leisten sich, neben Spitzensportlern, immer mehr gesundheitsorientierte und ambitionierte Sportler diese exakte und mittlerweile auch bezahlbare Methode, um eine optimale Trainingsteuerung zu gewährleisten. Für die Leistungsdiagnostik sind die Laktatbestimmung und die Spiroergometrie unverzichtbare Steuergrößen. Während die Laktatdiagnostik bereits die Herzfrequenz und die Laktatkonzentration bestimmt, werden mit der Spiroergo-

metrie ventilatorische Größen, wie beispielsweise die maximale Sauerstoffaufnahme und der respiratorische Quotient zusätzlich erfasst. Mit Hilfe eines Stufentests werden somit die optimalen Trainingsbereiche (Regeneration, extensive und intensive Grundlagenausdauer sowie der Entwicklungsbereich an der anaeroben Schwelle) abgeleitet, die mittels Herzfrequenz, Laufgeschwindigkeit (z.B. GPS) oder Laufstrecke pro Zeit (1000m-Zeit) umgesetzt werden können (vgl. Liesen, Dufaux, Heck, Mader, Rost, Lötzerich & Hollmann, 1979, S. 218, Buskies & Boeckh-Behrens, 1996, S. 26, Röcker, Schotte, Niess, Horstmann & Dickhuth, 1998, S. 1552ff., Röcker, Niess, Horstmann, Striegel, Mayer & Dickhuth, 2002, S. 881ff., Hollmann et al., 2006, S. 17, Dickhuth et al., 2011, S. 243ff.). Auf die Belastungsmessungen und die Untersuchungsmethoden wird in den nächsten Kapiteln näher eingegangen.

2.1.1.3 Belastungsmessungen unter standardisierten Bedingungen

Historisch gesehen haben sich weitestgehend physiologische und klinische Untersuchungsverfahren im Labor entwickelt. Diese Belastungsuntersuchungen werden in der Regel in Form von Ergometrien durchgeführt. Das Wort Ergometrie stammt aus dem Griechischen und setzt sich aus den Wörtern „*ergon*“ (Arbeit) und „*metron*“ (Maß) zusammen, d.h. die gemessene Arbeit beurteilen. Wichtig ist hierbei, dass die Belastungsmessungen unter standardisierten Bedingungen stattfinden und somit genau dosierbare und reproduzierbare Leistungen möglich machen. Das standardisierte Belastungsschema zur Bestimmung der Ausdauerleistungsfähigkeit beschreibt den zeitlichen Verlauf der Belastung und wird durch Belastungsmodus (konstante, rampenförmige bzw. stufenförmige Belastung), Belastungssteigerung, Anfangsbelastung, Stufendauer und eventueller Pausen bestimmt. In der Praxis ist die stufenförmige Belastung (Stufentest) das am häufigsten verwendete Verfahren. Je nach Fragestellung und/oder sportartspezifischer Ausrichtung werden die meisten Untersuchungen auf dem Laufband- bzw. dem Fahrradergometer durchgeführt, in seltenen Fällen werden auf die spezielleren Ergometrieformen wie beispielsweise die Handkurbel-, die Ruder- und die Schwimmergometrie zurückgegriffen (vgl. Löllgen, Winter & Erdmann, 1997, S. 56ff., Haber, 2004, S. 127f., Löllgen, 2005, S. 240ff., Hollmann et al., 2006, S. 36ff., S.59, Dickhuth et al., 2011, S. 226ff.).

Felduntersuchungen, die meist außerhalb von definierten Bedingungen eines Labors durchgeführt werden, sind für bestimmte Verfahren, die sich nicht im Labor simulieren lassen, wie z.B. Skilanglauf oder Eisschnelllauf, geeigneter (Dickhuth et al., 2011, S. 226ff.).

In dieser Arbeit soll jedoch nur auf Labortests insbesondere auf Laufband- und Fahrradergometrie eingegangen werden, da diese Formen der Bestandteil der Forschungsfragen im empirischen Teil darstellen.

Die **Laufbandergometrie** ist gegenüber der Fahrradergometrie, wie in Kapitel 2.1.1 erwähnt chronologisch gesehen die ältere Methode der Belastungsmessung. In den USA finden laut Löllgen et al. (1997, S. 62) überwiegend Belastungsmessungen auf dem Laufband statt, in Deutschland eher nur bei Sportlern zur sportartspezifischen Untersuchung bei Läufern. Die erbrachte physikalische Leistung W errechnet sich aus der Körpermasse G in kg, der Laufbandgeschwindigkeit v in m/s und dem Steigungswinkel α :

$$W = G \cdot v \cdot \sin\alpha$$

Zusätzlich kann eine Gehbandbelastung bei Personen, die nicht Fahrradfahren (z.B. bei Gelenkversteifung) und/oder die nicht laufen können durchgeführt werden. Die Belastung stellt trotzdem eine alltagsnahe Situation dar und wird hauptsächlich im klinischen Bereich angewandt. Das Laufbandergometer sollte in jeder Einrichtung biologisch geeicht und somit mit einer konstanten Steigung (zwischen 0,5 und 1,5%) zur Kompensation des Luftwiderstandes eingestellt werden (vgl. Jones & Doust, 1996, Dickhuth et al., 2011, S. 228f.). Für die Laufbanduntersuchung gibt es verschiedene Belastungsprotokolle, wie folgender Tabelle 3 zu entnehmen ist:

Tabelle 3: Empfehlungen für ein Untersuchungsprogramm für die Laufbandergometrie (vgl. Löllgen et al., 1997, S. 62)

Anwendungsbereich	Eingangsbelastung	Steigerung
Klinik (Patienten)	4 km/h (2,5%)	2,5% / 3 min
	4-6 km/h (0%), Gehen	1 km/h / 3 min
	7 km/h (0%), Laufen	

Sportmedizin	8-10 km/h (1-1,5% bzw. 5%)	2 km/h / 3 min
Angiologie	3,6 km/h (12,5) 4 km/h (10%)	Bis Schmerzempfinden
Pneumologie	4-6 km/h (5%) mehr als 6 min 8-10 km/h (0%)	Bis Belastungsdyspnoe

Laut Löllgen (2005, S. 240), Hollmann et al., (2006, S. 45) und Dickhuth et al., (2011, S. 229) liegen die *Vorteile der Laufbandbelastung* bei der gegebenen gewohnten Belastungsform des Gehens und Laufens (vgl. Tabelle 3). Somit kann die reale (auch sportartspezifische) maximale Leistungsfähigkeit des kardiopulmonalen Systems erfasst werden. Diese ist auf der Ebene im Gegensatz zur Fahrradergometrie im Mittel um 10 % höher, die Werte der maximalen Sauerstoffaufnahme sogar nochmals 3-5 % darüber. Die Leistung kann gut gemessen werden, in dem eine kontinuierlich ansteigende Belastung bis hin zur Ausbelastung möglich ist. Zusätzlich können weitere Messgrößen, wie Gasaustausch, Laktatkonzentration, Blutdruck- und EKG-Registrierung teilweise mit erhoben werden. Dies ist auch gleichzeitig ein *Nachteil der Laufbandergometrie* zumindest in Relation zur Fahrradergometrie. Durch die Auf- und Abwärtsbewegung während der Belastung können technische Schwierigkeiten bei der Registrierung der oben genannten Parameter auftreten, bzw. müssen für die Messung kurze Pausen zwischen den jeweiligen Stufen eingelegt werden. Zudem ist eine gewisse Koordination (Geschicklichkeit) erforderlich, da sonst eine Gefährdung bzw. Sturzgefahr bei vor allem älteren Probanden besteht. Weitere Nachteile wie der hohe Anschaffungspreis, der große Platzbedarf, der ggf. hohe Geräuschpegel sowie regelmäßige Kalibrierungen und Eichungen kommen noch dazu (vgl. Löllgen 2005, S. 240, Hollmann et al. 2006, S. 45 und Dickhuth et al. 2011, S. 229).

Die **Fahrradergometrie** ist in Europa als bevorzugtes Belastungsverfahren weit verbreitet, so auch in Deutschland (vgl. Löllgen et al. 1997, S. 58). Im (sport-) medizinischen Bereich wird die Belastung auf vorwiegend elektromagnetisch gebremste sowie drehzahlunabhängige Fahrradergometer und hauptsächlich in sitzender Position durchgeführt, in der Klinik meistens im Liegen, da häufig weitere oft invasive Untersuchungen wie Herzkatheter etc.

parallel mitgezeichnet werden. Die maximale Leistungsfähigkeit ist bei der liegenden Fahrradergometrie geringer, als in sitzender Position. Aufgrund von nicht-klinischer Fragestellungen wird in dieser Arbeit nur noch auf Fahrradergometrien in sitzender Position eingegangen. Der Vorteil der elektromagnetisch gebremsten Fahrradergometer ist die konstante Leistung bei nicht gleichbleibenden Drehzahlen. Die erbrachte physikalische Leistung wird hierbei in Watt angegeben, die relative Leistung, d.h. auf das Körpergewicht bezogen in Watt/kg (vgl. Löllgen et al., 1997, S. 56ff., Löllgen 2005, S. 240f., Hollmann et al., 2006, S. 38ff., Dickhuth et al., 2011, S. 227f.). Auch bei der Fahrradergometrie ist es wichtig die passenden Belastungsprotokolle (siehe Tabelle 4) unter Standardbedingungen zu verwenden, um beispielsweise Patienten und Gesundheitssportler nicht zu überfordern, aber auch um Vergleichsuntersuchungen und eine Beurteilung zu bekannten Referenzwerten zu ermöglichen.

Tabelle 4: Empfehlungen für Belastungsschemata für die Fahrradergometrie (vgl. Löllgen et al., 1997, S. 57, Rost, 2001, S. 53, De Marées, 2003, S. 453)

Anwendungsbereich	Eingangsstufe [Watt]	Steigerung [Watt]	Stufendauer [min]
Praxis, Klinik („Routineergometrie“) Arbeitsmedizin	50 (bei erhöhter Leistungsfähigkeit 75-100)	25	2
Praxis, Klinik, Begutachtung, Nuklearmed. Untersuchung, Weltgesundheitsorganisation (WHO)	50 (bei eingeschränkter Leistungsfähigkeit 25)	25	2
Pneumologie	50 (25)	25	4 oder 5
Pädiatrie	1 W pro kg Körpergewicht	0,5 W/kg Körpergewicht	3
Bundesausschuss Leistungssport (BAL) Sportmedizin	50 (100)	50 Im Bereich der Ausbelastung Steigerung um 25	2 oder 3
Bund Deutscher Radfahrer (BDR), Leistungssport	100 (80)	20	3

Die Vorteile der Fahrradergometrie liegen laut Löllgen (2005, S. 241), Hollmann et al., (2006, S. 40f.) und Dickhuth et al., (2011, S. 227ff.) neben der

Leistungskonstanz bei wechselnden Drehzahlen vor allem bei den exakten dosierbaren und reproduzierbaren Belastungen. Die kontinuierlich ansteigende Belastung ohne Untersuchungspausen machen zusätzliche Messgrößen, wie Gasaustausch, Laktatkonzentration, Blutdruck- und EKG-Registrierung relativ störungsfrei möglich. Im Vergleich zu Laufbändern hat das Fahrradergometer einen geringeren Raumbedarf und geringe Anschaffungskosten. Eine kardiopulmonale Ausbelastung ist im Gegensatz zur Laufbandergometrie jedoch schwieriger zu diagnostizieren. Dieser *Nachteil der Fahrradergometrie* ist auf frühzeitige muskuläre Erschöpfung zurückzuführen. Dies bezieht sich nicht auf Leistungsrennfahrer, da diese eine gleiche oder sogar höhere maximale Sauerstoffaufnahme erreichen, wie bei Laufbandbelastungen.

Nachstehende Tabelle 5 fasst alle Vor- und Nachteile der Laufband- bzw. der Fahrradergometrie zusammen.

Tabelle 5: Vor- und Nachteile der verschiedenen Belastungsformen (vgl. Löllgen, 2005, S. 241 & Dickhuth et al., 2011, S. 229)

	Fahrradergometer (sitzend)	Laufbandergometer
Gewohnte Belastungsart	++	++(+)
Ausbelastung möglich	++(+)	+++
Messmöglichkeit der physikalischen Leistung	+++	++
Gute Registriermöglichkeit für EKG	++	+
Blutdruck	++	(-)
Blutgase	++	+
Gaswechsel	++	+
Kontinuierlich ansteigende Belastung möglich	+++	++
Geschicklichkeit erforderlich	(+)	++
Geschicklichkeit bei hoher Belastung	(+)	-
Geringe Kosten	+	-

2.1.2 Untersuchungsmethoden

In der Leistungsdiagnostik haben sich verschiedene Parameter entwickelt (vgl. Kapitel 2.1.1.1). Die beiden folgenden Kapitel beschreiben die Untersuchungsmethoden der Laktatdiagnostik und der Spiroergometrie näher und zeigen die jeweiligen Möglichkeiten und Parameter auf, die für die Fragestellungen dieser Arbeit erforderlich sind.

2.1.2.1 Laktatdiagnostik

Als Salz der Milchsäure entsteht Laktat beim Abbau von Glykogen und Glukose als Produkt des anaeroben Stoffwechsels. Die vergleichsweise einfach zu bestimmende Messgröße der Laktatkonzentration aus dem kapillär-arteriellen Blut, z.B. aus dem Ohrläppchen oder der Fingerbeere, stellt die Basis der leistungsdiagnostischen Laboruntersuchung dar (vgl. Dickhuth et al. 2011, S. 239f). Eine Standardisierung ist jedoch wichtig, da die Blutentnahme an der Fingerbeere größere Blutlaktatkonzentrationen aufweist als am Ohrläppchen (vgl. Röcker & Dickhuth, 2001, S. 34, Faude & Meyer 2008, S. 305). Die Laktatkonzentration, im Muskel bzw. im Blut, liegt in Ruhe bei etwa 0,5-1,5 mmol/l und steigt mit zunehmender ergometrischer Belastung exponentiell von der überwiegend aeroben zur anaeroben Energiebereitstellung an. Der erste merkliche Anstieg von der Basalkonzentration des Laktats kennzeichnet die individuelle aerobe Schwelle oder auch „lactate threshold“ (LT) genannt (vgl. Röcker et al., 1998, S. 1552ff.). Ab dieser Belastungsintensität ist laut Dickhuth et al. (2011, S. 239f.) die maximal mögliche Energiebereitstellung über die Fette erreicht und die anaerobe Komponente nimmt zu. Befinden sich die Laktatproduktion und die Laktatelimination im Gleichgewicht bzw. ist die maximal kompensierbare Belastungsintensität erreicht, wird von einem maximalen Laktat Steady-State (maxlass oder MLSS) gesprochen (vgl. u.a. Stegmann & Kindermann, 1982, S. 105f, Jacobs & McLellan, 1988, S. 60f, Urhausen, Coen, Weiler, & Kindermann, 1993, S. 134f, Beneke, Leithäuser, Schwarz & Heck, 2000, S. 100, Dickhuth et al., 2011, S. 239f). Dieser Bereich stellt die „individuelle anaerobe Schwelle“ (IAS) dar und wird anhand des Basislaktats sowie einem dazu addierten Fixum (Laufband + 1,5 mmol/l, Fahrradergometer + 1 mmol/l) errechnet (vgl. Simon, 1986, Dickhuth, Wolfahrt, Hildebrand, Rokitzki, Huonker & Keul,

1988, Dickhuth, Aufenanger, Schmidt, Simon, Huonker & Keul, 1989). Den individuellen Schwellen stehen die fixen Schwellen gegenüber. Hierbei ist nach Kindermann, Simon & Keul (1978) die aerobe Schwelle bei 2 mmol/l Laktat und die anaerobe Schwelle nach Mader et al. (1976) bei 4 mmol/l Laktat. Das Konzept der aerob-anaeroben Schwelle hat sich in den letzten Jahrzehnten in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik etabliert. Es basiert auf dem bereits erwähnten exponentiellen Anstieg der Laktatleistungskurve ab einer Belastung von 50-70 % der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}), wodurch von einer submaximalen Belastung ein Rückschluss auf die maximale Leistungsfähigkeit gezogen werden kann (vgl. Kindermann, 2004, S. 161ff., Löllgen, 2005, S. 259f.). Die Laktatschwellen werden im Allgemeinen anhand eines stufenförmigen Belastungsprotokolls bestimmt und sind auch von diesem abhängig (vgl. Röcker et al., 1998, S. 1552ff., Heck & Beneke, 2008, S. 299).

Eine Leistungsdiagnostik ohne Laktat zur Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit vom Hochleistungssport bis hin zum klinischen Bereich ist laut Heck (In Löllgen et al., 1997, S. 216) kaum denkbar.

2.1.2.2 Spiroergometrie

Hollmann & Hettinger (2000, S. 332) definieren die Spiroergometrie als „ein diagnostisches Verfahren, mit dem sich qualitativ und quantitativ die Reaktion von Herz, Kreislauf, Atmung und Stoffwechsel auf muskuläre Arbeit sowie die kardiopulmonale Leistungsfähigkeit beurteilen lassen“.

Die Spiroergometrie setzt sich inhaltlich aus Ergometrie und Spirometrie zusammen. Die Ergometrie ist eine Methode um physische Belastungen exakt dosierbar und reproduzierbar zu machen. Die Spirometrie ist ein Verfahren zur Erfassung des respiratorischen Gasstoffwechsels (Atemgasanalyse) in Ruhe. Wird unter Belastung eine Atemgasanalyse durchgeführt spricht man von Spiroergometrie. Die wichtigsten ermittelten Messgrößen sind hierbei die Sauerstoffaufnahme (VO_2), die Kohlendioxidabgabe (VCO_2), das Atemminutenvolumen (VE oder AMV, im weiteren Verlauf VE genannt) und die Atem-

frequenz (AF). Daraus können wiederum wichtige Parameter wie das Atemäquivalent (AÄ) und der respiratorische Quotient (RQ) berechnet werden. Mit der parallel aufgezeichneten Herzfrequenz kann zusätzlich der Sauerstoffpuls bestimmt werden (vgl. u.a. Hollmann & Hettinger, 2000, S. 343ff., Löllgen, 2005, S. 286ff., Hollmann et al., 2006, S. 74ff., S. 92ff., Dickhuth et al., 2011, S. 61, S. 236f).

Laut den o.g. Experten der Sportmedizin stellt die VO_{2max} die höchstmögliche Sauerstoffaufnahme pro Minute während einer Maximalbelastung dar und ist eine der wichtigsten Basismessgrößen der Sportmedizin. Wie in der Einleitung bereits erwähnt, ist es jedoch wichtig in maximale Sauerstoffaufnahme und maximal erreichte Sauerstoffaufnahme (VO_{2peak}) zu unterscheiden.

Das Atemminutenvolumen (VE) beispielsweise bezeichnet das Volumen an Luft, das in einer Minute ein- und wieder ausgeatmet wird. Es lässt sich aus der Atemfrequenz (AF) und dem Atemzugvolumen (VT) errechnen $\rightarrow \boxed{VE = AF \times VT}$. Ein Erwachsener atmet ca. 15-18 mal pro Minute. Dabei atmet er pro Atemzug ein Atemzugvolumen von 500-700 ml ein. Somit beträgt sein Atemminutenvolumen durchschnittlich ca. 10 Liter. Das Atemäquivalent (AÄ) wiederum errechnet sich aus dem Atemminutenvolumen und der Sauerstoffaufnahme $\rightarrow \boxed{AÄ = VE/VO_2}$ und gibt an, wie viel Luft eingeatmet werden muss, um einen Liter Sauerstoff im Körper verfügbar zu haben. Es ist somit ein Indikator für den Wirkungsgrad, die Effektivität bzw. Ökonomie der Atmung. Dieser Parameter ist dimensionslos und wird ohne Einheit angegeben. Der ebenfalls dimensionslose respiratorische Quotient (RQ) beschreibt das Verhältnis der Menge des ausgeatmeten Kohlenstoffdioxids (VCO_2) im Vergleich zu der Menge des aufgenommenen Sauerstoffes (VO_2) $\rightarrow \boxed{RQ = VCO_2/VO_2}$. Anhand des RQ können die im Organismus verbrannten Nährstoffe zugeordnet werden. Die ausschließliche Verbrennung von Fettsäuren ergibt einen RQ-Wert von 0,70, die Proteinverbrennung einen Wert von 0,81 und die alleinige Verbrennung von Kohlenhydraten einen RQ-Wert von 1,00. Der Sauerstoffpuls, eine weitere Kenngröße, bezeichnet die pro Herzschlag aufgenommene Sauerstoffmenge in Abhängigkeit von der Größe des Herzschlagvolumens, der Sauerstoffbindungskapazität des Blutes sowie der Sauerstoffutilisation des Gesamtorganismus. Es wird aus dem Quotienten

von Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz in derselben Minute $\rightarrow \boxed{VO_2/Hf}$ errechnet (vgl. u.a. Hollmann & Hettinger, 2000, S. 343ff., Löllgen, 2005, S. 286ff., Hollmann et al., 2006, S. 74ff., S. 92ff., Dickhuth et al., 2011, S. 61, S. 236f).

Das Einsatzgebiet der Spiroergometrie ist nach Hollmann & Hettinger, (2000, S. 332) heute hauptsächlich:

- Beurteilung der kardiopulmonalen Leistungsfähigkeit beim Sportler, z.B.
 - Eignung für spezifische Hochleistungssportarten
 - Vor und nach Absolvierung eventuell unterschiedlicher Trainingsprogramme
- Eignungstest in der Arbeits-, Wehr-, Flug- und Weltraummedizin
- Präventiver Untersuchungen des kardiopulmonalen Systems
- Abklärung koronarer Herzkrankheit, des arteriellen Ruhe- bzw. Belastungshochdrucks, des hyperkinetischen Syndroms
- Herzinsuffizienz unterschiedlicher Genese
- Abklärung respiratorischer Gasaustauschstörungen
 - Obstruktive oder restriktive Ventilationsstörungen
 - Distributionsstörungen
 - Diffusionsstörungen
 - Perfusionsstörungen
- Belastungsasthma
- Effektkontrolle von Medikamenten
- Prä- und postoperativen kardiopulmonalen Leistungsbeurteilung
- Leistungsbeurteilung nach längerer Bettruhe
- Belastungsdosisempfehlungen von Patienten, z.B. im Rahmen von Herzgruppen
- Prognoseabschätzung bei Patienten
- Gutachterliche Leistungsanalyse, z.B. bei versicherungsrechtlichen Fragen
- Wissenschaftliche Untersuchungen

2.2 Forschungsstand

Aufgrund der oben beschriebenen nicht eindeutigen aktuellen Meinung in der Sportwissenschaft bzw. Sportmedizin soll in diesem Kapitel der Forschungsstand zu den Ausbelastungskriterien (Kapitel 2.2.1) und dem Nachbelastungsverhalten (Kapitel 2.2.2) aufgearbeitet werden. Dies soll die Grundlage zu den Themen bzw. Fragestellungen der Datenanalyse im dritten Hauptkapitel darstellen.

2.2.1 Ausbelastungskriterien

Für den Abbruch einer physiologischen Untersuchung gelten bestimmte Kriterien. Hierbei wird in relative und absolute Abbruchkriterien unterschieden, die wiederum in subjektive Symptome und objektive Befunde eingestuft werden. Bei relativen Abbruchkriterien ist eine erhöhte Vorsicht geboten, bei der nach ärztlicher Entscheidung die Untersuchung weitergeführt werden kann. Die absoluten Kriterien führen zum definitiven Testabbruch (vgl. Steinacker, Liu & Reißnecker, 2002, S. 228). Folgende Tabelle 6 soll die Abbruchkriterien veranschaulichen.

Tabelle 6: Relative und absolute Abbruchkriterien (nach Steinacker et al. 2002)

	Relative Abbruchkriterien	Absolute Abbruchkriterien
Subjektive Symptome	<ul style="list-style-type: none"> • Leichtes Unwohlseins • leichte Angina pectoris • Atmung: leichtes Giemen und Pfeifen 	<ul style="list-style-type: none"> • Erschöpfung • Mäßig-starke und typische Angina pectoris • Starke sonstige Symptome (Dyspnoe, Schwindel, Unsicherheit)
Objektive Befunde	<ul style="list-style-type: none"> • Art. Blutdruck systolisch >230 - 260 mmHg, diastolisch > 115 mmHg • Fehlender arterieller Blutdruckanstieg oder Blutdruckabfall bei Belastung • Supraventrikuläre Tachykardien • Bradyarrhythmien • Polymorphe Extrasystolie und Salven • Leitungsstörungen (höhergradiger AV-Block, Schenkelblock) 	<ul style="list-style-type: none"> • Leistung kann nicht gehalten werden • Gehäufte Arrhythmien, Tachykardien > 30 Sekunden • Starke, typische ST-Strecken-Senkungen ($V_{4-6} > 0,3 \text{ mV}$, Extr. > 0,2 mV) • Signifikante ST-Hebungen* • Stärkerer Blutdruckabfall, evtl. mit Zeichen der Myokardischämie oder der peripheren Minderperfusion (Zyanose)

* Deutsche Gesellschaft für Kardiologie: > 0,1 mV

Bei genauerer Betrachtung können diese Kriterien hauptsächlich als medizinische, gesundheitsorientierte Risikoparameter angesehen werden, wobei keine Berücksichtigung auf Leistungsparameter gegeben ist.

Daraufhin muss jedoch das Erreichen einer körperlichen Ausbelastung beurteilt werden. In der deutschen, europäischen und angloamerikanischen Literatur gibt es verschiedene Arbeiten bzw. Richtlinien zu den Ausbelastungskriterien. Oftmals wird die VO_{2max} bzw. die Herzfrequenzformel 220-LA als ein Kriterium zur Ausbelastung herangezogen. Wie aussagekräftig jedoch diese einzelnen Kriterien sind, ist nicht wirklich geklärt bzw. es gibt keine einheitlichen Standards.

Zunächst wird im Folgenden auf den Forschungsstand spiroergometrischer Parameter, wie maximale Sauerstoffaufnahme, respiratorischer Quotient, Atemäquivalent und Atemminutenvolumen eingegangen. Anschließend wird der Forschungsstand bezüglich des metabolischen Ausbelastungskriteriums der Laktatkonzentration sowie die Herzfrequenz vorgestellt. Abschließend folgt eine Übersicht der Ausbelastungskriterien.

2.2.1.1 Maximale Sauerstoffaufnahme

Bereits 1924 fanden Hill, Long & Lupton in einer Studie mit 7 Probanden heraus, dass bei zunehmender Belastung (von 2,86 m/s bis zu 4,98 m/s) auf einer 90 Meter-Bahn im Freien die maximale Sauerstoffaufnahme in der Ausbelastung nicht weiter zunimmt: „The oxygen intake fails to exceed this value, not because more oxygen is not required, but because the limiting capacity of the circulatory-respiratory system has been attained“ (Hill et al. 1924, S.157).

Laut dem Übersichtsartikel von Howley, Bassett & Welch (1995) kommen in den 1950er und 1960er Jahren auch Åstrand (1952), Taylor, Buskirk & Henschel (1955), Mitchell, Sproule & Chapman (1958), Åstrand (1960), Issekutz, Birkhead & Rodahl (1962) sowie Cumming & Friesen (1967) zu ähnlichen Ergebnissen. Obwohl hierbei zusätzlich das Testprotokoll sowie der Grad der „Plateaubildung“ des „leveling off“ bis hin zu einem abflachendem Anstieg der Sauerstoffaufnahme in den letzten beiden Stufen in der Diskussion stand (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Beispiele der Plateaubildungskriterien bei verschiedenen Studien in den 1950er und 1960er Jahren (mod. nach Howley, Bassett & Welch, 1995, S. 1294)

Autor	Jahr	Testprotokoll	Definition der Plateaubildung
Åstrand	1952	Laufband, 1-2 km/h Steigerung, Ausbelastung in 4-6 Min	Leveling off der O ₂ -Aufnahme
Taylor, Buskirk & Henschel	1955	Laufband, 7 mph und 2,5% Steigungen, 3 Min Stufendauer	<150 ml*min ⁻¹
Mitchell, Sproule & Chapman	1958	Laufband, 6 mph und 2,5% Steigungen, 2,5 Min Stufendauer	<54 ml*min ⁻¹
Åstrand	1960	Fahrradergometer, 25 W Steigerung	<80 ml*min ⁻¹
Issekutz, Birkhead & Rodahl	1962	Fahrradergometer, 25 W Steigerung, 5 Min Stufendauer	<100 ml*min ⁻¹
Cumming & Friesen	1967	Fahrradergometer, bis Belastung nicht mehr für 3 Min gehalten werden kann	<50 ml*min ⁻¹

Ein Plateau ist jedoch auch von dem Anteil der eingesetzten Muskulatur bzw. der Belastungsform abhängig. Dazu ist ebenfalls eine hohe Motivation der Probanden, sich maximal auszubelasten, eine Voraussetzung. Ist kein „leveling off“ erkennbar, kann von VO_{2peak} gesprochen werden, also um die maximal erreichte VO₂ direkt zum Zeitpunkt des Belastungsabbruchs (vgl. Shephard & Åstrand 1993, S. 192ff). Sie definieren ein Plateau bei einem O₂-Anstieg kleiner 2 ml//kg/min. Laut Meyer & Kindermann (1999, S. 285) setzt die VO_{2max} mittels ergometrischer Bestimmung ebenfalls eine Ausbelastung voraus. Eine konstant bleibende Sauerstoffaufnahme trotz zunehmender äußerer Belastung wird als „leveling off“ bezeichnet, das jedoch häufig nicht eindeutig als solches zu erkennen ist. Auch Steinacker et al (2002) beschreiben in Ihrem Artikel die Abbruchkriterien und Ausbelastung bei der Ergometrie. Bezogen auf die VO_{2max} führen sie ebenfalls das „leveling off“ als objektives Kriterium auf ohne den Grad der Plateaubildung weiter zu bestimmen. Gleichmaßen definieren die Expertenkommission um Boldt, Berbalk, Halle, Hoffmann, Löllgen, Schmidt Trucksäß, Urhausen, Völker & Zurstegge (2002) in den Leitlinien zur Belastungsuntersuchung in der Sportmedizin die Ausbelastung bei Erreichen bzw. Überschreiten bestimmter objektiver Kriterien, wie beispielsweise die maximale Sauerstoffaufnahme mit „leveling off“. Bei Hollmann & Strüder (2009, S. 348) und Scharhag-Rosenberger (2010, S. 146f)

weist der Anstieg der VO_2 zunächst eine lineare Beziehung zur Leistung auf und erreicht im „leveling off“ einen Punkt, an dem trotz zunehmender Belastung die O_2 -Aufnahme nicht weiter zunimmt (vgl. Tabelle 10). Bei den zuletzt genannten Artikeln wird darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse hinsichtlich Leistungsstand, Geschlecht, Alter, Protokoll und Testart variieren können. Beispielsweise wird das „leveling off“-Phänomen „bei gesunden Personen überwiegend nur bei Laufbandbelastungen beobachtet“ (Hollmann & Strüder, 2009, S. 348), da bei Belastungstests auf dem Fahrradergometer die Gewebsazidose aufgrund der geringeren beanspruchten Muskelmasse zu einem vorzeitigen Belastungsabbruch führt. Nach Hottenrott (2010, S. 66ff) und Friedmann-Bette (2011, S. 10f) jedoch ist die Art des Belastungsprotokolls (Rampen- oder Stufentest) bei der Bestimmung der VO_{2max} sekundär, solange eine sportartspezifische Belastung vorliegt. Zudem sollte die Testdauer, um eine aussagekräftige VO_{2max} zu erhalten, zwischen 5-26 Minuten liegen (vgl. Midgley Bentley, Luttikholt, McNaughton & Millet, 2008).

In den oben beschriebenen Artikel wird deutlich, dass die VO_{2max} einen hohen Stellenwert in der Leistungsdiagnostik genießt, vor allem um eine Ausbelastung zu beurteilen. Es wurde aber auch deutlich, dass eine VO_{2max} nicht eindeutig zu erkennen ist (Fehlen eines Plateaus) und deshalb von einem VO_{2peak} gesprochen werden müsste.

In den letzten 15 Jahren kamen viele weitere Artikel hinzu, die zu dem „leveling off“ Phänomen als Ausbelastungskriterium Stellung nehmen. Als objektive Ausbelastungskriterien werden u.a. aus den Daten von Duncan, Howley & Johnson (1997, S. 273) bei Untersuchungen auf dem Laufbandergometer (Rampen- und Stufentest) das „leveling off“ mit einem O_2 -Anstieg von <150 ml/min bei 50 bzw. 60 % der 10 männlichen Probanden im Alter von \bar{O} 24,1 Jahren angegeben (vgl. Tabelle 9). Laut Untersuchungen von Schmidt (2011, S. 35) erreichten in einem Stufentest mit dem Protokoll 100-20-3 (100 Watt Anfangsbelastung – 20 Watt Steigerung – 3 Minuten Stufendauer) auf dem Fahrradergometer 92 % der 24 getesteten Probanden (männlich, Alter \bar{O} 23,6 Jahre, Straßen-Rennrad Fahrer) ein „leveling off“. In einem vergleichenden Rampentest erreichten 58 % das „leveling off“ mit einem maximalen Anstieg der VO_2 von 150 ml in der letzten Minute. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen Poole, Wilkerson & Jones (2008, S. 406), wobei bei einem

Rampentest auf dem Fahrradergometer mit 8 Probanden (♂ im Alter von Ø 27 Jahren) 62,5 % ein „leveling off“ erreichen. Midgley, Carroll, Marchant, McNaughton & Siegler (2009, S. 116) untersuchten ebenfalls anhand eines Rampentest 10 Probanden auf dem Fahrradergometer (♂ im Alter Ø 36,0 Jahre) und 10 Probanden auf dem Laufbandergometer (♂ im Alter Ø 39,3 Jahre). 80 bzw. 70 % erreichten ein „leveling off“ mit einem Anstieg der VO_2 von 150 ml in der letzten Minute. Auf dem Laufbandergometer fanden Scharhag-Rosenberger, Carlsohn, Cassel, Mayer & Scharhag (2011, S. 156) heraus, dass von 40 Probanden (20♂, 20♀ im Alter zwischen 18 und 35 Jahren) nur 30 % bei einem Stufentest mit dem Protokoll 6/8-2-3 (6 bzw. 8 km/h Anfangsbelastung – 2 km/h Steigerung - 3 Minuten Stufendauer) ein „leveling off“ erreichen.

Zusammenfassend wird das beschriebene „leveling off“-Phänomen als ein wichtiges Merkmal zur Beurteilung der VO_{2max} angesehen und stellt somit ein Ausbelastungskriterium dar. Grundsätzlich wird von einem „leveling off“ gesprochen, wenn ein maximaler Anstieg der VO_2 von 150 ml in der letzten Minute nicht überschritten wird. Ist bei einem Ausbelastungstest ein solches Phänomen nicht zu beobachten, kann auch ein VO_{2peak} vorliegen. Ein „leveling off“ ist nicht ein zwingendes Ergebnis eines Ausbelastungstest. In der Literatur gibt es verschiedene Sichtweisen, welche weiteren Kriterien genau erfüllt sein müssen, damit von einer tatsächlichen oder zumindest einer annähernden VO_{2max} gesprochen werden kann. Deshalb sei es wichtig weitere Parameter (sekundäre Kriterien) zu berücksichtigen.

2.2.1.2 Respiratorischer Quotient

Hill et al. (1924) kommen in ihrer oben beschriebenen Untersuchung auf maximale RQ-Werte von 1,14. Robinson (1938) untersuchte anhand eines Ausbelastungstests (bis zu 5 Minuten Maximalbelastung) auf einem motorbetriebenen Laufband verschiedene Altersgruppen zwischen 10 und 75 Jahren. Pro Altersdekade standen etwa 10 männliche Probanden zur Verfügung. Der gemessene RQ-Bereich in der Altersgruppe 10-17 Jahren lag zwischen 1,11 und 1,12. In der Altersgruppe von 24-52 Jahren variierte der RQ zwischen 1,17 und 1,27. Im höheren Alter zwischen 63 und 75 Jahren erreichten die Probanden einen RQ im Bereich von 0,94 und 1,09. In der Studie von Isse-

kutz et al. (1962) erreichten die Probanden auf dem Fahrradergometer bei einer Stufendauer von 5 Minuten bis zur Ausbelastung einen RQ-Wert von 1,15 unabhängig von Geschlecht und Alter (über 20 Jahre). Ähnliche Ergebnisse fanden auch Aitken & Thompson (1988) auf dem Laufbandergometer bei einer Stufendauer von 5 Minuten bis zur Ausbelastung heraus. Über 60 jährige untrainierte Personen hatten einen RQ von 1,11. Junge untrainierte sowie Ausdauertrainierte erreichten einen Wert von 1,16. Mannschaftsspieler und Kraftsportler lagen mit entsprechenden Werten von 1,15 bzw. 1,14 dazwischen. Studien von Cumming & Borysyk (1972) über männliche Erwachsene (40-65 Jahre) zeigen, dass nur 54 % einen RQ von 1,12 erreichten. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch Sidney & Shephard (1977). Hierbei kommen 37 % der Männer und nur 20 % der Frauen im Alter zwischen 60 und 83 Jahren auf einen RQ von 1,15 oder höher. Shephard et al. (1969) untersuchten 11-13 jährige Mädchen und Jungen mit dem Ergebnis von jeweils einem RQ von 1,08 in der Ausbelastung. Im Gegensatz dazu erhielten Cunningham, Waterschoot, Paterson, Lefcoe & Sangal (1977) bei Jungen im Alter von 10 Jahren als Ergebnis auf dem Laufbandergometer (Stufenloses Protokoll) RQ-Werte unter 1,00, trotz Plateaubildung der VO_{2max} . Laut Dickhuth et al. (2011, S. 231) und Boldt et al. (2002) kann im Allgemeinen bereits bei RQ-Werten von $\geq 1,0$ bzw. zwischen 1,05 bis 1,10 von einer Ausbelastung gesprochen werden, wenn auch andere objektive Ausbelastungskriterien erreicht wurden (vgl. Tabelle 9). Meyer & Kindermann (1999, S. 286) sowie Steinacker et al. (2002, S. 229) setzen diesen Bereich mit $>1,10$ etwas höher an. Meyer (2003, S. 29) erläutert in seinem Artikel das Verhalten des RQ in der Ausbelastung. Er führt auf, dass Maximalwerte eng mit der (Laktat-) Azidosetoleranz zusammenhängen. Demnach erreichen gut anaerob trainierte Sportler neben hohen maximalen Blutlaktatkonzentrationen auch hohe maximale RQ-Werte mit deutlich über 1,15. Im Gegensatz dazu kommen ausdauerorientierte Sportler aufgrund des oft umfangreichen aeroben Trainings und dadurch häufig niedrigeren Azidosetoleranzen auf Werte von $>1,05$, Untrainierte bzw. unspezifisch Trainierte wiederum auf $>1,10$. Bei Herzpatienten wurden selten höhere Werte als 1,0 ermittelt, selbst bei Belastungsabbruch ohne kardiale Symptomatik. Poole et al. (2008, S. 406) sowie Schmidt (2011, S. 31) kommen jeweils in Ihren Studien zu ähnlichen Ergebnisse der RQ-

Werte in Bezug auf einen Rampentest auf dem Fahrradergometer. Die Probanden erreichten bei Poole et al. RQ-Werte von 1,21, bei Schmidt 1,24 bzw. 1,11 bei zusätzlicher Untersuchung eines Stufentests. Dies deckt sich mit den Forschungsarbeiten von Midgley et al. (2009, S. 116), die RQ Werte von 1,23 aufweisen können. Auf dem Laufbandergometer ermitteln die Autoren anhand eines Rampentests einen durchschnittlichen RQ-Wert von 1,16. Untersuchungen auf dem Laufbandergometer von Duncan et al. (1997, S. 273) und Scharhag-Rosenberger et al. (2011, S. 156) präsentieren unterschiedliche RQ-Werte. Bei Ausbelastung des Rampen bzw. Stufentests von Duncan et al. weisen die Probanden einen RQ-Wert von 1,22 bzw. 1,28 auf. Bei Scharhag-Rosenberger et al. wird ein Wert von 1,06 erreicht; nur 20 % der Probanden liegen hierbei über einen RQ von 1,1.

Der RQ-Wert ist ebenfalls ein wichtiges objektives Ausbelastungskriterium. Generell wird in der Literatur bei einem RQ von $>1,1$ von Ausbelastung gesprochen. Dies solle jedoch im Einzelfall genauer betrachtet werden, da beim RQ das Alter (Kinder – Jugendliche/Erwachsene – Senioren), die Leistungsfähigkeit (Reha-/Herzpatienten – Untrainiert – Trainiert/Leistungssportler), die Belastungsart (Fahrrad- bzw. Laufbandergometer) und die dazugehörigen Protokolle sowie die Art des Trainingszustandes (aerob – anaerob) eine Rolle spielen.

2.2.1.3 Atemäquivalent

Ein weiteres Ausbelastungskriterium ist das AÄ. Für das AÄ scheint es in der Literatur eine einheitliche Sichtweise zu geben. Hollmann & Strüder (2009, S. 348), die u.a. auf die Daten von Kirchhoff et al. (1956) zurückgreifen sowie Boldt et al. (2002) und Steinacker et al. (2002, S. 229) definieren einen AÄ von $>30-35$ als einen Wert der Ausbelastung. Die Ergebnisse der Studie von Schmidt (2011, S. 31) auf dem Fahrradergometer fallen mit AÄ-Werten von 32,22 im Rampentest und 33,27 im Stufentest genau in diesen Bereich. Meyer & Kindermann (1999, S. 286) setzen diesen Wert mit >35 etwas höher an.

Der AÄ ist ein Indikator für den Wirkungsgrad, die Effektivität bzw. Ökonomie der Atmung. Deswegen lässt sich anhand des AÄ der Grad der Ausbelastung gut bestimmen. In der Literatur gibt es momentan noch wenig veröffentlichtes

bzw. schwer zugängliches Datenmaterial. Die vorhandenen Artikel stimmen mit einem $\dot{V}O_2$ -Wert von >30-35 in der Ausbelastung überein. Aufgrund der relativ geringen Datenlage sollte der $\dot{V}O_2$ jedoch als zusätzliches sekundäres Kriterium gesehen werden.

2.2.1.4 Atemminutenvolumen

Das VE ist kein übliches Ausbelastungskriterium, kann jedoch als solches hinzugezogen werden. Schon Hill et al. (1924) ermittelte VE-Werte in der Ausbelastung auf einer 90 Meter-Bahn im Freien von 94,5 l/min. Untersuchungen von Duncan et al. (1997, S. 273) auf dem Laufbandergometer mit 150,7 l/min beim Stufentest und 149,5 l/min beim Rampentest sowie von Schmidt (2011, S. 31) auf dem Fahrradergometer mit 143,9 l/min beim Stufentest und 146,4 beim Rampentest weisen ähnlich hohe Werte auf. Dem gegenüber stehen die Ergebnisse von Hollmann & Strüder (2009, S. 348) auf dem Fahrradergometer und Scharhag-Rosenberger et al. (2011, S. 157) auf dem Laufbandergometer mit niedrigeren Werten von ~75 l/min (♀) und ~100 l/min (♂) bzw. von 115 l/min.

Ähnlich wie beim $\dot{V}O_2$ gibt es zum VE momentan noch wenig zugängliche Literatur. Das VE ist von Geschlecht, Alter, Trainingszustand, Art und Intensität der Belastung bestimmt und variiert in der Ausbelastung (aufgrund der geringen Datenlage) zwischen 75-150 l/min. Deswegen ist dieser Ausbelastungsparameter eher zu vernachlässigen bzw. kann als zusätzliches Kriterium hinzugenommen werden.

2.2.1.5 Laktatkonzentration

Neben der $\dot{V}O_{2max}$ wird häufig die Laktatkonzentration als objektives Ausbelastungskriterium herangezogen. Meyer & Kindermann (1999, S. 286), Steinacker et al. (2002, S. 229) sowie Hollmann & Strüder (2009, S. 348) empfehlen aus ihren Untersuchungen Maximalwerte zur Bestimmung der Ausbelastung von >8-10 mmol/l. Dickhuth et al. (2011, S. 231) legen sich auf Laktat-Werte von ≥ 9 mmol/l fest (vgl. Tabelle 9).

Im Vergleich dazu erreichten laut dem Übersichtsartikel von Howley et al. (1995, S. 1297f) bei Studien von Robinson (1938) die Altersgruppe der 10-17 jährigen männlichen Probanden La_{max} -Werte von 5,7-7,4 mmol/l, die Alters-

gruppe der 24-52 jährigen Werte von 8,2-10,0 mmol/l und die 63 jährigen La_{max} -Werte von 6,5 mmol/l. Ähnlich niedrige Werte von 4,9-6,5 mmol/l bei 10 jährigen Jungen fand Cunningham et al. (1977) heraus. Dies zeigte sich bei Untersuchungen von Åstrand (1952) nur bei den 4-6 jährigen Jungen, die mit einem Laktatwert von 6,3 mmol/l ebenfalls in dem Bereich liegen. Die Altersgruppe der 7-15 jährigen jedoch kommt auf Werte zwischen 8,9-10,2 mmol/l. Auch bei Shephard et al. (1969) erreichen die 11-13 jährigen Mädchen und Jungen Werte von 8,7 bzw. 8,8 mmol/l. Bei Untersuchungen mit Erwachsenen kommen Åstrand et al. (1959) und Cumming & Borysyk (1972) zu dem Ergebnis, dass 89 % bzw. 78 % der Probanden Laktatwerte über 7,9 bzw. 8,0 mmol/l erreichen. Bei Senioren (60-83 Jahre) messen Sidney & Shephard (1977) in der Ausbelastung bei 79 % der Männer und bei 75 % der Frauen jeweils Werte von 8,8 mmol/l oder höher. Braumann, Busse & Maassen (1987) untersuchten 8 Probanden auf dem Fahrradergometer mit dem Protokoll 50-16,6-1. Zu Belastungsende erreichten die Probanden maximale Laktatkonzentrationen von 10,7 mmol/l. Im gleichen Jahr erforschte die Arbeitsgruppe, erweitert um König, 9 Probanden anhand eines Maximaltest, ebenfalls auf dem Fahrradergometer, die maximale Laktatkonzentration. Das Ergebnis ist mit 13,9 mmol/l deutlich höher, als bei dem oben beschriebenen Stufentest. Im Gegensatz dazu stehen die Resultate des Rampentests von Poole et al. (2008, S. 406) mit eindeutig niedrigeren Werten von 7,1 mmol/l. Die Ergebnisse von Schmidt (2011, S. 31) mit La_{max} -Werte von 10,3 bzw. 10,8 mmol/l (Stufen- bzw. Rampentest) und Midgley et al. (2009, S. 116) mit durchschnittlichen maximalen Laktatwerten im Rampentest von 11,5 mmol/l zeigen wieder deutlich höhere Werte auf. Bei ihren Laufbanduntersuchungen (Stufen- bzw. Rampentest) ermitteln Duncan et al. (1997, S. 273) Laktatwerte von 14,3 bzw. 11,9 mmol/l. Deutlich niedrigere Werte zeigen die Forschungsergebnissen von Midgley et al. (2009, S. 116) mit 8,3 mmol/l beim Rampentest und die Ergebnisse der Laktatkonzentration des Stufentests von Scharhag-Rosenberger et al. (2011, S. 157) mit durchschnittlich 8,96 mmol/l.

Insgesamt wird die maximale Laktatkonzentration zum Zeitpunkt der Ausbelastung in der Literatur kontrovers beschrieben. Einerseits wird von einer

Ausbelastung bei Laktatwerten von $>8-10$ mmol/l ausgegangen und der Großteil der Datenlage bestätigt dies. Jedoch zeigen sich andererseits Studien, bei denen diese Werte nicht erreicht werden konnten. Wie beim RQ spielen auch bei der Laktatkonzentrationen das Alter (Kinder – Jugendliche/Erwachsene – Senioren), die Leistungsfähigkeit (Reha-/Herzpatienten – Untrainiert – Trainiert/Leistungssportler), die Belastungsart (Fahrrad- bzw. Laufbandergometer) und die dazugehörigen Protokolle sowie die Art des Trainingszustandes (aerob – anaerob) und die Ernährung eine Rolle.

2.2.1.6 Herzfrequenz

Die Herzfrequenz ist im Gegensatz zu der VO_{2max} oder der Laktatkonzentration sehr einfach zu bestimmen. Aus diesem Grund wurden Schätzformeln, die die Trainingsherzfrequenz oder die Hf_{max} betreffen entwickelt (vgl. Kapitel 2.1.1.2). Im deutschsprachigen Raum hat sich vor allem die Formel $Hf_{max}=220-LA$ durchgesetzt. Jedoch ist es nicht wirklich nachzuvollziehen, woher diese Formel stammt. Robergs & Landwehr (2002) versuchten der Formel auf die Spur zu kommen. Dabei stießen sie auf Untersuchungen von Robinson (1938, S. 265), bei denen die Altersgruppe 10-17 Jahren bei einem Ausbelastungstest eine maximale Herzfrequenz zwischen 175 und 206 Schlägen pro Minute (S/min) erreichten. In der Altersgruppe von 24-52 Jahren variierte die Hf_{max} zwischen 172 und 193 S/min. Im höheren Alter zwischen 63 und 75 Jahren erreichten die Probanden eine Hf_{max} im Bereich von 144 und 169 S/min. Aus den Daten von Robinson ergibt sich die Formel von $Hf_{max}=212$ minus $0,77$ Lebensalter (LA). Bei Åstrand (1952) errechneten Robergs & Landwehr von 225 Probanden (115 männlich und 110 weiblich) auf dem Laufband und Fahrradergometer die Formel $Hf_{max}=216,6-0,84 LA$. Schließlich recherchierten Robergs & Landwehr, dass Fox et al. (1971) aus einem Review von 35 Untersuchungen Regressionsgleichungen ermittelte, die sich um die Gerade der Formel $Hf_{max}=220-LA$, d.h. 1 Schlag pro Minute pro Jahr, befanden. Robergs & Landwehr listeten alle ihnen bekannten Studien zur Formel der maximalen Herzfrequenz auf (vgl. Tabelle 8). Je niedriger die Steigung der Regressionsgleichung, desto höher liegt die errechnete Hf_{max} im Alter. Auf eine Alterskorrektur wurde hierbei nicht eingegangen. Sie

selbst kommen zu der Schlussfolgerung, dass es keine akzeptable Methode zur Einschätzung der maximalen Herzfrequenz gibt.

Tabelle 8: Studien zur Bestimmung der maximalen Herzfrequenz anhand von Regressionsgleichungen, alphabetisch sortiert nach Autor (mod. nach Robergs & Landwehr 2002)

Autor	Jahr	N	Probanden	MW Alter (range)	Regression ($Hf_{max=}$)
Åstrand in Froelicher	2000	100	m, gesund, Fahrrad	50 (20-69)	211-0,92 LA
Brick in Froelicher	2000		w		226-LA
Bruce	1974	1295	CHD	52±8	204-1,07 LA
Bruce	1974	2091	m, gesund	44±8	210-0,66 LA
Bruce	1974	1295	Hypertonie	52±8	204-1,07 LA
Bruce	1974	2091	Hypertonie+CHD	44±8	210-0,66 LA
Cooper in Froelicher	2000	2535	m, gesund	43 (11-79)	217-0,84 LA
Ellestad in Froelicher	2000	2583	m, gesund	42 (10-60)	197-0,56 LA
Fernhall	2001	276	Geistig zurück	(9-46)	189-0,56 LA
Fernhall	2001	296	m, w gesund		205-0,64 LA
Froelicher	2000	1317	m, gesund	38,8 (28-54)	207-0,64 LA
Graettinger	1995	114	m, gesund	(19-73)	199-0,63 LA
Hammond	1983	156	Herzkrank	53,9	209-LA
Hossack	1982	104	w, gesund	(20-70)	206-0,6 LA
Hossack	1982	98	m, gesund	(20-73)	227-1,07 LA
Inbar	1994	1424	m, w gesund	46,7 (20-70)	205,8-0,68 LA
Jones	1985	100	m, w gesund, Fahrrad	(15-71)	202-0,72 LA
Jones	1985		m, w gesund		210-0,65 LA
Jones	1985	60	w, gesund	(20-49)	201-0,63 LA
Lester	1968	48	m, w trainiert		205-0,41 LA
Lester	1968	148	m, w untrainiert	43 (15-75)	198-0,41 LA
Londeree	1982		Nationale Kader Athleten		206,3-0,71 LA
Miller	1993	89	m, w überge- wichtig	42	200-0,48 LA
Morris in Froelicher	2000	1388	Herzkrank	57 (21-89)	196-0,9 LA
Morris in Froelicher	2000	244	m, gesund	45 (20-72)	200-0,72 LA
Ricard	1990	193	m, w Laufband		209-0,59 LA
Ricard	1990	193	m, w Fahrrad		200-0,69 LA
Robinson 1938 in Froelicher	2000	92	m, gesund	30 (6-76)	212-0,77 LA
Rodeheffer	1984	61	m, gesund	(25-79)	214-1,02 LA
Schiller	2001	53	w, hispanic	46 (20-75)	213,7-0,75 LA
Schiller	2001	93	w, kaukasisch	42 (20-75)	207-0,62 LA
Sheffield	1978	95	w	39 (19-69)	216-0,88 LA
Tanaka	1991		Sitzend m, w		211-0,8 LA
Tanaka	1991		Aktiv m, w		207-0,7 LA
Tanaka	1991		Ausdauertrainiert m, w		206-0,7 LA
Tanaka	1991		m, w		208-0,7 LA

Whaley	1992	754	w	41,3 (14-77)	209-0,7 LA
Whaley	1992	1256	m	42,1 (14-77)	214-0,8 LA

Laut Israel (1975, S. 372) hängt die Hf_{max} zusätzlich von der Art der Belastung ab, da durch den Einsatz verschiedener lokaler Muskelgruppen eine andere muskuläre Beanspruchung stattfindet, die die Herzfrequenz beeinflusst. Israel (1982, S. 66) weist deshalb auch darauf hin, dass im Einzelfall beträchtliche Abweichungen möglich sind. In seinen eigenen Untersuchungen kommt er auf eine Regressionsgleichung von 220-0,48 LA für Männer und 220-0,60 für Frauen (Israel 1982, S. 82). Also nur die Hälfte dessen was mit der Formel 220-LA berechnet wird (vgl. Schmidt & Israel 1983, S.159). Auch bei Duncan et al. (1997, S. 276) erreichen nur 10 % beim Stufentest und 40% beim Rampentest auf dem Laufbandergometer eine Herzfrequenz nach der Formel 220-LA. Meyer & Kindermann (1999, S. 286) nennen als Anhaltspunkt des Ausbelastungsgrades die im Test erreichte höchste Herzfrequenz anhand der Faustformel 220-LA auf dem Laufband- und 200-LA auf dem Fahrradergometer. Steinacker et al. (2002, S. 229) sehen die Faustformel mit 220-LA auf dem Laufband- und 210-LA auf dem Fahrradergometer nur als eine Richtgröße an, nicht jedoch als Abbruchkriterium. Auch bei der Herzfrequenz könne das „leveling off“ der Herzfrequenz als objektiver Parameter genutzt werden. Die Hf_{max} nimmt mit zunehmenden Alter ab, so Löllgen (2005, S. 23). Mit der Faustregel zur Berechnung der maximalen Herzfrequenz 220-LA greift er die Altersabhängigkeit wieder auf und liefert einen Überblick verschiedener Studien, die u.a. auch von Robergs & Landwehr bearbeitet wurden (siehe Abbildung 2). Auch Löllgen (2005, S. 25) kommt zu dem Schluss, dass die Formel 220-LA lediglich ein grober Richtwert ist, der auf gar keinen Fall überbewertet werden darf, da die realen Werte einer sehr großen Streuung unterliegen.

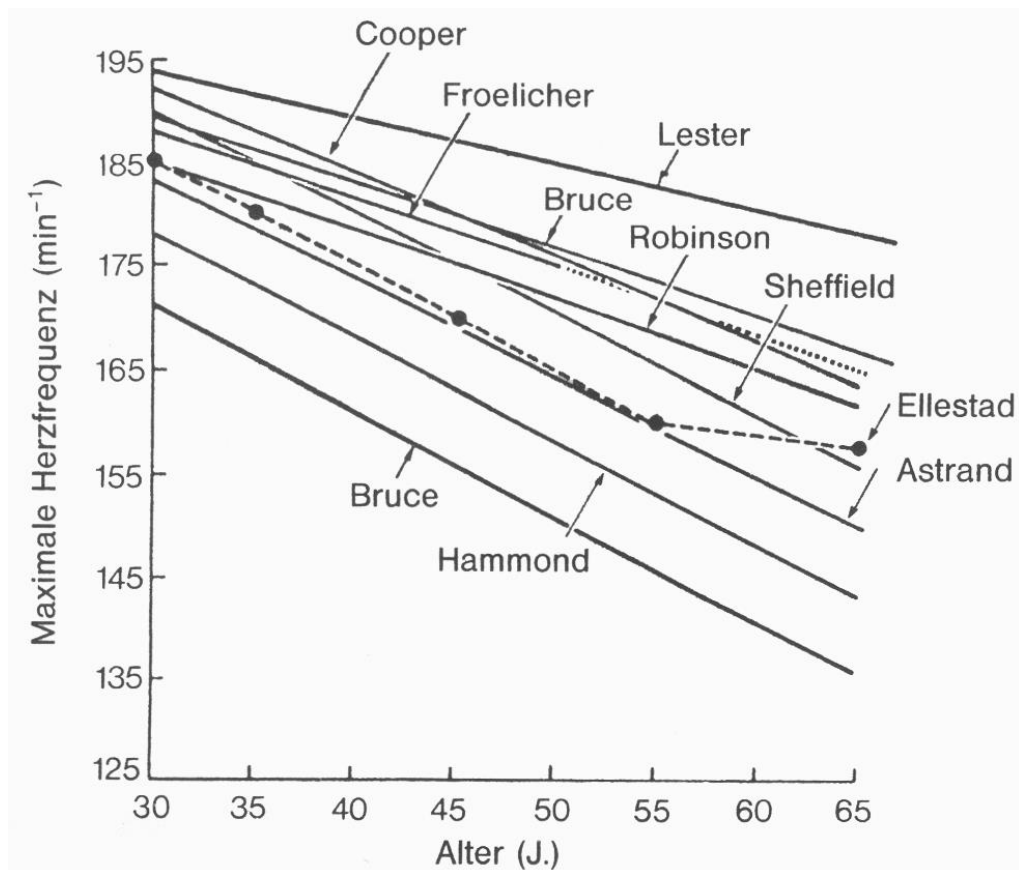


Abbildung 2: Altersabhängigkeit der maximalen Herzfrequenz verschiedener Studien (nach Löllgen 2005, S. 24)

Bei ihren Untersuchungen (Rampentest auf dem Fahrradergometer) erreichten bei Poole et al. (2008, S. 406) von 8 Probanden (Alter $\bar{\Delta}$ 27 Jahre, $Hf_{\max}=182 \pm 4$ S/min) 3 nicht das Kriterium $220-LA \pm 10$ S/min. Nach Midgley et al. (2009) waren es 8 von 20 Probanden (männlich, Alter $\bar{\Delta}$ 37,6 Jahre, 10 Läufer, 10 Radfahrer), die das Kriterium nicht erfüllen konnten ($Hf_{\max}=180 \pm 4$ S/min). Zu ähnlichen Ergebnissen auf dem Fahrradergometer kommt Schmidt (2011, S.39). Demnach erreichen die Probanden (Alter $\bar{\Delta}$ 23,6 Jahre) Hf_{\max} -Werte von 184,5 S/min beim Rampentest und 189,6 S/min beim Stufentest. Auf dem Laufbandergometer kommen die Probanden (20♂, 20♀ im Alter zwischen 18 und 35 Jahren) von Scharhag-Rosenberger et al. (2011, S. 157) auf 192 S/min.

Die Herzfrequenz gehört zu den wichtigsten objektiven Ausbelastungskriterien, da sie relativ leicht zu ermitteln ist und bei den meisten Untersuchungen mit erhoben wird. Generell wird in der Literatur zur Bestimmung der Ausbelastung die Faustregel 220 minus Lebensalter für das Laufbandergometer

und 210 bzw. 200 minus Lebensalter für das Fahrradergometer verwendet. Aufgrund von individueller Gegebenheiten wie Alter (Kinder – Jugendliche/Erwachsene – Senioren), die Leistungsfähigkeit (Reha-/Herzpatienten – Untrainiert – Trainiert/Leistungssportler), die Belastungsart (Fahrrad- bzw. Laufbandergometer) und die dazugehörigen Protokolle sowie die Art des Trainingszustandes (aerob – anaerob) sollte diese Formel nur als Richtwert herangezogen werden. Insgesamt kommen die Autoren zu dem Schluss, dass die maximale Herzfrequenz für die allgemeine Population schwer zu bestimmen sei.

2.2.1.7 Zusammenfassende Betrachtung der Ausbelastungskriterien

Die Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit erfolgt in der Regel an Kenngrößen wie der maximalen Sauerstoffaufnahme oder der maximalen Herzfrequenz. Dabei kann es zu extremen Fehleinschätzungen kommen, wenn von „falschen“ Werten ausgegangen wird. Deshalb lautet die zentrale Frage, ob es sich tatsächlich um Maximalwerte handelt, d.h. es gilt zu klären, ob eine Ausbelastung erzielt wurde oder nicht.

Laut Poole et al. (2008, S. 409) und Midgley et al. (2009, S. 115ff) sind traditionelle Kriterien nur bedingt gültig, da sie erheblich von inkrementeller Belastungstestdauer, Bewegungsmodalität und interindividuellen Unterschieden der maximal erreichbaren Werte jedes einzelnen Kriteriums beeinflussbar sind. Beispielsweise erreicht ein Proband bei Poole et al. ein VO_2 -Plateau, einen $\text{RQ} \geq 1,10-1,15$, eine $\text{Hf}_{\text{max}}=220-\text{LA} \pm 10 \text{ S/min}$, aber einen niedrigeren Laktatwert von $\text{La}_{\text{max}} \leq 8 \text{ mmol/l}$. Ein anderer Proband wiederum kann ein „leveling-off“ aufweisen, erreicht aber kein anderes Ausbelastungskriterium. Dem gegenüber steht ein Proband mit allen erfüllten Kriterien, nur fehlt ihm ein „leveling off“ bei der VO_2 . Meyer & Kindermann halten fest, dass zur Beurteilung einer Ausbelastung „oftmals nur eine kombinierte Betrachtung sämtlicher Kriterien eine befriedigende Lösung“ (1999, S. 286) darstellt. Es gäbe dennoch keine genaue Aussage, welche Kombination als gesichert gilt. Da keine eindeutigen Standards existieren sollte unter anderem der Umgang mit der Problematik der $\text{VO}_{2\text{max}}$ vs. $\text{VO}_{2\text{peak}}$ geklärt werden. In folgender Tabelle 9 werden zusammenfassend Studien bzw. Empfehlungen zu den objektiven Ausbelastungskriterien der oben beschriebenen Parameter aufgeführt.

Tabelle 9: Zusammenfassung der objektiven Ausbelastungskriterien nach Autoren und Jahr der Veröffentlichung (der letzten 15 Jahre)

Autor	Jahr	VO ₂ [l/min]	RQ	AÄ	VE [l/min]	Laktat [mmol/l]	Hf [S/min]
Duncan et al.** Laufband (♂, n=10) Stufentest Rampentest	1997	Leveling off O ₂ -Anstieg <150 ml/min (ST=60%, RT=50%) 4,3 (abs.) 4,2 (abs.)	1,28 1,22		150,7 149,5	14,3 11,9	Erreichen von 220-LA 10% 40%
Meyer & Kinder- mann*	1999	Leveling off O ₂ -Anstieg <150 ml/min	> 1,1	>35		8-10	220-LA (Laufband) 200-LA (Fahrrad)
Hollmann & Hettin- ger* Hollmann & Strüder*	2000 2009	Leveling off		>30-35	♂~100 ♀~75	>8-10	190
Boldt et al.*	2002	Leveling off	1,05- 1,11	>30-35			
Steinacker et al.*	2002	Leveling off	> 1,1	>30-35		Sportler 8-10 Patienten > 5	220-LA (Laufband) 210-LA (Fahrrad) Besser Leveling off
De Marées*	2003	Leveling off	≥ 1,1	≥ 30		≥ 8	210-LA (Laufband) 200-LA (Fahrrad)
Poole et al.** Fahrrad (♂, n=8) Rampentest	2008	Leveling off (62,5%) 4,03 (abs.)	1,21			7,1	182
Midgley et al.** Rampentest Fahrrad (♂, n=10) Laufband (♂, n=10)	2009	Leveling off O ₂ -Anstieg <150 ml/min (F=80%, L=70%) 4,05 (abs.) 3,86 (abs.)	1,23 1,16			11,5 8,3	183 177
Dickhuth et al.*	2011		≥ 1,0			≥ 5 (mind.) ≥ 9 (si- cher)	
Scharhag-Rosen- berger et al.** Laufband (♀♂, n=40) Stufentest	2011	Leveling off (30%) 3,82	1,06		115,0	8,96	192
Schmidt** Fahrrad (♂, n=24) Stufentest Rampentest	2011	Leveling off (ST=92%, RT=58%) 4,23 (abs.) 4,44 (abs.)	1,11 1,24	33,27 32,22	143,9 146,4	10,31 10,80	189,6 184,5

* Empfehlungen

** Grenzwerte

Bei der recherchierten Literatur handelt es sich um Artikel bzw. Studien, die sich mit der Thematik der Ausbelastung auseinandersetzen. Die dabei beschriebenen Grenzwerte werden in der Datenanalyse mit den eigenen Ergebnissen verglichen. Hierbei ist jedoch die kleine Stichprobe sowie die Untersuchung an nur männlichen Probanden vor allem bei Duncan et al. (1997), Poole et al. (2008), Midgley et al. (2009) und Schmidt (2011) zu berücksichtigen. Die Empfehlungen von Ausbelastungskriterien in der Literatur dienen zusätzlich als Richtwert zur Einstufung der eigenen ermittelten Daten. Bei diesen Artikeln ist teilweise die Herkunft der Daten unklar (vgl. u.a. Boldt et al., 2002, Steinacker et al., 2002 sowie Dickhuth et al., 2011), bzw. die verwendeten Daten stammen aus Untersuchungen (vgl. u.a. Meyer & Kindermann, 1999), die über 20 Jahre zurückliegen. Zudem wird, außer bei der Herzfrequenz, keine Unterscheidung hinsichtlich der Belastungsart (Laufband- bzw. Fahrradergometer) vorgenommen.

2.2.2 Nachbelastungsverhalten

In oben beschriebenem Kapitel 2.2.1 wurde der Literaturstand der Ausbelastungskriterien erläutert und festgestellt, dass ein einziger Parameter, wie die VO_{2max} (vor allem wenn nicht geklärt ist, ob überhaupt eine VO_{2max} erreicht ist oder ein VO_{2peak} vorherrscht) nicht wirklich eine maximale Ausbelastung beschreiben kann. Diese Ausbelastungskriterien stellen jedoch die Grundlage dar, um genaue Aussagen über das Nachbelastungsverhalten treffen zu können. Die Analyse des Nachbelastungsverhaltens erfolgt aus verschiedenen Gründen (Unterschied von aktiver und passiver Erholung, das Tragen von Kompressionsstrümpfen, Beurteilung von Patienten mit kardiologischen Erkrankungen, etc.). Dieses Kapitel soll zunächst theoretisch einen Überblick über die verwendeten Parameter und deren Verhalten geben.

2.2.2.1 Spiroergometrische Parameter

Royce (1969, S. 1ff) untersuchte anhand von 13 männlichen ausdauertrainierten Studenten (Alter 18-23 Jahre) den Unterschied einer 18 minütigen aktiven (keinen Widerstand mit 50 RPM) bzw. passiven (mit hochgelegten Beinen) Erholung nach einer maximalen Fahrradergometrie. Grundsätzlich findet der Großteil beider Erholungsarten unmittelbar nach Belastungsab-

bruch statt. Die Ausgangswerte werden bis zur 18. Erholungsminute nicht wieder erreicht, wobei der RQ unmittelbar nach Belastungsabbruch erst stark ansteigt, während die VO_2 -Aufnahme und die CO_2 -Abgabe (langsamer) kontinuierlich absinken. Die Unterschiede zeigen sich nach der 30.-45. Sekunde der Erholung bei der Herzfrequenz, VO_2 und VCO_2 , wobei bei passiver Erholung durchweg niedrigere Werte (ohne Angabe von Zahlen oder Prozentwerten) erreicht werden.

Dass sich das Erholungsverhalten durch einen verbesserten Trainingszustand verändert, fanden Hagberg, Hickson, Ehsani & Holloszy (1980, S.218ff) heraus. Aufgrund eines neunwöchigen Ausdauertrainings verbesserten die 8 teilnehmenden Probanden ihre VO_{2max} um 24 %. Nach einer zehnmütigen Belastung auf dem Fahrradergometer von 50 % der alten und neuen VO_{2max} sowie einer weiteren Einheit bei 70 % der VO_{2max} mit 60 Umdrehungen pro Minute beobachteten sie in den anschließenden zehn Minuten nach Belastungsabbruch, die Phase des Absinkens der Parameter VO_2 , VCO_2 , VE und der Hf auf 90 %, 70 % und 50 % der vorher maximal erreichten Werte. Bei allen Parametern konnte nach einem verbesserten Trainingszustand ein schnellerer Abfall in der Erholung festgestellt werden, der aus der geringeren O_2 -Schuld resultiere.

Das Verhalten der spiroergometrischen Parameter bei 8 trainierten Frauen (Alter $\bar{\emptyset}$ 30,2 Jahre) untersuchten Quinn, Vroman & Kertzer (1994, S. 908ff) in einer 3-stündigen Erholung nach einer konstanten Walkingbelastung auf dem Laufband in Abhängigkeit der Dauer (20, 40 und 60 Minuten). Dabei stellten sie fest, dass die VO_2 zu jedem Zeitpunkt der Nachbelastung über dem Vorstartwert lag, jedoch nach längerer Belastung in fast doppelt so hohen Werten resultierte. Short & Sedlock (1997, S. 153ff) untersuchten 12 trainierte und 10 untrainierte Probanden ($\bar{\emptyset}$ im Alter von $\bar{\emptyset}$ 23 Jahren), ob Training eine Auswirkung auf die überschüssige Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung und die anfängliche Nachbelastungsrate hat. Nach 30-minütigem Fahrradfahren bei 70 % der VO_{2max} sowie bei einer Sauerstoffaufnahme von 1,5 l/min wurde das Verhalten der VO_2 für 60 Minuten bei stillem Sitzen beobachtet. Bezüglich des überschüssigen VO_2 nach Belastungsabbruch ließen sich bei trainierten Probanden eine kürzere Dauer und eine schnellere Erholungsrate feststellen. Dabei hatte die Belastungsintensität

einen Einfluss auf die Größenordnung und Dauer der Erholung der VO_2 , des RQ und der Herzfrequenz. Insgesamt stellten die Autoren fest, dass ein aerobes Training eine metabolische Anpassung zur effizienteren Energieausnutzung in der Erholungsphase nach Belastung beeinflusst.

Deschenes, Hillard, Wilson, Dubina & Eason (2006, S. 1304ff) untersuchten einen geschlechtsspezifischen Unterschied (je 10 untrainierte Männer und Frauen im Alter von \bar{x} 20,5 Jahren) physiologischer Reaktionen nach 30-minütiger moderater Fahrradergometerbelastung bei gleicher relativer Intensität. Bei einer relativen Betrachtung zeigten beide Geschlechter gleiche VO_2 -Werte, die von der fünften bis zur 15. Nachbelastungsminute um drei Prozent absanken. Auch der RQ zeigte keine signifikanten Unterschiede, nur bei Betrachtung der absoluten VO_2 erreichten Männer signifikant höhere Werte als Frauen.

Bei 41 jugendlichen Schwimmern (\bar{x} im Alter von \bar{x} 16 Jahren) fanden Höltke, Degenhardt, Steuer, Starischka, Zéman & Jakob (2007, S. 137ff) anhand einer Laufbandrampenergometrie heraus, dass mit einer 7-minütigen Nachbelastung auf die VO_{2max} mit einer prozentualen Abweichung von \bar{x} 6,27 % geschlossen werden kann. Eine 5-minütige Nachbelastung habe eine prozentuale Abweichung von \bar{x} 7,23 %.

Nicht nur die Art der Nachbelastung, die Dauer während einer Belastung, der Trainingszustand oder das Geschlecht wurden hinsichtlich des Nachbelastungsverhaltens untersucht, auch ein Herzfehler kann die Kinetik spiroergometrischer Parameter in der Nachbelastung beeinflussen. Ein paar Studien hierzu werden im Folgenden kurz vorgestellt. Bereits 1994 kamen Sietsema, Ben-Dov & Hang (S. 1693ff) zu dem Ergebnis, dass die VO_2 -Kinetik bei Patienten mit chronischem Herzfehler während und nach sechsminütiger submaximaler Fahrradergometerbelastung einen langsameren Abfall der VO_2 in den ersten zwei Minuten der Erholung aufweisen.

Daida, Allison, Johnson, Squires & Gau (1996, S.47ff) untersuchten das Erholungsverhalten bei Patienten mit Herzfehler und einem linksventrikulären Ejektionsvermögen ($<45\%$) nach einer maximalen Laufbandergometrie. Bei 21 % (Gruppe 1) der 142 Probanden wurde ein weiterer Anstieg der VO_2 festgestellt, während bei Gruppe 2 die VO_2 abfiel. Gruppe 1 wies eine kürzere Laufbandbelastung bis zur Erschöpfung auf und hatte eine geringere ab-

solute sowie relative VO_{2max} . Ein weiterer Anstieg der Sauerstoffaufnahme ging also mit einer geringeren Belastungstoleranz einher und einer geringeren VO_{2max} . Somit schlussfolgern die Autoren, dass ein weiterer Anstieg der Sauerstoffaufnahme in der frühen Erholung einen schweren Herzfehler mit verringerter Herzreserve bei Belastung impliziert. Ähnliche Beobachtungen machten Cohen-Solal, Geneves, Citzrom & Gourgon (1997, S. 23ff). Durch eine verzögerte VO_2 -Kinetik könne die VO_{2max} somit bei Patienten mit schwerem chronischem Herzfehler verspätet auftreten. Das Verhalten von VE , VO_2 und RQ vor, während und nach rampenförmig ansteigender körperlicher Belastung bei normalgewichtigen, gesunden Erwachsenen beschreibt Scharhag-Rosenberger (2010, S. 146f) in folgender Tabelle 10.

Tabelle 10: Verhalten von VE , VO_2 und RQ vor, während und nach rampenförmiger Belastung (nach Scharhag-Rosenberger 2010, S.147)

	VE	VO_2	RQ
Vor Belastung in Ruhe	<ul style="list-style-type: none"> • Ca. 6-10 l/min 	<ul style="list-style-type: none"> • Ca. 200-450 ml/min bzw. 3,5-5,0 ml/min/kg 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,71-0,99
Während eines Rampentests	<ul style="list-style-type: none"> • Linearer Anstieg • Erster steilerer Anstieg ab VT • Zweiter steilerer Anstieg ab RCP 	<ul style="list-style-type: none"> • Linearer Anstieg • z.T. Abflachen kurz vor Abbruch („Leveling-Off“) 	<ul style="list-style-type: none"> • Kurzfristiges Absinken nach Belastungsbeginn • Kontinuierlicher Anstieg
Nach Abbruch	<ul style="list-style-type: none"> • Abfall 	<ul style="list-style-type: none"> • Abfall 	<ul style="list-style-type: none"> • zunächst weiterer Anstieg, danach Abfall

Charalampos, Nedios, Kelle, Helbig, Gottwik & von Bary (2012, S. 1ff) verglichen den Rückgang der Herzfrequenz und der VO_2 in der Erholungsphase nach maximaler Laufbandergometrie zwischen 50 gesunden Probanden sowie 136 Herzpatienten mit verschiedenen funktioneller Stadien. Bei den gesunden Probanden sank die VO_2 in der Erholung schneller als bei den Herzpatienten (je geringer die VO_{2max} desto langsamer der Rückgang). Sie stellten fest, dass ein Grund für den verlangsamten VO_2 -Abfall in der Erholung bei Patienten mit Herzfehlern eine beeinträchtigte Fähigkeit des zirkulatorischen Systems sei, den benötigten Bedarf an Sauerstoff schnell genug zu dem Myoglobin der peripheren Muskulatur zu transportieren. Auch Suzuki, Koike, Nagayama, Sakurada, Tsuneoka, Kato, Yamashita & Yamazaki (2012, S.

876ff) stellten eine überschüssige Sauerstoffaufnahme nach Belastungsabbruch bei 111 von 227 Patienten mit verschiedenen kardiologischen Erkrankungen fest. Diese hatten ebenso eine geringere VO_{2max} sowie eine niedrigere anaerobe Schwelle. Das Überschussphänomen in der Erholung korrelierte mit einer beeinträchtigten kardiopulmonalen Funktion während Belastung.

Zusammenfassend charakterisiert ein Abfallen der VO_2 -Aufnahme und CO_2 -Abgabe nach Belastungsabbruch das Nachbelastungsverhalten. Die VO_2 -Werte sinken schneller als die CO_2 -Werte, wodurch ein initialer Anstieg des RQ zu Beginn der Nachbelastung hervorgerufen wird. Anschließend fällt auch dieser ab. Bei trainierten Personen sinken die spiroergometrischen Parameter in der Erholung schneller und die VO_2 nimmt bei geringerer VO_{2max} langsamer ab. Auch die Belastungsdauer scheint bei Frauen den VO_2 -Verlauf in der Nachbelastung zu beeinflussen. Bei einer längeren Dauer ließ sich eine höhere VO_2 in der Nachbelastung beobachten. In Bezug auf Unterschiede spiroergometrischer Parameter in der Nachbelastung zwischen den Geschlechtern konnte bei Männern nur eine höhere absolute VO_2 in der Nachbelastung festgestellt werden. Bei Patienten mit chronischem Herzfehler lässt sich teilweise eine überschüssige VO_2 nach Belastung beobachten, die mit einer beeinträchtigten kardiopulmonalen Funktion während der Belastung korreliert. Durch diese verzögerte VO_2 -Kinetik könne die VO_{2max} bei Patienten mit schwerem chronischem Herzfehler verspätet auftreten.

2.2.2.2 Laktatkonzentration

Bereits in den 30 Jahren des 20. Jahrhunderts fanden laut Evans & Cureton (1983, S. 40) die Wissenschaftler Margaria, Edwards & Dill (1933) sowie Newman, Dill, Edwards & Webster (1937) heraus, dass bei passiver Erholung nach einer anstrengenden Belastung das Laktatverhalten in der Nachbelastung nach ca. 15 Minuten eine Halbwertszeit erreicht hat. Weitere Untersuchungen zeigten, dass die Laktateliminationsrate in der Nachbelastung bei leichter aerober Belastung steigt (Rammal & Strom, 1949; Gisolfi, Robinson & Turrell, 1966; Hermansen & Stensvold, 1972).

1970 versuchten Davies, Knibbs & Musgrove (S.155-161) bei 4 Probanden (♂ im Alter zwischen 20 und 45 Jahren) die optimale Eliminierungsrate der Laktatkinetik anhand von unterschiedlichen Intensitäten in der Nachbelas-

tung nach einer sechsminütigen Fahrradergometerbelastung bei 80 % der VO_{2max} , zu definieren. Sie beobachteten 40 Minuten die Laktatkinetik von passiver Erholung bis zu Belastungen bei 60 % der VO_{2max} . Sie nahmen jede 3.-6. Minute Laktat aus der Fingerbeere. Am effektivsten für eine Laktatelimination stellte sich eine Intensität von 35-45 % der VO_{2max} heraus. Diese wies eine doppelt so schnelle Laktateliminationsgeschwindigkeit auf wie passive Erholung, welche sich in dieser Untersuchung als ineffektivste Methode zeigte. Zu einem vergleichbaren Ergebnis kamen auch Belcastro & Bonen (1975, S. 932-936). Bei ihrer Untersuchung beobachteten sie bei 7 Probanden die Laktateliminationsrate bei unterschiedlichen Nachbelastungsintensitäten auf dem Fahrradergometer für 30 Minuten (Laktatabnahme jede 5. Minute). Eine Intensität von 29,7 bzw. 45,3 % der VO_{2max} stellte sich auch hier als die Effektivste heraus. Passive Erholung bzw. eine Intensität von 61,8 bis 80,8 % der VO_{2max} zeigen sich als weniger effektiv. Zusätzlich konnten die Probanden eine selbstgewählte Nachbelastungsintensität wählen, die genauso effektiv war wie eine Intensität von 30-45 % der VO_{2max} . Die gleiche Arbeitsgruppe Bonen, Campbell, Kirby & Belcastro (1979, S. 205-210), erweitert um 2 Personen, bekräftigten ihre Ergebnisse, dass die Laktatelimination bei aktiver Erholung signifikant schneller erfolgt als bei inaktiver Erholung. Zudem untersuchten sie bei den 10 Frauen und einer 6-minütigen Fahrradergometrie (87 % der VO_{2max} , Laktatabnahme jede 5. Minute) die Abhängigkeit der Laktatkinetik während der 20-minütigen Erholung vom Gehalt der slow-twitch-Fasern (ST-Fasern), der Laktatkonzentration im Blut sowie der Nachbelastungsintensität. Insgesamt beschreiben sie die Laktatkinetik als eine multiple additive Regression. Die Laktateliminationsrate korrelierte mit der Laktatkonzentration zum Abbruch, unter Berücksichtigung des ST-Faser-Gehalts und der Nachbelastungsintensität. Daraus schließen sie einen Zusammenhang zwischen der Laktateliminationsrate und dem ST-Faser-Gehalt.

Evans & Cureton (1983, S. 40-45) untersuchten den Effekt von körperlichem Trainingszustand und Laktateliminationsrate in der Erholungsphase nach einem Ausbelastungstest auf dem Fahrradergometer (4♂, 11♀ im Alter von $\bar{\varnothing}$ 27,4 Jahren). Es lagen die Ausbelastungskriterien von VO_{2max} , VO_2 -Anstieg kleiner als 150 ml/min, Laktatkonzentration höher als 10 mmol/l und

einen RQ-Wert von $>1,1$ zugrunde. Die Experimentalgruppe absolvierte für 6 Wochen, 4 Einheiten pro Woche ein hochintensives Intervalltraining auf dem Fahrradergometer und verbesserte die VO_{2max} um 15 % und die maximale Belastung um 27 %. Passive Erholung (sitzend auf einem Stuhl) und aktive Erholung (25 % der VO_{2max} bei gleicher absoluter Leistung sowie 25 % der VO_{2max} bei gleicher relativer Leistung) wurde 30 Minuten in der Nachbelastung mit einer Laktatabnahme jede 3. Minute beobachtet. Die Ergebnisse zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen dem Trainingszustand und der Laktateliminationsrate während passiver und aktiver Erholung bei gleicher absoluter Intensität. Es gibt jedoch eine signifikant höhere Eliminationsrate bei gleicher relativer Trainingsintensität. Auch die Untersuchung von Rawashdeh (1989, S. 77ff) mit 51 männlichen Rollstuhlfahrern (komplette und inkomplette Querschnittslähmung), wies einen deutlichen Unterschied absoluter Laktatwerte während und nach einer erschöpfenden Belastung auf einem Rollstuhlergometer bei Nichtsportlern, Freizeitsportlern und Ausdauersportlern auf. Jede Gruppe hatte in der Nachbelastung noch einen weiteren Laktatanstieg nach Belastungsabbruch, wobei die Werte der Freizeit- und Ausdauersportler während und nach Belastung höher waren.

An 7 Probanden untersuchten Dodd, Powers, Callender & Brooks 1984 (S. 1462ff) mittels einer Fahrradergometrie die Hypothese, ob die Eliminierung des Laktats nach intensiver Belastung durch aerobe Arbeit im Gegensatz zu passiver Erholung beschleunigt ist (Nachbelastungszeit 40 Minuten). Zudem prüften sie die Hypothese, ob eine Kombination aus hoher und niedriger Intensität in der Nachbelastung eine optimale Laktatelimination biete. Diese Kombination stellte sich jedoch nicht effektiver als eine dauerhafte niedrige Erholungsintensität heraus. Allerdings war der Eliminationsverlauf der durchgehend niedrigen und der kombinierten Nachbelastungsintensität ähnlich und in beiden Fällen effektiver als eine durchgehend hohe Intensität oder passive Erholung. Koutedakis & Sharp (1985, S. 199ff) kamen bei 7 gesunden Vereinsrudern (♂ im Alter zwischen 20 und 25 Jahren) bezogen auf die maximale Rudergeschwindigkeit zu einer vergleichbaren Schlussfolgerung. Die Laktatabnahmen erfolgten jeweils nach der ersten, fünften und dreizehnten Minute. Sie fanden bei drei verschiedenen Nachbelastungsintensitäten bei 40 % der maximalen Rudergeschwindigkeit die höchste Laktateliminierungsrate

(ca. 51 % der La_{max} nach 13 Minuten) im Gegensatz zur passiven Erholung (ca. 36 %) bzw. 60 % der maximalen Rudergeschwindigkeit (ca. 35 %). Auch Heck erwähnt, dass eine aktive Erholung die Halbwertszeit von Laktat verkürzt, denn „die Laktatelimination erfolgt im wesentlichen in der arbeitenden Muskulatur (inklusive dem Herzmuskel) und in der Leber“ (Heck, 1990, S. 38).

Baldari, Videira, Madeira, Sergio & Guidetti (2004, S. 224ff) betrachteten die Laktatelimination während drei verschiedener Belastungsintensitäten unterhalb der individuellen anaeroben Schwelle (IAT) bei 12 männlichen Fußballspielern (Alter $\bar{\Delta}$ 22 Jahre) auf dem Laufbandergometer nach einer 6-minütigen Belastung bei 90 % der VO_{2max} . Die Laktatabnahmen wurden nach der 1., 3., 6., 9., 12., 15., 20., 25. und 30. Minute in der Nachbelastung durchgeführt. Die effektivsten Nachbelastungsintensitäten zur Laktatelimination traten bei der individuellen ventilatorischen Schwelle (IVT) und der IVT minus 50 % der Differenz zwischen IVT und IAT auf. Weniger effektiv war eine Intensität bei IVT plus 50 % der Differenz zwischen IVS und IAT sowie die passive Erholung als ineffektivste Variante. Die Halbwertszeit der Laktatelimination liegt bei aktiver Erholung in dieser Studie bei etwa 10 Minuten (IVT sowie $IVT_{-50\% \Delta T}$ knapp darunter und $IVT_{+50\% \Delta T}$ knapp darüber), die der passiven Erholung bei ca. 15 Minuten. Anhand des gleichen Studiendesign untersuchte die gleiche Arbeitsgruppe Baldari et al. (2005, S. 460ff) 8 männliche Triathleten mit dem gleichen Ergebnis und dem Zusatz, dass nach der 20. Minute kein Laktat mehr abgebaut wurde.

Während sich die meisten vorangegangenen Studien mit der Laktatelimination, abhängig von anaeroben Schwellen bzw. der VO_{2max} , beschäftigten, konzentrierten sich Menzies, Menzies, McIntyre, Paterson, Wilson & Kemi (2010, S. 975ff) auf die aktive Erholung an bzw. unterhalb der Lactate Threshold (LT) nach hochintensiven Intervallläufen (5 Minuten Läufe bei 90 % der VO_{2max}). Die Ergebnisse der 10 trainierten, gesunden, männlichen Probanden (Alter $\bar{\Delta}$ 21,1 Jahren) zeigen, dass je näher die Nachbelastungsintensität an der LT (80-100 %) liegt desto schneller baut sich das Laktat ab. Die individuell wählbare Intensität lag bei ca. 80 % der LT und hatte einen deckungsgleichen Rückgang wie 80-100 % der LT. Eine erweiterte Betrachtung der Laktatkurve, die das Erholungsverhalten nach Belastungsabbruch bein-

halten, untersuchten Gass, Rogers & Mitchell (1981, S. 172ff) bei 13 gut trainierten, gesunden Männern auf dem Laufbandergometer. Nach Belastungsabbruch beobachteten sie den Verlauf der Laktatkonzentration, während sich die Probanden auf einem Sofa in Rückenlage befanden. Dabei stieg die Laktatkonzentration im Blut von 12,65 (+/- 0,46) mmol/l in der ersten Minute auf einen maximalen Wert von 14,2 (+/- 0,76) in der sechsten Minute. Anschließend folgte ein linearer Abfall, der bis zur 30. Minute einen Wert von 7,43 (+/- 0,6) mmol/l erreichte. Die durchschnittliche Eliminierungsrate betrug somit 0,3 mmol/l/Minute. Die Höhe der Laktatkonzentration weist in der vierten, fünften und sechsten Erholungsminute keinen signifikanten Unterschied auf. Zu dieser Erkenntnis kam auch Heck (vgl. 1990, S. 39), wobei der maximale Laktatwert nach Belastung in etwa der ersten bis 10. Minute erreicht wird. Den Anstieg des Blutlaktats in der Erholung begründet er mit dem Ausstoß des deutlich höheren Muskellaktats im Blut, das sich während der Belastung in der Muskulatur anhäuft. Auch Gmada, Bouhlef, Mrizak, Debabi, Ben Jabrallah, Tabke, Feki & Amri (2005, S. 874ff) fanden auf dem Fahrradergometer (supramaximale Belastung) bei 14 gesunden Probanden (♂, Alter Ø 20 Jahre, 7 trainiert, 7 untrainiert) die höchsten Laktatwerte zwischen der vierten und siebten Erholungsminute, gefolgt von einem progressivem Abfall. Zudem konnten sie eine relativ betrachtete unterschiedliche Laktatkinetik von trainierten und untrainierten Probanden bei kombinierter Nachbelastungsintensität (7 Minuten ca. 35% der VO_{2max} + 13 Minuten ca. 65% der VO_{2max}) beobachten. Sie stellten einen signifikanten Unterschied in der Halbwertszeit des Laktats fest, welche signifikant mit der Sauerstoffaufnahme korrelierte, die bei trainierten Probanden höher war. Die Halbwertszeit des Laktats war bei trainierten Probanden kürzer. Der Einfluss des Trainingszustandes konnte allerdings nur während kombinierter und nicht bei passiver bzw. zwei anderen verwendeten Nachbelastungsintensitäten (1. ca. 35 % der VO_{2max} , 2. ca. 65 % der VO_{2max}) festgestellt werden.

Die Betrachtung der Laktatkinetik bei 15 gesunden präpubertären Kindern (♂♀ im Alter zwischen 9 und 11 Jahren) auf dem Fahrradergometer untersuchten Dotan, Falk & Raz (2000, S. 564ff) und kamen dabei zu ähnlichen Ergebnissen wie oben erwähnte Autoren bei Erwachsenen. Auch Kinder kommen erst nach Belastungsabbruch (105. Sekunde der Erholung) auf ih-

ren maximalen Laktatwert. Insgesamt wurde die passive Erholung (PR) sowie die Nachbelastung (R) bei 40, 50 und 60 % der VO_{2max} betrachtet. Während 20 Minuten in der Nachbelastung erwiesen sich die passive Erholung am ineffektivsten und 40 % der VO_{2max} als die effektivste Nachbelastungsintensität zur Laktatelimination. Die Halbwertszeit der Laktatelimination wurde für die Nachbelastungsintensitäten folgendermaßen ermittelt: PR = 22,0 +/- 5,0; R40 = 10,3 +/- 1,9, R50 = 10,5 +/- 2,2 und R60 = 11,5 +/- 2,1 Minuten. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine aktive Erholung auch bei Kindern die Konzentration des Blutlaktat schneller reduziert als passive Erholung. In einer Folgestudie erforschten Dotan, Ohana, Bediz & Falk (2003, S. 419ff) das Nachbelastungsverhalten von 14 präpubertären Jungen und 12 Männern anhand eines 30 sec supramaximalen Fahrradtests (Wingate anaerobic test [WAnT]). Die Halbwertszeit der Laktatelimination (ca. 20 Minuten) war hierbei ohne signifikanten Unterschied, so dass die Autoren zu dem Schluss kommen, dass die Laktatkinetik in der Nachbelastung in dieser Studie keinen Einfluss zwischen Jungen und Männern hat.

Bei einer geschlechtsspezifischen Betrachtung der Laktatwerte in der Nachbelastung konnten Deschenes et al. (2006, S. 1304ff) bei je 10 untrainierten Männer und Frauen (im Alter von $\bar{\emptyset}$ 20,5 Jahren) nach 30-minütiger moderater Fahrradergometerbelastung bei gleicher relativer Intensität einen Unterschied im absoluten Laktatverhalten nicht nur während, sondern auch nach der Belastung feststellen. Die Laktatkonzentration bei Männern ist gegenüber Frauen während sowie nach der Belastung signifikant höher. Der prozentuale Rückgang wies in der Nachbelastung keinen signifikanten Unterschied auf. In einer weiterführenden Untersuchung von Deschenes, Connell, Jackson, Taylor & Glass (2009, S. 836ff) zeigten sich bei 10 jüngeren Frauen (im Alter von $\bar{\emptyset}$ 20,3 Jahren) im Gegensatz zu 10 älteren Frauen (im Alter von $\bar{\emptyset}$ 75,5 Jahren) mit gleichem Untersuchungsdesign signifikant höhere absolute Laktatwerte während und nach der Belastung. Der prozentuale Rückgang wies auch in dieser Studie in der Nachbelastung keinen signifikanten Unterschied auf.

Untersuchungen über den Effekt mit Kompressionssocken (CS) führten Rimaud, Messonnier, Castells, Devillard & Calmels (2010, S. 425ff) durch. 8 gesunde, trainierte Probanden ($\bar{\emptyset}$ im Alter von $\bar{\emptyset}$ 27,1 Jahren) absolvierten 2

maximale, stufenförmige Ausbelastungstests auf dem Fahrradergometer mit anschließender passiver Erholung von 60 Minuten. Die Laktatabnahme erfolgte bei der 0., 3., 5., 10., 15., 30. und 60. Erholungsminute an der Fingerbeere. Das Tragen von CS ergab signifikant erhöhte Laktatwerte in der Ausbelastung ($12,1 \pm 0,5$ vs. $10,8 \pm 0,5$ mmol/l) sowie in der 2., 3. und 4. Erholungsminute, was, laut den Autoren, wohl auch an der erhöhten La_{max} lag. Die Maximalwerte wurden während der dritten und fünften Nachbelastungsminute erreicht. Der weitere Verlauf erfolgte ohne signifikante Unterschiede. Die Halbwertszeit lag bei etwa 20 Minuten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass maximale Laktatwerte nach maximalen Belastungen zwischen der ersten und siebten Erholungsminute gemessen werden. Höhere absolute Laktatwerte während und nach der Belastung wurden zwischen Männern und Frauen, zwischen jüngeren und älteren Frauen, zwischen Männern und Jungen sowie zwischen Freizeit- bzw. Ausdauersportlern und Nichtsportlern auf dem Rollstuhlergometer herausgefunden. Höhere Laktatwerte wurde auch beim Tragen von Kompressionssocken beobachtet. Zudem beschleunigt eine aktive Erholung gegenüber einer passiven bei Kindern als auch bei Erwachsenen die Laktatelimination nach Belastungsabbruch. Eine optimale Nachbelastungsintensität liegt zwischen 30 und 45 % der VO_{2max} bzw. 80 bis 100 % der LT. Die Muskelfaserzusammensetzung ließ sich als Einflussfaktor auf die Laktatkinetik bei aktiver Erholung identifizieren. Die Halbwertszeit befindet sich bei passiver Erholung bei etwa 15-20 Minuten, bei aktiver Erholung bei ca. 10 Minuten. Schließlich wurde ein schnellerer Laktatabfall bei Trainierten gegenüber Untrainierten bei kombinierter Nachbelastung beobachtet.

2.2.2.3 Herzfrequenz

Die Herzfrequenz (Hf) in der Nachbelastungsphase kann neben der Beobachtung und Beurteilung in Ruhe und unter Belastung zur Diagnose der kardiovaskulären Leistungsfähigkeit einer Person dienen (vgl. Israel, 1982, S. 88). Bereits 1938 kam Robinson (S. 265) zu der Erkenntnis, dass die Herzfrequenz nach maximaler Leistung am schnellsten bei Jungen bis 10 Jahren zurückgeht. „The most rapid recoveries occur in the boys, and there is a tendency toward a slowing of the [heart] rate of recovery with age” (Robinson

1938, S. 265). In der ersten Erholungsminute erfolgte der Rückgang der Hf bei den unter 10 jährigen Jungen mit durchschnittlich 59 S/min. Bei den 10-20 jährigen Heranwachsenden fiel die Hf um 46 S/min. Um etwa 37 bzw. 20 S/min reduzierte sich die Hf im Alter zwischen 20-50 und 75 Jahren. Der relativ langsame Rückgang der Hf von den 20-50 jährigen Männern hänge, laut Robinson, mit den höchsten Blutlaktatkonzentrationen dieser Altersgruppen zusammen. Dieser Verlauf ist bis zur 10. Nachbelastungsminute zu beobachten.

Eine 10-minütige Erholung nach einer Minute Belastung auf dem Fahrradergometer mit 4 verschiedenen Intensitäten (1 = 80 % der AT, 2 = 50 % der Differenz von AT und VO_{2max} , 3 = 100 % der AT und 4 = 125 % der AT) bei 10 Kindern (Alter zwischen 7 und 11 Jahren) und 12 Erwachsenen (Alter zwischen 26 und 42 Jahren) untersuchten Baraldi, Cooper, Zanconato & Armon (1991, S. 575-579). Bei den Erwachsenen zeigten sich signifikant höhere Herzfrequenzen in der Nachbelastung je größer die Belastungsintensität war. Bei den Kindern ergab sich nur eine Tendenz. Die Hf-Erholungszeit bei höheren Belastungsintensitäten (über der AT) verlief bei Kindern signifikant schneller als bei den Erwachsenen. Auch Ohuchi, Suzuki, Yasuda, Arakaki, Echigo & Kamiya (2000, S. 329-335) fanden eine Abhängigkeit der Herzfrequenzerholung bezogen auf das Alter. 9 Kinder (Alter zwischen 9 und 12 Jahren) hatten einen signifikant schnelleren Rückgang der Herzfrequenz in der Erholungsphase nach leichter und intensiver Laufbandbelastung als 8 junge Erwachsene (Alter zwischen 17 und 21 Jahren).

Buchheit, Duché, Laursen & Ratel (2010, S. 142-150) kamen in ihrer Studie auf dem Fahrradergometer mit 10 mal 10 Sekunden maximaler Intensität mit jeweiliger 5-minütiger Erholungsphase zu ähnlichen Ergebnissen. Bei den Untersuchungen zwischen 10 vorpubertären Jungs (Alter $\bar{\emptyset}$ 9,6 Jahre), 6 pubertären Jungs (Alter $\bar{\emptyset}$ 15,2 Jahre) und 7 Männern (Alter $\bar{\emptyset}$ 20,4 Jahre) konnte ein signifikant schnellerer Rückgang der Herzfrequenz der Kinder gegenüber den Heranwachsenden und Erwachsenen beobachtet werden. Zwischen den Heranwachsenden und Erwachsenen gab es keinen Unterschied. Die schnellere Erholung der Herzfrequenz bei Kindern begründen die Autoren durch die niedrigere Arbeitsleistung und den anlagebedingten Mangel an anaerober, metabolischer Kapazität.

Deschenes et al. (2009, S. 836ff) konnten einen signifikanten Unterschied zwischen jüngeren und älteren Frauen feststellen. Jüngere Frauen haben durchweg eine höhere Herzfrequenz während Belastung und Erholung. Der Rückgang in der Nachbelastung ist nicht signifikant. In der 5. Erholungsminute erreichten die jungen Frauen 60 % der Hf_{peak} (ältere Frauen ca. 62 %), nach 15 Minuten 54 % bzw. 58 %. Ebenfalls keinen Unterschied konnte Deschenes et al. (2006, S. 1304ff) hinsichtlich Geschlecht feststellen.

Unabhängig von Alter und Geschlecht stellen Short & Sedlock im Jahr 1997 (S.153ff) in ihrer Untersuchung (s.o.) die Bedeutung der vorangegangenen Belastung dar. Es erwies sich neben weiteren Parametern auch bei der Herzfrequenz, dass diese bei Trainierten zu jedem Zeitpunkt niedrigere Werte zeigten, die sich zudem schneller erholten, als die bei den Untrainierten. Die Untersuchung (s.o.) von Hagberg et al. (1980, S. 218ff) zur Anpassung des Erholungsverhaltens an ein Ausdauertraining bestätigt diese Aussage. Nach einem neunwöchigen Ausdauertraining konnten sie bei der Herzfrequenz der Probanden den größten Effekt feststellen, welcher in der Nachbelastung u.a. sogar einen doppelt (45-55 %) so schnellen Erholungsverlauf aufwies wie vor der Intervention. Dass die Kinetik der Herzfrequenz nach Belastungsabbruch zum großen Teil von der Ausdauerleistungsfähigkeit bzw. der kardiovaskulären Leistungsfähigkeit einer Person abhängt wird auch bei Israel und Heck deutlich. Ausdauertrainierte weisen aufgrund einer besseren Kompensationsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems von körperlicher Belastung einen schnelleren Abfall der Herzfrequenz nach Belastung auf (vgl. Israel, 1982, S. 89; Heck, 1990, S. 80).

Die Vergleichsstudie von Darr, Bassett, Morgan & Thomas (1988, S. H340ff) bekräftigt diese Aussagen. Sie untersuchten 20 männliche Probanden auf dem Fahrradergometer, die in 4 Gruppen jeweils $n = 5$ trainierte (YT = Ø 24 Jahre) und untrainierte (YU = Ø 25 Jahre) junge Männer sowie trainierte (OT = Ø 51 Jahre) und untrainierte (OU = Ø 57 Jahre) ältere Männer unterteilt wurden. Anhand eines erschöpfenden Stufentests und einer darauffolgenden Erholungsphase von 10 Minuten mit 50 Umdrehungen pro Minute ohne Widerstand konnten sie einerseits herausfinden, dass es eine schnelle Erholungsphase (15-120 sec) bzgl. der Regressionsanalyse gibt und eine initial langsamere (120-240 sec) Phase. Andererseits konnte kein Unterschied hin-

sichtlich des Alters festgestellt werden. Die trainierten Gruppen jedoch zeigten einen signifikant schnelleren Rückgang der Hf als die untrainierten, vor allem während der schnellen Erholungsphase. Der Rückgang der Hf in der Nachbelastung betrug nach 2 Minuten bei der Gruppe YT ca. 37 %, bei der Gruppe YU etwa 28 %, bei den OT ca. 41 % und bei den OU etwa 33 %. Nach 4 Minuten zeigten sich bei den jeweiligen Gruppen folgende Werte: YT ca. 43 %, YU etwa 39 %, OT ca. 48 % und OU etwa 41 %.

Barak, Ovcin, Jakovljevic, Lozanov-Crvenkovic, Brodie & Grujic (2011, S. 369ff) untersuchten neben dem Einfluss des Alters und der bestehenden Ausdauerleistungsfähigkeit zudem die Körperposition nach einer submaximalen Fahrradergometerbelastung (80 % der Hf_{max}) in einer Erholungsphase von fünf Minuten. Bei 21 männlichen Athleten (Alter \bar{O} 19,9 Jahre) und 21 viel sitzenden männlichen Studenten (Alter \bar{O} 20,5 Jahre) anhand von verschiedenen Nachbelastungsphasen (aktiv ohne Widerstand mit 20 RPM und passiv sitzend, liegend sowie liegend mit hochgelagerten Beinen) konnte zu jedem Zeitpunkt einen signifikant schnelleren Abfall der Herzfrequenz bei Athleten analysiert werden. Zudem ergab ihre Untersuchung nicht nur, dass eine aktive Erholung im Zusammenhang mit einer langsameren Erholung der Herzfrequenz steht, sondern auch, dass sie durch Rückenlage beschleunigt wird. Auch Israel bestätigt, dass die Körperhaltung während der Nachbelastung einen Einfluss auf die Erholung der Herzfrequenz hat (vgl. 1982, S. 99). Dotan et al. (2000, S. 564ff) beobachteten bei ihren Untersuchungen zum Laktatverhalten (s.o.) während der Nachbelastung bei Kindern, dass eine passive Erholung den schnellsten Herzfrequenzabfall bewirkte. Bei aktiver Erholung fiel die Herzfrequenz nur anfänglich, bis sie sich an die Intensität der Nachbelastung anpasste.

Zuvor beobachtete bereits Royce 1969 (S. 3) bei seinen Untersuchungen (s.o.) einen schnelleren Abfall der Hf nach passiver Erholung (PR) mit hochgelegten Beinen als nach aktiver Erholung (AR) ohne Widerstand mit 50 Umdrehungen pro Minute auf dem Fahrradergometer. Der Rückgang der Hf_{max} bei der PR betrug nach 5 Minuten ca. 37 % und nach den kompletten 18 Minuten etwa 43 % bzw. bei der AR nach 5 Minuten ca. 30 % und nach den kompletten 18 Minuten etwa 34 %.

Israel (1982, S. 90) kommt weiterhin zu der Erkenntnis, wie auch einige Autoren zuvor (vgl. u.a. Ryhming 1953, Shephard 1966, McArdle, Zwiren & Magel 1969, Cotten 1971 und Verma, Sidhu & Kansal 1979), dass die Größenordnung der Belastung die Erholung der Herzfrequenz beeinflusst. Zunächst unterteilt er den hyperbelförmigen Verlauf der Hf in der Nachbelastung in zwei Phasen. Die erste Phase ist gekennzeichnet durch einen Steilabfall, welcher den ausbleibenden bzw. nachlassenden Impulsstrom von nervalen Regionen an das Automatiezentrum des Herzens ausdrückt. Der Verlauf der darauffolgenden langsamen Phase ist abhängig von der vorangegangenen Dauer der Belastung. Nach einem Marathonlauf beispielsweise kann in dieser Phase der Rückgang der Hf auf den Ruhewert länger als 24 Stunden dauern. Ein gleiches Beispiel greift auch Heck (1990, S. 80) auf. Er betont nicht nur die Dauer, sondern auch die Intensität der vorangegangenen Belastung als Einflussfaktor auf die Erholung der Herzfrequenz.

Koutedakis & Sharp (1985, S. 199ff) untersuchten unter anderem die Herzfrequenz in der Nachbelastung nach maximalem Rudern bei unterschiedlichen Intensitäten. Dabei konnte sich die Herzfrequenz bei einer Intensität von 60 % der maximalen Rudergeschwindigkeit auf 86 % bzw. bei passiver Erholung auf 44 % der maximalen Herzfrequenz verringern. Es ist jedoch anzumerken, dass es im Falle eines Übertrainings oder bei manifesten und latenten gesundheitlichen Störungen zu einer verzögerten Erholung der Herzfrequenz kommen kann (vgl. Israel, 1982, S. 99). Zu solchen Verzögerungen der Herzfrequenz gibt es eine Reihe von Untersuchungen, auf die in dieser Arbeit nur kurz eingegangen wird.

Imai, Sato, Hori, Kusuoka, Ozaki, Yokoyama, Takeda, Inoue & Kamada (1994, S. 1529ff) stellten in einem Vergleich von Athleten und Patienten mit chronischem Herzfehler, vor allem in der 30. Erholungssekunde eine verzögerte Erholung der Hf der Patienten aufgrund der vagalen Reaktivierung fest. Über sechs Jahre untersuchten Cole, Blackstone, Pashkow, Snader & Lauer (1999, S. 1351ff) 2428 männliche und weibliche Patienten hinsichtlich ihrer Hf-Erholung als Mortalitätsindikator. Sie charakterisierten dabei einen Abfall der Hf von weniger als 12 Schlägen pro Minute als anormal. Auch Jolly, Brennan & Cho (2011, S. 1520ff) bezeichneten einen Herzfrequenzabfall nach Belastung von weniger als 12 Schlägen pro Minute als anormal. Bei 51

% ihrer Studienteilnehmer (N= 1070), welche alle kardiologische Erkrankungen aufwiesen, ließ sich dieser Verlauf finden. Ähnliche Ergebnisse fanden auch Charalampos et al. (2012, S. 1ff) in jüngsten Studien (s.o.) heraus. Alle Patientengruppen wiesen einen verzögerten Hf-Abfall im Gegensatz zu den gesunden Probanden auf.

Ba, Delliaux, Bregeon, Levy & Jammes (2009, S. 52-58) untersuchten an Gesunden, Übergewichtigen sowie Patienten mit chronisch obstruktiver Lungenerkrankung mit und ohne Hypoxämie (erniedrigter Sauerstoffgehalt im Blut), ob ein erhöhter Blutlaktat Spiegel in der Nachbelastung und chronische Hypoxämie die sympathische Deaktivierung der Herzfrequenz, also deren Erholung, verzögert. Sie fanden heraus, dass eine verzögerte Herzfrequenzerholung nach Belastung mit Hypoxämie und erhöhten Blutlaktatwerten korreliert.

Zusammenfassend wird der Verlauf der Herzfrequenz in der Erholung bzw. Nachbelastung in zwei Phasen charakterisiert, einer ersten schnellen und einer zweiten anfänglich langsamen Phase. Dieser Verlauf wird hauptsächlich von verschiedenen Faktoren wie Alter, Belastungsintensität, Trainingszustand, Nachbelastungsintensität, kardiologische oder kardiovaskuläre Krankheiten sowie dem Blutlaktatlevel und Hypoxämie beeinflusst.

Der Rückgang der Herzfrequenz in der Nachbelastung erfolgt bei Kindern vor allem nach intensiveren Belastungen schneller als bei Erwachsenen. Laut Literatur scheint der Rückgang mit zunehmendem Alter langsamer zu verlaufen. Ausdauertrainierte weisen aufgrund einer besseren Kompensationsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems von körperlicher Belastung einen schnelleren Abfall der Herzfrequenz nach Belastung auf. Auch eine passive Erholung hat im Gegensatz zur aktiven Erholung ein schnelleres Sinken der Herzfrequenz zur Folge. Eine Verzögerung der Herzfrequenz in der Nachbelastung tritt hauptsächlich bei kardiologischen und kardiovaskulären Erkrankungen sowie bei Übertraining, erhöhtem Laktatlevel und bei Hypoxämie auf. Ein langsamerer Rückgang als 12 Schläge pro Minute gilt als anormal.

2.2.2.4 Zusammenfassende Betrachtung des Nachbelastungsverhaltens

Auch bei dem Nachbelastungsverhalten scheint es keine standardisierte Betrachtungsweise zu geben. Einerseits gibt es spezielle Fragestellungen wie

beispielsweise die Betrachtung von aktiver und passiver Erholung, das Tragen von Kompressionsstrümpfen oder es handelt sich um Patienten mit kardiologischen Erkrankungen. Andererseits erfolgt eine unterschiedliche Betrachtung bezüglich der Dauer der Nachbelastung und die Berechnung der einzelnen Parameter (Halbwertszeit sowie prozentualer Rückgang an definierten Zeitpunkten). Eine Zusammenfassung der Parameter in der Nachbelastung nach Autor und Jahr der Veröffentlichung kann der folgenden Tabelle 11 entnommen werden.

Mit dieser Arbeit soll u.a. geklärt werden, ob es möglich ist anhand des Nachbelastungsverhaltens die Leistungsfähigkeit eines Patienten oder Sportlers einzuschätzen. Nach oben durchgeführter Literaturrecherche und der standardisierten Routine bezüglich Testbedingungen am Institut für Sport und Sportwissenschaft (Analyse in der Nachbelastung bis E_5) erscheint es in der Datenanalyse sinnvoll, die Gesetzmäßigkeiten hinsichtlich des Parameters Herzfrequenz zu untersuchen.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Parameter in der Nachbelastung nach Autoren und Jahr der Veröffentlichung (der letzten 15 Jahre)

Autor	Jahr	Methodik	Ergebnisse
Short & Sedlock	1997	<p>Untersuchung des Einflusses vom aeroben Fitnesslevel auf die überschüssige Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung (EPOC) und die anfängliche Nachbelastungsrate nach 4-6-monatigem Interventionsausdauertraining.</p> <p>Probanden: 12 trainierte und 10 untrainierte Frauen u. Männer</p> <p>Methodik: Fahrradergometrie 30 Min. bei 70% der VO_{2max} sowie bei 1,5 l/min.; sitzende Nachbelastung, Beobachtung und Messung der Herzfrequenz bis zur 60. Nachbelastungsminute oder bis zum Erreichen des VO_{2max}-Ruhewert.</p> <p>Hf: absolute Werte und Veränderung in Bezug auf Ruhewerte</p> <p>VO_2: relative Werte in Bezug auf den Ausbelastungswert (0% Erholung) und den Vorstartwert (100% Erholung)</p>	<p>Hf: Trainierte haben signifikant niedrigere Hf-Werte in der Nachbelastung; bei gleicher VO_2 während Belastung ebenfalls niedrigere Hf-Werte zu jedem Zeitpunkt der Nachbelastung</p> <p>VO_2: Phase des EPOC bei Trainierten bei beiden Nachbelastungsarten schneller vorbei als bei Untrainierten. Größenordnung des EPOC ist bei Trainierten beim zweiten Protokoll geringer; signifikante Unterschiede in schnellerer anfänglicher Erholungsphase bis zur achten Erholungsminute</p>
Cole et al.	1999	<p>Untersuchung der Herzfrequenz-Erholung als zweckmäßiger, prognostischer Marker für Sterblichkeit bei verspätetem Abfall der Herzfrequenz nach Belastung.</p> <p>Probanden: 2428 männliche und weibliche Erwachsene ohne Herzkrankheiten</p> <p>Methodik: Laufbandergometrie bis zur Ausbelastung, Nachbelastung bei 2,4 km/h und Steigung von 2,5%</p> <p>Absolute Werte, Messung des Herzfrequenzabfalls von Belastungsabbruch bis zur 1. Nachbelastungsminute</p>	<p>Hf: Abfall der Hf nach Belastung mit weniger als 12 S/min gilt als anormal, eine verzögerte Herzfrequenzerholung in der 1. Erholungsminute wird als Anzeichen einer allgemeinen Mortalität gesehen</p>
Dotan et al.	2000	<p>Untersuchung des Laktatverhaltens von Kindern bei verschiedenen Intensitäten von aktiver und passiver Erholung.</p> <p>Probanden: 15 gesunde Mädchen und Jungen zwischen 9-11 Jahre, nicht leistungsorientiert</p> <p>Methodik: Fahrradergometrie: drei mal 40 s bei 150% der VO_{2max} mit zwei 50-sekündigen Pausenintervallen, danach zwei Minuten passive Erholung (bei 40%, 50% oder 60% der VO_{2max}) gefolgt von 23 Minuten randomisiert ausgewählter aktiver Erholung</p> <p>Hf: Mittelwert aus 20 sec zu Belastungsabbruch sowie zur 2, 4, 6, 10, 15., 20. und 25. Nachbelastungsminute</p> <p>La: absolute Laktatkonzentrationen und Halbwertszeit</p>	<p>Hf: sinkt bei passiver Erholung am schnellsten und bei aktiver Erholung nur anfänglich bis sie sich an die Intensität anpasst</p> <p>La: kurz nach Ausbelastung steigt die Laktatkonzentration bis zur 105. sec an (Maximalwerte), bei einer Intensität von 50% der VO_{2max} ist die Elimination in den ersten zehn Minuten am schnellsten</p>
Ohuchi et al.	2000	<p>Untersuchung bzgl. Unterschied in der Herzfrequenzerholung nach Belastung zwischen Kindern und jungen Erwachsenen.</p> <p>Probanden: 9 Kinder (9-12 Jahre) und junge Erwachsene (17-21 Jahre)</p> <p>Methodik: Laufbandergometrie, 1. Rampentest mit progressiv ansteigender Belastung bis zur Erschöpfung, anschließend 30 sec Ausgehen gefolgt von vier Minuten Sitzen, 2. vierminütiges konstantes Walking an AS gefolgt von vier Minuten Sitzen</p> <p>Hf: absolute Werte und der Veränderung von Hf_{max} zu verschied. Nachbelastungszeitpunkten als Differenz zu Hf_{max}</p>	<p>Hf: Erholungsminute 1 und 3 ist bei Kindern signifikant niedriger, Veränderung der Hf von Hf_{max} zu jedem Zeitpunkt der Erholung ist bei Kindern größer (gilt für 1. u. 2. Testprotokoll). Hf- Erholung nach Belastung abhängig von Belastungsintensität u. kardiorespiratorischer Fitness, hohe sympathische Aktivierung bei jungen Erwachsenen entwickelt eine signifikante Verspätung in der Hf-Erholung im Vergleich zu Kindern</p>

Baldari et al.	2004	Vergleich der Auswirkung drei verschiedener Nachbelastungen unterhalb der IAS auf die Eliminierungsrate des Laktat <u>Probanden:</u> 12 männliche Fußballspieler <u>Methodik:</u> Laufbandergometrie, verschiedene Belastungen zwischen IVT und AS, danach 30 Minuten Nachbelastung bei 1. IVT+50% (bis zur AS), 2. an der IVT, 3. an IVT-50% (bis zur AS) und 4. passive Erholung; <u>La:</u> Laktatverringern pro Zeit	<u>La:</u> passive Erholung hat die geringste Eliminierungsrate, die Nachbelastungsintensitäten zur Laktatelimination sind an der IVT und IVT-50% (bis zur AS) effizienter als bei IVT+50% (bis zur AS)
Gmada et al.	2005	Untersuchung verschiedener Nachbelastungsintensitäten nach supramaximaler Arbeit auf die Laktatelimination. <u>Probanden:</u> 14 gesunde männliche (un-)trainierte junge Erwachsene <u>Methodik:</u> Fahrradergometrie, drei supramaximale intermittierende Belastungen bei 60% der Zeit bis zur Erschöpfung, bei 120% der max. aeroben Leistung mit 5-minütiger Pause und eine dritte 20-minütige Nachbelastung bei verschiedenen Intensitäten <u>La:</u> Halbwertszeit der Laktatkonzentration	<u>La:</u> höchste La-Werte zwischen 4. & 7. Erholungsminute gefolgt von einem progressivem Abfall, signifikant kürzere Halbwertszeit des Laktats bei Trainierten, signifikante Korrelation mit der VO_2 , die bei Trainierten höher ist, ein Einfluss des Trainingszustandes kann allerdings nur während kombinierter und nicht bei passiver bzw. bei zwei anderen aktiven Nachbelastungsintensitäten nachgewiesen werden
Deschenes et al.	2006	Untersuchung des Unterschieds der physiologischen Reaktion zwischen Männern und Frauen, während und nach gleicher relativer submaximaler Belastung. <u>Probanden:</u> 10 untrainierte Frauen und 10 untrainierte Männer <u>Methodik:</u> Fahrradergometrie, 30-minütige Belastung bei 60-65% der individuellen VO_{2max} , 15 Minuten passive Nachbelastung; Messung zur 5. und 15. Nachbelastungsminute <u>Hf:</u> absolute Werte und prozentualer Rückgang <u>La:</u> absolute Werte und prozentualer Rückgang <u>VO₂ & RQ:</u> relative und absolute Werte	<u>Hf:</u> Kein signifikanter Unterschied bei den Hf-Werten bzw. beim prozentualen Rückgang. <u>La:</u> während und nach der Belastung ist die Laktatkonzentration bei Männern signifikant höher als bei Frauen. Kein signifikanter Unterschied beim prozentualen Rückgang. <u>VO₂ & RQ:</u> Keine signifikanten Unterschiede bei relativer Betrachtung. Signifikant höhere VO_2 -Werte der Männer bei absoluter Betrachtung
Ba et al.	2009	Untersuchung ob ein erhöhtes Blutlaktatlevel in der Nachbelastung und/oder chronische Hypoxämie die sympathische Deaktivierung und die Herzfrequenzerholung verzögern kann. <u>Probanden:</u> 20 gesunde, 20 Übergewichtige davon 7 mit Hypoxämie, 15 COPD-Patienten mit Hypoxämie <u>Methodik:</u> Fahrradergometrie, Protokoll 20-20-1 bis 90% der erwarteten Hf_{max} erreicht wurden, anschließende Nachbelastung von 5 Minuten bei null Watt <u>Hf:</u> Mittelwerte über 10 sec. zur 1., 2., 4. und 5. Minute der Erholung der absoluten Werte und der Differenz zur Hf_{max}	<u>Hf:</u> verzögerte Herzfrequenzerholung nach Belastung korreliert mit Hypoxämie und erhöhten Blutlaktatwerten
Buchheit et al.	2010	Unterschied der Herzfrequenzerholung im Zusammenhang mit Kindern, Heranwachsenden und Erwachsenen. <u>Probanden:</u> 10 präpubertäre, 6 pubertierende Jungen und 7 Männern <u>Methodik:</u> Fahrradergometrie, 10 mal 10-sekündige maximale Sprints mit 5-minütige Erholungsphase (passive Pause) <u>Hf:</u> Hf-Erholung nach 60 sec. und Zeitkonstanten des Hf-Zerfall	<u>Hf:</u> Alterseffekt zur 60. Erholungssekunde. Kinder hatten eine schnellere Hf-Erholung; kein Unterschied zwischen Heranwachsenden und Erwachsenen; Hf-Erholung der 60. Sekunde korreliert signifikant mit der mittleren Arbeitsleistung; positiver Zusammenhang zwischen Hf der 60. Sekunde und des pH-Werts; Hf-Erholung & Alter korrelieren nicht signifikant bei relative Betrachtung der Arbeitsleistung; schnellere Hf-Erholung bei Kindern scheint mit geringeren Werten der Arbeitsleistung, der La-Konzentration und weniger Säure im Blut zusammenzuhängen

Menzies et al.	2010	<p>Untersuchung der Erholung in Abhängigkeit der Nachbelastungsintensität. Probanden: 10 moderat trainierte, junge gesunde Männer.</p> <p>Methodik: Laufbandergometrie, 5 Minuten hochintensives Laufen bei 90% der VO_{2max}, danach Nachbelastung bei 100%, 80%, 60%, 40% und 0% der LT sowie selbstregulierte Intensität bis zum Rückgang zu Ausgangswerten</p> <p>La: Messung alle 4 Minuten, Zeitkonstanten der Laktatelimierungskurven, welche mit dieser wiederum auf Korrelation geprüft wurden</p>	<p>La: das Blutlaktat geht innerhalb von 32 Minuten zurück zu den Ausgangswerten; Intensitäten von 60-100% reduzieren Laktat schneller als niedrigere Intensitäten bei 40 und 0% der LT; höchste Eliminierungsrate bei 80 und 100% der LT</p>
Rimaud et al.	2010	<p>Untersuchungen über den Effekt mit Kompressionssocken.</p> <p>Probanden: 8 trainierte, gesunde Männer</p> <p>Methodik: Fahrradergometrie, 2 stufenförmige Ausbelastungstests mit passiver Erholung von 60 Minuten; Laktatabnahmen bei 0, 3, 5, 10, 15, 30. und 60. Erholungsminute (Fingerbeere).</p> <p>La: Absolute Werte, prozentualer Verlauf und Halbwertszeit</p>	<p>La: signifikant höhere La-Werte in der Ausbelastung sowie in der 2., 3. und 4. Erholungsminute bei Tragen von CS. Maximale Werte nach der 3. und 5. Nachbelastungsminute; Halbwertszeit lag bei etwa 20 Minuten</p>
Jolly et al.	2011	<p>Untersuchung bzgl. Verbesserung der Hf-Erholung durch kardiologische Rehabilitation.</p> <p>Probanden: 1070 Patienten mit Kriterien zur kardiologischen Rehabilitation</p> <p>Methodik: Laufbandergometrie, 2-minütiger Rampentests bis zur maximalen Erschöpfung bzw. 85% der berechneten Hf_{max}, danach 2-minütige Nachbelastung bei 2,4 km/h und 2,5% Steigung</p> <p>Hf: Differenz von Hf_{max} und Hf zur ersten Nachbelastungsminute</p>	<p>Hf: Beziehung zwischen kardiologischer Reha und verbesserter Hf-Erholung; Verringerung der Mortalität durch kardiologische Reha</p>
Barak et al.	2011	<p>Untersuchung des Effekts verschiedener Erholungsprotokolle auf die Hf-Erholung.</p> <p>Probanden: 21 trainierte männliche Athleten und 21 viel sitzende männliche Studenten</p> <p>Methodik: Fahrradergometrie, vier submaximale Tests mit anschließend 5-minütiger Nachbelastung: 1. passiv, aufrecht sitzend, 2. aktiv in aufrechter Position ohne Widerstand bei 20 rpm, 3. in Rückenlage, 4. in Rückenlage mit hochgelegten Beinen</p> <p>Hf: Erfassung der Differenz der Hf zur 60. Nachbelastungssekunde und der Hf_{max}; Zeitkonstante des Hf-Zerfall über die 5-minütige Nachbelastung</p>	<p>Hf: höhere Hf zur 60. Nachbelastungssekunde bei Athleten unter allen Bedingungen; keine Korrelation zwischen Hf-Erholung und maximaler Arbeitsleistung; beide Rückenlagen beschleunigten die Hf-Erholung mehr als die Sitzenden; aktive Erholung steht im Zusammenhang mit langsamerer Hf-Erholung</p>
Charalampos et al.	2012	<p>Vergleich von Hf und VO_2 in der frühen Erholungsphase nach maximaler Belastung von Patienten mit verschiedenen funktionellen Stadien eines Herzfehlers und von gesunden Probanden.</p> <p>Probanden: 136 Patienten mit Herzfehler und 50 gleichaltrige gesunde Probanden eingeteilt in 4 funktionelle Gruppen mit abfallender VO_2</p> <p>Methodik: Laufbandergometrie, 4% anfängliche Steigung bei 1 mph+1% Steigung und 0,5 mph jede Minute</p> <p>Hf: absolute Werte und Kurvensteigung</p> <p>VO_2: zeitlicher Verlauf des VO_2-Abfall bis zur 120. Nachbelastungssekunde und Berechnung der Steigung der VO_2 zur 30., 60., 90. und 120. Nachbelastungssekunde</p>	<p>Hf: bei gesunden Probanden sinkt die Hf schneller, Patienten mit Herzfehler hatten ein langsameren Rückgang der Hf</p> <p>VO_2: bei gesunden Probanden sinkt die VO_2 in der Erholung schneller als bei Patienten mit Herzfehler und geringerer VO_{2max}</p>
Suzuki et al.	2012	<p>Untersuchung des Überschuss an respiratorischen Gasen und Parameter nach kardiopulmonalen Belastungstests.</p> <p>Probanden: 227 Patienten mit verschiedenen kardiologischen Erkrankungen</p> <p>Methodik: Fahrradergometrie, nach 4 Minuten Aufwärmung bei 0-20 Watt mit 60 rpm und Steigerung um 1 Watt/6s ($\approx 10W/att/Min$).</p> <p>VO_2: Überschuss dauert mindestens eine Minute an, der Wert ist höher als der zum Zeitpunkt der maximalen Belastung</p>	<p>VO_2: Patienten mit VO_2-Überschuss nach Belastungsabbruch haben eine höhere Prävalenz zur Kardiomyopathie, ein signifikant geringeres linksventrikuläres Ejektionsvermögen, eine geringere VO_{2max} und eine niedrigere anaerobe Schwelle</p>

3 DATENANALYSE

Im folgenden Hauptkapitel werden die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen dargestellt. Zu Beginn erfolgt die Beschreibung der Methodik, das heißt Messsysteme, Messtechnik, die verwendeten statistischen Verfahren, die Stichprobe sowie die Methodenkritik werden beschrieben. In den darauffolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Untersuchung hinsichtlich Ausbelastungskriterien und Nachbelastungsverhalten dargestellt. Dabei wird auf die in der Methodik erwähnte deskriptive und Interferenzstatistik zurückgegriffen. Am Ende jedes Kapitels folgen eine Zusammenfassung sowie ein Fazit.

3.1 Methodik

Die für diese Dissertation analysierten Untersuchungen fanden im Labor der leistungsdiagnostischen Abteilung des Instituts für Sport und Sportwissenschaft (IfSS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) statt. Alle Untersuchungen wurden auf Grundlage von aktuellen wissenschaftlichen Standards und unter Verwendung modernster Messapparaturen durchgeführt.

3.1.1 Messsysteme und Messtechnik

Die Analysen auf dem Lamellen-Laufbandergometer (vgl. Abbildung 3) pps med L70 der Firma WOODWAY GmbH (Weil am Rhein, Deutschland) wurden in der Regel mit dem Stufenprotokoll 6-2-3 (Anfangsgeschwindigkeit in km/h - Inkrement in km/h - Stufendauer in Minuten) durchgeführt. Die Laufbandsteigung betrug 1,0 %. Bei dieser Steigung besteht für das verwendete Ergometer die größte Übereinstimmung des Energieumsatzes bei gegebener Belastung bei der Laufbandgeschwindigkeit im Labor mit der Laufgeschwindigkeit im Freien (biologische Eichung; vgl. Jones & Doust, 1996, Hipp, 2007). Abweichende Protokolle, 8-2-3 bei Leistungssportlern und 4-2-3 bei

„leistungsschwachen“ Sportlern werden, wenn nicht anders erwähnt, gleichermaßen in die Auswertung einbezogen.



Abbildung 3: Laufbandergometer der Firma Woodway am IfSS des KIT (eigenes Bildmaterial)

Die fahrradergometrischen Untersuchungen erfolgten auf dem Ergometer (vgl. Abbildung 4) der Firma SRM Schoberer Rad Messtechnik GmbH (Jülich, Deutschland) und dem ergobike med 8 der Firma daum electronic GmbH (Fürth, Deutschland). Dabei kamen die Belastungsprotokolle 25-25-2, 50-50-3 und 100-20-3 (Anfangsbelastung in Watt - Inkrement in Watt - Stufendauer in Minuten) zum Einsatz. Leicht abweichende Protokolle mit veränderten Anfangsbelastungen (z.B. 50-25-2) werden, wenn nicht anders erwähnt, gleichermaßen in die Auswertung einbezogen, da das Inkrement und die Stufendauer unverändert bleiben. Somit werden bei der Fahrradergometrie 3 Testprotokolle unterschieden: Testprotokoll 1 (TP1: 25-2) mit 25 Watt Inkrement und einer Stufendauer von 2 Minuten. Testprotokoll 2 (TP2: 20-3) mit 20 Watt Inkrement und einer Stufendauer von 3 Minuten sowie Testprotokoll 3 (TP3: 50-3) mit 50 Watt Inkrement und einer Stufendauer von 3 Minuten. TP1 wird hauptsächlich als „Routineergometrie“ in der Arbeitsmedizin, TP2 im Leistungssport und TP3 in der Sportmedizin verwendet (vgl. Tabelle 4). Bei allen Belastungsprotokollen sollte die Trittfrequenz zwischen 60-90

Umdrehungen pro Minute liegen und stabil eingehalten werden. Eine Vorlage der verwendeten Belastungsprotokolle (Laufband- und Fahrradergometrie) findet sich im Anhang III und IV.



Abbildung 4: Fahrradergometer der Firma SRM am IfSS des KIT (eigenes Bildmaterial)

Die Laktatbestimmung erfolgte über eine Entnahme von 20 μ l Kapillarblut aus dem hyperämisierten Ohrläppchen und eine anschließende elektrochemische Analyse mittels einer Chip-Sensor-Technologie des Gerätes „biosen c_line“ (vgl. Abbildung 5) der Firma EKF-Diagnostics GmbH (Magdeburg, Deutschland).



Abbildung 5: Biosen c-line der Firma EKF-Diagnostics (Quelle: ekfdiagnostics.de)

Die Herzschlagfrequenz wurde mittels eines codierten T31 Pulsgurts (vgl. Abbildung 6) als Sendereinheit der Firma Polar Electro GmbH (Kempele, Finnland) sowie der Empfangseinheit des jeweiligen Ergometers erfasst.



Abbildung 6: Pulsgurt der Firma Polar (Quelle: polar-deutschland.de)

Die spiroergometrische Datenerfassung erfolgte mittels MetaMax 3B[®]-System (vgl. Abbildung 7) der Firma Cortex Biophysik GmbH (Leipzig, Deutschland). Dabei handelt es sich um ein offenes Messsystem mit Breath-by-Breath Registrierung der Atemzüge.



Abbildung 7: Spirometer MetaMax 3B der Firma Cortex (Quelle: cortex-medical.de)

Die spiroergometrischen Daten wurden kontinuierlich aufgezeichnet, die Laktatmessung und Herzfrequenz jeweils vor dem Start, am Ende der jeweiligen Belastungsstufe, bei Belastungsabbruch sowie nach der ersten, dritten und fünften Erholungsminute (E_1 , E_3 und E_5). Die Nachbelastungsphase bis zu E_3 wurde bei der Anfangsbelastung (aktiv) durchgeführt, die letzten beiden Minuten von E_3 bis zu E_5 erfolgten ohne körperliche Belastung (passiv). Auf dem Laufbandergometer wurde zur Abnahme des Kapillarblutes aus dem Ohrläppchen eine Belastungspause von 30 Sekunden nach dem Ende jeder Stufe eingelegt.

Zur Bestimmung der individuellen aeroben Schwelle (Lactate Threshold LT, initialer Anstieg der Laktatkonzentration) sowie der individuellen anaeroben Schwelle (IAS, Addition von 1,5 mmol/l bei der Laufbandergometrie bzw. von 1,0 mmol/l bei der Fahrradergometrie zur LT) nach Dickhuth et al. (1988 und 1991) und der fixen aeroben Schwelle bei 2 mmol/l nach Kindermann et al. (1978) sowie der fixen anaeroben Schwelle bei 3 mmol/l auf dem Fahrradergometer nach Heck (1997) bzw. 4 mmol/l auf dem Laufbandergometer nach Mader et al. (1976), wurde die Software Ergonizer[®] der Sportmedizin Freiburg (Deutschland) herangezogen.

3.1.2 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte über die Programme Excel der Firma Microsoft sowie SPSS Statistics 19 der Firma IBM GmbH.

Zur deskriptiven Darstellung der Ergebnisse werden das arithmetische Mittel (MW) sowie die Standardabweichung (SD) dargestellt. Haupteffekte und Interaktionen bei Gruppenvergleichen (z.B. Ergometrien unter Berücksichtigung des Geschlechts) wurden anhand der *Varianzanalyse (ANOVA)* auf Signifikanz geprüft. Effektgrößen wurden in Form von partiellem eta-Quadrat (η^2) berichtet. Um Unterschiede innerhalb einer Gruppe aufzuzeigen wurden zusätzlich post-hoc T-Tests gerechnet. Wenn im Text nicht weiter angegeben, sind die gängigen Voraussetzungen der angewandten Methoden erfüllt (Varianzhomogenität, Normalverteilung). Für alle Testverfahren wurden die in der Sportwissenschaft gängigen Signifikanzgrenzen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit p bei zweiseitiger Testung berichtet (vgl. u.a. Heck, 1990, S. 20, Bös, Hänsel & Schott, 2000, S. 114):

$p \leq .05$ (*)	signifikant auf dem 5 % Niveau.
$p \leq .01$ (**)	signifikant auf dem 1 % Niveau

Nach Cohen (1988) gelten folgende Faustregeln und Richtlinien zur Einschätzung der Größe eines Effekts:

Größe des Effekts	Eta ²	Erklärte Varianz
Klein	.01	1 %
Mittel	.06	6 %
Groß	.14	14 %

Zur Interpretation der Höhe von Korrelationskoeffizienten bei der *Zusammenhangsüberprüfung nach Pearson* dienen die folgenden Anhaltspunkte nach Bös et al. (2000, S. 169):

$r = .00$	kein Zusammenhang
$.00 < r \leq .39$	niedriger Zusammenhang
$.40 < r \leq .69$	mittlerer Zusammenhang
$.70 < r \leq .99$	hoher Zusammenhang
$r = 1,00$	perfekter Zusammenhang

Die Daten wurden auf Plausibilität geprüft. Nicht plausible Werte wurden mit den Rohdaten abgeglichen und, falls auf messmethodische Fehler zurückzuführen gelöscht. Fehlende Werte - vor allem in der Nachbelastung - wurden als „zufällig fehlend“ (Missing completely at random) betrachtet und als unbedenklich eingestuft. Die fehlenden Werte stehen in keinem Zusammenhang mit anderen erhobenen Variablen, sondern sind auf die Messsituation (Ausfall der Messtechnik) zurückzuführen.

3.1.3 Gesamtstichprobe

Die Stichprobe umfasst alle laufband- und fahrradergometrischen Untersuchungen gesunder Probanden im Alter zwischen 13 und 80 Jahren, die im Zeitraum von 2007 bis 2010 am Institut für Sport und Sportwissenschaft (IfSS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführt wurden. Als gesund wurden alle Personen bezeichnet, die den in deutscher Version modifizierten Risikofragebogen „Physical Activity Readiness-Questionnaire“ PAR-Q (Canadian Society for Exercise Physiology, 2012) bestanden, d.h. alle Fragen mit „nein“ beantwortet haben (siehe Anhang I). Jeder Proband erhielt daraufhin Informationen über den genauen Ablauf der Untersuchung und erklärte sich mittels einer schriftlichen Einwilligung (siehe Anhang II) zur Teilnahme mit den Durchführungsmodalitäten einverstanden. Minderjährige Probanden benötigten eine Einverständniserklärung eines Erziehungsberechtigten. Die Testteilnahme erfolgte freiwillig, d.h. aus eigenem Interesse an der Bestimmung der Ausdauerleistungsfähigkeit. Aus diesem Grund wird von einer hohen Eigenmotivation ausgegangen, die Belastung bis zu einer individuellen Erschöpfung auszuführen. Probanden, bei denen der Testabbruch

aufgrund von subjektiven Beschwerden verfrüht erfolgte, wurden aus der Analyse ausgeschlossen. In der Gesamtstichprobe sind Untersuchungen von Probanden enthalten, die sowohl eine Laufband- als auch eine Fahrradergometrie absolviert haben. Bei Probanden, die mehrere Untersuchungen der gleichen Belastungsform durchgeführt haben, wurde nur der erste Test berücksichtigt. Insgesamt wurden somit in dieser Arbeit 1055 Datensätze bearbeitet. Aufgrund der unterschiedlichen und nicht direkt vergleichbaren Belastungsformen wird die Stichprobe hinsichtlich Untersuchungen auf dem Laufband- und dem Fahrradergometer unterteilt.

Teilstichprobe Laufbandergometer (LE)

Auf dem Laufbandergometer wurden insgesamt 382 männliche und 125 weibliche Probanden ($N_{LE\text{gesamt}} = 507$) untersucht. Das Durchschnittsalter beträgt insgesamt $31,5 \pm 11,4$ Jahre. Das durchschnittliche Körpergewicht beläuft sich auf $73,2 \pm 13,8$ kg bei einer durchschnittlichen Körperhöhe von $177,3 \pm 10,2$ cm. Aus dem Körpergewicht und -höhe resultiert der BMI von $23,1 \pm 2,9$ (vgl. Tabelle 12). Insgesamt sind die folgenden Tabellen der Stichprobenbeschreibung aufgeteilt in Geschlecht (♂ , ♀), Anzahl der Probanden (N), prozentuale Verteilung der Geschlechter (%), durchschnittliches Alter (Jahre), Gewicht (kg), Größe (cm) und BMI (kg/m^2). In der untersten Zeile sind die jeweiligen Werte bezogen auf die Teilstichprobe angegeben.

Tabelle 12: Anthropometrische Daten (MW \pm SD) aller Probanden auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	Prozent [%]	Alter [Jahre]	Gewicht [kg]	Größe [cm]	BMI [kg/m^2]
♂	382	75,3	30,5 $\pm 11,5$	77,1 $\pm 12,7$	180,5 $\pm 8,9$	23,6 $\pm 2,8$
♀	125	24,7	34,6 $\pm 10,6$	61,3 $\pm 9,3$	167,5 $\pm 7,0$	21,8 $\pm 2,9$
Σ	507	100	31,5 $\pm 11,4$	73,2 $\pm 13,8$	177,3 $\pm 10,2$	23,1 $\pm 2,9$

Bei 97 Personen wurden bei der Laufbandergometrie zusätzlich spiroergometrischen Parameter erhoben. Das Durchschnittsalter dieser Gruppe beträgt $31,7 \pm 10,1$ Jahre. Das durchschnittliche Körpergewicht beläuft sich auf

74,3 ± 10,4 kg bei einer durchschnittlichen Körperhöhe von 179,1 ± 8,3 cm und einem resultierenden BMI von 23,1 ± 2,2 (vgl. Tabelle 13).

Tabelle 13: Anthropometrische Daten (MW ± SD) der Probanden mit spiroergometrischer Untersuchung auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	Prozent [%]	Alter [Jahre]	Gewicht [kg]	Größe [cm]	BMI [kg/m ²]
♂	77	79,4	32,0 ± 9,9	77,7 ± 8,0	181,7 ± 6,6	23,5 ± 2,3
♀	20	20,6	30,6 ± 11,0	61,2 ± 7,8	169,2 ± 6,3	21,4 ± 2,3
Σ	97	100	31,7 ± 10,1	74,3 ± 10,4	179,1 ± 8,3	23,1 ± 2,2

Teilstichprobe Fahrradergometer (FE)

Auf dem Fahrradergometer wurden insgesamt 396 männliche und 152 weibliche Probanden ($N_{FE\text{gesamt}} = 548$) untersucht. Das Durchschnittsalter beträgt hierbei 39,4 ± 17,1 Jahre. Das durchschnittliche Körpergewicht beläuft sich auf 74,4 ± 11,5 kg bei einer durchschnittlichen Körperhöhe von 176,3 ± 9,5 cm und einem BMI von 23,9 ± 3,2 (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Anthropometrische Daten (MW ± SD) der Probanden auf dem Fahrradergometer Probanden unterteilt nach Geschlecht

	N	Prozent [%]	Alter [Jahre]	Gewicht [kg]	Größe [cm]	BMI [kg/m ²]
♂	396	72,3	36,0 ± 15,6	77,3 ± 10,1	180,3 ± 7,1	23,8 ± 2,7
♀	152	27,7	48,2 ± 17,7	66,7 ± 11,3	166,0 ± 6,5	24,2 ± 4,1
Σ	548	100	39,4 ± 17,1	74,4 ± 11,5	176,3 ± 9,5	23,9 ± 3,2

Spiroergometrische Parameter auf dem Fahrradergometer werden bei einer Teilstichprobe von 307 Personen erhoben. Das Durchschnittsalter beträgt hierbei 41,1 ± 18,8 Jahre. Das durchschnittliche Körpergewicht beläuft sich auf 73,9 ± 11,1 kg bei einer durchschnittlichen Körperhöhe von 175,5 ± 9,5 cm und einem resultierenden BMI von 24,0 ± 3,0. Die geschlechtsspezifischen Werte können der folgenden Tabelle 15 entnommen werden.

Tabelle 15: Anthropometrische Daten (MW \pm SD) der Probanden mit spiroergometrischer Untersuchung auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	Prozent [%]	Alter [Jahre]	Gewicht [kg]	Größe [cm]	BMI [kg/m ²]
♂	217	70,7	37,0 \pm 17,5	77,1 \pm 9,9	179,8 \pm 7,0	23,9 \pm 2,7
♀	90	29,3	51,2 \pm 18,1	66,2 \pm 10,2	165,2 \pm 6,3	24,3 \pm 3,7
Σ	307	100	41,1 \pm 18,8	73,9 \pm 11,1	175,5 \pm 9,5	24,0 \pm 3,0

Zum besseren Verständnis werden die zur Beantwortung der jeweiligen Fragestellungen verwendeten Teilstichproben in den jeweiligen Kapiteln detailliert beschrieben.

Bei einer vergleichenden Betrachtung der beiden Teilstichproben (LE_{gesamt} und FE_{gesamt}) ergeben sich insgesamt signifikante Unterschiede ($p \leq .01$) im Alter und beim BMI. Die Probanden auf dem Laufbandergometer sind signifikant jünger und können einen signifikant niedrigeren BMI aufweisen als die Probanden auf dem Fahrradergometer. Geschlechtsspezifisch sind die Unterschiede hauptsächlich bei den Frauen zu finden. Während bei den Männern signifikante Unterschiede ($p \leq .01$) beim Alter nachzuweisen sind, können bei den Frauen signifikante Unterschiede ($p \leq .01$) beim Alter, beim Gewicht und dadurch auch beim BMI nachgewiesen werden.

3.1.4 Methodenkritik

Die Untersuchungen wurden im Labor der leistungsdiagnostischen Abteilung durchgeführt. Dies hat einerseits den Vorteil, dass die Tests unter standardisierten Bedingungen und weitestgehend ohne Störgrößen erfolgen (vgl. Neumann, 1991), andererseits können jedoch Nervosität oder Unerfahrenheit der Probanden mit der Testsituation bzw. Testgeräten Abweichungen im Ergebnis hervorrufen. Dies kann beispielsweise zu erhöhten Werten vor allem in der Vorstartphase führen, die sich im Laufe der Untersuchung wieder normalisieren. Zusätzlich kann dies auch die Laufökonomie, hauptsächlich während der ersten Belastungsstufe auf dem Laufbandergometer, betreffen. Auf dem Fahrradergometer sind Abweichungen der Ergebnisse durch Eingewöhnungsprobleme nicht zu erwarten.

Wie im Forschungsstand (vgl. Kapitel 2.2.1.7) erwähnt weisen einzelne Studien darauf hin, dass das Testprotokoll bei der Beurteilung von Untersuchungsergebnissen zu berücksichtigen ist. Bei den beschriebenen Ausbelastungskriterien (Empfehlungen) wird jedoch nicht speziell zwischen Belastungsformen und -protokollen unterschieden. Auf dem Laufbandergometer wurden Protokolle mit gleichem Inkrement und gleicher Stufendauer verwendet. Lediglich die Anfangsgeschwindigkeit wurde an die aufgrund der Anamnese erwartete Leistungsfähigkeit der Probanden angepasst. Auf dem Fahrradergometer wurden ebenfalls die verschiedenen Anfangsbelastungen eines der 3 verwendeten Protokollarten zugeordnet, bei denen das Inkrement und die Stufendauer identisch waren (vgl. 3.1.1). Für einen besseren Überblick werden die Ergebnisse der jeweiligen Protokolle der Fahrradergometrie im Anhang V aufgeführt. In der Analyse bzw. der Diskussion erfolgt jedoch keine protokollabhängige Auswertung.

In der vorliegenden Stichprobe wurden nur Personen berücksichtigt, bei denen nach Beurteilung des Testleiters eine subjektive Ausbelastung vorlag. Zur Identifikation spezifischer Ausbelastungswerte (in Abhängigkeit von beispielsweise Alter, Geschlecht, Leistungsfähigkeit) wäre eine Gegenüberstellung der vorhandenen Werte mit den Werten von Probanden mit verfrühtem Testabbruch (submaximale Belastung) sinnvoll. Aufgrund der gegebenen Rahmenbedingungen mit den Probanden der leistungsdiagnostischen Abteilung des IfSS (vgl. Kapitel 3.1.3), war eine solche Analyse nicht möglich. Trotz der im Vergleich zu anderen Arbeiten großen Stichprobe, ist bei Betrachtung spezifischer Personengruppen (Geschlechts-, Alters- und Leistungsspezifisch) die jeweilige Zellengröße teilweise nicht mehr ausreichend, um genaue Aussagen treffen zu können. Aus diesem Grund werden die jeweiligen Fragestellungen hauptsächlich auf Basis der Gesamtstichprobe analysiert.

3.2 Ausbelastungskriterien

In dem folgenden Kapitel werden die ermittelten Ergebnisse zum Themenbereich der Ausbelastungskriterien dargestellt. Zuerst erfolgt eine Betrachtung der erhobenen Daten der Laufbandergometrie, gefolgt von den Ergebnissen der Fahrradergometrie. Aus den Ergebnissen der Literaturrecherche abgeleitet, werden dabei einige Parameter genauer analysiert, so der kardiozirkulatorische Parameter der Herzfrequenz, der metabolische Parameter der Laktatkonzentration sowie die respiratorischen Parameter rel. VO_{2peak} , RQ, $\dot{V}A$ und VE. Zusätzlich werden die genannten Parameter untereinander auf Zusammenhänge untersucht. Abschließend folgen eine summarische Übersicht der Ergebnisse und ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der Laufband- und der Fahrradergometrie.

Basierend auf den Empfehlungen, die bereits in Kapitel 2.2.1 (vgl. Tabelle 9) genannt werden, erfolgt im Folgenden eine Einteilung bzw. Bewertung der ermittelten Kenngrößen nach „weichen“ und „harten“ Ausbelastungskriterien. „Weiche“ Kriterien sind demnach:

- $Hf_{max} = 210$ -LA (Laufbandergometrie); 200-LA (Fahrradergometrie)
- $La_{Abbruch} \geq 8$ mmol/l
- $RQ_{Abbruch} \geq 1,0$
- $\dot{V}A_{Abbruch} > 30$

„Harte“ Kriterien werden definiert als

- $Hf_{max} = 220$ -LA (Laufbandergometrie); 210-LA (Fahrradergometrie)
- $La_{Abbruch} \geq 9$ mmol/l
- VO_{2max} - “leveling off”
- $RQ_{Abbruch} > 1,1$
- $\dot{V}A_{Abbruch} > 35$.

In der Ergebnisdarstellung sowie in der Diskussion wird hinsichtlich „weichen“ und „harten“ Ausbelastungskriterien unterschieden.

3.2.1 Laufbandergometrie

Die 507 auf dem Laufbandergometer untersuchten Probanden erreichten eine durchschnittliche Laufgeschwindigkeit (v) an den aeroben Schwellen von $8,4 \pm 1,6$ km/h (v_{LT}) bzw. von $9,1 \pm 2,4$ km/h ($v_{2\text{mmol/l}}$). Die Laufgeschwindigkeit an den anaeroben Schwellen lag bei $11,3 \pm 1,9$ km/h (v_{IAS}) bzw. bei $12,0 \pm 2,1$ km/h ($v_{4\text{mmol/l}}$). Bei 7 Probanden wurde ein Laktatwert < 4 mmol/l bei Testabbruch ermittelt, deswegen gingen bei der Laufgeschwindigkeit an der fixen 4mmol/l-Schwelle nur 500 Probanden in die Analyse ein. Die maximale Laufgeschwindigkeit lag im Durchschnitt bei $14,7 \pm 2,3$ km/h (v_{max}). Zum besseren Verständnis der erzielten Ergebnisse werden die ermittelten Leistungskenngrößen in der nachfolgenden Tabelle 16 nach Geschlecht und Altersgruppen unterteilt dargestellt.

Tabelle 16: Durchschnittliche Laufgeschwindigkeit (v) in km/h auf dem Laufbandergometer an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 4mmol/l) Schwellen sowie bei Testabbruch

	Alter [Jahre]		v_{LT} [km/h]	$v_{2\text{mmol/l}}$ [km/h]	v_{IAS} [km/h]	$v_{4\text{mmol/l}}$ [km/h]	v_{max} [km/h]
♂	≤ 20	N	89	89	89	89	89
		MW	9,0	9,7	12,1	12,9	15,9
		SD	± 1,3	± 2,2	± 1,5	± 1,6	± 1,7
	21-30	N	121	121	121	120	121
		MW	9,0	9,8	12,3	13,0	16,2
		SD	± 1,5	± 2,3	± 1,7	± 1,9	± 1,7
31-40	N	88	88	88	87	88	
	MW	8,5	9,4	11,5	12,1	15,0	
	SD	± 1,4	± 2,4	± 1,7	± 2,1	± 1,8	
41-50	N	67	67	67	67	67	
	MW	8,3	8,9	11,3	11,9	14,4	
	SD	± 1,4	± 2,5	± 1,6	± 1,8	± 1,7	
> 50	N	17	17	17	17	17	
	MW	7,6	7,9	10,4	10,9	13,3	
	SD	± 1,4	± 1,8	± 1,6	± 1,8	± 2,1	
	Σ	N	382	382	382	380	382
		MW	8,7	9,5	11,8	12,5	15,4
		SD	± 1,5	± 2,4	± 1,7	± 1,9	± 1,9
♀	≤ 20	N	12	12	12	11	12
		MW	6,9	7,7	9,1	9,4	11,9
		SD	± 1,0	± 2,0	± 1,7	± 2,6	± 1,9
	21-30	N	42	42	42	38	42
		MW	7,3	8,3	10,0	10,8	12,9
		SD	± 1,4	± 2,2	± 1,7	± 1,9	± 1,9
31-40	N	28	28	28	28	28	
	MW	8,0	8,9	10,7	11,3	13,4	
	SD	± 1,4	± 2,4	± 1,7	± 1,9	± 1,8	

	41-50	N	37	37	37	37	37
		MW	7,3	7,6	9,8	10,3	12,1
		SD	± 1,6	± 2,1	± 2,0	± 2,1	± 2,3
	> 50	N	6	6	6	6	6
		MW	6,8	6,9	8,7	8,9	11,0
		SD	± 2,2	± 2,1	± 2,5	± 2,8	± 2,0
Σ	Σ	N	125	125	125	120	125
		MW	7,4	8,1	10,0	10,5	12,6
		SD	± 1,5	± 2,2	± 1,8	± 2,1	± 2,1
Σ	Σ	N	507	507	507	500	507
		MW	8,4	9,1	11,3	12,0	14,7
		SD	± 1,6	± 2,4	± 1,9	± 2,1	± 2,3

Bei den männlichen Probanden fällt auf, dass die maximale Laufgeschwindigkeit sowie die erbrachte Leistung an den aeroben und anaeroben Schwellen in der Altersgruppe der 21-30 Jährigen am höchsten ist, knapp gefolgt von den unter 21 Jährigen. Daraufhin nimmt die Leistung mit zunehmendem Alter ab. Der Leistungsabfall bezüglich der maximalen Laufgeschwindigkeit beträgt bei den 31-40 Jährigen 7 %, bei den 41-50 Jährigen 11 % sowie insgesamt 18 % bei den über 50 Jährigen. Bei den weiblichen Probanden steigt die Leistung bis zu einem Höhepunkt in der 3. Altersgruppe (31-40 Jahre) an und fällt bei den 41-50 Jährigen wieder um 10 % sowie bei den über 50 Jährigen um 18 % ab. Der Vergleich erfolgte jeweils zur leistungsstärksten Altersgruppe.

In den folgenden Kapiteln zur Analyse der einzelnen Parameter werden die einzelnen Altersgruppen nicht explizit aufgeführt. An dieser Stelle sei jedoch erwähnt, dass hohe Unterschiede hinsichtlich Minima und Maxima aufgrund der großen Altersspanne (Randgruppen 13-80 Jahre) auftreten können. In Kapitel 3.2.1.8 zeigt Tabelle 24 eine Übersicht aller Parameter hinsichtlich Geschlecht und Altersgruppe.

3.2.1.1 Analyse der Herzfrequenz in der Ausbelastung

In der Literatur wird als ein Ausbelastungskriterium auf dem Laufbandergometer für die maximale Herzfrequenz die Formel 220 minus Lebensalter beschrieben (vgl. Meyer & Kindermann, 1999, Steinacker et al., 2002). Zahlreiche weitere Studien kommen auf leicht veränderte Formeln (vgl. Tabelle 8), jedoch hat sich die erwähnte Schätzformel im deutschsprachigen Raum durchgesetzt.

Bei Anwendung der Formel 220-LA, erreichen 264 der getesteten 507 Probanden (52,1 %) dieses „harte“ Ausbelastungskriterium. Bei der „weichen“ Alternative mit ± 10 S/min erreichen 450 von 507 Probanden (88,8 %) dieses modifizierte Ausbelastungskriterium. Die Probanden, die mit Hf_{\max} -Werten über den nach diesen Formeln berechneten Abbruchwerten liegen, konnten durchschnittlich noch zusätzlich 8 S/min (+ 3,7 %) bei 220-LA und 12 S/min (+ 5,7 %) bei 210-LA zulegen.

Hinsichtlich der maximalen Herzfrequenz auf dem Laufbandergometer ergeben sich in der Literatur Grenzwerte von 177 S/min ($\bar{\varnothing}$ 39,3 Jahre) bzw. 192 S/min ($\bar{\varnothing}$ 24,0 Jahre) (vgl. Tabelle 9). In der vorliegenden empirischen Untersuchung wurden im Mittel Hf_{\max} -Werte von $189,0 \pm 12,0$ S/min bei einem durchschnittlichen Alter von 31,5 Jahren ermittelt. Zum besseren Überblick ist in nachstehender Tabelle 17 das Alter, die maximale Herzfrequenz, Minimum und Maximum nach Geschlecht getrennt sowie in Summe aufgeführt.

Tabelle 17: Maximale Herzfrequenz (MW \pm SD), Minimum und Maximum in S/min auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	Alter [Jahre]	Hf_{\max} [S/min]	Minimum [S/min]	Maximum [S/min]
♂	382	30,5 $\pm 11,5$	189,9 $\pm 11,6$	146	223
♀	125	34,6 $\pm 10,6$	186,4 $\pm 12,0$	152	215
Σ	507	31,5 $\pm 11,4$	189,0 $\pm 12,0$	146	223

3.2.1.2 Analyse der Laktatkonzentrationen in der Ausbelastung

Bezüglich der Laktatkonzentration bei Testabbruch werden in der Literatur einheitliche Werte von ≥ 8 mmol/l (vgl. Meyer & Kindermann, 1999, Hollmann & Hettinger, 2000, Steinacker et al., 2002, De Marées, 2003) bzw. von ≥ 9 mmol/l (Dickhuth et al., 2011) angegeben. Von 507 Probanden erreichen 268 (52,9 %) das „harte“ Ausbelastungskriterium von ≥ 9 mmol/l. Nimmt man die Herangehensweise mit La-Werten von ≥ 8 mmol/l erhöht sich die Anzahl der Probanden auf 336 (66,3 %). Die Probanden, die maximale La-Werte bei Testabbruch über den angegebenen Abbruchwerten aufweisen, konnten durchschnittlich noch zusätzlich 1,7 mmol/l (+ 18,4 %) bei der 9 mmol/l-Grenze und 2,2 mmol/l (+ 27,9 %) bei der 8 mmol/l-Grenze tolerieren.

Die im Forschungsstand dargestellten Grenzwerte der Laktatkonzentration liegen bei einem Stufentest zwischen 9,0 mmol/l (♂♀, Ø 24 Jahre, n=40) und 14,3 mmol/l (♂, Ø 24 Jahre, n=10) (vgl. Tabelle 9). Die Ergebnisse sind insgesamt abhängig von Alter, Geschlecht und Leistungsfähigkeit und werden aufgrund der Vollständigkeit aufgeführt. In dieser Arbeit wurden bei den 507 Probanden auf dem Laufbandergometer durchschnittliche Laktatwerte bei Testabbruch von $9,0 \pm 2,3$ mmol/l ermittelt (vgl. Tabelle 18).

Tabelle 18: Laktatkonzentrationen bei Testabbruch (MW \pm SD), Minimum und Maximum in mmol/l auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	La _{Abbruch} [mmol/l]	Minimum [mmol/l]	Maximum [mmol/l]
♂	382	9,3 $\pm 2,1$	3,1	15,3
♀	125	8,0 $\pm 2,3$	2,8	15,2
Σ	507	9,0 $\pm 2,3$	2,8	15,3

3.2.1.3 Analyse der maximalen Sauerstoffaufnahme in der Ausbelastung

Als Ausbelastungskriterium wird für die VO_{2max} das „leveling off“ beschrieben. Diese Plateaubeschreibung wird definiert bei einem kleineren O_2 -Anstieg als 150 ml/min in der letzten Belastungsminute (vgl. Tabelle 7 & Tabelle 9). Von VO_{2peak} wird gesprochen, wenn kein „leveling off“ vorliegt. Im weiteren Verlauf wird der Begriff VO_{2peak} verwendet, da nicht ausschließlich ein „leveling off“ erreicht wurde.

Von den 507 Probanden auf dem Laufbandergometer wurde bei 97 Probanden eine spiroergometrische Untersuchung durchgeführt. Deshalb kann bei den respiratorischen Parameter (VO_{2peak} , RQ, AÄ und VE) nur ein Teil der gesamten Stichprobe verwendet werden. Insgesamt wiesen 67 von 97 Probanden (69,1 %) ein „leveling off“ auf.

Die absoluten Werte der VO_{2peak} in den Vergleichsstudien betragen 3,8 l/min (♂♀, Ø 24 Jahre, n=40) bis 4,3 l/min (♂, Ø 24 Jahre, n=10). Hierbei erreichen 30 bis 60 % der Probanden ein „leveling off“ (vgl. Tabelle 9). Im Durchschnitt liegen die Ergebnisse der eigenen Untersuchung bei $3,9 \pm 0,9$ l/min. Die relative VO_{2peak} beläuft sich auf $52,1 \pm 8,9$ ml/min/kg (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19: Maximale Sauerstoffaufnahme (MW \pm SD), Minimum und Maximum in l/min (abs.) bzw. ml/min/kg (rel.) auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	Abs. VO _{2peak} [l/min]	Minimum [l/min]	Maximum [l/min]	Rel. VO _{2peak} [ml/min/kg]	Minimum [ml/min/kg]	Maximum [ml/min/kg]
♂	77	4,2 \pm 0,6	2,9	5,7	54,3 \pm 7,8	35,0	69,0
♀	20	2,6 \pm 0,3	1,9	3,2	43,6 \pm 7,6	27,0	54,0
Σ	97	3,9 \pm 0,9	1,9	5,7	52,1 \pm 8,9	27,0	69,0

3.2.1.4 Analyse des respiratorischen Quotienten in der Ausbelastung

Für den dimensionslosen respiratorischen Quotienten wird als Ausbelastungskriterium der Wert $> 1,10$ (vgl. Meyer & Kindermann, 1999, Steinacker et al., 2002) bzw. $\geq 1,00$ mmol/l (Dickhuth et al., 2011) angegeben.

Wie oben beschrieben steht bei diesem Parameter ebenfalls eine Teilstichprobe von 97 Probanden zur Verfügung. Davon erreichen 47 Probanden (48,5 %) das Ausbelastungskriterium $RQ > 1,10$ und 90 Probanden (92,8 %) das „weiche“ Kriterium $RQ \geq 1,00$. Die Probanden, die maximale RQ-Werte bei Testabbruch über den angegebenen Abbruchwerten aufweisen, konnten durchschnittlich noch zusätzlich 0,08 (+ 7,5 %) bei einem $RQ > 1,10$ und 0,12 (+ 12,2 %) bei einem $RQ \geq 1,00$ zulegen.

Die Grenzwerte liegen laut den vorgestellten Studien bei 1,06 bzw. bei 1,28 (vgl. Tabelle 9). Der Mittelwert der 97 Probanden dieser Untersuchung beläuft sich auf einen RQ von $1,11 \pm 0,09$. Die folgende Tabelle 20 zeigt die durchschnittlichen RQ-Werte sowie Minimum und Maximum auf dem Laufbandergometer.

Tabelle 20: Respiratorischer Quotient bei Testabbruch (MW \pm SD), Minimum und Maximum auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	RQ _{Abbruch}	Minimum	Maximum
♂	77	1,11 \pm 0,09	0,94	1,35
♀	20	1,11 \pm 0,10	0,93	1,31
Σ	97	1,11 \pm 0,09	0,93	1,35

3.2.1.5 Analyse des Atemäquivalents in der Ausbelastung

Der Wert als Kriterium zur Beurteilung einer Ausbelastung liegt hinsichtlich des Atemäquivalents bei $\text{AÄ} > 35$ (vgl. Meyer & Kindermann, 1999) bzw. $\text{AÄ} > 30-35$ (Hollmann & Hettinger, 2000, Boldt et al., 2002, Steinacker et al., 2002).

Aus der Teilstichprobe erreichen 17 Probanden (17,5 %) die Vorgabe des „harten“ Ausbelastungskriterium von $\text{AÄ} > 35$ und 60 Probanden (61,9 %) erreichen die Grenze bei einem $\text{AÄ} > 30$. Die Probanden, die maximale AÄ -Werte bei Testabbruch über den angegebenen Abbruchwerten aufweisen, konnten durchschnittlich noch zusätzlich 2,2 (+ 6,4 %) bei einem $\text{AÄ} > 35$ und 3,3 (+ 11,0 %) bei einem $\text{AÄ} > 30$ zulegen.

In dieser Arbeit wurden bei den 97 Probanden auf dem Laufbandergometer durchschnittliche AÄ -Werte bei Testabbruch von $31,2 \pm 4,2$ ermittelt (vgl. Tabelle 21).

Tabelle 21: Maximaler Atemäquivalent (MW \pm SD), Minimum und Maximum auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	AÄ_{max}	Minimum	Maximum
♂	77	31,0 $\pm 4,2$	21,3	43,4
♀	20	32,0 $\pm 4,1$	23,7	38,8
Σ	97	31,2 $\pm 4,2$	21,3	43,4

3.2.1.6 Analyse des Atemminutenvolumens in der Ausbelastung

Für das Atemminutenvolumen wird als Ausbelastungskriterium der Wert 100 l/min für Männer und 75 l/min für Frauen (vgl. Hollmann & Hettinger, 2000) angegeben.

Von den 97 Probanden aus der Teilstichprobe erreichen bei den Männern (N = 77) 56 Probanden (72,7 %) das Ausbelastungskriterium $\text{VE} \geq 100$ l/min und bei den Frauen (N = 20) 9 Probanden (45,0 %) das Kriterium $\text{VE} \geq 75$ l/min.

Die in der Literatur beschriebenen Grenzwerte liegen bei 115 l/min (♂♀ gemischt) bzw. bei 150,7 l/min (nur ♂) (vgl. Tabelle 9). Der Mittelwert der 97 Probanden der vorliegenden Untersuchung beläuft sich auf ein VE von $100,9 \pm 22,2$ l/min (vgl. Tabelle 22). Das VE wird aufgrund der schlechten Ver-

gleichbarkeit mit den in der Literatur genannten Werten und der fehlenden Relevanz nicht weiter berücksichtigt.

Tabelle 22: Maximales Atemminutenvolumen (MW \pm SD), Minimum und Maximum in l/min auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	VE _{max} [l/min]	Minimum [l/min]	Maximum [l/min]
♂	77	108,5 \pm 17,1	60,8	142,6
♀	20	71,4 \pm 13,2	43,2	90,7
Σ	97	100,9 \pm 22,2	43,2	142,6

3.2.1.7 Zusammenhänge

Die Analyse der einzelnen Zusammenhänge ist sehr komplex, da sich die Einzelfaktoren teilweise physiologisch bedingen oder identische „Primärparameter“ enthalten (beispielsweise VO₂ im RQ und AÄ bzw. direkter Einfluss der La-Konzentration auf die Atemfrequenz und damit das im AÄ enthaltene VE). Aus diesem Grund werden die *Korrelationsberechnungen nach Pearson* der Vollständigkeit halber aufgeführt, jedoch nicht weiter diskutiert.

Bei den Männern zeigen sich signifikante Zusammenhänge zwischen den Ausbelastungswerten der Herzfrequenz, der Laktatkonzentration und der relativen Sauerstoffaufnahme. Zudem besteht eine signifikante Korrelation zwischen dem respiratorischen Quotienten und dem Atemäquivalent bei Testabbruch. Bei den Frauen kann ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem respiratorischen Quotienten und dem Atemäquivalent bei Testabbruch ermittelt werden. Zusätzlich besteht jeweils ein signifikanter Zusammenhang zwischen den Ausbelastungswerten der Herzfrequenz, der Laktatkonzentration und dem respiratorischen Quotienten. In folgender Tabelle 23 können die Korrelationen der Ausbelastungskriterien eingesehen werden.

Tabelle 23: Korrelationsüberprüfung der Ausbelastungskriterien nach Pearson auf dem Laufbandergometer

♂ \ ♀	Hf _{max}	La _{Abbruch}	Rel. VO _{2peak}	RQ _{Abbruch}	AÄ _{Abbruch}
Hf _{max}	1	,40** N = 125	,44 N = 20	,63** N = 20	,15 N = 20
La _{Abbruch}	,21** N = 382	1	,26 N = 20	,54* N = 20	,40 N = 20
Rel. VO _{2peak}	,29** N = 77	,24* N = 77	1	,06 N = 20	,04 N = 20
RQ _{Abbruch}	,01 N = 77	,08 N = 77	-,16 N = 77	1	,52* N = 20
AÄ _{Abbruch}	-,06 N = 77	,03 N = 77	-,22 N = 77	,69** N = 77	1

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

3.2.1.8 Übersicht der analysierten Ausbelastungsparameter auf dem Laufbandergometer

In der nachstehenden Tabelle 24 werden die analysierten Parameter (Hf, La, rel. VO₂, RQ und AÄ) unterteilt nach Geschlecht und Altersgruppen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 24: Übersicht der maximal erreichten Werte bei Testabbruch auf dem Laufbandergometer

	Alter [Jahre]		Hf _{max} [S/min]	La _{Abbruch} [mmol/l]	Rel. VO _{2peak} [ml/min/kg]	RQ _{Abbruch}	AÄ _{Abbruch}
♂	≤ 20	N	89	89	5	5	5
		MW SD	199,6 ± 8,1	9,4 ± 2,3	61,4 ± 3,9	1,03 ± 0,05	28,8 ± 5,0
	21-30	N	121	121	36	36	36
		MW SD	191,3 ± 8,4	9,8 ± 2,1	57,0 ± 6,6	1,10 ± 0,09	30,2 ± 3,4
	31-40	N	88	88	16	16	16
		MW SD	186,6 ± 11,2	9,2 ± 2,0	54,1 ± 5,1	1,12 ± 0,09	29,9 ± 4,7
	41-50	N	67	67	17	17	17
MW SD		182,9 ± 10,5	8,5 ± 1,9	49,2 ± 8,2	1,16 ± 0,07	33,7 ± 3,9	
> 50	N	17	17	3	3	3	
	MW SD	174,2 ± 11,0	8,5 ± 2,2	39,3 ± 1,2	1,09 ± 0,05	34,7 ± 2,5	
Σ	N	382	382	77	77	77	
	MW SD	189,9 ± 11,6	9,3 ± 2,1	54,3 ± 7,8	1,11 ± 0,09	31,0 ± 4,2	

♀	≤ 20	N	12	12	1	1	1
		MW	201,5	8,9	44,0	1,31	31,5
		SD	± 5,8	± 2,5			
	21-30	N	42	42	14	14	14
		MW	190,1	8,2	45,4	1,09	31,4
		SD	± 12,2	± 2,7	7,3	0,09	3,8
31-40	N	28	28	1	1	1	
	MW	185,8	8,4	41,0	1,25	32,0	
	SD	± 7,2	± 2,1				
41-50	N	37	37	3	3	3	
	MW	180,4	7,2	37,3	1,08	32,8	
	SD	± 9,4	± 2,0	± 10,5	± 0,05	± 6,9	
> 50	N	6	6	1	1	1	
	MW	169,8	8,1	38,0	1,13	38,0	
	SD	± 10,6	± 1,7				
Σ	N	125	125	20	20	20	
	MW	186,4	8,0	43,6	1,11	32,0	
	SD	± 12,0	± 2,3	± 7,6	± 0,10	± 4,1	
Σ	N	507	507	97	97	97	
	MW	189,0	9,0	52,1	1,11	31,2	
	SD	± 12,0	± 2,3	± 8,9	± 0,09	± 4,2	

Als Grundlage für die Diskussion (vgl. Kapitel 3.2.4) werden zusätzlich die prozentualen Abweichungen zwischen den Angaben aus der Literatur und den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung sowie die zusätzlich erbrachte Leistung der Probanden, die Werte über jene Vorgaben hinaus erreichen konnten, in Tabelle 25 aufgeführt. Zur besseren Übersicht sind die „harten“ Kriterien hellblau eingefärbt.

Tabelle 25: Vergleich von Ausbelastungskriterien aus der Literatur und die in der vorliegenden Untersuchung erreichten Werte auf dem Laufbandergometer

	Hf _{max} [S/min]		La _{Abbruch} [mmol/l]		Rel.VO _{2peak} [ml/min/kg]	RQ _{Abbruch}		AÄ _{Abbruch}	
	„weich“	„hart“	„weich“	„hart“	„hart“	„weich“	„hart“	„weich“	„hart“
Vorgabe Literatur	210-LA	220-LA	≥ 8,0	≥ 9,0	Leveling off	≥ 1,0	> 1,1	> 30	> 35
Eigene Studie ¹	88,8 %	52,1 %	66,3 %	52,9 %	69,1 %	92,8 %	48,5 %	61,9 %	17,5 %
Zusätzl. Leistung ²	5,7 %	3,7 %	27,9 %	18,4 %	-	12,2 %	7,5 %	11,0 %	6,4 %

¹: Probanden (in %) der vorliegenden Untersuchung, die die Vorgabe der Literatur erreichen konnten

²: Zusätzlich erreichte Leistung (in %) der Probanden, die Werte über den Vorgaben der Literatur aufweisen

3.2.2 Fahrradergometrie

In den folgenden Kapiteln wird auf die Untersuchungen der Fahrradergometrie eingegangen. Wie bereits in Kapitel 3.1.1 beschrieben, werden für unterschiedliche Ziel- bzw. Leistungsgruppen verschiedene Belastungsprotokolle verwendet. Da bei allen Protokollen von einer Ausbelastung der Probanden ausgegangen wird, steht die Betrachtung der Ergebnisse der Gesamtstichprobe auf dem Fahrradergometer im Vordergrund. Zur besseren Übersicht findet sich eine Unterteilung der absolvierten Testprotokolle im Anhang V, im Folgenden wird jedoch die Gesamtbetrachtung vorgestellt. Hierbei erfolgt die Analyse der Leistungskenngrößen der aeroben und anaeroben Schwellen sowie der maximalen Leistung.

Bei Betrachtung der Ergebnisse ohne Berücksichtigung der verschiedenen Testprotokolle kann auf eine Stichprobengröße von 548 Probanden zurückgegriffen werden. Die Probanden der Gesamtstichprobe erreichen eine durchschnittliche Leistung (P) an den aeroben Schwellen von $119,9 \pm 41,6$ Watt (P_{LT}) bzw. von $149,3 \pm 60,9$ Watt ($P_{2\text{mmol/l}}$). Die Leistung an den anaeroben Schwellen liegt bei $168,8 \pm 55,8$ Watt (P_{IAS}) bzw. bei $183,5 \pm 63,4$ Watt ($P_{3\text{mmol/l}}$). Bei Testabbruch wurde bei einem Probanden ein Laktatwert < 2 mmol/l und bei 9 Probanden < 3 mmol/l ermittelt, deswegen konnten bei der Leistung an den fixen Schwellen (2 bzw. 3mmol/l) nur 547 respektive 539 Probanden erfasst werden. Das Gleiche gilt auch bei der Leistung der individuellen anaeroben Schwelle. 3 Probanden konnten keinen Laktatwert erreichen, der in der Addition von LT plus $1,0$ mmol/l liegt. Die maximale Leistung (P_{max}) liegt im Durchschnitt bei $256,0 \pm 85,4$ Watt.

Folgender Tabelle 26 sind die ermittelten Leistungskenngrößen der gesamten Stichprobe der Fahrradergometrie zu entnehmen.

Tabelle 26: Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (Gesamtstichprobe) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch

	Alter [Jahre]		P _{LT} [Watt]	P _{2mmol/l} [Watt]	P _{IAS} [Watt]	P _{3mmol/l} [Watt]	P _{max} [Watt]
♂	≤ 20	N	29	29	29	29	29
		MW	166,9	207,7	229,3	246,8	336,6
		SD	± 27,1	± 55,8	± 37,0	± 43,2	± 49,6
	21-30	N	178	178	178	178	178
		MW	138,5	174,0	193,6	212,0	307,2
		SD	± 33,0	± 50,9	± 42,5	± 51,1	± 51,0
	31-40	N	55	55	55	55	55
MW		148,8	189,6	209,9	228,2	322,6	
SD		± 34,5	± 53,8	± 45,0	± 49,8	± 56,7	
41-50	N	53	53	53	52	53	
	MW	140,5	171,2	198,4	210,9	300,1	
	SD	± 31,5	± 56,3	± 41,1	± 49,6	± 52,4	
> 50	N	81	81	81	79	81	
	MW	106,9	132,3	150,9	164,3	216,4	
	SD	± 31,3	± 48,0	± 41,9	± 47,7	± 58,1	
Σ	N	396	396	396	393	396	
	MW	135,8	169,7	190,4	207,1	292,0	
	SD	± 36,1	± 55,8	± 47,5	± 54,7	± 66,2	
♀	≤ 20	N	7	7	7	7	7
		MW	98,0	126,1	137,4	150,4	222,4
		SD	± 32,7	± 49,4	± 44,1	± 49,8	± 53,9
	21-30	N	35	35	35	35	35
		MW	96,8	120,3	136,7	147,1	213,5
		SD	± 22,7	± 39,8	± 30,6	± 38,5	± 39,7
	31-40	N	8	8	8	8	8
MW		87,0	113,2	124,4	137,8	210,5	
SD		± 14,1	± 25,1	± 20,0	± 22,6	± 22,8	
41-50	N	21	21	21	21	21	
	MW	75,8	92,3	108,2	115,7	165,2	
	SD	± 15,7	± 32,1	± 22,1	± 30,6	± 46,7	
> 50	N	81	80	78	75	81	
	MW	68,6	81,4	97,4	103,6	129,7	
	SD	± 14,7	± 25,4	± 18,3	± 23,3	± 30,2	
Σ	N	152	151	149	146	152	
	MW	78,4	95,7	111,5	119,9	162,4	
	SD	± 21,6	± 35,7	± 29,1	± 35,6	± 52,3	
Σ	N	548	547	545	539	548	
	MW	119,9	149,3	168,8	183,5	256,0	
	SD	± 41,6	± 60,9	± 55,8	± 63,4	± 85,4	

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass auf dem Fahrradergometer bei den männlichen Probanden die jüngste Altersgruppe (≤ 20 Jahre) die höchste maximale Leistung erbringt. Danach folgen die 31-40 Jährigen, dann erst die 21-30 Jährigen. Bei den weiblichen Probanden ist festzustellen, dass ebenfalls die jüngste Altersgruppe die höchste Leistung liefert. Der Leistungsabfall erfolgt daraufhin kontinuierlich mit dem Alter.

In den folgenden Kapiteln zur Analyse der einzelnen Parameter wird zunächst nicht nach Altersgruppen unterschieden. Die Stichprobe beinhaltet, wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, eine Altersspanne von 13 bis 80 Jahren sowie verschiedene Leistungsbereiche (Anfänger - Freizeitsportler - Leistungssportler). Deshalb treten bei den jeweiligen Ausbelastungsparametern sehr hohe Spannbereiche zwischen Minima und Maxima auf. In Kapitel 3.2.2.8 zeigt Tabelle 34 eine Übersicht aller Parameter unterteilt nach Geschlecht und Altersgruppe. Eine Aufteilung der unterschiedlichen Belastungsprotokolle findet sich im Anhang V.

3.2.2.1 Analyse der Herzfrequenz in der Ausbelastung

In der Literatur wird als ein Ausbelastungskriterium auf dem Fahrradergometer für die maximale Herzfrequenz die Formel 210 minus Lebensalter beschrieben (vgl. Meyer & Kindermann, 1999, Steinacker et al., 2002). Zahlreiche weitere Studien kommen auf leicht veränderte Formeln (vgl. Tabelle 8), jedoch hat sich die erwähnte Schätzformel im deutschsprachigen Raum durchgesetzt.

Bei diesem Parameter kann auf die komplette Stichprobe von 548 Probanden zurückgegriffen werden. Unter Verwendung der Formel 210-LA erreichen 394 von 548 untersuchten Probanden (71,9 %) dieses Ausbelastungskriterium. Wird das Kriterium mit ± 10 S/min gelockert, erreichen 499 von 548 Probanden (91,1 %) dieses modifizierte Ausbelastungskriterium. Die Probanden, die mit Hf_{\max} -Werten über dem nach diesen Formeln berechneten Abbruchwert liegen, konnten noch zusätzlich 12 S/min (+ 5,5 %) bei 210-LA bzw. 18 S/min (+ 9,0 %) bei 200-LA zulegen.

Hinsichtlich der maximalen Herzfrequenz auf dem Fahrradergometer ergeben sich in der Literatur Grenzwerte von 182 bis 190 S/min (vgl. Tabelle 9). In der hier vorliegenden empirischen Untersuchung wurden durchschnittliche Hf_{\max} -Werte von $176,3 \pm 19,1$ S/min ermittelt. Zum besseren Überblick sind in nachstehender Tabelle 27 die maximale Herzfrequenz, Minimum und Maximum nach Geschlecht getrennt aufgeführt. Die weiteren Tabellen der einzelnen Parameter auf dem Fahrradergometer zeigen den gleichen Aufbau.

Tabelle 27: Maximale Herzfrequenz (N, MW \pm SD), Minimum und Maximum in S/min auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	Hf _{max} [S/min]	Minimum [S/min]	Maximum [S/min]
♂	396	180,3 \pm 16,4	115	212
♀	152	165,8 \pm 21,4	105	203
Σ	548	176,3 \pm 19,1	105	212

3.2.2.2 Analyse der Laktatkonzentrationen in der Ausbelastung

Im Zusammenhang mit der Laktatkonzentration bei Testabbruch wurden, laut beschriebener Literatur, einheitliche Werte von ≥ 8 mmol/l (vgl. Meyer & Kindermann, 1999, Hollmann & Hettinger, 2000, Steinacker et al., 2002, De Marées, 2003) bzw. von ≥ 9 mmol/l (Dickhuth et al., 2011) angegeben. Von 548 Probanden erreichen 276 (50,4 %) das Ausbelastungskriterium von ≥ 9 mmol/l. Nimmt man die Herangehensweise mit La-Werten von ≥ 8 mmol/l erhöht sich die Anzahl der Probanden auf 342 (62,4 %). Die Probanden, die maximale Laktatwerte bei Testabbruch über den angegebenen Abbruchwerten aufweisen, konnten durchschnittlich noch zusätzlich 2,1 mmol/l (+ 23,8 %) bei der 9 mmol/l-Grenze und 2,6 mmol/l (+ 32,5 %) bei der 8 mmol/l-Grenze tolerieren.

Die im Forschungsstand dargestellten Grenzwerte der Laktatkonzentration liegen zwischen 7,1 und 11,5 mmol/l (vgl. Tabelle 9). In dieser Arbeit wurden bei den 548 Probanden auf dem Fahrradergometer durchschnittliche La-Werte bei Testabbruch von $8,8 \pm 3,0$ mmol/l ermittelt (vgl. Tabelle 28).

Tabelle 28: Laktatkonzentrationen bei Testabbruch (N, MW \pm SD), Minimum und Maximum in mmol/l auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	La _{Abbruch} [mmol/l]	Minimum [mmol/l]	Maximum [mmol/l]
♂	396	9,4 \pm 2,7	2,0	17,7
♀	152	7,0 \pm 3,0	1,5	15,8
Σ	548	8,8 \pm 3,0	1,5	17,7

3.2.2.3 Analyse der maximalen Sauerstoffaufnahme in der Ausbelastung

Als Ausbelastungskriterium wird auch bei der Fahrradergometrie für die VO_{2max} das „leveling off“ beschrieben. Diese Plateaubeschreibung wird definiert bei einem kleineren O_2 -Anstieg als 150 ml/min in der letzten Belastungsminute (vgl. Tabelle 7 & Tabelle 9). Von VO_{2peak} wird gesprochen, wenn kein „leveling off“ vorliegt. Im weiteren Verlauf wird wie bei der Laufbandergometrie der Begriff VO_{2peak} verwendet, da nicht ausschließlich ein „leveling off“ erreicht wurde.

Von den 548 Probanden auf dem Fahrradergometer wurden bei 307 Probanden spiroergometrische Untersuchungen durchgeführt. Deshalb kann bei den respiratorischen Parameter (VO_{2peak} , RQ, $\dot{V}A$ und VE) nur ein Teil der gesamten Stichprobe verwendet werden. Die absoluten Werte der VO_{2peak} in den Vergleichsstudien betragen 4,0 bis 4,2 l/min (vgl. Tabelle 9). Hierbei erreichen 58 bis 92 % der Probanden ein „leveling off“. Im Durchschnitt liegen die Ergebnisse der eigenen Untersuchung bei $3,1 \pm 1,0$ l/min. Die relative VO_{2peak} beläuft sich auf $42,0 \pm 13,2$ ml/min/kg. Insgesamt weisen 219 Probanden von 307 (71,3 %) ein „leveling off“ auf. Der folgenden Tabelle 29 können die einzelnen Werte bezüglich der maximalen Sauerstoffaufnahme entnommen werden.

Tabelle 29: Maximale Sauerstoffaufnahme (N, MW \pm SD), Minimum und Maximum in l/min (abs.) bzw. (ml/min/kg) auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	Abs. VO_{2peak} [l/min]	Minimum [l/min]	Maximum [l/min]	Rel. VO_{2peak} [ml/min/kg]	Minimum [ml/min/kg]	Maximum [ml/min/kg]
♂	217	3,6 $\pm 0,8$	1,5	5,6	46,8 $\pm 11,4$	17,3	71,0
♀	90	2,0 $\pm 0,6$	1,1	4,1	30,5 $\pm 9,5$	16,5	66,0
Σ	307	3,1 $\pm 1,0$	1,1	5,6	42,0 $\pm 13,2$	16,5	71,0

3.2.2.4 Analyse des respiratorischen Quotienten in der Ausbelastung

Für den dimensionslosen respiratorischen Quotienten wird als Ausbelastungskriterium der Wert $> 1,10$ (vgl. Meyer & Kindermann, 1999, Steinacker et al., 2002) bzw. $\geq 1,00$ mmol/l (Dickhuth et al., 2011) angegeben.

Wie oben bereits beschrieben steht bei diesem Parameter ebenfalls eine Teilstichprobe von 307 Probanden zur Verfügung. Davon erreichen 202 Probanden (65,8 %) das Ausbelastungskriterium $RQ > 1,10$ und 289 Probanden (94,1 %) das Kriterium $RQ \geq 1,00$. Die Probanden, die maximale RQ-Werte bei Testabbruch über den angegebenen Abbruchwerten aufweisen, konnten durchschnittlich noch zusätzlich 0,09 (8,2 %) bei einem $RQ > 1,10$ und 0,15 (15,0 %) bei einem $RQ \geq 1,00$ zulegen.

Die Grenzwerte liegen laut den vorgestellten Studien zwischen 1,11 und 1,23 (vgl. Tabelle 9). Der Mittelwert der 307 Probanden dieser Untersuchung beläuft sich auf einen RQ von $1,14 \pm 0,10$ (vgl. Tabelle 30).

Tabelle 30: Respiratorischer Quotient bei Testabbruch (N, MW \pm SD), Minimum und Maximum auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	RQ _{Abbruch}	Minimum	Maximum
♂	217	1,13 $\pm 0,09$	0,82	1,46
♀	90	1,15 $\pm 0,11$	0,83	1,45
Σ	307	1,14 $\pm 0,10$	0,82	1,46

3.2.2.5 Analyse des Atemäquivalents in der Ausbelastung

Der Wert als Kriterium zur Beurteilung einer Ausbelastung liegt hinsichtlich des Atemäquivalents bei $A\ddot{A} > 35$ (vgl. Meyer & Kindermann, 1999) bzw. $A\ddot{A} > 30-35$ (Hollmann & Hettinger, 2000, Boldt et al., 2002, Steinacker et al., 2002).

Aus der Teilstichprobe erreichen 127 Probanden (41,4 %) die Vorgabe $A\ddot{A} > 35$ und 235 Probanden (76,6 %) erreichen die Grenze bei einem $A\ddot{A} > 30$. Die Probanden, die maximale $A\ddot{A}$ -Werte bei Testabbruch über den angegebenen Abbruchwerten aufweisen, konnten durchschnittlich noch zusätzlich 3,9 (+ 11,1 %) bei einem $A\ddot{A} > 35$ und 5,9 (+ 19,6 %) bei einem $A\ddot{A} > 30$ zulegen.

Der in der Literatur recherchierte durchschnittliche $A\ddot{A}$ -Wert liegt bei 32,2 bzw. bei 33,3 (vgl. Tabelle 9). In dieser Arbeit wurden bei den 307 Probanden auf dem Fahrradergometer durchschnittliche $A\ddot{A}$ -Werte bei Testabbruch von $33,9 \pm 5,4$ ermittelt (vgl. Tabelle 31).

Tabelle 31: Atemäquivalent bei Testabbruch (N, MW \pm SD), Minimum und Maximum auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	AÄ _{Abbruch}	Minimum	Maximum
♂	217	33,7 \pm 5,1	21,2	49,0
♀	90	34,2 \pm 6,2	21,3	54,1
Σ	307	33,9 \pm 5,4	21,2	54,1

3.2.2.6 Analyse des Atemminutenvolumens in der Ausbelastung

Für das Atemminutenvolumen wird als Ausbelastungskriterium der Wert 100 l/min für Männer und 75 l/min für Frauen (vgl. Hollmann & Hettinger, 2000) angegeben.

Beim VE können von der Gesamtstichprobe 132 Probanden berücksichtigt werden. Aus dieser Teilstichprobe erreichen bei den Männern (N = 115) 67 Probanden (58,3 %) das Ausbelastungskriterium $VE \geq 100$ l/min und bei den Frauen (N = 17) 3 Probanden (17,7 %) das Kriterium $VE \geq 75$ l/min. Die in der Literatur beschriebenen Grenzwerte liegen zwischen 143,9 und 146,4 l/min (nur ♂) (vgl. Tabelle 9). Der Mittelwert dieser 132 Probanden beläuft sich auf ein VE von $99,2 \pm 25,0$ l/min (vgl. Tabelle 32). Das VE wird aufgrund der schlechten Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Literatur und der geringen Stichprobengröße nicht weiter berücksichtigt.



Tabelle 32: Atemminutenvolumen bei Testabbruch (MW \pm SD), Minimum und Maximum in l/min auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht

	N	VE _{Abbruch} [l/min]	Minimum [l/min]	Maximum [l/min]
♂	115	104,3 \pm 21,2	57,6	152,1
♀	17	64,3 \pm 20,5	32,0	112,9
Σ	132	99,2 \pm 25,0	32,0	152,1

3.2.2.7 Zusammenhänge

Wie bei der Beschreibung der Ergebnisse auf dem Laufbandergometer werden der Vollständigkeit wegen die *Korrelationen nach Pearson* bezüglich der einzelnen Ausbelastungsparameter dargestellt (vgl. Tabelle 33), jedoch nicht weiter diskutiert.

Tabelle 33: Korrelationsüberprüfung der Ausbelastungskriterien nach Pearson auf dem Fahrradergometer

 / 	Hf _{max}	La _{Abbruch}	Rel. VO _{2peak}	RQ _{Abbruch}	AÄ _{Abbruch}
Hf _{max}	1	,73** N = 152	,61** N = 90	,22* N = 90	-,01 N = 90
La _{Abbruch}	,58** N = 396	1	,61** N = 90	,35** N = 90	,21* N = 90
Rel. VO _{2peak}	,61** N = 217	,57** N = 217	1	,00 N = 90	-,16 N = 90
RQ _{Abbruch}	,10 N = 217	,23** N = 217	-,03 N = 217	1	,66** N = 20
AÄ _{Abbruch}	,01 N = 217	,20** N = 217	-,16* N = 217	,40** N = 217	1

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

3.2.2.8 Übersicht der analysierten Ausbelastungsparameter auf dem Fahrradergometer

Bei der Fahrradergometrie gelten die gleichen „harten“ und „weichen“ Kriterien wie bei der Laufbandergometrie mit Ausnahme der Herzfrequenz, die jeweils um 10 Schläge pro Minute reduziert ist. Die Grenzwerte für eine maximale Herzfrequenz lauten somit 210-LA bzw. 200-LA.

Zur besseren Übersicht werden die Ergebnisse der Ausbelastungsparameter (Hf, La, rel. VO₂, RQ und AÄ) der gesamten Stichprobe auf dem Fahrradergometer unabhängig vom verwendeten Protokoll in folgender Tabelle 34 zusammengefasst. Auf Grundlage diese Ergebnisse erfolgt die Diskussion (vgl. Kapitel 3.2.4). Eine Darstellung der Ergebnisse in Abhängigkeit der verwendeten Belastungsprotokolle findet sich im Anhang V.

Tabelle 34: Übersicht der maximal erreichten Werte bei Testabbruch auf dem Fahrradergometer

	Alter [Jahre]		Hf _{max} [S/min]	La _{Abbruch} [mmol/l]	Rel. VO _{2peak} [ml/min/kg]	RQ _{Abbruch}	ÄÄ _{Abbruch}
♂	≤ 20	N	29	29	12	12	12
		MW	194,5	10,2	55,6	1,11	33,9
		SD	± 8,1	± 2,6	± 8,5	± 0,09	± 4,7
	21-30	N	178	178	113	113	113
		MW	187,9	10,3	51,9	1,14	33,3
		SD	± 9,7	± 2,1	± 8,7	± 0,09	± 4,9
	31-40	N	55	55	15	15	15
MW		182,4	9,8	47,3	1,11	31,0	
SD		± 10,8	± 2,5	± 6,2	± 0,07	± 5,0	
41-50	N	53	53	20	20	20	
	MW	175,4	9,4	45,9	1,13	32,8	
	SD	± 11,0	± 2,6	± 9,9	± 0,09	± 5,3	
> 50	N	81	81	57	57	57	
	MW	160,1	7,1	35,0	1,13	35,5	
	SD	± 17,6	± 2,6	± 8,9	± 0,09	± 5,2	
Σ	N	396	396	217	217	217	
	MW	180,3	9,4	46,8	1,13	33,7	
	SD	± 16,4	± 2,7	± 11,4	± 0,09	± 5,1	
♀	≤ 20	N	7	7	3	3	3
		MW	190,4	10,3	46,0	1,12	33,3
		SD	± 6,6	± 3,2	17,8	± 0,12	± 2,7
	21-30	N	35	35	19	19	19
		MW	188,4	9,6	40,0	1,14	31,0
		SD	± 9,1	± 2,3	± 9,2	± 0,12	± 5,1
	31-40	N	8	8	1	1	1
MW		179,4	8,8	44,0	1,26	45,8	
SD		± 12,2	± 1,0				
41-50	N	21	21	8	8	8	
	MW	164,6	7,4	32,5	1,13	35,9	
	SD	± 15,4	± 3,2	± 9,7	± 0,07	± 5,2	
> 50	N	81	81	59	59	59	
	MW	152,8	5,3	26,1	1,16	34,9	
	SD	± 16,9	± 2,0	± 5,0	± 0,12	± 6,3	
Σ	N	152	152	90	90	90	
	MW	165,8	7,0	30,5	1,15	34,2	
	SD	± 21,4	± 3,0	± 9,5	± 0,11	± 6,2	
Σ	N	548	548	307	307	307	
	MW	176,3	8,8	42,0	1,14	33,9	
	SD	± 19,1	± 3,0	± 13,2	± 0,10	± 5,4	

Als Grundlage der Diskussion (vgl. Kapitel 3.2.4) werden zusätzlich die prozentualen Abweichungen zwischen den Angaben aus der Literatur und den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung sowie die zusätzlich erbrachte Leistung der Probanden, die Werte über jene Vorgaben hinaus erreichen konnten, in Tabelle 35 aufgeführt. Zur besseren Übersicht sind die „harten“ Kriterien hellblau eingefärbt.

Tabelle 35: Vergleich von Ausbelastungskriterien aus der Literatur und die in der vorliegenden Untersuchung erreichten Werte auf dem Fahrradergometer

	Hf_{\max} [S/min]		La_{Abbruch} [mmol/l]		$Rel.VO_{2\text{peak}}$ [ml/min/kg]	RQ_{Abbruch}		$A\ddot{A}_{\text{Abbruch}}$	
	„weich“	„hart“	„weich“	„hart“	„hart“	„weich“	„hart“	„weich“	„hart“
Vorgabe Literatur	200-LA	210-LA	≥ 8,0	≥ 9,0	Leveling off	≥ 1,0	> 1,1	> 30	> 35
Eigene Studie ¹	91,1 %	71,9 %	62,4 %	50,4 %	71,3 %	94,1 %	65,8 %	76,6 %	41,4 %
Zusätzl. Leistung ²	9,0 %	5,5 %	32,5 %	23,8 %	-	15,0 %	8,2 %	19,6 %	11,1 %

¹: Probanden (in %) der vorliegenden Untersuchung, die die Vorgabe der Literatur erreichen konnten

²: Zusätzlich erreichte Leistung (in %) der Probanden, die Werte über den Vorgaben der Literatur aufweisen

3.2.3 Vergleich Laufband- und Fahrradergometrie in der Ausbelastung

In Bezug auf Ausbelastungskriterien wird laut den Empfehlungen der Literatur (vgl. Tabelle 9) weder zwischen Laufband- und Fahrradergometrie (mit Ausnahme der Herzfrequenz) noch zwischen Geschlecht unterschieden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen jedoch erhebliche Differenzen. Bei der Bewertung der Ergebnisse sollte die geringe Anzahl der - vor allem weiblichen - Probanden bei spiroergometrischen Parametern sowie das niedrigere Alter, der niedrigere BMI (vgl. Kapitel 3.1.3) und die daraus resultierende höhere Leistungsfähigkeit der Probanden auf dem Laufbandergometer (vgl. $VO_{2\text{peak}}$ in Tabelle 38) berücksichtigt werden.

Bei Berechnung der *Varianzanalyse (ANOVA)* zeigt der Parameter Herzfrequenz sowohl einen signifikanten Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .063$), einen signifikanten Effekt bei der Ergometrie ($p \leq .01$, $\eta^2 = .159$), als auch eine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Ergometrie ($p \leq .01$, $\eta^2 = .025$). Es wurden bei der Laufbandergometrie signifikant höhere Herzfrequenzwerte nachgewiesen als bei der Fahrradergometrie, ebenso haben Männer signifikant höhere Herzfrequenzwerte als Frauen. Bei den Männern und Frauen ist der Mittelwertsunterschied der Herzfrequenz zwischen Laufband- und Fahrradergometrie signifikant ($p \leq .01$). Bei den Frauen ist dieser größer als bei den Männern (vgl. Tabelle 36). Insgesamt wird auch in der Literatur die Herzfrequenz bei einer Fahrradergometrie mit 10 S/min Unterschied in die Schätzformel eingerechnet ($Hf_{\max} = 210\text{-LA}$).

Tabelle 36: Varianzanalyse (ANOVA) der Herzfrequenz in der Ausbelastung zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht

Ausbelastungsparameter				Laufband- ergometrie	Fahrrad- ergometrie			
Hf_{max} [S/min]	♂	N		382	396			
		MW		189,9	180,3			
		SD		± 11,6	± 16,4			
	♀	N		125	152			
		MW		186,4	165,8			
		SD		± 12,0	± 21,4			
Σ	N		507	548				
	MW		189,0	176,3				
	SD		± 12,0	± 19,1				
ANOVA								
Geschlecht			Ergometrie			Geschlecht x Ergometrie		
F	p	η ²	F	p	η ²	F	p	η ²
= 70,59	≤ .01	= .063	= 199,38	≤ .01	= .159	= 26,42	≤ .01	= .025

Beim Parameter der Laktatkonzentration zeigt die ANOVA sowohl einen signifikanten Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .093$), einen signifikanten Effekt bei der Ergometrie ($p \leq .05$, $\eta^2 = .006$), als auch eine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Ergometrie ($p \leq .01$, $\eta^2 = .010$). Es wurden bei der Laufbandergometrie signifikant höhere Laktatwerte nachgewiesen als bei der Fahrradergometrie, ebenso haben Männer signifikant höhere Laktatwerte als Frauen. Während bei den Männern die Laktatkonzentration bei der Fahrradergometrie leicht höhere Werte aufweist als bei der Laufbandergometrie (n.s.), weist bei den Frauen die Konzentration signifikant ($p \leq .01$) niedrigere Werte auf (vgl. Tabelle 37).

Tabelle 37: Varianzanalyse (ANOVA) der Laktatkonzentration in der Ausbelastung zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht

Ausbelastungsparameter				Laufband- ergometrie	Fahrrad- ergometrie
La_{Abbruch} [mmol/l]	♂	N		382	396
		MW		9,3	9,4
		SD		± 2,1	± 2,7
	♀	N		125	152
		MW		8,0	7,0
		SD		± 2,3	± 3,0
Σ	N		507	548	
	MW		9,0	8,8	
	SD		± 2,3	± 3,0	

ANOVA								
Geschlecht			Ergometrie			Geschlecht x Ergometrie		
F	p	η^2	F	p	η^2	F	p	η^2
= 108,39	≤ .01	= .093	= 6,07	≤ .05	= .006	= 10,97	≤ .01	= .010

Die ANOVA zeigt beim Parameter der absoluten Sauerstoffaufnahme sowohl einen signifikanten Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .385$), als auch einen signifikanten Effekt bei der Ergometrie ($p \leq .01$, $\eta^2 = .092$). Es wurden bei der Laufbandergometrie signifikant höhere Werte der absoluten Sauerstoffaufnahme nachgewiesen als bei der Fahrradergometrie, ebenso haben Männer signifikant höhere Werte als Frauen. Es besteht keine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Ergometrie (vgl. Tabelle 38).

Tabelle 38: Varianzanalyse (ANOVA) der absoluten Sauerstoffaufnahme in der Ausbelastung zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht

Ausbelastungsparameter			Laufband-ergometrie	Fahrrad-ergometrie				
Abs. VO_{2peak} [l/min]	♂	N MW SD	77 4,2 ± 0,6	217 3,6 ± 0,8				
	♀	N MW SD	20 2,6 ± 0,3	90 2,0 ± 0,6				
	Σ	N MW SD	97 3,9 ± 0,9	307 3,1 ± 1,0				
ANOVA								
Geschlecht			Ergometrie			Geschlecht x Ergometrie		
F	p	η^2	F	p	η^2	F	p	η^2
= 250,25	≤ .01	= .385	= 40,29	≤ .01	= .092	= 0,01	= .94	= .000

Beim Parameter des respiratorischen Quotienten zeigt die ANOVA keinen signifikanten Geschlechtseffekt, jedoch einen signifikanten Effekt bei der Ergometrie ($p \leq .01$, $\eta^2 = .014$). Es wurden bei der Fahrradergometrie signifikant höhere RQ-Werte nachgewiesen als bei der Laufbandergometrie. Es

besteht keine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Ergometrie (vgl. Tabelle 39).

Tabelle 39: Varianzanalyse (ANOVA) des respiratorischen Quotienten in der Ausbelastung zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht

Ausbelastungsparameter					Laufband-ergometrie	Fahrrad-ergometrie		
RQ _{Abbruch}	♂	N	77		217			
		MW	1,11		1,13			
		SD	± 0,09		± 0,09			
♀	N	20		90				
	MW	1,11		1,15				
	SD	± 0,10		± 0,11				
Σ	N	97		307				
	MW	1,11		1,14				
	SD	± 0,09		± 0,10				
ANOVA								
Geschlecht			Ergometrie			Geschlecht x Ergometrie		
F	p	η ²	F	p	η ²	F	p	η ²
= 0,41	= .52	= .001	= 5,78	≤ .01	= .014	= 0,38	= .54	= .001

Beim Parameter Atemäquivalent zeigt die ANOVA keinen signifikanten Geschlechtseffekt, jedoch einen signifikanten Effekt bei der Ergometrie ($p \leq .01$, $\eta^2 = .029$). Es wurden bei der Fahrradergometrie signifikant höhere AÄ-Werte nachgewiesen als bei der Laufbandergometrie. Es besteht keine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Ergometrie (vgl. Tabelle 40).

Tabelle 40: Varianzanalyse (ANOVA) des Atemäquivalents in der Ausbelastung zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht

Ausbelastungsparameter					Laufband-ergometrie	Fahrrad-ergometrie
AÄ _{Abbruch}	♂	N	77		217	
		MW	31,0		33,7	
		SD	± 4,2		± 5,1	
♀	N	20		90		
	MW	32,0		34,2		
	SD	± 4,1		± 6,2		
Σ	N	97		307		
	MW	31,2		33,9		
	SD	± 4,2		± 5,4		

ANOVA								
Geschlecht			Ergometrie			Geschlecht x Ergometrie		
F	p	η^2	F	p	η^2	F	p	η^2
= 1,02	= .31	= .003	= 11,85	≤ .01	= .029	= 0,97	= .76	= .000

Die signifikanten Unterschiede zwischen Geschlecht und Ergometrie resultieren hauptsächlich aus der Problematik, dass über die Hälfte der Probandinnen bei der Fahrradergometrie aus der Altersgruppe > 50 Jahre stammen und somit das durchschnittliche Alter erheblich erhöhen. Dies wirkt sich auf alle Parameter aus, vor allem bei der altersabhängigen Herzfrequenz (große Effektstärke). Zudem ist davon auszugehen, dass Männer mehr Muskelmasse besitzen als Frauen und dadurch den Stoffwechsel (z.B. Laktatproduktion, mittlere Effektstärke) und die Leistung (VO_{2peak} , große Effektstärke) erheblich beeinflussen.

Auf dem Fahrradergometer werden im Gegensatz zur Laufbandergometrie die vorgegebenen „harten“ Ausbelastungskriterien um 20 % bei der Hf, 2 % bei der VO_2 , 18 % beim RQ und 23 % beim $\dot{V}A$ häufiger erreicht. Nur bei der Laktatkonzentration ist es umgekehrt. Hierbei erreichen zusätzliche 3 % der Probanden der Laufbandergometrie La-Werte von ≥ 9 mmol/l im Gegensatz zu den Probanden, die eine Fahrradergometrie absolviert haben.

Bei Betrachtung von geschlechtsspezifischen Unterschieden sind besonders die Ausbelastungsparameter der Laktatkonzentration und der maximalen Sauerstoffaufnahme mit Erreichen eines „leveling off“ hervorzuheben. Auf dem Laufbandergometer erreichen 24 % mehr Männer La-Werte von ≥ 9 mmol/l. Auf dem Fahrradergometer sind es sogar 34 % mehr Männer als Frauen, die dieses Kriterium erfüllen können. Bei der VO_{2max} ist es umgekehrt. Ein „leveling off“ erreichen bei der Laufbandergometrie 7 % mehr Frauen. Bei der Fahrradergometrie sind es 18 % mehr Frauen als Männer.

Auf das Alter bezogen kommen bei der Hf_{max} vor allem die älteren Männer auf das „harte“ Ausbelastungskriterium von 220-LA bzw. 210-LA. Die Wahrscheinlichkeit dieses Kriterium zu erfüllen liegt beispielsweise bei den über

50 Jährigen im Vergleich zu den unter 20 Jährigen bei einer Laufbandergometrie um 59 % höher. Bei der Fahrradergometrie liegt dieser Unterschied bei 23 %. Die Unterschiede in Abhängigkeit vom Alter liegen an den Formeln. Mit zunehmendem Alter werden die Formeln häufiger erreicht. Bei den Frauen ist diese Tendenz nicht zu erkennen. Der prozentuale Anteil der Probanden, die das Ausbelastungskriterium von $La \geq 9$ mmol/l erreicht haben nimmt deskriptiv gesehen mit zunehmendem Alter unabhängig von Belastungsart und Geschlecht ab. Am deutlichsten ist dies bei den Frauen auf dem Fahrradergometer zu beobachten. Der Unterschied beträgt zwischen den unter 20 und den über 50 Jährigen 67 %.

In Tabelle 41 sind die Ausbelastungsparameter unterteilt nach Geschlecht und Altersgruppe sowie nach Laufband- und Fahrradergometrie zusammenfassend dargestellt. Dabei werden die ermittelten Ergebnisse, die prozentualen Abweichungen zwischen den Angaben aus der Literatur („harte“ Kriterien) und den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung sowie die zusätzlich erbrachte Leistung der Probanden, die Werte über jenen Vorgaben hinaus erreichen konnten gegenübergestellt. Die Altersgruppen mit $n < 5$ wurden aufgrund der schlechten Vergleichbarkeit eingeklammert.

Tabelle 41: Vergleich zwischen Ausbelastungsparameter der Laufband- und Fahrradergometrie

Ausbelastungsparameter	Alter [Jahre]	Laufbandergometrie			Fahradergometrie			
		N MW SD	% von Vorgabe „hart“ ¹	% zu- sätzl. Leistung ²	N MW SD	% von Vorgabe „hart“ ¹	% zu- sätzl. Leistung ²	
Hf_{max} [S/min]	♂	≤ 20	89 199,6 8,1	29	2,3	29 194,5 ± 8,1	62	3,1
	21-30	121 191,3 8,4	36	2,2	178 187,9 ± 9,7	65	4,0	
	31-40	88 186,6 11,2	65	3,7	55 182,4 ± 10,8	80	5,2	
	41-50	67 182,9 10,5	79	5,2	53 175,4 ± 11,0	89	6,3	
	> 50	17 174,2 11,0	88	5,5	81 160,1 ± 17,6	85	8,0	
	Σ	382 189,9 ± 11,6	51	3,7	396 180,3 ± 16,4	74	5,5	

	♀	≤ 20	12 201,5 5,8	58	2,3	7 190,4 ± 6,6	57	1,1
		21-30	42 190,1 12,2	36	3,2	35 188,4 ± 9,1	71	4,0
		31-40	28 185,8 7,2	64	3,2	8 179,4 ± 12,2	75	5,0
		41-50	37 180,4 9,4	70	4,3	21 164,6 ± 15,4	62	4,9
		> 50	6 169,8 10,6	67	3,9	81 152,8 ± 16,9	65	7,1
		Σ	125 186,4 ± 12,0	56	3,5	152 165,8 ± 21,4	66	5,7
		Σ	507 189,0 ± 12,0	52	3,7	548 176,3 ± 19,1	72	5,5
La_{Abbruch} [mmol/l]	♂	≤ 20	89 9,4 2,3	60	20,3	29 10,2 ± 2,6	69	28,4
		21-30	121 9,8 2,1	69	20,9	178 10,3 ± 2,1	74	24,3
		31-40	88 9,2 2,0	57	17,2	55 9,8 ± 2,5	65	26,4
		41-50	67 8,5 1,9	42	14,1	53 9,4 ± 2,6	58	23,7
		> 50	17 8,5 2,2	53	14,7	81 7,1 ± 2,6	23	15,4
		Σ	382 9,3 ± 2,1	59	18,8	396 9,4 ± 2,7	60	24,2
	♀	≤ 20	12 8,9 2,5	58	14,4	7 10,3 ± 3,2	71	31,1
		21-30	42 8,2 2,7	40	19,2	35 9,6 ± 2,3	66	21,3
		31-40	28 8,4 2,1	39	16,7	8 8,8 ± 1,0	38	8,4
		41-50	37 7,2 2,0	22	12,0	21 7,4 ± 3,2	24	32,7
		> 50	6 8,1 1,7	17	17,7	81 5,3 ± 2,0	4	1,9
		Σ	125 8,0 ± 2,3	35	16,5	152 7,0 ± 3,0	26	21,5
		Σ	507 9,0 ± 2,3	53	18,4	548 8,8 ± 3,0	50	23,8

Rel. VO _{2peak} [ml/min/kg]	♂	≤ 20	5 61,4 3,9	60	-	12 55,6 ± 8,5	58	-
		21-30	36 57,0 6,6	61	-	113 51,9 ± 8,7	59	-
		31-40	16 54,1 5,1	61	-	15 47,3 ± 6,2	73	-
		41-50	17 49,2 8,2	71	-	20 45,9 ± 9,9	65	-
		(> 50)	3 39,3 1,16	67	-	57 35,0 ± 8,9	79	-
		Σ	77 54,3 ± 7,8	68	-	217 46,8 ± 11,4	66	-
	♀	(≤ 20)	1 44,0	100	-	3 46,0 17,8	100	-
		21-30	14 45,4 7,3	79	-	19 40,0 ± 9,2	74	-
		(31-40)	1 41,0	100	-	1 44,0	0	-
		(41-50)	3 37,3 10,5	67	-	8 32,5 ± 9,7	75	-
		(> 50)	1 38	0	-	59 26,1 ± 5,0	91	-
		Σ	20 43,6 ± 7,6	75	-	90 30,5 ± 9,5	84	-
Σ	97 52,1 ± 8,9	69	-	307 42,0 ± 13,2	71	-		
RQ _{Abbruch}	♂	≤ 20	5 1,03 0,05	0	-	12 1,11 ± 0,09	42	9,4
		21-30	36 1,10 0,09	39	7,7	113 1,14 ± 0,09	67	8,1
		31-40	16 1,12 0,09	56	7,0	15 1,11 ± 0,07	47	6,7
		41-50	17 1,16 0,07	82	7,1	20 1,13 ± 0,09	75	6,3
		(> 50)	3 1,09 0,05	33	3,6	57 1,13 ± 0,09	67	7,3
		Σ	77 1,11 ± 0,09	49	7,2	217 1,13 ± 0,09	65	7,5
	♀	(≤ 20)	1 1,31	100	19,1	3 1,12 ± 0,12	67	6,8

		21-30	14 1,09 0,09	36	8,0	19 1,14 ± 0,12	74	8,6
		(31-40)	1 1,25	100	13,6	1 1,26	100	14,5
		(41-50)	3 1,08 0,05	33	1,8	8 1,13 ± 0,07	63	6,5
		(> 50)	1 1,13	100	2,7	59 1,16 ± 0,12	66	11,2
		Σ	20 1,11 ± 0,10	45	8,6	90 1,15 ± 0,11	68	10,0
		Σ	97 1,11 ± 0,09	48	7,5	307 1,14 ± 0,10	66	8,2
AÄAbbruch	♂	≤ 20	5 28,8 5,0	20	0,3	12 33,9 ± 4,7	50	8,0
		21-30	36 30,2 3,4	6	9,4	113 33,3 ± 4,9	35	10,3
		31-40	16 29,9 4,7	13	6,0	15 31,0 ± 5,0	27	3,7
		41-50	17 33,7 3,9	29	10,5	20 32,8 ± 5,3	40	8,6
		(> 50)	3 34,7 2,5	67	3,1	57 35,5 ± 5,2	56	11,1
		Σ	77 31,0 ± 4,2	16	7,5	217 33,7 ± 5,1	41	9,9
	♀	(≤ 20)	1 31,5	0	-	3 33,3 ± 2,7	33	2,3
		21-30	14 31,4 3,8	21	1,7	19 31,0 ± 5,1	21	5,8
		(31-40)	1 32,0	0	-	1 45,8	100	30,9
		(41-50)	3 32,8 6,9	33	10,9	8 35,9 ± 5,2	63	11,4
		(> 50)	1 38,0	100	8,6	59 34,9 ± 6,3	44	16,0
		Σ	20 32,0 ± 4,1	25	4,9	90 34,2 ± 6,2	41	14,1
Σ	97 31,2 ± 4,2	18	6,4	307 33,9 ± 5,4	41	11,1		

¹: Probanden (in %) der vorliegenden Untersuchung, die die Vorgabe der Literatur erreichen konnten

²: Zusätzlich erreichte Leistung (in %) der Probanden, die Werte über den Vorgaben der Literatur aufweisen

3.2.4 Diskussion und Fazit zu Ausbelastungskriterien

Bei den Ausbelastungskriterien gibt es in Bezug auf die Belastungsart (Laufbandergometrie, LE bzw. Fahrradergometrie, FE) nur bei der Herzfrequenz spezifische Vorgaben. Auf dem Fahrradergometer werden niedrigere Werte angesetzt. Ansonsten gelten, laut Literatur, für eine Laufbandergometrie die gleichen Ausbelastungskriterien wie für eine Fahrradergometrie.

Als Ergebnis der Literaturrecherche ist festzuhalten, dass im Wesentlichen 5 Parameter zur Beurteilung des Ausbelastungszustandes verwendet werden: Herzfrequenz, Laktatkonzentration, Sauerstoffaufnahme (Kurvenverlauf, „leveling off“), respiratorischer Quotient und Atemäquivalent. Bezüglich der Kenngrößen lassen sich diese Parameter weiter unterteilen in:

„weiche“ Kriterien

- $Hf_{\max} = 210\text{-LA (LE)}$ (De Marées, 2003)
- $Hf_{\max} = 200\text{-LA (FE)}$ (De Marées, 2003)
- $La_{\text{Abbruch}} \geq 8 \text{ mmol/l}$ (Meyer & Kindermann, 1999, Hollmann & Hettinger, 2000, Steinacker et al., 2002, De Marées, 2003, Hollmann & Strüder, 2009)
- $RQ_{\text{Abbruch}} \geq 1,0$ (Dickhuth et al., 2011)
- $A\ddot{A}_{\text{Abbruch}} > 30$ (Hollmann & Hettinger, 2000, Steinacker et al., 2002, De Marées, 2003, Hollmann & Strüder, 2009)

„harte“ Kriterien

- $Hf_{\max} = 220\text{-LA (LE)}$ (Meyer & Kindermann, 1999, Steinacker et al., 2002)
- $Hf_{\max} = 210\text{-LA (FE)}$ (Meyer & Kindermann, 1999, Steinacker et al., 2002)
- $La_{\text{Abbruch}} \geq 9 \text{ mmol/l}$ (Dickhuth et al., 2011)
- $VO_{2\max}$ - „leveling off“ (Meyer & Kindermann, 1999, Hollmann & Hettinger, 2000, Boldt et al., 2002, Steinacker et al., 2002, Hollmann & Strüder, 2009)
- $RQ_{\text{Abbruch}} > 1,1$ (Meyer & Kindermann, 1999, Steinacker et al., 2002, De Marées, 2003)
- $A\ddot{A}_{\text{Abbruch}} > 35$ (Meyer & Kindermann, 1999)

Das „leveling off“ der Sauerstoffaufnahme mit einem Anstieg in der letzten Minute von < 150 ml wird den „harten“ Kriterien zugeordnet. Ein „weiches“ Kriterium für ein „leveling off“ wird nicht definiert.

Laut Forschungsstand (vgl. Kapitel 2.2.1.7) erfolgt die Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit in der Regel an Kenngrößen wie der maximalen Sauerstoffaufnahme oder der maximalen Herzfrequenz. Dabei kann es zu extremen Fehleinschätzungen kommen. Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen diese Annahme.

Laufbandergometer

Im Folgenden werden die einzelnen Parameter hinsichtlich Ausbelastungskriterien auf dem Laufbandergometer diskutiert.

Herzfrequenz

Bei Betrachtung der Herzfrequenz erreichen 264 (52,1 %) Probanden der gesamten Stichprobe ($N = 507$) auf dem Laufbandergometer die Formel 220-LA. 450 (88,8 %) Probanden kommen mit ihrer Hf_{\max} auf das „weiche“ Kriterium von 210-LA. Die Probanden, die diese Vorgabe erreichen konnten, erbrachten eine zusätzliche Herzschlagfrequenz von 3,7 bzw. 5,7 %, d.h. sie erzielten im Mittel ca. 8 respektive 12 S/min mehr.

Demnach würde bei diesen Probanden fälschlicherweise zu früh eine Ausbelastung attestiert werden. Umgekehrt würden 47,9 % bzw. 11,2 % nach dieser Klassifikation als „nicht ausbelastet“ bewertet. Aus den genannten Gründen sollte somit der Parameter Herzfrequenz mit den beschriebenen Formeln nicht als alleiniges absolutes Ausbelastungskriterium herangezogen werden.

Tabelle 24 ist zu entnehmen, dass die maximale Herzfrequenz im Alter sowohl bei den Männern, als auch bei den Frauen kontinuierlich abnimmt. Im Vergleich zu der Formel 220-LA wird unter Anwendung der vorliegenden Daten eine Regressionsgleichung von $y = 209 - 0,62 \text{ LA}$ berechnet. Die Konstante stellt dabei 209 (95 % CI: 206 – 211) und die Steigung $-0,62$ (95 % CI: $-0,69 - -0,55$) dar. Der Rückgang ist linear und weist gegenüber exponentieller, logarithmischer und quadratischer Regression die beste Anpassung auf (R^2 Linear = 0,362). Diese Regressionsgleichung liegt im Bereich der Formeln von Bruce (1974), Hossack (1982), Jones (1985), Ricard (1990), Froeli-

cher (2000), Fernhall (2001) und Schiller (2001), die in Tabelle 8 vorgestellt wurden. Bei der Regressionsgleichung 220-LA wird es mit zunehmendem Alter leichter das Ausbelastungskriterium zu erreichen, als bei der eigenen ermittelten Gleichung. Das in Abbildung 8 dargestellte Streudiagramm verdeutlicht das grundsätzliche Problem bei der Festlegung von Kenngrößen zur Bestimmung einer Ausbelastung. Die Kenngrößen stellen Mittelwerte dar, von denen Probanden - zum Teil deutlich - abweichen.

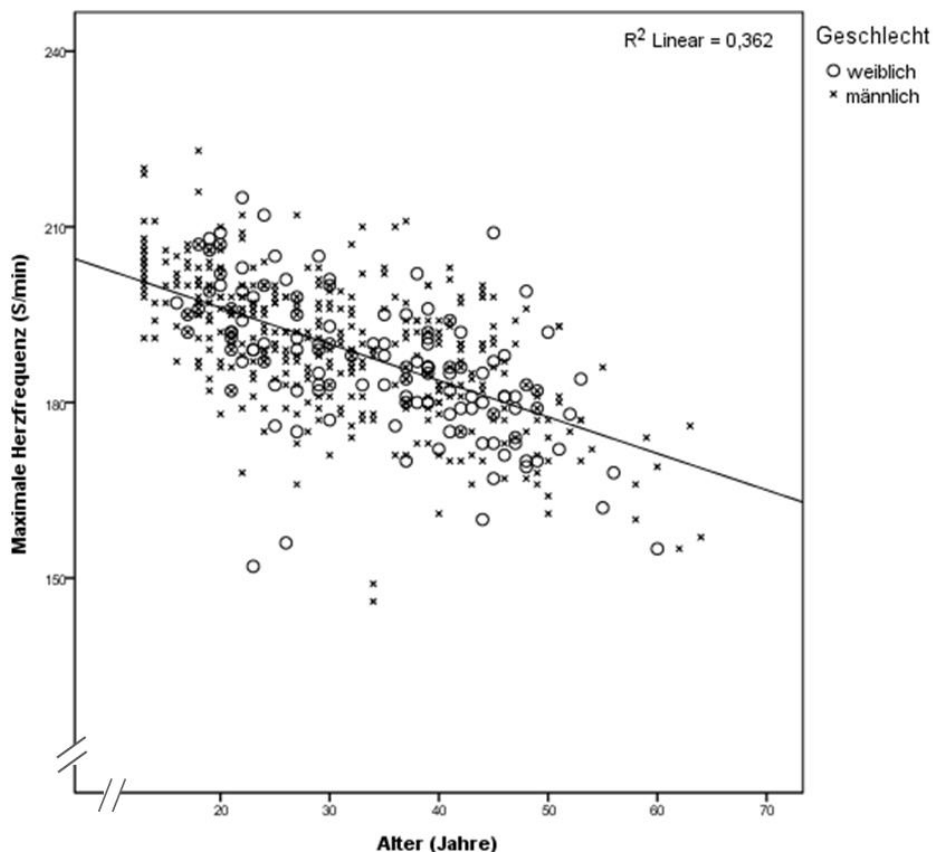


Abbildung 8: Streudiagramm mit Regressionsgleichung der Hf_{\max} in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Laufbandergometer

Laktatkonzentration

Bezüglich der Laktatkonzentration erreichen 268 (52,9 %) Probanden der Gesamtstichprobe (N = 507) das „harte“ Ausbelastungskriterium von $La \geq 9$ mmol/l. 336 (66,3 %) Probanden weisen höhere Werte als das „weiche“ Kriterium 8 mmol/l auf. Die Probanden, die diese Vorgabe erreichen konnten, haben eine zusätzliche um durchschnittlich 18,4 bzw. 27,9 % höhere maxi-

male Laktatkonzentration erbracht, d.h. um ca. 1,7 respektive 2,2 mmol/l höhere Werte. Auch bei der Laktatkonzentration ist zu erkennen, dass aufgrund der genannten Kriterien eine Aussage über den Grad der Ausbelastung nur tendenziell möglich ist. Zu sehr hängt dieser Parameter von verschiedenen Faktoren, wie beispielsweise individueller Leistungsfähigkeit oder auch Sportart bzw. Disziplin ab. Abbildung 9 verdeutlicht anhand eines Streudiagramms, wie groß im Einzelfall die Abweichungen der Laktatkonzentrationen bei Testabbruch sein können.

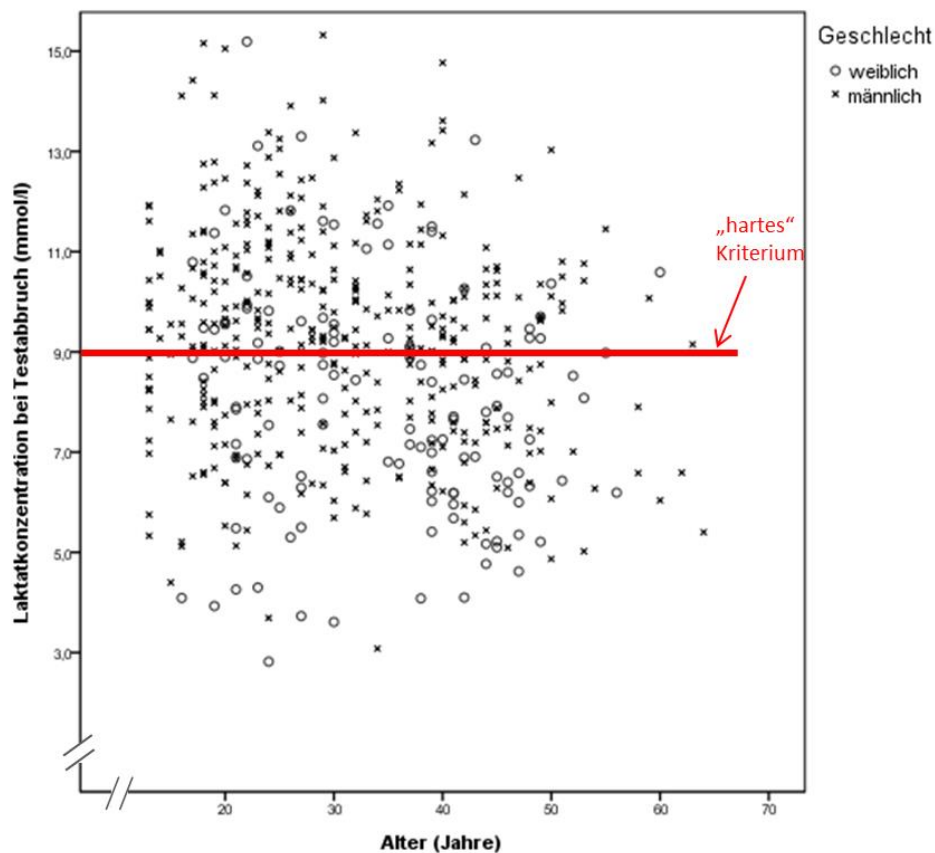


Abbildung 9: Streudiagramm der La_{Abbruch} in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Laufbandergometer

Zusätzlich ist es wichtig darauf zu achten, welche Analyseverfahren zur Ermittlung der Laktatkonzentration für die jeweilige Untersuchung angewandt wurde. Laut Biedler, Risch & Mertzluft (1998, S. 968ff.) sowie Röcker & Dickhuth (2001, S. 33f) können bei verschiedenen Analyseverfahren - Vollblut, Plasma, Serum - erhebliche Unterschiede (im Mittel 0-18 %) hinsichtlich der Blutlaktatkonzentrationen auftreten.

Maximale Sauerstoffaufnahme

Die maximale Sauerstoffaufnahme (Verlaufskurve) wird in der Sportwissenschaft als das wichtigste Ausbelastungskriterium gesehen. In der vorliegenden Untersuchung erreichen 67 (69,1 %) Probanden der Teilstichprobe (N = 97) ein „leveling off“ der VO_2 und damit eine VO_{2max} , d.h. die restlichen 30 Probanden (30,9 %) erreichen eine VO_{2peak} . Diese Probanden, die kein „leveling off“ erreichen, können jedoch durchschnittlich 2,8 bzw. 1,2 der vier sogenannten „weichen“ respektive „harten“ sekundären Ausbelastungskriterien zusätzlich erfüllen. Dabei erreichen in den Extremfällen bei den „weichen“ Kriterien 2 (6,7 %) Probanden kein weiteres Kriterium und 9 (30,0 %) Probanden alle vier. Umgekehrt ist es bei den „harten“ Kriterien. Hierbei erreichen 6 (20,0 %) Probanden kein zusätzliches Kriterium und 1 (3,3 %) Proband wiederum alle vier.

Bei den Probanden mit einem „leveling off“ der VO_2 konnten durchschnittlich 3,2 bzw. 1,9 der weiteren Ausbelastungskriterien zusätzlich erreicht werden. Dabei erreichen bei den „weichen“ Kriterien alle Probanden mindestens ein zusätzliches Kriterium und 28 (41,8 %) Probanden erreichen alle vier. Umgekehrt ist es bei den „harten“ Kriterien. Hierbei erreichen 10 (14,9 %) Probanden kein zusätzliches Kriterium und 6 (9,0 %) Probanden wiederum alle vier. Unter der Voraussetzung, dass alle Probanden der vorliegenden Untersuchung sich bis zur Erschöpfung ausbelastet haben, muss somit festgehalten werden, dass die Betrachtung des „leveling off“ der VO_2 kein geeigneter Parameter zu sein scheint, um eine Ausbelastung zu attestieren.

Respiratorischer Quotient

Bei Betrachtung des respiratorischen Quotienten erreichen 47 (48,5 %) Probanden, also weniger als die Hälfte der Gesamtstichprobe (N = 97), das „harte“ Ausbelastungskriterium von $RQ \geq 1,10$. Insgesamt 90 (92,8 %) Probanden weisen bei dem „weichen“ Kriterium höhere Werte als 1,00 auf. Die Probanden, die diese Vorgaben erreichen konnten, haben im Mittel um 7,5 bzw. 12,2 % höhere Werte erzielt, d.h. der RQ lag im Mittel um ca. 0,08 respektive 0,12 höher. Zwar stimmen die Durchschnittswerte von $RQ_{Abbruch} = 1,11$ der vorliegenden Ergebnisse mit den in der Literatur genannten Kenngrößen überein, jedoch ist die Streubreite groß. In Abbildung 10 werden die Abwei-

chungen des respiratorischen Quotienten der einzelnen Untersuchungen der 97 Probanden bei Testabbruch deutlich.

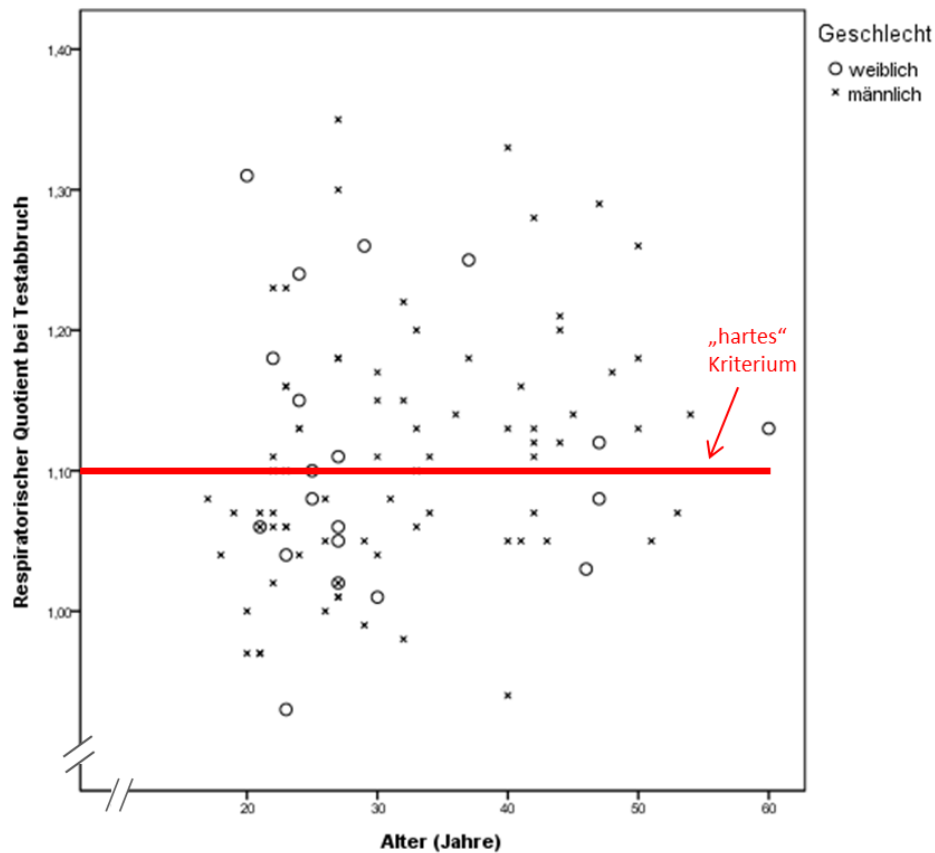


Abbildung 10: Streudiagramm des RQ_{Abbruch} in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Laufbandergometer

Atemäquivalent

Bei Betrachtung des Atemäquivalents erreichen 17 (17,5 %) Probanden der Gesamtstichprobe ($N = 97$) das „harte“ Ausbelastungskriterium von $A\ddot{A} \geq 35$. 60 (61,9 %) Probanden können höhere Werte als $A\ddot{A} = 30$ aufweisen. Die Probanden, die diese Vorgabe erreichen konnten, haben durchschnittlich 6,4 bzw. 11,0 % höhere Werte erzielt, d.h. der $A\ddot{A}$ lag im Mittel 2,2 respektive 3,3 höher. Das Atemäquivalent weist auf dem Laufbandergometer die geringste Übereinstimmung mit dem „harten“ Kriterium auf und liegt dabei im Mittel als einziger Ausbelastungsparameter nicht im Bereich der Werte aus der Literatur.

In Abbildung 11 werden die Abweichungen des Atemäquivalents der einzelnen Untersuchungen der 97 Probanden bei Testabbruch von dem „harten“ Ausbelastungskriterium aus der Literatur anhand eines Streudiagramms deutlich.

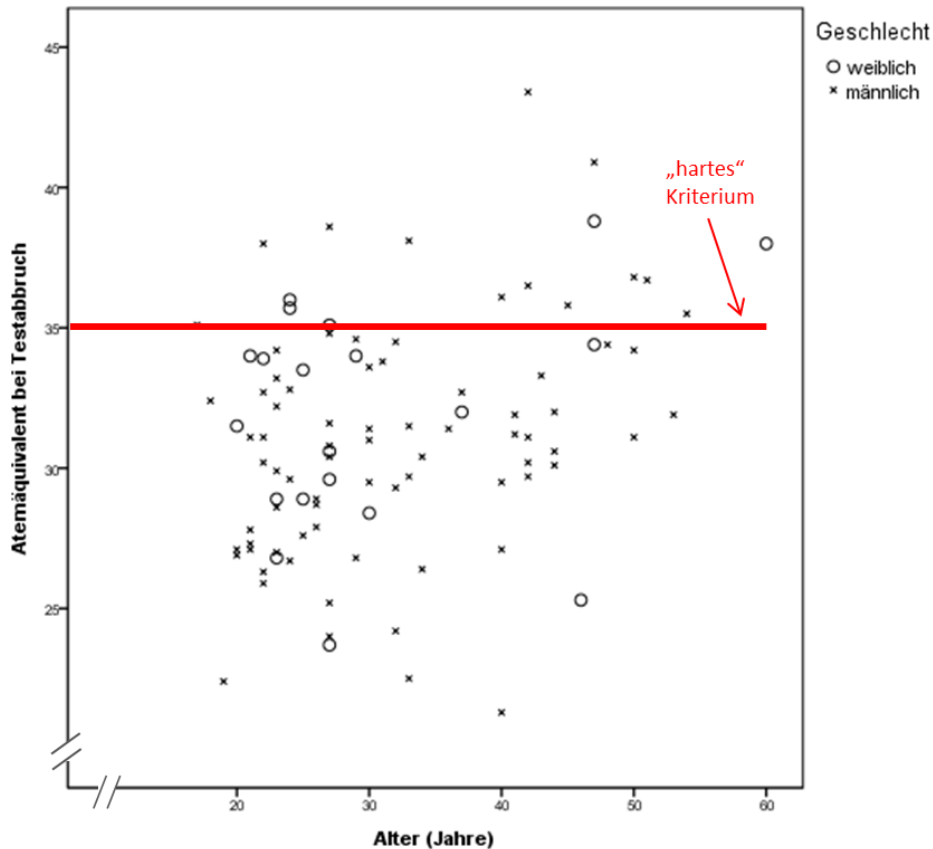


Abbildung 11: Streudiagramm des $\ddot{A}_{\text{Abbruch}}$ in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Laufbandergometer

Kombination verschiedener Kriterien

Bei der kombinierten Analyse der bei allen 507 Laufbandtests erhobenen Parameter Hf und La zeigt sich, dass 142 (28,0 %) Probanden beide „harten“ Kriterien sowie 304 (60,0 %) der Probanden beide „weichen“ Kriterien erfüllten. Eines der beiden Ausbelastungskriterien erreichten 248 (48,9 %) bzw. 178 (35,1 %) Probanden. 117 (23,1 %) Probanden der Gesamtstichprobe kamen auf Werte, die nicht im Bereich der beiden „harten“ Ausbelastungskriterien liegen. Hinsichtlich „weicher“ Kriterien kann dies bei 25 (4,9 %) Probanden festgestellt werden (vgl. Tabelle 42).

Tabelle 42: Anzahl der Probanden, die bei der Laufbandergometrie "harte" und "weiche" Ausbelastungskriterien (kombiniert Hf und La) erreichen

	„harte Kriterien“		„weiche“ Kriterien	
	N	%	N	%
2 aus 2	142	28,0	304	60,0
1 aus 2	248	48,9	178	35,1
0 aus 2	117	23,1	25	4,9
Σ	507	100	507	100

Bei Erweiterung der Kombination um die respiratorischen Parameter maximale Sauerstoffaufnahme, respiratorischer Quotient und Atemäquivalent zeigt sich folgendes Ergebnis: Von den 97 Probanden der Teilstichprobe erreichten 6 (6,2 %) respektive 28 (28,9 %) Probanden alle 5 „harten“ bzw. „weiche“ Ausbelastungskriterien. 4 aus 5 Ausbelastungskriterien erfüllten 17 (17,5 %) bzw. 34 (35 %) Testpersonen. 19 (19,6 %) bzw. 23 (23,7 %) Probanden erreichten 3 aus 5 Kriterien. Die „Vorgabe“ 2 aus 5 Parametern konnte bei 24 (24,7 %) respektive 9 (9,3 %) Probanden „harte“ bzw. „weiche“ Ausbelastungskriterien ermittelt werden. Nur einen Parameter erreichten 25 (25,8 %) Probanden bei den „harten“ und ein Proband bei den „weichen“ Kriterien. 6 (6,2 %) Probanden dieser Teilstichprobe erreichten kein einziges der „harten“ Ausbelastungskriterien. Hinsichtlich „weicher“ Kriterien kann dies bei 2 (2,1 %) Probanden festgestellt werden. Die Kombination der 5 Parameter hinsichtlich des Erfüllens von „harten“ bzw. „weichen“ Ausbelastungskriterien sind Tabelle 43 zu entnehmen.

Tabelle 43: Anzahl von Probanden, die bei der Laufbandergometrie "harte" und "weiche" Ausbelastungskriterien (kombiniert Hf, La, VO₂, RQ und AÄ) erreichen

	„harte“ Kriterien		„weiche“ Kriterien	
	N	%	N	%
5 aus 5	6	6,2	28	28,9
4 aus 5	17	17,5	34	35,0
3 aus 5	19	19,6	23	23,7

2 aus 5	24	24,7	9	9,3
1 aus 5	25	25,8	1	1,0
0 aus 5	6	6,2	2	2,1
Σ	97	100	97	100

Fazit Laufbandergometrie

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der vorliegenden Untersuchung hinsichtlich Ausbelastungskriterien auf dem Laufbandergometer lassen sich anhand der folgenden Gesichtspunkte verdeutlichen.

Einerseits erreicht eine Vielzahl der untersuchten Probanden nicht die in der Literatur genannten „harten“ Kriterien. So erzielen nur 69,1 % der Probanden auf dem Laufbandergometer ein „leveling off“ der VO_2 , nur ca. 50 % erreichen die Kriterien bezüglich Hf, La und RQ sowie gerade einmal 17,5 % erreichen die AÄ-Vorgabe von 35. In Abhängigkeit davon, welcher Parameter zur objektiven Bestimmung einer Ausbelastung verwendet wird, ändert sich somit die Anzahl der Probanden, denen eine Ausbelastung attestiert wird, sehr deutlich.

Andererseits zeigt sich das folgende Problem: Die Verwendung der in der Literatur genannten Abbruchkriterien führt in der Praxis häufig zu einem vorzeitigen Beenden der Belastung. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen, inwieweit dies bei einzelnen Personen zu einer Unterschätzung der Leistungsfähigkeit führt. So konnten die Probanden, die beispielsweise eine Herzfrequenz über den Vorgaben der Literatur erreichten, Hf-Werte von 3,7 % oberhalb des Kriteriums 220-LA erzielen. Bei der Laktatkonzentration wird das Problem noch deutlicher. Hierbei konnten die Probanden zusätzlich eine Laktatkonzentration 18,4 % oberhalb des Kriteriums $La_{\text{Abbruch}} \geq 9$ mmol/l erreichen (die Messung der Laktatkonzentration erfolgt bei den meisten Analysegeräten nach der Untersuchung und stellt somit kein Abbruchkriterium dar, sondern dient der Beurteilung einer Ausbelastung). Beim RQ wurden Werte von 7,5 % über dem Kriterium $RQ_{\text{Abbruch}} > 1,1$ sowie beim AÄ von 6,4 % über $AÄ_{\text{Abbruch}} > 35$ erreicht.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das Unterschätzen der maximalen Sauerstoffaufnahme unter Verwendung anderer sekundärer Ausbelastungskriterien, um auf eine VO_{2max} zu schließen. Demzufolge würde beispielsweise bei einem Testabbruch aufgrund der Formel 220-LA bei etwa 50 % der Probanden eine VO_{2peak} ermittelt werden, der jedoch keine Ausbelastung zu Grunde liegt.

Im Mittel jedoch, liegen 3 von 4 Ausbelastungsparameter (Hf_{max} , $La_{Abbruch}$, $RQ_{Abbruch}$) der vorliegenden Untersuchung exakt in den vorgegebenen Bereichen der „harten“ Kriterien laut den Empfehlungen in der Literatur und ein Parameter liegt im Bereich der „weichen“ Kriterien ($A\ddot{A}_{Abbruch}$). Somit wird dennoch die in der Sportwissenschaft allgemein anerkannte Akzeptanz der VO_{2max} bzw. der Schätzformel $Hf_{max} = 220-LA$ als **alleiniges** Ausbelastungskriterium, laut den vorliegenden Ergebnissen überschätzt. Es würde demnach eine Fehlerquote von ca. 30-50 % vorliegen.

Fahrradergometer

Im Folgenden werden die einzelnen Parameter hinsichtlich Ausbelastungskriterien auf dem Fahrradergometer diskutiert.

Herzfrequenz

Bei Betrachtung der Herzfrequenz erreichen 394 (71,9 %) Probanden der gesamten Stichprobe (N = 548) auf dem Fahrradergometer die nach der Formel 210-LA berechneten Kenngrößen. 499 (91,1 %) Probanden kommen mit ihrer Hf_{max} auf das „weiche“ Kriterium von 200-LA. Die Probanden, die diese Vorgabe erreichen konnten, erbrachten zusätzlich um durchschnittlich 5,5 bzw. 9,0 % höhere maximale Herzfrequenz, d.h. erzielten im Mittel ca. 12 respektive 18 S/min mehr. Demnach würde bei diesen Probanden fälschlicherweise zu früh eine Ausbelastung attestiert werden.

Aus den genannten Gründen sollte somit der Parameter Herzfrequenz mit den beschriebenen Formeln nicht als alleiniges absolutes Ausbelastungskriterium herangezogen werden. Tabelle 34 ist zu entnehmen, dass die maximale Herzfrequenz im Alter sowohl bei den Männern, als auch bei den Frauen kontinuierlich abnimmt. Im Vergleich zu der Formel 210-LA wird unter

Anwendung der vorliegenden Daten eine Regressionsgleichung von $y = 209 - 0,83 \text{ LA}$ berechnet. Die Konstante stellt dabei 209 (95 % CI: 206 – 212) und die Steigung $-0,83$ (95 % CI: $-0,89 - -0,77$) dar. Der lineare Rückgang weist gegenüber exponentieller, logarithmischer und quadratischer Regression eine gleiche Anpassung auf ($R^2 \text{ Linear} = 0,553$). Diese Regressionsgleichung deckt sich ebenfalls mit denen von Tanaka (1991), Whaley (1992), Åstrand, Cooper und Robinson in Froelicher (2000), die in Tabelle 8 vorgestellt wurden. Bei der Regressionsgleichung 210-LA wird es mit zunehmendem Alter leichter das Ausbelastungskriterium zu erreichen, als bei der eigenen ermittelten Gleichung. Das in Abbildung 12 dargestellte Streudiagramm verdeutlicht das grundsätzliche Problem bei der Festlegung von Kenngrößen zur Bestimmung einer Ausbelastung.

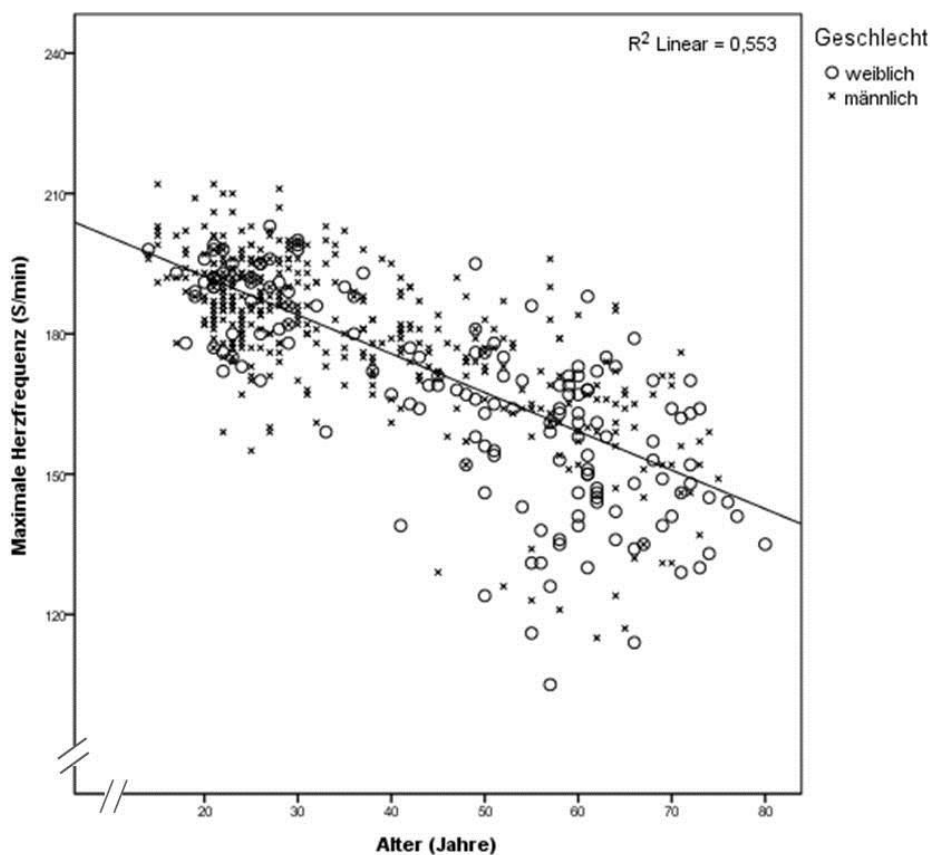


Abbildung 12: Streudiagramm mit Regressionsgleichung der Hf_{\max} in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Fahrradergometer

Laktatkonzentration

Bei Betrachtung der Laktatkonzentration erreichen 276 (50,4 %) Probanden der Gesamtstichprobe (N = 548) das „harte“ Ausbelastungskriterium von $La \geq 9$ mmol/l. 342 (62,4 %) Probanden weisen höhere Werte als das „weiche“ Kriterium 8 mmol/l auf. Die Probanden, die diese Vorgabe erreichen konnten, haben eine zusätzliche um durchschnittlich 23,8 bzw. 32,5 % höhere maximale Laktatkonzentration erbracht, d.h. um ca. 2,1 respektive 2,6 mmol/l. Auch bei der Laktatkonzentration auf dem Fahrradergometer ist zu erkennen, dass aufgrund der genannten Kriterien eine Aussage über den Grad der Ausbelastung nur tendenziell möglich ist. Zu sehr hängt dieser Parameter von verschiedenen Faktoren ab. Abbildung 13 verdeutlicht anhand eines Streudiagramms, wie groß im Einzelfall die Abweichungen der Laktatkonzentrationen bei Testabbruch sein können.

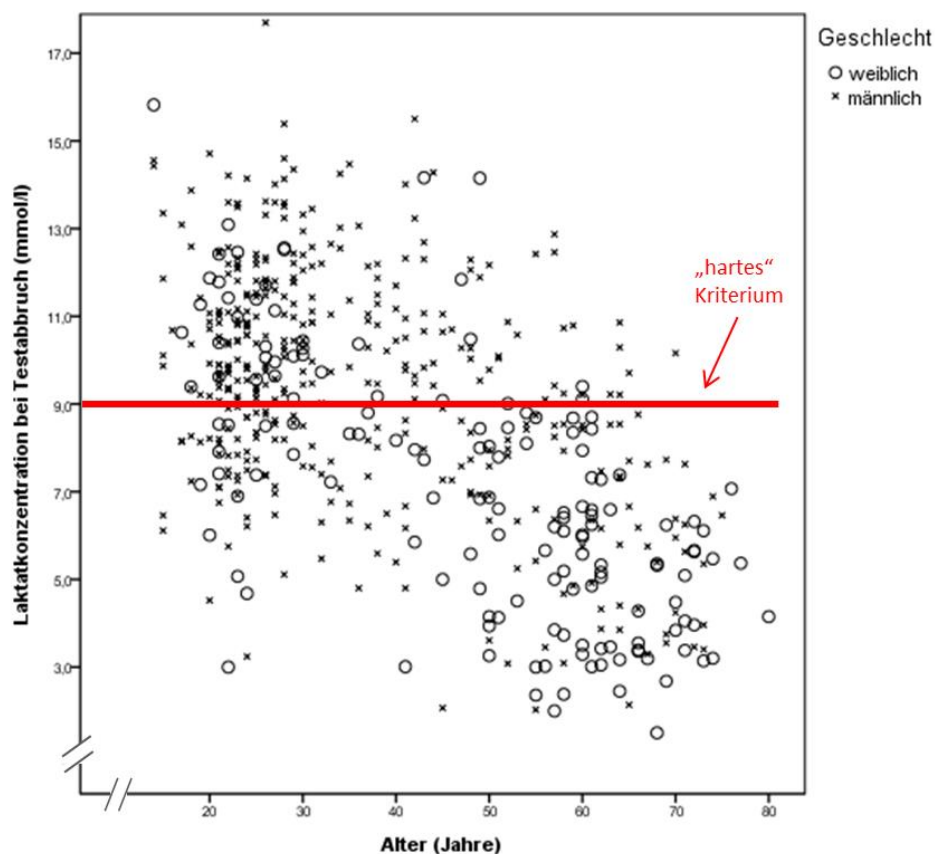


Abbildung 13: Streudiagramm der La_{Abbruch} in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Fahrradergometer

Maximale Sauerstoffaufnahme

In der vorliegenden Untersuchung erreichen 219 (71,3 %) Probanden der Teilstichprobe (N = 307) ein „leveling off“ der VO_2 und damit eine VO_{2max} , d.h. die restlichen 88 (28,7 %) erreichen eine VO_{2peak} . Diese Probanden, die kein „leveling off“ erreichen, können jedoch durchschnittlich 3,1 bzw. 2,1 der vier sogenannten „weichen“ respektive „harten“ sekundären Ausbelastungskriterien zusätzlich erfüllen. Dabei erreichen in den Extremfällen bei den „weichen“ Kriterien 2 (2,3 %) Probanden kein weiteres Kriterium und 43 (48,9 %) Probanden alle vier. Bei den „harten“ Kriterien erreichen hingegen 6 (6,8 %) Probanden kein zusätzliches Kriterium und 11 (12,5 %) Proband wiederum alle vier.

Bei den Probanden mit einem „leveling off“ der VO_2 konnten durchschnittlich 3,2 bzw. 2,3 der weiteren Ausbelastungskriterien zusätzlich erreicht werden. Dabei erreichen bei den „weichen“ Kriterien 2 (0,9 %) Probanden kein zusätzliches Kriterium und 91 (41,6 %) Probanden erreichen alle vier. Bei den „harten“ Kriterien wiederum erreichen 17 (7,7 %) Probanden kein zusätzliches Kriterium und 30 (13,7 %) Probanden alle vier.

Respiratorischer Quotient

Bei Betrachtung des respiratorischen Quotienten erreichen 65,8 % der Probanden der Gesamtstichprobe (N = 307) das „harte“ Ausbelastungskriterium von $RQ \geq 1,10$. 94,1 % der Probanden weisen bei dem „weichen“ Kriterium höhere Werte als 1,00 auf. Die Probanden, die diese Vorgaben erreichen konnten, haben im Mittel um 8,2 bzw. 15,0 % höhere Werte erreicht, d.h. der RQ lag im Mittel um ca. 0,09 respektive 0,15 höher. Zwar liegen die Durchschnittswerte von $RQ = 1,14$ der vorliegenden Untersuchung höher als die in der Literatur genannten Kenngrößen, jedoch ist die Streubreite im Einzelfall groß. In Abbildung 14 werden die Abweichungen des respiratorischen Quotienten der einzelnen Untersuchungen der 307 Probanden bei Testabbruch deutlich.

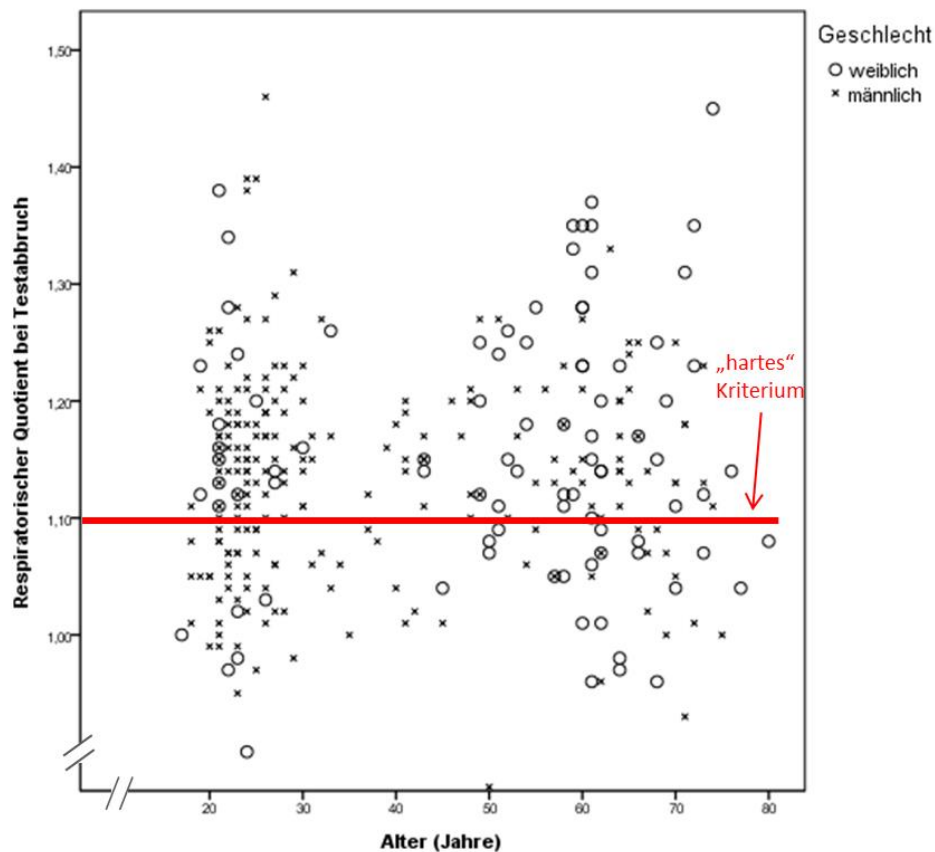


Abbildung 14: Streudiagramm des RQ_{Abbruch} in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Fahrradergometer

Atemäquivalent

Bei Betrachtung des Atemäquivalents erreichen 41,4 % der Probanden der Gesamtstichprobe ($N = 307$) das „harte“ Ausbelastungskriterium von $A\ddot{A} \geq 35$. 76,6 % der Probanden können höhere Werte als 30 aufweisen. Die Probanden, die diese Vorgabe erreichen konnten, haben durchschnittlich 11,1 bzw. 19,6 % höhere Werte erzielt, d.h. der $A\ddot{A}$ lag im Mittel ca. 3,9 respektive 5,9 höher. Das Atemäquivalent weist auch auf dem Fahrradergometer die geringste Übereinstimmung mit dem „harten“ Kriterium auf und liegt dabei im Bereich der Werte für „weiche“ Ausbelastungskriterien aus der Literatur. In der folgenden Abbildung 11 werden die Abweichungen des Atemäquivalents der einzelnen Untersuchungen der 307 Probanden bei Testabbruch von dem „harten“ Ausbelastungskriterium aus der Literatur anhand eines Streudiagramms verdeutlicht.

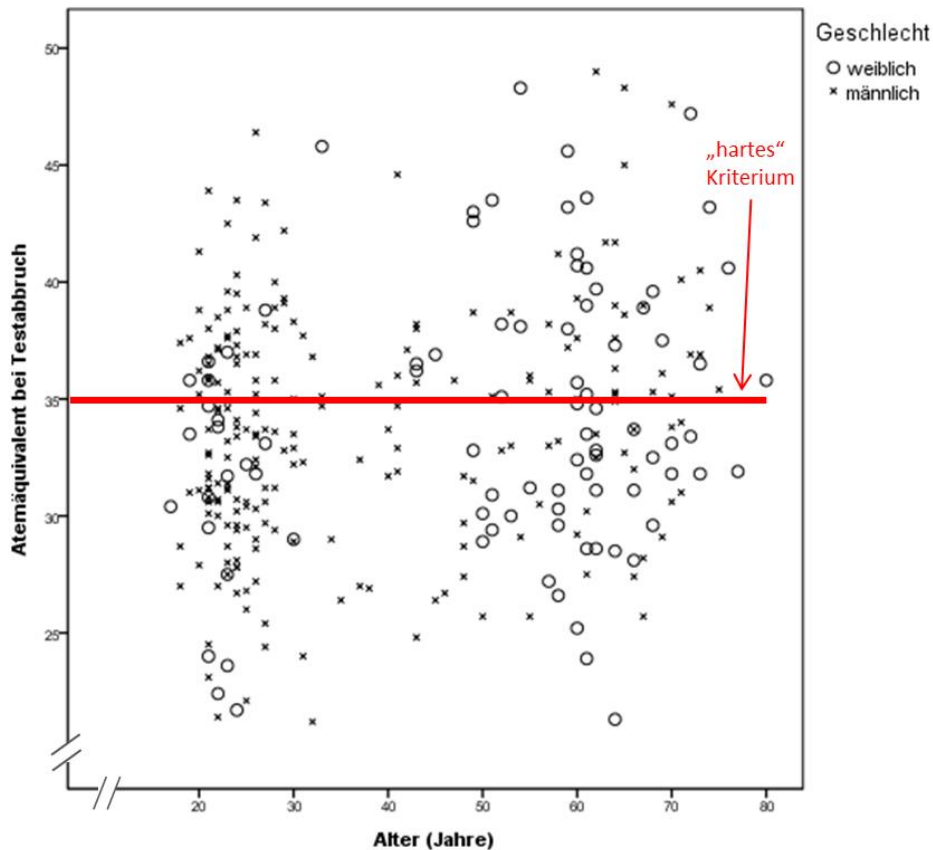


Abbildung 15: Streudiagramm des $\text{AA}_{\text{Abbruch}}$ in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Fahrradergometer

Kombination verschiedener Kriterien

Bei der kombinierten Analyse der bei allen 548 Fahrradtests erhobenen Parameter Hf und La zeigt sich, dass 218 (39,8 %) Probanden beide „harten“ Kriterien sowie 324 (59,1 %) der Probanden beide „weichen“ Kriterien erfüllten. Eines der beiden Ausbelastungskriterien erreichten 234 (42,7 %) bzw. 193 (35,2 %) Probanden. 96 (17,5 %) Probanden der Gesamtstichprobe kamen auf Werte, die nicht im Bereich der beiden „harten“ Ausbelastungskriterien liegen. Hinsichtlich „weicher“ Kriterien kann dies bei 31 (5,7 %) Probanden festgestellt werden (vgl. Tabelle 44).

Tabelle 44: Anzahl der Probanden, die bei der Fahrradergometrie "harte" und "weiche" Ausbelastungskriterien (kombiniert Hf und La) erreichen

	„harte Kriterien“		„weiche“ Kriterien	
	N	%	N	%
2 aus 2	218	39,8	324	59,1
1 aus 2	234	42,7	193	35,2
0 aus 2	96	17,5	31	5,7
Σ	548	100	548	100

Bei Erweiterung der Kombination um die respiratorischen Parameter maximale Sauerstoffaufnahme, respiratorischer Quotient und Atemäquivalent zeigt sich bei der Fahrradergometrie folgendes Ergebnis: Von den 307 Probanden der Teilstichprobe erreichen 30 (9,8 %) respektive 91 (29,6 %) Probanden alle 5 „harten“ bzw. „weiche“ Ausbelastungskriterien. 4 aus 5 Ausbelastungskriterien erfüllen 90 (29,3 %) bzw. 139 (45,3 %) Testpersonen. 76 (24,8 %) bzw. 49 (16,0 %) Probanden erreichen 3 aus 5 Kriterien. Die „Vorgabe“ 2 aus 5 Parametern konnte bei 63 (20,5 %) respektive 18 (5,9 %) Probanden „harte“ bzw. „weiche“ Ausbelastungskriterien ermittelt werden. Nur einen Parameter erreichten 42 (13,7 %) Probanden bei den „harten“ und 8 (2,6 %) Probanden bei den „weichen“ Kriterien. 6 (1,9 %) Probanden dieser Teilstichprobe erreichten kein einziges der „harten“ Ausbelastungskriterien. Hinsichtlich „weicher“ Kriterien kann dies bei 2 (0,6 %) Probanden festgestellt werden. Die Kombination der 5 Parameter hinsichtlich des Erfüllens von „harten“ bzw. „weichen“ Ausbelastungskriterien sind Tabelle 45 zu entnehmen.

Tabelle 45: Anzahl von Probanden (N, %), die bei der Fahrradergometrie "harte" und "weiche" Ausbelastungskriterien (kombiniert Hf, La, VO₂, RQ und AÄ) erreichen

	„harte“ Kriterien		„weiche“ Kriterien	
	N	%	N	%
5 aus 5	30	9,8	91	29,6
4 aus 5	90	29,3	139	45,3

3 aus 5	76	24,8	49	16,0
2 aus 5	63	20,5	18	5,9
1 aus 5	42	13,7	8	2,6
0 aus 5	6	1,9	2	0,6
Σ	307	100	307	100

Fazit Fahrradergometer

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der vorliegenden Untersuchung hinsichtlich Ausbelastungskriterien auf dem Fahrradergometer lassen sich anhand der folgenden Gesichtspunkte verdeutlichen.

Eine Vielzahl der untersuchten Probanden erreicht nicht die in der Literatur genannten „harten“ Kriterien. So erzielen ca. 70 % der Probanden auf dem Fahrradergometer ein „leveling off“ der VO_2 und eine Hf_{max} von 210-LA. 65,8 % erreichen die Kriterien bezüglich des RQ sowie etwa die Hälfte (50,4 %) der Probanden eine Laktatkonzentration bei Testabbruch von ≥ 9 mmol/l. Nur 41,4 % erreichen die AÄ-Vorgabe von 35. In Abhängigkeit davon, welcher Parameter zur objektiven Bestimmung einer Ausbelastung verwendet wird, ändert sich somit die Anzahl der Probanden, denen eine Ausbelastung attestiert wird, sehr deutlich.

Zudem führt die Verwendung der in der Literatur genannten Grenzwerte in der Praxis häufig zu einem vorzeitigen Beenden der Belastung. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen, inwieweit dies bei einzelnen Personen zu einer Unterschätzung der Leistungsfähigkeit führt. So konnten die Probanden, die beispielsweise eine Herzfrequenz über den Vorgaben der Literatur erreichten, Hf -Werte von 5,5 % oberhalb des Kriteriums 210-LA erzielen. Bei der Laktatkonzentration wird das Problem noch deutlicher. Hierbei konnten die Probanden zusätzlich eine Laktatkonzentration 23,8 % oberhalb des Kriteriums $La_{Abbruch} \geq 9$ mmol/l erreichen. Beim RQ wurden Werte von 8,2 % über dem Kriterium $RQ_{Abbruch} > 1,1$ sowie beim AÄ von 11,1 % über $AÄ_{Abbruch} > 35$ erreicht.

Im Mittel jedoch, liegen die Hälfte der Ausbelastungsparameter (Hf_{\max} sowie RQ_{Abbruch}) der vorliegenden Untersuchung über den vorgegebenen Bereichen der „harten“ Kriterien laut den Empfehlungen in der Literatur und die beiden anderen Parameter liegen im Bereich der „weichen“ Kriterien (La_{Abbruch} sowie $A\ddot{A}_{\text{Abbruch}}$). Auch bei der Fahrradergometrie wird somit die in der Sportwissenschaft allgemein anerkannte Akzeptanz der $VO_{2\max}$ bzw. der Schätzformel $Hf_{\max} = 210 - LA$ als **alleiniges** Ausbelastungskriterium, laut den vorliegenden Ergebnissen überschätzt.

3.3 Nachbelastungsverhalten

Das zweite Kernthema dieser Arbeit ist die Frage, ob eine praktikable Möglichkeit besteht, über das Nachbelastungsverhalten bestimmter physiologischer Parameter auf die aerobe Leistungsfähigkeit eines Patienten oder Sportlers zu schließen. Hierzu sollen zunächst physiologische Gesetzmäßigkeiten verschiedener Parameter in der Nachbelastung analysiert werden. Eine einheitliche Betrachtung des Nachbelastungsverhaltens setzt voraus, dass die vorangegangene Belastung standardisiert mit einer Ausbelastung endete, d.h. submaximale Testabbrüche ermöglichen keine sinnvolle Beurteilung des Nachbelastungsverhaltens. Dementsprechend ist der Themenbereich der Ausbelastungskriterien diesem Kapitel vorangestellt.

Im folgenden Kapitel werden die ermittelten Ergebnisse zum Nachbelastungsverhalten dargestellt. Zuerst erfolgt eine Analyse der erhobenen Daten der Laufbandergometrie, gefolgt von den Ergebnissen der Fahrradergometrie. Anhand der durchgeführten Literaturrecherche (vgl. Kapitel 2.2.2) und der standardisierten Untersuchungsroutine am IfSS (Analyse der Nachbelastung bis zur 5. Erholungsminute) steht in der Datenanalyse, die Schätzung der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit mit Hilfe des Nachbelastungsverhaltens der Herzfrequenz im Zentrum. Zusätzlich werden die Laktatkonzentration sowie die absolute Sauerstoffaufnahme und der respiratorische Quotient gesondert beschrieben.

Für die Analyse in der Nachbelastung stehen insgesamt 836 Datensätze zur Verfügung, bei denen nach Einschätzung des Testleiters eine Ausbelastung vorlag. Die Daten der Stichprobe beinhalten die Ausbelastungswerte (E_0) sowie die Werte zur ersten (E_1), dritten (E_3) und fünften (E_5) Erholungsminute. Die Nachbelastungsphase bis zu E_3 wurde mit der Belastungsintensität der initialen Belastungsstufe durchgeführt, die letzten beiden Minuten von E_3 bis zu E_5 erfolgten ohne körperliche Belastung (vgl. Kapitel 3.1.1). Aufgrund dieser Testroutine am IfSS werden die Nachbelastungsparameter anhand des absoluten sowie prozentualen Rückgangs analysiert. Die Analyse der Halbwertszeit erfordert die Analyse einer deutlich längeren Nachbelastungsphase und kann somit für diese Arbeit nicht berücksichtigt werden. Zur bes-

seren Übersicht wird bei den Tabellen und Abbildungen der Nachbelastungsverläufe nur der absolute Rückgang verwendet.

3.3.1 Laufbandergometrie

Auf dem Laufbandergometer wurden 323 Probanden hinsichtlich des Nachbelastungsverhaltens untersucht. Diese Probanden erreichten eine durchschnittliche Laufgeschwindigkeit (v) an den aeroben Schwellen von $8,4 \pm 1,5$ km/h (v_{LT}) bzw. von $9,1 \pm 2,5$ km/h ($v_{2\text{mmol/l}}$). Die Laufgeschwindigkeit an den anaeroben Schwellen liegt insgesamt bei $11,4 \pm 1,9$ km/h (v_{IAS}) bzw. bei $12,0 \pm 2,2$ km/h ($v_{4\text{mmol/l}}$). Die maximale Laufgeschwindigkeit der Stichprobe liegt im Durchschnitt bei $14,7 \pm 2,3$ km/h (v_{max}). Zum besseren Verständnis der vorliegenden Stichprobe werden die ermittelten Leistungskenngrößen in der nachfolgenden Tabelle 46 unterteilt in Geschlecht und Altersgruppen dargestellt. Bei der hier dargestellten Stichprobe handelt es sich um eine Untergruppe der in Tabelle 16 aufgeführten Gesamtstichprobe.

Tabelle 46: Durchschnittliche Laufgeschwindigkeit (v) in km/h auf dem Laufbandergometer an den aeroben (LT und 2 mmol/l) und anaeroben (IAS und 4 mmol/l) Schwellen sowie der maximalen Leistung bei Testabbruch

	Alter [Jahre]		v_{LT} [km/h]	$v_{2\text{mmol/l}}$ [km/h]	v_{IAS} [km/h]	$v_{4\text{mmol/l}}$ [km/h]	v_{max} [km/h]
♂	≤ 20	N	30	30	30	30	30
		MW	9,2	9,3	12,5	13,1	16,4
		SD	± 0,9	± 2,3	± 1,0	± 1,3	± 1,2
	21-30	N	75	75	75	75	75
		MW	9,4	10,3	12,7	13,4	16,5
		SD	± 1,4	± 2,6	± 1,6	± 1,9	± 1,6
	31-40	N	68	68	68	68	68
MW		8,6	9,6	11,6	12,2	15,1	
SD		± 1,3	± 2,4	± 1,6	± 2,1	± 1,7	
41-50	N	57	57	57	57	57	
	MW	8,3	8,8	11,3	11,9	14,5	
	SD	± 1,4	± 2,4	± 1,5	± 1,7	± 1,6	
> 50	N	15	15	15	15	15	
	MW	7,7	8,0	10,3	10,8	13,1	
	SD	± 1,4	± 1,8	± 1,6	± 1,8	± 2,1	
Σ	N	245	245	245	245	245	
	MW	8,8	9,5	11,9	12,5	15,4	
	SD	± 1,4	± 2,5	± 1,7	± 2,0	± 1,9	
♀	≤ 20	N	4	4	4	4	4
		MW	7,8	9,2	10,6	11,4	13,9
		SD	± 0,8	± 1,3	± 0,8	± 0,8	± 0,1
	21-30	N	26	26	26	26	26
		MW	7,3	8,5	10,0	10,8	13,1
	SD	± 1,4	± 2,3	± 1,7	± 1,9	± 1,8	

31-40	N	17	17	17	17	17
	MW	7,5	8,1	10,0	10,5	12,5
	SD	± 1,2	± 2,0	± 1,3	± 1,6	± 1,3
41-50	N	27	27	27	27	27
	MW	7,4	7,4	9,9	10,3	12,3
	SD	± 1,6	± 2,1	± 1,9	± 2,1	± 2,3
> 50	N	4	4	4	4	4
	MW	6,4	6,9	8,4	8,4	10,8
	SD	± 1,8	± 2,4	± 2,2	± 2,8	± 1,9
Σ	N	78	78	78	78	78
	MW	7,4	8,0	9,9	10,5	12,6
	SD	± 1,4	± 2,2	± 1,7	± 2,0	± 1,9
Σ	N	323	323	323	323	323
	MW	8,4	9,1	11,4	12,0	14,7
	SD	± 1,5	± 2,5	± 1,9	± 2,2	± 2,3

Bei den männlichen Probanden fällt auf, dass die maximale Laufgeschwindigkeit sowie die erbrachte Leistung an den aeroben und anaeroben Schwellen in der Altersgruppe der 21-30 Jährigen deskriptiv gesehen am höchsten ist, knapp gefolgt von den unter 21 Jährigen. Daraufhin nimmt die Leistung mit zunehmendem Alter ab. Der Leistungsabfall an der maximalen Laufgeschwindigkeit beträgt bei den 31-40 Jährigen 9 %, bei den 41-50 Jährigen 14 % sowie 26 % bei den über 50 Jährigen. Bei den weiblichen Probanden ist die Leistung in der jüngsten Gruppe am Höchsten und nimmt mit zunehmendem Alter kontinuierlich ab. Der Leistungsabfall beträgt bei den 21-30 jährigen Frauen 6 %. In der 3. Altersgruppe (31-40 Jahre) fällt die Leistung auf 11 %, bei den 41-50 Jährigen um 13 % sowie bei den über 50 Jährigen um 29 % ab. Der Vergleich erfolgte jeweils zur leistungsstärksten Altersgruppe.

In den folgenden Kapiteln zur Analyse der einzelnen Nachbelastungsparameter werden die einzelnen Altersgruppen nicht explizit aufgeführt. In Kapitel 3.3.1.5 zeigt Tabelle 24 eine Übersicht aller Parameter hinsichtlich Geschlecht und Altersgruppe.

3.3.1.1 Analyse der Herzfrequenz in der Nachbelastung

Zur Analyse der Herzfrequenz in der Nachbelastung kann auf eine Stichprobe von 323 Probanden zurückgegriffen werden. Der Rückgang der maximalen Herzfrequenz (Hf_0) bei den Männern von $188,0 \pm 11,6$ S/min zu Hf_1 ($151,9 \pm 16,7$ S/min) beträgt $36,1$ S/min bzw. $19,2$ %. Nach der dritten Nachbelastungsminute ($133,7 \pm 16,9$ S/min) ergibt sich ein Rückgang von $54,3$ S/min und einem prozentualen Abfall von insgesamt $28,9$ %. Beim letzten

Nachbelastungszeitpunkt nach 5 Minuten ($112,9 \pm 14,3$ S/min) beträgt der Rückgang $75,1$ S/min respektive $39,9$ %. Der Rückgang der Herzfrequenz beträgt bei den Frauen von Hf_0 ($185,2 \pm 11,9$ S/min) zu Hf_1 ($151,3 \pm 17,0$ S/min) $33,9$ S/min bzw. $18,3$ %. Nach Hf_3 ($130,6 \pm 18,8$ S/min) ergibt sich ein Rückgang von insgesamt $54,6$ S/min und einem prozentualen Abfall von $29,5$ %. Beim letzten Nachbelastungszeitpunkt Hf_5 ($109,3 \pm 15,7$ S/min) beträgt der Rückgang bei den Frauen $75,9$ S/min respektive $40,1$ %.

Das Nachbelastungsverhalten der Herzfrequenz kann der folgenden Tabelle 47 entnommen werden. Dabei werden bei der Hf zur besseren Einordnung zusätzlich die Werte vor der Belastung (Vorstart) mit aufgeführt. Abbildung 16 zeigt den Verlauf der Herzfrequenz in der Nachbelastung (Hf_0 bis Hf_5).

Tabelle 47: Herzfrequenzwerte in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer

		Hf_{Vorstart} [S/min]	Hf_0 [S/min]	Hf_1 [S/min]	Hf_3 [S/min]	Hf_5 [S/min]
♂	N	245	245	205	205	191
	MW	75,1	188,0	151,9	133,7	112,9
	SD	$\pm 13,8$	$\pm 11,6$	$\pm 16,7$	$\pm 16,9$	$\pm 14,3$
♀	N	78	78	62	64	59
	MW	80,2	185,2	151,3	130,6	109,3
	SD	$\pm 14,2$	$\pm 11,9$	$\pm 17,0$	$\pm 18,8$	$\pm 15,7$
Σ	N	323	323	267	269	250
	MW	76,3	187,3	151,7	133,0	112,1
	SD	$\pm 14,0$	$\pm 11,7$	$\pm 16,8$	$\pm 17,4$	$\pm 14,7$

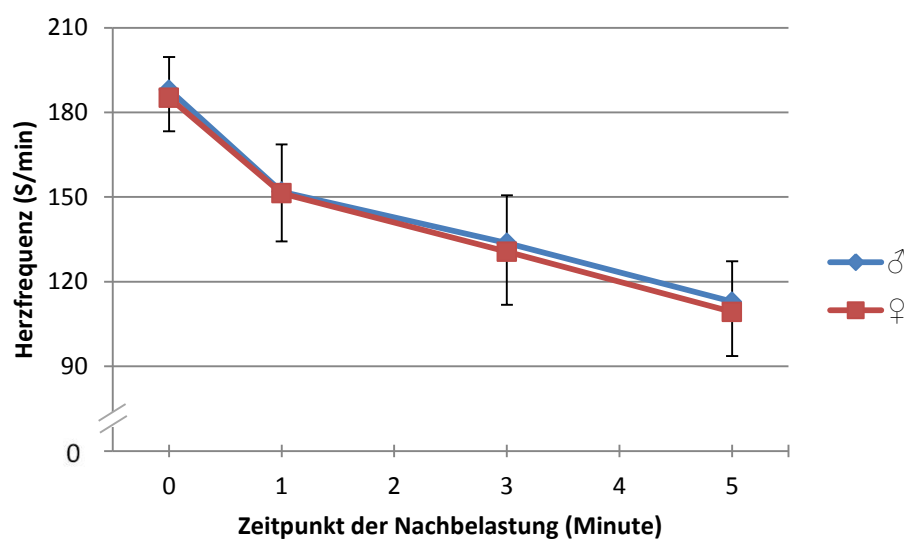


Abbildung 16: Nachbelastungsverhalten der Herzfrequenz auf dem Laufbandergometer

Die Nachbelastungswerte zwischen Männern und Frauen zeigen einen vergleichbaren Verlauf (vgl. Abbildung 16). *Varianzanalysen (ANOVA)* zwischen den Messzeitpunkten (E_0 zu E_1 , E_1 zu E_3 und E_3 zu E_5) liefern keine signifikanten Interaktionen zwischen Zeit und Geschlecht. Innerhalb eines Messzeitpunktes konnten geschlechtsspezifisch ebenfalls keine signifikanten Mittelwertsunterschiede ermittelt werden.

Bei der Berücksichtigung des Alters konnten in der Nachbelastung, außer bei den Männern bei E_3 ($p \leq .05$), keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Hierbei wurden mittels Berechnung von Quartilen die jüngsten 25 % mit den ältesten 25 % der Stichprobe, unterteilt nach Geschlecht, hinsichtlich des Herzfrequenzrückgangs verglichen. Die junge männliche Gruppe weist ein Alter von < 24 Jahre und die ältere Gruppe > 42 Jahre auf sowie < 27 Jahre bzw. > 45 Jahre bei den Frauen. Die Mittelwertsunterschiede weisen jeweils bei der älteren Gruppe einen höheren Rückgang der Herzfrequenz auf, als bei der jüngeren Gruppe. Bei Betrachtung der einzelnen Messzeitpunkte konnten bei der jüngeren männlichen Gruppe signifikant höhere ($p \leq .01$) Herzfrequenzen nachgewiesen werden. Bei den Frauen konnte ein Signifikanzniveau von ($p \leq .01$) bei Hf_0 und Hf_1 sowie ein Signifikanzniveau von ($p \leq .05$) bei Hf_3 und Hf_5 erreicht werden. Somit konnten insgesamt die jüngeren Gruppen höhere Herzfrequenzen aufweisen.

Um aus dem Nachbelastungsverlauf der Herzfrequenz Rückschlüsse auf die Ausdauerleistungsfähigkeit zu ziehen, wurden *Korrelationsüberprüfungen nach Pearson* durchgeführt. Hierbei wurde zuerst überprüft, ob es Zusammenhänge hinsichtlich der Messzeitpunkte (E_1 , E_3 und E_5) gibt. Bei einem perfekten Zusammenhang der drei Messzeitpunkte müsste bei der weiteren Betrachtung nur ein einziger Messzeitpunkt berücksichtigt werden, von dem auf die beiden anderen Messzeitpunkte geschlossen werden könnte.

Die Berechnung zeigt einen hohen Zusammenhang von E_1 zu E_3 in Höhe von $r = .73$ bei den Männern bzw. $r = .75$ bei den Frauen sowie einen mittleren Zusammenhang von $r = .53$ respektive $r = .57$ bei E_1 zu E_5 . Zudem besteht ein mittlerer bzw. hoher Zusammenhang von $r = .64$ bei den Männern und $r = .70$ bei den Frauen zwischen den Ergebnissen bei E_3 und E_5 . Die Ergebnisse der Messzeitpunkte zeigen hohe bis mittlere Zusammenhänge,

die jedoch nicht ausreichend hoch sind von einem Messzeitpunkt auf den anderen zu schließen.

Die Analyse des prozentualen Rückgangs der Herzfrequenz zur 1., 3. und 5. Erholungsminute im Verhältnis zu den Leistungskenngrößen der individuellen und fixen Schwellen sowie der maximalen Leistung zeigt bei den Männern niedrige Zusammenhänge ($r = .21 - .34$) der beiden fixen Schwellen im Vergleich zum prozentualen Rückgang der Hf zur 1., 3. und 5. Erholungsminute. Ebenso werden niedrige Zusammenhänge ($r = .16$ respektive $r = .20$) bei der individuellen anaeroben Schwelle zur 1. und 3. Erholungsminute ermittelt. Bei den Frauen werden ebenfalls nur niedrige Zusammenhänge bei den beiden fixen Schwellen (je $r = .26$) zur 1. Erholungsminute ermittelt. Ansonsten konnten in Bezug auf den prozentualen Rückgang der Herzfrequenz und den Leistungskenngrößen auf dem Laufbandergometer keine weiteren signifikanten Zusammenhänge nachgewiesen werden (vgl. Tabelle 48).

Tabelle 48: Korrelationsüberprüfung (nach Pearson) des prozentualen Rückgangs der Nachbelastungs-Hf und den Leistungskenngrößen auf dem Laufbandergometer

	Nachbelastung	N	V_{LT}	$V_{2\text{mmol/l}}$	V_{IAS}	$V_{4\text{mmol/l}}$	V_{max}
♂	E ₁	205	n.s.	.28**	.16*	.26**	n.s.
	E ₃	205	n.s.	.39**	.20**	.30**	n.s.
	E ₅	191	n.s.	.25**	n.s.	.21**	n.s.
♀	E ₁	62	n.s.	.26*	n.s.	.26*	n.s.
	E ₃	64	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	E ₅	59	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

n.s. nicht signifikant

Bei einer Differenzierung nach Altersgruppen konnten bei den Männern vor allem in der Altersgruppe der 31-40 Jährigen ein mittlerer bis niedriger Zusammenhang hinsichtlich der individuellen und fixen aeroben sowie anaeroben Schwellen ($r = .29 - .51$) zur prozentualen Abnahme der Hf zur 1., 3. und

5. Erholungsminute sowie zur maximalen Leistung ($r = .30 - .35$) ermittelt werden. Bei den Frauen besteht (auch aufgrund der geringen Anzahl von Probanden) lediglich bei den 21-30 Jährigen zur 5. Nachbelastungsminute mittlere Zusammenhänge der beiden anaeroben Schwellen ($r = .58$ bzw. $.59$) sowie der maximalen Leistung ($r = .64$). Die weiteren Zusammenhänge und das Signifikanzniveau sind der folgenden Tabelle 49 zu entnehmen. Bei den nicht aufgeführten Altersgruppen und Nachbelastungszeitpunkten konnten keine signifikanten Zusammenhänge gefunden werden.

Tabelle 49: Korrelationsüberprüfung (nach Pearson) des prozentualen Rückgangs der Nachbelastungs-Hf und den Leistungskenngrößen auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Altersgruppen

	Altersgruppen	Nachbelastung	N	V _{LT}	V _{2mmol/l}	V _{IAS}	V _{4mmol/l}	V _{max}
♂	≤ 20	E ₃	24	n.s.	.43*	n.s.	n.s.	n.s.
	21-30	E ₁	50	n.s.	.33*	n.s.	n.s.	.31*
		E ₃	50	n.s.	.35*	n.s.	.36*	n.s.
	31-40	E ₁	62	.29*	.44**	.37**	.47**	.34**
		E ₃	62	.33**	.49**	.40**	.51**	.53**
		E ₅	58	.34**	.42**	.36**	.44**	.30*
	41-50	E ₅	52	n.s.	.28*	n.s.	n.s.	n.s.
♀	21-30	E ₅	13	n.s.	n.s.	.59*	.58*	.64*

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

n.s. nicht signifikant

Für eine genauere Analyse des Einflusses der Ausdauerleistungsfähigkeit wurden Leistungsgruppen anhand der Laufgeschwindigkeit an der fixen anaeroben Schwelle gebildet. Eine Einteilung nach den Laufgeschwindigkeiten an der individuellen anaeroben Schwelle sowie nach der maximalen Leistung zeigte wenige bis keine signifikanten Mittelwertsunterschiede, weshalb im Folgenden nur die Resultate nach der Einteilung über die Laufgeschwindigkeit an der fixen anaeroben Schwelle analysiert werden. Mittels Berechnung

von Quartilen wurden die schlechtesten und besten 25 % (1. und 4. Quartil), nach Geschlecht unterteilt, berücksichtigt. Die resultierende Laufgeschwindigkeit der leistungsschwachen Männer beträgt $< 11,3$ km/h und $> 13,8$ km/h bei der leistungsstarken Gruppe sowie $< 9,1$ bzw. $> 11,9$ km/h bei den Frauen. Somit kann das Nachbelastungsverhalten der Hf hinsichtlich leistungsschwachen und -starken Probanden geprüft werden. Bei Berechnung der *Varianzanalyse (ANOVA)* zeigt der Parameter Herzfrequenz beim prozentualen Rückgang der Hf_{max} zu E₁ keinen signifikanten Geschlechtseffekt, jedoch einen signifikanten Effekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .070$) in der Leistungsgruppe. Es wurden im Verlauf von Hf_{max} zu E₁ in den leistungsstarken Gruppen signifikant höhere Rückgangswerte nachgewiesen als in den leistungsschwachen Gruppen. Es besteht keine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Leistungsgruppe (vgl. Tabelle 50).

Tabelle 50: Varianzanalyse (ANOVA) des prozentualen Rückgangs der Hf_{max} zu E₁ in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer unterteilt in leistungsschwache und -starke Gruppe (gemessen an v_{4mmol/l}) sowie Geschlecht

Rückgang in % von Hf _{max} zu:					Leistungsgruppe				
					schwach	stark			
E ₁			♂	N	59	45			
				MW	17,0	21,4			
			SD	± 6,6	± 7,2				
			♀	N	14	12			
				MW	14,5	19,1			
				SD	± 4,6	± 4,7			
			Σ	N	73	57			
				MW	16,6	20,9			
				SD	± 6,3	± 6,8			
ANOVA									
Geschlecht			Leistungsgruppe			Geschlecht x Leistungsgruppe			
F	p	η ²	F	p	η ²	F	p	η ²	
= 2,93	= .09	= .023	= 9,43	≤ .01	= .070	= 0,01	= .92	= .000	

Beim prozentualen Rückgang der Hf_{\max} zu E_3 zeigt die ANOVA ebenfalls keinen signifikanten Geschlechtseffekt, jedoch einen signifikanten Effekt ($p \leq .05$, $\eta^2 = .035$) in der Leistungsgruppe. Es wurden auch in diesem Verlauf in den leistungsstarken Gruppen signifikant höhere Rückgangswerte nachgewiesen als in den leistungsschwachen Gruppen. Es besteht wiederum keine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Leistungsgruppe (vgl. Tabelle 51).

Tabelle 51: Varianzanalyse (ANOVA) des prozentualen Rückgangs der Hf_{\max} zu E_3 in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer unterteilt in leistungsschwache und -starke Gruppe (gemessen an $v_{4\text{mmol/l}}$) sowie Geschlecht

Rückgang in % von Hf_{\max} zu:						Leistungsgruppe			
						schwach		stark	
E_3			♂	N	59	46			
				MW	26,4	31,2			
			SD	$\pm 8,3$	$\pm 6,6$				
			♀	N	16	12			
				MW	26,7	28,9			
			SD	$\pm 8,6$	$\pm 6,3$				
			Σ	N	75	58			
				MW	26,5	30,8			
			SD	$\pm 8,3$	$\pm 6,6$				
ANOVA									
Geschlecht			Leistungsgruppe			Geschlecht x Leistungsgruppe			
F	p	η^2	F	p	η^2	F	p	η^2	
= 0,36	= .55	= .023	= 4,64	$\leq .05$	= .035	= 0,65	= .42	= .005	

Beim prozentualen Rückgang der Hf_{\max} zu E_5 zeigt die ANOVA ebenfalls keinen signifikanten Geschlechtseffekt, jedoch einen signifikanten Effekt ($p \leq .05$, $\eta^2 = .041$) in der Leistungsgruppe. Es wurden auch im Verlauf von Hf_{\max} zu E_5 in den leistungsstarken Gruppen signifikant höhere Rückgangswerte nachgewiesen als in den leistungsschwachen Gruppen. Es besteht wiederum keine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Leistungsgruppe (vgl. Tabelle 52).

Tabelle 52: Varianzanalyse (ANOVA) des prozentualen Rückgangs der Hf_{max} zu E_5 in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer unterteilt in leistungsschwache und -starke Gruppe (gemessen an $v_{4mmol/l}$) sowie Geschlecht

Rückgang in % von Hf_{max} zu:						Leistungsgruppe		
						schwach		stark
E_5	♂	N	57		42			
		MW	38,3		41,6			
		SD	± 6,4		± 6,3			
	♀	N	15		12			
		MW	37,1		40,3			
		SD	± 7,0		± 6,8			
	Σ	N	72		54			
		MW	38,1		41,3			
		SD	± 6,5		± 6,4			
ANOVA								
Geschlecht			Leistungsgruppe			Geschlecht x Leistungsgruppe		
F	p	η^2	F	p	η^2	F	p	η^2
= 0,81	= .37	= .007	= 5,21	≤ .05	= .041	= 0,01	= .98	= .000

Die Ergebnisse zeigen insgesamt einen signifikant schnelleren Rückgang der Herzfrequenz bei leistungsstärkeren gegenüber leistungsschwächeren Personen. Dies liegt hauptsächlich an einer verbesserten Ökonomisierung des Herz-Kreislauf-Systems (z.B. Hypertrophie des Herzmuskels) bei den leistungsstarken Personen. Die Signifikanzen weisen jedoch kleine bis mittlere Effektstärken auf und sollten somit nicht überbewertet werden.

3.3.1.2 Analyse der Laktatkonzentrationen in der Nachbelastung

Zur Analyse der Laktatkonzentration in der Nachbelastung kann auf eine Stichprobe von 323 Probanden zurückgegriffen werden. Der Verlauf der Laktatkonzentration der Männer bei Testabbruch (La_0) von $9,3 \pm 2,1$ mmol/l steigt zu La_1 ($10,0 \pm 2,3$ mmol/l) um $0,7$ mmol/l bzw. $7,5$ % an. Nach der dritten Nachbelastungsminute (La_3) liegt der Laktatwert immer noch bei $10,0 \pm 2,4$ mmol/l. Somit werden zwischen der 1. und 3. Erholungsminute die höchsten Laktatkonzentrationen gemessen. Beim letzten Nachbelastungszeitpunkt nach 5 Minuten ($9,3 \pm 2,4$ mmol/l) wurde das Laktat soweit abgebaut, dass es wieder im Bereich des Testabbruchwertes liegt.

Bei den Probandinnen steigt die Laktatkonzentration von La_0 ($8,1 \pm 2,4$ mmol/l) auf La_1 ($8,6 \pm 2,4$ mmol/l) um $0,5$ mmol/l bzw. $6,2$ %. Somit wird bei den Frauen bei der 1. Erholungsminute die höchste Laktatkonzentration gemessen. Bei La_3 ($8,3 \pm 2,4$ mmol/l) liegt der Laktatwert zu La_1 um $0,3$ mmol/l niedriger, jedoch immer noch über dem Wert von La_0 . In der 5. Erholungsminute ($7,8 \pm 2,4$ mmol/l) fällt die Laktatkonzentration weiter ab. Der prozentuale Rückgang zu La_0 beträgt $3,7$ %. Das absolute Nachbelastungsverhalten der Laktatkonzentration kann der folgenden Tabelle 53 entnommen werden. Dabei werden bei der Laktatkonzentration zur besseren Einordnung zusätzlich die Werte vor der Belastung (Vorstart) mit aufgeführt. Abbildung 17 zeigt den Verlauf der Laktatkonzentration in der Nachbelastung (La_0 bis La_5).

Tabelle 53: Laktatkonzentrationen in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer

		La_{Vorstart} [mmol/l]	La_0 [mmol/l]	La_1 [mmol/l]	La_3 [mmol/l]	La_5 [mmol/l]
♂	N	245	245	201	201	180
	MW	1,1	9,3	10,0	10,0	9,3
	SD	$\pm 0,4$	$\pm 2,1$	$\pm 2,3$	$\pm 2,4$	$\pm 2,4$
♀	N	78	78	65	65	58
	MW	1,0	8,1	8,6	8,3	7,8
	SD	$\pm 0,4$	$\pm 2,0$	$\pm 2,4$	$\pm 2,4$	$\pm 2,4$
Σ	N	323	323	266	266	238
	MW	1,1	9,0	9,7	9,6	8,9
	SD	$\pm 0,4$	$\pm 2,2$	$\pm 2,4$	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$

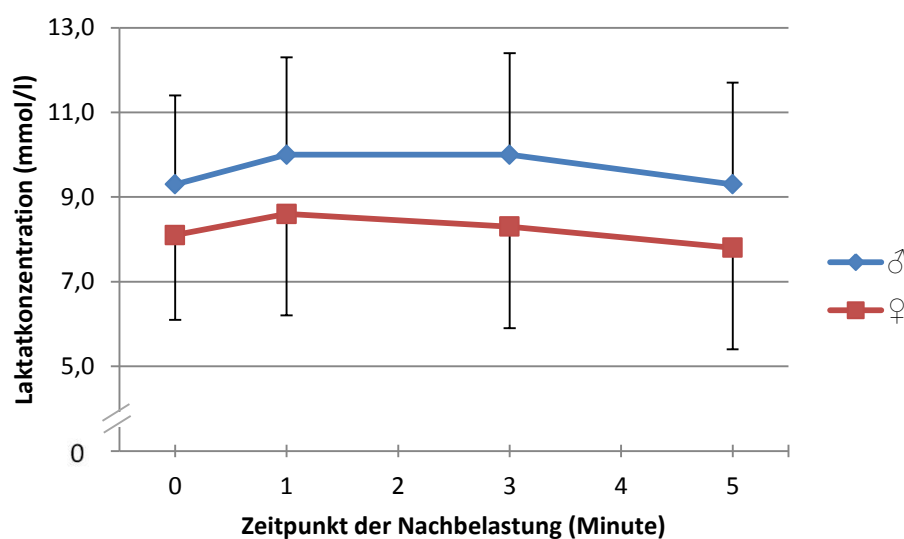


Abbildung 17: Nachbelastungsverhalten der Laktatkonzentration auf dem Laufbandergometer

Im Verlauf der Laktatkonzentration von E_0 zu E_1 zeigt die ANOVA sowohl einen signifikanten Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .061$), einen signifikanten Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .299$), als auch eine signifikante Interaktion zwischen Zeit und Geschlecht ($p \leq .01$, $\eta^2 = .032$). Sowohl bei den Männern, als auch bei den Frauen steigt die Laktatkonzentration innerhalb der ersten Nachbelastungsminute signifikant an. Die signifikante Interaktion zeigt außerdem, dass der Anstieg bei den Männern leicht höher ist. Im Verlauf von E_1 zu E_3 zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .076$), ein signifikanter Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .080$) sowie eine signifikante Interaktion zwischen Zeit und Geschlecht ($p \leq .01$, $\eta^2 = .027$). Im Intervall von Zeitpunkt E_1 zu E_3 beginnt die Laktatkonzentration bei den Frauen zu sinken, wobei sie bei den Männern annähernd konstant bleibt. Im letzten Messabschnitt zeigt der Verlauf von E_3 zu E_5 einen signifikanten Zeit- ($p \leq .01$, $\eta^2 = .515$) sowie Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .072$), allerdings keine signifikante Interaktion. Bei beiden Geschlechtern sinkt hierbei die Laktatkonzentration annähernd gleich schnell. Bei den Männern konnten signifikant höhere Werte ($p \leq .01$) der Laktatkonzentration bei allen Messzeitpunkten nachgewiesen werden.

Bei Betrachtung des Alters konnten bei der jüngeren männlichen Gruppe signifikant höhere ($p \leq .01$) Laktatkonzentrationen der einzelnen Messzeitpunkte nachgewiesen werden. Bei den Frauen konnte ein Signifikanzniveau von ($p \leq .05$) bei La_1 erreicht werden. Insgesamt konnten die jüngeren Gruppen höhere Laktatkonzentrationen bei La_0 bis La_5 aufweisen. Der Verlauf weist altersspezifisch keine signifikanten Unterschiede auf.

3.3.1.3 Analyse der absoluten Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung

Zur Analyse der absoluten Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung kann auf eine Stichprobe von 94 Probanden zurückgegriffen werden. Der Verlauf der VO_2 der Männer bei Testabbruch ($VO_{2/0}$) von $4,2 \pm 0,6$ l/min fällt zur ersten Nachbelastungsminute ($2,9 \pm 0,7$ l/min) um 1,3 l/min bzw. 30,5 % ab. Nach der dritten Nachbelastungsminute ($VO_{2/3}$) fällt die Sauerstoffaufnahme um insgesamt 1,9 l/min auf $2,3 \pm 0,6$ l/min und damit um 46,2 %. Beim letzten Nachbelastungszeitpunkt nach 5 Minuten ($1,0 \pm 0,5$ l/min) beträgt der Rückgang 3,2 l/min respektive 76,2 %.

Bei den Probandinnen fällt die Sauerstoffaufnahme von $VO_{2/0}$ ($2,6 \pm 0,3$ l/min) auf $VO_{2/1}$ ($1,9 \pm 0,5$ l/min) um 0,7 l/min bzw. 26,9 %. Nach der dritten Nachbelastungsminute ($VO_{2/3}$) fällt die Sauerstoffaufnahme um 1,0 l/min auf $1,6 \pm 0,5$ l/min und damit um 38,5 %. Bei $VO_{2/5}$ ($0,7 \pm 0,3$ l/min) beträgt der Rückgang 1,9 l/min respektive 73,1 %.

Der nachfolgenden Tabelle 54 sind die Mittelwerte der absoluten Sauerstoffaufnahme im Nachbelastungsverlauf zu entnehmen. Abbildung 17 verdeutlicht das absolute Nachbelastungsverhalten der Sauerstoffaufnahme auf dem Laufbandergometer.

Tabelle 54: Absolute Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer

		$VO_{2peak/0}$ [l/min]	$VO_{2/1}$ [l/min]	$VO_{2/3}$ [l/min]	$VO_{2/5}$ [l/min]
♂	N	75	72	70	69
	MW	4,2	2,9	2,3	1,0
	SD	$\pm 0,6$	$\pm 0,7$	$\pm 0,6$	$\pm 0,5$
♀	N	19	19	19	17
	MW	2,6	1,9	1,6	0,7
	SD	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,3$
Σ	N	94	91	89	86
	MW	3,9	2,7	2,1	0,9
	SD	$\pm 0,9$	$\pm 0,8$	$\pm 0,6$	$\pm 0,4$

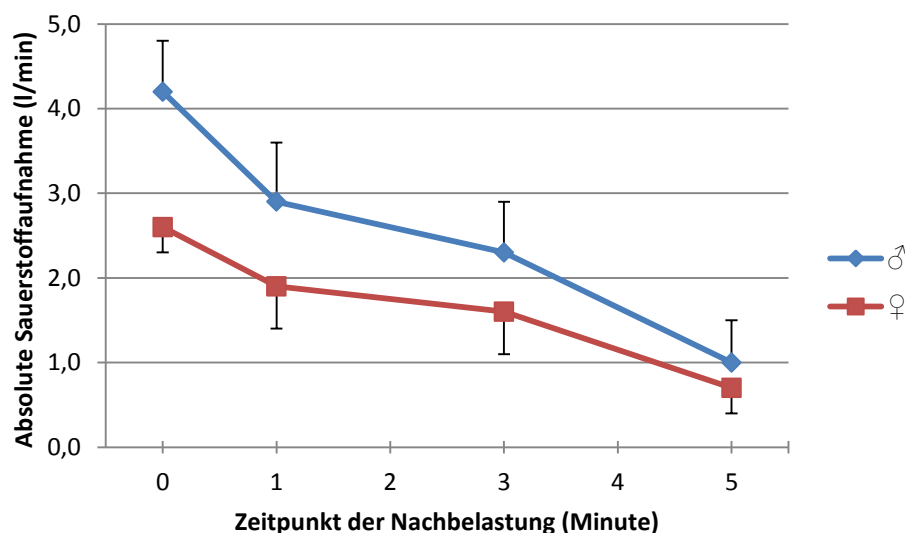


Abbildung 18: Nachbelastungsverhalten der absoluten Sauerstoffaufnahme auf dem Laufbandergometer

Im Verlauf der absoluten Sauerstoffaufnahme von E_0 zu E_1 zeigt die ANOVA sowohl einen signifikanten Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .489$), einen signifikanten Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .748$), als auch eine signifikante Interaktion zwischen Zeit und Geschlecht ($p \leq .01$, $\eta^2 = .177$). Sowohl bei den Männern, als auch bei den Frauen fällt die Sauerstoffaufnahme innerhalb der ersten Nachbelastungsminute signifikant ab. Die signifikante Interaktion zeigt außerdem, dass der Abfall bei den Männern höher ist als bei den Frauen. Im Verlauf von E_1 zu E_3 zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .305$), ein signifikanter Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .384$) sowie eine signifikante Interaktion zwischen Zeit und Geschlecht ($p \leq .01$, $\eta^2 = .086$). Im Intervall von Zeitpunkt E_1 zu E_3 flacht die Sauerstoffaufnahme bei beiden Geschlechtern leicht ab. Im letzten Messabschnitt zeigt der Verlauf von E_3 zu E_5 einen signifikanten Zeit- ($p \leq .01$, $\eta^2 = .795$) und Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .146$) sowie eine signifikante Interaktion ($p \leq .05$, $\eta^2 = .060$). Bei beiden Geschlechtern sinkt die Sauerstoffaufnahme wieder schneller ab, das auf die Testmethodik zurückzuführen ist (passive Nachbelastung von E_3 zu E_5). Bei den Männern konnten signifikant höhere Mittelwerte ($p \leq .01$, bei $VO_{2/5}$ $p \leq .05$) der absoluten Sauerstoffaufnahme bei den einzelnen Messzeitpunkten nachgewiesen werden.

Hinsichtlich des Alters erreichte die jüngere männlichen Gruppe eine signifikant höhere ($p \leq .01$) absolute Sauerstoffaufnahme bei $VO_{2/0}$ und $VO_{2/1}$ als die ältere männliche Gruppe. Bei den Frauen konnten keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

3.3.1.4 Analyse des respiratorischen Quotienten in der Nachbelastung

Zur Analyse des respiratorischen Quotienten in der Nachbelastung kann auf eine Stichprobe von 94 Probanden zurückgegriffen werden. Der Verlauf des RQ der Männer bei Testabbruch (RQ_0) von $1,11 \pm 0,09$ steigt zur ersten Nachbelastungsminute ($1,23 \pm 0,13$) um $0,12$ respektive $10,8\%$ an. Zur dritten Nachbelastungsminute (RQ_3) fällt der respiratorische Quotient von RQ_0 um $0,04$ auf $1,07 \pm 0,09$ ($3,6\%$). Zum letzten Nachbelastungszeitpunkt nach 5 Minuten ($1,06 \pm 0,13$) beträgt der Rückgang insgesamt $0,05$ bzw. $4,5\%$.

Bei den Probandinnen steigt der respiratorische Quotient von RQ_0 ($1,11 \pm 0,10$) auf RQ_1 ($1,21 \pm 0,15$) um $0,10$ bzw. $9,0\%$. Zur dritten Nachbelas-

tungsminute (RQ_3) fällt der respiratorische Quotient von RQ_0 um 0,04 auf $1,07 \pm 0,10$ (3,6 %). Zum letzten Nachbelastungszeitpunkt nach 5 Minuten ($1,19 \pm 0,16$) steigt der RQ wieder um 0,08 respektive 7,2 % zum RQ_0 an (vgl. Tabelle 55 und Abbildung 19).

Tabelle 55: Respiratorischer Quotient in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer

		RQ_0	RQ_1	RQ_3	RQ_5
♂	N	75	72	70	69
	MW	1,11	1,23	1,07	1,06
	SD	$\pm 0,09$	$\pm 0,13$	$\pm 0,09$	$\pm 0,13$
♀	N	19	19	19	17
	MW	1,11	1,21	1,07	1,19
	SD	$\pm 0,10$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,16$
Σ	N	94	91	89	86
	MW	1,11	1,22	1,07	1,08
	SD	$\pm 0,09$	$\pm 0,13$	$\pm 0,09$	$\pm 0,14$

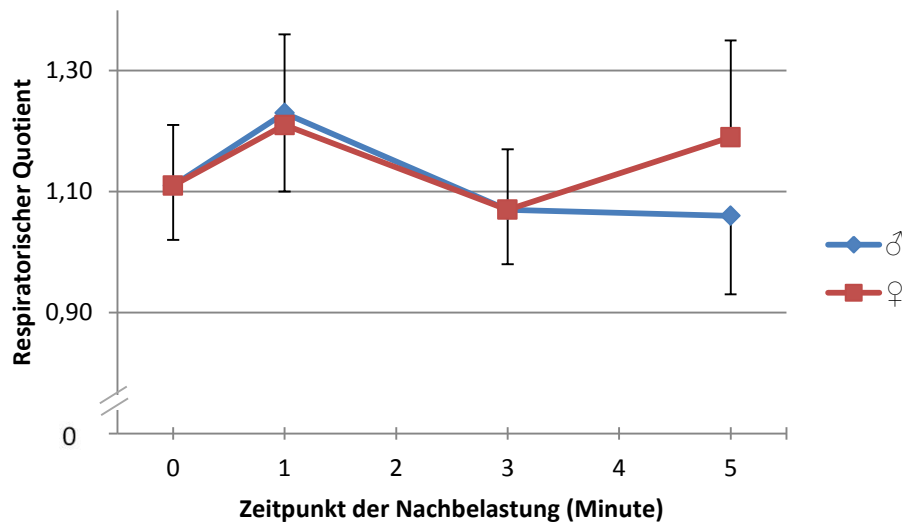


Abbildung 19: Nachbelastungsverhalten des respiratorischen Quotienten auf dem Laufbandergometer

Im Verlauf des respiratorischen Quotienten von E_0 zu E_1 zeigt die ANOVA keinen signifikanten Geschlechtseffekt, jedoch einen signifikanten Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .496$). Es zeigt sich allerdings keine signifikante Interaktion. Sowohl bei den Männern, als auch bei den Frauen steigt der RQ innerhalb der ersten Nachbelastungsminute annähernd gleich an. Im Verlauf von E_1 zu

E_3 zeigt sich ebenfalls kein signifikanter Geschlechtseffekt, allerdings ein signifikanter Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .516$). Es zeigt sich keine signifikante Interaktion. Im Intervall von Zeitpunkt E_1 zu E_3 sinkt der respiratorische Quotient bei beiden Geschlechtern gleich schnell ab. Im letzten Messabschnitt zeigt der Verlauf von E_3 zu E_5 einen signifikanten Zeit- ($p \leq .01$, $\eta^2 = .095$) und Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .081$) sowie eine signifikante Interaktion ($p \leq .01$, $\eta^2 = .135$). Während bei den Männern der RQ abflacht steigt der Wert bei den Frauen von E_3 zu E_5 wieder signifikant ($p \leq .01$) an. Dieser untypische Anstieg ist auf die Testmethodik (aktive Nachbelastung von E_0 bis zu E_3 , danach passive Erholung bis zu E_5), die geringere Leistungsfähigkeit den Männern gegenüber und die daraus resultierende erhöhte Nachatmung von CO_2 zurückzuführen

Bei Betrachtung des Alters wies die ältere männliche Gruppe einen signifikant höheren ($p \leq .01$) respiratorischen Quotienten bei RQ_0 und RQ_5 auf als die jüngere männliche Gruppe. Bei RQ_1 und RQ_3 konnten dabei ebenfalls höhere, jedoch nicht signifikante Werte ermittelt werden. Bei den Frauen konnten keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

3.3.1.5 Übersicht der Parameter in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer

In der nachstehenden Tabelle 24 werden die analysierten Parameter (Hf, La, abs. VO_2 und RQ) unterteilt in Geschlecht und Altersgruppen zusammenfassend dargestellt. Dabei werden die Werte der Laufbandergometrie bei Testabbruch (E_0) sowie die Nachbelastungswerte der ersten (E_1), dritten (E_3) und fünften (E_5) Erholungsminute berücksichtigt.

Tabelle 56: Übersicht der analysierten Parameter (Hf, La, abs. VO₂ und RQ) in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer unterteilt in Geschlecht und Altersgruppe

Alter [Jahre]	Herzfrequenz [S/min]				Laktatkonzentration [mmol/l]				Absolute Sauerstoffaufnahme [l/min]				Respiratorischer Quotient				
	Hf ₀	Hf ₁	Hf ₃	Hf ₅	La ₀	La ₁	La ₃	La ₅	VO _{2/0}	VO _{2/1}	VO _{2/3}	VO _{2/5}	RQ ₀	RQ ₁	RQ ₃	RQ ₅	
♂	≤ 20	N	24	24	17	30	23	17	5	5	5	4	5	5	5	4	
		MW	199,2	166,3	151,2	125,1	10,2	10,9	10,2	4,5	2,8	2,1	0,8	1,03	1,15	0,99	0,94
		SD	± 8,6	± 16,3	± 15,0	± 10,2	± 2,5	± 2,4	± 2,9	± 0,4	± 0,5	± 0,5	± 0,1	± 0,05	± 0,08	± 0,09	± 0,07
	21-30	N	75	50	50	49	75	50	47	36	34	32	32	36	34	32	32
		MW	191,5	154,7	135,3	117,3	9,7	10,5	10,3	4,5	3,1	2,4	1,1	1,10	1,22	1,07	1,04
		SD	± 8,2	± 18,1	± 16,3	± 12,9	± 2,0	± 2,1	± 2,3	± 0,6	± 0,8	± 0,6	± 0,5	± 0,09	± 0,14	± 0,08	± 0,09
	31-40	N	68	62	62	58	68	59	60	14	13	13	13	14	13	13	13
		MW	186,3	151,1	132,4	111,3	9,3	10,0	10,1	4,1	2,9	2,2	0,8	1,12	1,23	1,05	1,06
		SD	± 10,8	± 14,1	± 15,6	± 13,6	± 2,0	± 2,3	± 2,4	± 0,5	± 0,5	± 0,6	± 0,2	± 0,08	± 0,11	± 0,10	± 0,16
	41-50	N	57	54	54	52	57	54	53	17	17	17	17	17	17	17	17
		MW	183,4	147,0	128,3	109,9	8,7	9,5	9,5	3,9	2,7	2,3	1,0	1,16	1,29	1,12	1,11
		SD	± 11,0	± 14,0	± 12,5	± 12,6	± 1,9	± 2,0	± 2,2	± 0,5	± 0,6	± 0,5	± 0,6	± 0,07	± 0,13	± 0,08	± 0,15
> 50	N	15	15	15	15	15	15	14	3	3	3	3	3	3	3	3	
	MW	172,5	140,1	125,4	101,6	8,2	9,0	8,9	3,0	2,4	2,0	0,7	1,08	1,13	1,02	1,14	
	SD	± 10,4	± 16,5	± 21,8	± 17,6	± 2,2	± 2,6	± 2,7	± 0,1	± 0,2	± 0,7	± 0,3	± 0,05	± 0,04	± 0,10	± 0,08	
Σ	N	245	205	205	191	245	201	180	75	72	70	69	75	72	70	69	
	MW	188,0	151,9	133,7	112,9	9,3	10,0	10,0	4,2	2,9	2,3	1,0	1,11	1,23	1,07	1,06	
	SD	± 11,6	± 16,7	± 16,9	± 14,3	± 2,1	± 2,3	± 2,4	± 0,6	± 0,7	± 0,6	± 0,5	± 0,09	± 0,13	± 0,09	± 0,13	
♀	≤ 20	N	4	3	2	4	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	
		MW	198,0	172,7	149,0	121,5	9,5	9,9	9,7	7,8	2,0	1,8	0,6	1,31	1,42	1,14	1,37
		SD	± 7,5	± 3,1	± 8,7	± 5,0	± 0,9	± 2,1	± 2,3	± 1,2	± 0,2	± 0,3	± 0,6	± 0,09	± 0,13	± 0,09	± 0,13
	21-30	N	26	14	14	13	26	15	15	13	13	13	12	13	13	13	12
		MW	191,2	160,9	138,0	115,1	8,5	10,0	9,8	9,5	2,6	1,9	0,8	1,10	1,19	1,08	1,18
		SD	± 12,6	± 14,0	± 18,1	± 14,0	± 2,1	± 2,4	± 2,5	± 2,3	± 0,4	± 0,6	± 0,3	± 0,09	± 0,16	± 0,09	± 0,17
	31-40	N	17	17	17	17	17	17	16	1	1	1	1	1	1	1	1
		MW	184,1	149,7	131,4	109,4	8,1	8,5	8,1	7,4	2,6	1,4	0,6	1,25	1,33	1,10	1,27
		SD	± 6,8	± 14,6	± 17,9	± 15,6	± 2,1	± 2,4	± 2,3	± 2,3	± 0,6	± 0,6	± 0,6	± 0,09	± 0,16	± 0,09	± 0,17
	41-50	N	27	25	26	24	27	27	26	23	3	3	3	3	3	3	3
		MW	180,3	145,6	126,2	106,8	7,5	7,8	7,4	7,0	2,7	1,9	0,6	1,08	1,14	0,97	1,15
		SD	± 9,9	± 16,9	± 18,4	± 16,5	± 2,0	± 2,2	± 2,2	± 2,2	± 0,5	± 0,4	± 0,1	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,08
> 50	N	4	3	4	3	4	3	4	1	1	1	-	1	1	1	-	
	MW	171,3	141,3	115,8	96,3	8,4	7,9	8,5	7,7	2,5	0,8	-	1,13	1,42	1,23	-	
	SD	± 12,7	± 22,4	± 18,0	± 11,9	± 1,8	± 1,3	± 2,0	± 1,9	± 0,8	± 0,8	± 0,8	± 0,09	± 0,16	± 0,10	± 0,16	
Σ	N	78	62	64	59	78	65	58	19	19	19	17	19	19	19	17	
	MW	185,2	151,3	130,6	109,3	8,1	8,6	8,3	7,8	2,6	1,6	0,7	1,11	1,21	1,07	1,19	
	SD	± 11,9	± 17,0	± 18,8	± 15,7	± 2,0	± 2,4	± 2,4	± 2,4	± 0,3	± 0,5	± 0,3	± 0,10	± 0,15	± 0,10	± 0,16	
Σ	N	323	267	269	250	323	266	238	94	91	89	86	94	91	89	86	
	MW	187,3	151,7	133,0	112,1	9,0	9,7	9,6	8,9	3,9	2,1	0,9	1,11	1,22	1,07	1,08	
	SD	± 11,7	± 16,8	± 17,4	± 14,7	± 2,2	± 2,4	± 2,5	± 2,5	± 0,9	± 0,6	± 0,4	± 0,09	± 0,13	± 0,09	± 0,14	

3.3.2 Fahrradergometrie

In den folgenden Kapiteln wird auf die Untersuchung des Nachbelastungsverhaltens einzelner physiologischer Parameter bei der Fahrradergometrie eingegangen. Wie bereits in Kapitel 3.1.1 beschrieben, werden verschiedene Belastungsprotokolle für unterschiedliche Ziel- bzw. Leistungsgruppen verwendet. Da bei allen Protokollen von einer Ausbelastung der Probanden ausgegangen wird, steht die Betrachtung der Ergebnisse der Gesamtstichprobe auf dem Fahrradergometer im Vordergrund. Zur besseren Übersicht findet sich eine Unterteilung der absolvierten Testprotokolle im Anhang V, im Folgenden wird jedoch die Gesamtbetrachtung vorgestellt. Hierbei erfolgt die Analyse der Leistungskenngrößen der aeroben und anaeroben Schwellen sowie der maximalen Leistung.

Zur Analyse des Nachbelastungsverhaltens physiologischer Parameter bei fahrradergometrischen Untersuchungen kann - bei Verwendung aller Belastungsprotokolle - auf die Ergebnisse von 513 Probanden zurückgegriffen werden. Die Probanden der Gesamtstichprobe erreichen eine durchschnittliche Leistung (P) an den aeroben Schwellen von $118,9 \pm 41,5$ Watt (P_{LT}) bzw. von $147,9 \pm 61,1$ Watt ($P_{2\text{mmol/l}}$). Die Leistung an den anaeroben Schwellen liegt bei $167,4 \pm 56,2$ Watt (P_{IAS}) bzw. bei $181,3 \pm 63,7$ Watt ($P_{3\text{mmol/l}}$). Bei Testabbruch wurde bei einem Probanden ein Laktatwert < 2 mmol/l und bei 7 Probanden < 3 mmol/l ermittelt, weswegen bei der Leistung an den fixen Schwellen (2 bzw. 3mmol/l) nur 512 respektive 506 Probanden in die Ergebnisse einfließen. Das Gleiche gilt bei der Leistung an der individuellen anaeroben Schwelle. 2 Probanden konnten keinen Laktatwert von LT plus 1,0 mmol/l erreichen. Die maximale Leistung (P_{max}) liegt im Durchschnitt bei $253,1 \pm 85,2$ Watt.

Tabelle 57 sind die Leistungskenngrößen der Stichprobe der Fahrradergometrie zu entnehmen. Bei der hier dargestellten Stichprobe handelt es sich um eine Untermenge der in Tabelle 26 aufgeführten Gesamtstichprobe.

Tabelle 57: Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (Gesamtstichprobe) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch

	Alter [Jahre]		P _{LT} [Watt]	P _{2mmol/l} [Watt]	P _{IAS} [Watt]	P _{3mmol/l} [Watt]	P _{max} [Watt]
♂	≤ 20	N	28	28	28	28	28
		MW	166,4	211,1	229,5	247,9	337,9
		SD	± 27,4	± 53,6	± 37,7	± 43,6	± 50,0
	21-30	N	157	157	157	157	157
		MW	138,1	172,1	193,5	209,9	303,6
		SD	± 32,5	± 50,8	± 43,0	± 51,3	± 50,3
31-40	N	52	52	52	52	52	
	MW	148,7	191,9	210,2	229,6	322,7	
	SD	± 34,8	± 54,5	± 45,8	± 50,7	± 58,2	
41-50	N	50	50	50	49	50	
	MW	140,5	169,5	197,6	209,3	301,4	
	SD	± 32,2	± 57,2	± 41,6	± 50,0	± 53,6	
> 50	N	77	77	77	76	77	
	MW	106,6	132,6	150,7	163,6	216,5	
	SD	± 30,3	± 47,5	± 40,9	± 47,2	± 56,5	
	Σ	N	364	364	364	362	364
		MW	135,5	169,2	190,1	205,9	290,2
		SD	± 36,0	± 56,1	± 47,9	± 55,2	± 66,2
♀	≤ 20	N	7	7	7	7	7
		MW	98,0	126,1	137,4	150,4	222,4
		SD	± 32,7	± 49,4	± 44,1	± 49,8	± 53,9
	21-30	N	33	33	33	33	33
		MW	96,8	120,1	136,6	147,0	213,6
		SD	± 23,1	± 41,0	± 31,4	± 39,7	± 40,8
31-40	N	8	8	8	8	8	
	MW	87,0	113,2	124,4	137,8	210,5	
	SD	± 14,1	± 25,1	± 20,0	± 22,6	± 22,8	
41-50	N	21	21	21	21	21	
	MW	75,8	92,3	108,2	115,7	165,2	
	SD	± 15,7	± 32,1	± 22,1	± 30,6	± 46,7	
> 50	N	80	79	78	75	80	
	MW	68,9	81,4	97,4	103,6	130,4	
	SD	± 14,6	± 25,5	± 18,3	± 23,3	± 29,8	
	Σ	N	149	148	147	144	149
		MW	78,4	95,4	111,1	119,4	162,3
		SD	± 21,5	± 35,9	± 29,2	± 35,6	± 52,0
	Σ	N	513	512	511	506	513
		MW	118,9	147,9	167,4	181,3	253,1
		SD	± 41,5	± 61,1	± 56,2	± 63,7	± 85,2

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass auf dem Fahrradergometer bei den männlichen Probanden die jüngste Altersgruppe (≤ 20 Jahre) die höchste maximale Leistung erbringt. Danach folgen die 31-40 Jährigen, dann erst die 21-30 Jährigen. Bei den weiblichen Probanden ist festzustellen, dass ebenfalls die jüngste Altersgruppe die höchste Leistung liefert. Der Leistungsabfall erfolgt daraufhin kontinuierlich mit dem Alter.

In den folgenden Kapiteln zur Analyse der einzelnen Nachbelastungsparameter werden die einzelnen Altersgruppen nicht explizit aufgeführt. In Kapitel 3.3.2.5 zeigt Tabelle 34 eine Übersicht alle Parameter hinsichtlich Geschlecht und Altersgruppe. Eine Aufteilung der unterschiedlichen Belastungsprotokolle findet sich im Anhang V.

3.3.2.1 Analyse der Herzfrequenz in der Nachbelastung

Zur Analyse der Herzfrequenz in der Nachbelastung während der Fahrradergometrie kann auf eine Stichprobe von 513 Probanden zurückgegriffen werden. Der Rückgang der maximalen Herzfrequenz (Hf_0) der Männer von $180,2 \pm 16,6$ S/min zu Hf_1 ($154,4 \pm 18,4$ S/min) beträgt 25,8 S/min bzw. 14,3 %. Nach Hf_3 ($127,0 \pm 15,7$ S/min) ergibt sich ein Rückgang von insgesamt 53,2 S/min (29,5 %). Beim letzten Nachbelastungszeitpunkt nach 5 Minuten ($111,5 \pm 16,0$ S/min) beträgt der Rückgang 68,7 S/min respektive 38,1 %.

Der Rückgang der Herzfrequenz beträgt bei den Frauen von Hf_0 ($165,8 \pm 21,2$ S/min) zu Hf_1 ($143,1 \pm 21,7$ S/min) 22,7 S/min bzw. 13,7 %. Zu Hf_3 ($119,1 \pm 16,2$ S/min) ergibt sich ein Rückgang von 46,7 S/min und damit um insgesamt 28,2 %. Beim letzten Nachbelastungszeitpunkt Hf_5 ($104,2 \pm 15,8$ S/min) beträgt der Rückgang bei den Frauen 61,6 S/min respektive 37,1 %.

Tabelle 58 zeigt das absolute Nachbelastungsverhalten der Herzfrequenz auf dem Fahrradergometer. Dabei werden bei der Herzfrequenz zur besseren Einordnung zusätzlich die Werte vor der Belastung (Vorstart) mit aufgeführt. Abbildung 20 verdeutlicht den Verlauf von Hf_0 bis Hf_5 .

Tabelle 58: Herzfrequenzwerte in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer

		Hf_{Vorstart} [S/min]	Hf_0 [S/min]	Hf_1 [S/min]	Hf_3 [S/min]	Hf_5 [S/min]
♂	N	364	364	351	287	264
	MW	76,3	180,2	154,4	127,0	111,5
	SD	$\pm 13,3$	$\pm 16,6$	$\pm 18,4$	$\pm 15,7$	$\pm 16,0$
♀	N	149	149	147	129	113
	MW	80,9	165,8	143,1	119,1	104,2
	SD	$\pm 14,3$	$\pm 21,2$	$\pm 21,7$	$\pm 16,2$	$\pm 15,8$
Σ	N	513	513	498	416	377
	MW	77,6	176,0	151,1	124,5	109,4
	SD	$\pm 13,7$	$\pm 19,2$	$\pm 20,1$	$\pm 16,3$	$\pm 16,2$

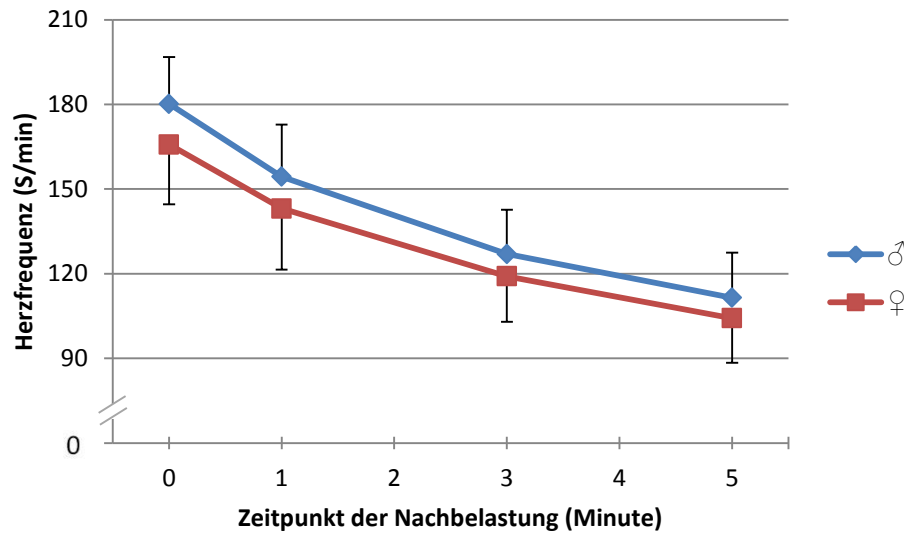


Abbildung 20: Nachbelastungsverhalten der Herzfrequenz auf dem Fahrradergometer

Im Verlauf der Herzfrequenz von E_0 zu E_1 zeigt die ANOVA sowohl einen signifikanten Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .097$), einen signifikanten Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .798$), als auch eine signifikante Interaktion zwischen Zeit und Geschlecht ($p \leq .01$, $\eta^2 = .016$). Sowohl bei den Männern, als auch bei den Frauen fällt die Herzfrequenz innerhalb der ersten Nachbelastungsminute signifikant ab. Die signifikante Interaktion zeigt außerdem, dass der Abfall bei den Männern leicht höher ist. Im Verlauf von E_1 zu E_3 zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .072$), ein signifikanter Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .789$) sowie eine signifikante Interaktion zwischen Zeit und Geschlecht ($p \leq .01$, $\eta^2 = .022$). Auch hierbei ist der Abfall bei den Männern leicht höher. Im letzten Messabschnitt zeigt der Verlauf von E_3 zu E_5 einen signifikanten Zeit- ($p \leq .01$, $\eta^2 = .769$) sowie Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .039$), allerdings keine signifikante Interaktion. Bei beiden Geschlechtern sinkt hierbei die Herzfrequenz annähernd gleich schnell. Bei den Männern konnten signifikant höhere Werte ($p \leq .01$) der Herzfrequenz bei allen Messzeitpunkten nachgewiesen werden.

Bei der Berücksichtigung des Alters konnten im Nachbelastungsverlauf keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden. Hierbei wurden mittels Berechnung von Quartilen die jüngsten mit den ältesten 25 % der Stichprobe, unterteilt nach Geschlecht, hinsichtlich des prozentualen Rückgangs verglichen.

Die junge männliche Gruppe weist ein Alter von < 24 Jahre und die ältere Gruppe > 48 Jahre auf sowie $< 29,5$ Jahre bzw. $> 61,5$ Jahre bei den Frauen. Bei Betrachtung der einzelnen Messzeitpunkte konnten sowohl bei der jüngeren männlichen als auch der jüngeren weiblichen Gruppe signifikant höhere ($p \leq .01$) Herzfrequenzen nachgewiesen werden.

Um aus dem Nachbelastungsverlauf der Herzfrequenz Rückschlüsse auf die Ausdauerleistungsfähigkeit auf dem Fahrradergometer zu ziehen, wurden *Korrelationsüberprüfungen nach Pearson* durchgeführt. Zuerst wurde überprüft, ob es Zusammenhänge hinsichtlich der Messzeitpunkte (E_1 , E_3 und E_5) gibt. Bei einem perfekten Zusammenhang der drei Messzeitpunkte müsste bei der weiteren Betrachtung nur ein einziger Messzeitpunkt berücksichtigt werden, von dem auf die beiden anderen Messzeitpunkte geschlossen werden könnte.

Die Berechnung zeigt einen mittleren Zusammenhang von E_1 zu E_3 in Höhe von $r = .54$ bei den Männern bzw. $r = .69$ bei den Frauen sowie von $r = .38$ respektive $r = .42$ bei E_1 zu E_5 . Zudem besteht ein hoher Zusammenhang von $r = .74$ bei den Männern und $r = .79$ bei den Frauen zwischen den Ergebnissen bei E_3 und E_5 . Die Ergebnisse der Messzeitpunkte zeigen hohe bis mittlere Zusammenhänge, die jedoch nicht ausreichend hoch sind, um von einem Messzeitpunkt auf den anderen zu schließen.

Die Analyse des prozentualen Rückgangs der Herzfrequenz zur 1., 3. und 5. Erholungsminute im Verhältnis zu den Leistungskenngrößen der individuellen und fixen Schwellen sowie der maximalen Leistung zeigt bei den Männern niedrige Zusammenhänge ($r = .18 - .37$) aller Leistungskenngrößen im Vergleich zum prozentualen Rückgang der Hf zur 1., 3. und 5. Erholungsminute. Bei den Frauen werden zur 1. Erholungsminute keine Zusammenhänge ermittelt. Dagegen zeigen sich niedrige Zusammenhänge von $r = .24 - .34$ bei den Kenngrößen (außer v_{LT}) bei E_3 . Ferner werden bei E_5 bei beiden fixen Schwellen ebenfalls niedrige Zusammenhänge ($r = .28$ bzw. $.27$) gefunden. Die beschriebenen Werte und das jeweilige Signifikanzniveau sind der folgenden Tabelle 59 zu entnehmen.

Tabelle 59: Korrelationsüberprüfung (nach Pearson) des prozentualen Rückgangs der Nachbelastungs-Hf und den Leistungskenngrößen auf dem Fahrradergometer

	Nachbelastung	N	v _{LT}	v _{2mmol/l}	v _{IAS}	v _{3mmol/l}	v _{max}
♂	E ₁	351	.24**	.21**	.23**	.24**	.18**
	E ₃	287	.33**	.32**	.35**	.37**	.35**
	E ₅	264	.18**	.23**	.21**	.25**	.19**
♀	E ₁	147	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	E ₃	129	n.s.	.34**	.24**	.32**	.28**
	E ₅	113	n.s.	.28**	n.s.	.27**	n.s.

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

n.s. nicht signifikant

Bei weiterer Betrachtung der Altersgruppen konnten bei den Männern vor allem in den Altersgruppen der 21-30 Jährigen, der 41-50 Jährigen und der über 50 Jährigen ein mittlerer bis niedriger Zusammenhang ($r = .23 - .49$) hinsichtlich der Leistungskenngrößen zur prozentualen Abnahme der Hf im Nachbelastungsverlauf ermittelt werden. Es besteht bei den 21-30 jährigen sowie bei den über 50 jährigen Frauen mittlere bis niedrige Zusammenhänge ($r = .26 - .66$) der Leistungskenngrößen im Nachbelastungsverlauf. Die weiteren Zusammenhänge und das Signifikanzniveau sind der folgenden Tabelle 60 zu entnehmen. Bei den nicht aufgeführten Altersgruppen und Nachbelastungszeitpunkten konnten keine signifikanten Zusammenhänge gefunden werden.

Tabelle 60: Korrelationsüberprüfung (nach Pearson) des prozentualen Rückgangs der Nachbelastungs-Hf und den Leistungskenngrößen auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Altersgruppen

	Altersgruppen	Nachbelastung	N	v _{LT}	v _{2mmol/l}	v _{IAS}	v _{3mmol/l}	v _{max}
♂	21-30	E ₁	150	.26**	.24**	.23**	.26**	n.s.
		E ₃	92	.30**	.30**	.33**	.35**	.31**
		E ₅	83	.28*	.38**	.34**	.39**	n.s.

	41-50	E ₁	49	.33*	n.s.	.28*	n.s.	.31*
		E ₃	49	.40**	.29*	.40**	.42**	.49**
	> 50	E ₁	75	.28*	.32**	.30*	.31**	n.s.
		E ₃	76	.41**	.37**	.41**	.42**	.39**
		E ₅	71	.39**	.29*	.37**	.37**	.44**
	♀	21-30	E ₃	15	n.s.	.53*	n.s.	.53*
E ₅			15	n.s.	.60*	n.s.	.62*	.66**
> 50		E ₁	79	n.s.	.27*	n.s.	.26*	n.s.
		E ₃	79	n.s.	.44**	.27*	.40**	.28*
		E ₅	66	n.s.	.40**	.26*	.39**	.26*

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

n.s. nicht signifikant

Für eine genauere Analyse des Einflusses der Ausdauerleistungsfähigkeit wurden Gruppen anhand der Leistung an der fixen anaeroben Schwelle gebildet. Eine Leistungseinteilung an der individuellen anaeroben Schwelle sowie an der maximalen Leistung weisen ähnliche signifikante Mittelwertsunterschiede auf, weshalb im Folgenden nur die Resultate dieser Einteilung an der fixen anaeroben Schwelle analysiert werden. Mittels Berechnung von Quartilen wurden auf dem Fahrradergometer die schlechtesten und besten 25 % (1. und 4. Quartil), nach Geschlecht unterteilt, berücksichtigt. Die resultierende Leistung der leistungsschwachen Männer beträgt < 168,3 Watt und > 245,8 Watt bei der leistungsstarken Gruppe sowie < 93,2 Watt bzw. > 143,2 Watt bei den Frauen. Somit kann das Nachbelastungsverhalten der Hf hinsichtlich leistungsschwachen und -starken Probanden geprüft werden. Bei Berechnung der *Varianzanalyse (ANOVA)* zeigt der Parameter Herzfrequenz beim prozentualen Rückgang der Hf_{max} zu E₁ keinen signifikanten Geschlechtseffekt, jedoch einen signifikanten Effekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .041$) in der Leistungsgruppe. Es wurden im Verlauf von Hf_{max} zu E₁ in den leistungsstarken Gruppen signifikant höhere Rückgangswerte nachgewiesen als in den leistungsschwachen Gruppen. Es besteht keine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Leistungsgruppe (vgl. Tabelle 61).

Tabelle 61: Varianzanalyse (ANOVA) des prozentualen Rückgangs der Hf_{max} zu E_1 in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer unterteilt in leistungsschwache und -starke Gruppe (gemessen an $v_{4mmol/l}$) sowie Geschlecht

Rückgang in % von Hf_{max} zu:			Leistungsgruppe					
			schwach	stark				
E_1	♂	N	87	87				
		MW	12,1	16,1				
		SD	± 5,1	± 6,7				
	♀	N	34	35				
		MW	12,1	13,8				
		SD	± 8,0	± 5,4				
Σ	N	122	122					
	MW	12,1	15,5					
	SD	± 6,1	± 6,4					
ANOVA								
Geschlecht			Leistungsgruppe			Geschlecht x Leistungsgruppe		
F	p	η^2	F	p	η^2	F	p	η^2
= 1,78	= .18	= .007	= 10,28	≤ .01	= .041	= 1,80	= .18	= .007

Beim prozentualen Rückgang der Hf_{max} zu E_3 zeigt die ANOVA einen signifikanten Geschlechtseffekt ($p \leq .05$, $\eta^2 = .028$) sowie einen signifikanten Effekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .178$) in der Leistungsgruppe. Es wurden in diesem Verlauf in den leistungsstarken Gruppen signifikant höhere Rückgangswerte nachgewiesen als in den leistungsschwachen Gruppen. Es besteht allerdings keine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Leistungsgruppe (vgl. Tabelle 62).

Tabelle 62: Varianzanalyse (ANOVA) des prozentualen Rückgangs der Hf_{max} zu E_3 in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer unterteilt in leistungsschwache und -starke Gruppe (gemessen an $v_{4mmol/l}$) sowie Geschlecht

Rückgang in % von Hf_{max} zu:			Leistungsgruppe	
			schwach	stark
E_3	♂	N	74	76
		MW	25,2	31,6
		SD	± 7,0	± 5,1
	♀	N	32	25
		MW	22,7	29,3
		SD	± 8,0	± 4,4
Σ	N	106	101	
	MW	24,5	31,0	
	SD	± 7,3	± 5,0	

ANOVA								
Geschlecht			Leistungsgruppe			Geschlecht x Leistungsgruppe		
F	p	η^2	F	p	η^2	F	p	η^2
= 5,95	≤ .05	= .028	= 43,92	≤ .01	= .178	= 0,02	= .90	= .000

Beim prozentualen Rückgang der Hf_{\max} zu E_5 zeigt die ANOVA keinen signifikanten Geschlechtseffekt, jedoch einen signifikanten Effekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .078$) in der Leistungsgruppe. Es wurden auch im Verlauf von Hf_{\max} zu E_5 in den leistungsstarken Gruppen signifikant höhere Rückgangswerte nachgewiesen als in den leistungsschwachen Gruppen. Es besteht keine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Leistungsgruppe (vgl. Tabelle 63).

Tabelle 63: Varianzanalyse (ANOVA) des prozentualen Rückgangs der Hf_{\max} zu E_5 in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer unterteilt in leistungsschwache und -starke Gruppe (gemessen an $v_{4\text{mmol/l}}$) sowie Geschlecht

Rückgang in % von Hf_{\max} zu:			Leistungsgruppe	
			schwach	stark
E_5	♂	N	70	71
		MW	35,3	39,0
		SD	± 7,9	± 5,9
	♀	N	27	24
		MW	34,1	39,3
		SD	± 7,5	± 4,8
Σ	N	97	95	
	MW	35,0	39,1	
	SD	± 7,7	± 5,6	

ANOVA								
Geschlecht			Leistungsgruppe			Geschlecht x Leistungsgruppe		
F	p	η^2	F	p	η^2	F	p	η^2
= 0,15	= .70	= .001	= 15,89	≤ .01	= .078	= 0,48	= .49	= .003

Die Ergebnisse zeigen insgesamt einen signifikant schnelleren Rückgang der Herzfrequenz bei leistungsstärkeren gegenüber leistungsschwächeren Personen. Dies liegt hauptsächlich an einer verbesserten Ökonomisierung des Herz-Kreislauf-Systems (z.B. Hypertrophie des Herzmuskels) bei den leistungsstarken Personen.

3.3.2.2 Analyse der Laktatkonzentrationen in der Nachbelastung

Zur Analyse der Laktatkonzentration in der Nachbelastung während der Fahrradergometrie kann auf eine Stichprobe von 513 Probanden zurückgegriffen werden. Der Verlauf der Laktatkonzentration der Männer bei Testabbruch (La_0) von $9,4 \pm 2,6$ mmol/l steigt zur ersten Nachbelastungsminute ($9,9 \pm 2,7$ mmol/l) um $0,5$ mmol/l bzw. $5,3$ % an. Bei den Männern wird bei der 1. Erholungsminute die höchste Laktatkonzentration gemessen. Nach der dritten Nachbelastungsminute fällt die Laktatkonzentration wieder auf den gleichen Wert wie bei Testabbruch (La_0) zurück. Beim letzten Nachbelastungszeitpunkt La_5 ($8,8 \pm 2,8$ mmol/l) fällt die Laktatkonzentration unter den Wert vom Testabbruch mit $0,6$ mmol/l bzw. $6,4$ %.

Bei den Frauen steigt die Laktatkonzentration von La_0 ($7,0 \pm 2,9$ mmol/l) auf La_1 ($7,3 \pm 3,0$ mmol/l) um $0,3$ mmol/l bzw. $4,3$ %. Somit wird bei den Frauen ebenfalls zur 1. Erholungsminute die höchste Laktatkonzentration gemessen. Bei La_3 ($6,7 \pm 3,0$ mmol/l) liegt der Laktatwert im Gegensatz zu La_0 um $0,3$ mmol/l respektive $4,3$ % niedriger. In der 5. Erholungsminute ($6,6 \pm 2,9$ mmol/l) fällt die Laktatkonzentration weiter leicht ab. Der prozentuale Rückgang zu La_0 beträgt $5,7$ %.

Das absolute Nachbelastungsverhalten der Laktatkonzentration auf dem Fahrradergometer kann der folgenden Tabelle 64 entnommen werden. Dabei werden bei der Laktatkonzentration zur besseren Einordnung zusätzlich die Werte vor der Belastung (Vorstart) mit aufgeführt. Abbildung 21 veranschaulicht den Verlauf der Laktatkonzentration in der Nachbelastung (La_0 bis La_5).

Tabelle 64: Laktatkonzentration in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer

		La_{Vorstart} [mmol/l]	La_0 [mmol/l]	La_1 [mmol/l]	La_3 [mmol/l]	La_5 [mmol/l]
♂	N	364	364	349	278	252
	MW	0,9	9,4	9,9	9,4	8,8
	SD	$\pm 0,3$	$\pm 2,6$	$\pm 2,7$	2,9	$\pm 2,8$
♀	N	149	149	145	123	100
	MW	1,0	7,0	7,3	6,7	6,6
	SD	$\pm 0,4$	$\pm 2,9$	$\pm 3,0$	$\pm 3,0$	$\pm 2,9$
Σ	N	513	513	494	401	352
	MW	0,9	8,7	9,1	8,6	8,2
	SD	$\pm 0,3$	$\pm 2,9$	$\pm 3,0$	$\pm 3,2$	$\pm 3,0$

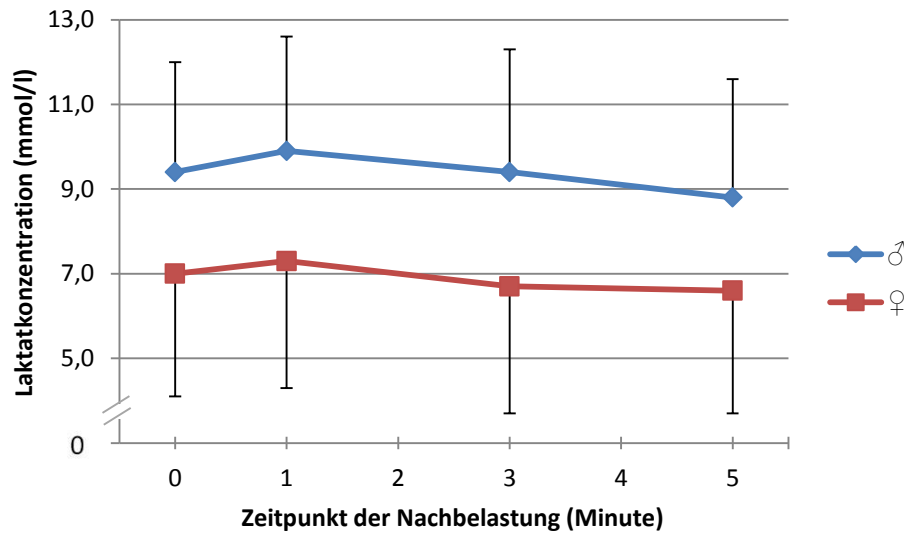


Abbildung 21: Nachbelastungsverhalten der Laktatkonzentration auf dem Fahrradergometer

Im Verlauf der Laktatkonzentration von E_0 zu E_1 zeigt die ANOVA einen signifikanten Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .148$) sowie einen signifikanten Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .145$), jedoch keine signifikante Interaktion zwischen Zeit und Geschlecht. Sowohl bei den Männern, als auch bei den Frauen steigt die Laktatkonzentration innerhalb der ersten Nachbelastungsminute an. Im Verlauf von E_1 zu E_3 zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Geschlechts- ($p \leq .01$, $\eta^2 = .152$) sowie Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .122$). Es zeigt sich keine signifikante Interaktion zwischen Zeit und Geschlecht. Bei beiden Geschlechtern sinkt hierbei die Laktatkonzentration annähernd gleich schnell. Im letzten Messabschnitt zeigt der Verlauf von E_3 zu E_5 einen signifikanten Zeit- ($p \leq .01$, $\eta^2 = .350$) sowie Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .109$), allerdings keine signifikante Interaktion. Im Intervall von Zeitpunkt E_3 zu E_5 fällt die Laktatkonzentration bei den Männern weiter ab, wobei sie bei den Frauen annähernd konstant bleibt. Insgesamt konnten bei den Männern signifikant höhere Werte ($p \leq .01$) der Laktatkonzentration bei allen Messzeitpunkten nachgewiesen werden.

Bei Betrachtung des Alters konnten bei der jüngeren männlichen sowie der jüngeren weiblichen Gruppe signifikant höhere ($p \leq .01$) Laktatkonzentrationen der einzelnen Messzeitpunkte nachgewiesen werden als bei den jeweili-

gen älteren Gruppen. Der prozentuale Verlauf weist altersspezifisch keine signifikanten Unterschiede auf.

3.3.2.3 Analyse der absoluten Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung

Zur Analyse der absoluten Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung kann auf eine Stichprobe von 305 Probanden zurückgegriffen werden. Der Verlauf der VO_2 der Männer bei Testabbruch ($VO_{2/0}$) von $3,6 \pm 0,8$ l/min fällt zur ersten Nachbelastungsminute ($2,4 \pm 0,6$ l/min) um 1,2 l/min bzw. 33,3 % ab. Nach der dritten Nachbelastungsminute ($VO_{2/3}$) fällt die Sauerstoffaufnahme insgesamt um 2,1 l/min auf $1,5 \pm 0,4$ l/min und damit um 58,3 % ab. Beim letzten Nachbelastungszeitpunkt nach 5 Minuten ($0,7 \pm 0,3$ l/min) beträgt der Rückgang 2,9 l/min respektive 80,6 %.

Bei den Probandinnen fällt die Sauerstoffaufnahme von $VO_{2/0}$ ($2,0 \pm 0,6$ l/min) auf $VO_{2/1}$ ($1,7 \pm 0,3$ l/min) um 0,3 l/min bzw. 15,0 %. Nach der dritten Nachbelastungsminute ($VO_{2/3}$) fällt die Sauerstoffaufnahme um 0,7 l/min auf $1,3 \pm 0,2$ l/min (35,0 %) ab. Beim letzten Nachbelastungszeitpunkt nach 5 Minuten ($0,5 \pm 0,2$ l/min) beträgt der Rückgang 1,5 l/min respektive 75,0 %.

Der nachfolgenden Tabelle 65 sind die Mittelwerte der absoluten Sauerstoffaufnahme im Nachbelastungsverlauf zu entnehmen. Abbildung 22 veranschaulicht das absolute Nachbelastungsverhalten der Sauerstoffaufnahme auf dem Fahrradergometer.

Tabelle 65: Absolute Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer

		$VO_{2peak/0}$ [l/min]	$VO_{2/1}$ [l/min]	$VO_{2/3}$ [l/min]	$VO_{2/5}$ [l/min]
♂	N	215	113	66	49
	MW	3,6	2,4	1,5	0,7
	SD	$\pm 0,8$	$\pm 0,6$	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$
♀	N	90	17	5	4
	MW	2,0	1,7	1,3	0,5
	SD	$\pm 0,6$	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
Σ	N	305	130	71	53
	MW	3,1	2,3	1,5	0,7
	SD	$\pm 1,0$	$\pm 0,6$	$\pm 0,4$	$\pm 0,3$

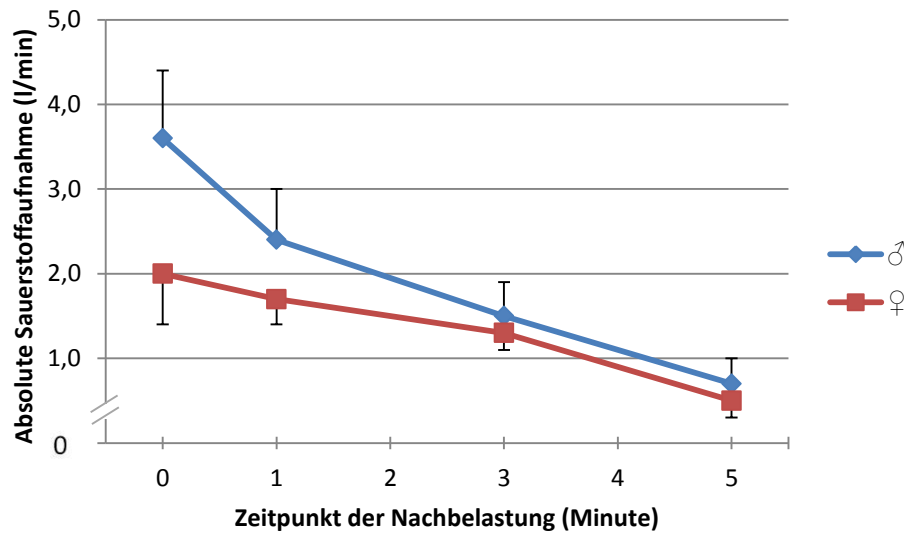


Abbildung 22: Nachbelastungsverhalten der absoluten Sauerstoffaufnahme auf dem Fahrradergometer

Im Verlauf der absoluten Sauerstoffaufnahme von E_0 zu E_1 zeigt die ANOVA einen signifikanten Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .264$), einen signifikanten Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .605$), sowie eine signifikante Interaktion zwischen Zeit und Geschlecht ($p \leq .01$, $\eta^2 = .096$). Sowohl bei den Männern, als auch bei den Frauen fällt die VO_2 innerhalb der ersten Nachbelastungsminute signifikant ab. Die signifikante Interaktion zeigt zudem, dass der Abfall bei den Männern höher ist als bei den Frauen. Im Verlauf von E_1 zu E_3 zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Geschlechtseffekt ($p \leq .05$, $\eta^2 = .052$) sowie ein signifikanter Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .268$), jedoch keine signifikante Interaktion. Im Intervall von Zeitpunkt E_1 zu E_3 flacht die Sauerstoffaufnahme bei beiden Geschlechtern leicht ab. Im letzten Messabschnitt zeigt der Verlauf von E_3 zu E_5 einen signifikanten Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .575$), allerdings keinen signifikanten Geschlechtseffekt sowie keine signifikante Interaktion. Bei beiden Geschlechtern sinkt die Sauerstoffaufnahme in diesem Intervall gleich schnell ab. Bei den Männern konnten insgesamt signifikant höhere Mittelwerte ($p \leq .01$) bei $VO_{2/0}$ sowie $VO_{2/1}$ nachgewiesen werden.

Hinsichtlich des Alters erreichten sowohl die jüngere männliche als auch die jüngere weibliche Gruppe eine signifikant höhere ($p \leq .01$) absolute Sauerstoffaufnahme bei $VO_{2/0}$ als die jeweilige ältere Gruppe. Im weiteren Verlauf konnten keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

3.3.2.4 Analyse des respiratorischen Quotienten in der Nachbelastung

Zur Analyse des RQ in der Nachbelastung kann auf eine Stichprobe von 305 Probanden zurückgegriffen werden. Der Verlauf des RQ der Männer bei Testabbruch (RQ_0) von $1,14 \pm 0,09$ steigt zu RQ_1 ($1,32 \pm 0,18$) um 0,18 bzw. 15,8 % an. Zur dritten Nachbelastungsminute (RQ_3) fällt der RQ von RQ_0 um 0,03 auf $1,11 \pm 0,14$ und damit um 2,6 % ab. Zum letzten Nachbelastungszeitpunkt RQ_5 ($1,01 \pm 0,19$) beträgt der Rückgang 0,13 respektive 11,4 %. Bei den Frauen steigt ebenfalls der RQ von RQ_0 ($1,15 \pm 0,12$) auf RQ_1 ($1,25 \pm 0,15$) um 0,10 bzw. 8,7 %. RQ_3 ($1,20 \pm 0,23$) weist ein niedrigerer Wert auf, als RQ_1 , ist jedoch höher als der Wert bei RQ_0 . Zum letzten Nachbelastungszeitpunkt RQ_5 ($1,12 \pm 0,15$) fällt der RQ um 0,03 respektive 2,6 % im Vergleich zu RQ_0 ab (vgl. Tabelle 66 und Abbildung 23).

Tabelle 66: Respiratorischer Quotient in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer (Gesamtwerte)

		RQ_0	RQ_1	RQ_3	RQ_5
♂	N	215	113	66	49
	MW	1,14	1,32	1,11	1,01
	SD	$\pm 0,09$	$\pm 0,18$	$\pm 0,14$	$\pm 0,19$
♀	N	90	17	5	4
	MW	1,15	1,25	1,20	1,12
	SD	$\pm 0,12$	$\pm 0,17$	$\pm 0,23$	$\pm 0,15$
Σ	N	305	130	71	53
	MW	1,14	1,31	1,12	1,02
	SD	$\pm 0,97$	$\pm 0,18$	$\pm 0,15$	$\pm 0,19$

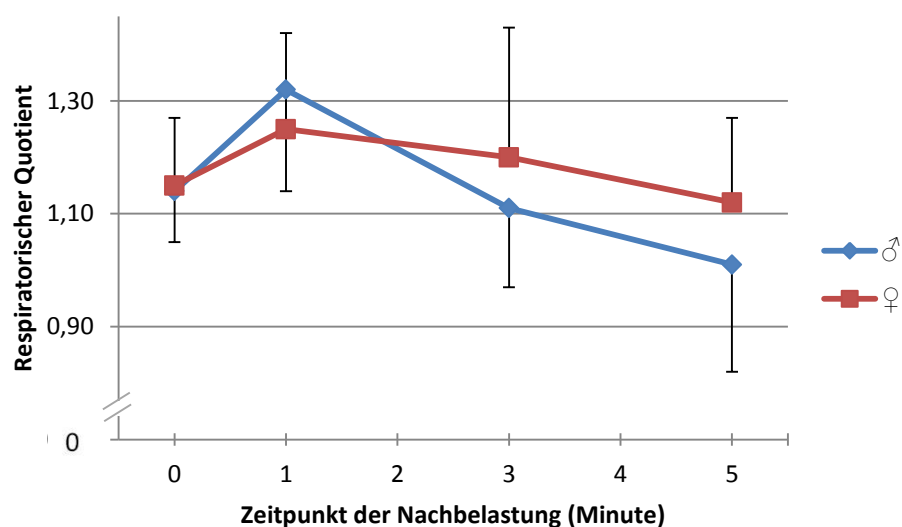


Abbildung 23: Nachbelastungsverhalten des respiratorischen Quotienten auf dem Fahrradergometer

Im Verlauf des respiratorischen Quotienten von E_0 zu E_1 zeigt die ANOVA keinen signifikanten Geschlechtseffekt, jedoch einen signifikanten Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .396$). Es zeigt sich allerdings keine signifikante Interaktion. Bei beiden Geschlechtern steigt der RQ innerhalb der ersten Nachbelastungsminute an, bei den Männern mehr als bei den Frauen. Im Verlauf von E_1 zu E_3 zeigt sich ebenfalls kein signifikanter Geschlechtseffekt, jedoch ein signifikanter Zeiteffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .182$). Es zeigt sich keine signifikante Interaktion. Im Intervall von Zeitpunkt E_1 zu E_3 fällt der respiratorische Quotient bei beiden Geschlechtern ab, wobei der Abfall bei den Männern höher ist als bei den Frauen. Im letzten Messabschnitt zeigt der Verlauf von E_3 zu E_5 weder signifikante Zeit- noch Geschlechtseffekte. Somit zeigt sich keine signifikante Interaktion. Bei beiden Geschlechtern fällt jedoch der RQ weiter ab.

Bei Betrachtung des Alters weist nur die ältere männliche Gruppe einen signifikant höheren ($p \leq .01$) respiratorischen Quotienten bei RQ_5 auf. Die leistungsstärkere männliche Gruppe zeigt zu RQ_1 einen signifikant höheren ($p \leq .01$) Anstieg im Nachbelastungsverlauf als die leistungsschwächere Gruppe. Bei den Frauen konnten alters- und leistungsspezifisch weder tendenzielle noch signifikante Unterschiede beobachtet werden.

Bei den respiratorischen Parametern ist die geringe Anzahl von - vor allem weiblichen - Probanden während den Messzeitpunkten E_3 und E_5 zu berücksichtigen.

3.3.2.5 Übersicht der Parameter in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer

In der nachstehenden Tabelle 24 werden die analysierten Parameter (Hf, La, abs. VO_2 und RQ) unterteilt in Geschlecht und Altersgruppen zusammenfassend dargestellt. Dabei werden die Werte der Fahrradergometrie bei Testabbruch (E_0) sowie die Nachbelastungswerte der ersten (E_1), dritten (E_3) und fünften (E_5) Erholungsminute berücksichtigt.

Tabelle 67: Übersicht der Nachbelastungswerte auf dem Fahrradergometer unterteilt in Geschlecht und Altersgruppe

Alter [Jahre]	Herzfrequenz [S/min]					Laktatkonzentration [mmol/l]					Absolute Sauerstoffaufnahme [l/min]					Respiratorischer Quotient				
	Hf ₀	Hf ₁	Hf ₃	Hf ₅		La ₀	La ₁	La ₃	La ₅		VO ₂₀	VO ₂₁	VO ₂₃	VO ₂₅	RQ ₀	RQ ₁	RQ ₃	RQ ₅		
≤ 20	N	28	26	23	22	28	26	23	22		12	10	8	6	12	10	8	6		
	MW	194,2	164,3	139,7	124,5	10,2	10,5	10,1	9,1		4,2	2,3	1,4	0,6	1,11	1,28	1,04	0,96		
	SD	± 8,1	± 18,0	± 13,1	± 12,6	± 2,7	± 3,0	± 3,6	± 3,4		± 0,7	± 1,1	± 0,6	± 0,3	± 0,10	± 0,14	± 0,07	± 0,10		
21-30	N	157	150	92	83	157	150	90	82		112	75	33	20	112	75	33	20		
	MW	188,3	162,1	132,5	119,3	10,3	10,7	10,1	9,5		3,8	2,4	1,5	0,8	1,14	1,33	1,15	1,05		
	SD	± 9,7	± 15,5	± 14,0	± 15,2	± 2,1	± 2,2	± 2,4	± 2,6		± 0,6	± 0,6	± 0,3	± 0,2	± 0,09	± 0,20	± 0,17	± 0,12		
31-40	N	52	51	47	43	52	51	46	41		15	8	5	5	15	8	5	5		
	MW	182,4	154,0	127,3	109,6	9,9	10,2	9,8	9,1		3,9	2,7	1,6	0,8	1,11	1,24	1,08	0,90		
	SD	± 10,5	± 13,4	± 13,9	± 15,7	± 2,4	± 2,5	± 2,7	± 3,0		± 0,7	± 0,8	± 0,3	± 0,3	± 0,07	± 0,16	± 0,06	± 0,06		
41-50	N	50	49	49	45	50	49	49	43		20	13	13	11	20	13	13	11		
	MW	175,5	148,9	126,3	108,6	9,6	10,2	10,0	9,1		3,8	2,7	1,7	0,8	1,13	1,31	1,11	1,07		
	SD	± 11,3	± 16,8	± 14,1	± 12,5	± 2,5	± 2,7	± 2,7	± 2,7		± 0,6	± 0,5	± 0,4	± 0,3	± 0,09	± 0,13	± 0,08	± 0,07		
> 50	N	77	75	76	71	77	73	70	64		56	7	7	7	56	7	7	7		
	MW	160,1	139,5	116,6	101,4	7,1	7,5	7,4	7,2		2,7	1,8	1,3	0,7	1,14	1,34	1,09	1,08		
	SD	± 17,5	± 17,3	± 14,6	± 12,6	± 2,5	± 2,6	± 2,6	± 2,5		± 0,6	± 0,3	± 0,2	± 0,1	± 0,08	± 0,07	± 0,06	± 0,13		
Σ	N	364	351	287	264	364	349	278	252		215	113	66	49	215	113	66	49		
	MW	180,2	154,4	127,0	111,5	9,4	9,9	9,4	8,8		3,6	2,4	1,5	0,7	1,14	1,32	1,11	1,01		
	SD	± 16,6	± 18,4	± 15,7	± 16,0	± 2,6	± 2,7	± 2,9	± 2,8		± 0,8	± 0,6	± 0,4	± 0,3	± 0,09	± 0,18	± 0,14	± 0,19		
≤ 20	N	7	7	5	6	7	7	5	6		3	2	1	1	3	2	1	1		
	MW	190,4	157,7	136,8	120,3	10,3	10,5	10,1	9,6		2,6	1,5	1,6	0,8	1,12	1,43	1,03	0,90		
	SD	± 6,6	± 10,7	± 10,5	± 5,4	± 3,2	± 3,5	± 3,6	± 3,5		± 1,4	± 0,3			± 0,12	± 0,00				
21-30	N	33	32	15	15	33	31	15	14		19	13	2	1	19	13	2	1		
	MW	188,7	168,3	139,4	122,7	9,5	9,8	9,7	9,2		2,7	1,8	1,3	0,6	1,14	1,20	1,32	1,15		
	SD	± 9,1	± 11,9	± 13,8	± 13,6	± 2,3	± 2,4	± 2,5	± 1,6		± 0,5	± 0,4	± 0,1		± 0,12	± 0,2	± 0,4			
31-40	N	8	8	8	7	8	8	8	7		1	-	-	-	1	-	-	-		
	MW	179,4	148,1	124,6	110,6	8,8	9,2	8,7	7,4		2,4	-	-	-	1,26	-	-	-		
	SD	± 12,2	± 8,5	± 8,6	± 10,4	± 1,0	± 1,5	± 1,6	± 1,9											
41-50	N	21	21	21	19	21	21	21	18		8	1	1	1	8	1	1	1		
	MW	164,6	138,1	120,8	106,1	7,4	7,7	7,6	7,7		2,1	1,7	1,3	0,5	1,13	1,43	1,19	1,26		
	SD	± 15,4	± 18,9	± 14,7	± 14,8	± 3,2	± 3,5	± 3,4	± 3,2		± 0,5				± 0,07					
> 50	N	80	79	80	66	80	78	74	55		59	1	1	1	59	1	1	1		
	MW	153,1	132,4	113,2	97,6	5,4	5,8	5,4	5,3		1,7	1,7	1,0	0,3	1,16	1,22	1,16	1,16		
	SD	± 16,8	± 17,8	± 13,6	± 12,8	± 2,0	± 2,1	± 2,2	± 2,3		± 0,3				± 0,12					
Σ	N	149	147	129	113	149	145	123	100		90	17	5	4	90	17	5	4		
	MW	165,8	143,1	119,1	104,2	7,0	7,3	6,7	6,6		2,0	1,7	1,3	0,5	1,15	1,25	1,20	1,12		
	SD	± 21,2	± 21,7	± 16,2	± 15,8	± 2,9	± 3,0	± 3,0	± 2,9		± 0,6	± 0,3	± 0,2	± 0,2	± 0,12	± 0,17	± 0,23	± 0,15		
Σ	N	513	498	416	377	513	494	401	352		305	130	71	53	305	130	71	53		
	MW	176,0	151,1	124,5	109,4	8,7	9,1	8,6	8,2		3,1	2,3	1,5	0,7	1,14	1,31	1,12	1,02		
	SD	± 19,2	± 20,1	± 16,3	± 16,2	± 2,9	± 3,0	± 3,2	± 3,0		± 1,0	± 0,6	± 0,4	± 0,3	± 0,97	± 0,18	± 0,15	± 0,19		

♂

♀

3.3.3 Vergleich Laufband- und Fahrradergometrie in der Nachbelastung

In Bezug auf das Nachbelastungsverhalten werden in der Literatur (vgl. Kapitel 2.2.2) verschiedene Fragestellungen jeweils anhand einer spezifischen Belastungsform betrachtet. Es wird jedoch kein Vergleich zwischen Ergebnissen auf dem Laufband- und dem Fahrradergometer vorgenommen. In diesem Kapitel werden daher die beiden Belastungsformen über einen Vergleich des prozentualen Rückgangs verschiedener physiologischer Parameter von E_0 zu E_5 gegenübergestellt.

Bei Berechnung der *Varianzanalyse (ANOVA)* zeigt der Parameter Herzfrequenz (prozentualer Rückgang von E_0 zu E_5) keinen signifikanten Geschlechtseffekt, jedoch einen signifikanten Effekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .037$) bei der Ergometrie. Es wurden bei der Laufbandergometrie signifikant höhere Rückgangswerte nachgewiesen als beim Fahrradergometer. Es besteht keine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Ergometrie (vgl. Tabelle 68).

Tabelle 68: Varianzanalyse (ANOVA) der Herzfrequenz in der Nachbelastung (prozentualer Rückgang von E_0 zu E_5) zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht

Prozentualer Rückgang von E_0 zu E_5					Laufband-ergometrie	Fahrrad-ergometrie		
Herzfrequenz	♂		N		191	264		
			MW		39,6	37,4		
			SD		± 5,9	± 7,1		
	♀		N		59	113		
			MW		40,8	37,0		
			SD		± 6,7	± 6,7		
	Σ		N		250	377		
			MW		39,9	37,3		
			SD		± 6,1	± 7,0		
ANOVA								
Geschlecht			Ergometrie			Geschlecht x Ergometrie		
F	p	η^2	F	p	η^2	F	p	η^2
= 0,36	= .55	= .001	= 24,08	≤ .01	= .037	= 1,92	= .17	= .003

Beim Parameter der Laktatkonzentration zeigt die *ANOVA* einen signifikanten Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .015$), jedoch keinen signifikanten Effekt bei der Ergometrie. Es wurden bei den Frauen signifikant höhere Rück-

gangswerte nachgewiesen als bei den Männern. Es besteht keine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Ergometrie (vgl. Tabelle 69).

Tabelle 69: Varianzanalyse (ANOVA) der Laktatkonzentration in der Nachbelastung (prozentualer Rückgang von E₀ zu E₅) zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht

Prozentualer Rückgang von E ₀ zu E ₅					Laufband-ergometrie	Fahrrad-ergometrie		
Laktatkonzentration	♂	N			180	252		
		MW			0,1	5,3		
		SD			± 12,9	± 18,2		
	♀	N			58	100		
		MW			6,9	7,5		
		SD			± 11,6	± 17,2		
Σ	N			238	352			
	MW			1,7	5,9			
	SD			± 12,9	± 17,9			
ANOVA								
Geschlecht			Ergometrie			Geschlecht x Ergometrie		
F	p	η ²	F	p	η ²	F	p	η ²
= 8,82	≤ .01	= .015	= 3,53	= .06	= .006	= 2,28	= .13	= .004

Die ANOVA zeigt beim Parameter der absoluten Sauerstoffaufnahme keinen signifikanten Geschlechtseffekt, jedoch einen signifikanten Effekt ($p \leq .05$, $\eta^2 = .043$) bei der Ergometrie. Es wurden bei der Fahrradergometrie signifikant höhere Rückgangswerte nachgewiesen als bei der Laufbandergometrie. Es besteht keine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Ergometrie (vgl. Tabelle 70).

Tabelle 70: Varianzanalyse (ANOVA) der absoluten Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung (prozentualer Rückgang von E₀ zu E₅) zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht

Prozentualer Rückgang von E ₀ zu E ₅					Laufband-ergometrie	Fahrrad-ergometrie
Absolute Sauerstoffaufnahme	♂	N			69	49
		MW			76,1	80,5
		SD			± 10,4	± 5,5
	♀	N			17	4
		MW			73,0	81,6
		SD			± 11,1	± 5,3
Σ	N			86	53	
	MW			75,5	80,6	
	SD			± 10,6	± 5,4	

ANOVA								
Geschlecht			Ergometrie			Geschlecht x Ergometrie		
F	p	η^2	F	p	η^2	F	p	η^2
= 0,15	= .70	= .001	= 6,14	≤ .05	= .043	= 0,63	= .43	= .005

Beim Parameter des respiratorischen Quotienten zeigt die ANOVA einen signifikanten Geschlechtseffekt ($p \leq .01$, $\eta^2 = .077$), jedoch keinen signifikanten Effekt bei der Ergometrie. Es wurden bei den Männern signifikant höhere Rückgangswerte nachgewiesen als bei den Frauen. Es besteht keine signifikante Interaktion zwischen Geschlecht und Ergometrie (vgl. Tabelle 71).

Tabelle 71: Varianzanalyse (ANOVA) des respiratorischen Quotienten in der Nachbelastung (prozentualer Rückgang von E_0 zu E_5) zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht

Prozentualer Rückgang von E_0 zu E_5			Laufband-ergometrie	Fahrrad-ergometrie				
Respiratorischer Quotient	♂	N MW SD	69 5,4 ± 9,7	49 8,5 ± 7,8				
	♀	N MW SD	17 -6,4 ± 14,1	4 1,3 ± 8,9				
	Σ	N MW SD	86 3,1 ± 11,6	53 8,0 ± 8,0				
ANOVA								
Geschlecht			Ergometrie			Geschlecht x Ergometrie		
F	p	η^2	F	p	η^2	F	p	η^2
= 11,20	≤ .01	= .077	= 3,62	= .06	= .026	= 0,64	= .42	= .005

3.3.4 Diskussion und Fazit zum Nachbelastungsverhalten

Bezüglich der Analyse des Nachbelastungsverhaltens gibt es nach den Ergebnissen der Literaturrecherche (vgl. Kapitel 2.2.2) keine standardisierte Vorgehensweise. Einerseits gibt es spezielle Fragestellungen beispielsweise zu der Betrachtung von aktiver und passiver Erholung, das Tragen von Kompressionsstrümpfen oder es handelt sich um spezielle Zielgruppen, wie z.B. Patienten mit kardiologischen Erkrankungen. Andererseits existieren unterschiedliche methodische Herangehensweisen, so etwa bezüglich der Dauer der analysierten Nachbelastung sowie der Art der Betrachtung des Nachbelastungsverlaufs (Halbwertszeit bzw. prozentualer Rückgang an definierten Zeitpunkten) der einzelnen Parameter.

Die wesentlichen Erkenntnisse der vorliegenden Untersuchung hinsichtlich des Nachbelastungsverhaltens auf dem Laufband- und Fahrradergometer werden anhand der folgenden Diskussion zu den einzelnen Parametern verdeutlicht.

Herzfrequenz

Der größte Abfall der Herzfrequenz findet in der ersten Nachbelastungsminute statt. Daraufhin flacht der Verlauf zu den weiteren erfassten Messzeitpunkten (E_3 und E_5) leicht ab. Bei der Laufbandergometrie ist dieses Verhalten deutlicher zu beobachten als bei der Fahrradergometrie (vgl. Abbildung 16 und Abbildung 20). Diese Ergebnisse decken sich mit den Aussagen von Royce (1969), Israel (1982) und Darr et al. (1988). Nach Royce (1969, S. 1ff) erfolgt der Großteil des Herzfrequenzabfalls unmittelbar nach Belastungsabbruch. Diese Aussage bezieht sich jedoch auf Messungen nach einer submaximalen Fahrradergometrie. Israel (1982, S. 88) charakterisiert den Verlauf der Herzfrequenz in der Erholung bzw. Nachbelastung in zwei Phasen, einer ersten schnellen und einer zweiten anfänglich langsamen Phase. Dabei werden jedoch die jeweiligen Phasen nicht genauer bestimmt. Bei Darr et al. (1988 S. H340ff) wird die erste schnelle Phase zwischen der 15. und 120. Sekunde sowie die initial langsamere Phase zwischen der 120. und 240. Sekunde bestimmt. Diese Aussagen stützen sich auf einen erschöpfenden Stu-

fentest auf dem Fahrradergometer mit einer darauffolgenden Erholungsphase von 10 Minuten bei 50 Umdrehungen pro Minute ohne Widerstand.

Die Analyse der Nachbelastungsherzfrequenz zeigt geschlechtsspezifische Unterschiede auf dem Fahrradergometer. Hierbei ergeben sich bei den Männern durchweg signifikant höhere Mittelwerte bei den einzelnen Messzeitpunkten. Der Nachbelastungsverlauf auf dem Fahrradergometer sowie die einzelnen Messzeitpunkte und deren Verlauf auf dem Laufbandergometer sind geschlechtsspezifisch nicht signifikant. Zu einem gleichen Ergebnis kommen auch Deschenes et al. (2006, S. 1304ff), allerdings bei submaximaler Belastung auf dem Fahrradergometer.

Bei Berücksichtigung des Alters konnten im Nachbelastungsverlauf, außer bei der älteren Gruppe der Männer mit einem höheren Rückgang der Hf bei E₃ auf dem Laufbandergometer, keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Ebenfalls keine signifikanten Unterschiede im Nachbelastungsverlauf der Herzfrequenz konnten Darr et al. (1988 S. H340ff) zwischen jüngeren und älteren Männern sowie Deschenes et al. (2009, S. 836ff) zwischen jüngeren und älteren Frauen bei Belastung auf dem Fahrradergometer feststellen. Zu dieser Erkenntnis kommen auch Buchheit et al. (2010, S. 142ff) auf dem Fahrradergometer mit 10 mal 10 Sekunden maximaler Intensität. Dabei konnte zwischen Heranwachsenden und Erwachsenen im Nachbelastungsverlauf kein Unterschied beobachtet werden.

Beim Vergleich des Nachbelastungsverhaltens zwischen leistungsschwachen und -starken Probanden konnte insgesamt festgestellt werden, dass die Mittelwertsunterschiede (prozentualer Rückgang der Herzfrequenz) bei beiden Belastungsarten jeweils in der leistungsstarken Gruppe höher waren als in der leistungsschwachen Gruppe. Diese Unterschiede sind bei den Männern bei der Laufbandergometrie sowie bei den Frauen bei E₁ auf dem Laufbandergometer bzw. bei E₃ und E₅ auf dem Fahrradergometer signifikant. Diese Ergebnisse decken sich weitestgehend mit denen von Hagberg et al. (1980, S. 218ff), Israel (1982, S. 89), Darr et al. (1988, S. H340ff), Heck (1990, S. 80) sowie Short & Sedlock (1997, S. 153ff), deren Erkenntnisse jedoch allesamt aus den Ergebnissen der Fahrradergometrie entstammen.

Vor dem Hintergrund, dass sowohl die eigenen Daten als auch die Literatur einen signifikanten Einfluss des Leistungsniveaus auf den Verlauf der Nachbelastungsherzfrequenz zeigen, lag der Schluss nahe, dass sich aus der Geschwindigkeit des Herzfrequenzrückgangs auf die Ausdauerleistungsfähigkeit (Leistung an den Schwellen bzw. maximale Leistung) schließen lässt. Zwar zeigten sich hier insgesamt niedrige signifikante Zusammenhänge, vor allem bei den Männern (bei genauerer Betrachtung hauptsächlich bei den 31-40 jährigen Männern) und überwiegend bei den fixen Schwellen, die ermittelten Ergebnisse ermöglichen jedoch keine adäquate Schätzung der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit aus dem Nachbelastungsverlauf der Herzfrequenz.

Laktatkonzentration

Die Analyse der Daten bezüglich der Laktatkinetik im Nachbelastungsverlauf zeigt im Vergleich zwischen Laufband- und Fahrradergometrie ein ähnliches Verhalten. Bei beiden Belastungsformen erhöht sich der Laktatspiegel zur ersten Erholungsminute auf sein Maximum. Auf dem Laufbandergometer hält dieses Maximum bei den Männern bis zur dritten Erholungsminute an, wonach die Konzentration wieder auf den Ausbelastungswert bei E_5 zurückfällt. Bei den Frauen auf dem Laufbandergometer sowie bei beiden Geschlechtern auf dem Fahrradergometer fällt die Laktatkonzentration zur dritten Nachbelastungsminute wieder ab und erreicht bei E_5 einen niedrigeren Wert als zum Zeitpunkt der Ausbelastung (vgl. Abbildung 17 sowie Abbildung 21). Auch Heck (1990, S. 39) berichtet von einem Erreichen einer maximalen Laktatkonzentration zwischen der ersten und zehnten Nachbelastungsminute. Gass et al. (1981, S. 172ff) bestimmten den maximalen Wert auf dem Laufbandergometer bei Männern in der sechsten Minute, während einer passiven Nachbelastung in Rückenlage. Gmada et al. (2005, S. 874ff) lokalisierten auf dem Fahrradergometer bei Männern den höchsten Wert zwischen der vierten und siebten Minute bei kombinierter Nachbelastung. Weitere Untersuchungen (vgl. u.a. Davies et al., 1970, S. 155ff; Belcastro & Bonen, 1975, S. 932ff; Bonen et al., 1979, S. 205ff; Dodd et al., 1984, S. 1462ff; Koutedakis & Sharp, 1985, S. 199ff; Baldari et al., 2004, S. 224ff; Menzies et al., 2010, S. 975ff; Heck, 1990, S. 38) konnten bei passiver Erholung eine geringere Eli-

minationsrate aufzeigen, was auch der Grund für die verzögerte Laktatspitze im Vergleich zur eigenen Untersuchung sein könnte, denn laut Heck (1990, S. 38) erfolgt die Laktatelimination hauptsächlich in der arbeitenden Muskulatur.

Geschlechtsspezifisch betrachtet können bei beiden Belastungsarten bei den Männern durchweg signifikant höhere Mittelwerte der einzelnen Messzeitpunkte nachgewiesen werden als bei den Frauen. Zu einem gleichen Ergebnis kommen, jedoch nach submaximaler Belastung auf dem Fahrradergometer, auch Deschenes et al. (2006, S. 1304ff). Bei Betrachtung des prozentualen Nachbelastungsverlaufs konnten, wie bei der eigenen Untersuchung, keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

Altersspezifisch konnte festgestellt werden, dass die Mittelwerte der Laktatkonzentration in der Nachbelastung auf dem Laufband- und Fahrradergometer jeweils in den jüngeren Gruppen höher lagen als in den älteren Gruppen. Die jüngere männliche Gruppe konnte zudem bei beiden Belastungsarten signifikant höhere Laktatkonzentrationen der einzelnen Messzeitpunkte nachweisen sowie die jüngere weibliche Gruppe ebenfalls auf dem Fahrradergometer bzw. auf dem Laufbandergometer bei La_1 im Gegensatz zu den jeweiligen älteren Gruppen. Diese Ergebnisse decken sich mit denen von Deschenes (2009, S. 836ff). Hierbei konnten jüngere Frauen signifikant höhere absolute Laktatwerte erreichen als ältere Frauen. Wie bei der eigenen Untersuchung wurden keine signifikanten Unterschiede beim Nachbelastungsverlauf ermittelt.

Beim Vergleich des Nachbelastungsverhaltens zwischen leistungsschwachen und -starken Probanden konnte insgesamt festgestellt werden, dass die Mittelwerte der Laktatkonzentration bei der Laufbandergometrie in der leistungsschwachen Gruppe höher liegen als in der leistungsstarken Gruppe. Es konnten jedoch, außer bei La_0 , keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Bei der Fahrradergometrie verhält es sich genau umgekehrt. Hierbei weist die leistungsstärkere Gruppe höhere Laktatkonzentrationen auf. Bei den Frauen ist dieser Unterschied, bis auf E_5 , zudem signifikant. Der prozentuale Rückgang der Laktatkonzentration weist bei der Laufbandergometrie keine signifikanten Unterschiede auf. Dieses Ergebnis ist überraschend, da eigentlich davon ausgegangen wird, dass eine gute Grundlagenausdauer

zu einem schnelleren Laktatabbau führt. Bei der Fahrradergometrie hingegen kann sowohl bei den Männern als auch bei den Frauen, außer bei E_1 , ein signifikant schnellerer Rückgang bei den leistungsstärkeren Gruppen nachgewiesen werden. Gmada et al. (2005, S. 874ff) konnten ebenfalls auf dem Fahrradergometer bei trainierten Probanden eine signifikant kürzere Halbwertszeit nachweisen. Evans & Cureton (1983, S. 40ff) hingegen stellten auf dem Fahrradergometer keine signifikanten Unterschiede bezüglich des körperlichen Trainingszustandes und der Laktateliminationsrate fest.

Eine Betrachtung der Halbwertszeit ist mit den Daten der eigenen Untersuchung nicht möglich, da die Datenerhebung der einzelnen Parameter nur bis zur fünften Nachbelastungsminute erfolgte.

Spiroergometrische Parameter

Die absolute Sauerstoffaufnahme weist im Nachbelastungsverlauf einen kontinuierlichen Abfall auf. Nach Belastungsabbruch erfolgt zunächst ein steiler Abfall zur ersten Erholungsminute. Daraufhin flacht die Kurve bis zur dritten Nachbelastungsminute ab, worauf, mit einsetzender passiver Erholung von der dritten bis zur fünften Erholungsminute, die Kurve wieder steiler abfällt (vgl. Abbildung 18 sowie Abbildung 22). Der respiratorische Quotient hingegen steigt direkt nach Belastungsabbruch zunächst an und sinkt zu E_3 bzw. E_5 wieder ab, mit Ausnahme der Frauen bei der Laufbandergometrie, bei der der RQ bei E_5 nochmals ansteigt (vgl. Abbildung 19 und Abbildung 23). Die Untersuchungsergebnisse von Royce (1969, S. 1ff) und Scharhag-Rosenberger (2010, S. 147) bestätigen den VO_2 -Verlauf sowie das Ansteigen des RQ nach Belastungsabbruch bei einer erschöpfenden Fahrradergometrie.

Geschlechtsspezifisch konnten bei der absoluten Sauerstoffaufnahme der Männer auf dem Laufbandergometer erwartungsgemäß durchweg signifikant höhere Mittelwerte der einzelnen Messzeitpunkte sowie auf dem Fahrradergometer bei E_0 und E_1 nachgewiesen werden. Der RQ weist in Bezug auf das Geschlecht keine signifikanten Unterschiede bzw. Verläufe auf, mit Ausnahme der Frauen auf dem Laufbandergometer, die bei E_5 einen signifikant höheren RQ erreichten. Zu dem gleichen Ergebnis, bis auf die beschriebene

Ausnahme, kommen nach submaximaler Belastung auf dem Fahrradergometer auch Deschenes et al. (2006, S. 1304ff).

Altersspezifisch konnte festgestellt werden, dass die Mittelwerte der absoluten Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung bei beiden Belastungsarten jeweils in den jüngeren männlichen Gruppen höher liegen als in den älteren männlichen Gruppen. Es konnte jedoch nur ein signifikanter Unterschied bei der Laufbandergometrie zu E_1 nachgewiesen werden. Bei den Frauen sind sowohl bei der VO_2 als auch beim RQ keine Tendenzen festzustellen, was unter anderem auch an der niedrigen Stichprobengröße liegen kann. Ebenfalls keine Tendenzen konnten bei den Männern auf dem Fahrradergometer bei E_0 , E_1 und E_3 beobachtet werden. Einzig bei E_5 erreicht die ältere Gruppe signifikant höhere RQ-Werte. Auf dem Laufbandergometer weist der RQ bei den älteren Männern durchweg höhere Werte auf, die bei E_0 und E_5 signifikant sind.

Beim Vergleich des Nachbelastungsverhaltens zwischen leistungsschwachen und -starken Probanden konnte festgestellt werden, dass die Mittelwerte der VO_2 bei beiden Belastungsarten jeweils in der leistungsstarken Gruppe höher waren, als in der leistungsschwachen Gruppe. Bei den Männern konnten zusätzlich signifikante Unterschiede bei der Laufbandergometrie bei E_0 und E_1 , bei den Frauen auf dem Fahrradergometer bei E_0 und E_1 nachgewiesen werden. Einen signifikant schnelleren Rückgang konnte auf dem Fahrradergometer bei den Männern in der leistungsstarken Gruppe beobachtet werden. Diese Ergebnisse decken sich weitestgehend mit denen von Hagberg et al. (1980, S. 218ff) sowie Short & Sedlock (1997, S. 153ff). Jedoch basieren jene Erkenntnisse nur aus Ergebnissen fahrradergometrischer Untersuchungen. Beim RQ konnten die leistungsstärkeren Frauen auf dem Laufbandergometer tendenziell höhere Werte aufweisen. Signifikante Mittelwertsunterschiede konnte bei den Männern auf dem Fahrradergometer bei E_1 gefunden werden.

4 ABSCHLIEßENDE ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand einerseits darin gängige Ausbelastungskriterien in der physiologischen Ausdauerleistungsdiagnostik anhand einer umfassenden Literaturrecherche aufzuzeigen und diese mittels eigener Daten zu überprüfen. Zum anderen wurden physiologische Gesetzmäßigkeiten verschiedener Parameter in der Nachbelastung aufgearbeitet, um eine Schätzung der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit über das Nachbelastungsverhalten - der Herzfrequenz - vorzunehmen.

Ausbelastungskriterien

Die Ergebnisse der Literaturrecherche hinsichtlich Ausbelastungskriterien verweisen hauptsächlich auf 5 Parameter - Herzfrequenz, Laktatkonzentration, Sauerstoffaufnahme, respiratorischer Quotient und Atemäquivalent. Die Kenngrößen dieser Parameter lassen sich weiter unterteilen in:

„weiche“ Kriterien

- $Hf_{\max} = 210\text{-LA (LE)}$ (De Marées, 2003)
- $Hf_{\max} = 200\text{-LA (FE)}$ (De Marées, 2003)
- $La_{\text{Abbruch}} \geq 8 \text{ mmol/l}$ (Meyer & Kindermann, 1999, Hollmann & Hettinger, 2000, Steinacker et al., 2002, De Marées, 2003, Hollmann & Strüder, 2009)
- $RQ_{\text{Abbruch}} \geq 1,0$ (Dickhuth et al., 2011)
- $A\ddot{A}_{\text{Abbruch}} > 30$ (Hollmann & Hettinger, 2000, Steinacker et al., 2002, De Marées, 2003, Hollmann & Strüder, 2009)

„harte“ Kriterien

- $Hf_{\max} = 220\text{-LA (LE)}$ (Meyer & Kindermann, 1999, Steinacker et al., 2002)
- $Hf_{\max} = 210\text{-LA (FE)}$ (Meyer & Kindermann, 1999, Steinacker et al., 2002)
- $La_{\text{Abbruch}} \geq 9 \text{ mmol/l}$ (Dickhuth et al., 2011)

- VO_{2max} - "leveling off" (Meyer & Kindermann, 1999, Hollmann & Hettinger, 2000, Boldt et al., 2002, Steinacker et al., 2002, Hollmann & Strüder, 2009)
- $RQ_{Abbruch} > 1,1$ (Meyer & Kindermann, 1999, Steinacker et al., 2002, De Marées, 2003)
- $A\ddot{A}_{Abbruch} > 35$ (Meyer & Kindermann, 1999)

Insgesamt betrachtet liegen im Durchschnitt die analysierten Ausbelastungsparameter dieser Untersuchung überwiegend im Bereich der „harten“ Kriterien, teilweise im Bereich der „weichen“ Kriterien, laut den Empfehlungen der Literatur. Die Kenngrößen stellen jedoch nur Mittelwerte dar, von denen eine Vielzahl von Probanden - zum Teil deutlich - abweicht. Demnach scheint es nach den vorliegenden Ergebnissen nicht auszureichen, sich auf einzelne feste Ausbelastungsparameter festzulegen, um eine Aussage über das Vorliegen einer Ausbelastung während oder nach einer Ergometrie treffen zu können. Einzelne Parameter sind zu abhängig von individuellen Faktoren, wie beispielsweise Alter, Geschlecht, Belastungsart oder die jeweilige Ausprägung der aeroben bzw. anaeroben Kapazität. Vor diesem Hintergrund empfehlen Meyer & Kindermann, dass zur Beurteilung einer Ausbelastung „oftmals nur eine kombinierte Betrachtung sämtlicher Kriterien eine befriedigende Lösung“ (1999, S. 286) darstellt.

Somit erscheint es notwendig, Standards zur Definition eines „Ausbelastungszustandes“ festzulegen, vor allem um eine einheitliche Abgrenzung von VO_{2max} und VO_{2peak} -Werten zu gewährleisten und die in verschiedenen Studien bestimmten VO_{2max} -Werte vergleichen zu können.

In Anlehnung an das *Karlsruher Beratungssystem für den Freizeit- und Gesundheitssport* von Bös (2010, S. 6) wird anhand der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit die folgende Vorgehensweise zur Bestimmung einer Ausbelastung (siehe Abbildung 24) empfohlen:

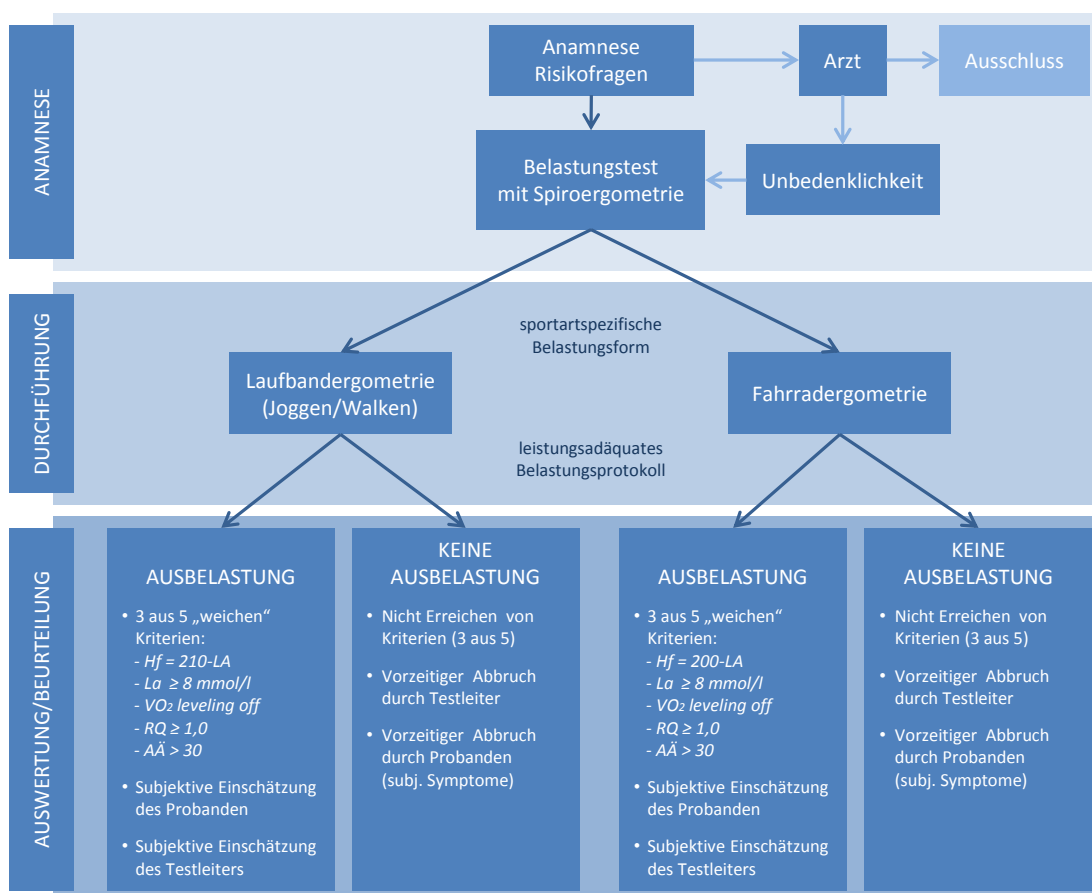


Abbildung 24: Vereinfachte Darstellung der Vorgehensweise bei Untersuchungen mit dem Ziel einer Ausbelastung

In einem ersten Schritt wird mit jedem Probanden im Vorfeld der Untersuchung ein individuelles Beratungsgespräch mit Erfassung der persönlichen Daten (Name, Anschrift, Geburtsdatum, Körpergröße, Körpergewicht) sowie der Sportanamnese (Sportart, Trainingsjahre, Trainingseinheiten, Trainingsumfang, evtl. Bestzeiten und Trainingsziel) durchgeführt. Zusätzlich wird anhand der Risikofragen Par-Q (siehe Anhang I) überprüft, ob ein Belastungstest absolviert werden kann (alle Fragen werden mit „nein“ beantwortet) oder ob eine ärztliche Meinung eingeholt werden muss. Wird bei dem Par-Q mindestens eine Frage mit „ja“ beantwortet, entscheidet der Arzt über die Teilnahme an einem Belastungstest mit geplanter Ausbelastung. Bestehen aus ärztlicher Sicht keine Bedenken (Unbedenklichkeit), kann an dem Test teilgenommen werden. Ist jedoch für den Probanden ein gesundheitliches Risiko bei einer Ausbelastung zu erwarten, erfolgt für diese Untersuchung ein Ausschluss (ein submaximaler Belastungstest ist dabei nicht ausgeschlos-

sen). Bei Übergewichtigen und Risikopersonen sowie bei Personen mit orthopädischen Problemen wird aufgrund der Praktikabilität die Untersuchung (nach Ermessen des Arztes zusätzlich mit Blutdruckmessung und EKG) auf dem Fahrradergometer durchgeführt. Bei weiteren speziellen Personengruppen (z.B. Ruderer, Personen mit Behinderung der unteren Extremitäten) können alternative Ergometrien (z.B. Ruderergometrie, Handkurbelergometrie) durchgeführt werden, wobei dieser Aspekt aufgrund der Übersichtlichkeit nicht mit aufgeführt wird.

Im zweiten Schritt erfolgt die Durchführung des Belastungstests auf dem Laufband- oder Fahrradergometer. Dabei werden die Belastungsart sportartspezifisch und das Belastungsprotokoll leistungsorientiert gewählt. Läufer, Walker und Spilsportler sind der Laufbandergometrie zuzuordnen, Radfahrer dem Fahrradergometer. Leistungsschwächere Personen (v.a. Anfänger, Gesundheitssportler, Senioren) absolvieren auf dem Laufbandergometer ein Walkingprotokoll bzw. das Belastungsprotokoll 4-2-3 und auf dem Fahrradergometer das Protokoll 25(50)-25-2. Bei leistungsstärkeren Personen (v.a. Freizeit-, Breiten- und Leistungssportler) werden die Belastungsprotokolle 6-2-3 (LE) und 50-50-3 bzw. 100-20-3 (FE) verwendet. Während des Tests steht der Proband ständig unter genauer Beobachtung durch den Testleiter.

Zu Testende wird als dritter Schritt zur Bestimmung einer Ausbelastung routinemäßig die subjektive Bewertung der Belastung des Probanden mit aufgenommen (Borg-Skala bzw. persönliches Abschlussgespräch nach der Untersuchung). Zudem muss bei spiroergometrischen Untersuchungen eine Kombination aus verschiedenen Kriterien 3 aus 5 „weichen“ Kriterien ($H_f = 210$ -LA (LE) bzw. $H_f = 200$ -LA (FE), $La \geq 8,0$ mmol/l, VO_2 leveling off, $RQ \geq 1,0$ und $A\ddot{A} > 30$) erfüllt sein. Bei Anwendung dieser Vorgehensweise hätten in dieser Studie, bei der alle Probanden nach Einschätzung des Testleiters ausbelastet waren, in 85 von 97 Fällen (87,6 %) auf dem Laufbandergometer (vgl. Tabelle 43) bzw. in 279 aus 307 Fällen (90,9 %) auf dem Fahrradergometer (vgl. Tabelle 45) Ausbelastungen vorgelegen.

Zusätzlich ist die Erfahrung des Testleiters wertvoll, jedoch kein wissenschaftliches objektives Kriterium. Dieser sollte einerseits die oben beschriebene Problematik hinsichtlich der Ausbelastungskriterien kennen, um den

tatsächlichen Grad der Ausbelastung besser einschätzen zu können. Keine Ausbelastung liegt vor, und dies muss klar dokumentiert werden, wenn zum einen ein vorzeitiger Abbruch durch den Testleiter bzw. Probanden selbst erfolgt, d.h. der Test wird aufgrund von subjektiven Symptomen (u.a. Unwohlsein, Schwindel, angina pectoris, muskuläre Beschwerden) abgebrochen oder wenn die Vorgabe 3 aus 5 „weichen“ Kriterien nicht erfüllt werden kann.

Im Allgemeinen ist es wichtig nicht nur die Parameter bzw. das Erzielen einer Ausbelastung im Blick zu behalten, sondern auch die Gesundheit und das Wohlergehen des Probanden.

Nachbelastungsverhalten

Die vorliegenden Ergebnisse bezüglich der einzelnen Parameter im Nachbelastungsverlauf sind grundsätzlich mit denen aus der Literatur vergleichbar. Zu beachten ist jedoch, dass der Hauptteil der zitierten Literatur auf fahrradergometrischen Untersuchungen basiert. Die hier ermittelten abweichenden Ergebnisse zwischen Laufband- und Fahrradergometrie legen den Schluss nahe, dass die Nachbelastung getrennt nach der jeweiligen Belastungsform betrachtet werden sollte. Unterschiedlich sind die Bewegungsabläufe und die beanspruchten Muskelgruppen.

Darüber hinaus zeigt die Aufarbeitung der vorhandenen Literatur, dass zum Thema Nachbelastung ausschließlich spezifische Forschungsfragen untersucht wurden. In der eigenen Untersuchung wurden nur Probanden eingeschlossen, bei denen eine Ausbelastung (nach Einschätzung des Testleiters sowie Plausibilitätsprüfung der Daten) vorlag, denn nur das Vorhandensein einer solchen Ausbelastung erlaubt eine systematische Betrachtung der Parameter im Nachbelastungsverlauf. Demgegenüber weisen verschiedene Autoren explizit darauf hin, dass die vorangegangene Belastung submaximal beendet wurde (vgl. u.a. Deschenes et al., 2006 und 2009). Die einzelnen Studien unterscheiden sich zudem in der Gestaltung der Nachbelastungsphase (z.B. aktive - passive Erholung) und weisen teilweise sehr kleine Stichproben auf. Auch bei der eigenen Untersuchung musste teilweise - vor allem bei den Frauen - auf eine kleine Stichprobe zurückgegriffen werden.

Aus diesem Grund sind die Ergebnisse aus der Literatur mit denen der eigenen Untersuchung nur eingeschränkt vergleichbar.

Vor dem Hintergrund, dass sowohl die Ergebnisse der eigenen Daten als auch die der Literatur einen signifikanten Einfluss des Leistungsniveaus auf den Verlauf der Nachbelastungsherzfrequenz zeigen, lag der Schluss nahe, dass sich aus der Geschwindigkeit des Herzfrequenzrückgangs auf die Ausdauerleistungsfähigkeit (Leistung an den Schwellen bzw. maximale Leistung) schließen lässt. Zwar zeigten sich hier insgesamt niedrige signifikante Zusammenhänge, vor allem bei den Männern (bei genauerer Betrachtung hauptsächlich bei den 31-40 jährigen Männern) und überwiegend bei den fixen Schwellen, die ermittelten Ergebnisse ermöglichen jedoch keine adäquate Schätzung der aeroben Ausdauerleistungsfähigkeit aus dem Nachbelastungsverlauf der Herzfrequenz.

Ausblick

Die vorliegenden Daten wurden über mehrere Jahre anhand von verschiedenen Untersuchungen gesammelt und nicht primär für diese Arbeit erhoben. Somit wurde keine spezielle Rekrutierung von Probanden vorgenommen. Aus diesem Grund ist bei Betrachtung spezifischer Personengruppen (Geschlechts-, Alters- und Leistungsspezifisch) die jeweilige Zellengröße teilweise nicht mehr ausreichend, um genaue Aussagen treffen zu können. Um die bekannten Gesetzmäßigkeiten zu stützen oder widerlegen zu können, sind jedoch weitere Forschungsarbeiten erforderlich, vor allem in Hinblick einer Erweiterung spezifischer Personengruppen auf eine geeignete Stichprobengröße. Dabei wird die neu entwickelte Vorgehensweise zur Bestimmung einer Ausbelastung bei den zukünftigen Untersuchungen angewandt und soll somit die Zweckmäßigkeit überprüfen.

In einem weiteren Schritt sollte, wie auch bereits Heck & Beneke (2008, S. 300f) forderten, deutschlandweit eine standardisierte Vorgehensweise definiert werden, damit die großen Datenmengen, die an den verschiedenen Forschungseinrichtungen erhoben werden, vergleichbar sind. Folgender Vorschlag dient zur Umsetzung dieser Vorgehensweise:

Eine Expertenbefragung zum Thema standardisierte deutschlandweite Vorgehensweise bei Belastungsuntersuchungen soll Aufschluss über die Notwendigkeit geben. Bei allgemeinem Interesse folgt eine Tagung von Vertretern wissenschaftlicher Einrichtungen mit sportmedizinischer Ausrichtung (Angebot von leistungsdiagnostischen Untersuchungen). Hierbei sollen folgende Punkte geklärt werden:

1. Abklärung/Abstimmung von Anforderungen an Gerätschaften und medizinische Materialien
 - Laufband- bzw. Fahrradergometer (z.B. biologische Eichung)
 - Analysegeräte (Laktatanalyse/Spiroergometrie)

2. Festlegung eines standardisierten Untersuchungsablaufes (vgl. Abbildung 24)
 - Anamnese (Tauglichkeit Belastungstest)
 - Durchführung (sportartspezifische Belastungsform, leistungsorientiertes Belastungsprotokoll, standardisiertes Testleiterverhalten z.B. durch spezielle Schulungen, Pausendauer auf dem Laufbandergometer von 30 Sekunden)
 - Auswertung/Beurteilung (Ziel der Untersuchung, Definition Ausbelastung anhand der Vorgaben, Rohdatenverarbeitung)

Wenn man noch weiter gehen möchte ist eine zentrale Datenbank von teilnehmenden Forschungseinrichtungen vorstellbar, in die alle Untersuchungsergebnisse eingepflegt werden. Jede dieser Institutionen hat Zugriff auf die Datenbank und somit entsteht ein gemeinsamer Datenpool. Mit dieser Datenmenge können genauere und vor allem repräsentative Aussagen zu leistungsdiagnostischen bzw. sportmedizinischen Themen wie beispielsweise Ausbelastungskriterien und Nachbelastungsverhalten getroffen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- Aitken, J.C. & Thompson, J. (1988). The respiratory VCO_2/VO_2 exchange ratio during maximum exercise and its use as a predictor of maximum oxygen uptake. *European Journal of Applied Physiology* 57: 714-719
- Andersen, L.B., Henckel, P. & Saltin B. (1987). Maximal oxygen uptake in Danish adolescents 16-19 years of age. *European Journal of Applied Physiology* 56: 74-82
- Åstrand, P.-O. (1952). Experimental Studies of Physical Working Capacity in Relation to Sex and Age. Copenhagen: *Ejnar Munksgaard*, pp. 23-27: 92-102.
- Åstrand, I., Åstrand, P.-O. & Rodahl, K. (1959). Maximal heart rate during work in older men. *Journal of Applied Physiology* 14: 562-566
- Åstrand, I.(1960). Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. *Acta Physiology Scandinavia* 49 (Suppl. 169): 1-92
- Ba, A., Delliaux, S., Bregeon, F., Levy, S. & Jammes, Y. (2009). Post-exercise heart rate recovery in healthy, obeses, and COPD subjects: relationships with blood lactic acid and PaO_2 levels. *Clinical Research in Cardiology*, 98(1): 52-58
- Baldari, C., Videira, M., Madeira, F., Sergio, J. & Guidetti, L. (2004). Lactate removal during active recovery related to the individual anaerobic and ventilatory thresholds in soccer players. *European Journal of Applied Physiology*, 93(1): 224-230
- Baldari, C., Videira, M., Madeira, F., Sergio, J. & Guidetti, L. (2005). Blood lactate removal during recovery at various intensities below the individual anaerobic threshold in triathletes. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 45: 460-466
- Barak, O.F., Ovcin, Z.B., Jakovljevic, D.G., Lozanov-Crvenkovic, Z., Brodie, D.A. & Grujic, N.G. (2011). Heart rate recovery after submaximal exercise in four different recovery protocols in male athletes and non-athletes. *Journal of Sports Science and Medicine*, 10(2): 369-375
- Baraldi, E., Cooper, D.M., Zanconato, S. & Armon, Y. (1991). Heart Rate Recovery from 1 Minute of Exercise in Children and Adults. *Pediatric Research*, 29(6): 575-579
- Baum, K.V. (1971). Trainings-Pulsfrequenz: 170 minus Lebensalter. *Sportarzt und Sportmedizin*, 22 (1): 20.
- Belcastro, A.N. & Bonen, A. (1975). Lactic acid removal rates during controlled and uncontrolled recovery exercise. *Journal for Applied Physiology* 39(6): 932-935.

- Beneke, R., Leithäuser, R.M., Schwarz, V. & Heck, H. (2000). Maximales Laktat-Steady-State bei Kindern und Erwachsenen. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 51(3): 100-104
- Biedler, A., Risch, A. & Mertzlufft, F. (1998). Bestimmung der Laktatkonzentration in Blut und Plasma mit Biosensoren. *Anaesthesist* 47: S. 968-974
- Billat, V., Sirvent, P., Lepretre, P.-M. & Koralsztein, J.P. (2004). Training effect on performance, substrate balance and blood lactate concentration at maximal lactate steady state in master endurance-runners. *European Journal of Applied Physiology* 447: 875-883
- Boldt, F., Berbalk, A., Halle, M., Hoffmann, G., Löllgen, H. (Federführend), Schmidt Trucksäß, A., Urhausen, A., Völker, K. & Zurstegge, M. (2002). Leitlinien zur Belastungsuntersuchung in der Sportmedizin (Ebene IV - 03/2002). *Deutsche Gesellschaft für Sportmedizin und Prävention*.
- Bonen, A., Campbell, C.J., Kirby R.L. & Belcastro, A.N. (1979). A multiple regression model for blood lactate removal in man. *Pflügers Archiv: European Journal of Physiology* 380: 205-210
- Borg, G. & Noble, B. (1974). Perceived exertion. *Exercise and Sports Sciences Review*: 131-153
- Borg, G. (2004). Anstrengungsempfinden und körperliche Aktivität, *Deutsches Ärzteblatt* 101(15): A 1016.
- Bös, K., Hänsel, F. & Schott, N. (2000). *Empirische Untersuchungen in der Sportwissenschaft: Planung-Auswertung-Statistik*. (1. Aufl.). Czwalina: Hamburg.
- Bös, K. (2010). Kein Training ohne Diagnose. *Shape up* 19(5/6): 6-8
- Bruce, R.A., Fisher, L.D., Cooper, M.N. & Grey, G.O. (1974). Separation of effects of cardiovascular disease and age on ventricular function with maximal exercise. *American Journal of Cardiology* 34(7): 757-763
- Buchheit, M., Duché, P., Laursen, P.B. & Ratel, S. (2010). Postexercise heart rate recovery in children: relationship with power output, blood pH, and lactate. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*, 35(2): 142-150
- Buskies, W., Kläger, G. & Riedel, H. (1992). Möglichkeiten zur Steuerung der Belastungsintensität für ein Breitensportlich orientiertes Laufausdauertraining. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 43(6): 248-260.
- Buskies, W., Liesner, K. & Zieschang, K. (1993). Zur Problematik der Steuerung der Belastungsintensität beim Dauerlauftraining älterer Männer. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 44(12): 568-573.
- Buskies, W. & Boeckh-Behrens, W.-U. (1996). *Gesundheitsorientiertes Fitnesstraining* (2. Auflage). Lüneburg: Wehdemeier & Pusch.
- Buskies, W. (1998). *Laufausdauertraining mit Älteren nach dem subjektiven Belastungsempfinden unter Berücksichtigung physischer und psychischer Parameter (Wohlbefinden)*. In H. Mechling, Training im Alterssport, 77-79. Schorndorf: Hofmann.
- Charalampos, C.D., Nedios, S., Kelle, S., Helbig, S., Gottwik, M. & von Bary, C. (2012). Oxygen Kinetics and Heart Rate Response during Early Re-

- covery from Exercise in Patients with Heart Failure. *Cardiology Research and Practice. Epub 2012 Januar 24*, 1-7
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2., neu bearb. Aufl.). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Cohen-Solal, A., Geneves, M. & Citzrom, D. (1997). Delayed attainment of peak oxygen consumption after the end of exercise in patients with chronic heart failure. *International Journal of Cardiology*, 60 (1): 23-29
- Cole, R.C., Blackstone, E.H., Pashkow, F.J., Snader, C.E. & Lauer, M.S. (1999). Heart-rate recovery immediately after exercise as a predictor of mortality. *The New England Journal of Medicine*, 341(18): 1351-1357
- Cotton, D.T. (1971). A modified step test for grouped cardiovascular testing. *Research Quarterly* 42: 91.
- Cumming, G.R. & Friesen, W. (1967). Bicycle ergometer measurement of maximal oxygen uptake in children. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology* 45: 937-946.
- Cumming, G.R. & Borysyk, L.M. (1972). Criteria for maximum oxygen uptake in men over 40 in a population survey. *Medicine and Science of Sports* 9: 18-20
- Cunningham, D.A., Waterschoot, B.M.V., Paterson, D.H., Lefcoe, M. & Sangal, S.P. (1977). Reliability and reproducibility of maximal oxygen uptake measurement in children. *Medicine and Science of Sports* 9: 104-108
- Daida, H., Allison, T.G., Johnson, B.D., Squires, R.W. & Gau, G.T. (1996). Further Increase in Oxygen Uptake During Early Active Recovery Following Maximal Exercise in Chronic Heart Failure. *Chest*, 109 (1): 47-51
- Darr, K.C., Bassett, D.R., Morgan, B.J. & Thomas, D.P. (1988). Effects of age and training status in heart rate recovery after peak exercise. *American Journal of Physiology*, 254(2): H340-H343
- Davies C.T.M., Knibbs A.V. & Musgrove L. (1970). The rate of lactic acid removal in relation to different baselines of recovery exercise. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie*, 28 (3): 155-161
- De Marées, H. (2003). *Sportphysiologie*. Kassel : Sportverlag Strauß
- Deschenes, M.R., Hillard, M.N., Wilson, J.A., Dubina, M.I. & Eason, M.K. (2006). Effects of Gender on Physiological Responses during Submaximal Exercise and Recovery. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 38 (7): 1304-1310
- Deschenes, M.R., Connell, A.M., Jackson, E.M., Taylor, J.L. & Glass, E.K. (2009). A Comparison of Physiological Variables in Aged and Young Women During and Following Submaximal Exercise. *American Journal of Human Biology* (21): 836-843
- Dickhuth, H.-H., Wolfahrt, B., Hildebrand, D., Rokitzki, L., Huonker, M. & Keul, J. (1988). Jahreszeitliche Schwankungen der Ausdauerfähigkeit von hochtrainierten Mittelstreckenläufern. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 39: 346-353

- Dickhuth, H.-H., Aufenanger, W., Schmidt, P., Simon, G., Huonker, M. & Keul, J. (1989). Möglichkeiten und Grenzen der Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung im Mittel- und Langstreckenlauf. *Leistungssport 19*: 21-24
- 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 dysfunctions. In: Bachl., Graham T.E., Löllgen H. (Hrsg.): *Advances in ergometry*. Springer. Berlin, Heidelberg, New York: 173-179
- Dickhuth, H.-H. Röcker, K., Gollhofer, A., König, D. & Mayer, F. (2011). *Einführung in die Sport- und Leistungsmedizin* (2. Überarbeitete und aktualisierte Auflage). Hofmann: Schorndorf.
- Dodd, S., Powers, S.K., Callender, T. & Brooks, E. (1984). Blood lactate disappearance at various intensities of recovery from exercise. *Journal of Applied Physiology*, 57(5): 1462-1465
- Dotan, R., Falk, B. & Raz, A. (2000). Intensity effect of active recovery from glycolytic exercise on decreasing blood lactate concentration in prepubertal children. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(3): 564-570
- Dotan, R., Ohana, S., Bediz, C. & Falk, B. (2003). Blood lactate disappearance dynamics in boys and men following exercise of similar and dissimilar peak lactate concentrations. *Journal of Pediatric Endocrinology and Metabolism*, 16(3): 419-429
- Duncan, G.E., Howley, E.T. & Johnson, B.N. (1997). Applicability of VO_{2max} criteria: discontinuous versus continuous protocols. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 29: 273-278
- Edwards, S. (2001). *Leitfaden zur Trainingskontrolle* (12. Auflage). Aachen: Meyer & Meyer.
- Evans, B.W. & Cureton, K.J. (1983). Effect of physical conditioning on blood lactate disappearance after supramaximal exercise. *British Journal of Sports Medicine* 17(1): 40-45
- Faude, O. & Meyer, T. (2008). Methodische Aspekte der Laktatbestimmung. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 59(12): 305-308
- Fernhall, B., McCubbin, J.A., Pitetti, K.H., Rintala, P., Rimmer, J.H., Millar, A.L. & Silva, A. (2001). Prediction of maximal heart rate in individuals with mental retardation. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 33(10): 1655-1660
- Friedmann-Bette, B. (2011). Die Spiroergometrie in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 62(1): 10-15.
- Froelicher, V.F. & Myers, J.N. (2000). *Exercise and the heart*. 4th ed. Philadelphia: W.B. Saunders Company
- Gass, C.G., Rogers, S. & Mitchell, R. (1981). Blood lactate concentration following maximum exercise in trained subjects. *British Journal of Sports Medicine*, 15(3): 172-176

- Gisolfi, C., Robinson, S. & Turrell, E.S. (1966). Effects of aerobic work performed during recovery from exhausting work. *Journal of applied Physiology* 21: 1767-1772
- Gmada, N., Bouhlel, E., Mrizak, I., Debabi, H., Ben Jabrallah, M., Tabka, Z., Feki, Y. & Amri, M. (2005). Effect of Combined Active Recovery from Supramaximal Exercise on Blood Lactate Disappearance in Trained and Untrained Subjects. *International Journal of Sports Medicine*, 26(10): 874-879
- Graf, C. & Rost, R. (2001). Herz und Sport (2. Auflage). Balingen: Spitta.
- Graettinger, W.F., Smith, D.H.G., Neutel, J.M., Myers, J., Froelicher, V.F. & Weber, M. (1995). Relationship of left ventricular structure to maximal heart rate during exercise. *Chest* 107(2): 341-345
- Haber, P. (2004). *Lungenfunktion und Spiroergometrie*. Wien: Springer.
- Hagberg, J.M., Hickson, R.C., Ehsani, A.A. & Holloszy, J.O. (1980). Faster adjustment to and recovery from submaximal exercise in the trained state. *Journal of applied Physiology*, 48(2): 218-224
- Hammond, H.K., Kelly, T.L. & Froelicher, V. (1983). Radionucleotide imaging correlates of heart rate impairment during maximal exercise testing. *Journal of the American College of Cardiology* 2(5): 826-833
- Härtel, S. (2007). *Entwicklung und Analyse walkingbasierter Ausdauer- testverfahren im Rahmen der medizinischen Rehabilitation*. Karlsruher sportwissenschaftliche Beiträge (Band 4). Universitätsverlag Karlsruhe.
- Heck, H. (1990). *Laktat in der Leistungsdiagnostik*. Schorndorf: Hofmann
- Heck, H. & Roszkopf, P. (1994). Grundlagen verschiedener Laktatschwellenkonzepte und ihre Bedeutung für die Trainingssteuerung. In: Clasing, D., Weicker, H. et al. (Hrsg.) (1994): *Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik*. Gustav Fischer Verlag Stuttgart
- Heck, H. & Schulz, H. (2002). Methoden der anaeroben Leistungsdiagnostik, *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 53: 202-212
- Heck, H. & Beneke, R. (2008). 30 Jahre Laktatschwellen – was bleibt zu tun?. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 59: 297-302
- Heitkamp, H.-C., Vogt, P., Venter, C., Hipp, A., Furian, T.C. & Horstmann, T. (2003). Steuerung des präventiven Ausdauertrainings. In D. Jeschke & R. Lorenz, *Sportmedizinische Trainingssteuerung: Sport – Prävention – Therapie*. Aus der Reihe *Wissenschaftliche Berichte und Materialien des Bundesinstituts für Sportwissenschaft (Band: 4)*; 161-167. Köln: Sport und Buch Strauß.
- Hermansen, L. & Stensvold, I. (1972). Production and removal of lactate during exercise in man. *Acta Physiology Scandinavia* 86: 191–201
- Hill, A. V., Long, C. N. H. & Lupton, H. (1924). Muscular Exercise, Lactic Acid and the Supply and Utilisation of Oxygen. *Proceedings of the Royal Society of London B* 97:155-176
- Hipp, M. (2007). *Vergleich von Laufband- und Feldstufentests zur biologischen Eichung des Laufbands "Woodway PPSmed L70"*. Unveröffentlicht-

- te Examensarbeit am Institut für Sport und Sportwissenschaft des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).
- Hohmann, A., Lames, M. & Letzelter, M. (2002). *Einführung in die Trainingswissenschaft*. Wiebelsheim: Limpert.
- Hollmann, W. & Hettinger, T. (2000). *Sportmedizin – Grundlagen für Arbeit, Training und Präventivmedizin* (4., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Stuttgart, New York: Schattauer.
- Hollmann, W., Strüder, H.K., Predel, H.-G. & Tagarakis, C.V.M. (2006). *Spiroergometrie. Kardiopulmonale Leistungsdiagnostik des Gesunden und Kranken*. Stuttgart: Schattauer
- Hollmann, W. & Strüder, H.K. (2009). *Sportmedizin – Grundlagen für körperliche Aktivität, Training und Präventivmedizin* (5., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Stuttgart: Schattauer.
- Höltke, V., Degenhardt, A., Steuer, M., Starischka, S., Zéman, V. & Jakob, E. (2007). In „Wissenschaftliche Berichte und Materialien des Bundesinstituts für Sportwissenschaft“: Die Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme auf Grundlage spiroergometrischer Messungen der Nachbelastungsatmung. Ausdauer und Ausdauertraining. Band 14: 137-146
- Hossack, K.F. & Bruce, R.A. (1982). Maximal cardiac function in sedentary normal men and women: comparison of age-related changes. *Journal of Applied Physiology* 53(4): 799-804
- Hottenrott, K. (2010). Moderne Leistungsdiagnostik- Einsatz der Spiroergometrie in Sport und universitärer Ausbildung. *Medical Sports Network*, 5 K(10): 66-69
- Howley, E.T., Bassett, D.R. & Welch, H.G. (1995). Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Medicine and Science in Sports and Exercise*: 1292-1301
- Imai, K., Sato, H., Hori, M., Kusuoka, H., Ozaki, H., Yokoyama, H., Takeda, H., Inoue, M. & Kamada, T. (1994). Vagally mediated Heart Rate Recovery After Exercise is Accelerated in Athletes but blunted in Patients with chronic Heart Failure. *Journal of the American College of Cardiology*, 24(6): 1529-1535
- Inbar, O., Oten, A., Scheinowitz, M., Rotstein, A., Dlin, R. & Casaburi, R. (1994). Normal cardiopulmonary responses during incremental exercise in 20-70-yr-old men. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 26(5): 538-546
- Israel, S. (1975). Die maximale Herzfrequenz im Altersgang. *Medizin und Sport* 15(12): 370-373
- Israel, S. (1982). *Sport und Herzschlagfrequenz*. Saalfeld: Gutenberg
- Issekutz, B., Birkhead, N.C. & Rodahl, K. (1962). Use of respiratory quotients in assessment of aerobic work capacity. *Journal of Applied Physiology* 17: 47-50.
- Jablonski, D., Liesen, H. & Hollmann, W. (1987). *Untersuchungen zur Entwicklung eines Trainingsgefühls zur Intensitätssteuerung des Dauerlauf-*

- trainings bei älteren Frauen und Männern.* In H. Rieckert, Sportmedizin – Kursbestimmung; 34-38. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Jacobs, I. & McLellan, T. (1988). Validity of the individual anaerobic threshold (IAT). *Canadian Journal of Sport Sciences* 13: 60–64
- Jolly, M.A., Brennan, D.M. & Cho, L. (2011). Impact of Exercise on Heart Rate Recovery. *Circulation*, 124(14): 1520-1526
- Jones, N.L., Makrides, L., Hitchcock, C., Chypchar, T. & McCartney, N. (1985). Normal standards for an incremental progressive cycle ergometer test. *The American Review of Respiratory Disease* 131: 700-708
- Jones, A.M. & Doust, J.H. (1996). 1 % treadmill grade most accurately reflects the energy cost of outdoor running. *Journal of Sports Science*, 14(4): 321-327
- Karvonen, M.J., Kentala, E. & Mustala, O. (1957). The effects of training on heart rate - a longitudinal study. *Annales Medicinæ Experimentalis et Biologiæ Fenniae*, 35(3): 307-315.
- Kindermann, W., Simon, G., Keul, J. (1978). Dauertraining - Ermittlung der optimalen Trainingsherzfrequenz und Leistungsfähigkeit. *Leistungssport* 8(1): 34-39
- Kindermann, W. & Rost, R. (1991). *Hypertonie, Bewegung, Sport.* München: Aktuelles Wissen Hoechst.
- Kindermann, W. (2004). Anaerobe Schwelle. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 55: 161-162
- Kirchhoff, H.W., Reindell, H. & Gebauer, A. (1956). Untersuchungen über die Sauerstoffaufnahme, die Kohlendioxidabgabe, das Atemminutenvolumen, das Atemäquivalent und den Respiratorischen Quotienten während körperlicher Belastung bei Normalpersonen und Hochleistungssportlern. *Deutsches Archiv für Klinische Medizin* 203: 423
- Koutedakis, Y. & Sharp, N.C.C. (1985). Lactic Acid Removal and heart rate frequencies during recovery after strenuous rowing exercise. *British Journal of Sports Medicine*, 19(4): 199-202
- Krueger, I.M., Moyna, N.M., Robertson, R.J., Perik, K., Meckes, C.I., Millich, N.B., Monroe-Wise, A. & Thompson, P.D. (2000). Physiologic Responses to Exercise Training at Self-Selected Intensities - Abstract. *Medicine and Science in Sports and Exercise, Supplement* 32(5): 171, Abstract No.769.
- Lagerstrøm, D. & Graf, J. (1986). Die richtige Trainingspulsfrequenz beim Ausdauersport. *Herz, Sport und Gesundheit* 3(1): 21-24
- Lester, M., Sheffield, L.T., Trammel, P. & Reeves, T.J. (1968). The effect of age and athletic training on maximal heart rate during muscular exercise. *American Heart Journal* 76(3): 370-376
- Liesen, H., Dufaux, B., Heck, H., Mader, A., Rost, R., Lötzerich, S. & Hollmann, W. (1979). Körperliche Belastung und Training im Alter. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 30(7): 218-226.

- Löllgen, H., Winter, U.J. & Erdmann, E. (Hrsg.) (1997). *Ergometrie. Belastungsuntersuchungen in Klinik und Praxis*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Löllgen, H. (2005). *Kardiopulmonale Funktionsdiagnostik* (4., neu bearb. Auflage). Nürnberg: Novartis.
- Londeree, B.R. & Moeschberger, M.L. (1982). Effect of age and other factors on maximal heart rate. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 53(4): 297-304
- Mader, A., Liesen, H., Heck, H., Philippi, H., Rost, R., Schürch, P. & Hollmann W. (1976). Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. *Sportarzt und Sportmedizin*, 27: 80-88; 109-112
- Margaria, R., Edwards, H.T. & Dill, D.B. (1933). The possible mechanism of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. *American Journal of Physiology* 106: 689-715
- McArdle, D.W., Zwiren, L. & Magel, J.R. (1969). Validity of post exercise heart rate as a means of estimating heart rate during work in various intensities. *Research Quarterly*. 42: 91.
- Mellerowicz, H. & Maidorn, K. (1979). *Ergometrie: Grundriss der medizinischen Leistungsmessung* (3., überarbeitete und erweiterte Auflage). München: Urban & Schwarzenberg.
- Menzies, P., Menzies, C., McIntyre, L., Paterson, P., Wilson, J. & Kemi, O.J. (2010). Blood lactate clearance during active recovery after an intense running bout depends on the intensity of the active recovery. *Journal of Sports Sciences*, 28(9): 975-982
- Meyer, T., Kindermann, W. (1999). Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}). *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 50(9): 285-286.
- Meyer, T. (2003). Der Respiratorische Quotient (RQ). *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 54: 29-30
- Midgley, A.W., Bentley, D.J., Luttikholt, H., McNaughton, L.R., & Millet, G.P. (2008). Challenging a dogma of exercise physiology: Does an incremental exercise test for valid VO_{2max} determination really need to last between 8-12 minutes? *Sports Medicine* 38: 441-447.
- Midgley, A.W., Carroll, S., Marchant, D., McNaughton, L.R., Siegler, J. (2009). Evaluation of true maximal oxygen uptake based on a novel set of standardised criteria. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism* 34: 115-123.
- Miller, W.C., Wallace, J.P. & Eggert, K.E. (1993). Predicting max hr and the HR- VO_2 relationship for exercise prescription in obesity. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 25(9): 1077-1081
- Mitchell, J.H., Sproule, B.J., & Chapman, C.B. (1958). The physiological meaning of the maximal oxygen intake test. *Journal of Clinical Investigation* 37: 538-547

- Neumann, G. (1991). *Comparison between ergometric methods of investigation and field tests*. In: Bachl., Graham T.E., Löllgen H. (Hrsg.): *Advances in ergometry*. Springer. Berlin, Heidelberg, New York: 214-227
- Newman, E.V., Dill, D.B., Edwards, H.T. & Webster, F.A. (1937). The rate of lactate acid removal in exercise. *American Journal of Physiology* 118: 457-461
- Ohuchi, H., Suzuki, H., Yasuda, K., Arakaki, Y., Echigo, S. & Kamiya, T. (2000). Heart Rate Recovery after Exercise and Cardiac Autonomic Nervous Activity in Children. *Pediatric Research*, 47(3): 329-335
- Pate, R.R., Sparling, P.B., Wilson, G.E., Cureton, K.J. & Miller, B.J. (1987). Cardiorespiratory and Metabolic Responses to Submaximal and Maximal Exercise in Elite Women Distance Runners. *International Journal of Sports Medicine* 8: 91-95
- Poole, D.C., Wilkerson, D.P. & Jones, A.M (2008). Validity of criteria for establishing maximal O₂ uptake during ramp exercise tests. *European Journal of Applied Physiology* 102: 403-410
- Quinn, T.J., Vroman, N.B. & Kertzer, R. (1994). Postexercise oxygen consumption in trained females: effect of exercise duration. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 26(7): 908-913
- Rammal, K. & Strom, G. (1949). The rate of lactate utilization in man during work and at rest. *Acta Physiology Scandinavia* 17: 452-456
- Rawashdeh, M. (1989). Training und kardiovaskuläre Leistungsfähigkeit bei Querschnittsgelähmten- Bedeutung des Rollstuhlsports als Rehabilitationsfaktor. Tübingen: Copy- Center Druckerei gedruckt mit Genehmigung von Fakultät für Sozial- und Verhaltenswissenschaften der Universität Tübingen
- Ricard, R.M., Leger, L. & Massicotte, D. (1990). Validity of the "220-age formula" to predict maximal heart rate. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 22(2): Supplement S96 (Abstract 575)
- Rieckert, H. (Hrsg.). (1981). *Sport an der Grenze der menschlichen Leistungsfähigkeit*. Springer, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- Rimaud, D., Messonnier, L., Castells, J., Devillard, X. & Calmels, P. (2010). Effects of compression stockings during exercise and recovery on blood lactate kinetics. *European Journal of Applied Physiology* 110: 425-433
- Robergs, R.A. & Landwehr, R. (2002). The surprising history of the "Hrmax=220-age" equation. *Journal of Exercise Physiology online* 5(2).
- Robinson, S. (1938). Experimental studies of physical fitness in relation to age. *Arbeitsphysiologie* 10: 251-323
- Rodeheffer, R.J., Gerstenblith, G., Becker, L.C., Fleg, J.L., Weisfeldt, M.L. & Lakatta, E. (1984). Exercise cardiac output is maintained with advancing age in healthy human subjects: cardiac dilatation and increased stroke volume compensate for a diminished heart rate. *Circulation* 69(2): 203-213.

- Röcker, K. & Dickhuth, H.-H. (1996). Spiroergometrische Meßgrößen in der sportartspezifischen Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung. *Leistungssport* (6): 44-48
- Röcker, K., Schotte, O., Niess, A.M., Horstmann, T. & Dickhuth H.-H. (1998). Predicting competition performance in long-distance running by means of a treadmill test. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 30(10): 1552-1557
- Röcker, K. & Dickhuth, H.-H. (2001). Praxis der Laktatmessung. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 52(1): 33-34.
- Röcker, K., Niess, A.M., Horstmann, T., Striegel, H., Mayer, F. & Dickhuth, H.H. (2002). Heart rate prescription from performance and anthropometrical characteristics. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 34: 881-887
- Rost, R. (1992). Fitness im Alter. *Herz, Sport und Gesundheit*, 9 (3): 10-11.
- Rost, R. (Hrsg.).(2001). *Lehrbuch der Sportmedizin*. Deutscher Ärzte Verlag: Köln.
- Royce, J. (1969). Active and Passive Recovery from Maximal Aerobic Capacity Work. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie*, 8 (1): 1-8
- Ryhming, I. (1953). A modified Harvard step test for the evaluation of physical fitness. *Arbeitsphysiologie*, 15: 235.
- Scharhag-Rosenberger, F. (2010). Spiroergometrie zur Ausdauerleistungsdiagnostik. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 61(6): 146-147.
- Scharhag-Rosenberger, F., Carlsohn, A., Cassel, M., Mayer, F. & Scharhag, J. (2011). How to test maximal oxygen uptake: a study on timing and testing procedure of a supramaximal verification test. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* 36(1): 153-160
- Schiller, B.C., Casas, Y.G., DeSouza, A. & Seals, D.R. (2001). Maximal aerobic capacity across age in healthy Hispanic and Caucasian women. *Journal of Applied Physiology* 91(3): 1048-1054
- Schmidt, G. & Israel, S. (1983). Herzschlagfrequenz beim gesundheitsstabilisierenden Ausdauertraining: 170-1/2 Lebensalter (Jahre) \pm 10 pro min. *Medizin und Sport* 23(5): 158-161
- Schmidt, H. (2011). *Studie zur Untersuchung der maximalen Sauerstoffaufnahme kapazität anhand zweier Leistungsprotokolle auf dem SRM-Ergometer*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit am Institut für Sport und Sportwissenschaft des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).
- Sheffield, L.T., Maloof, J.A., Sawyer, J.A. & Roitman, D. (1978). Maximal heart rate and treadmill performance of healthy women in relation to age. *Circulation* 57(1): 79-84
- Shephard, R.J. (1966). On the timing of post exercise pulse readings. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. 6: 23.
- Shephard, R.J., Allen, C., Bar-Or, O., Davies, C.T., Degre, S., Hedman, R., Ishii, K., Kaneko, M., LaCour, J.R., Di Prampero, P.E. & Seliger, V.

- (1969). The working capacity of Toronto schoolchildren: part 1. *Canadian Journal of Medicine Association* 100: 560-566
- Shephard, R.J., Åstrand, P.-O. (Hrsg.) (1993). *Ausdauer im Sport*. Deutscher Ärzte Verlag GmbH: Köln.
- Short, K.R. & Sedlock, D.A. (1997). Excess postexercise oxygen consumption and recovery rate in trained and untrained subjects. *Journal of Applied Physiology*, 83 (1):, 153-159
- Sidney, K.H. & Shephard, R.J. (1977). Maximum and submaximum exercise tests in men and women in the seventh, eighth and ninth decades of life. *Journal of Applied Physiology* 43: 280-287
- Sietsema, K.E., Ben-Dov, I. & Zhang Y.Y. (1994). Dynamics of oxygen uptake for submaximal exercise and recovery in patients with chronic heart failure. *Chest*, 105 (6): 1693-1700
- Simon, G. (1986). Trainingssteuerung im Schwimmsport. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 37: 376-379
- Stegmann, H. & Kindermann, W. (1982). Comparison of prolonged exercise tests at the individual anaerobic threshold and the fixed anaerobic threshold of 4 mmol/l lactate. *International Journal of Sports Medicine* 3: 105-110
- Steinacker, J. M., Liu, Y. & Reißnecker, S. (2002). Abbruchkriterien bei der Ergometrie. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 53(7+8): 228-229
- Suzuki, T., Koike, A., Nagayama, O., Sakurada, K., Tsuneoka, H., Kato, J., Yamashita, T. & Yamazaki, J. (2012). Overshoot Phenomena of Respiratory Gas Variables During Exercise Recovery in Cardiac Patients. *Circulation Journal*, 76 (4): 876-883
- Szögy, A., Böhmer, D., Ambrus, P. & Linzbach, B. (1984). Fahrradergometrische Bestimmungen der anaeroben Kapazität bei jugendlichen Bahn-, Straßen- und Querfeldeinradrennfahrern. *Therapiewoche* 34: 3868-3870
- Tanaka, H., Fukumoto, S., Osaka, Y., Ogawa, S., Yamaguchi, H. & Miyamoto, H. (1991). Distinctive effects of three different modes of exercise on oxygen uptake, heart rate and blood lactate and pyruvate. *International Journal of Sports Medicine* 12: 433-438
- Taylor, H. L., Buskirk, E. & Henschel, A. (1955). Maximal Oxygen Intake as an Objective Measure of Cardio-Respiratory Performance. *Journal of Applied Physiology* 8: 73-80.
- Tittel, K., Arndt, K.H. & Hollmann, W. (1993). *Sportmedizin: gestern – heute – morgen*. Band 28: Sportmedizinische Schriftreihe. Leipzig, Berlin, Heidelberg: Johann Ambrosius Barth.
- 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
- Verma, S.K., Sidhu, L.S. & Kansal, D.K. (1979). A study of maximum oxygen uptake and heart rate during work and recovery as measured on cycle er-

gometer on national Indian sportsmen. *British Journal of Sports Medicine*, 13(1): 24-28

Wahl, P., Bloch, W. & Mester, J. (2009). Moderne Betrachtungsweisen des Laktats: Laktat ein überschätztes und zugleich unterschätztes Molekül. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie* 57(3): 100-107

Whaley, M.W., Kaminsky, L.A., Dwyer, G.B., Getchell, L.H. & Norton, J.A. (1992). Predictors of over – and underachievement of age – predicted maximal heart rate. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 24(10): 1173-1179

Wonisch, M., Fruhwald, F.M., Hofmann, P., Hödl, R., Klein, W., Kraxner, W., Maier, R., Pokan, R., Smekal, G., Watzinger, N. (2003). Spiroergometrie in der Kardiologie - Grundlagen der Physiologie und- Terminologie. *Journal für Kardiologie* 10(9): 383-390.

INTERNETQUELLEN

Cortex Biophysik GmbH, www.cortex-medical.de, Stand: 10.02.2011.

Daum electronic GmbH, www.daum-electronic.de, Stand: 27.10.2012

EKF-Diagnostics GmbH, www.ekfdiagnostics.de, Stand: 27.10.2012

Ergonizer® Software für sportmedizinische Leistungsdiagnostik ,
www.ergonizer.de, Stand: 10.02.2011.

Polar Electro GmbH Deutschland, www.polar-deutschland.de, Stand:
27.10.2012

Schoberer Rad Messtechnik SRM GmbH, www.srm.de, Stand: 27.10.2012

SPSS Statistics IBM, www.ibm.com/software/analytics/spss/, Stand:
27.10.2012

WOODWAY GmbH, www.woodway.de, Stand: 27.10.2012

TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle 1:</i>	<i>Die RPE-Skala zur Einschätzung des Belastungsempfinden (nach Borg & Noble, 1974, S. 131-153)</i>	<i>13</i>
<i>Tabelle 2:</i>	<i>Formeln zur Berechnung der Trainingsherzfrequenz im Bereich „Laufen“ (vgl. Härtel, 2006, S. 29).....</i>	<i>15</i>
<i>Tabelle 3:</i>	<i>Empfehlungen für ein Untersuchungsprogramm für die Laufbandergometrie (vgl. Löllgen et al., 1997, S. 62)</i>	<i>18</i>
<i>Tabelle 4:</i>	<i>Empfehlungen für Belastungsschemata für die Fahrradergometrie (vgl. Löllgen et al., 1997, S. 57, Rost, 2001, S. 53, De Marées, 2003, S. 453).....</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 5:</i>	<i>Vor- und Nachteile der verschiedenen Belastungsformen (vgl. Löllgen, 2005, S. 241 & Dickhuth et al., 2011, S. 229)</i>	<i>21</i>
<i>Tabelle 6:</i>	<i>Relative und absolute Abbruchkriterien (nach Steinacker et al. 2002).....</i>	<i>26</i>
<i>Tabelle 7:</i>	<i>Beispiele der Plateaubildungskriterien bei verschiedenen Studien in den 1950er und 1960er Jahren (mod. nach Howley, Bassett & Welch, 1995, S. 1294)</i>	<i>28</i>
<i>Tabelle 8:</i>	<i>Studien zur Bestimmung der maximalen Herzfrequenz anhand von Regressionsgleichungen, alphabetisch sortiert nach Autor (mod. nach Robergs & Landwehr 2002)</i>	<i>36</i>
<i>Tabelle 9:</i>	<i>Zusammenfassung der objektiven Ausbelastungskriterien nach Autoren und Jahr der Veröffentlichung (der letzten 15 Jahre).....</i>	<i>40</i>
<i>Tabelle 10:</i>	<i>Verhalten von VE, VO₂ und RQ vor, während und nach rampenförmiger Belastung (nach Scharhag-Rosenberger 2010, S.147)</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 11:</i>	<i>Zusammenfassung der Parameter in der Nachbelastung nach Autoren und Jahr der Veröffentlichung (der letzten 15 Jahre).....</i>	<i>58</i>
<i>Tabelle 12:</i>	<i>Anthropometrische Daten (MW ± SD) aller Probanden auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht.....</i>	<i>67</i>

Tabelle 13:	<i>Anthropometrische Daten (MW ± SD) der Probanden mit spiroergometrischer Untersuchung auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht.....</i>	<i>68</i>
Tabelle 14:	<i>Anthropometrische Daten (MW ± SD) der Probanden auf dem Fahrradergometer Probanden unterteilt nach Geschlecht.....</i>	<i>68</i>
Tabelle 15:	<i>Anthropometrische Daten (MW ± SD) der Probanden mit spiroergometrischer Untersuchung auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht</i>	<i>69</i>
Tabelle 16:	<i>Durchschnittliche Laufgeschwindigkeit (v) in km/h auf dem Laufbandergometer an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 4mmol/l) Schwellen sowie bei Testabbruch.....</i>	<i>72</i>
Tabelle 17:	<i>Maximale Herzfrequenz (MW ± SD), Minimum und Maximum in S/min auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht</i>	<i>74</i>
Tabelle 18:	<i>Laktatkonzentrationen bei Testabbruch (MW ± SD), Minimum und Maximum in mmol/l auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht.....</i>	<i>75</i>
Tabelle 19:	<i>Maximale Sauerstoffaufnahme (MW ± SD), Minimum und Maximum in l/min (abs.) bzw. ml/min/kg (rel.) auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht.....</i>	<i>76</i>
Tabelle 20:	<i>Respiratorischer Quotient bei Testabbruch (MW ± SD), Minimum und Maximum auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht.....</i>	<i>76</i>
Tabelle 21:	<i>Maximaler Atemäquivalent (MW ± SD), Minimum und Maximum auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht.....</i>	<i>77</i>
Tabelle 22:	<i>Maximales Atemminutenvolumen (MW ± SD), Minimum und Maximum in l/min auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Geschlecht.....</i>	<i>78</i>
Tabelle 23:	<i>Korrelationsüberprüfung der Ausbelastungskriterien nach Pearson auf dem Laufbandergometer</i>	<i>79</i>
Tabelle 24:	<i>Übersicht der maximal erreichten Werte bei Testabbruch auf dem Laufbandergometer.....</i>	<i>79</i>
Tabelle 25:	<i>Vergleich von Ausbelastungskriterien aus der Literatur und die in der vorliegenden Untersuchung erreichten Werte auf dem Laufbandergometer.....</i>	<i>80</i>
Tabelle 26:	<i>Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (Gesamtstichprobe) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch.....</i>	<i>82</i>

Tabelle 27:	Maximale Herzfrequenz (N, MW \pm SD), Minimum und Maximum in S/min auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht	84
Tabelle 28:	Laktatkonzentrationen bei Testabbruch (N, MW \pm SD), Minimum und Maximum in mmol/l auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht	84
Tabelle 29:	Maximale Sauerstoffaufnahme (N, MW \pm SD), Minimum und Maximum in l/min (abs.) bzw. (ml/min/kg) auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht.....	85
Tabelle 30:	Respiratorischer Quotient bei Testabbruch (N, MW \pm SD), Minimum und Maximum auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht	86
Tabelle 31:	Atemäquivalent bei Testabbruch (N, MW \pm SD), Minimum und Maximum auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht	87
Tabelle 32:	Atemminutenvolumen bei Testabbruch (MW \pm SD), Minimum und Maximum in l/min auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Geschlecht	87
Tabelle 33:	Korrelationsüberprüfung der Ausbelastungskriterien nach Pearson auf dem Fahrradergometer	88
Tabelle 34:	Übersicht der maximal erreichten Werte bei Testabbruch auf dem Fahrradergometer	89
Tabelle 35:	Vergleich von Ausbelastungskriterien aus der Literatur und die in der vorliegenden Untersuchung erreichten Werte auf dem Fahrradergometer	90
Tabelle 36:	Varianzanalyse (ANOVA) der Herzfrequenz in der Ausbelastung zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht.....	91
Tabelle 37:	Varianzanalyse (ANOVA) der Laktatkonzentration in der Ausbelastung zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht.....	91
Tabelle 38:	Varianzanalyse (ANOVA) der absoluten Sauerstoffaufnahme in der Ausbelastung zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht.....	92
Tabelle 39:	Varianzanalyse (ANOVA) des respiratorischen Quotienten in der Ausbelastung zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht.....	93
Tabelle 40:	Varianzanalyse (ANOVA) des Atemäquivalents in der Ausbelastung zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht.....	93
Tabelle 41:	Vergleich zwischen Ausbelastungsparameter der Laufband- und Fahrradergometrie	95

Tabelle 42:	Anzahl der Probanden, die bei der Laufbandergometrie "harte" und "weiche" Ausbelastungskriterien (kombiniert Hf und La) erreichen.....	106
Tabelle 43:	Anzahl von Probanden, die bei der Laufbandergometrie "harte" und "weiche" Ausbelastungskriterien (kombiniert Hf, La, VO ₂ , RQ und AÄ) erreichen.....	106
Tabelle 44:	Anzahl der Probanden, die bei der Fahrradergometrie "harte" und "weiche" Ausbelastungskriterien (kombiniert Hf und La) erreichen	114
Tabelle 45:	Anzahl von Probanden (N, %), die bei der Fahrradergometrie "harte" und "weiche" Ausbelastungskriterien (kombiniert Hf, La, VO ₂ , RQ und AÄ) erreichen.....	114
Tabelle 46:	Durchschnittliche Laufgeschwindigkeit (v) in km/h auf dem Laufbandergometer an den aeroben (LT und 2 mmol/l) und anaeroben (IAS und 4 mmol/l) Schwellen sowie der maximalen Leistung bei Testabbruch.....	118
Tabelle 47:	Herzfrequenzwerte in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer	120
Tabelle 48:	Korrelationsüberprüfung (nach Pearson) des prozentualen Rückgangs der Nachbelastungs-Hf und den Leistungskenngrößen auf dem Laufbandergometer	122
Tabelle 49:	Korrelationsüberprüfung (nach Pearson) des prozentualen Rückgangs der Nachbelastungs-Hf und den Leistungskenngrößen auf dem Laufbandergometer unterteilt nach Altersgruppen.....	123
Tabelle 50:	Varianzanalyse (ANOVA) des prozentualen Rückgangs der Hf _{max} zu E ₁ in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer unterteilt in leistungsschwache und -starke Gruppe (gemessen an v _{4mmol/l}) sowie Geschlecht	124
Tabelle 51:	Varianzanalyse (ANOVA) des prozentualen Rückgangs der Hf _{max} zu E ₃ in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer unterteilt in leistungsschwache und -starke Gruppe (gemessen an v _{4mmol/l}) sowie Geschlecht	125
Tabelle 52:	Varianzanalyse (ANOVA) des prozentualen Rückgangs der Hf _{max} zu E ₅ in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer unterteilt in leistungsschwache und -starke Gruppe (gemessen an v _{4mmol/l}) sowie Geschlecht	126

Tabelle 53:	<i>Laktatkonzentrationen in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer</i>	127
Tabelle 54:	<i>Absolute Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer</i>	129
Tabelle 55:	<i>Respiratorischer Quotient in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer</i>	131
Tabelle 56:	<i>Übersicht der analysierten Parameter (Hf, La, abs. VO₂ und RQ) in der Nachbelastung auf dem Laufbandergometer unterteilt in Geschlecht und Altersgruppe</i>	133
Tabelle 57:	<i>Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (Gesamtstichprobe) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch.....</i>	135
Tabelle 58:	<i>Herzfrequenzwerte in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer.....</i>	136
Tabelle 59:	<i>Korrelationsüberprüfung (nach Pearson) des prozentualen Rückgangs der Nachbelastungs-Hf und den Leistungskenngrößen auf dem Fahrradergometer</i>	139
Tabelle 60:	<i>Korrelationsüberprüfung (nach Pearson) des prozentualen Rückgangs der Nachbelastungs-Hf und den Leistungskenngrößen auf dem Fahrradergometer unterteilt nach Altersgruppen.....</i>	139
Tabelle 61:	<i>Varianzanalyse (ANOVA) des prozentualen Rückgangs der Hf_{max} zu E₁ in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer unterteilt in leistungsschwache und -starke Gruppe (gemessen an v_{4mmol/l}) sowie Geschlecht.....</i>	141
Tabelle 62:	<i>Varianzanalyse (ANOVA) des prozentualen Rückgangs der Hf_{max} zu E₃ in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer unterteilt in leistungsschwache und -starke Gruppe (gemessen an v_{4mmol/l}) sowie Geschlecht.....</i>	141
Tabelle 63:	<i>Varianzanalyse (ANOVA) des prozentualen Rückgangs der Hf_{max} zu E₅ in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer unterteilt in leistungsschwache und -starke Gruppe (gemessen an v_{4mmol/l}) sowie Geschlecht.....</i>	142
Tabelle 64:	<i>Laktatkonzentration in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer.....</i>	143
Tabelle 65:	<i>Absolute Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer.....</i>	145
Tabelle 66:	<i>Respiratorischer Quotient in der Nachbelastung auf dem Fahrradergometer (Gesamtwerte)</i>	147

<i>Tabelle 67:</i>	<i>Übersicht der Nachbelastungswerte auf dem Fahrradergometer unterteilt in Geschlecht und Altersgruppe</i>	<i>149</i>
<i>Tabelle 68:</i>	<i>Varianzanalyse (ANOVA) der Herzfrequenz in der Nachbelastung (prozentualer Rückgang von E₀ zu E₅) zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht.....</i>	<i>150</i>
<i>Tabelle 69:</i>	<i>Varianzanalyse (ANOVA) der Laktatkonzentration in der Nachbelastung (prozentualer Rückgang von E₀ zu E₅) zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht.....</i>	<i>151</i>
<i>Tabelle 70:</i>	<i>Varianzanalyse (ANOVA) der absoluten Sauerstoffaufnahme in der Nachbelastung (prozentualer Rückgang von E₀ zu E₅) zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht.....</i>	<i>151</i>
<i>Tabelle 71:</i>	<i>Varianzanalyse (ANOVA) des respiratorischen Quotienten in der Nachbelastung (prozentualer Rückgang von E₀ zu E₅) zwischen Laufband- und Fahrradergometrie sowie Geschlecht.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabelle 72:</i>	<i>Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (TP 1: 25-2) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch.....</i>	<i>194</i>
<i>Tabelle 73:</i>	<i>Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (TP 2: 20-3) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch.....</i>	<i>196</i>
<i>Tabelle 74:</i>	<i>Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (TP 3: 50-3) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch.....</i>	<i>197</i>
<i>Tabelle 75:</i>	<i>Übersicht der maximal erreichten Werte bei Testabbruch auf dem Fahrradergometer (Testprotokoll 1)</i>	<i>198</i>
<i>Tabelle 76:</i>	<i>Übersicht der maximal erreichten Werte bei Testabbruch auf dem Fahrradergometer (Testprotokoll 2)</i>	<i>199</i>
<i>Tabelle 77:</i>	<i>Übersicht der maximal erreichten Werte bei Testabbruch auf dem Fahrradergometer (Testprotokoll 3)</i>	<i>200</i>
<i>Tabelle 78:</i>	<i>Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (TP 1: 25-2) an den aeroben (LT</i>	

	<i>und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch der Probanden mit Nachbelastungsverlauf</i>	<i>201</i>
<i>Tabelle 79:</i>	<i>Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (TP 2: 20-3) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch der Probanden mit Nachbelastungsverlauf</i>	<i>203</i>
<i>Tabelle 80:</i>	<i>Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (TP 3: 50-3) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch der Probanden mit Nachbelastungsverlauf</i>	<i>204</i>
<i>Tabelle 81:</i>	<i>Übersicht der Nachbelastungswerte auf dem Fahrradergometer (Testprotokoll 1)</i>	<i>205</i>
<i>Tabelle 82:</i>	<i>Übersicht der Nachbelastungswerte auf dem Fahrradergometer (Testprotokoll 2)</i>	<i>206</i>
<i>Tabelle 83:</i>	<i>Übersicht der Nachbelastungswerte auf dem Fahrradergometer (Testprotokoll 3)</i>	<i>207</i>

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Abweichung der Herzfrequenz an der anaeroben Schwelle bei 1423 getesteten Probanden und der Formel „200 minus Lebensalter“ (Quelle: ergonizer.de/trainingssteuerung.html)	16
Abbildung 2:	Altersabhängigkeit der maximalen Herzfrequenz verschiedener Studien (nach Löllgen 2005, S. 24)	38
Abbildung 3:	Laufbandergometer der Firma Woodway am IfSS des KIT (eigenes Bildmaterial)	62
Abbildung 4:	Fahrradergometer der Firma SRM am IfSS des KIT (eigenes Bildmaterial).....	63
Abbildung 5:	Biosen c-line der Firma EKF-Diagnostics (Quelle: ekfdiagnostics.de).....	63
Abbildung 6:	Pulsgurt der Firma Polar (Quelle: polar-deutschland.de).....	64
Abbildung 7:	Spirometer MetaMax 3B der Firma Cortex (Quelle: cortex-medical.de)	64
Abbildung 8:	Streudiagramm mit Regressionsgleichung der Hf_{max} in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Laufbandergometer	101
Abbildung 9:	Streudiagramm der $La_{Abbruch}$ in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Laufbandergometer	102
Abbildung 10:	Streudiagramm des $RQ_{Abbruch}$ in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Laufbandergometer	104
Abbildung 11:	Streudiagramm des $A\ddot{A}_{Abbruch}$ in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Laufbandergometer.....	105
Abbildung 12:	Streudiagramm mit Regressionsgleichung der Hf_{max} in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Fahrradergometer.....	109
Abbildung 13:	Streudiagramm der $La_{Abbruch}$ in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Fahrradergometer	110
Abbildung 14:	Streudiagramm des $RQ_{Abbruch}$ in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Fahrradergometer	112
Abbildung 15:	Streudiagramm des $A\ddot{A}_{Abbruch}$ in Abhängigkeit des Lebensalters auf dem Fahrradergometer	113

<i>Abbildung 16:</i>	<i>Nachbelastungsverhalten der Herzfrequenz auf dem Laufbandergometer</i>	<i>120</i>
<i>Abbildung 17:</i>	<i>Nachbelastungsverhalten der Laktatkonzentration auf dem Laufbandergometer</i>	<i>127</i>
<i>Abbildung 18:</i>	<i>Nachbelastungsverhalten der absoluten Sauerstoffaufnahme auf dem Laufbandergometer</i>	<i>129</i>
<i>Abbildung 19:</i>	<i>Nachbelastungsverhalten des respiratorischen Quotienten auf dem Laufbandergometer</i>	<i>131</i>
<i>Abbildung 20:</i>	<i>Nachbelastungsverhalten der Herzfrequenz auf dem Fahrradergometer.....</i>	<i>137</i>
<i>Abbildung 21:</i>	<i>Nachbelastungsverhalten der Laktatkonzentration auf dem Fahrradergometer.....</i>	<i>144</i>
<i>Abbildung 22:</i>	<i>Nachbelastungsverhalten der absoluten Sauerstoffaufnahme auf dem Fahrradergometer.....</i>	<i>146</i>
<i>Abbildung 23:</i>	<i>Nachbelastungsverhalten des respiratorischen Quotienten auf dem Fahrradergometer</i>	<i>147</i>
<i>Abbildung 24:</i>	<i>Vereinfachte Darstellung der Vorgehensweise bei Untersuchungen mit dem Ziel einer Ausbelastung</i>	<i>161</i>

ABKÜRZUNGEN

AÄ Atemäquivalent

AF Atemfrequenz [1/min]

AMV/VE Atemminutenvolumen [ml]

AT Anaerobic Threshold (anaerobe Laktatschwelle)

AZV Atemzugvolumen [l/Atemzug]

cm Zentimeter

CO₂ Kohlenstoffdioxid

EPOC excess postexercise oxygen consumption

F Prüfsumme des F-Test

FE Fahrradergometer

h Stunden

Hf Herzfrequenz [S/min]

IAS Individuelle anaerobe Schwelle

IVT Individuelle ventilatorische Schwelle

kg Kilogramm

km/h Kilometer pro Stunde

La Laktat [mmol/l]

LA	Lebensalter	[Jahre]
LE	Laufbandergometer	
l/min	Liter pro Minute	
LT	Lactate Threshold (aerobe Laktatschwelle)	
m	männlich	[♂]
max	maximal	
MLSS	maximales Laktat Steady State	
mmol/l	Millimol pro Liter	
MW	Mittelwert	[Ø]
N	Anzahl der Probanden	
O ₂	Sauerstoff	
p	Signifikanzwert	
P	Leistung	[Watt]
RCP	Respiratorischer Kompensationspunkt	
RQ	Respiratorischer Quotient	
SD	Standardabweichung	
S/min	Schläge pro Minute	
TP	Testprotokoll	
VE/AMV	Atemminutenvolumen	[ml]
VCO ₂	Kohlenstoffdioxidabgabe	[l/min]
VO ₂ (abs.)	absolute Sauerstoffaufnahme	[l/min]

VO_2 (rel.)	Relative Sauerstoffaufnahme	[ml/min/kg]
VO_{2max}	Maximale Sauerstoffaufnahme	
VO_{2peak}	Maximal erreichte Sauerstoffaufnahme	
VO_2/Hf	Sauerstoffpuls	[ml/S]
w	weiblich	[♀]
η^2	Eta Quadrat, Effektstärke	
Σ	Summe/ gesamt	
\pm	plus-minus	
\leq	kleiner gleich	
\geq	größer gleich	
$<$	kleiner	
$>$	größer	

ANHANG

I Kundendatenerfassung mit Risikofragebogen (Par-Q)



Institut für Sport und Sportwissenschaft
Abteilung Leistungsdiagnostik

Kundendatenerfassung

ID: _____ /13

Testdaten (vom IfSS auszufüllen):			
Testbeschreibung/Protokoll	Testdatum/-uhrzeit:	Rechnungsdatum:	Bezahlt am:
Bemerkungen/Besonderheiten (eventuell Projekt)			

Kundendaten			
Name	Vorname	Geburtsdatum	Geschlecht <input type="checkbox"/> weiblich / <input type="checkbox"/> männlich
Straße, Hausnummer		PLZ, Wohnort	
Telefon privat/beruflich		Email	
Abweichende Rechnungsadresse:			
Auswertung/Trainingsempfehlung Postalisch <input type="checkbox"/> Email <input type="checkbox"/>		Aktion: Keine <input type="checkbox"/> Rabatt <input type="checkbox"/> Gutschein <input type="checkbox"/> Sonstiges:	
Um Risikofaktoren auszuschließen, die gegen eine Leistungsdiagnostik sprechen könnten, bitten wir Sie, die folgenden Fragen aufmerksam durchzulesen und mit „Ja“ oder „Nein“ zu beantworten:			
1. Hat Ihnen Ihr Arzt jemals gesagt, dass Ihr Herz in keinem guten Zustand ist <u>und</u> dass Sie Sport nur nach ärztlicher Verordnung betreiben sollen?	ja ... <input type="checkbox"/>	nein ... <input type="checkbox"/>	
2. Haben Sie Schmerzen in der Brust, wenn Sie sich körperlich anstrengen?	ja ... <input type="checkbox"/>	nein ... <input type="checkbox"/>	
3. Hatten Sie in den letzten Monaten Brustschmerzen in Momenten, in denen Sie sich nicht körperlich anstrengten?	ja ... <input type="checkbox"/>	nein ... <input type="checkbox"/>	
4. Verlieren Sie aufgrund von Schwindel leicht Ihr Gleichgewicht oder wurden Sie jemals ohnmächtig?	ja ... <input type="checkbox"/>	nein ... <input type="checkbox"/>	
5. Haben Sie ein Knochen- oder Gelenkproblem, das sich durch eine Veränderung Ihrer körperlichen Aktivität verschlimmern könnte?	ja ... <input type="checkbox"/>	nein ... <input type="checkbox"/>	
6. Verschreibt Ihnen Ihr Arzt momentan Herzmittel oder Medikamente für Ihren Blutdruck (z.B. Betablocker)?	ja ... <input type="checkbox"/>	nein ... <input type="checkbox"/>	
7. Kennen Sie irgendeinen anderen Grund, warum Sie keinen Sport betreiben sollten?	ja ... <input type="checkbox"/>	nein ... <input type="checkbox"/>	
8. Leiden Sie an einer Blutgerinnungsstörung (Hämophilie)?	ja ... <input type="checkbox"/>	nein ... <input type="checkbox"/>	
Falls Sie eine oder mehrere der oben genannten Fragen mit „Ja“ beantwortet haben, benötigen wir für die Durchführung der Ausdauer-Leistungsdiagnostik eine ärztliche Unbedenklichkeitsbescheinigung.			

II Einverständniserklärung



Institut für Sport und Sportwissenschaft
Abteilung Leistungsdiagnostik

Einverständniserklärung

Hiermit erkläre ich mich einverstanden, an einem leistungsdiagnostischen Test bzw. einer wissenschaftlichen Studie am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Sport und Sportwissenschaft, Leitung Prof. Dr. Alexander Woll, teilzunehmen.

Mit der Speicherung der erhobenen Daten und der anschließenden anonymen, wissenschaftlichen Auswertung bin ich einverstanden.

Mir ist bekannt, dass bei jeder sportlichen Betätigung ein Verletzungsrisiko besteht und auch eine Herz-Kreislaufbelastung auftritt. Das individuelle Risiko ist abhängig vom Allgemeinzustand des Betroffenen, von eventuell bestehenden Erkrankungen, von früheren Erkrankungen und vom aktuellen Trainingszustand.

Die Teilnahme am Test erfolgt auf eigenes Risiko.

Mit der geplanten Blutabnahme (Kapillarblut) im Rahmen des Laktattests bin ich einverstanden.

Unterschrift Kunde/Kundin: _____

Ort, Datum: _____

- | | |
|---|--------------------------|
| 1. Technische Geräte in einwandfreiem Zustand? | <input type="checkbox"/> |
| 2. Probanden über Risiken und Gefahren aufgeklärt? | <input type="checkbox"/> |
| 3. Fragen über Risikofaktoren überprüft? | <input type="checkbox"/> |
| 4. Ist die Notfallkette inklusive Notrufnummer bekannt? | <input type="checkbox"/> |
| 5. Ist ein funktionsfähiges Telefon vorhanden? | <input type="checkbox"/> |

Unterschrift Mitarbeiter / Mitarbeiterin IfSS: _____

Ort, Datum: _____

III Belastungsbogen Laufbandergometrie (exemplarisch 6-2-3)



Institut für Sport und Sportwissenschaft

Name/Vorname: ID:
 Geburtsdatum: Testleiter:
 Untersuchung am: Maske:

Belastungsbogen (Laufband 6-2-3)

PERSÖNLICHE DATEN:
 Gewicht: kg Größe: cm

SPORTNAMENSE:
 Sportart:
 zusätzliche Sportaktivitäten:
 Haben Sie schon einmal einen Test bei uns absolviert? (Art, Zeitraum)
system. Training: Anzahl der Einheiten:/Woche
 seit wann: Std./Woche
 Trainingsumfang: km/Woche
 Trainingsziel:
 Bestzeiten + Disziplin:
 Allgemeines/ derzeitiges Training:
 Haben Sie Interesse an PT?/TP?
 Waren Sie am Vortag sportlich aktiv? *nein/ja*
 Nehmen Sie Medikamente? *nein/ja*
 Waren Sie in letzter Zeit krank? *nein/ja*

Stufe	Herzfrequenz	Laktat
vor		
6 km/h		
8 km/h		
10 km/h		
12 km/h		
14 km/h		
16 km/h		
18 km/h		
20 km/h		
22 km/h		
+ 1 min		
+ 3 min		
+ 5 min		

Abbruch nach min bei km/h, wegen

IV Belastungsbogen Fahrradergometrie (exemplarisch 50-50-3)

Belastungsbogen (Radergometrie 50-50-3)

Name/Vorname: ID:
 Geburtsdatum: Testleiter:
 Untersuchung am: Maske:

PERSÖNLICHE DATEN:
 Gewicht : kg Größe : cm Tf :
 Lenker : X : cm Y : cm PS :
 Sattel : X : cm Y : cm

Stufe	Herzfrequenz	Laktat
vor		
50 Watt		
100 Watt		
150 Watt		
200 Watt		
250 Watt		
300 Watt		
350 Watt		
400 Watt		
450 Watt		
500 Watt		
+ 1 min		
+ 3 min		
+ 5 min		

SPORTNAMENNESE:
 Sportart:
 zusätzliche Sportaktivitäten:
 Haben Sie schon einmal einen Test bei uns absolviert? (Art, Zeitraum)
system. Training: Anzahl der Einheiten:/Woche
 seit wann: Std./Woche
 Trainingsumfang: km/Woche
 Trainingsziel:
 Beszeiten + Disziplin:
 Allgemeines/ derzeitiges Training:
 Haben Sie Interesse an PT?/TP?
 Waren Sie am Vortag sportlich aktiv? *nein/ja*
 Nehmen Sie Medikamente? *nein/ja*
 Waren Sie in letzter Zeit krank? *nein/ja*

Abbruch nach min bei Watt, wegen

V Ergebnisse der einzelnen Belastungsprotokolle (TP 1, 2 und 3) auf dem Fahrradergometer

Ausbelastungskriterien

Das Testprotokoll 1 (TP 1: 25-2) mit einem Inkrement von 25 Watt und einer Stufendauer von 2 Minuten absolvierten 343 Probanden. Diese Probanden erreichen eine durchschnittliche Leistung (P) an den aeroben Schwellen von $103,0 \pm 35,8$ Watt (P_{LT}) bzw. von $129,5 \pm 54,0$ Watt ($P_{2\text{mmol/l}}$). Die Leistung an den anaeroben Schwellen liegt insgesamt bei $146,5 \pm 49,5$ Watt (P_{IAS}) bzw. bei $159,6 \pm 57,4$ Watt ($P_{3\text{mmol/l}}$). Bei Testabbruch wurde bei einem Probanden ein Laktatwert < 2 mmol/l und bei 9 Probanden < 3 mmol/l ermittelt, deswegen konnten bei der Leistung an den fixen Schwellen (2 bzw. 3mmol/l) nur 342 respektive 334 Probanden erfasst werden. Das Gleiche gilt auch bei der Leistung der individuellen anaeroben Schwelle. 3 Probanden konnten keinen Laktatwert erreichen, der in der Addition von LT plus 1,0 mmol/l liegt. Die maximale Leistung (P_{max}) dieser Teilstichprobe liegt im Durchschnitt bei $221,6 \pm 81,1$ Watt. Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden die ermittelten Leistungskenngrößen der vorliegenden Stichprobe in der nachfolgenden Tabelle 72 dargestellt. Dabei wird geschlechtsspezifisch und in Altersgruppen unterschieden sowie die Summe am Ende der Tabelle aufgeführt. Die folgenden 4 Tabellen haben jeweils den gleichen Aufbau.

Tabelle 72: Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (TP 1: 25-2) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch

	Alter [Jahre]		P_{LT} [Watt]	$P_{2\text{mmol/l}}$ [Watt]	P_{IAS} [Watt]	$P_{3\text{mmol/l}}$ [Watt]	P_{max} [Watt]
♂	≤ 20	N	7	7	7	7	7
		MW SD	154,0 ± 31,2	201,1 ± 45,1	217,7 ± 41,8	241,0 ± 40,2	337,6 ± 40,7
	21-30	N	98	98	98	98	98
		MW SD	125,7 ± 28,0	155,4 ± 43,5	177,1 ± 36,9	192,8 ± 44,4	291,7 ± 47,5
	31-40	N	20	20	20	20	20
		MW SD	144,0 ± 40,9	195,3 ± 59,1	205,0 ± 55,3	226,8 ± 60,3	310,7 ± 63,3
	41-50	N	16	16	16	15	16
		MW SD	123,6 ± 30,0	177,0 ± 48,6	183,7 ± 42,6	203,4 ± 48,7	271,8 ± 57,2

	> 50	N	69	69	69	67	69
		MW	101,0	128,3	143,3	157,0	204,4
		SD	± 28,0	± 44,9	± 38,3	± 44,9	± 52,6
	Σ	N	210	210	210	207	210
		MW	120,1	153,5	170,5	186,9	264,8
		SD	± 33,0	± 50,7	± 45,1	± 52,0	± 67,2
♀	≤ 20	N	4	4	4	4	4
		MW	79,1	97,7	114,0	124,2	200,0
		SD	± 24,6	± 34,2	± 34,9	± 37,6	± 54,0
	21-30	N	29	29	29	29	29
		MW	93,7	116,1	133,1	143,0	207,6
		SD	± 21,8	± 39,5	± 30,4	± 38,5	± 38,4
	31-40	N	4	4	4	4	4
	MW	89,5	118,9	127,9	143,3	212,6	
	SD	± 12,8	± 10,7	± 17,6	± 14,8	± 20,2	
41-50	N	16	16	16	16	16	
	MW	75,4	87,1	106,2	110,5	151,8	
	SD	± 15,7	± 32,0	± 21,0	± 28,9	± 36,5	
> 50	N	80	79	77	74	80	
	MW	68,7	81,3	97,3	103,4	128,8	
	SD	± 14,8	± 25,5	± 18,4	± 23,4	± 29,3	
Σ	N	133	132	130	127	133	
	MW	75,9	91,3	107,9	115,2	153,4	
	SD	± 19,6	± 33,0	± 26,6	± 32,8	± 47,3	
Σ	N	343	342	340	334	343	
	MW	103,0	129,5	146,5	159,6	221,6	
	SD	± 35,8	± 54,0	± 49,5	± 57,4	± 81,1	

Das Testprotokoll 2 (TP 2: 20-3) mit einem Inkrement von 20 Watt und einer Stufendauer von 3 Minuten absolvierten 73 Probanden, die eine durchschnittliche Leistung (P) an den aeroben Schwellen von $153,6 \pm 29,3$ Watt (P_{LT}) bzw. von $200,8 \pm 50,9$ Watt ($P_{2\text{mmol/l}}$) erreichten. Die Leistung an den anaeroben Schwellen liegt insgesamt bei $214,7 \pm 40,8$ Watt (P_{IAS}) bzw. bei $234,1 \pm 51,8$ Watt ($P_{3\text{mmol/l}}$). Bei allen 73 Probanden konnten sowohl die aeroben als auch die anaeroben Schwellen ermittelt werden. Die maximale Leistung (P_{max}) dieser Teilstichprobe liegt im Durchschnitt bei $302,2 \pm 46,5$ Watt. Bei diesem Protokoll konnten die wenigsten Probanden untersucht werden. Aus diesem Grund sind die Zellen der 3. bis 5. Altersgruppe bei den weiblichen Probanden unausgefüllt.

Folgender Tabelle 73 sind die ermittelten Leistungskenngrößen dieser Teilstichprobe zu entnehmen.

Tabelle 73: Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (TP 2: 20-3) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch

	Alter [Jahre]		P_{LT} [Watt]	$P_{2mmol/l}$ [Watt]	P_{IAS} [Watt]	$P_{3mmol/l}$ [Watt]	P_{max} [Watt]
♂	≤ 20	N	11	11	11	11	11
		MW	166,2	219,4	231,1	251,5	324,6
		SD	± 22,7	± 54,3	± 35,4	± 41,5	± 45,7
	21-30	N	39	39	39	39	39
		MW	151,1	199,7	213,1	235,1	300,1
		SD	± 30,9	± 52,6	± 42,8	± 56,4	± 46,0
31-40	N	10	10	10	10	10	
	MW	150,9	195,7	211,1	229,4	301,0	
	SD	± 31,3	± 48,8	± 40,5	± 46,3	± 44,1	
41-50	N	9	9	9	9	9	
	MW	155,5	193,3	214,1	222,5	301,4	
	SD	± 32,0	± 54,7	± 45,6	± 58,4	± 52,8	
> 50	N	1	1	1	1	1	
	MW	166,8	203,5	218,9	233,9	285,0	
	SD						
	Σ	N	70	70	70	70	70
		MW	154,3	201,5	215,9	235,2	304,1
		SD	± 29,6	± 51,7	± 41,1	± 52,4	± 46,1
+0	≤ 20	N	2	2	2	2	2
		MW	135,8	183,8	186,9	206,7	261,8
		SD	± 17,9	± 35,2	± 30,6	± 39,0	± 59,0
	21-30	N	1	1	1	1	1
		MW	145,0	189,2	189,7	208,6	255,0
		SD					
31-40	N	-	-	-	-	-	
	MW						
	SD						
41-50	N	-	-	-	-	-	
	MW						
	SD						
> 50	N	-	-	-	-	-	
	MW						
	SD						
	Σ	N	3	3	3	3	3
		MW	138,9	185,6	187,8	207,4	259,5
		SD	± 13,7	± 25,1	± 21,7	± 27,6	± 41,9
	Σ	N	73	73	73	73	73
		MW	153,6	200,8	214,7	234,1	302,2
		SD	± 29,3	± 50,9	± 40,8	± 51,8	± 46,5

Das Testprotokoll 3 (TP 3: 50-3) mit einem Inkrement von 50 Watt und einer Stufendauer von 3 Minuten absolvierten 132 Probanden. Diese Probanden konnten eine durchschnittliche Leistung (P) an den aeroben Schwellen von $145,1 \pm 47,1$ Watt (P_{LT}) bzw. von $172,2 \pm 58,2$ Watt ($P_{2mmol/l}$) erreichen. Die Leistung an den anaeroben Schwellen liegt insgesamt bei $200,8 \pm 46,6$ Watt (P_{IAS}) bzw. bei $215,8 \pm 52,6$ Watt ($P_{3mmol/l}$). Bei allen 132 Probanden konnten

sowohl die aeroben als auch die anaeroben Schwellen ermittelt werden. Die maximale Leistung (P_{\max}) dieser Teilstichprobe liegt im Durchschnitt bei $319,9 \pm 60,8$ Watt. Zum besseren Verständnis der vorliegenden Stichprobe, werden die ermittelten Leistungskenngrößen in der nachfolgenden Tabelle 74 dargestellt.

Tabelle 74: Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (TP 3: 50-3) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch

	Alter [Jahre]		P_{LT} [Watt]	$P_{2\text{mmol/l}}$ [Watt]	P_{IAS} [Watt]	$P_{3\text{mmol/l}}$ [Watt]	P_{\max} [Watt]
♂	≤ 20	N	11	11	11	11	11
		MW SD	175,8 ± 27,3	200,3 ± 65,6	234,9 ± 37,5	245,8 ± 49,8	348,0 ± 59,2
	21-30	N	41	41	41	41	41
		MW SD	156,9 ± 33,3	194,1 ± 48,2	214,6 ± 38,1	236,0 ± 41,7	351,0 ± 38,0
	31-40	N	25	25	25	25	25
		MW SD	151,8 ± 30,8	182,6 ± 52,6	213,2 ± 38,7	229,0 ± 43,6	340,9 ± 51,7
	41-50	N	28	28	28	28	28
MW SD		145,2 ± 28,9	160,8 ± 60,1	201,7 ± 37,4	211,2 ± 48,2	315,9 ± 43,7	
> 50	N	11	11	11	11	11	
	MW SD	138,2 ± 28,4	150,7 ± 61,2	192,7 ± 35,1	202,1 ± 45,4	285,3 ± 39,3	
Σ	N	116	116	116	116	116	
	MW SD	153,0 ± 31,7	180,1 ± 56,7	211,0 ± 38,6	226,2 ± 46,1	333,8 ± 48,9	
♀	≤ 20	N	1	1	1	1	1
		MW SD	98,2	124,1	132,1	142,6	233,3
	21-30	N	5	5	5	5	5
		MW SD	104,8 ± 17,2	130,6 ± 33,6	146,6 ± 23,8	159,1 ± 31,5	239,5 ± 39,2
	31-40	N	4	4	4	4	4
		MW SD	84,6 ± 16,9	107,5 ± 35,6	120,8 ± 24,3	132,4 ± 29,9	208,3 ± 28,1
	41-50	N	5	5	5	5	5
MW SD		77,0 ± 17,2	109,0 ± 28,9	114,4 ± 26,9	132,3 ± 33,2	207,9 ± 53,8	
> 50	N	1	1	1	1	1	
	MW SD	65,3	86,0	100,9	116,3	200,0	
Σ	N	16	16	16	16	16	
	MW SD	88,2 ± 19,9	114,9 ± 30,8	126,3 ± 26,5	140,3 ± 30,5	219,0 ± 39,8	
Σ	N	132	132	132	132	132	
	MW SD	145,1 ± 37,1	172,2 ± 58,2	200,8 ± 46,6	215,8 ± 52,6	319,9 ± 60,8	

Folgender Tabelle 75 sind die Ergebnisse von Testprotokoll 1 (25-2) als Übersicht der einzelnen beschriebenen Ausbelastungsparameter zu entnehmen.

Tabelle 75: Übersicht der maximal erreichten Werte bei Testabbruch auf dem Fahrradergometer (Testprotokoll 1)

	Alter [Jahre]		Hf _{max} [S/min]	La _{Abbruch} [mmol/l]	Rel. VO _{2peak} [ml/min/kg]	RQ _{Abbruch}	ÄÄ _{Abbruch}
O ₂	≤ 20	N	7	7	6	6	6
		MW	190,6	10,0	54,0	1,17	34,9
		SD	± 6,7	± 1,7	± 9,4	± 0,10	± 5,2
	21-30	N	98	98	93	93	93
		MW	188,3	10,4	51,1	1,14	33,2
		SD	± 10,1	± 2,1	± 9,2	± 0,09	± 5,0
	31-40	N	20	20	11	11	11
MW		186,9	9,7	46,3	1,13	32,5	
SD		± 10,9	± 2,6	± 5,8	± 0,08	± 4,4	
41-50	N	16	16	11	11	11	
	MW	172,0	8,2	43,6	1,13	31,0	
	SD	± 15,0	± 2,6	± 11,3	± 0,11	± 4,0	
> 50	N	69	69	54	54	54	
	MW	158,7	6,7	34,7	1,13	35,5	
	SD	± 17,9	± 2,5	± 8,9	± 0,09	± 5,3	
Σ	N	210	210	175	175	175	
	MW	177,3	9,0	45,4	1,14	33,8	
	SD	± 19,2	± 2,8	± 11,7	± 0,09	± 5,1	
H ₂ O	≤ 20	N	4	4	2	2	2
		MW	186,5	9,9	36,0	1,18	34,7
		SD	± 5,8	± 2,1	± 5,7	± 0,08	± 1,6
	21-30	N	29	29	19	19	19
		MW	187,3	9,4	40,0	1,14	31,0
		SD	± 9,2	± 2,5	± 9,2	± 0,12	± 5,1
	31-40	N	4	4	1	1	1
MW		169,5	8,7	44,0	1,26	45,8	
SD		± 8,8	± 1,4				
41-50	N	16	16	7	7	7	
	MW	162,5	6,7	29,7	1,13	35,8	
	SD	± 16,4	± 2,9	± 6,2	± 0,08	± 5,6	
> 50	N	80	80	59	59	59	
	MW	152,8	5,3	26,1	1,16	34,9	
	SD	± 17,0	± 2,0	± 5,0	± 0,12	± 6,3	
Σ	N	133	133	88	88	88	
	MW	163,0	6,6	29,8	1,15	34,2	
	SD	± 20,9	± 2,8	± 8,5	± 0,12	± 6,2	
Σ	N	343	343	263	263	263	
	MW	171,7	8,0	40,2	1,14	33,9	
	SD	± 21,0	± 3,0	± 13,0	± 0,10	± 5,5	

Der anschließenden Tabelle 76 können die Ergebnisse von Testprotokoll 2 (20-3) als Übersicht der einzelnen beschriebenen Ausbelastungsparameter entnommen werden.

Tabelle 76: Übersicht der maximal erreichten Werte bei Testabbruch auf dem Fahrradergometer (Testprotokoll 2)

	Alter [Jahre]		Hf _{max} [S/min]	La _{Abbruch} [mmol/l]	Rel. VO _{2peak} [ml/min/kg]	RQ _{Abbruch}	ÄÄ _{Abbruch}
O ₂	≤ 20	N	11	11	6	6	6
		MW	197,1	9,9	57,2	1,05	32,9
		SD	± 9,2	± 2,7	± 8,0	± 0,04	± 4,3
	21-30	N	39	39	15	15	15
		MW	187,6	9,3	55,5	1,14	34,2
		SD	± 9,4	± 1,8	± 5,5	± 0,08	± 4,6
	31-40	N	10	10	2	2	2
MW		178,3	8,8	46,0	1,07	29,4	
SD		± 10,9	± 2,1	± 7,1	± 0,04	± 3,3	
41-50	N	9	9	4	4	4	
	MW	176,7	9,2	52,3	1,08	38,6	
	SD	± 7,8	± 2,5	± 6,2	± 0,08	± 4,2	
> 50	N	1	1	1	1	1	
	MW	169	6,2	38,0	1,07	33,5	
	SD						
Σ	N	70	70	28	28	28	
	MW	186,1	9,2	54,1	1,10	34,2	
	SD	± 11,3	± 2,1	± 7,2	± 0,08	± 4,7	
+O	≤ 20	N	2	2	1	1	1
		MW	194,5	8,3	66	1,00	30,4
		SD	± 2,1	± 3,3			
	21-30	N	1	1	-	-	-
		MW	192	9,6			
		SD					
	31-40	N	-	-	-	-	-
MW							
SD							
41-50	N	-	-	-	-	-	
	MW						
	SD						
> 50	N			-	-	-	
	MW						
	SD						
Σ	N	3	3	1	1	1	
	MW	193,7	8,7	66	1,00	30,4	
	SD	± 2,1	± 2,4				
Σ	N	73	73	29	29	29	
	MW	186,4	9,2	54,5	1,10	34,1	
	SD	± 11,2	± 2,1	± 7,4	± 0,08	± 4,6	

Die Ergebnisse von Testprotokoll 3 (50-3) als Übersicht der einzelnen beschriebenen Ausbelastungsparameter können der nachstehenden Tabelle 77 entnommen werden.

Tabelle 77: Übersicht der maximal erreichten Werte bei Testabbruch auf dem Fahrradergometer (Testprotokoll 3)

	Alter [Jahre]		Hf _{max} [S/min]	La _{Abbruch} [mmol/l]	Rel. VO _{2peak} [ml/min/kg]	RQ _{Abbruch}	ÄÄ _{Abbruch}
O ₂	≤ 20	N MW SD	11 194,5 ± 7,3	11 10,7 ± 3,2	-	-	-
	21-30	N MW SD	41 187,4 ± 9,2	41 10,9 ± 2,2	5 54,6 ± 5,8	5 1,17 ± 0,04	5 33,0 ± 3,5
	31-40	N MW SD	25 180,5 ± 9,9	25 10,3 ± 2,5	2 54,5 ± 5,0	2 1,08 ± 0,01	2 24,1 4,0
	41-50	N MW SD	28 177,0 ± 7,8	28 10,1 ± 2,5	5 45,8 ± 7,8	5 1,16 ± 0,03	5 32,2 ± 6,1
	> 50	N MW SD	11 168,3 ± 14,1	11 9,1 ± 2,4	2 44,0 ± 11,3	2 1,20 ± 0,10	2 37,3 ± 2,8
	Σ	N MW SD	116 182,3 ± 11,8	116 10,4 ± 2,5	14 49,9 ± 8,0	14 1,16 ± 0,06	14 32,1 ± 5,6
	≤ 20	N MW SD	1 198,0	1 15,8	-	-	-
21-30	N MW SD	5 194,2 ± 7,1	5 10,9 ± 1,1	-	-	-	
31-40	N MW SD	4 189,3 ± 3,0	4 8,8 ± 0,7	-	-	-	
41-50	N MW SD	5 171,4 ± 9,8	5 9,9 ± 3,0	-	-	-	
> 50	N MW SD	1 154	1 7,8	1 52	1 1,14	1 36,2	
Σ	N MW SD	16 183,6 ± 14,4	16 10,2 ± 2,5	1 52	1 1,14	1 36,2	
Σ	N MW SD	132 182,4 ± 12,1	132 10,4 ± 2,5	15 50,1 ± 7,7	15 1,16 ± 0,05	15 32,4 ± 5,5	

Nachbelastungsverhalten

In der Nachbelastung absolvierten 335 Probanden das Testprotokoll 1 (TP 1: 25-2). Diese Probanden erreichen eine durchschnittliche Leistung (P) an den aeroben Schwellen von $103,0 \pm 35,8$ Watt (P_{LT}) bzw. von $129,6 \pm 54,1$ Watt ($P_{2\text{mmol/l}}$). Die Leistung an den anaeroben Schwellen liegt insgesamt bei $146,3 \pm 49,7$ Watt (P_{IAS}) bzw. bei $159,3 \pm 57,6$ Watt ($P_{3\text{mmol/l}}$). Bei Testabbruch wurde bei einem Probanden ein Laktatwert < 2 mmol/l und bei 7 Probanden < 3 mmol/l ermittelt, deswegen konnten bei der Leistung an den fixen Schwellen (2 bzw. 3mmol/l) nur 334 respektive 328 Probanden erfasst werden. Das Gleiche gilt auch bei der Leistung der individuellen anaeroben Schwelle. 2 Probanden konnten keinen Laktatwert erreichen, der in der Addition von LT plus 1,0 mmol/l liegt. Die maximale Leistung (P_{max}) dieser Teilstichprobe liegt im Durchschnitt bei $221,8 \pm 80,8$ Watt. Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden die ermittelten Leistungskenngrößen der vorliegenden Stichprobe in der nachfolgenden Tabelle 78 dargestellt. Dabei wird geschlechtsspezifisch und in Altersgruppen unterschieden sowie die Summe am Ende der Tabelle aufgeführt.

Tabelle 78: Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (TP 1: 25-2) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch der Probanden mit Nachbelastungsverlauf

	Alter [Jahre]		P_{LT} [Watt]	$P_{2\text{mmol/l}}$ [Watt]	P_{IAS} [Watt]	$P_{3\text{mmol/l}}$ [Watt]	P_{max} [Watt]
♂	≤ 20	N	7	7	7	7	7
		MW SD	154,0 ± 31,2	201,1 ± 45,1	217,7 ± 41,8	241,0 ± 40,2	337,6 ± 40,7
	21-30	N	96	96	96	96	96
		MW SD	125,5 ± 28,2	154,7 ± 43,5	176,6 ± 37,1	192,1 ± 44,6	291,1 ± 47,8
	31-40	N	19	19	19	19	19
		MW SD	144,0 ± 42,0	197,7 ± 59,7	205,5 ± 56,8	228,3 ± 61,5	310,6 ± 65,1
	41-50	N	16	16	16	15	16
MW SD		123,6 ± 30,0	177,0 ± 48,6	183,7 ± 42,6	203,4 ± 48,7	271,8 ± 57,2	
> 50	N	67	67	67	66	67	
	MW SD	101,7 ± 27,7	130,0 ± 44,5	144,3 ± 38,2	157,7 ± 44,9	206,3 ± 51,4	
Σ	N	205	205	205	203	205	
	MW	120,3	153,9	170,7	186,8	265,3	
	SD	± 33,0	± 50,6	± 45,0	± 52,0	± 66,4	

♀	≤ 20	N	4	4	4	4	4
		MW	79,1	97,7	114,0	124,2	200,0
		SD	± 24,6	± 34,2	± 34,9	± 37,6	± 54,0
	21-30	N	27	27	27	27	27
		MW	93,5	115,6	132,8	142,4	207,3
		SD	± 22,3	± 40,8	± 31,3	± 39,9	± 39,7
	31-40	N	4	4	4	4	4
	MW	89,5	118,9	127,9	143,3	212,6	
	SD	± 12,8	± 10,7	± 17,6	± 14,8	± 20,2	
41-50	N	16	16	16	16	16	
	MW	75,4	87,1	106,2	110,5	151,8	
	SD	± 15,7	± 32,0	± 21,0	± 28,9	± 36,5	
> 50	N	79	78	77	74	79	
	MW	69,0	81,4	97,3	103,4	129,5	
	SD	± 14,7	± 25,7	± 18,4	± 23,4	± 28,9	
Σ	N	130	129	128	125	130	
	MW	75,8	90,9	107,4	114,7	153,1	
	SD	± 19,4	± 33,1	± 26,6	± 32,8	± 46,8	
Σ	N	335	334	333	328	335	
	MW	103,0	129,6	146,3	159,3	221,8	
	SD	± 35,8	± 54,1	± 49,7	± 57,6	± 80,8	

Das Testprotokoll 2 (TP 2: 20-3) absolvierten 68 Probanden, die eine durchschnittliche Leistung (P) an den aeroben Schwellen von $155,3 \pm 28,6$ Watt (P_{LT}) bzw. von $205,1 \pm 49,3$ Watt ($P_{2\text{mmol/l}}$) erreichten. Die Leistung an den anaeroben Schwellen liegt insgesamt bei $216,9 \pm 40,8$ Watt (P_{IAS}) bzw. bei $237,0 \pm 52,1$ Watt ($P_{3\text{mmol/l}}$). Bei allen 68 Probanden konnten sowohl die aeroben als auch die anaeroben Schwellen ermittelt werden. Die maximale Leistung (P_{max}) dieser Teilstichprobe liegt im Durchschnitt bei $304,5 \pm 46,8$ Watt. Bei diesem Protokoll konnten die wenigsten Probanden untersucht werden. Aus diesem Grund sind die Zellen der 3. bis 5. Altersgruppe bei den weiblichen Probanden unausgefüllt.

Folgender Tabelle 79 sind die ermittelten Leistungskenngrößen dieser Teilstichprobe zu entnehmen.

Tabelle 79: Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (TP 2: 20-3) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch der Probanden mit Nachbelastungsverlauf

	Alter [Jahre]		P _{LT} [Watt]	P _{2mmol/l} [Watt]	P _{IAS} [Watt]	P _{3mmol/l} [Watt]	P _{max} [Watt]
♂	≤ 20	N	10	10	10	10	10
		MW	164,7	230,1	231,9	255,0	327,1
		SD	± 23,5	± 43,3	± 37,2	± 42,0	± 47,4
	21-30	N	36	36	36	36	36
		MW	154,6	205,1	217,3	239,9	303,2
		SD	± 29,5	± 50,6	± 41,9	± 55,8	± 45,6
31-40	N	10	10	10	10	10	
	MW	150,9	195,7	211,1	229,4	301,0	
	SD	± 31,3	± 48,8	± 40,5	± 46,3	± 44,1	
41-50	N	8	8	8	8	8	
	MW	156,9	193,3	214,5	222,1	305,8	
	SD	± 34,0	± 58,5	± 48,7	± 62,4	± 54,7	
> 50	N	1	1	1	1	1	
	MW	166,8	203,5	218,9	233,9	285,0	
	SD						
Σ	N	65	65	65	65	65	
	MW	156,1	206,0	218,2	238,3	306,6	
	SD	± 28,9	± 50,0	± 41,0	± 52,6	± 46,2	
+0	≤ 20	N	2	2	2	2	2
		MW	135,8	183,8	186,9	206,7	261,8
		SD	± 17,9	± 35,2	± 30,6	± 39,0	± 59,0
	21-30	N	1	1	1	1	1
		MW	145,0	189,1	189,7	208,6	255,0
		SD					
31-40	N	-	-	-	-	-	
	MW						
	SD						
41-50	N	-	-	-	-	-	
	MW						
	SD						
> 50	N	-	-	-	-	-	
	MW						
	SD						
Σ	N	3	3	3	3	3	
	MW	138,9	185,6	187,8	207,4	259,5	
	SD	± 13,7	± 25,1	± 21,7	± 27,6	± 41,9	
Σ	N	68	68	68	68	68	
	MW	155,3	205,1	216,9	237,0	304,5	
	SD	± 28,6	± 49,3	± 40,8	± 52,1	± 46,8	

Das Testprotokoll 3 (TP 3: 50-3) absolvierten 110 Probanden. Diese Probanden konnten eine durchschnittliche Leistung (P) an den aeroben Schwellen von $144,7 \pm 37,3$ Watt (P_{LT}) bzw. von $168,0 \pm 59,6$ Watt (P_{2mmol/l}) erreichen. Die Leistung an den anaeroben Schwellen liegt insgesamt bei $200,6 \pm 47,6$ Watt (P_{IAS}) bzw. bei $212,2 \pm 53,4$ Watt (P_{3mmol/l}). Bei allen 110 Probanden

konnten sowohl die aeroben als auch die anaeroben Schwellen ermittelt werden. Die maximale Leistung (P_{\max}) dieser Teilstichprobe liegt im Durchschnitt bei $316,7 \pm 63,3$ Watt. Zum besseren Verständnis der vorliegenden Stichprobe, werden die ermittelten Leistungskenngrößen in der nachfolgenden Tabelle 80 dargestellt.

Tabelle 80: Durchschnittliche Leistung in Watt auf dem Fahrradergometer (TP 3: 50-3) an den aeroben (LT und 2mmol/l) und anaeroben (IAS und 3mmol/l) Schwellen sowie die maximale Leistung bei Testabbruch der Probanden mit Nachbelastungsverlauf

	Alter [Jahre]		P_{LT} [Watt]	$P_{2\text{mmol/l}}$ [Watt]	P_{IAS} [Watt]	$P_{3\text{mmol/l}}$ [Watt]	P_{\max} [Watt]
♂	≤ 20	N MW SD	11 175,8 ± 27,3	11 200,3 ± 65,6	11 234,9 ± 37,5	11 245,8 ± 49,8	11 348,0 ± 59,2
	21-30	N MW SD	25 162,8 ± 27,8	25 191,1 ± 48,1	25 224,0 ± 32,3	25 234,9 ± 38,2	25 352,0 ± 36,4
	31-40	N MW SD	23 151,6 ± 30,4	23 185,4 ± 54,0	23 213,7 ± 38,9	23 230,8 ± 44,5	23 342,3 ± 53,3
	41-50	N MW SD	26 145,9 ± 29,4	26 157,5 ± 60,5	26 201,0 ± 37,5	26 208,8 ± 48,0	26 318,3 ± 44,3
	> 50	N MW SD	9 136,5 ± 27,7	9 144,7 ± 65,3	9 190,8 ± 34,1	9 199,0 ± 47,1	9 284,9 ± 43,5
	Σ	N MW SD	94 154,4 ± 30,4	94 177,1 ± 58,7	94 213,2 ± 37,9	94 224,5 ± 46,3	94 333,4 ± 50,1
♀	≤ 20	N MW SD	1 98,2	1 124,1	1 132,1	1 142,6	1 233,3
	21-30	N MW SD	5 104,8 ± 17,2	5 130,6 ± 33,6	5 146,6 ± 23,8	5 159,1 ± 31,5	5 239,5 ± 39,2
	31-40	N MW SD	4 84,6 ± 16,9	4 107,5 ± 35,6	4 120,8 ± 24,3	4 132,4 ± 29,9	4 208,3 ± 28,1
	41-50	N MW SD	5 77,0 ± 17,2	5 109,0 ± 28,9	5 114,4 ± 26,9	5 132,3 ± 33,2	5 207,9 ± 53,8
	> 50	N MW SD	1 65,3	1 86,0	1 100,9	1 116,3	1 200
	Σ	N MW SD	16 88,2 ± 19,9	16 114,9 ± 30,8	16 126,3 ± 26,5	16 140,3 ± 30,5	16 219,0 ± 39,8
Σ	N MW SD	110 144,7 ± 37,3	110 168,0 ± 59,6	110 200,6 ± 47,6	110 212,2 ± 53,4	110 316,7 ± 63,3	

In den folgenden Tabellen werden die jeweiligen Nachbelastungsverläufe der einzelnen Parameter von den Testprotokollen 1-3 zusammengefasst.

Tabelle 81: Übersicht der Nachbelastungswerte auf dem Fahrradergometer (Testprotokoll 1)

Alter [Jahre]	Herzfrequenz [S/min]				Laktatkonzentration [mmol/l]				Absolute Sauerstoffaufnahme [l/min]				Respiratorischer Quotient				
	Hf ₀	Hf ₁	Hf ₃	Hf ₅	La ₀	La ₁	La ₃	La ₅	VO ₂₀	VO ₂₁	VO ₂₃	VO ₂₅	RQ ₀	RQ ₁	RQ ₃	RQ ₅	
≤ 20	N	7	6	3	2	7	3	2	6	4	2	-	6	4	2	-	
	MW	190,6	167,0	146,7	143,5	10,0	11,2	11,9	4,2	2,3	1,6	-	1,17	1,35	1,13	-	
	SD	± 6,7	± 7,3	± 9,1	± 12,0	± 1,7	± 2,0	± 1,8	± 0,5	± 0,4	± 0,6	-	± 0,10	± 0,11	± 0,04	-	
	N	96	93	35	31	96	93	29	92	55	14	2	92	55	14	2	
21-30	MW	188,2	164,4	131,0	121,2	10,4	10,8	10,6	3,8	2,4	1,4	0,9	1,14	1,29	1,27	1,02	
	SD	± 10,2	± 16,0	± 15,0	± 17,7	± 2,1	± 2,0	± 2,3	± 0,7	± 0,6	± 0,4	± 0,3	± 0,09	± 0,16	± 0,17	± 0,02	
	N	19	18	14	15	19	18	14	11	4	1	1	11	4	1	1	
	MW	186,4	160,0	130,4	114,2	9,5	9,9	9,6	4,0	3,0	1,5	1,2	1,13	1,26	0,95	0,82	
31-40	SD	± 10,9	± 14,1	± 13,6	± 17,2	± 2,4	± 2,8	± 3,0	± 0,7	± 1,1	-	-	± 0,08	± 0,21	-	-	
	N	16	16	16	14	16	16	16	11	4	4	3	11	4	4	3	
	MW	172,0	151,1	127,8	107,9	8,2	8,6	8,5	7,9	3,5	2,4	0,9	1,13	1,34	1,11	1,08	
	SD	± 15,0	± 18,3	± 16,8	± 15,1	± 2,6	± 2,6	± 2,9	± 0,7	± 0,4	± 0,2	± 0,5	± 0,11	± 0,16	± 0,07	± 0,11	
> 50	N	67	65	66	62	67	64	61	53	4	4	4	53	4	4	4	
	MW	158,9	138,6	116,0	101,3	6,8	7,2	7,3	7,1	2,7	1,7	0,6	1,14	1,32	1,11	1,11	
	SD	± 17,9	± 18,1	± 15,1	± 12,8	± 2,4	± 2,5	± 2,6	± 0,6	± 0,1	± 0,2	± 0,1	± 0,08	± 0,04	± 0,07	± 0,18	
	N	205	198	134	124	205	198	126	117	71	25	10	173	71	25	10	
Σ	MW	177,3	154,5	123,5	109,2	9,0	9,4	8,6	8,4	3,5	2,4	0,8	1,14	1,30	1,19	1,05	
	SD	± 19,1	± 20,2	± 16,8	± 17,5	± 2,8	± 2,8	± 3,0	± 0,8	± 0,6	± 0,3	± 0,3	± 0,09	± 0,15	± 0,16	± 0,15	
	N	4	4	2	3	4	4	2	3	2	1	-	2	1	-	-	
	MW	186,5	156,5	135,5	118,7	9,9	9,9	10,3	10,0	1,8	1,3	-	1,18	1,43	-	-	
≤ 20	SD	± 5,8	± 11,4	± 16,3	± 3,5	± 2,1	± 2,1	± 1,3	± 0,4	-	-	-	± 0,08	-	-	-	
	N	27	26	9	10	27	25	9	19	13	2	1	19	13	2	1	
	MW	187,6	166,9	137,3	122,9	9,3	9,6	9,2	9,0	2,7	1,8	0,6	1,14	1,20	1,32	1,15	
	SD	± 9,3	± 12,6	± 16,2	± 15,6	± 2,5	± 2,6	± 2,8	± 1,6	± 0,5	± 0,4	± 0,1	± 0,12	± 0,17	± 0,38	-	
31-40	N	4	4	4	4	4	4	4	1	-	-	-	1	-	-	-	
	MW	169,5	147,5	119,3	102,5	8,7	9,7	9,2	8,2	2,4	-	-	1,26	-	-	-	
	SD	± 8,8	± 9,3	± 9,5	± 3,0	± 1,4	± 1,4	± 2,1	± 2,1	-	-	-	± 0,08	-	-	-	
	N	16	16	16	14	16	16	13	7	7	-	-	7	-	-	-	
41-50	MW	162,5	135,9	119,5	106,2	6,7	6,9	6,9	7,2	1,9	-	-	1,13	-	-	-	
	SD	± 16,4	± 20,1	± 16,1	± 16,5	± 2,9	± 3,2	± 3,2	± 3,2	± 0,1	-	-	± 0,08	-	-	-	
	N	79	78	79	66	79	77	73	55	59	1	1	59	1	1	1	
	MW	153,1	132,7	113,2	97,6	5,4	5,7	5,4	5,3	1,7	1,7	0,3	1,16	1,22	1,16	1,16	
> 50	SD	± 16,9	± 17,7	± 13,7	± 12,8	± 2,0	± 2,1	± 2,1	± 2,3	± 0,3	-	-	± 0,12	-	-	-	
	N	130	128	110	97	130	126	104	84	88	3	2	88	15	3	2	
	MW	163,0	141,2	116,7	102,3	6,6	6,9	6,2	6,2	2,0	1,7	0,4	1,15	1,22	1,27	1,16	
	SD	± 20,7	± 21,6	± 15,7	± 15,5	± 2,8	± 2,9	± 2,7	± 2,8	± 0,5	± 0,4	± 0,2	± 0,12	± 0,17	± 0,29	± 0,01	
Σ	N	335	326	244	221	335	324	230	201	261	86	12	261	86	28	12	
	MW	171,7	149,3	120,5	106,2	8,0	8,4	7,5	7,5	3,0	2,3	0,8	1,14	1,29	1,20	1,07	
	SD	± 20,9	± 21,7	± 16,6	± 17,0	± 3,0	± 3,1	± 3,1	± 3,1	± 1,0	± 0,6	± 0,3	± 0,10	± 0,16	± 0,17	± 0,14	

♂

♀

Tabelle 82: Übersicht der Nachbelastungswerte auf dem Fahrradergometer (Testprotokoll 2)

Alter [Jahre]	Herzfrequenz [S/min]				Laktatkonzentration [mmol/l]				Absolute Sauerstoffaufnahme [l/min]				Respiratorischer Quotient				
	Hf ₀	Hf ₁	Hf ₃	Hf ₅	La ₀	La ₁	La ₃	La ₅	VO _{2/10}	VO _{2/1}	VO _{2/3}	VO _{2/5}	RQ ₀	RQ ₁	RQ ₃	RQ ₅	
♂	N	10	9	9	10	8	9	9	6	6	6	6	6	6	6	6	
	MW	196,5	169,7	141,0	122,6	9,7	9,6	9,0	8,0	4,2	2,3	1,3	0,6	1,05	1,23	1,01	0,96
	SD	± 9,5	± 21,0	± 14,8	± 9,4	± 2,8	± 3,5	± 3,4	± 3,0	± 0,9	± 1,4	± 0,6	± 0,3	± 0,04	± 0,14	± 0,06	± 0,10
	N	36	33	33	31	33	33	32	32	15	15	14	14	15	15	14	14
21-30	MW	187,9	157,5	134,5	118,5	9,3	9,5	8,9	8,0	4,1	2,1	1,6	0,7	1,14	1,42	1,05	1,04
SD	± 9,6	± 13,8	± 14,6	± 14,7	± 1,8	± 2,1	± 2,2	± 1,9	± 0,5	± 0,5	± 0,3	± 0,2	± 0,08	± 0,28	± 0,12	± 0,12	
31-40	N	10	10	10	7	10	10	7	2	2	2	2	2	2	2	2	2
MW	178,3	148,1	131,9	112,7	8,8	9,3	8,9	7,9	3,6	2,5	1,9	0,7	1,07	1,17	0,95	0,88	
SD	± 10,9	± 14,1	± 17,4	± 16,2	± 2,1	± 2,4	± 2,4	± 2,9	± 0,3	± 0,6	± 0,0	± 0,0	± 0,04	± 0,16	± 0,04	± 0,01	
41-50	N	8	7	7	8	7	7	5	4	4	4	3	4	4	4	4	3
MW	177,3	152,6	130,9	113,9	9,5	10,5	9,8	8,4	4,1	2,9	1,9	0,8	1,08	1,20	1,07	1,03	
SD	± 8,2	± 16,5	± 13,8	± 5,1	± 2,5	± 2,0	± 1,6	± 1,9	± 0,3	± 0,5	± 0,5	± 0,2	± 0,08	± 0,11	± 0,10	± 0,08	
> 50	N	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MW	169,0	140,0	105,0	101,0	6,2	6,5	6,3	5,9	3,7	1,9	1,2	0,8	1,07	1,29	1,01	1,04	
SD																	
♀	N	65	60	60	55	59	61	54	28	28	27	26	28	28	27	27	26
	MW	186,2	156,9	134,1	117,5	9,3	9,5	9,0	8,0	4,1	2,3	1,6	0,7	1,10	1,33	1,04	1,00
	SD	± 11,4	± 16,3	± 15,3	± 13,4	± 2,1	± 2,4	± 2,3	± 2,2	± 0,6	± 0,8	± 0,5	± 0,2	± 0,08	± 0,24	± 0,10	± 0,11
	N	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
≤ 20	MW	194,5	152,5	135,0	118,0	8,3	8,6	7,6	6,6	4,1	1,6	0,8	1,00	1,43	1,03	0,90	
SD	± 2,1	± 0,7	± 11,3	± 2,8	± 3,3	± 3,4	± 3,3	± 4,0									
21-30	N	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MW	192,0	175,0	153,0	135,0	9,6	9,7	9,0	7,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SD																	
31-40	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41-50	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
> 50	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σ	N	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MW	193,7	160,0	141,0	123,7	8,7	9,0	8,1	6,9	4,1	1,6	1,6	0,8	1,00	1,43	1,03	0,90	
SD	± 2,1	± 13,0	± 13,1	± 10,0	± 2,4	± 2,5	± 2,5	± 2,9									
Σ	N	68	63	63	58	62	64	57	29	29	28	27	29	29	28	27	
MW	186,5	157,1	134,4	117,8	9,2	9,5	8,9	7,9	4,1	2,2	1,6	0,7	1,10	1,33	1,04	1,00	
SD	± 11,3	± 16,1	± 15,2	± 13,2	± 2,1	± 2,3	± 2,3	± 2,2	± 0,6	± 0,8	± 0,4	± 0,2	± 0,08	± 0,24	± 0,10	± 0,11	

VI Curriculum Vitae

Praktika und Berufserfahrung

Seit 04/2007	Wissenschaftlicher Angestellter, stellvertretender Leiter der Abteilung für Leistungsdiagnostik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Institut für Sport und Sportwissenschaft.
Seit 02/2011	Projektleiter, School goes BioMotion ein Projekt des Forschungszentrum für den Schulsport und den Sport von Kindern und Jugendlichen (FoSS) gefördert vom Regierungspräsidium Karlsruhe.
08/2010 - 09/2012	Projektleiter, soziale Integration von Kindern und Jugendlichen (Honduras und Costa Rica).
10/2007 - 11/2009	Schulungsleiter und Leiter der Qualitätssicherung des bundesweiten Projektes „Besser Essen, mehr Bewegen“ gefördert vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz am Max-Rubner-Institut.
06/2008	Ehrenamtliche Tätigkeit des wettbewerbsfreien Angebots bei den Special Olympics (Nationale Sommerspiele für Sportlerinnen und Sportler mit geistiger Behinderung).
09/2003 - 03/2007	Wissenschaftliche Hilfskraft der Abteilung für Leistungsdiagnostik.
07/2003 - 03/2003	Evaluation des Walkingtest im Rehabereich und Überprüfung kohlenhydratreduzierter Kostform auf den Fettstoffwechsel in der Rehaklinik Überruh.
10/2004 - 12/2006	Organisation und Durchführung spiroergometrischer Untersuchungen auf dem Hintertuxer Gletscher in Österreich im Rahmen meiner Masterarbeit.
06/2003 - 06/2006	Wissenschaftliche Hilfskraft des RKI-Projektes Motorik-Modul (MoMo) zur Untersuchung der motorischen Leistungsfähigkeit von Kindern und Jugendlichen in Deutschland.
06/2005	Praktikum und wissenschaftliche Mitarbeit an der San Diego State University, Kalifornien (USA) in den Projekten TAAG und Aventuras para Ninos.

- 01/2005 - 05/2005 Wissenschaftliche Mitarbeit an der University of Hawaii at Manoa (USA) mit der Anfertigung einer wissenschaftlichen Arbeit zu dem Thema: „Does distance and density of parks around people’s workplace influence their physical activity?“ sowie eines Berichts zu dem Thema: „Can the activity behaviors of children be improved?“ im Rahmen eines Forschungsaufenthaltes.
- 09/2002 - 01/2005 Wissenschaftliche Hilfskraft für das Karlsruher Motorik-Screening.
- 04/2004 - 06/2004 Organisation und Durchführung der Feldarbeit einer Ländervergleichenden Studie zur Untersuchung der motorischen Leistungsfähigkeit von Kindern und Jugendlichen in Luxemburg.
- 10/2003 Praktikum am UKK-Institut in Tampere/Finnland.
- 10/2002 - 05/2003 Praktikum beim Badischen Fußball Verband.

Aufgabenbereiche in Lehre und Forschung

- Seit 04/2007 Ausbildung, Forschungsarbeiten und Dienstleistung in der Abteilung für Leistungsdiagnostik
- Exkursionsleiter „Jugend- und Freizeitpädagogik“
- Integrative Sportspiele und Spiel Fit
- Wahlfach, Hochschulsportkurs und Forschungsarbeiten der Trendsportart „Slackline“

Studium

- 10/2004 - 11/2006 Studium mit der Fachrichtung Sportwissenschaft an der Forschungsuniversität Karlsruhe (TH)
- Thema der Masterarbeit: „Analyse der Belastungsintensitäten und der Wärmeproduktion beim Alpin- und Tourenskilauf“.
- Abschluss: Master of Arts
Note: sehr gut
- 10/2000 - 06/2004 Studium mit der Fachrichtung Sportwissenschaft, Fitness- und Gesundheitsmanagement an der Forschungsuniversität Karlsruhe (TH)
- Thema der Bachelorarbeit: „Konzeption einer Datenbank zu motorischen Entwicklungsdaten“.
- Abschluss: Bachelor of Arts
Note: sehr gut

Zivildienst

07/1999 - 07/2000 Zivildienst im Altenpflegeheim „Mathilde-Vogt-Haus“ in Heidelberg

Schulbildung

25.06.1999 Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

1989 - 1999 Internationale Gesamtschule Heidelberg (IGH); Neusprachliches Gymnasium

1985 - 1989 Fröbel Grundschule in Heidelberg

Publikationen

Engel, F. & **Neumann, R.** (2011). Der Tanz auf dem Band: Slacklining mit Kindern und Jugendlichen. *Sportpraxis*, 5+6/2011, S. 6-13

Vater, H.-H., Nowacki, P.-E., Röder, Y., Vater, K.-U., Härtel, S., **Neumann, R.**, Buhl, B. & Bös, K. (2005). Kardiorespiratorische und metabolische Parameter beim Alpinen Skilauf und beim Tourenskilauf in einer kombinierten Labor- und Feldstudie. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 56 (7/8), 248.

Vater, H.-H., Röder, Y., Vater, K.-U., Härtel, S., **Neumann, R.**, Buhl, B. & Bös, K. (2004). Pilotstudie zur kardiozirkulatorischen, kardiorespiratorischen und metabolischen Beanspruchung beim Alpinen Skilauf im Labor- und Feldversuch. In: *Skilauf und Snowboard in Lehre und Forschung. Schriftenreihe der ASH (15)*, 77-85. Hamburg: Czwalina.

Röder, Y., Vater, H.-H., Härtel, S., **Neumann, R.**, Buhl, B. & Bös, K. (2004). Kardiozirkulatorische, kardiorespiratorische und metabolische Leistungsfähigkeit in der Sportart Telemark auf Nationalmannschaftsniveau. In: *Skilauf und Snowboard in Lehre und Forschung. Schriftenreihe der ASH (15)*, 87-97. Hamburg: Czwalina.

Vater, H.-H., Röder, Y., Vater, K.-U., Härtel, S., **Neumann, R.**, Buhl, B. & Bös, K. (2004). Kombinierte Labor- und Feldstudie zur Beanspruchung im Skitourenlauf. In: *Skilauf und Snowboard in Lehre und Forschung. Schriftenreihe der ASH (15)*, 99-106. Hamburg: Czwalina.

Sonstige Kenntnisse und Fähigkeiten

Sprachen	Englisch, verhandlungssicher Spanisch, gute Kenntnisse Französisch, Grundkenntnisse
Lizenzen/Scheine	DFB – Fußballtrainer C-Lizenz DOSB – Wettkampfsport Übungsleiter C-Lizenz PADI-Lizenzen: Open Water Diver und Advanced Open Water Diver
EDV-Kenntnisse	Microsoft Windows und Microsoft Office SPSS 19.0 (Statistical Package for the Social Science)

VII Erklärung

Hiermit versichere ich, dass die Arbeit

Analyse physiologischer Gesetzmäßigkeiten zu den Themenbereichen „Ausbelastungskriterien“ und „Nachbelastungsverhalten“ anhand der Ergebnisse ausdauerleistungsdiagnostischer Untersuchungen am Institut für Sport und Sportwissenschaft des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Zeitraum von 2007-2010

von mir selbst und ohne jede unerlaubte Hilfe angefertigt wurde, dass sie noch keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegen hat und dass sie weder ganz noch im Auszug veröffentlicht worden ist.

Die Stellen der Arbeit einschließlich Tabellen, Karten, Abbildungen usw., die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall als Entlehnung kenntlich gemacht und die Herkunft nachgewiesen.

Ort, Datum

Unterschrift

(Rainer Neumann)

