Universität Hamburg

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Medizin

vorgelegt von

Ole Guderjahn (geboren am 21.11.1977 in Hamburg)

Hamburg, 2008

Thema:

Validierung der monoexponentiellen Nachatmungsmethode nach unterschiedlichen Belastungsintensitäten bei Sportlern unterschiedlicher Ausdauerleistungsfähigkeit in Annäherung an den breath-by-breath-Modus

Aus der

Abteilung Sport- und Bewegungsmedizin
am Fachbereich Bewegungswissenschaft der
Universität Hamburg
Ärztlicher Leiter: Prof. Dr. med. K.-M. Braumann

Gefördert vom BiSP (Bundesinstitut für Sportwissenschaft) unter VF 07065/04

Angenommen von der Medizinischen Fakultät
der Universität Hamburg am: 27.03.2009

Veröffentlicht mit Genehmigung der Medizinischen
Fakultät der Universität Hamburg

Prüfungsausschuss, der Vorsitzende: Prof. Dr. med. K.-M. Braumann
Prüfungsausschuss: 2. Gutachter: PD Dr. med. A. Meyer
Prüfungsausschuss: 3. Gutachter: Prof. Dr. F. Sommer

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 7

1.1. Erläuterung der Thematik 7

1.1.1. Spiroergometrie 7

1.2. Bedeutung der vorliegenden Arbeit 11

1.3. Ziel der Arbeit 12

2. Material und Methoden 13

2.1. Geräte und Chemikalien 13

2.1.1. Spirometrie 13

2.1.2. Laktatmessung 14

2.1.3. Bestimmung der Leistungsfähigkeit und der Belastungsintensität mit dem Laufbandergometer 15

2.1.4. Pulsmessung 15

2.1.5. Bestimmung des Probandengewichts und des Körperfettanteils 16

2.1.6. Bestimmung physiologischer Parameter an der IAS 16

2.2. Probanden 16

2.3. Versuchsablauf 18

2.3.1. Procedere unmittelbar vor der Belastung 19

2.3.2. Testvorbereitungen 19

2.3.3. Procedere bei Test A (Online-Methode) 21

2.3.4. Procedere bei Test B (Nachatmungsmethode) 23

2.4. Statistische Auswertung 24

2.5. Kritik der Methoden 25

2.5.1. Einteilung der Probanden 25

2.5.2. Rekrutierungsproblem für Gruppe C 25

2.5.3. Terminvergabe 25

2.5.4. Abbruchkriterium 26

2.5.5. Vorzeitiger Testabbruch 26

2.5.6. Laktatabnahme 26

2.5.7. Messbeginn in Test B (Nachatmungsmethode) 26

2.5.8. Intervallbildung in der Nachbelastung 27

2.5.9. Stufendauer 27

2.5.10. Pausenlänge 28

2.5.11. Spirometer 28

2.5.12. Bestimmung physiologischer Parameter an der IAS 28

3. Ergebnisse 29

3.1. Probandendaten, Raumbedingungen, physiologische Parameter 29

3.1.1. Gruppe A (<50ml O_2/min/kg) 29

3.1.2. Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg) 31

3.1.3. Gruppe C (>60ml O_2/min/kg) 33

3.2. Ausbelastungskriterien bei Bestimmung der VO_2max 35

3.2.1. Gruppe A (<50ml O_2/min/kg) 35

3.2.2. Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg) 35

3.2.3. Gruppe C (>60ml O_2/min/kg) 35

3.3. Vergleich VO_2peak: Online-Messung (3-sek-Intervalle) vs. Retroextrapolation (20-sek-Intervalle) 36

3.3.1. Gruppe A (<50ml O_2/min/kg) 36

3.3.2. Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg) 37

3.3.3. Gruppe C (>60ml O_2/min/kg) 38

3.4. Vergleich VO_2peak: Online-Messung (3-sek-Intervalle) vs. Retroextrapolation (3-sek-Intervalle) 39
3.4.1. Gruppe A (<50ml O_2/min/kg) 39
3.4.2. Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg) 44
3.4.3. Gruppe C (>60ml O_2/min/kg) 50
3.4.4. Prozentuale Abweichungen der erhobenen VO_2peak-Werte der Nachatmungs-untersuchungen in Bezug auf die VO_2peak-Werte der vergleichbaren Online-messungen 58
3.4.4.1. nach Ausbelastung 58
3.4.4.2. nach 1.Intervall vor Ausbelastung 59
3.4.4.3. nach 2. Intervall vor Ausbelastung 60
3.4.4.4. nach 3. Intervall vor Ausbelastung 61

3.5. Multiple Mittelwertvergleiche der O_2-Kinetik nach Ausbelastung zwischen den Gruppen A, B, C (prozentuale Darstellung der VO_2) 62

3.6. Multiple Mittelwertvergleiche der O_2-Kinetik zwischen Ausbelastung und submaximalen Belastungsstufen (prozentuale Darstellung der VO_2) 65
3.6.1. Gruppe A-C zusammengefasst (n=67) 65
3.6.2. Gruppe A (<50ml O_2/min/kg) (n=21) 67
3.6.3. Gruppe B (50-60ml O2/min/kg) (n=34) 69
3.6.4. Gruppe C (>60ml O_2/min/kg) (n=12) 71

4. Diskussion 74

4.1. Vergleichbare Versuchsbedingungen während der Online- und Nachatmungstests 74

4.2. Ausbelastungskriterien bei Bestimmung der VO_2max 75

4.3. Vergleich VO_2peak: Online-Messung (3-sek-Intervalle) vs. Retroextrapolation (20-sek-Intervalle) 76

4.4. Vergleich VO_2peak: Online-Messung (3-sek-Intervalle) vs. Retroextrapolation (3-sek-Intervalle) 77
4.4.1. Zusammenhang zwischen O_2-Kinetik und PCr-Resynthese in der Nachbelastungsphase 79
4.4.2. Überdeckung der initialen O_2-Kinetik durch gemittelte 20-Sekunden-Intervalle 80

4.5. Multiple Mittelwertvergleiche der O_2-Kinetik nach Ausbelastung zwischen den Gruppen A, B, C (prozentuale Darstellung der VO_2) 82
4.5.1. nach Ausbelastung 82
4.5.2. nach submaximalen Belastungsstufen 83

4.6. Multiple Mittelwertvergleiche der O_2-Kinetik zwischen Ausbelastung und submaximalen Belastungsstufen (prozentuale Darstellung der VO_2) 84

5. Zusammenfassung 85

6. Ausblick 86

7. Literaturverzeichnis 87

8. Anhang 97

8.1. Borg-RPE-Skala 97

8.2. Kalipermetrie 98
8.2.1. Messpunkte 98
8.2.2. Umrechnungstabelle 99

8.3. Anamnesebogen 100

8.4. Handout zur Nachatmungsstudie 102

8.5. Datenschutzerklärung / Einverständniserklärung 103

8.6. Checkliste 104

8.7. Danksagung 105

8.8. Lebenslauf 106

8.9. Erklärung 107

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Beispiel einer breath-by-breath-Messung von VO_2-Werten im diskontinuerlichen Mehrstufentest..... 7
Abb. 2: Beispiel einer retrograden monoexponentiellen Extrapolation (20-Sekunden-Intervalle) der VO_2max bei Belastungsabbruch..... 9
Abb. 3: Beispiel der VO_2-Kurvenkinetik nach Ausbelastung eines Probanden im breath-by-breath-Modus 11
Abb. 4: K4b^2 13
Abb. 5: Ruhespirometrie in fünfminütiger Rückenlage zur Bestimmung des Ruhe-RQ's. 17
Abb. 6: Laktatmessung nach Beendigung der Eingehphase während einer Online-Messung..... 21
Abb. 7: Beispielhafte graphische Darstellung des während der Versuchsreihen verwendeten Laufbandbelastungesprofils mit Vmax 20 km/h..... 21
Abb. 8: VO_2peak Online-Messung und retroextrapoliert nach Léger,Gruppe A 35
Abb. 9: VO_2 peak Online-Messung und retroextrapoliert nach Léger, Gruppe B..... 36
Abb. 10: VO_2 peak Online-Messung und retroextrapoliert nach Léger, Gruppe C..... 37
Abb. 11: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle nach Ausbelastung, Gruppe A 38
Abb. 12: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle nach 1.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe A..... 39
Abb. 13: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle nach 2.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe A 39
Abb. 14: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle nach Ausbelastung Gruppe B 43
Abb. 15: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle nach 1. Intervall vor Ausbelastung, Gruppe B..... 43
Abb. 16: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle nach 2.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe B..... 44
Abb. 17: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle nach 3.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe B..... 44
Abb. 18: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle nach Ausbelastung Gruppe C 49
Abb. 19: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle nach 1.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C 49
Abb. 20: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle nach 2.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C..... 50
Abb. 21: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle nach 3.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C..... 50
Abb. 22: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle nach 4.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C..... 51
Abb. 23: Abweichungen der erhobenen VO_2peak-Werte der Nachatmungs-Untersuchungen in Bezug auf die VO_2peak-Werte der vergleichbaren Online-Messung nach Ausbelastung. 57
Abb. 24: Abweichungen der erhobenen VO_2peak-Werte der Nachatmungs-Untersuchungen in Bezug auf die VO_2peak-Werte der vergleichbaren Online-Messung nach dem 1. Intervall vor Ausbelastung. 58
Abb. 25: Abweichungen der erhobenen VO_2peak-Werte der Nachatmungs-Untersuchungen in Bezug auf die VO_2peak-Werte der vergleichbaren Online-Messung nach dem 2. Intervall vor Ausbelastung..... 59
Abb. 26: Abweichungen der erhobenen VO_2peak-Werte der Nachatmungs-Untersuchungen in Bezug auf die VO_2peak-Werte der vergleichbaren Online-Messung nach dem 3. Intervall vor Ausbelastung. 60
Abb. 27: Multipler Mittelwertvergleich zwischen den 3 Versuchsgruppen A,B,C; O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung der VO_2) nach maximaler, subjektiver Ausbelastung..... 61
Abb. 28: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung und submaximalen Belastungsstufen; Gruppe A-C zusammengefaßt..... 64
Abb. 29: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung und submaximalen Belastungsstufen; Gruppe A..... 65
Abb. 30: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung und submaximalen Belastungsstufen;Gruppe B..... 68
Abb. 31: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung und submaximalen Belastungsstufen; Gruppe C..... 70

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Flussschema Vorbereitung Test A und B 19
Tab. 2: Flussschema Testdurchführung Test A und B 20
Tab. 3: Anthropometrische Daten, leistungsphysilogische Parameter in Ruhe, Umgebungsbedingungen, Gruppe A 28
Tab. 4: Leistungsphysiologische Parameter unter Belastungsbedingungen, Gruppe A 29
Tab. 5: Anthropometrische Daten, leistungsphysilogische Parameter in Ruhe, Umgebungsbedingungen, Gruppe B 30
Tab. 6: Leistungsphysiologische Parameter unter Belastungsbedingungen, Gruppe B 31
Tab. 7: Anthropometrische Daten, leistungsphysilogische Parameter in Ruhe, Umgebungsbedingungen, Gruppe C 32
Tab. 8: Leistungsphysiologische Parameter unter Belastungsbedingungen, Gruppe C 33
Tab. 9: Referenzwerte der Ausbelastung, Gruppe A 34
Tab. 10: Referenzwerte der Ausbelastung, Gruppe B 34
Tab. 11: Referenzwerte der Ausbelastung, Gruppe C 34
Tab. 12: VO_2 peak Online-Messung und retroextrapoliert nach Léger, Gruppe A 35
Tab. 13: VO_2 peak Online-Messung und retroextrapoliert nach Léger, Gruppe B 36
Tab. 14: VO_2 peak Online-Messung und retroextrapoliert nach Léger, Gruppe C 37
Tab. 15: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle; Ausbelastung Gruppe A 40
Tab. 16: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle; 1.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe A 41
Tab. 17: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle; 2.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe A 42
Tab. 18: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle; Ausbelastung Gruppe B 45
Tab. 19: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle; 1.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe B 46
Tab. 20: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle; 2.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe B 47
Tab. 21: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle; 3.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe B 48
Tab. 22: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle; Ausbelastung Gruppe C 52
Tab. 23: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle; 1.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C 53
Tab. 24: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle; 2.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C 54
Tab. 25: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle; 3.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C 55
Tab. 26: Vergleich VO_2peak 3-Sek-Intervalle; 4.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C 56
Tab. 27: Prozentuale Abweichung von gemessener VO_2peak (nach Ausbelastung) in Bezug auf die durch die Nachatmungsmethode bestimmte VO_2peak 57
Tab. 28: Prozentuale Abweichung von gemessener VO_2peak (nach Ausbelastung) in Bezug auf die durch die Nachatmungsmethode bestimmte VO_2peak (1.Intervall vor Ausbelastung) 58
Tab. 29: Prozentuale Abweichung von gemessener VO_2peak (nach Ausbelastung) in Bezug auf die durch die Nachatmungsmethode bestimmte VO_2peak (2.Intervall vor Ausbelastung) 59
Tab. 30: Prozentuale Abweichung von gemessener VO_2peak (nach Ausbelastung) in Bezug auf die durch die Nachatmungsmethode bestimmte VO_2peak (3.Intervall vor Ausbelastung) 60
Tab. 31: Multipler Mittelwertvergleich aller 3 Gruppen A,B,C; O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach maximaler, subjektiver Ausbelastung 62
Tab. 32: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung (0), 1.Intervall vor Ausbelastung (1), 2.Intervall vor Ausbelastung (2); Gruppe A-C 65
Tab. 33: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung (0), 1.Intervall vor Ausbelastung (1), 2.Intervall vor Ausbelastung (2); Gruppe A 67
Tab. 34: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung (0), 1.Intervall vor Ausbelastung (1), 2.Intervall vor Ausbelastung (2), 3.Intervall vor Ausbelastung; Gruppe B 69
Tab. 35: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung (0), 1.Intervall vor Ausbelastung (1), 2.Intervall vor Ausbelastung (2), 3.Intervall vor Ausbelastung (3), 4.Intervall vor Ausbelastung (4); Gruppe C 71

1. Einleitung

1.1. Erläuterung der Thematik

In der heutigen sportmedizinischen Leistungsdiagnostik wird neben dem Laktat als Leistungsparameter auch die Spiroergometrie genutzt, um Aussagen über die Leistung der Athleten zu treffen.

Während das Laktat bevorzugt zur Ermittlung der aerob-anaeroben Schwelle und zur Trainingssteuerung vor allem für den intraindividuellen Verlauf erhoben wird [49], eignet sich die Spirometrie, neben der Erfassung der maximalen Sauerstoffaufnahmekapazität im Längsschnitt, auch für den interindividuellen Vergleich in der Beurteilung der maximalen Leistungsfähigkeit [39, 105] und zur Einschätzung koordinativ-technischer Fähigkeiten auf submaximalen Belastungsstufen [48].

1.1.1. Spiroergometrie

Respiratorische Parameter, vor allem die Sauerstoffaufnahme (VO_2) auf unterschiedlichen Belastungsstufen und die maximale Sauerstoffaufnahmefähigkeit (VO_2max), gelten in der Leistungsphysiologie seit Jahren als wichtige Kriterien zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Athleten [5, 11, 21, 42, 51, 55, 76, 93, 105, 108, 111, 112].

Mit Hilfe der von Knipping und Brauer 1924 entwickelten und im Laufe der Jahrzehnten verfeinerten Spirometrie, konnten erstmals respiratorische Parameter aufgezeichnet und dargestellt werden [51].

Der lineare VO_2-Anstieg bei steigender körperlicher Belastung mit Übergang der VO_2 in eine nahezu horizontale Plateauphase kurz vor Erreichen der Maximalleistung (VO_2max), wurde in Beziehung zum kardiorespiratorischen Zustand der Probanden gesetzt. Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_2max) stellte für A.V. Hill somit einen leistungslimitierenden Faktor für den Athleten dar , der dadurch interindividuell verleichbar wurde [39].

Gestützt durch weitere Forschungen in den folgenden Jahren, wurde die Messung der VO_2max als eine objektive Maßnahme zur Einschätzung der kardiorespiratorische Leistung in die Leistungsdiagnostik aufgenommen [105].

Bis in die 1990er Jahre wurde in der Spirometrie mit der diskontinuierlichen Methode mit dem Douglas-Sack gearbeitet [18, 80, 87]. Dabei wurde die Expirationsluft der Sportler in einem geschlossenen Behälter gesammelt und die gesammelte Expirationsluft z.B. am Ende der Belastung analysiert (O_2 und CO_2). Aussagen zu respiratorischen Geschehnissen im Verlaufe der Belastung waren nur eingeschränkt möglich.

Vereinfacht und verbessert wurde die Spirometrie mit der Einführung der mixing-chamber--Aufzeichnung. Die Konstruktion einer neuen Spirometrieeinheit, bestehend aus einer Atemmaske, die über ein Schlauchsystem mit dem Spirometer verbunden ist, schaffte die Voraussetzung für die kontinuierliche Aufzeichnung und spätere Darstellung der respiratorischen Parameter in Echtzeit in zuvor fest definierten Zeitintervallen[92].

Durch Fortschritte in der Elektrotechnik und der Entwicklung schnellerer Gasanalysatoren wurden neuere Spirometriegeräte entwickelt, bei denen die Inspirations- und Expirationsluft eines jeden Atemzuges analysiert (breath-by-breath Modus) und durch die mit kürzerer zeitlicher Latenz gemessen werden konnte als beim mixing-chamber-Modus [7, 8, 14, 27, 58, 59, 93, 97, 102, 107, 108, 111, 113, 114].

Die O_2-Kinetik kann dadurch wesentlich detaillierter dargestellt werden (s. Abbildung 1).

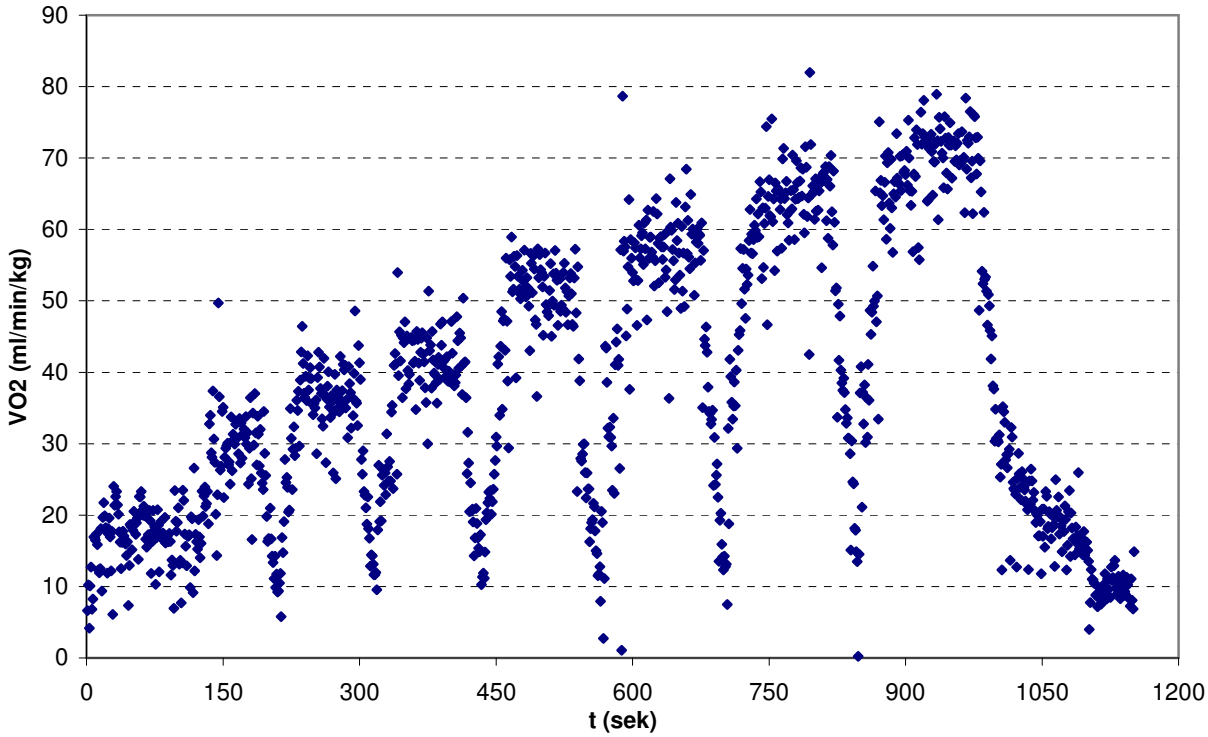


Abb. 1: Beispiel einer breath-by-breath-Messung von VO_2-Werten im diskontinuerlichen Mehrstufentest

Zur Online-Spirometrie stehen Standgeräte zur Aufzeichnung unter Laborbedingungen und portable Geräte zur Messung unter Feldbedingungen zur Verfügung.

Der Vorteil der Datenerhebung unter Feldbedingungen ist, das die Tests in einer für den Sportler jeweils gewohnten Umgebung, sportartspezifisch, stattfinden und Laborbedingungen vermieden werden können, was die Validität der erhobenen respiratorischen Parameter erhöht [33, 63, 76, 90, 96].

Eine Ausnahme in der einfachen Verwendung portabler Spirometriegeräte im Feldversuch, stellte der Schwimmsport dar.

Erst mit Entwicklung der Gegenstromanlage fand die Spirometrie seit 1972 breite Anwendung im Schwimmsport [5], da der Kanal, im Gegensatz zum Schwimmbecken, gute standardisierte Bedingungen bot. Es mußten keine Wenden geschwommen, die Belastungsintensitäten konnten genau definiert und die Laborgeräte problemlos neben dem Kanal installiert werden.

Der sichere Einsatz portabler Spirometriegeräte als Routinemethode bei Schwimmern zur kontinuierlichen Aufzeichnung im Schwimmbecken scheitert daran, daß die Geräte nicht wasserdicht sind. Um trotz dieser Situation respiratorische Daten (VO_2max) unter Feldbedingungen erheben zu können, muß man sich eines diskontinuierlichen Meßverfahrens, der *Nachatmungsmethode*, bedienen.

Bei Verwendung der Nachatmungsmethode zur Erfassung respiratorischer Daten, atmet der Athlet unmittelbar nach Beendigung der Belastung in die Atemmaske des Spirometers. Das Spirometer mißt die aktuellen respiratorischen Daten, z.B. die O_2-Aufnahme/-Abgabe und stellt diese graphisch dar. Aus der Kinetik des O_2-Verbrauchs in der Nachbelastung läßt sich der maximale VO_2-Wert bei Belastungsabbruch nach der Gleichung $y = ae^{-bx}$ retrograd monoexponentiell extrapolieren (siehe Abbildung 2).

$$y = ae^{-bx}$$

a=Konstante, e=Euler`sche Konstante, b= Steigung, x= Länge der Extrapolierten Intervalle

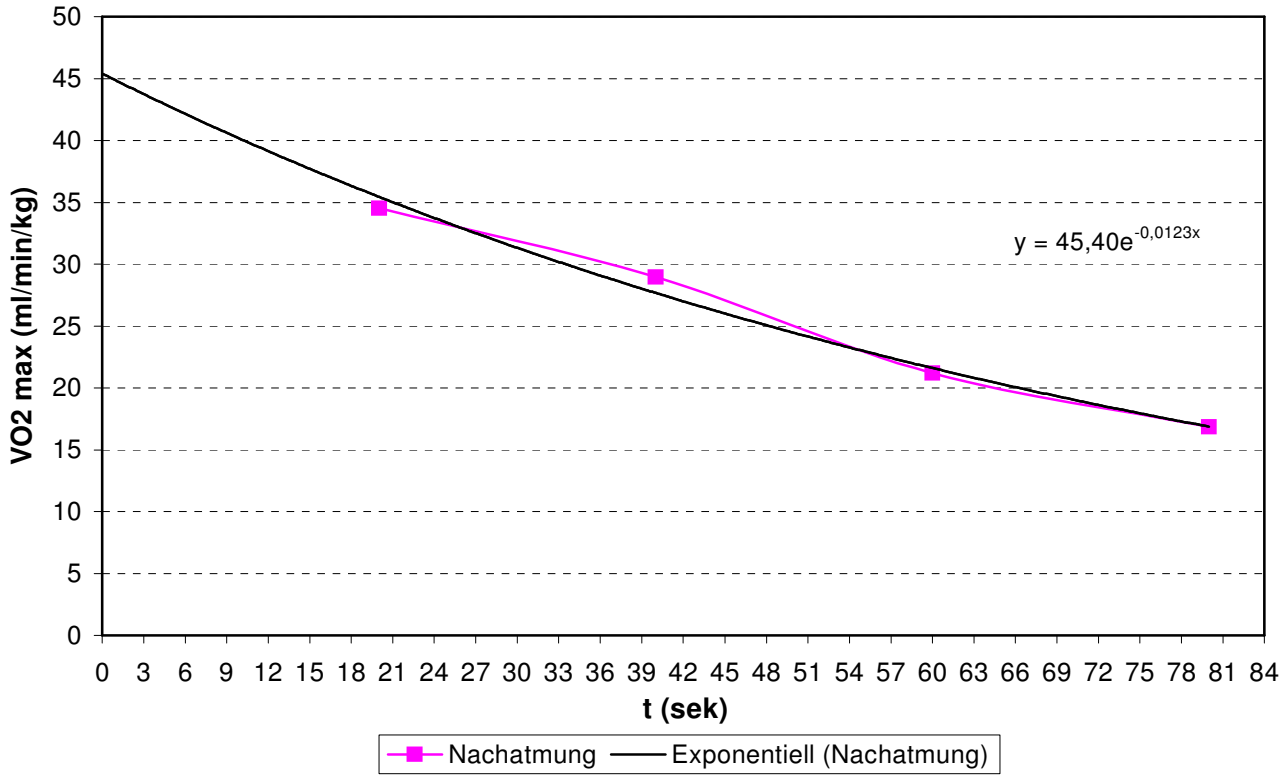


Abb. 2: Beispiel einer retrograden monoexponentiellen Extrapolation (20-Sekunden-Intervalle) der VO_2max bei Belastungsabbruch

Die Anwendung der monoexponentiellen Retroextrapolation von O_2-Werten in der Nachbelastung wurde erstmals 1976 von di Prampero unter Verwendung von Mischkammergeräten beschrieben [25] und 1980 durch Léger et al. unter Laborbedingungen an Läufern weiterentwickelt und validiert [55]. Bereits 1981 gelang Montpetit die erfolgreiche Anwendung der Nachatmungsmethode unter Feldbedingungen im Schwimmsport [76]. Zahlreiche Forschungsarbeiten der folgenden Jahren bestätigten die Zuverlässigkeit der Nachatmungsmethode zur Bestimmung der VO_2max, sowohl nach Maximalleistungen als auch nach submaximalen Belastungen [16, 21, 52, 54-56, 76, 77, 88, 100].

Bis heute findet die Nachatmungsmethode breite Anwendung in der leistungsphysiologischen Forschung.

Neben der VO_2max erlangte der O_2-Verbrauch auf submaximalen Belastungsstufen zunehmendes Interesse in Bezug auf die Bewegungsökonomie, der in koordinativ anspruchsvollen Sportarten eine große Bedeutung beigemessen wird [107].

Die technisch-koordinativen Fähigkeiten eines Athleten werden z.B. beim Schwimmen als wichtiger für die Leistungssteigerung angesehen, als die rein kardiopulmonal-metabolischen Gegebenheiten [41, 83, 107].

Dabei spielt der O_2-Mehrverbrauch auf der nächst höheren Belastungsstufe eine grundlegende Rolle für die Beurteilung der Bewegungsökonomie und der technischen Fähigkeiten im aeroben Bereich.

Jenseits der aerob-anaeroben Schwelle, gewinnt die anaerobe Kapazität und die Muskelfaser-Verteilung des Schwimmers an Bedeutung. Die Energiebereitstellung für die Muskelarbeit zur Überwindung des Wasserwiderstandes findet nicht mehr überwiegend aerob statt. Mit Zunahme des anaeroben Anteils an der Gesamtenergiebereitstellung, sinkt die Genauigkeit der Spirometrie bezüglich der Ökonomiebeurteilung, da aerobe Energiebereitstellungsmechanismen in den Hintergrund treten [15, 36, 53, 74].

1.2. Bedeutung der vorliegenden Arbeit

Bei der bisherigen Validierung der monoexponentiellen Retroextrapolation wurden ausschließlich gut trainierte Ausdauersportler berücksichtigt und eine sehr grobe Intervalleinteilung der VO_2-Werte vorgenommen [16, 21, 52, 54-56, 76, 77, 88, 100].

Durch die Entwicklung der breath-by-breath-Messung konnte der Verlauf der O_2 -Kurve nach Belastungsabbruch detaillierter dargestellt werden (siehe Abbildung 3).

In der Nachbelastungsphase nach körperlicher Anstrengung kehren die beanspruchten Funktionssysteme (z.B. Herz-Kreislauf-System, Bewegungsapparat) in zeitlich unterschiedlicher Folge zum Ausgangszustand zurück. Neben der Rückkehr der Herzfrequenz und des Blutdrucks auf das Ausgangsniveau vor Belastung, dem Laktatabbau als Teil des Säure-Base-Ausgleichs, der Abnahme der Proteinsynthesehemmung und Steigerung des Eiweißumsatzes im Rahmen anaboler Stoffwechselprozesse, dem Flüssigkeitsausgleich und der muskulären und psychischen Regeneration, kommt es zu einer Auffüllung der Energiespeicher. Während die vollständige Auffüllung des Leber-und Muskelglykogens bis zu einigen Tagen dauert, kommt es bereits in den ersten Minuten nach Belastungsabbruch zu einer fast vollständigen Kreatinphosphatresynthese.

Es herrscht in der Literatur Übereinstimmung, das die Kinetik der Kreatinphosphatresynthese nach körperlicher Belastung durch die O_2-Aufnahmekurve repräsentiert wird[19, 37, 71, 84, 95].

Es ist anzunehmen, dass sich die O_2 -Kinetik in den ersten Sekunden nach maximaler Ausbelastung zwischen unterschiedlich gut trainierten Sportlern unterscheidet, da die Geschwindigkeit der sauerstoffabhängigen Resynthese von Kreatinphosphat trainingsabhängig ist[68-70, 103, 118].

Diese Tatsache führt zu der Annahme, dass der initiale O_2-Kurvenverlauf die monoexponentielle Berechnung der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_2max) bei Belastungsabbruch verfälschen könnte, wenn die Rohwerte im breath-by-breath Modus erhoben werden und die O_2-Kinetik dadurch detaillierter erfasst wird.
Die Beschreibung einer dadurch eventuell nicht rein monoexponentiellen O_2-Kinetik durch eine monoexponentielle Funktion ($y = ae^{-bx}$) erscheint problematisch.

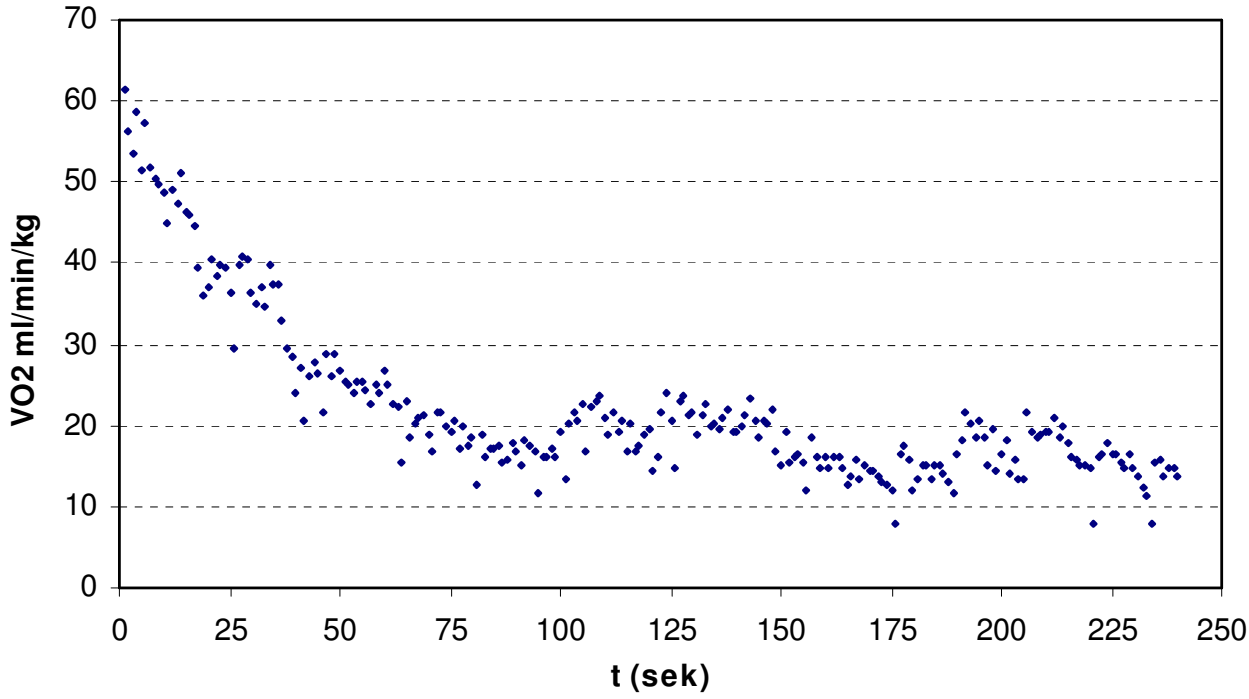


Abb. 3: Beispiel der VO_2-Kurvenkinetik nach Ausbelastung eines Probanden im breath-by-breath-Modus

1.3. Ziel der Arbeit

Mit dieser Arbeit soll überprüft werden, inwiefern die Nachatmungsmethode nach Léger et al. [55] bei Erhebung der Rohdaten in Annäherung an den breath-by-breath Modus valide ist. Zur Beantwortung dieser Frage soll zunächst überprüft werden, inwiefern sich bei der breath-by-breath-Erfassung der respiratorischen Parameter im Online- bzw. Nachatmungsmodus ein systematischer Unterschied dieser Methoden darstellen läßt, der auf ein unterschiedliches Ansprechverhalten des Spirometriegerätes in den jeweiligen Modi hinweisen würde.
Anschließend soll geprüft werden, inwiefern die bei einer breath-by-breath-Spirometrie ab der 7. Sekunde der Nachbelastungsphase, mit Hilfe der retrograden Extrapolation ($y=ae^{-bx}$) errechneten VO_2-Werte mit den tatsächlichen VO_2-Werten (VO_2peak) der entsprechenden Online-Messung (Mittelwert der letzten 30 Sekunden einer Belastungsstufe bei gleichen Belastungsbedingungen) übereinstimmen.

Abschließend soll die jeweilige Zielgenauigkeit der monoexponentiellen Nachatmungsmethode in Annäherung an den breath-by-breath-Modus bei Sportlern unterschiedlicher Ausdauerleistungsfähigkeit nach unterschiedlichen Belastungsstufen beurteilt werden.

2. Material und Methoden

2.1. Geräte und Chemikalien

2.1.1. Spirometrie

Die Bestimmung der spirometrischen Daten (VO_2) erfolgte mit Hilfe des transportablen Spirometrieystems „K4b^2“ (K4b^2, Cosmed S.r.I, Rom, Italien), das den Gasaustausch Atemzug für Atemzug analysiert (Breath by Breath) [22, 61]. Im Messkopf, an dem die Gesichtsmaske befestigt war, in welche der Proband zu atmen hatte, befand sich ein Flussmesser mit einer digitalen bidirektionalen Turbine (Durchmesser 28mm, Strömungsbereich 0-20 l/s, Ventilationsbereich 0-300l/min, Messgenauigkeit (MG) +/- 2%, dyn. Widerstand < 0,7 cmH2O/l/s bei 12/s, Auflösung 4ml).

Ein Probenschlauch (Nafion-Schlauch, Permapure R; Länge 73 cm, Rom, Italien) trocknete die Atemluft an und führte sie dem O_2-Analysator (Meßbereich(MB) 7-24%O2, MG 0,02% O2 (Ansprechzeit (AZ) <150ms bei 90%FS) und dem CO_2-Analysator (MB 0-8% CO2, MG 0,01% CO2, AZ <150ms bei 90%FS) im Inneren der tragbaren Einheit (portable Unit, PU; Abmessung 170x55x100mm, Gewicht 550g, Thermometer 0-50°C, Barometer 53-106 kPa), dem eigentlichen Spirometer, zu.

Die PU ermöglichte es, die Messungen ohne PC vorzunehmen; die Daten konnten gespeichert werden und zu einem späteren Zeitpunkt auf einen PC überspielt (mittels RS232C-Schnittstelle) und dort weiterverarbeitet werden (K4b^2 4.1Software, Cosmed S.r.I., Rom, Italien).

Zur Kalibration der Turbine wurde eine Pumpe (3-Liter-Kalibrationspumpe, Cosmed S.r.I., Rom, Italien), zur Gaskalibration ein definiertes Gasgemisch mit CO2=5,86%, O2=12,15% und N2=81,99% mit 150 bar bei 15°C in einer 0,5-l-Flasche (Fl-Nr. AB556589, Messer Griesheim GmbH, Duisburg, Deutschland) verwendet.

Die Werkseinstellung der Kalibrationsfaktoren an der PU war: O_2-Baseline (BL):0, O_2-Gain (G): 1000, O_2-Delay (Dly): 500; CO_2-BL:0, CO_2-G:1000, CO_2-Dly: 500; Turbine-G: 1000ex/1000in, die sich nach erfolgter Raumluft-, Gas-, und Turbinenkalibration feinjustierten.

Abb. 4: K4b^2

2.1.2. Laktatmessung

Zur Blutlaktatbestimmung wurde Kapillarblut aus dem mechanisch hyperämisierten rechten Ohrläppchen entnommen, das mit einer Blutlanzette (Solofix, B.Braun Petzold GmbH, Melsungen, Deutschland) angestochen wurde. Der Blutstropfen wurde mit einer 20µl-End-zu-End-Kapillare (EKF- Diagnostik GmbH, Barleben/Magdeburg, Deutschland) aufgefangen, in einem Probegefäß mit 1000µl Systemlösung (EKF- Diagnostik GmbH, Barleben/Magdeburg, Deutschland) geschüttelt und bis zur Analyse aufbewahrt (Lagerung <12h bei Raumtemperatur, >12h bei 8-12°C).

Der Untersucher trug während aller Untersuchungen Handschuhe Vasco puderfrei (B.Braun Petzold GmbH, Melsungen, Deutschland).

Als Analysegerät stand das Biosen C-Line (EKF- Diagnostik GmbH, Barleben/Magdeburg, Deutschland) zur Verfügung. Laktat wurde enzymatisch-amperometrisch bestimmt (MB 5,0-360 mg/dl bzw. 0,5-40mmol/l Laktat, Unpräzision <1,5% bei 12mmol/l).

Bei diesem Verfahren wird Probenlösung in eine Messkammer gesaugt (Ansaugvolumen ca. 90µl) und passiert dabei eine Membran, auf der Laktat-Dehydrogenase immobilisiert ist und eine Oxidation des Laktats katalysiert. Das neben Pyruvat entstehende Wasserstoff-

peroxid wird nach Passage einer zweiten Membran an einer Platinelektrode bei +600mV oxidiert: $H_2O_2 = 2H^+ + O_2 + 2e^-$. Die Elektronen erzeugen ein Meßsignal (Strom-Zeit-Kurve), dessen maximaler Anstieg zur Laktatkonzentration in der Probe proportional ist (Maximumbestimmung der ersten Ableitung nach der Zeit).

2.1.3. Bestimmung der Leistungsfähigkeit und der Belastungsintensität mit dem Laufbandergometer

Die Leistungsfähigkeit und jeweilige Belastungsintensität der Probanden wurde mittels eines Stufentests auf dem motorisierten Laufbandergometer „Venus“ (Venus, Lauffläche von 200 x 75cm, HP-Cosmos Sportgeräte GmbH, Nussdorf-Traunstein, Deutschland) bestimmt. Die Laufbandsteigung betrug 2%. Nach 5min. Eingehen bei 5km/h Beginn des Laufens mit 8km/h. Steigerung der Laufgeschwindigkeit um jeweils 2 km/h alle 3min. mit 60 sec. Pause nach jeder Stufe zur Blutentnahme zwecks Laktatbestimmung und Aufzeichnung des Sauerstoffverlaufs.

Nach Belastungsabbruch wurden alle leistungsphysiologischen Daten weitere 5 Minuten erfasst. Dadurch wurde der O_2-Kurvenverlauf nach Belastungsende ausreichend lange erfaßt [24, 25, 55]. Die subjektive Anstrengung während der letzten Belastungsstufe vor Belastungsabbruch, wurde vom Probanden mittels einer Skala zur Einschätzung des subjektiven Belastungsempfinden (Borg-Skala) bestimmt [13].

2.1.4. Pulsmessung

Die Herzfrequenz wurde nach dem Prinzip der Radiotelemetrie mit einem Senderbrustgurt der Firma „Polar“ (Polar Electro GmbH, Büttelborn, Deutschland) erhoben [6, 32, 64]. Sowohl das Spirometriegerät „K4b^2“ , als auch das Laufbandergometer „Venus“ zeigten die durch den Senderbrustgurt gesendete Herzfrequenz durch ein integriertes Kommunikationsmodul kontinuierlich an. Das Spirometriesystem „K4B^2“ speicherte die Herzfrequenz während der Messungen.

2.1.5. Bestimmung des Probandengewichts und des Körperfettanteils

Das Gewicht der Probanden wurde, im bis auf die Unterhose entkleideten Probanden, mit Hilfe der mechanischen Balkenwaage „Seca 710“ (Seca, Vogel & Halke GmbH & Co., Hamburg, Deutschland) mit Tarierrad zur Einstellung der Nullstelle bestimmt.

Das Körperfett wurde mit Hilfe einer Fettzange (Baty International, West Sussex, Grossbritannien) gemessen. Der dabei ermittelte prozentuale Körperfettanteil in Bezug auf die Körpermasse ergab sich durch die Kalipermetrie nach Parizkova. Hierbei wurde die Hautfaltendicke an zehn definierten Stellen in mm gemessen (siehe Anhang), addiert und mit dem Körpergewicht in Beziehung gesetzt. Aus einer alters- und geschlechtsabhängigen Tabelle (siehe Anhang) konnte man nun den Prozentsatz an Körperfett des Probanden ablesen [81, 82].

2.1.6. Bestimmung physiologischer Parameter an der IAS

Die Bestimmung der physiologischen Parameter Laktat (mmol/l) und Herzfrequenz (S/min) an der IAS erfolgte nach einheitlich manueller Bestimmung der IAS anhand der Methode von Simon et al.[99] im Anschluß an jede Messung.

2.2. Probanden

An der vorliegenden Studie nahmen n = 67 Männer im Alter zwischen 18 bis 35 Jahren aus dem Großraum Hamburg teil, die in Abhängigkeit der Ausdauerleistungsfähigkeit in drei Gruppen eingeteilt wurden.

Gruppe A [VO_2 peak: < 50ml O_2/min/kg]:
n=21 [Alter: 27,7 Jahre (± 3,8); Größe: 182 cm (± 6,3); KG: 78,3 kg (± 8,8);
BMI: 23,6 kg/m^2 (± 1,8); Körperfett: 17,7 % (± 4,2)]

Gruppe B [VO_2 peak: 50-60ml O_2/min/kg]:
n=34 [Alter: 27,4 Jahre (± 3,6); Größe: 183,5 cm (± 5,9); KG: 75,4 kg (± 6,1);
BMI: 22,4 kg/m^2 (± 1,75); Körperfett: 13,2 % (± 2,8)]

Gruppe C [VO_2 peak: > 60ml O_2/min/kg]:
n=12 [Alter: 27,3 Jahre (± 5); Größe: 181,7 cm (± 4,2); KG: 73 kg (± 5);
BMI: 22,1 kg/m^2 (± 1,3); Körperfett: 11,7 % (± 3)]

Allgemeine Einschlusskriterien:

- männlich
- regelmäßiges Ausdauertraining / bzw. kein Ausdauertraining
- Alter zwischen 18 bis 35 Jahren
- körperliche Beschwerdefreiheit

Zuordnungskriterien für die Leistungsgruppen A, B, C:

- Gruppe A: VO_2max < 50 ml/min/kg KG, untrainiert bis mäßig trainiert.
- Gruppe B: VO_2max 50-60 ml/min/kg KG, Marathonzeit: 3:00:00-4:30:00, 10km- Bestzeit zirka 40 min.
- Gruppe C: VO_2max > 60 ml/min/kg KG, Marathonzeit: < 3:00:00, 10km-Bestzeit < 36min.

Es wurde von jedem Probanden vor dem Test eine allgemeine Anamnese mit einem standardisierten Anamnesebogen erhoben (siehe Anhang).
Alle Teilnehmer wurden im Vorfeld der Studie schriftlich in einem Handout über den Ablauf und das Ziel der Messungen informiert (siehe Anhang) und es wurde darauf hingewiesen, je zwei Tage vor beiden Untersuchungen nicht zu trainieren, um eine vergleichbar gute Regeneration der Probanden zu gewährleisten. Des weiteren sollten sich die Sportler an den jeweiligen Vortagen kohlenhydratreich ernähren und ausreichend viel Flüssigkeit zu sich nehmen, um einer Glykogenverarmung vorzubeugen, was die Validität der Messwerte eingeschränkt hätte [12, 20, 43, 117].
Zur Überprüfung der Regeneration diente die Bestimmung der Ruheherzfrequenz, der Kreatinkinase in Ruhe (Ruhe-CK), die Erhebung des Ruhelaktats und eine Spirometrie in fünfminütiger Rückenlage zur Bestimmung des Ruhe-RQ´s vor jedem Stufentest. Für die Ermittlung des Ruhe-RQ´s war der Mittelwert der letzten 30 Sekunden der fünfminütigen Untersuchung maßgeblich. Ein RQ-Wert von >0,85 galt als Indikator für eine ausgewogene Energiebereitstellung[73].
Die Teilnahme erfolgte auf freiwilliger Basis. Eine schriftliche Einverständniserklärung, die auch eine Datenschutzaufklärung enthielt (siehe Anhang), wurde von jedem Teilnehmer nach Erklärung des Versuchsablaufes durch den Versuchsleiter vor Studienbeginn unterschrieben und abgegeben.

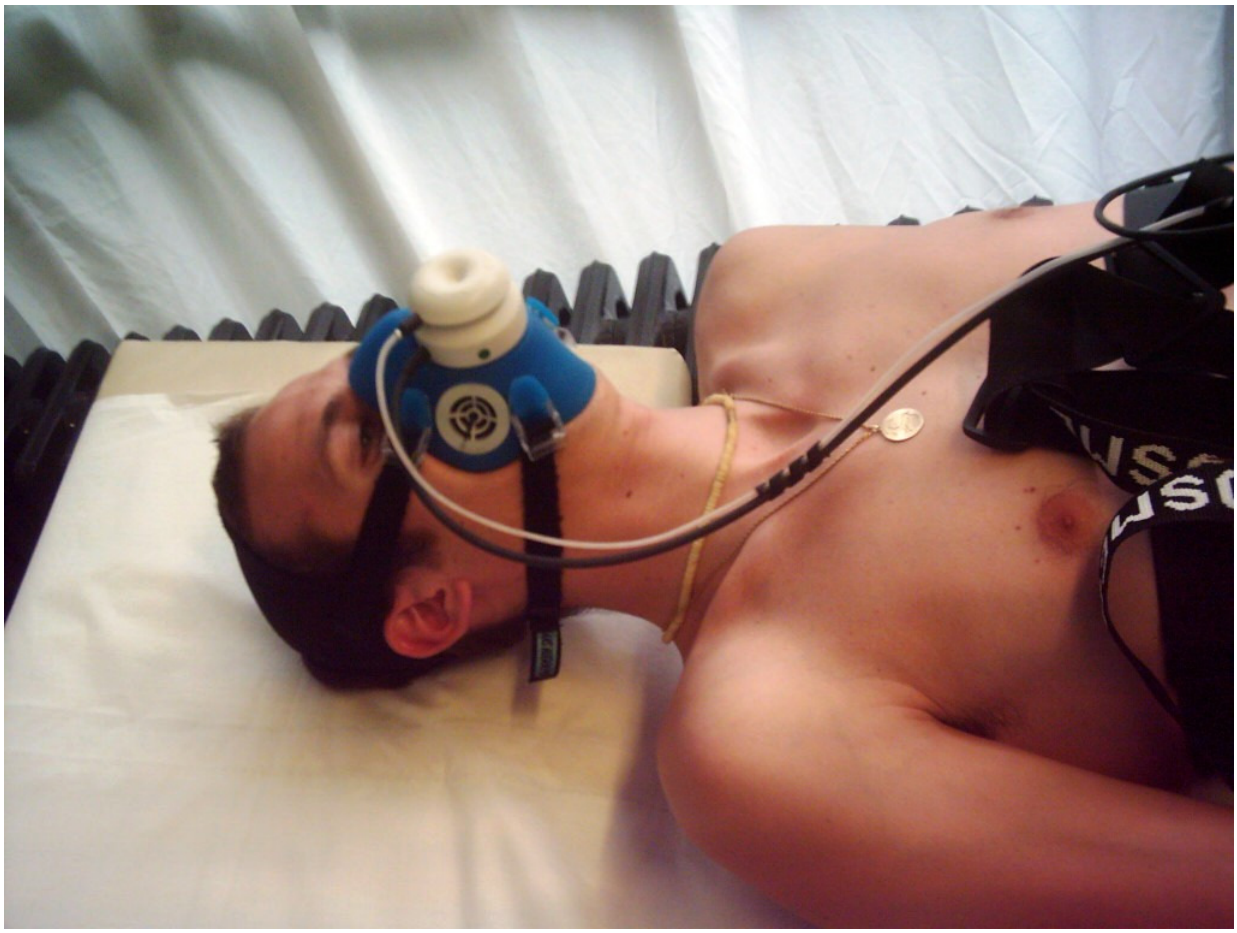


Abb. 5: Ruhespirometrie in fünfminütiger Rückenlage zur Bestimmung des Ruhe-RQ's.

2.3. Versuchsablauf

Die Untersuchung gliederte sich in 2 randomisiert zugewiesene Stufentests auf dem Laufbandergometer im Abstand von einer Woche. Um die Tests leistungsphysiologisch vergleichen zu können, wurden Herzfrequenz, Laufgeschwindigkeit (km/h), Laufzeit, Blutlaktat und Sauerstoffaufnahme gemessen.

Beide Stufentests unterlagen demselben Testprotokoll des Laufbandergometers, unterschieden sich jedoch darin, dass die O_2-Aufnahme bei Test A mit der online-Methode und bei Test B mit der Nachatmungsmethode durchgeführt wurde.

2.3.1. Procedere unmittelbar vor der Belastung

Vor Beginn der beiden Stufentests fand für jeden Probanden eine Aufklärung über den Ablauf beider Belastungen, die geplanten Untersuchungen und die Blutabnahmen statt. Nach der Klärung noch offener Fragen unterschrieb jeder Proband die schriftliche Einverständniserklärung und füllte den Anamnesebogen aus (siehe Anhang).

Die Probanden wurden gewogen und gemessen. Der Brustsendergurt wurde angelegt. Es folgte die fünfminütige Ruhespirometrie, die Abnahme des Ruhelaktats, die Blutabnahme aus der rechten Ellenbeuge, die Messung des Ruheblutdrucks und der Ruheherzfrequenz.

Der Proband wurde auf dem Laufband positioniert. Es folgte eine kurze Einweisung über die richtige Laufposition auf dem Laufband mit Hinweis auf die Notausschalter. Die Anbringung der Spirometermaske vor Mund und Nase wurde durch das manuelle Zuhalten der Maskenöffnung mit der Aufforderung zum Ausatmen getestet. Strömte daraufhin keine Luft an den Seiten der Maske aus, so galt diese als gut positioniert.

Zeigten Spirometriegerät und Laufband die aktuelle Herzfrequenz optisch an, galt die Vorbereitung als abgeschlossen.

2.3.2. Testvorbereitungen

Vor Beginn der ersten Belastung wurden jeden Morgen Spirometer und Akkus an ihre Aufladestation angeschlossen. Diese wurde über einen Netzstecker ans Stromnetz angeschlossen, so dass Spirometer und Akkus jeden Morgen auf Betriebstemperatur (>35°C) aufgewärmt und vollständig geladen wurden.

Jeden Morgen vor Messbeginn wurde das Spirometer kalibriert.

Die Kalibration gliederte sich in vier Teile:

- Raumluftkalibration: Vor jedem Test durchgeführt
- Gaskalibration: Einmal täglich
- Volumenkalibration: Einmal täglich
- Turbinenkalibration: Einmal täglich

Danach wurden Akku und Spirometer miteinander verbunden, in die Tragevorrichtung gesteckt und bei Belastung vor den Probanden auf Kopfhöhe eingehängt. Somit musste der Proband weder das Spirometer, noch den Akku während der Belastung am Körper tragen. Nach den technischen Vorbereitungen erfolgten vor jedem Stufentest standardisierte Vorbereitungen des Stoffwechselplatzes, des Patienten und der Belastung (siehe Tabelle 1).

Tab. 1: Flussschema Vorbereitung Test A und B

Testvorbereitung	
Vorbereitung Spirometer: • Spirometer an Stromquelle anschliessen • Betriebstemperatur von mindestens 35 ° C abwarten • Spirometer kalibrieren (Gas, Turbine, Umgebung, Verzögerung) • Pulsempfänger ans Spirometer anschliessen • Trockener Samplingschlauch • Speicherplatz überprüfen	Vor Beginn des Testtages
Vorbereitung Stoffwechselplatz: Bereitlegen von • Kapillaren • Tupfern • Handschuhen • Solofix-Lanzetten • Probegefäßen mit Systemlösung, randständig durchnumeriert • Desinfektionsspray • Stauschlauch, Spritzen, Kanülen, Abwurf • Blutdruckmanschette, Stethoskop • Belastungsbogen	Vor jedem Test
Vorbereitung Patient • Einverständnis-/ und Datenschutzerklärung unterschreiben lassen • Bestimmung Körpergewicht, Körpergrösse und Körperfettanteil • Anlegen von Pulsgurt und Spirometermaske • Probandendaten und Luftfeuchtigkeit ins Spirometer eingeben • Probanden auf Liege legen; Start 5min Ruhespirometrie • Handschuhe anziehen. Blutentnahme • Bestimmung von Ruhepuls, Ruheblutdruck, Ruhe-RQ	Vor jedem Test
Vorbereitung Belastung: • Randomisierung • Schweisstuch bereitlegen • Probanden auf dem Laufband positionieren, Spirometer einhängen • Ruhelaktat abnehmen • Probanden nochmals über das Laufbandprogramm und das sonstige Procedere informieren • Nochmals Abbruchsignale eindeutig zeigen und auf das Redeverbot ab Belastungsbeginn hinweisen • Laufbandprogramm wählen, simultan mit dem dritten Startsignal das Spirometer starten	Vor jedem Test

Tab. 2: Flussschema Testdurchführung Test A und B

Testdurchführung				
	Eingehen	Belastung	Pause	Abbruch
	Aufwärmphase			
Tempo	5 km/h	8-10-12-14-16-18-20 km/h	0 km/h	0 km/h
Zeit	5 min	3 min	1 min	5 min
	In letzter Minute: Laktatabnahme	Redeverbot	Redeverbot	subjektive Ausbelastung
		Absprache über Fortführung der Belastung mittels Handzeichen zum Ende der jew. Belastungsstufe	Bei Nachatmung: Vorhalten der Maske zur Aufzeichnung O_2-Verlauf; Maskenentfernung 2sek. vor Start nächster Stufe	Bei Nachatmung: Vorhalten der Maske zur Aufzeichnung O_2-Verlauf
	Pulserhebung: 15 sek. vor Ende	Pulserhebung: 15 sek. vor Ende	Laktatabnahme	Messung Laktat, Puls und RR nach 1,3 und 5 min.
				Belastungseinschätzung anhand der Borg-Skala
Online-Methode:	Kontinuierliche Aufzeichnung des O_2-Verlaufs von Beginn der Aufwärmphase bis 5 min. nach Belastungsabbruch.			
Nachatmungsmethode:	Kontinuierliche Aufzeichnung des O_2-Verlaufs während der Belastungspausen und nach Belastungsabbruch; vom Vorhalten der Maske bis ca. sek. 55 der Pausen / bzw. bis 5 min. nach Belastungsabbruch.			

2.3.3. Procedere bei Test A (Online-Methode)

Das Laufbandprogramm, mit dem in Tabelle 2 beschriebenen Belastungsprotokoll, wurde eingegeben und automatisch nach drei kurzen akustischen Signalen mit 5km/h gestartet. Mit dem dritten akustischen Startsignal wurde die Aufzeichnung des Spirometriegerätes manuell durch den Untersucher gestartet, wodurch die Messuhren des Laufbands und Spirometriegeräts sekundengenau zeitgleich liefen.

Da es nach der ersten Stufe keine Pause gab, wurde dem Probanden in der letzten Minute der fünfminütigen Eingehphase Laktat abgenommen und die Herzfrequenz aufgeschrieben.

Abb. 6: Laktatmessung nach Beendigung der Eingehphase während einer Online-Messung

Nach den fünf Minuten Eingehen folgten in kontinuierlicher Folge die Stufen ab 8km/h mit einer Steigerung von 2km/h je Stufe. Die Dauer jeder Stufe betrug 3 Minuten, gefolgt von einer 60 sekündigen Pause zur Blutentnahme und Aufzeichnung der O_2-Aufnahme in der Nachbelastungsphase während der Pause. Die Herzfrequenz wurde immer 15 Sekunden vor Ende einer jeden Belastungsstufe erhoben, das Laktat in der jeweiligen Pause.

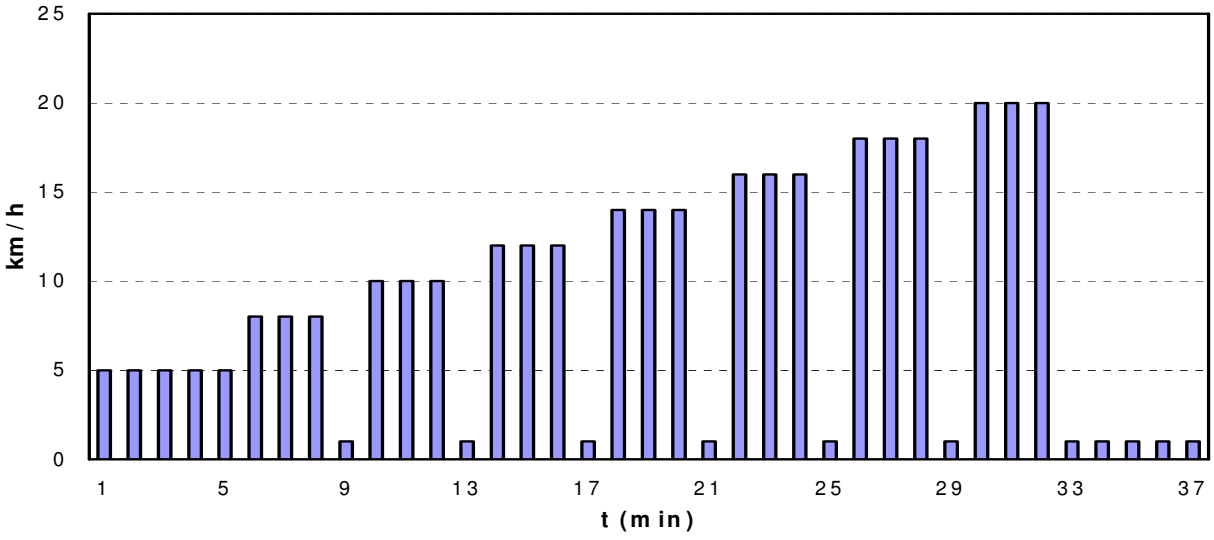


Abb. 7: Beispielhafte graphische Darstellung des während der Versuchsreihen verwendeten Laufbandbelastungesprofils mit Vmax 20 km/h

Während der Messung, besonders während der Pausen, bestand für den Probanden Redeverbot, um eine möglichst unverfälschte Aufzeichnung des Sauerstoffverlaufs zu sichern.
Die Zwischenzeiten der einzelnen Intervalle wurden dem Probanden bei 60`, 90`, 120`, 150`sek angesagt. In der letzten Minute jeder Belastungsstufe gab der Proband, auf Nachfrage des Untersuchers, seine körperliche Verfassung mit erhobenen Daumen, bzw. gesenkten Daumen an. Nach der jeweiligen körperlichen Verfassung des Probanden wurde über die Fortführung der Belastung entschieden.
Der Proband lief bis zu seiner subjektiven Ausbelastung, wobei er die nächste Stufe nur dann anlaufen sollte, wenn er sich zutraute diese zu durchlaufen.
Ein vorzeitiger Abbruch, innerhalb eines 3min-Intervalls, hatte den Verwurf der an diesem Termin bisher erhobenen Testdaten zur Folge und ein neuer Belastungstermin, mit einem Mindestabstand von 1 Woche, zur Testwiederholung wurde vereinbart.
Auf der letzten Stufe wurde jeder Proband vom Untersucher mit Zurufen angefeuert. Das Ziel war den Sportler zu motivieren durchzuhalten, um die Belastung nicht vor Ende des 3min.-Intervalls abzubrechen [101].
Es folgte eine fünfminütige Nachbelastungsphase mit weiterer kontinuierlicher Aufzeichnung der spiromerischen Werte, Herzfrequenzmessung, Blutdruckkontrolle und Abnahme von Kapillarblut zur maximalen Laktatbestimmung in der 1., 3. und 5. Minute [23, 24, 50].
Auf der dem Probanden zuvor erklärten Borg-Skala[13] gab dieser seine subjektive Anstrengung während der letzten Stufe an.

2.3.4. Procedere bei Test B (Nachatmungsmethode)

Das Procedere entsprach genau demselben wie dem bei der Online-Methode, nur dass der Proband die Belastungsstufen ohne Spirometermaske lief und diese nur während der Pausen und nach Belastungsabbruch durch den Untersucher aufgesetzt bekam (s. Tabelle 2).

2.4. Statistische Auswertung

Für die graphischen Darstellungen der erhobenen Daten wurde das Programm Microsoft Excel (Excel 2000, Microsoft, Redmond, USA) genutzt. Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm STATISTICA 6.0 für Windows (StatSoft, Tulsa, USA).

Die Mittelwerte der Stichproben und deren Standardabweichungen dienten als Ausgangsbasis zur Überprüfung der Grundgesamtheit.

Die erhobenen Daten wurden als *verbundene Stichproben* angesehen.

Mit dem *Kolmogoroff-Smirnoff-Anpassungstest* wurde die Normalverteilung der Daten bestätigt.

Das zu prüfende Signifikanzniveau wurde auf 5% ($p= 0,05$) festgesetzt.

Die Prüfung auf signifikante Unterschiede ($p< 0,05$) zweier Stichproben wurde mit dem *t-Test für gepaarte Daten* und die Prüfung bei >2 Stichproben mit einer *einfaktoriellen Varianzanalyse* (ANOVA: Analysis of Variance), nach Sicherung der Varianzhomogenität durch den *Levene-Test*, durchgeführt.

Wies die Varianzanalyse eine Signifikanz ($p< 0,05$) aus, wurde als post-hoc Test der *Scheffé-Test* bei ungleich großen Probandenzahlen der Stichproben und der *Tukey HSD-Tes*t bei Stichproben mit gleich großen Probandenzahlen gewählt.

2.5. Kritik der Methoden

2.5.1. Einteilung der Probanden

Die Probanden konnten meist erst nach der Online-Messung in eine der drei Leistungsgruppen eingeteilt werden, da von den meisten Probanden vor Testbeginn keine aktuelle maximale Sauerstoffaufnahmekapazität (VO_2max) vorlag. Die Rekrutierung orientierte sich deshalb im Vorfeld hauptsächlich an den von uns gewählten Bestzeiten im 10km-Lauf, bzw. im Marathonlauf, in die sich die Probanden selber einordnen mußten. Die Zeitvorgaben stellten sich als unzuverlässig in Bezug auf die erreichte VO_2peak dar. Es kam zu Schätzungsfehlern mit ungleich stark gefüllten Gruppen.
Eine objektivere Vortestung mit Erfassung der individuellen, aktuellen VO_2 max hätte dem vorbeugen können.

2.5.2. Rekrutierungsproblem für Gruppe C

Das ausgewählte Alter 18 - 35 Jahren führte bei hochklassigen Läufern zu Rekrutierungsproblemen in der Gruppe C (VO_2 peak > 60ml O_2 /min/kg Körpergewicht). Viele der kontaktierten Sportler mit gesicherten VO_2 max > 60ml O_2 /min/kg waren zum Zeitpunkt der Studie älter als 35 Jahre. Eine überregionale Rekrutierung gestaltete sich schwierig, da einige der kontaktierten Sportler und Trainer, aufgrund von regelmäßigen Leistungsdiagnostiken in der Trainingsbetreuung, keine Anreize an einer Studienteilnahme sahen.

2.5.3. Terminvergabe

Im Laufe der Datenerhebung kam es in seltenen Fällen zu minimalen Abweichungen vom Testschema bei der Terminvergabe. Dies erklärte sich durch berufliche oder andersweitige Verpflichtungen der Probanden. So kam es gelegentlich dazu, daß der einwöchige Abstand zwischen den beiden Laufbandbelastungen um maximal einen bis zwei Tage verkürzt, beziehungsweise verlängert werden mußte. Die Regeneration, anhand der vorgenannten Parameter, konnte aber auch in diesen Fällen bestätigt werden.

2.5.4. Abbruchkriterium

Abbruchkriterium, als Grundlage zur Vergleichbarkeit der erhobenen Daten, war die Ausbelastung der Probanden. Da diese nach dem Belastungsschema von den Sportlern selbst subjektiv festgelegt wurde, ist es nicht ausgeschlossen, daß einzelne Teilnehmer nicht vollständig ausbelastet waren.

2.5.5. Vorzeitiger Testabbruch

Schlechte Tagesform, unzureichende Motivation und schlechte Selbsteinschätzung führten gelegentlich zu vorzeitigen Belastungsabbrüchen im Verlauf einer Belastungsstufe vor Ende des Intervalls. In diesen Fällen wurde der Test komplett abgebrochen, die Daten verworfen und zwei neue Testtermine festgelegt.

2.5.6. Laktatabnahme

Obwohl bei der Kapillarblutentnahme zur Laktatbestimmung vom Versucher stets Handschuhe getragen und darauf geachtet wurde, das Ohr vor jeder neuen Abnahme von Schweiß zu befreien, ist es nicht auszuschließen, dass es im Verlauf der Abnahmen zur Vermengung von Probandenschweiß und Kapillarblut gekommen ist. Der Laktatgehalt des Schweißes hätte so zu einer Messung erhöhter Laktatwerte führen können. Stark abweichende Werte wurden deshalb vor der statistischen Auswertung als Messfehler definiert und gelöscht.

2.5.7. Messbeginn in Test B (Nachatmungsmethode)

Für die Bestimmung des ersten korrekt erfassten VO_2-Messwerts mit Hilfe der Nachatmungsmethode, wurden das Atemminutenvolumen (AMV) und das Atemzugvolumen (AZV) hinzugezogen. Ein Anstieg dieser respiratorischen Parameter nach Belastungsabbruch wurde auf die noch fehlerhaft positionierte Maske zurückgeführt, aus der Nebenluft noch entweichen konnte. Bei einem Abfall von AMV und AZV wurde die auf eine korrekte Maskenanbringung geschlossen und der höchste Wert galt als der erste realistische Messwert.

Aus diesen Gründen gingen von allen Probanden erst die VO_2-Messwerte ab Sekunde 7 nach Belastungsende in die Bewertung ein. Beim Rückwärts-Extrapolieren wurden Zeitspannen zwischen 54-81 Sekunden berücksichtigt, so daß einzelne nicht eliminierte Artefakte als Ausreisser anzusehen sind.

2.5.8. Intervallbildung in der Nachbelastung

Die Online- und die Nachatmungsmessung wurden vom Spirometer im breath-by-breath-Modus aufgezeichnet, wobei jeder einzelne Atemzug erfasst und dargestellt wurde. Zur besseren Vergleichbarkeit der O_2-Kinetik zwischen den einzelnen Gruppen und zwischen den unterschiedlichen Belastungsstufen innerhalb einer jeden Gruppe, wurden die Rohdaten nach abgeschlossener Datenerhebung auf 3-Sekunden-Intervalle geglättet.

Damit war sichergestellt, dass bei der Analyse der Spirometriedaten stets mit einer konstanten Anzahl an spirometrischen Parametern gerechnet wurde (paarweiser Vergleich mit immer gleich großem n im Kurvenverlauf).

Bei 1- oder 2-sekündigen-Intervallen bestand die Problematik, dass einige Probanden gerade nicht geatmet hatten und man dadurch mit stets unterschiedlich großen Datenmengen hätte arbeiten müssen.

Somit wurde in dieser Studie ein „3-Sekunden-Mixing-chamber“ validiert, das jedoch eine starke Annäherung an eine „breath-by-breath-Messung“ bedeutet und in dieser Tendenz gedeutet werden kann.

2.5.9. Stufendauer

Um mit der monoexponentiellen Retroextrapolation auf die jeweils korrekte maximale VO_2 am Ende einer jeden Belastungsstufe zurückrechnen zu können, mußten die Belastungsstufen ausreichend lang sein, um einen VO_2-Steady-State unter Belastung zu ermöglichen.

Die sich mit der Nachatmungsmethode beschäftigten Forschungsgruppen wählten häufig 2-minütige Belastungsintervalle, um einen VO_2-Steadystate zu gewährleisten [38, 55, 88, 93, 98, 116].

Zur erforderlichen Intervallänge gibt es in der Literatur unterschiedliche Angaben.

Es gibt Studien die ein Erreichen des VO_2-Steadystates nach 2min. belegen [5, 55, 62, 75, 105], andere unter 3min. Belastungsdauer [29, 89].

Obwohl unter Maximalbelastung bereits 90% der VO_2max nach einer Minute erreicht sein sollen [47] und Mittelwerte über 30 Sekunden bei Bestimmung der VO_2peak einen adäquaten Kompromiss gegen Verzerrungen durch technische und physiologische Meßausreisser darstellen [40, 46], wurden für diese Studie 3-minütige Belastungsintervalle für gesichertere steady-state-Bedingungen gewählt.

2.5.10. Pausenlänge

Die Dauer der Pausen zwischen den Belastungsstufen wurde mit 60 Sekunden definiert. Dadurch sollte in den Pausen die ausreichende Erfassung der schnellen Komponenete des O_2 -Kurvenverlaufes gesichert werden [24, 25, 55].

Die sauerstoffabhängige Resynthese von energiereichen Kreatinphosphat benötigt nach Belastungsende ungefähr 22 Sekunden zur Teilauffüllung [37] und ungefähr 2 Minuten zur vollständigen Wiederauffüllung der Kreatinphosphatspeicher [45, 85] .

Da die Geschwindigkeit der Wiederauffüllung O_2-abhängig und durch Ausdauertraining beeinflussbar ist [71], wurde hier von unterschiedlich langen und steilen initialen O_2 -Kurvenverläufen in der ersten Minute nach Belastungsabbruch ausgegangen.

2.5.11. Spirometer

Da die Genauigkeit einer breath-by-breath-Analyse im hohen Maße von der Empfindlichkeit des O_2 -Sensors und einwandfreiem technischen Material abhängt [44], wurde vor Studienbeginn folgendes Spirometerzubehör gegen fabrikneue Teile ausgetauscht: O_2 -Sensor, Sampling-Schlauch, Turbine, Opto-elektronischer Messkopf.

Zur täglichen Überprüfung des O_2-Sensors und der luftzuleitenden Komponenten wurde bei jeder Kalibrierung auf die t90 Zeit geachtet, um Messungenauigkeiten von Anfang an vorzubeugen. Die t90 Zeit ist definiert als die Zeit, die der Sensor benötigt, um 90% einer Gasveränderung zu registrieren und sollte für eine vertrauenswürdige Messung nicht >100ms betragen [30].

2.5.12. Bestimmung physiologischer Parameter an der IAS

Zur Darstellung eines gleichartigen Belastungsverlaufes und einer gleichen physiologischen Leistungsentwicklung während der Online/Nachatmung- Tests wurden physiologische Parameter während der Belastung dokumentiert.

Die Bestimmung der physiologischen Parameter Laktat (mmol/l) und Herzfrequenz (S/min) an der IAS erfolgte einheitlich nach manueller Bestimmung der IAS anhand der Methode von Simon et al. [99] im Anschluß an jede Messung durch Expertenexpertise.

Bei Auswahl der Methode zur Bestimmung der IAS stand allein die Praktibilität der Methode im Vordergrund. Dafür eignete sich die IAS-Bestimmung nach Simon et al. besonders gut, der die Schwellengeschwindigkeit am Berührungspunkt einer Tangente mit dem Anstiegswinkel 45° an der Laktatleistungskurve festlegte [99].

3. Ergebnisse

3.1. Probandendaten, Raumbedingungen, physiologische Parameter

In Kapitel 3.1 werden aufeinanderfolgend die antropometrischen und leistungsphysiologischen Parameter der Probanden der Gruppen A, B und C und die Umgebungsbedingungen des Raumklimas an den Belastungstagen dargestellt und auf signifikante Unterschiede zwischen Test A (online) und Test B (Nachatmung) überprüft ($p<0,05$). Der p-Wert prüft die Wahrscheinlichkeit, ob die Nullhypothese gilt. Kann die Nullhypothese auf dem zuvor festgelegten Signifikanzniveau (hier Alpha 0,05) abgelehnt werden, so liegt ein signifikantes Ergebnis vor ($p<0,05$).

3.1.1. Gruppe A (<50ml O_2/min/kg)

In der Gruppe A zeigen sich im Vorfeld der Belastungen keine signifikanten Unterschiede im Vergleich beider Tests (siehe Tabelle 3).

Tab. 3: Antropometrische Daten, leistungsphysilogische Parameter in Ruhe, Umgebungsbedingungen, Gruppe A (<50ml O_2/min/kg)

	MW	Stabw	SEM	Var.	n	p-Wert (fett, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
Alter (Jahre)						
	27,67	3,80	0,83	14,43	21	-
Körpergröße (cm)						
	182,02	6,28	1,37	39,46	21	-
Körpergewicht (kg)						
online	78,3	8,84	1,93	78,14	21	0,542
Nachatmung	78,22	8,78	1,92	77,16	21	
BMI (kg/m²)						
online	23,58	1,75	0,38	3,05	21	0,593
Nachatmung	23,56	1,75	0,38	3,07	21	
Körperfett (%)						
online	17,68	4,22	0,92	17,79	21	0,083
Nachatmung	17,33	3,74	0,82	14,01	21	
Ruheherzfrequenz (S/m)						
online	73,71	10,47	2,28	109,61	21	0,114
Nachatmung	70,33	11,62	2,54	135,13	21	
Ruhelaktat (mmol/l)						
online	0,96	0,32	0,07	0,1	21	0,215
Nachatmung	1,05	0,24	0,05	0,06	21	
Ruhe-RQ						
online	0,91	0,14	0,03	0,02	21	0,286
Nachatmung	0,95	0,14	0,03	0,02	21	
Ruhe-CK (U/l)						
online	178,19	99,29	21,67	9858	21	0,833
Nachatmung	181,14	118,51	25,86	14044	21	
Raumtemperatur (°C)						
online	20,3	0,96	0,21	0,92	21	0,871
Nachatmung	20,26	1,02	0,22	1,04	21	
Luftfeuchtigkeit (%HF)						
online	48,67	5,24	1,14	27,43	21	0,718
Nachatmung	48	5,64	1,23	31,8	21	

Lediglich die subjektive Selbsteinschätzung der maximalen Belastung anhand der Borg-Skala, im direkten Anschluß nach Beendigung der Spiroergometrie, ergibt eine signifikant stärkere Anstrengung beim Laufen mit Spirometermaske während der Online-Messung. Dies scheint aber keinen Einfluss auf die Trainingssteuerung auf Grundlage der Laktatbestimmung zu haben.

Geschwindigkeit, Herzfrequenz und Laktatproduktion weisen weder an der aerob-anaeroben Schwelle (IAS), noch bei Ausbelastung signifikante Unterschiede auf (siehe Tabelle 4).

Tab. 4: Leistungsphysiologische Parameter unter Belastungsbedingungen, Gruppe A (<50ml O_2/min/kg)

	MW	**Stabw.**	**SEM**	**Var.**	**n**	**p-Wert** (**fett**, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
VO_2peak (ml/min/kg)						
online	46,27	3,91	0,85	15,28	21	0,619
Nachatmung	45,40	7,54	1,65	56,88	21	
max. Herzfrequenz (S/m)						
online	192,71	10,04	2,19	100,81	21	0,303
Nachatmung	191,43	9,19	2,01	84,46	21	
max. Laktat (mmol/l)						
online	8,84	2,13	0,46	4,53	21	0,625
Nachatmung	8,73	2,42	0,53	5,88	21	
Borg-Skala						
online	16,71	1,27	0,28	1,61	21	**0,036**
Nachatmung	16,14	1,31	0,29	1,73	21	
Laktat IAS (mmol/l)						
online	3,49	0,74	0,16	0,55	21	0,406
Nachatmung	3,54	0,74	0,16	0,54	21	
Herzfrequenz IAS (S/min)						
online	172,4	9,80	2,14	95,95	21	0,964
Nachatmung	172,3	8,49	1,85	72,14	21	
km/h IAS						
online	10,19	1,32	0,29	1,73	21	0,052
Nachatmung	10,29	1,26	0,28	1,60	21	

3.1.2. Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg)

Auch bei Gruppe B gibt es keine signifikanten Unterschiede der physiologischen Parameter vor Testbeginn.

Lediglich bezüglich der Umgebungbedingungen ließ sich eine signifikant höhere Raumtemperatur (0,4°C) bei den Online-Messungen, bei nicht signifikanten Unterschieden bezüglich der Luftfeuchtigkeit, im Vergleich zu den Nachatmungs-Messungen darstellen (siehe Tabelle 5).

Tab. 5: Antropometrische Daten, leistungsphysilogische Parameter in Ruhe, Umgebungsbedingungen, Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg)

	MW	Stabw	SEM	Var.	n	**p-Wert** (**fett**, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
Alter (Jahre)						
	27,44	3,61	0,62	13,04	34	-
Körpergröße (cm)						
	183,54	5,93	1,02	35,16	34	-
Körpergewicht (kg)						
online	75,42	6,14	1,05	37,65	34	0,584
Nachatmung	75,34	5,93	1,02	35,11	34	
BMI (kg/m^2)						
online	22,41	1,84	0,32	3,40	34	0,695
Nachatmung	22,40	1,87	0,32	3,50	34	
Körperfett (%)						
online	13,19	2,79	0,48	7,81	34	0,538
Nachatmung	13,07	2,61	0,45	6,79	34	
Ruheherzfrequenz (S/m)						
online	64,00	8,86	1,52	78,48	34	0,610
Nachatmung	63,32	8,82	1,51	77,74	34	
Ruhelaktat (mmol/l)						
online	1,03	0,30	0,05	0,09	34	0,959
Nachatmung	1,04	0,30	0,05	0,09	34	
Ruhe-RQ						
online	0,96	0,17	0,03	0,03	34	0,862
Nachatmung	0,97	0,13	0,02	0,02	34	
Ruhe-CK (U/l)						
online	158,74	73,47	12,60	5397	34	0,458
Nachatmung	175,12	119,57	20,51	14298	34	
Raumtemperatur (°C)						
online	20,46	0,76	0,13	0,58	34	**0,017**
Nachatmung	20,06	0,85	0,14	0,71	34	
Luftfeuchtigkeit (%HF)						
online	47,47	7,70	1,32	59,35	34	0,130
Nachatmung	44,94	8,33	1,43	69,45	34	

Das wärmere Raumklima bei den Online-Messungen führt aber zu keinen signifikanten leistungsphysiologischen Differenzen im Vergleich zum Nachatmungstest. Auch die Probanden in Gruppe B erleben eine gesteigerte subjektive Anstrengung beim Laufen mit kontinuierlicher Atmung durch die Spirometermaske (siehe Tabelle 6).

Tab. 6: Leistungsphysiologische Parameter unter Belastungsbedingungen, Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg)

	MW	**Stabw.**	**SEM**	**Var.**	**n**	**p-Wert** (**fett**, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
VO_2peak (ml/min/kg)						
online	55,03	2,50	0,43	6,25	34	0,446
Nachatmung	56,01	7,13	1,22	50,84	34	
max. Herzfrequenz (S/m)						
online	190,38	7,98	1,37	63,76	34	0,205
Nachatmung	189,56	8,55	1,47	73,16	34	
max. Laktat (mmol/l)						
online	9,39	2,67	0,46	7,13	34	0,350
Nachatmung	9,18	2,44	0,42	5,96	34	
Borg-Skala						
online	17,12	1,07	0,18	1,14	34	**0,034**
Nachatmung	16,68	1,04	0,18	1,07	34	
Laktat IAS (mmol/l)						
online	3,42	0,78	0,13	0,62	34	0,485
Nachatmung	3,38	0,74	0,13	0,54	34	
Herzfrequenz IAS (S/min)						
online	173,21	8,07	1,38	65,08	34	0,074
Nachatmung	172,06	8,48	1,45	71,94	34	
km/h IAS						
online	13,13	1,91	0,33	3,66	34	0,747
Nachatmung	13,16	1,94	0,33	3,78	34	

3.1.3. Gruppe C (>60ml O_2/min/kg)

Neben den nicht signifikanten Unterschieden der Umgebungsbedingungen und einer Übereinstimmung der meisten physiologischen Daten in Ruhe, zeigt sich bei den hochtrainierten Probanden ein sigifikanter Unterschied des Ruhe-RQ`s (siehe Tabelle 7).

Tab. 7: Antropometrische Daten, leistungsphysilogische Parameter in Ruhe, Umgebungsbedingungen, Gruppe C (>60ml O_2/min/kg)

	MW	Stabw	SEM	Var.	n	p-Wert (fett, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
Alter (Jahre)						
	27,33	5,02	1,45	25,15	12	-
Körpergröße (cm)						
	181,67	4,17	1,20	17,38	12	-
Körpergewicht (kg)						
online	73,01	4,95	1,43	24,50	12	0,639
Nachatmung	73,13	4,77	1,38	22,77	12	
BMI (kg/m²)						
online	22,12	1,25	0,36	1,56	12	0,579
Nachatmung	22,16	1,32	0,38	1,73	12	
Körperfett (%)						
online	11,66	3,03	0,88	9,20	12	0,372
Nachatmung	11,53	2,71	0,78	7,36	12	
Ruheherzfrequenz (S/m)						
online	54,00	10,35	2,99	107,1	12	0,689
Nachatmung	54,75	10,35	2,99	107,11	12	
Ruhelaktat (mmol/l)						
online	0,94	0,25	0,07	0,06	12	0,314
Nachatmung	1,01	0,20	0,06	0,04	12	
Ruhe-RQ						
online	0,85	0,09	0,03	0,01	12	**0,023**
Nachatmung	0,94	0,13	0,04	0,02	12	
Ruhe-CK (U/l)						
online	204,1	133,70	38,60	17875	12	0,425
Nachatmung	183,5	103,88	29,99	10792	12	
Raumtemperatur (°C)						
online	20,27	0,87	0,25	0,76	12	0,707
Nachatmung	20,14	0,84	0,24	0,70	12	
Luftfeuchtigkeit (%HF)						
online	45,08	8,35	2,41	69,72	12	0,245
Nachatmung	41,67	8,68	2,51	75,33	12	

Die hochtrainierten Sportler der Gruppe C hatten eine signifikant erhöhte maximale Herzfrequenz bei Ausbelastung in der Online-Messung ($p<0,05$), gaben jedoch im Gegensatz zu den Guppen A und B keinen Unterschied der subjektiven Anstrengung zwischen beiden Belastungen an (siehe Tabelle 8).

Tab. 8: Leistungsphysiologische Parameter unter Belastungsbedingungen, Gruppe C (>60ml O_2/min/kg)

	MW	**Stabw.**	**SEM**	**Var.**	**n**	**p-Wert** (**fett**, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
VO_2peak (ml/min/kg)						
online	64,33	4,26	1,23	18,18	12	**0,630**
Nachatmung	65,59	6,92	2,00	47,89	12	
max. Herzfrequenz (S/m)						
online	193,42	9,25	2,67	85,54	12	**0,049**
Nachatmung	190,92	8,96	2,59	80,27	12	
max. Laktat (mmol/l)						
online	9,83	3,92	1,13	15,33	12	0,848
Nachatmung	9,93	3,79	1,10	14,40	12	
Borg-Skala						
online	17,00	1,21	0,35	1,45	12	0,551
Nachatmung	16,83	1,19	0,34	1,42	12	
Laktat IAS (mmol/l)						
online	3,24	0,74	0,21	0,55	12	0,151
Nachatmung	3,13	0,66	0,19	0,44	12	
Herzfrequenz IAS (S/min)						
online	175,75	9,55	2,76	91,11	12	0,231
Nachatmung	174,83	10,07	2,91	101,42	12	
km/h IAS						
online	15,18	1,56	0,45	2,42	12	0,539
Nachatmung	15,29	1,71	0,49	2,91	12	

3.2. Ausbelastungskriterien bei Bestimmung der VO_2max

Die Überprüfung der Ausbelastung nach subjektiven Empfinden der Probanden und anhand von objektiven leistungsphysiologischen Parametern zeigt, dass von einer Ausbelastung der drei Leistungsgruppen ausgegangen werden kann (siehe Tabellen 9-11).

3.2.1. Gruppe A (<50ml O_2/min/kg)

Tab. 9: Referenzwerte der Ausbelastung [28, 57, 73, 101]. Gruppe A (<50ml O_2/min/kg), n=21

	Referenzwerte	Online (MW)	Nachatmung (MW)
		fett wenn Ausbelastungskriterium erfüllt nach [28, 57, 73, 101]	
levelling off	O_2-Anstieg <150ml/min	370	*
Atemfrequenz	>50/min	46	*
max. Herzfrequenz (220-Lebensalter)	192 S/min	**193**	191
max. Laktatkonzentration	8-10mmol/l	**8,84**	**8,73**
Borg-RPE-Skala	>16	**16,71**	**16,14**
max. Respiratorischer Quotient (VCO_2/VO_2)	>1,05-1,15	**1,05**	*
max. Atemequivalent (VE/VO_2)	>30-35	**33,68**	*

3.2.2. Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg)

Tab. 10: Referenzwerte der Ausbelastung [28, 57, 73, 101]. Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg), n=34

	Referenzwerte	Online (MW)	Nachatmung (MW)
		fett wenn Ausbelastungskriterium erfüllt nach [28, 57, 73, 101]	
levelling off	O_2-Anstieg <150ml/min	322	*
Atemfrequenz	>50/min	**51**	*
max. Herzfrequenz (220-Lebensalter)	193 S/min	190	190
max. Laktatkonzentration	8-10mmol/l	**9,39**	**9,18**
Borg-RPE-Skala	>16	**17,12**	**16,68**
max. Respiratorischer Quotient (VCO_2/VO_2)	>1,05-1,15	**1,06**	*
max. Atemequivalent (VE/VO_2)	>30-35	**33,79**	*

3.2.3. Gruppe C (>60ml O_2/min/kg)

Tab. 11: Referenzwerte der Ausbelastung [28, 57, 73, 101]. Gruppe C (>60ml O_2/min/kg), n=12

	Referenzwerte	Online (MW)	Nachatmung (MW)
		fett wenn Ausbelastungskriterium erfüllt nach [28, 57, 73, 101]	
levelling off	O_2-Anstieg <150ml/min	330	*
Atemfrequenz	>50/min	**54**	*
max. Herzfrequenz (220-Lebensalter)	193 S/min	**193**	191
max. Laktatkonzentration	8-10mmol/l	**9,83**	**9,93**
Borg-RPE-Skala	>16	**17,0**	**16,83**
max. Respiratorischer Quotient (VCO_2/VO_2)	>1,05-1,15	1,00	*
max. Atemequivalent (VE/VO_2)	>30-35	**31,61**	*

* = Wert konnte nicht bestimmt werden, da es sich um Mittelwerte der letzten 30/ bzw. 60 Belastungssekunden handelte, die bei der Nachatmungsmethode nicht erhoben werden können.

3.3. Vergleich VO_2peak: Online-Messung (3-sek-Intervalle) vs. Retroextrapolation (20-sek-Intervalle)

In Kapitel 3.3 wird aufeinanderfolgend für die Gruppen A, B und C die Auswertung der O_2-Werte nach Ausbelastung mit der von Léger et al. validierten Extrapolationsmethode dargestellt. Die O_2-Werte sind zu diesem Zweck auf 20-Sekunden-Intervalle geglättet und führen bei der monoexponenetiellen retrograden Extrapolation in allen drei Gruppen zu nicht signifikanten Unterschieden gegenüber der gemessenen VO_2peak, d.h. des O_2-Mittelwertes der letzten 30 Belastungssekunden ($p>0,05$; siehe Tabellen 12-14).

3.3.1. Gruppe A (<50ml O_2/min/kg)

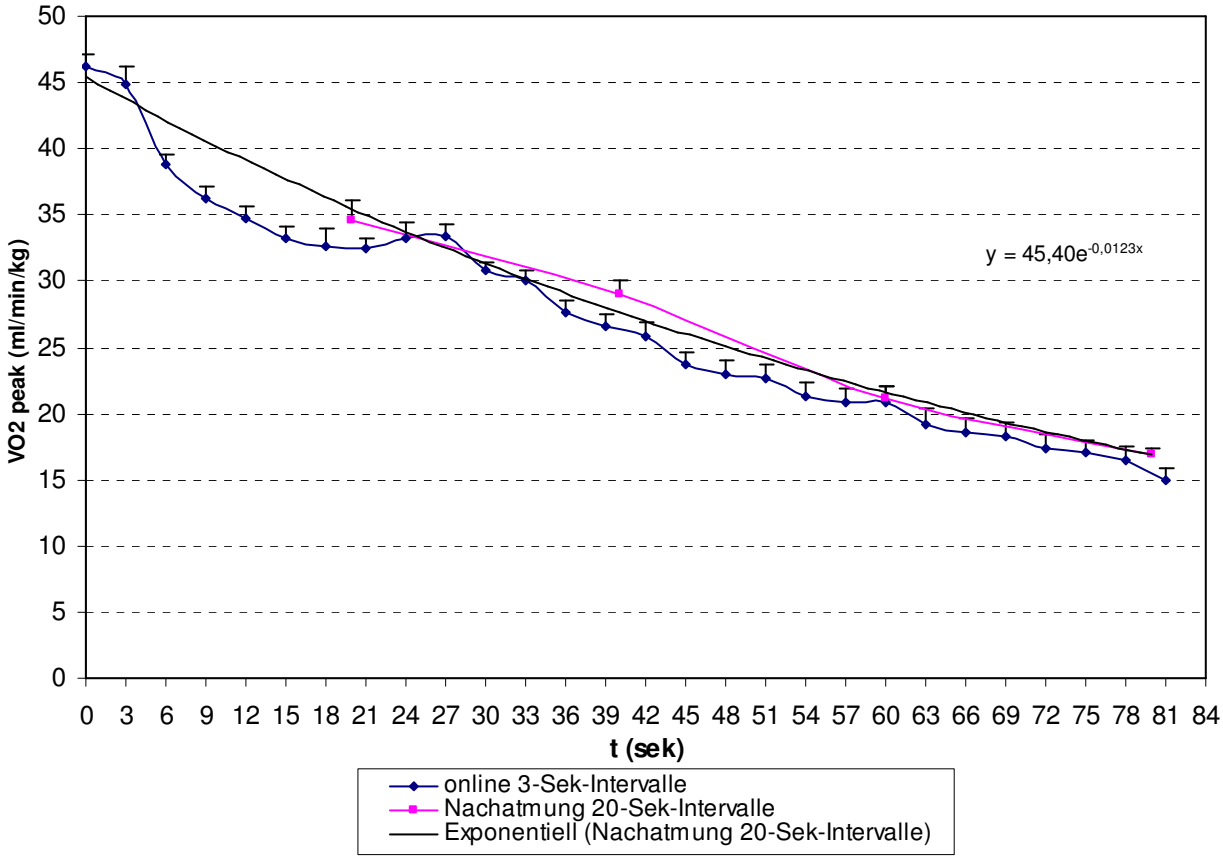


Abb. 8: VO_2 peak Online-Messung und retroextrapoliert nach Léger, Gruppe A (<50ml O_2/min/kg)

Tab. 12: VO_2 peak Online-Messung und retroextrapoliert nach Léger, Gruppe A (<50ml O_2/min/kg)

	MW	Stabw	SEM	Var.	n	p-Wert (**fett**, falls p<0,05)
VO_2 peak (ml/min/kg)						t-Paar-Test
online	46,27	3,91	0,85	15,28	21	
Nachatmung *retroextrapoliert nach Léger*	45,40	7,54	1,65	56,88	21	0,619
max. Belastungsstufe (km/h)						
online	13,05	1,36	0,30	1,85	21	
Nachatmung	13,05	1,36	0,30	1,85	21	-

3.3.2. Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg)

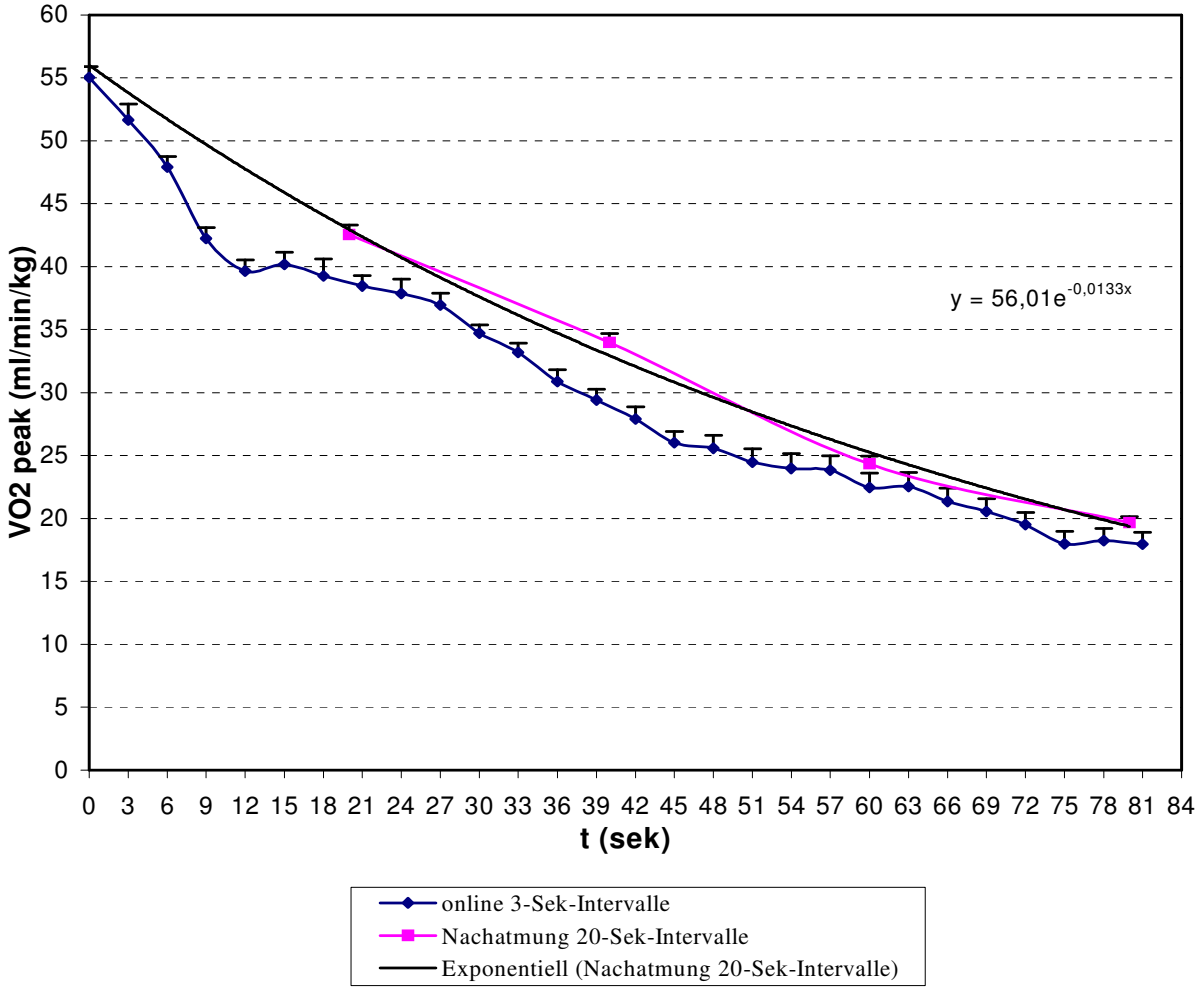


Abb. 9: VO_2 peak Online-Messung und retroextrapoliert nach Léger, Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg)

Tab. 13: VO_2 peak Online-Messung und retroextrapoliert nach Léger, Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg)

	MW	Stabw	SEM	Var.	n	p-Wert (fett, falls p<0,05)
VO_2 peak (ml/min/kg)						t-Paar Test
online	55,03	2,50	0,43	6,25	34	
Nachatmung *retroextrapoliert nach Léger*	56,01	7,13	1,22	50,84	34	0,446
max. Belastungsstufe (km/h)						
online	16,18	1,59	0,32	2,51	34	
Nachatmung	16,18	1,59	0,32	2,51	34	-

3.3.3. Gruppe C (>60ml O_2/min/kg)

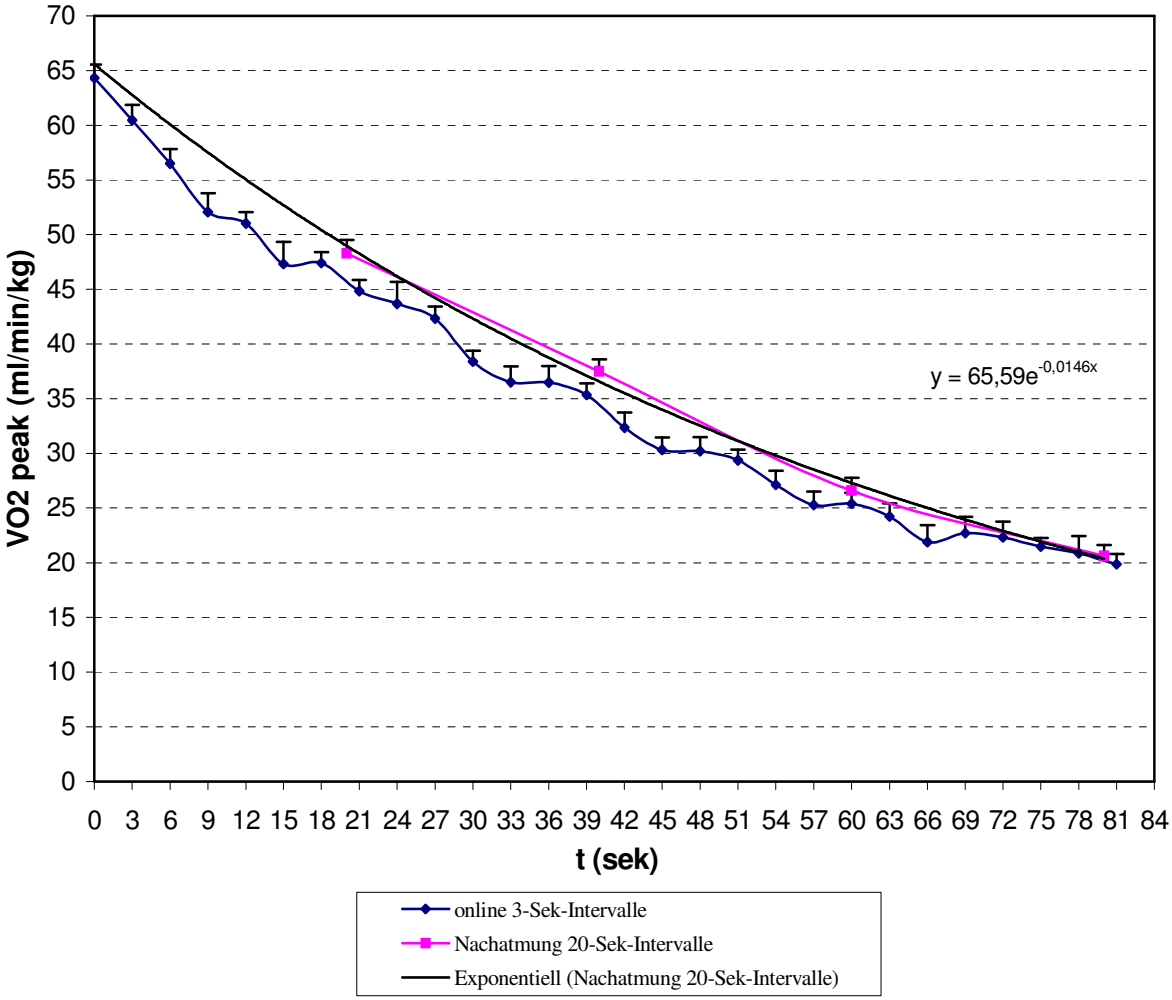


Abb. 10: VO_2 peak Online-Messung und retroextrapoliert nach Léger, Gruppe C (>60ml O_2/min/kg)

Tab. 14: VO_2 peak Online-Messung und retroextrapoliert nach Léger, Gruppe C (>60ml O_2/min/kg)

	MW	Stabw	SEM	Var.	n	p-Wert (fett, falls p<0,05)
VO_2 peak (ml/min/kg)						t-Paar Test
online	64,33	4,26	1,23	18,18	12	
Nachatmung *retroextrapoliert nach Léger*	65,59	6,92	2,00	47,89	12	0,630
max. Belastungsstufe (km/h)						
online	18,17	1,59	0,46	2,51	12	
Nachatmung	18,17	1,59	0,46	2,51	12	-

3.4. Vergleich VO_2peak: Online-Messung (3-sek-Intervalle) vs. Retroextrapolation (3-sek-Intervalle)

Es stellt sich bis auf wenige Ausreißer kein signifikanter Messunterschied des Spirometriegerätes beim paarweisen Vergleich der gemittelten 3-Sekunden-Intervalle im Verlauf der Nachbelastung dar ($p>0,05$). Sowohl nach Ausbelastung als auch auf den submaximalen Belastungsstufen zeigt sich eine nahezu identische Kinetik der O_2-Kurven (Vergleich 3-Sekunden-Intervall online/Nachatmung = *).

Die Durchführung einer monoexponentiellen retrograden Extrapolation anhand derselben O_2-Werte nach Ausbelastung wie in Kapitel 3.3, dieses mal in 3-Sekunden-Intervalle gemittelt, führt jedoch in allen drei Probandengruppen zu signifikanten Unterschätzungen ($p<0,001$) der errechneten VO_2peak gegenüber der gemessenen VO_2peak (Vergleich errechnete VO_2peak/gemessene VO_2peak = +).

Diese Unterschätzung nimmt auf den submaximalen Belastungsstufen deutlich zu.

3.4.1. Gruppe A (<50ml O_2/min/kg)

signifikant (<0,05); Vergleich 3-Sekunden-Intervall online/Nachatmung = *

signifikant (<0,05); Vergleich errechnete VO_2peak/gemessene VO_2peak = +

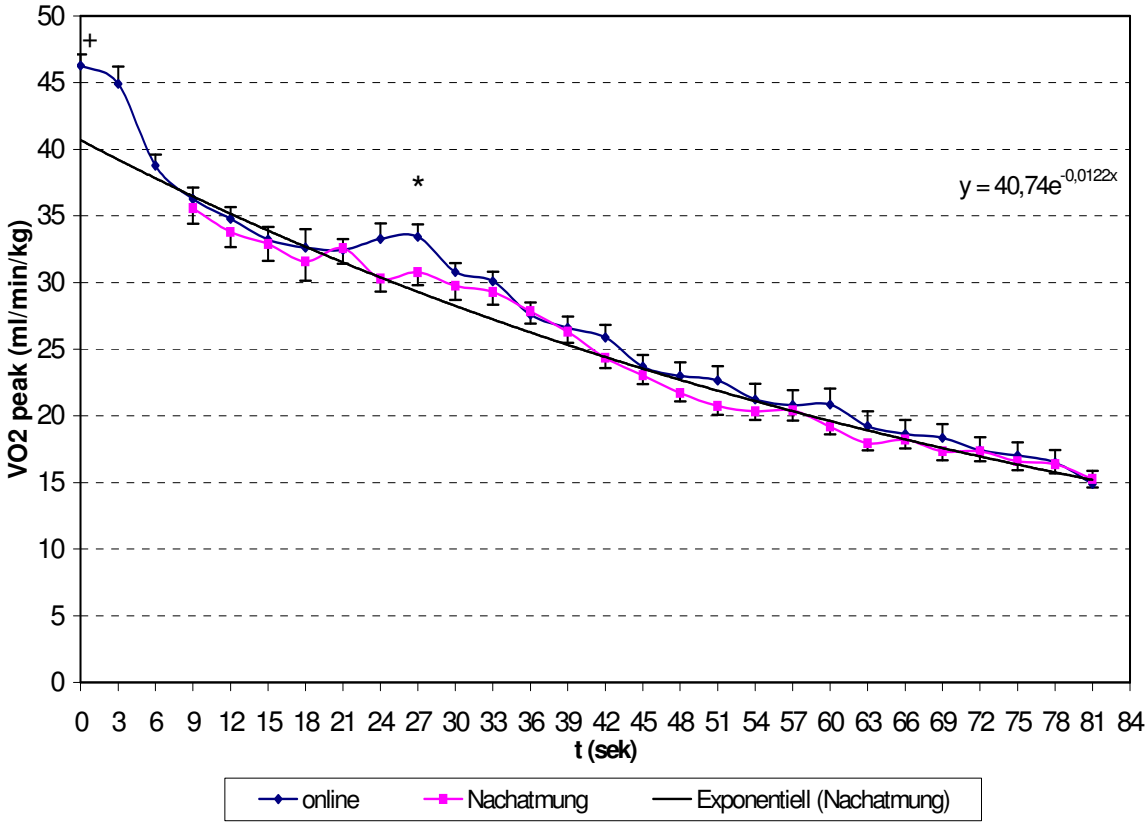


Abb. 11: Ausbelastung, Gruppe A (<50ml O_2/min/kg) ; durchschnittlich 13,05±1,36 km/h

signifikant (<0,05); Vergleich 3-Sekunden-Intervall online/Nachatmung = *

signifikant (<0,05); Vergleich errechnete VO_2peak/gemessene VO_2peak = +

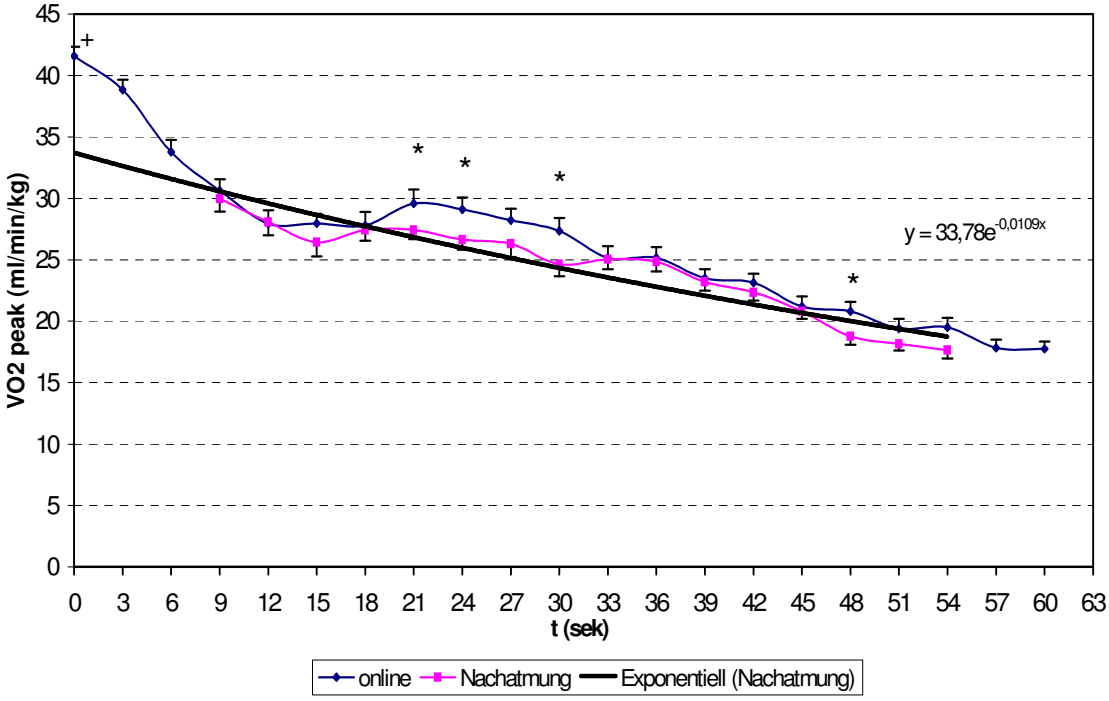


Abb. 12: 1.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe A (<50ml O_2/min/kg), durchschnittlich 11,05±1,36 km/h

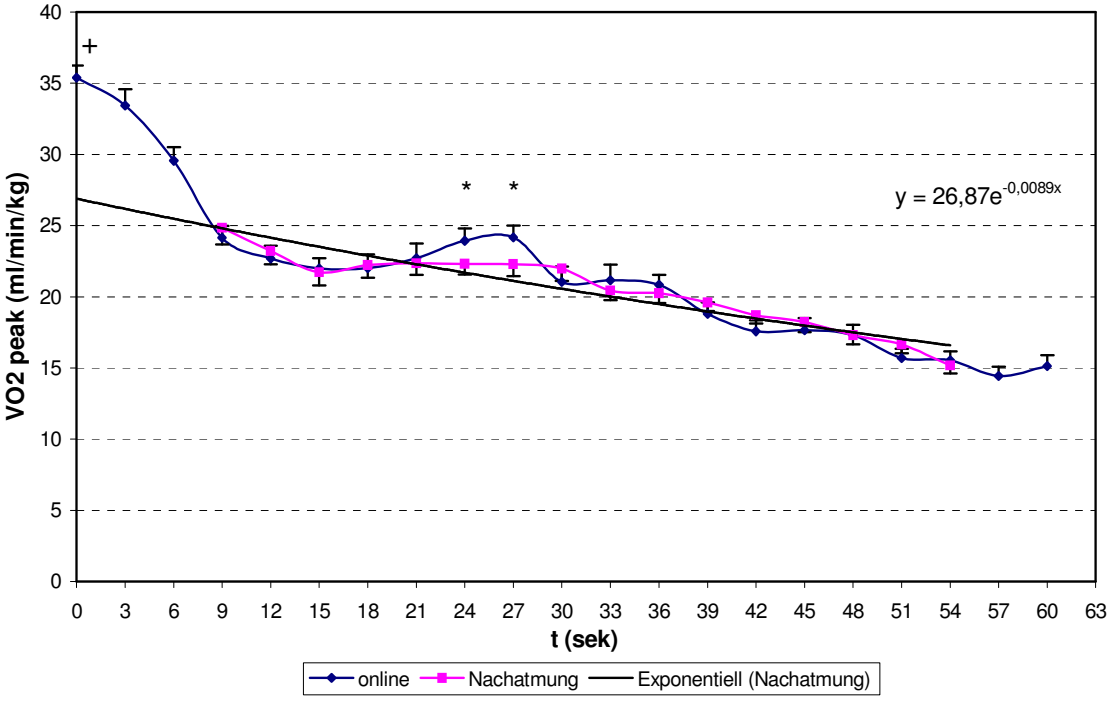


Abb. 13: 2.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe A (<50ml O_2/min/kg), durchschnittlich 9,05±1,36 km/h

Tab. 15: Ausbelastung Gruppe A (<50ml O_2/min/kg), durchschnittlich 13,05±1,36 km/h

		MW	Stabw.	SEM	Var.	n	p-Wert (fett, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
sek. 0	online	46,27	3,91	0,85	15,28	21	**<0,001**
	Nachatmung	40,74	6,53	1,42	42,62	21	
sek. 3	online	44,90	5,85	1,28	34,26	21	-
	Nachatmung	-	-	-	-	21	
sek. 6	online	38,77	3,84	0,84	14,72	21	-
	Nachatmung	-	-	-	-	21	
sek. 9	online	36,28	3,92	0,86	15,36	21	0,549
	Nachatmung	35,58	5,32	1,16	28,30	21	
sek. 12	online	34,78	4,05	0,88	16,37	21	0,384
	Nachatmung	33,79	5,18	1,13	26,80	21	
sek. 15	online	33,22	4,41	0,96	19,44	21	0,793
	Nachatmung	32,90	5,77	1,26	33,32	21	
sek. 18	online	32,63	6,21	1,35	38,55	21	0,489
	Nachatmung	31,59	6,65	1,45	44,24	21	
sek. 21	online	32,43	3,80	0,83	14,42	21	0,897
	Nachatmung	32,58	5,34	1,16	28,49	21	
sek. 24	online	33,27	5,36	1,17	28,71	21	0,050
	Nachatmung	30,29	4,36	0,95	19,00	21	
sek.27	online	33,42	4,30	0,94	18,45	21	**0,029**
	Nachatmung	30,77	4,40	0,96	19,32	21	
sek. 30	online	30,79	3,06	0,67	9,39	21	0,359
	Nachatmung	29,75	4,84	1,06	23,46	21	
sek. 33	online	30,09	3,37	0,74	11,38	21	0,787
	Nachatmung	29,28	4,31	0,94	18,62	21	
sek. 36	online	27,59	4,23	0,92	17,90	21	0,854
	Nachatmung	27,84	4,19	0,91	17,54	21	
sek. 39	online	26,59	4,00	0,87	16,04	21	0,813
	Nachatmung	26,31	3,82	0,83	14,56	21	
sek. 42	online	25,87	4,42	0,97	19,56	21	0,265
	Nachatmung	24,34	3,43	0,75	11,78	21	
sek. 45	online	23,69	4,04	0,88	16,36	21	0,591
	Nachatmung	23,04	3,04	0,66	9,27	21	
sek. 48	online	22,99	4,65	1,02	21,67	21	0,353
	Nachatmung	21,71	2,89	0,63	8,34	21	
sek. 51	online	22,66	4,87	1,06	23,78	21	0,176
	Nachatmung	20,74	3,02	0,66	9,10	21	
sek. 54	online	21,24	5,38	1,18	29,04	21	0,594
	Nachatmung	20,34	2,92	0,64	8,51	21	
sek. 57	online	20,80	5,18	1,13	26,85	21	0,793
	Nachatmung	20,41	3,40	0,74	11,58	21	
sek. 60	online	20,86	5,41	1,18	29,32	21	0,209
	Nachatmung	19,18	2,55	0,56	6,52	21	
sek. 63	online	19,24	4,96	1,08	24,59	21	0,290
	Nachatmung	17,94	2,46	0,54	6,05	21	
sek. 66	online	18,64	4,83	1,05	23,34	21	0,729
	Nachatmung	18,21	2,98	0,65	8,89	21	
sek.69	online	18,35	4,72	1,03	22,28	21	0,454
	Nachatmung	17,33	3,09	0,67	9,56	21	
sek. 72	online	17,44	4,42	0,96	19,53	21	0,935
	Nachatmung	17,33	3,45	0,75	11,89	21	
sek. 75	online	17,03	4,49	0,98	20,20	21	0,719
	Nachatmung	16,58	3,07	0,67	9,43	21	
sek. 78	online	16,50	4,36	0,95	19,06	21	0,924
	Nachatmung	16,36	3,11	0,68	9,66	21	
sek. 81	online	14,91	4,36	0,95	19,03	21	0,794
	Nachatmung	15,26	2,87	0,63	8,24	21	

Tab. 16: 1.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe A (<50ml O_2/min/kg), durchschnittlich 11,05±1,36 km/h

		MW	Stabw.	SEM	Var.	n	p-Wert (fett, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
sek. 0	online	41,58	3,52	0,77	12,38	21	**<0,001**
	Nachatmung	33,78	6,35	1,38	40,26	21	
sek. 3	online	38,84	3,73	0,81	13,93	21	-
	Nachatmung	-	-	-	-	21	
sek. 6	online	33,79	4,44	0,97	19,72	21	-
	Nachatmung	-	-	-	-	21	
sek. 9	online	30,62	4,33	0,94	18,73	21	0,627
	Nachatmung	30,00	4,99	1,09	24,93	21	
sek. 12	online	27,93	5,08	1,11	25,84	21	0,917
	Nachatmung	28,09	4,99	1,09	24,95	21	
sek. 15	online	27,97	3,54	0,77	12,50	21	0,174
	Nachatmung	26,42	5,30	1,16	28,07	21	
sek. 18	online	27,79	5,09	1,11	25,96	21	0,752
	Nachatmung	27,44	4,08	0,89	16,66	21	
sek. 21	online	29,58	5,20	1,14	27,09	21	**0,040**
	Nachatmung	27,44	3,47	0,76	12,04	21	
sek. 24	online	29,11	4,44	0,97	19,68	21	**0,023**
	Nachatmung	26,64	3,74	0,82	14,00	21	
sek.27	online	28,20	4,39	0,96	19,24	21	0,165
	Nachatmung	26,30	4,88	1,07	23,83	21	
sek. 30	online	27,35	4,79	1,05	22,97	21	**0,025**
	Nachatmung	24,63	4,51	0,98	20,33	21	
sek. 33	online	25,15	4,41	0,96	19,49	21	0,929
	Nachatmung	25,05	3,70	0,81	13,69	21	
sek. 36	online	25,17	3,93	0,86	15,47	21	0,780
	Nachatmung	24,84	3,69	0,81	13,63	21	
sek. 39	online	23,48	3,36	0,73	11,29	21	0,760
	Nachatmung	23,20	3,27	0,71	10,69	21	
sek. 42	online	23,13	3,39	0,74	11,51	21	0,363
	Nachatmung	22,35	2,97	0,65	8,81	21	
sek. 45	online	21,18	3,77	0,82	14,20	21	0,691
	Nachatmung	20,80	2,83	0,62	8,00	21	
sek. 48	online	20,80	3,52	0,77	12,38	21	**0,041**
	Nachatmung	18,77	3,06	0,67	9,39	21	
sek. 51	online	19,42	3,55	0,77	12,59	21	0,185
	Nachatmung	18,15	2,49	0,54	6,20	21	
sek. 54	online	19,51	3,55	0,77	12,60	21	0,073
	Nachatmung	17,66	3,13	0,68	9,78	21	
sek. 57	online	17,84	3,03	0,66	9,20	21	-
	Nachatmung	-	-	-	-	21	
sek. 60	online	17,74	2,75	0,60	7,56	21	-
	Nachatmung	-	-	-	-	21	

Tab. 17: 2.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe A (<50ml O_2/min/kg), durchschnittlich 9,05±1,36 km/h

		MW	Stabw.	SEM	Var.	n	p-Wert (fett, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
sek. 0	online	35,39	3,97	0,87	15,73	21	**0,001**
	Nachatmung	26,87	5,12	1,12	26,22	21	
sek. 3	online	33,43	5,19	1,13	26,95	21	-
	Nachatmung	-	-	-	-	21	
sek. 6	online	29,55	4,31	0,94	18,60	21	-
	Nachatmung	-	-	-	-	21	
sek. 9	online	24,14	3,81	0,83	14,55	21	0,519
	Nachatmung	24,83	5,32	1,16	28,26	21	
sek. 12	online	22,68	4,04	0,88	16,32	21	0,645
	Nachatmung	23,20	4,18	0,91	17,45	21	
sek. 15	online	21,98	3,31	0,72	10,99	21	0,785
	Nachatmung	21,71	4,24	0,93	18,01	21	
sek. 18	online	22,01	4,44	0,97	19,68	21	0,876
	Nachatmung	22,23	4,06	0,89	16,51	21	
sek. 21	online	22,70	4,73	1,03	22,36	21	0,759
	Nachatmung	22,34	3,72	0,81	13,81	21	
sek. 24	online	23,93	3,92	0,86	15,38	21	**0,0442**
	Nachatmung	22,30	3,48	0,76	12,12	21	
sek.27	online	24,16	3,92	0,85	15,33	21	**0,0468**
	Nachatmung	22,28	3,78	0,82	14,26	21	
sek. 30	online	21,04	4,90	1,07	23,96	21	0,565
	Nachatmung	21,97	3,93	0,86	15,48	21	
sek. 33	online	21,14	5,10	1,11	25,98	21	0,591
	Nachatmung	20,43	3,04	0,66	9,26	21	
sek. 36	online	20,82	3,26	0,71	10,63	21	0,435
	Nachatmung	20,24	3,13	0,68	9,81	21	
sek. 39	online	18,79	3,71	0,81	13,79	21	0,443
	Nachatmung	19,60	2,74	0,60	7,50	21	
sek. 42	online	17,57	3,59	0,78	12,86	21	0,250
	Nachatmung	18,70	2,69	0,59	7,21	21	
sek. 45	online	17,66	3,79	0,83	14,35	21	0,588
	Nachatmung	18,22	3,25	0,71	10,54	21	
sek. 48	online	17,29	3,44	0,75	11,83	21	0,993
	Nachatmung	17,30	2,93	0,64	8,58	21	
sek. 51	online	15,68	3,06	0,67	9,34	21	0,175
	Nachatmung	16,63	2,80	0,61	7,84	21	
sek. 54	online	15,52	2,86	0,62	8,17	21	0,536
	Nachatmung	15,17	2,64	0,58	6,95	21	
sek. 57	online	14,42	2,98	0,65	8,89	21	-
	Nachatmung	-	-	-	-	21	
sek. 60	online	15,12	3,47	0,76	12,01	21	-
	Nachatmung	-	-	-	-	21	

3.4.2. Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg)

signifikant (<0,05); Vergleich 3-Sekunden-Intervall online/Nachatmung = *

signifikant (<0,05); Vergleich errechnete VO_2peak/gemessene VO_2peak = +

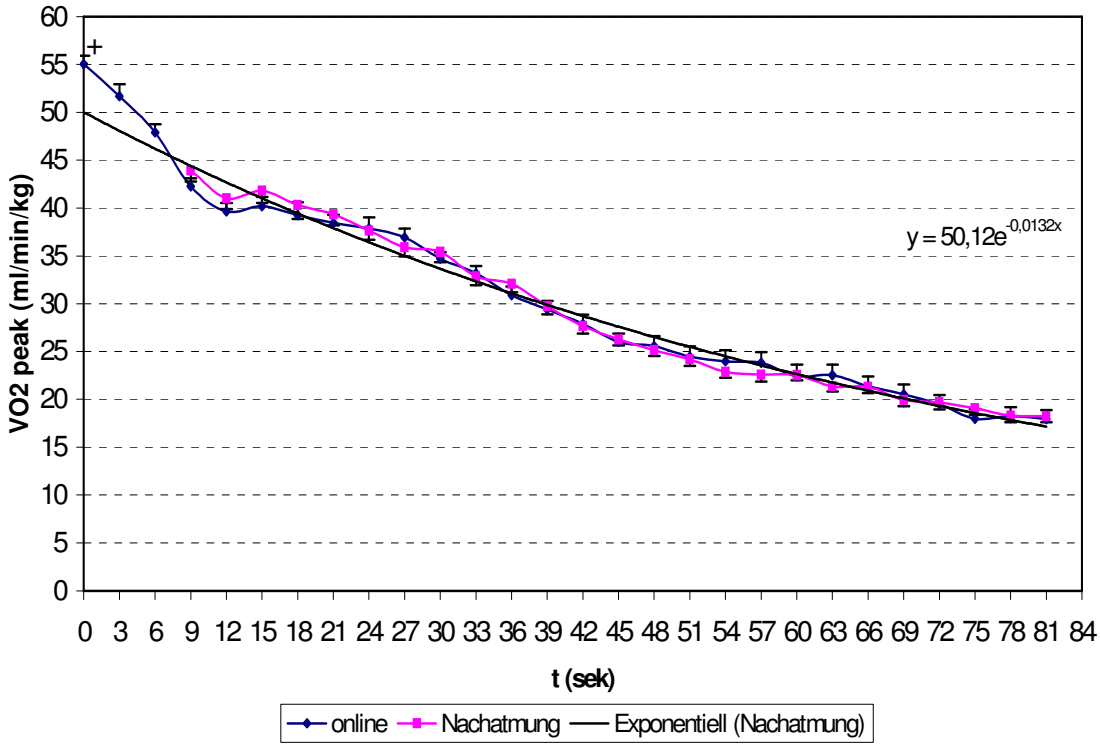


Abb. 14: Ausbelastung Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 16,18±1,87 km/h

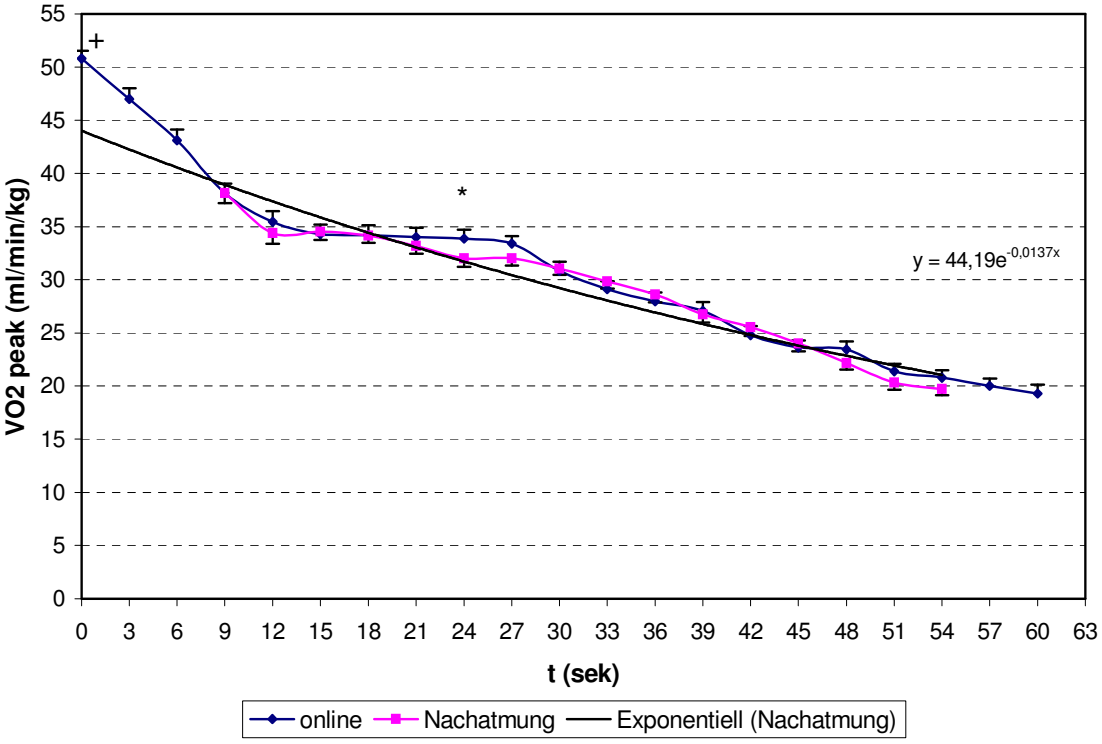


Abb. 15: 1. Intervall vor Ausbelastung, Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 14,18±1,87 km/h

signifikant (<0,05); Vergleich 3-Sekunden-Intervall online/Nachatmung = *

signifikant (<0,05); Vergleich errechnete VO_2peak/gemessene VO_2peak = +

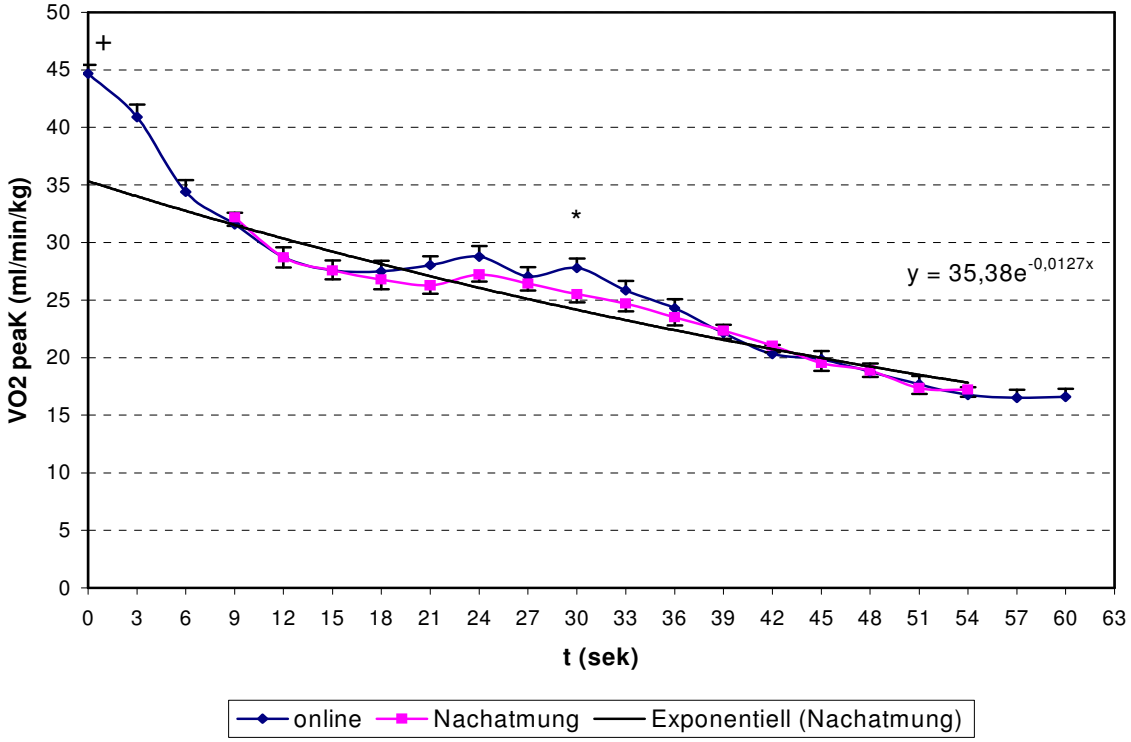


Abb. 16: 2.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 12,18±1,87 km/h

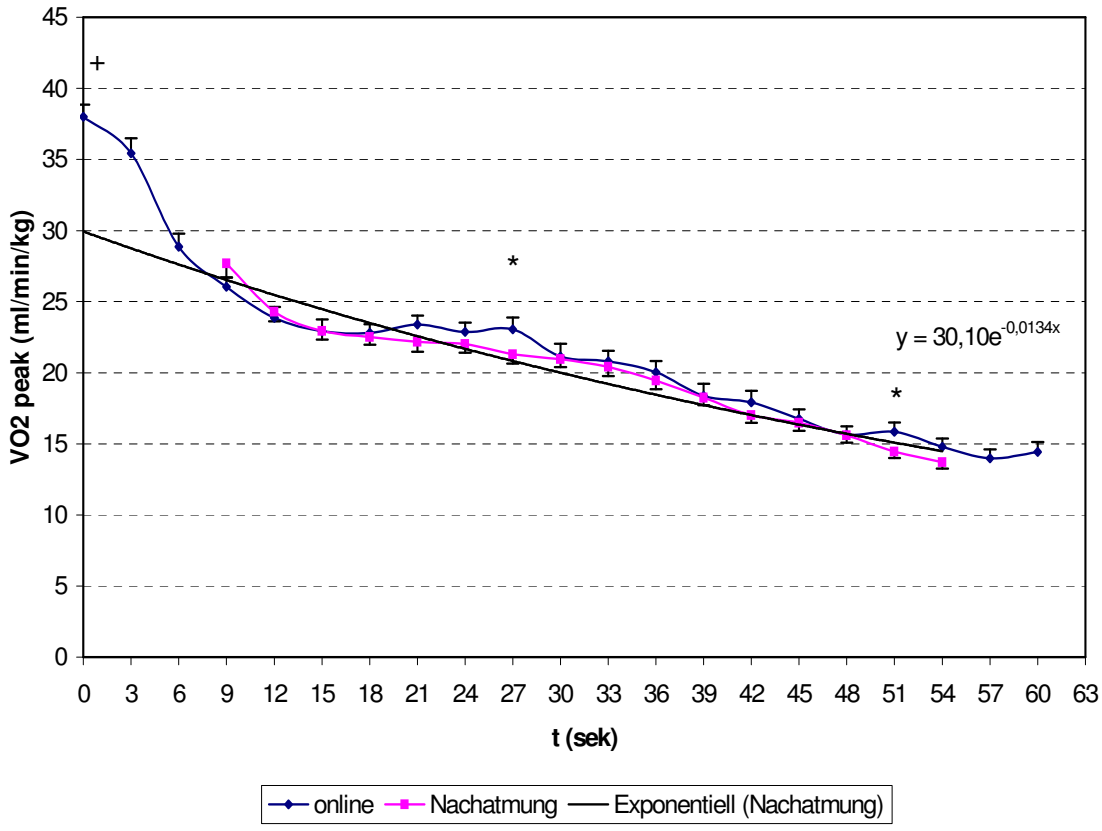


Abb. 17: 3.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 10,18±1,87 km/h

Tab. 18: Ausbelastung Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 16,18±1,87 km/h

		MW	Stabw.	SEM	Var.	n	p-Wert (fett, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
sek. 0	online	55,03	2,50	0,43	6,25	34	**<0,001**
	Nachatmung	50,12	6,16	1,06	37,93	34	
sek. 3	online	51,66	5,30	0,91	28,11	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	
sek. 6	online	47,91	5,67	0,97	32,17	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	
sek. 9	online	42,24	4,72	0,81	22,27	34	0,131
	Nachatmung	43,93	5,98	1,03	35,73	34	
sek. 12	online	39,64	7,52	1,29	56,53	34	0,307
	Nachatmung	41,01	4,72	0,81	22,25	34	
sek. 15	online	40,19	4,26	0,73	18,17	34	0,132
	Nachatmung	41,79	5,29	0,91	27,98	34	
sek. 18	online	39,25	4,45	0,76	19,85	34	0,332
	Nachatmung	40,31	5,05	0,87	25,51	34	
sek. 21	online	38,46	4,37	0,75	19,13	34	0,358
	Nachatmung	39,35	4,08	0,70	16,66	34	
sek. 24	online	37,86	4,90	0,84	24,05	34	0,819
	Nachatmung	37,62	4,81	0,82	23,12	34	
sek.27	online	36,93	4,76	0,82	22,65	34	0,382
	Nachatmung	35,88	5,51	0,95	30,37	34	
sek. 30	online	34,70	4,74	0,81	22,45	34	0,536
	Nachatmung	35,41	5,09	0,87	25,93	34	
sek. 33	online	33,19	3,69	0,63	13,65	34	0,737
	Nachatmung	32,86	4,52	0,77	20,41	34	
sek. 36	online	30,88	3,15	0,54	9,91	34	0,201
	Nachatmung	32,09	4,80	0,82	23,06	34	
sek. 39	online	29,39	4,11	0,70	16,86	34	0,697
	Nachatmung	29,73	4,01	0,69	16,05	34	
sek. 42	online	27,89	4,35	0,75	18,90	34	0,793
	Nachatmung	27,65	4,20	0,72	17,68	34	
sek. 45	online	26,00	3,82	0,66	14,63	34	0,765
	Nachatmung	26,29	4,33	0,74	18,77	34	
sek. 48	online	25,57	3,89	0,67	15,10	34	0,593
	Nachatmung	25,15	3,91	0,67	15,26	34	
sek. 51	online	24,47	4,29	0,74	18,37	34	0,720
	Nachatmung	24,17	4,16	0,71	17,30	34	
sek. 54	online	23,97	4,56	0,78	20,75	34	0,214
	Nachatmung	22,90	3,66	0,63	13,41	34	
sek. 57	online	23,83	4,63	0,79	21,41	34	0,253
	Nachatmung	22,59	4,02	0,69	16,18	34	
sek. 60	online	22,44	4,61	0,79	21,23	34	0,898
	Nachatmung	22,53	3,50	0,60	12,27	34	
sek. 63	online	22,54	4,55	0,78	20,72	34	0,988
	Nachatmung	21,36	3,41	0,58	11,60	34	
sek. 66	online	21,35	4,64	0,80	21,55	34	0,955
	Nachatmung	21,29	4,28	0,73	18,32	34	
sek.69	online	20,53	3,97	0,68	15,80	34	0,517
	Nachatmung	19,95	4,23	0,73	17,92	34	
sek. 72	online	19,50	3,22	0,55	10,36	34	0,812
	Nachatmung	19,68	3,76	0,64	14,13	34	
sek. 75	online	17,98	3,43	0,59	11,75	34	0,149
	Nachatmung	19,08	3,72	0,64	13,81	34	
sek. 78	online	18,23	4,00	0,69	16,01	34	0,921
	Nachatmung	18,31	2,89	0,50	8,37	34	
sek. 81	online	17,94	4,34	0,74	18,85	34	0,715
	Nachatmung	18,24	3,31	0,57	10,94	34	

Tab. 19: 1.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 14,18±1,87 km/h

		MW	Stabw.	SEM	Var.	n	p-Wert (fett, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
sek. 0	online	50,81	4,32	0,74	18,64	34	**<0,001**
	Nachatmung	44,19	6,15	1,05	37,77	34	
sek. 3	online	46,99	5,89	1,01	34,66	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	
sek. 6	online	43,11	5,78	0,99	33,44	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	
sek. 9	online	38,17	5,14	0,88	26,43	34	0,990
	Nachatmung	38,16	5,55	0,95	30,79	34	
sek. 12	online	35,43	5,90	1,01	34,78	34	0,383
	Nachatmung	34,38	5,87	1,01	34,42	34	
sek. 15	online	34,30	5,22	0,90	27,26	34	0,811
	Nachatmung	34,52	4,55	0,78	20,70	34	
sek. 18	online	34,19	5,56	0,95	30,92	34	0,971
	Nachatmung	34,16	4,14	0,71	17,15	34	
sek. 21	online	34,01	5,17	0,89	26,78	34	0,305
	Nachatmung	33,16	4,21	0,72	17,74	34	
sek. 24	online	33,88	4,75	0,81	22,56	34	**0,016**
	Nachatmung	32,01	4,68	0,80	21,93	34	
sek.27	online	33,40	4,10	0,70	16,81	34	0,155
	Nachatmung	32,02	4,04	0,69	16,33	34	
sek. 30	online	30,85	4,97	0,85	24,73	34	0,269
	Nachatmung	31,05	3,34	0,57	11,16	34	
sek. 33	online	29,10	4,41	0,76	19,47	34	0,315
	Nachatmung	29,82	3,80	0,65	14,41	34	
sek. 36	online	27,96	4,82	0,83	23,28	34	0,495
	Nachatmung	28,63	4,47	0,77	20,01	34	
sek. 39	online	27,06	4,98	0,85	24,77	34	0,756
	Nachatmung	26,75	4,46	0,76	19,87	34	
sek. 42	online	24,79	5,01	0,86	25,15	34	0,423
	Nachatmung	25,55	4,97	0,85	24,74	34	
sek. 45	online	23,64	3,92	0,67	15,38	34	0,631
	Nachatmung	24,01	4,35	0,75	18,88	34	
sek. 48	online	23,43	4,43	0,76	19,59	34	0,110
	Nachatmung	22,19	3,79	0,65	14,38	34	
sek. 51	online	21,39	4,14	0,71	17,13	34	0,150
	Nachatmung	20,32	3,83	0,66	14,66	34	
sek. 54	online	20,80	4,01	0,69	16,07	34	0,165
	Nachatmung	19,73	3,48	0,60	12,10	34	
sek. 57	online	20,01	4,08	0,70	16,67	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	
sek. 60	online	19,30	4,83	0,83	23,36	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	

Tab. 20: 2.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 12,18±1,87 km/h

		MW	Stabw.	SEM	Var.	n	p-Wert (**fett**, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
sek. 0	online	44,67	4,32	0,74	18,69	34	**<0,001**
	Nachatmung	35,38	5,35	0,92	28,65	34	
sek. 3	online	40,89	6,36	1,09	40,51	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	
sek. 6	online	34,39	6,03	1,03	36,37	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	
sek. 9	online	31,57	5,97	1,02	35,68	34	0,552
	Nachatmung	32,19	4,29	0,74	18,44	34	
sek. 12	online	28,73	4,90	0,84	24,05	34	0,984
	Nachatmung	28,71	5,02	0,86	25,16	34	
sek. 15	online	27,57	5,11	0,88	26,12	34	0,987
	Nachatmung	27,58	4,48	0,77	20,05	34	
sek. 18	online	27,49	5,42	0,93	29,33	34	0,442
	Nachatmung	26,78	4,81	0,83	23,14	34	
sek. 21	online	28,05	4,28	0,73	18,34	34	0,050
	Nachatmung	26,28	4,32	0,74	18,65	34	
sek. 24	online	28,76	5,42	0,93	29,35	34	0,095
	Nachatmung	27,23	3,68	0,63	13,53	34	
sek.27	online	27,05	4,80	0,82	23,06	34	0,465
	Nachatmung	26,44	3,55	0,61	12,59	34	
sek. 30	online	27,78	4,75	0,81	22,57	34	**0,006**
	Nachatmung	25,51	4,02	0,69	16,15	34	
sek. 33	online	25,83	4,74	0,81	22,48	34	0,234
	Nachatmung	24,71	3,94	0,68	15,55	34	
sek. 36	online	24,28	4,61	0,79	21,25	34	0,368
	Nachatmung	23,51	4,16	0,71	17,27	34	
sek. 39	online	22,15	4,13	0,71	17,09	34	0,820
	Nachatmung	22,35	4,16	0,71	17,28	34	
sek. 42	online	20,31	4,53	0,78	20,53	34	0,337
	Nachatmung	21,04	3,24	0,56	10,52	34	
sek. 45	online	19,85	4,36	0,75	19,04	34	0,698
	Nachatmung	19,53	3,98	0,68	15,84	34	
sek. 48	online	18,78	4,16	0,71	17,32	34	0,864
	Nachatmung	18,89	3,28	0,56	10,76	34	
sek. 51	online	17,68	4,27	0,73	18,26	34	0,680
	Nachatmung	17,37	3,02	0,52	9,12	34	
sek. 54	online	16,77	3,87	0,66	14,99	34	0,623
	Nachatmung	17,22	3,59	0,62	12,89	34	
sek. 57	online	16,51	4,13	0,71	17,03	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	
sek. 60	online	16,60	4,16	0,71	17,29	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	

Tab. 21: 3.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 10,18±1,87 km/h

		MW	Stabw.	SEM	Var.	n	p-Wert (**fett**, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
sek. 0	online	37,99	5,02	0,86	25,21	34	**<0,001**
	Nachatmung	30,10	5,69	0,98	32,37	34	
sek. 3	online	35,44	6,18	1,06	38,14	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	
sek. 6	online	28,86	5,33	0,91	28,43	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	
sek. 9	online	26,04	3,84	0,66	14,78	34	0,122
	Nachatmung	27,70	5,69	0,98	32,42	34	
sek. 12	online	23,86	4,52	0,78	20,46	34	0,610
	Nachatmung	24,30	3,99	0,68	15,93	34	
sek. 15	online	22,93	4,84	0,83	23,38	34	0,991
	Nachatmung	22,94	3,52	0,60	12,37	34	
sek. 18	online	22,79	3,51	0,60	12,34	34	0,613
	Nachatmung	22,51	3,15	0,54	9,90	34	
sek. 21	online	23,38	3,79	0,65	14,37	34	0,192
	Nachatmung	22,17	4,03	0,69	16,21	34	
sek. 24	online	22,86	3,87	0,66	14,99	34	0,235
	Nachatmung	22,01	3,52	0,60	12,42	34	
sek.27	online	23,05	4,87	0,84	23,71	34	**0,026**
	Nachatmung	21,30	3,79	0,65	14,33	34	
sek. 30	online	21,14	5,21	0,89	27,11	34	0,844
	Nachatmung	20,95	3,28	0,56	10,77	34	
sek. 33	online	20,80	4,40	0,75	19,36	34	0,597
	Nachatmung	20,41	3,78	0,65	14,30	34	
sek. 36	online	20,03	4,68	0,80	21,87	34	0,448
	Nachatmung	19,45	3,44	0,59	11,81	34	
sek. 39	online	18,38	4,95	0,85	24,49	34	0,845
	Nachatmung	18,25	3,19	0,55	10,17	34	
sek. 42	online	17,92	4,73	0,81	22,42	34	0,252
	Nachatmung	17,02	3,18	0,55	10,11	34	
sek. 45	online	16,76	3,84	0,66	14,75	34	0,652
	Nachatmung	16,48	3,33	0,57	11,11	34	
sek. 48	online	15,64	3,40	0,58	11,55	34	0,970
	Nachatmung	15,62	3,01	0,52	9,09	34	
sek. 51	online	15,86	3,74	0,64	13,96	34	**0,033**
	Nachatmung	14,47	2,71	0,46	7,34	34	
sek. 54	online	14,79	3,44	0,59	11,80	34	0,100
	Nachatmung	13,73	2,70	0,46	7,31	34	
sek. 57	online	13,98	3,73	0,64	13,93	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	
sek. 60	online	14,43	4,16	0,71	17,29	34	-
	Nachatmung	-	-	-	-	34	

3.4.3. Gruppe C (>60ml O_2/min/kg)

signifikant (<0,05); Vergleich 3-Sekunden-Intervall online/Nachatmung = *

signifikant (<0,05); Vergleich errechnete VO_2peak/gemessene VO_2peak = +

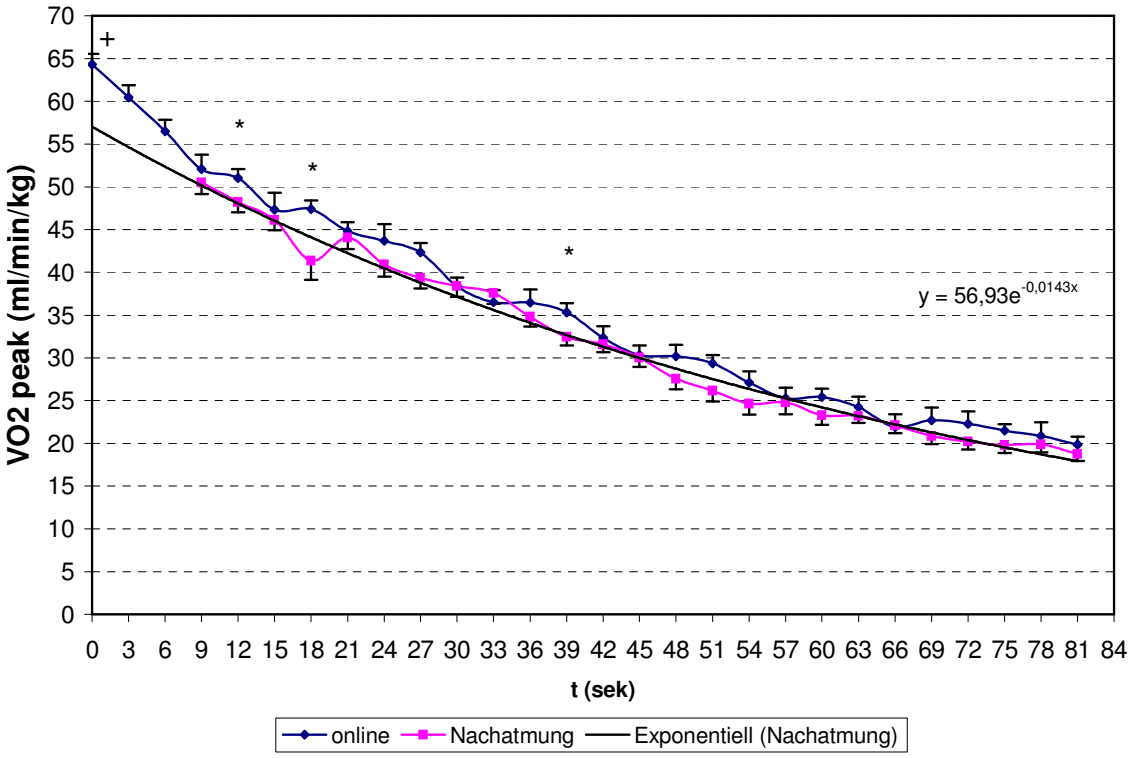


Abb. 18: Ausbelastung Gruppe C (>60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 18,17±1,59 km/h

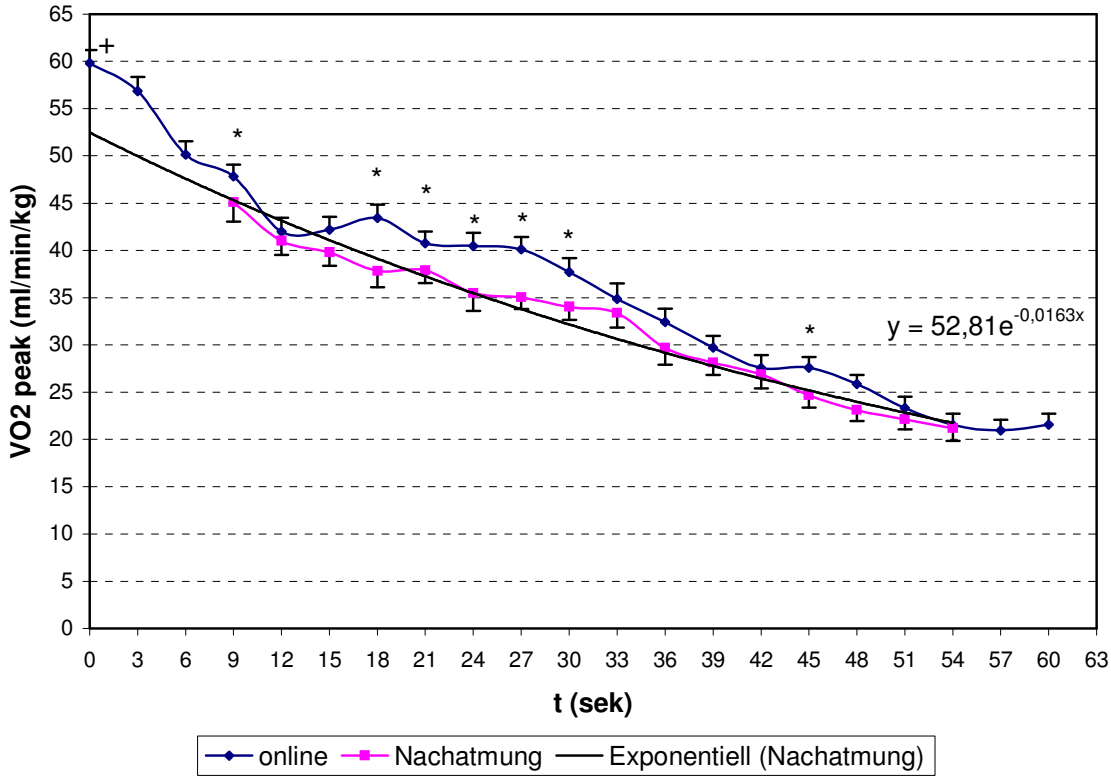


Abb. 19: 1.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C (>60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 16,17±1,59 km/h

signifikant (<0,05); Vergleich 3-Sekunden-Intervall online/Nachatmung = *

signifikant (<0,05); Vergleich errechnete VO_2peak/gemessene VO_2peak = +

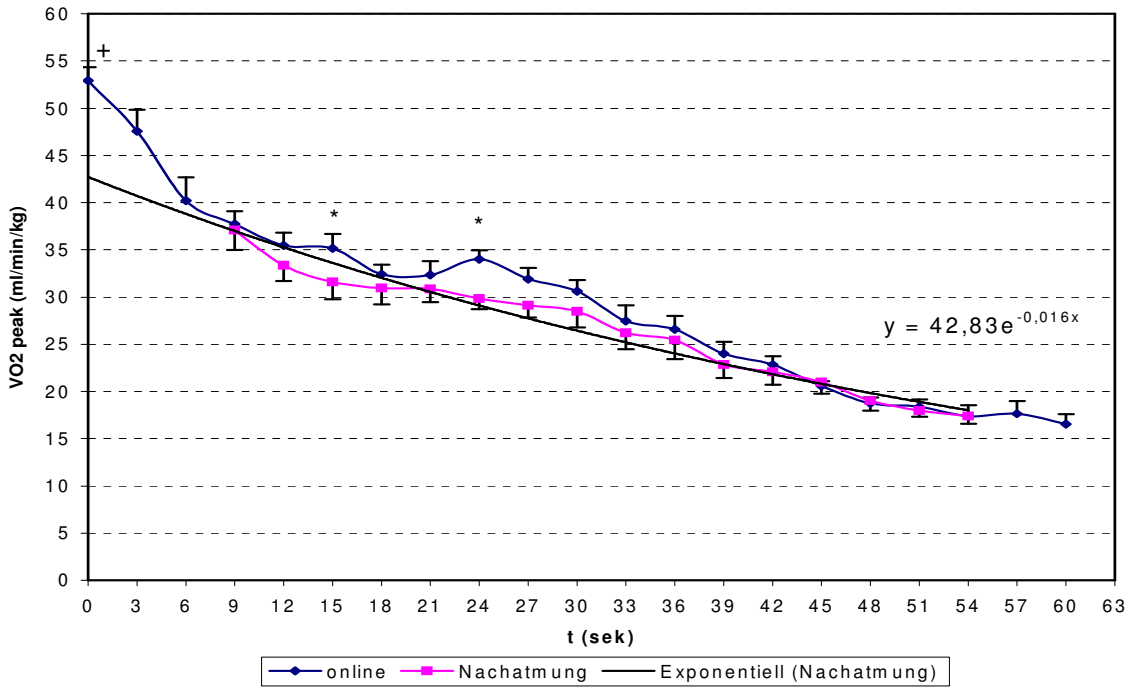


Abb. 20: 2.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C (>60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 14,17±1,59 km/h

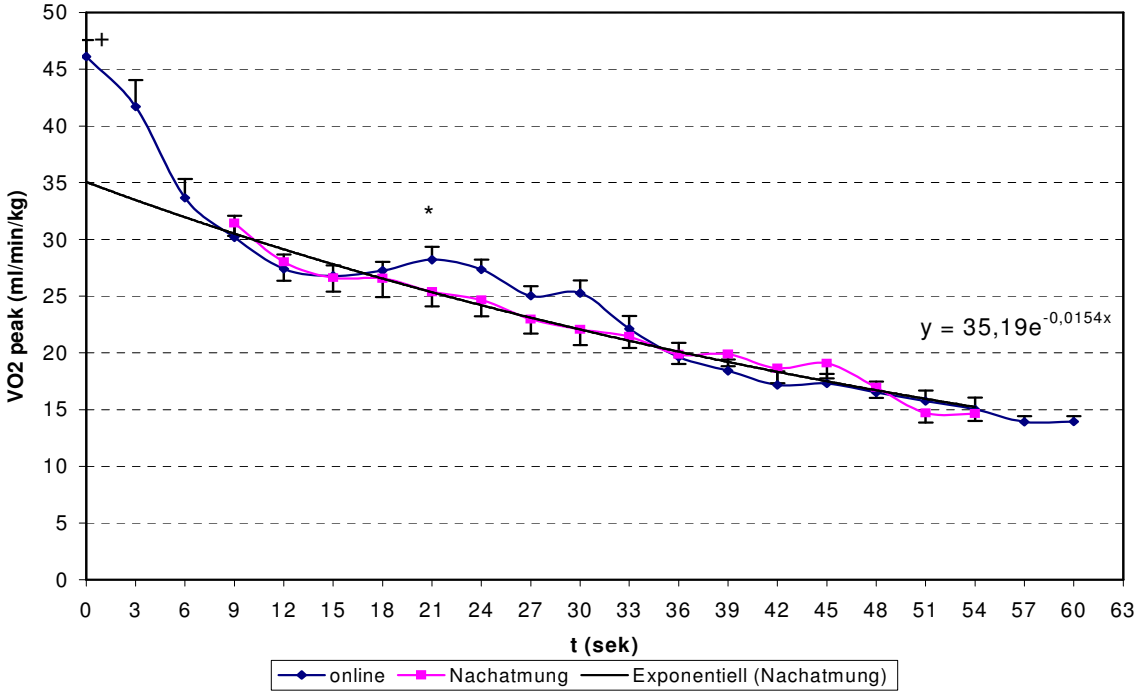


Abb. 21: 3.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C (>60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 12,17±1,59 km/h

signifikant (<0,05); Vergleich 3-Sekunden-Intervall online/Nachatmung = *

signifikant (<0,05); Vergleich errechnete VO_2peak/gemessene VO_2peak = +

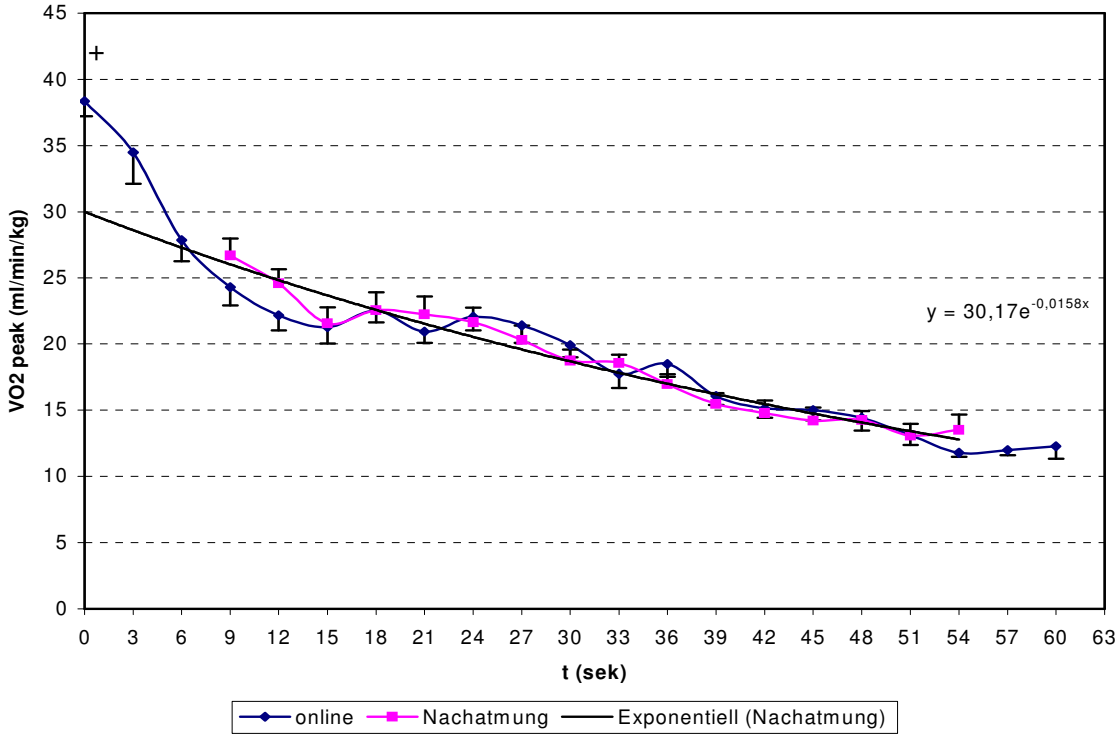


Abb. 22: 4.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C (>60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 10,17±1,59 km/h

Tab. 22: Ausbelastung Gruppe C (>60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 18,17±1,59 km/h

		MW	Stabw.	SEM	Var.	n	p-Wert (fett, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
sek. 0	online	64,33	4,26	1,23	18,19	12	**<0,001**
	Nachatmung	56,93	4,09	1,18	16,74	12	
sek. 3	online	60,46	4,91	1,42	24,15	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 6	online	56,50	4,70	1,36	22,09	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 9	online	52,07	5,88	1,70	34,54	12	0,381
	Nachatmung	50,51	4,67	1,35	21,78	12	
sek. 12	online	51,02	3,62	1,05	13,14	12	**0,046**
	Nachatmung	48,24	4,15	1,20	17,24	12	
sek. 15	online	47,31	6,92	2,00	47,89	12	0,420
	Nachatmung	46,13	4,13	1,19	17,04	12	
sek. 18	online	47,40	3,43	0,99	11,76	12	**0,048**
	Nachatmung	41,36	7,70	2,22	59,22	12	
sek. 21	online	44,83	3,62	1,05	13,11	12	0,616
	Nachatmung	44,07	4,72	1,36	22,25	12	
sek. 24	online	43,69	6,85	1,98	46,94	12	0,264
	Nachatmung	40,90	4,83	1,39	23,31	12	
sek.27	online	42,35	3,82	1,10	14,59	12	0,077
	Nachatmung	39,34	4,15	1,20	17,25	12	
sek. 30	online	38,39	3,46	1,00	11,99	12	0,981
	Nachatmung	38,42	4,48	1,29	20,11	12	
sek. 33	online	36,52	4,92	1,42	24,25	12	0,608
	Nachatmung	37,58	4,34	1,25	18,80	12	
sek. 36	online	36,47	5,24	1,51	27,49	12	0,361
	Nachatmung	34,80	3,87	1,12	14,98	12	
sek. 39	online	35,33	3,66	1,06	13,37	12	**0,012**
	Nachatmung	32,45	3,52	1,02	12,38	12	
sek. 42	online	32,34	4,76	1,37	22,67	12	0,530
	Nachatmung	31,57	3,08	0,89	9,46	12	
sek. 45	online	30,34	3,87	1,12	14,97	12	0,713
	Nachatmung	30,02	3,70	1,07	13,70	12	
sek. 48	online	30,21	4,47	1,29	19,97	12	**0,0493**
	Nachatmung	27,58	4,39	1,27	19,28	12	
sek. 51	online	29,38	3,35	0,97	11,24	12	0,062
	Nachatmung	26,16	4,37	1,26	19,08	12	
sek. 54	online	27,11	4,54	1,31	20,65	12	0,162
	Nachatmung	24,66	4,49	1,30	20,20	12	
sek. 57	online	25,28	4,28	1,23	18,30	12	0,736
	Nachatmung	24,79	4,77	1,38	22,76	12	
sek. 60	online	25,41	3,41	0,99	11,66	12	0,062
	Nachatmung	23,29	3,91	1,13	15,25	12	
sek. 63	online	24,24	4,13	1,19	17,05	12	0,480
	Nachatmung	23,23	2,91	0,84	8,47	12	
sek. 66	online	21,91	5,22	1,51	27,24	12	0,853
	Nachatmung	22,12	3,26	0,94	10,64	12	
sek.69	online	22,70	5,24	1,51	27,48	12	0,336
	Nachatmung	20,89	3,34	0,96	11,15	12	
sek. 72	online	22,30	5,00	1,44	24,95	12	0,254
	Nachatmung	20,22	3,30	0,95	10,88	12	
sek. 75	online	21,49	2,65	0,76	7,02	12	0,191
	Nachatmung	19,79	3,25	0,94	10,58	12	
sek. 78	online	20,86	5,50	1,59	30,30	12	0,567
	Nachatmung	19,90	3,22	0,93	10,34	12	
sek. 81	online	19,88	3,17	0,91	10,03	12	0,272
	Nachatmung	18,76	2,90	0,84	8,38	12	

Tab. 23: 1.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C (>60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 16,17±1,59 km/h

		MW	Stabw.	SEM	Var.	n	p-Wert (fett, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
sek. 0	online	59,82	4,77	1,38	22,76	12	**<0,001**
	Nachatmung	52,81	8,28	2,39	68,55	12	
sek. 3	online	56,85	5,21	1,51	27,18	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 6	online	50,14	4,91	1,42	24,08	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 9	online	47,83	4,34	1,25	18,80	12	**0,041**
	Nachatmung	45,11	7,13	2,06	50,85	12	
sek. 12	online	42,00	5,07	1,46	25,72	12	0,557
	Nachatmung	41,03	5,23	1,51	27,31	12	
sek. 15	online	42,21	4,71	1,36	22,20	12	0,214
	Nachatmung	39,77	4,81	1,39	23,11	12	
sek. 18	online	43,44	4,83	1,40	23,37	12	**0,006**
	Nachatmung	37,81	5,94	1,72	35,31	12	
sek. 21	online	40,76	4,31	1,24	18,56	12	**0,008**
	Nachatmung	37,89	4,67	1,35	21,78	12	
sek. 24	online	40,45	4,88	1,41	23,81	12	**0,017**
	Nachatmung	35,47	6,53	1,89	42,64	12	
sek.27	online	40,11	4,47	1,29	20,02	12	**0,006**
	Nachatmung	35,02	4,31	1,24	18,54	12	
sek. 30	online	37,68	5,29	1,53	28,02	12	**0,009**
	Nachatmung	34,03	4,77	1,38	22,73	12	
sek. 33	online	34,88	5,65	1,63	31,96	12	0,421
	Nachatmung	33,35	5,29	1,53	27,95	12	
sek. 36	online	32,42	4,87	1,41	23,76	12	0,099
	Nachatmung	29,68	6,13	1,77	37,54	12	
sek. 39	online	29,71	4,27	1,23	18,22	12	0,338
	Nachatmung	28,10	4,51	1,30	20,35	12	
sek. 42	online	27,55	4,78	1,38	22,81	12	0,675
	Nachatmung	26,88	5,06	1,46	25,58	12	
sek. 45	online	27,60	3,82	1,10	14,59	12	**0,040**
	Nachatmung	24,66	4,54	1,31	20,58	12	
sek. 48	online	25,87	3,28	0,95	10,78	12	0,900
	Nachatmung	23,10	3,90	1,13	15,25	12	
sek. 51	online	23,32	4,21	1,21	17,68	12	0,290
	Nachatmung	22,11	3,53	1,02	12,48	12	
sek. 54	online	21,52	4,10	1,18	16,82	12	0,816
	Nachatmung	21,17	4,59	1,32	21,03	12	
sek. 57	online	20,96	3,97	1,15	15,75	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 60	online	21,58	3,96	1,14	15,65	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	

Tab. 24: 2.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C (>60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 14,17±1,59 km/h

		MW	Stabw.	SEM	Var.	n	p-Wert (**fett**, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
sek. 0	online	52,91	4,91	1,42	24,07	12	**<0,001**
	Nachatmung	42,83	8,66	2,50	74,93	12	
sek. 3	online	47,58	7,80	2,25	60,82	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 6	online	40,20	8,55	2,47	73,02	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 9	online	37,74	4,66	1,35	21,72	12	0,701
	Nachatmung	37,07	7,22	2,08	52,17	12	
sek. 12	online	35,45	4,80	1,39	23,03	12	0,310
	Nachatmung	33,37	5,82	1,68	33,88	12	
sek. 15	online	35,16	5,30	1,53	28,06	12	**0,042**
	Nachatmung	31,61	6,37	1,84	40,58	12	
sek. 18	online	32,42	3,43	0,99	11,79	12	0,318
	Nachatmung	30,94	5,96	1,72	35,52	12	
sek. 21	online	32,33	5,20	1,50	27,07	12	0,293
	Nachatmung	30,86	4,88	1,41	23,86	12	
sek. 24	online	34,02	3,20	0,92	10,21	12	**0,0015**
	Nachatmung	29,85	3,94	1,14	15,55	12	
sek.27	online	31,91	4,05	1,17	16,43	12	0,107
	Nachatmung	29,14	4,57	1,32	20,93	12	
sek. 30	online	30,61	4,15	1,20	17,24	12	0,372
	Nachatmung	28,49	5,93	1,71	35,19	12	
sek. 33	online	27,46	5,84	1,69	34,13	12	0,435
	Nachatmung	26,20	5,99	1,73	35,91	12	
sek. 36	online	26,58	4,95	1,43	24,48	12	0,616
	Nachatmung	25,44	6,93	2,00	48,06	12	
sek. 39	online	24,01	4,35	1,26	18,96	12	0,504
	Nachatmung	22,86	4,95	1,43	24,53	12	
sek. 42	online	22,83	3,10	0,89	9,59	12	0,639
	Nachatmung	22,08	4,78	1,38	22,80	12	
sek. 45	online	20,56	1,80	0,52	3,26	12	0,745
	Nachatmung	21,00	4,29	1,24	18,44	12	
sek. 48	online	18,76	2,16	0,62	4,67	12	0,779
	Nachatmung	19,05	3,82	1,10	14,56	12	
sek. 51	online	18,38	2,63	0,76	6,93	12	0,711
	Nachatmung	18,00	2,26	0,65	5,10	12	
sek. 54	online	17,40	3,94	1,14	15,54	12	0,985
	Nachatmung	17,38	2,81	0,81	7,88	12	
sek. 57	online	17,65	4,63	1,34	21,43	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 60	online	16,55	3,63	1,05	13,21	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	

Tab. 25: 3.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C (>60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 12,17±1,59 km/h

		MW	Stabw.	SEM	Var.	n	p-Wert (fett, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
sek. 0	online	46,11	5,08	1,47	25,79	12	**<0,001**
	Nachatmung	35,19	6,90	1,99	47,62	12	
sek. 3	online	41,71	8,03	2,32	64,45	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 6	online	33,66	5,74	1,66	32,91	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 9	online	30,18	6,58	1,90	43,25	12	0,579
	Nachatmung	31,44	3,97	1,15	15,74	12	
sek. 12	online	27,39	4,39	1,27	19,24	12	0,715
	Nachatmung	28,01	5,79	1,67	33,50	12	
sek. 15	online	26,80	3,16	0,91	10,00	12	0,827
	Nachatmung	26,62	4,30	1,24	18,49	12	
sek. 18	online	27,26	2,68	0,77	7,21	12	0,548
	Nachatmung	26,56	5,66	1,63	32,07	12	
sek. 21	online	28,21	3,95	1,14	15,60	12	**0,022**
	Nachatmung	25,39	4,44	1,28	19,71	12	
sek. 24	online	27,35	3,02	0,87	9,14	12	0,089
	Nachatmung	24,66	4,98	1,44	24,75	12	
sek.27	online	25,01	3,01	0,87	9,05	12	0,112
	Nachatmung	22,96	4,38	1,26	19,15	12	
sek. 30	online	25,26	3,96	1,14	15,67	12	0,058
	Nachatmung	22,07	4,77	1,38	22,75	12	
sek. 33	online	22,10	3,96	1,14	15,68	12	0,601
	Nachatmung	21,43	3,49	1,01	12,17	12	
sek. 36	online	19,65	4,33	1,25	18,71	12	0,749
	Nachatmung	19,87	2,88	0,83	8,32	12	
sek. 39	online	18,43	3,42	0,99	11,71	12	0,226
	Nachatmung	19,89	3,73	1,08	13,88	12	
sek. 42	online	17,17	4,18	1,21	17,44	12	0,285
	Nachatmung	18,65	4,60	1,33	21,21	12	
sek. 45	online	17,29	3,00	0,87	9,01	12	0,352
	Nachatmung	19,08	4,58	1,32	20,96	12	
sek. 48	online	16,51	3,31	0,96	10,96	12	0,792
	Nachatmung	16,96	3,28	0,95	10,75	12	
sek. 51	online	15,75	3,22	0,93	10,39	12	0,340
	Nachatmung	14,71	2,88	0,83	8,29	12	
sek. 54	online	15,01	3,55	1,02	12,60	12	0,727
	Nachatmung	14,62	2,21	0,64	4,87	12	
sek. 57	online	13,92	1,74	0,50	3,02	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 60	online	13,94	1,71	0,49	2,92	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	

Tab. 26: 4.Intervall vor Ausbelastung, Gruppe C (>60ml O_2/min/kg), durchschnittlich 10,17±1,59 km/h

		MW	Stabw.	SEM	Var.	n	p-Wert (fett, falls p<0,05) t-Test für gepaarte Daten
sek. 0	online	38,36	3,91	1,13	15,33	12	**<0,001**
	Nachatmung	30,17	5,15	1,49	26,47	12	
sek. 3	online	34,48	8,17	2,36	66,75	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 6	online	27,85	5,53	1,60	30,62	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 9	online	24,29	4,73	1,37	22,36	12	0,0884
	Nachatmung	26,70	4,39	1,27	19,27	12	
sek. 12	online	22,17	4,02	1,16	16,13	12	0,233
	Nachatmung	24,59	3,61	1,04	13,07	12	
sek. 15	online	21,26	4,19	1,21	17,58	12	0,090
	Nachatmung	21,56	4,23	1,22	17,87	12	
sek. 18	online	22,53	3,10	0,89	9,59	12	0,765
	Nachatmung	22,56	4,70	1,36	22,06	12	
sek. 21	online	20,93	2,88	0,83	8,30	12	0,544
	Nachatmung	22,24	4,67	1,35	21,79	12	
sek. 24	online	22,06	3,47	1,00	12,05	12	0,814
	Nachatmung	21,65	3,82	1,10	14,61	12	
sek.27	online	21,41	4,56	1,32	20,79	12	0,267
	Nachatmung	20,30	3,86	1,11	14,87	12	
sek. 30	online	19,92	3,22	0,93	10,37	12	0,220
	Nachatmung	18,75	2,90	0,84	8,40	12	
sek. 33	online	17,76	3,76	1,09	14,14	12	0,407
	Nachatmung	18,57	2,16	0,62	4,67	12	
sek. 36	online	18,49	3,32	0,96	11,03	12	0,138
	Nachatmung	16,97	2,61	0,75	6,83	12	
sek. 39	online	16,06	2,31	0,67	5,33	12	0,440
	Nachatmung	15,48	2,82	0,81	7,95	12	
sek. 42	online	15,13	2,44	0,70	5,95	12	0,451
	Nachatmung	14,78	3,26	0,94	10,60	12	
sek. 45	online	15,01	2,68	0,77	7,19	12	0,163
	Nachatmung	14,22	3,44	0,99	11,86	12	
sek. 48	online	14,42	3,30	0,95	10,91	12	0,998
	Nachatmung	14,26	2,36	0,68	5,58	12	
sek. 51	online	13,11	2,54	0,73	6,46	12	0,787
	Nachatmung	13,10	3,04	0,88	9,24	12	
sek. 54	online	11,79	1,01	0,29	1,03	12	0,222
	Nachatmung	13,53	3,97	1,15	15,76	12	
sek. 57	online	11,99	1,30	0,38	1,70	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	
sek. 60	online	12,28	3,27	0,94	10,68	12	-
	Nachatmung	-	-	-	-	12	

3.4.4. Prozentuale Abweichungen der erhobenen VO_2peak-Werte der Nachatmungs-untersuchungen in Bezug auf die VO_2peak-Werte der vergleichbaren Online-messungen

Die oben erwähnte Unterschätzung der errechneten VO_2peak von der gemessenen VO_2peak, bei Verwendung von 3-Sekunden-Intervallen, nimmt zu den submaximalen Belastungsstufen hin zu.

3.4.4.1. nach Ausbelastung

Nach Ausbelastung wird die VO_2peak im Schnitt um 10,2% signifikant unterschätzt ($p<0,001$, s.Abb.23). Dabei unterscheiden sich die drei Gruppen unterschiedlichen Leistungszustandes untereinander nicht in der %-Abweichung zur „online“ gemessenen VO_2peak ($p>0,05$, siehe Tabelle 27).

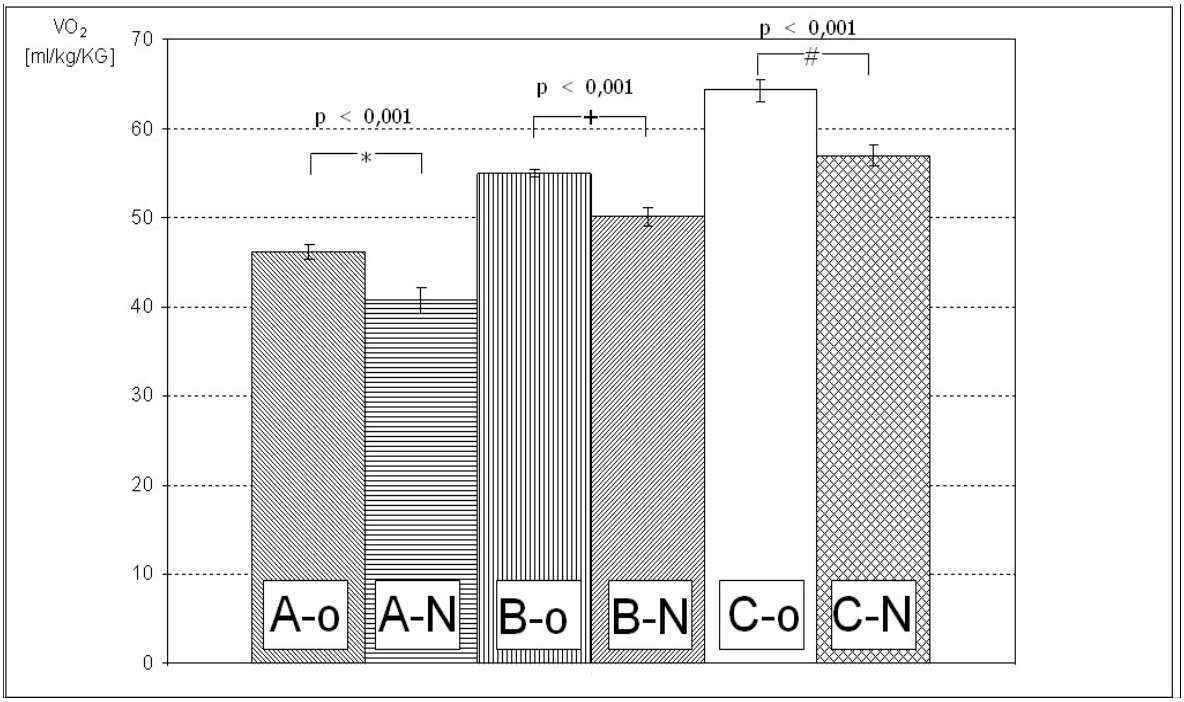


Abb. 23: Abweichungen der erhobenen VO_2peak-Werte der Nachatmungs-Untersuchungen in Bezug auf die VO_2peak-Werte der vergleichbaren Online-Messung nach Ausbelastung.
(A-o = Gruppe A [< 50ml O_2/min/kg]/ online; A-N = Gruppe A [< 50ml O_2/min/kg]/ Nachatmung; B-o = Gruppe B [50-60ml O_2/min/kg]/ online; B-N = Gruppe B [50-60ml O_2/min/kg]/ Nachatmung; C-o = Gruppe C [> 60ml O_2/min/kg]/ online; C-N = Gruppe C [> 60ml O_2/min/kg]/ Nachatmung)

Tab. 27: Prozentuale Abweichung von gemessener VO_2peak (nach Ausbelastung) in Bezug auf die durch die Nachatmungsmethode bestimmte VO_2peak

	Gruppe A (13,05±1,36km/h)	Gruppe B (16,18±1,87km/h)	Gruppe C (18,17±1,59km/h)	Gruppe A-C	Gruppe A-C **fett** wenn p<0,05
MW (%)	11,8	8,8	11,3	10,2	0,589
Stabw.	11,4	12,0	5,8	11,4	
n	21	34	12	67	-

3.4.4.2. nach 1.Intervall vor Ausbelastung

Die Unterschätzung nimmt ein Intervall vor Ausbelastung im Mittel um 4,1% zu ($p<0,001$). Wie nach Ausbelastung unterscheiden die Gruppen A, B und C untereinander nicht in ihrer jeweiligen prozentualen Abweichung von 14,3% zur gemessenen VO_2peak ($p>0,05$; siehe Tabelle 28).

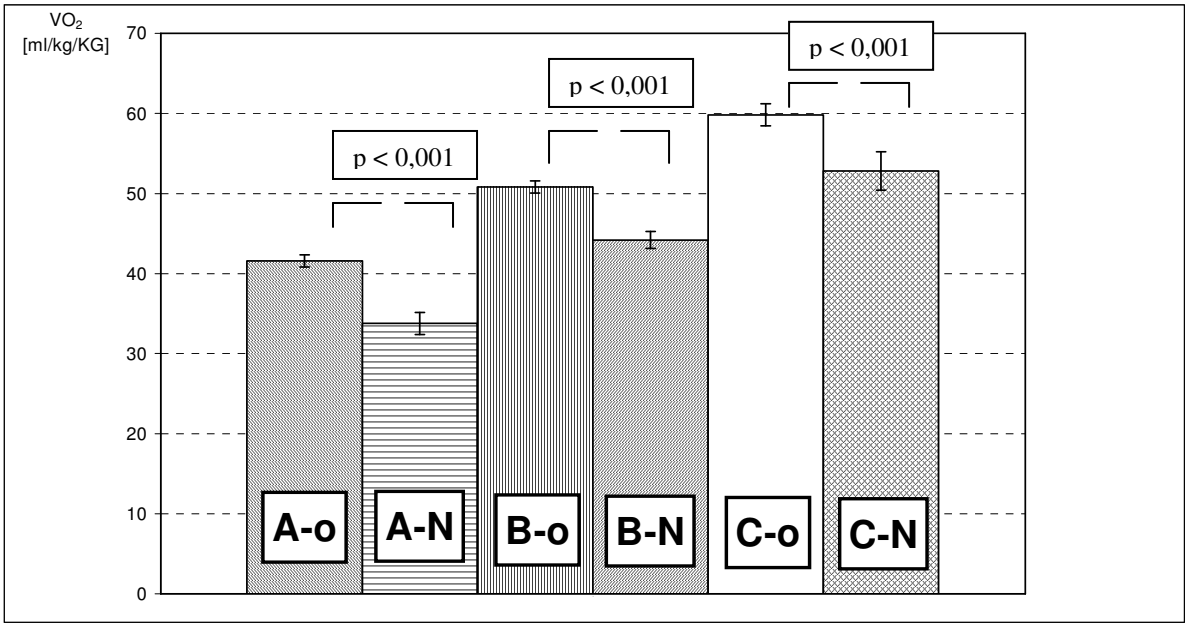


Abb. 24: Abweichungen der erhobenen VO_2peak-Werte der Nachatmungs-Untersuchungen in Bezug auf die VO_2peak-Werte der vergleichbaren Online-Messung nach dem 1. Intervall vor Ausbelastung. (A-o = Gruppe A [< 50ml O_2/min/kg]/ online; A-N = Gruppe A [< 50ml O_2/min/kg]/ Nachatmung; B-o = Gruppe B [50-60ml O_2/min/kg]/ online; B-N = Gruppe B [50-60ml O_2/min/kg]/ Nachatmung; C-o = Gruppe C [> 60ml O_2/min/kg]/ online; C-N = Gruppe C [> 60ml O_2/min/kg]/ Nachatmung)

Tab. 28: Prozentuale Abweichung von gemessener VO_2peak (nach Ausbelastung) in Bezug auf die durch die Nachatmungsmethode bestimmte VO_2peak (1.Intervall vor Ausbelastung)

	Gruppe A (11,05±1,36km/h)	Gruppe B (14,18±1,87km/h)	Gruppe C (16,17±1,59km/h)	Gruppe A-C	Gruppe A-C **fett** wenn p<0,05
MW (%)	18,8	12,7	12,1	14,3	0,249
Stabw.	16,1	12,8	8,76	13,4	
n	21	34	12	67	-

3.4.4.3. nach 2. Intervall vor Ausbelastung

Zwei Intervalle vor Ausbelastung nimmt die Unterschätzung um weitere 7% zum 1.Intervall vor Ausbelastung zu ($p<0,001$). Die Unterschätzung verdoppelt sich nahezu auf 21,3% gegenüber der Ausbelastung. Die Gruppen unterscheiden sich nicht in ihrer jeweiligen prozentualen Unterschätzung zur gemessenen VO_2peak voneinander ($p>0,05$; siehe Tabelle 29).

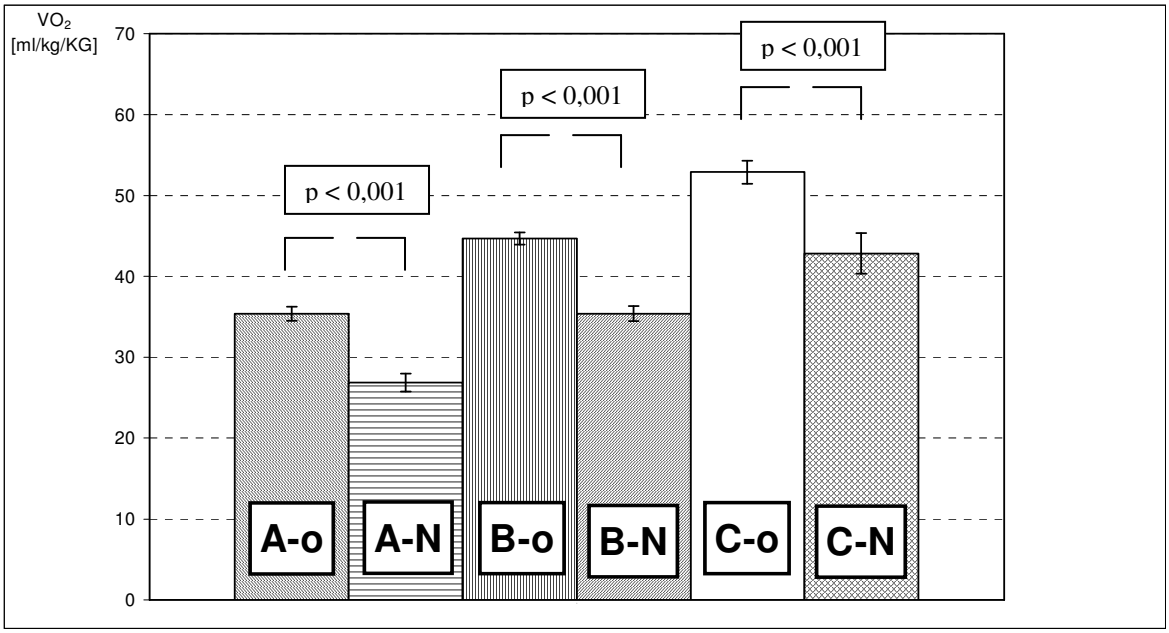


Abb. 25: Abweichungen der erhobenen VO_2peak-Werte der Nachatmungs-Untersuchungen in Bezug auf die VO_2peak-Werte der vergleichbaren Online-Messung nach dem 2. Intervall vor Ausbelastung.
(A-o = Gruppe A [< 50ml O_2/min/kg]/ online; A-N = Gruppe A [< 50ml O_2/min/kg]/ Nachatmung; B-o = Gruppe B [50-60ml O_2/min/kg]/ online; B-N = Gruppe B [50-60ml O_2/min/kg]/ Nachatmung; C-o = Gruppe C [> 60ml O_2/min/kg]/ online; C-N = Gruppe C [> 60ml O_2/min/kg]/ Nachatmung)

Tab. 29: Prozentuale Abweichung von gemessener VO_2peak (nach Ausbelastung) in Bezug auf die durch die Nachatmungsmethode bestimmte VO_2peak (2.Intervall vor Ausbelastung)

	Gruppe A (9,05±1,36km/h)	Gruppe B (12,18±1,87km/h)	Gruppe C (14,17±1,59km/h)	Gruppe A-C	Gruppe A-C **fett** wenn p<0,05
MW (%)	23,9	20,4	19,24	21,3	0,520
Stabw.	19,1	12,5	12,47	12,7	
n	21	34	12	67	-

3.4.4.4. nach 3. Intervall vor Ausbelastung

Da Gruppe A keine 3 submaximalen Belastungsstufen bis zur Ausbelastung absolvierte, können im folgenden nur die Gruppen B und C miteinander verglichen werden.

Aber auch ohne Gruppe A ist eine weitere leichte 0,8%ige Zunahme der Unterschätzung auf insgesamt 22,1% festzustellen. Auch hier zeigt sich eine gleiche, nicht signifikante prozentuale Unterschätzung der „online" gemessenen VO_2peak ($p>0,05$; siehe Tabelle 30).

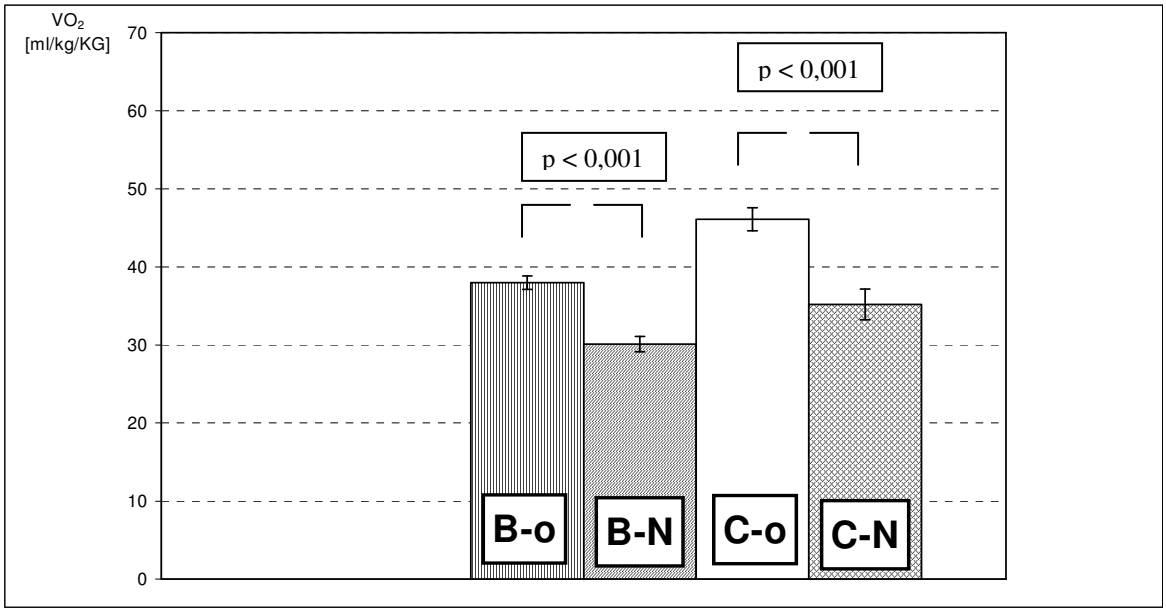


Abb. 26: Abweichungen der erhobenen VO_2peak-Werte der Nachatmungs-Untersuchungen in Bezug auf die VO_2peak-Werte der vergleichbaren Online-Messung nach dem 3. Intervall vor Ausbelastung.
(B-o = Gruppe B [50-60ml O_2/min/kg]/ online; B-N = Gruppe B [50-60ml O_2/min/kg]/ Nachatmung; C-o = Gruppe C [> 60ml O_2/min/kg]/ online; C-N = Gruppe C [> 60ml O_2/min/kg]/ Nachatmung)

Tab. 30: Prozentuale Abweichung von gemessener VO_2peak (nach Ausbelastung) in Bezug auf die durch die Nachatmungsmethode bestimmte VO_2peak (3.Intervall vor Ausbelastung)

	Gruppe A	Gruppe B (10,18±1,87km/h)	Gruppe C (12,17±1,59km/h)	Gruppe B-C	Gruppe A-C **fett** wenn p<0,05
MW (%)	*	20,38	23,75	22,1	0,434
Stabw.	*	13,0	11,89	12,5	
n	*	34	12	36	-

* = Die Gruppe A hatte im Mittel nicht mehr als 2 submaximale Belastungspausen.

Allgemein ist somit eine Zunahme der Unterschätzung der errechneten VO_2peak auf submaximalen Stufen zu erkennen ($p<0,001$). Nach Ausbelastung ist die Unterschätzung geringer als auf den submaximalen Stufen.

Das Ausmaß der prozentualen Unterschätzung ist dabei unabhängig von der Leistungsfähigkeit der Probanden ($p>0,05$).

3.5. Multiple Mittelwertvergleiche der O_2-Kinetik nach Ausbelastung zwischen den Gruppen A, B, C (prozentuale Darstellung der VO_2)

Zur Verdeutlichung der beschriebenen identischen Unterschätzung der monoexponentiell errechneten VO_2peak (3-Sekunden-Intervalle) gegenüber der „online“ gemessenen VO_2peak nach allen Belastungsstufen (Mittelwert der letzten 30 Sekunden der Belastung), wird in diesem Kapitel die O_2-Kurvenkinetik vom Belastungsabbruch in Prozent auf der y-Achse dargestellt. Die 100% stehen dabei für die maximale Sauerstoffaufnahme im Moment des Belastungsendes, d.h. das Anhalten des Laufbandes.

Die prozentuale O_2-Kurvenkinetik der drei Gruppen unterschiedlicher Ausdauerleistungsfähigkeit hat einen meist identischen Verlauf in den ersten 81 Sekunden nach Ausbelastung ($p>0,05$, siehe Abbildung 27; Tabelle 31).

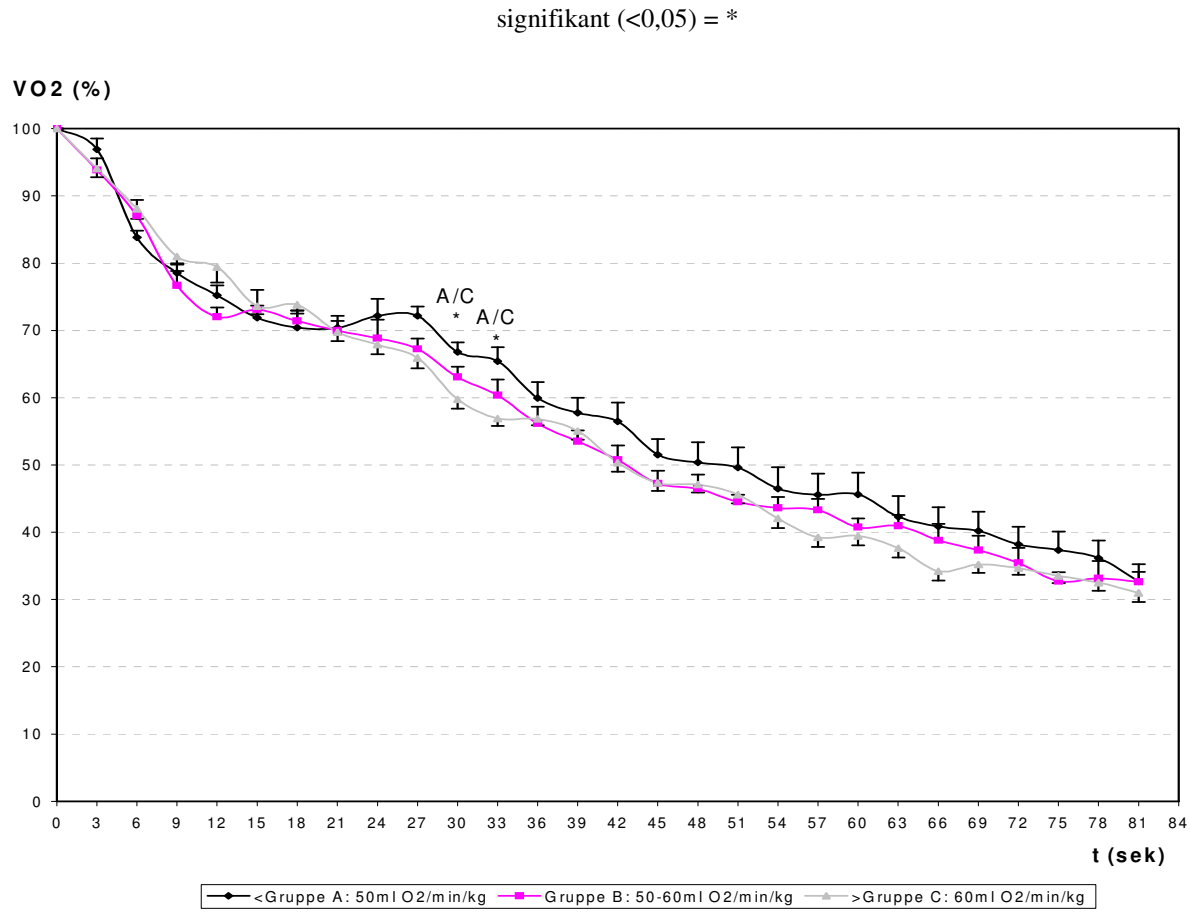


Abb. 27: Multipler Mittelwertvergleich zwischen den 3 Versuchsgruppen A,B,C; O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung der VO_2) nach maximaler, subjektiver Ausbelastung

Tab. 31: Multipler Mittelwertvergleich aller 3 Gruppen A,B,C; O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach maximaler, subjektiver Ausbelastung; Gruppe A (< 50ml O_2/min/kg;) 13,05±1,36km/h, Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg;) 16,18±1,87km/h, Gruppe C (> 60ml O_2/min/kg) 18,17±1,59km/h

	Gruppe	MW (%)	**Stabw.** (%)	**SEM** (%)	**Var.** (%)	**n**	**p-Wert** (**fett**, falls p<0,05) Scheffé-Test
sek. 3	A	96,92	7,27	1,59	52,80	21	A / B = 0,314
	B	93,81	7,66	1,31	58,63	34	A / C = 0,559
	C	94,06	6,09	1,76	37,09	12	B / C = 0,995
sek. 6	A	83,82	4,70	1,03	22,07	21	A / B = 0,330
	B	87,01	8,81	1,51	77,60	34	A / C = 0,311
	C	88,10	8,27	2,39	68,46	12	B / C = 0,915
sek. 9	A	78,52	6,71	1,46	44,99	21	A / B = 0,639
	B	76,68	6,97	1,19	48,53	34	A / C = 0,624
	C	80,97	7,40	2,13	54,69	12	B / C = 0,194
sek. 12	A	75,21	6,64	1,45	44,13	21	A/ B = 0,547
	B	72,02	13,28	2,28	176,31	34	A/ C = 0,342
	C	79,41	4,82	1,39	23,26	12	B / C = 0,116
sek. 15	A	71,90	8,07	1,76	65,20	21	A / B = 0,873
	B	73,08	7,29	1,25	53,18	34	A / C = 0,842
	C	73,63	10,19	2,94	103,94	12	B / C = 0,978
sek. 18	A	70,42	11,72	2,56	137,43	21	A / B = 0,926
	B	71,39	7,68	1,32	58,93	34	A / C = 0,571
	C	73,83	5,46	1,58	29,82	12	B / C = 0,715
sek. 21	A	70,39	8,31	1,81	69,01	21	A / B = 0,980
	B	69,97	7,82	1,34	61,11	34	A / C = 0,974
	C	69,76	5,04	1,46	25,42	12	B / C = 0,997
sek. 24	A	72,15	11,53	2,52	132,90	21	A / B = 0,464
	B	68,82	8,30	1,42	68,96	34	A / C = 0,475
	C	67,87	9,55	2,76	91,29	12	B / C = 0,958
sek. 27	A	72,16	6,43	1,40	41,39	21	A / B = 0,076
	B	67,24	8,87	1,52	78,64	34	A / C = 0,085
	C	65,90	5,36	1,55	28,68	12	B / C = 0,873
sek. 30	A	66,78	6,64	1,45	44,10	21	A / B = 0,193
	B	63,08	8,13	1,39	66,14	34	A / C = **0,034**
	C	59,77	5,25	1,52	27,60	12	B / C = 0,403
sek. 33	A	65,43	9,49	2,07	90,12	21	A / B = 0,072
	B	60,37	6,42	1,10	41,19	34	A / C = **0,014**
	C	56,93	8,15	2,35	66,46	12	B / C = 0,427
sek. 36	A	59,96	10,82	2,36	117,02	21	A / B = 0,249
	B	56,17	5,56	0,95	30,93	34	A / C = 0,576
	C	56,87	8,65	2,50	74,74	12	B / C = 0,968
sek. 39	A	57,77	10,11	2,21	102,14	21	A / B = 0,174
	B	53,49	7,45	1,28	55,47	34	A / C = 0,655
	C	55,04	5,77	1,67	33,28	12	B / C = 0,850
sek. 42	A	56,46	12,82	2,80	164,41	21	A / B = 0,112
	B	50,76	7,90	1,35	62,41	34	A / C = 0,363
	C	50,36	7,48	2,16	56,02	12	B / C = 0,993
sek. 45	A	51,54	10,67	2,33	113,75	21	A / B = 0,176
	B	47,27	6,73	1,15	45,29	34	A / C = 0,363
	C	47,31	6,52	1,88	42,51	12	B / C = 0,999
sek. 48	A	50,38	13,85	3,02	191,92	21	A / B = 0,352
	B	46,47	6,86	1,18	47,12	34	A / C = 0,646
	C	47,10	7,26	2,10	52,73	12	B / C = 0,981
sek. 51	A	49,62	13,82	3,02	190,90	21	A / B = 0,171
	B	44,53	7,76	1,33	60,19	34	A / C = 0,520
	C	45,62	3,58	1,03	12,82	12	B / C = 0,945
sek. 54	A	46,50	14,51	3,17	210,51	21	A / B = 0,605
	B	43,61	8,35	1,43	69,71	34	A / C = 0,500
	C	42,06	5,65	1,63	31,88	12	B / C = 0,906
sek. 57	A	45,57	14,41	3,15	207,78	21	A / B = 0,732
	B	43,32	8,21	1,41	67,45	34	A / C = 0,342
	C	39,25	5,69	1,64	32,33	12	B / C = 0,502
sek. 60	A	45,65	14,67	3,20	215,24	21	A / B = 0,237
	B	40,77	8,13	1,39	66,12	34	A / C = 0,257
	C	39,47	4,51	1,30	20,30	12	B / C = 0,931
sek. 63	A	42,30	14,12	3,08	199,44	21	A / B = 0,891
	B	40,96	8,10	1,39	65,59	34	A / C = 0,445
	C	37,63	5,67	1,64	32,14	12	B / C = 0,619
sek. 66	A	40,85	13,23	2,89	174,93	21	A / B = 0,763
	B	38,79	8,12	1,39	65,94	34	A / C = 0,199
	C	34,22	8,57	2,47	73,44	12	B / C = 0,406

sek. 69	A	40,20	13,06	2,85	170,49	21	A / B = 0,552
	B	37,33	7,13	1,22	50,87	34	A / C = 0,352
	C	35,22	7,50	2,16	56,21	12	B / C = 0,802
sek. 72	A	38,22	11,99	2,62	143,76	21	A / B = 0,506
	B	35,45	5,75	0,99	33,11	34	A / C = 0,519
	C	34,68	7,65	2,21	58,49	12	B / C = 0,964
sek. 75	A	37,37	12,56	2,74	157,79	21	A / B = 0,158
	B	32,73	6,32	1,08	39,91	34	A / C = 0,962
	C	33,53	4,67	1,35	21,82	12	B / C = 0,470
sek. 78	A	36,17	12,11	2,64	146,60	21	A / B = 0,510
	B	33,17	7,19	1,23	51,75	34	A / C = 0,556
	C	32,52	8,85	2,55	78,27	12	B / C = 0,979
sek. 81	A	32,70	11,74	2,56	137,91	21	A / B = 0,999
	B	32,62	7,83	1,34	61,31	34	A / C = 0,869
	C	30,99	5,26	1,52	27,67	12	B / C = 0,863

3.6. Multiple Mittelwertvergleiche der O_2-Kinetik zwischen Ausbelastung und submaximalen Belastungsstufen (prozentuale Darstellung der VO_2)

3.6.1. Gruppe A-C zusammengefasst (n=67)

Wie in Kapitel 3.4 dargestellt, ergeben sich unterschiedlich starke Abweichungen in der Berechnung der VO_2peak mit Hilfe der Nachatmungmethode (unter Verwendung von 3-Sekunden-Intervallen) in Abhängigkeit zur jeweiligen Belastungsstufe.

Bei Betrachtung der prozentualen O_2-Kurvenkinetik in der Nachbelastung ist darstellbar, dass sich die prozentuale O_2-Kinetik in Abhängigkeit zur jeweiligen Belastungsstufe unterschiedlich verhält. Der O_2-Bedarf in den ersten 60 Sekunden Nachbelastungsphase nimmt allgemein mit intensiverer Belastung prozentual signifikant zu ($p<0,05$; siehe Abbildung 28; Tabelle 32).

Der Beobachtungszeitraum wurde durch die 60-sekündige Pausendauer des Testprotokolls eingeschränkt. An dieser Stelle werden alle 67 Probanden gemeinsam betrachtet, bevor die Leistungsgruppen A, B und C in den Kapiteln 3.5.3-3.5.5 isoliert untersucht werden.

signifikant (<0,05) = *

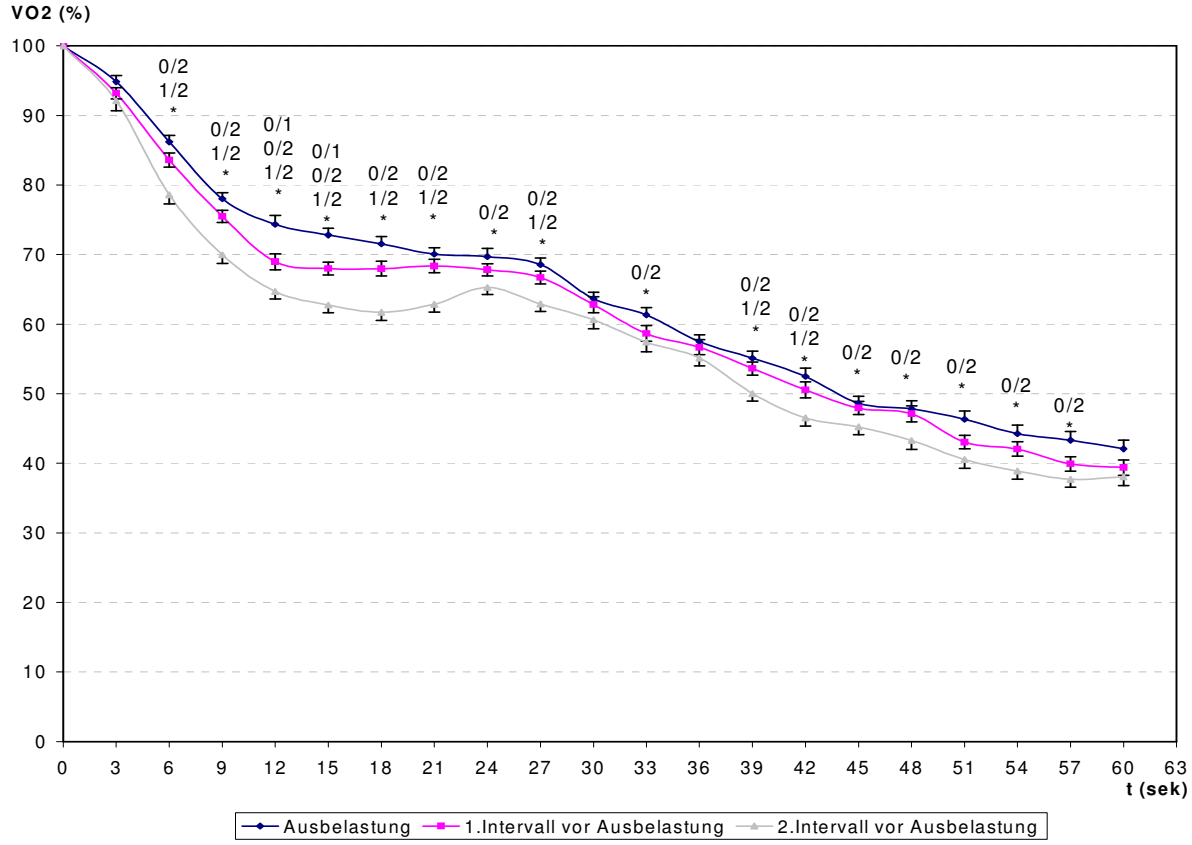


Abb. 28: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung (0) 15,55±2,48km/h, 1.Intervall vor Ausbelastung (1) 13,55±2,48km/h, 2.Intervall vor Ausbelastung (2) 11,55±2,48km/h; Gruppe A-C zusammengefasst (n=67)

Tab. 32: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung (0) 15,55±2,48km/h, 1.Intervall vor Ausbelastung (1) 13,55±2,48km/h, 2.Intervall vor Ausbelastung (2) 11,55±2,48km/h; Gruppe A-C zusammengefasst (n=67)

	Intervall	MW (%)	Stabw. (%)	SEM (%)	Var. (%)	n	p-Wert (fett, falls p<0,05) Tukey HSD-Test
sek. 3	0	94,83	7,32	0,89	53,53	67	0 / 1 = 0,526
	1	93,19	6,52	0,80	42,47	67	0 / 2 = 0,166
	2	92,09	11,58	1,41	134,09	67	1 / 2 = 0,745
sek. 6	0	86,21	7,73	0,94	59,69	67	0 / 1 = 0,210
	1	83,58	8,40	1,03	70,52	67	0 / 2 = **0,00002**
	2	78,59	10,61	1,30	112,47	67	1 / 2 = **0,0037**
sek. 9	0	78,03	7,04	0,86	49,60	67	0 / 1 = 0,172
	1	75,47	7,20	0,88	51,81	67	0 / 2 = **0,00002**
	2	69,96	10,11	1,23	102,15	67	1 / 2 = **0,0003**
sek. 12	0	74,35	10,63	1,30	113,10	67	0 / 1 = **0,003**
	1	68,96	9,32	1,14	86,94	67	0 / 2 = **0,00002**
	2	64,69	8,68	1,06	75,27	67	1 / 2 = **0,027**
sek. 15	0	72,81	8,01	0,98	64,09	67	0 / 1 = **0,002**
	1	67,99	7,62	0,93	58,00	67	0 / 2 = **0,00002**
	2	62,73	9,05	1,11	81,84	67	1 / 2 = **0,0007**
sek. 18	0	71,52	8,80	1,08	77,44	67	0 / 1 = 0,062
	1	67,98	8,62	1,05	74,30	67	0 / 2 = **0,00002**
	2	61,72	9,81	1,20	96,14	67	1 / 2 = **0,0002**
sek. 21	0	70,06	7,47	0,91	55,76	67	0 / 1 = 0,446
	1	68,35	7,87	0,96	61,88	67	0 / 2 = **0,00002**
	2	62,85	9,07	1,11	82,19	67	1 / 2 = **0,0003**
sek. 24	0	69,70	9,64	1,18	92,89	67	0 / 1 = 0,399
	1	67,81	7,16	0,88	51,33	67	0 / 2 = **0,007**
	2	65,27	8,39	1,02	70,38	67	1 / 2 = 0,191
sek. 27	0	68,54	7,93	0,97	62,94	67	0 / 1 = 0,391
	1	66,70	7,46	0,91	55,59	67	0 / 2 = **0,0002**
	2	62,90	9,02	1,10	81,40	67	1 / 2 = **0,019**
sek. 30	0	63,64	7,55	0,92	57,06	67	0 / 1 = 0,857
	1	62,80	9,54	1,17	91,09	67	0 / 2 = 0,139
	2	60,61	10,37	1,27	107,56	67	1 / 2 = 0,356
sek. 33	0	61,34	8,27	1,01	68,33	67	0 / 1 = 0,243
	1	58,64	9,29	1,14	86,37	67	0 / 2 = **0,049**
	2	57,40	11,30	1,38	127,75	67	1 / 2 = 0,757
sek. 36	0	57,48	8,14	0,99	66,28	67	0 / 1 = 0,857
	1	56,68	8,76	1,07	76,78	67	0 / 2 = 0,269
	2	55,13	9,42	1,15	88,75	67	1 / 2 = 0,566
sek. 39	0	55,11	8,24	1,01	67,84	67	0 / 1 = 0,561
	1	53,62	7,83	0,96	61,26	67	0 / 2 = **0,001**
	2	50,04	9,04	1,10	81,77	67	1 / 2 = **0,036**
sek. 42	0	52,48	9,89	1,21	97,75	67	0 / 1 = 0,476
	1	50,53	9,54	1,17	91,04	67	0 / 2 = **0,001**
	2	46,53	9,58	1,17	91,75	67	1 / 2 = **0,044**
sek. 45	0	48,62	8,26	1,01	68,16	67	0 / 1 = 0,889
	1	47,95	7,68	0,94	58,94	67	0 / 2 = **0,049**
	2	45,22	9,11	1,11	83,06	67	1 / 2 = 0,143
sek. 48	0	47,81	9,68	1,18	93,62	67	0 / 1 = 0,907
	1	47,10	9,32	1,14	86,84	67	0 / 2 = **0,019**
	2	43,26	10,30	1,26	106,07	67	1 / 2 = 0,060
sek. 51	0	46,32	9,76	1,19	95,29	67	0 / 1 = 0,104
	1	43,05	7,97	0,97	63,45	67	0 / 2 = **0,0009**
	2	40,52	10,04	1,23	100,82	67	1 / 2 = 0,258
sek. 54	0	44,24	10,33	1,26	106,65	67	0 / 1 = 0,373
	1	42,04	8,56	1,05	73,22	67	0 / 2 = **0,003**
	2	38,89	9,52	1,16	90,60	67	1 / 2 = 0,133
sek. 57	0	43,30	10,33	1,26	106,70	67	0 / 1 = 0,099
	1	39,91	8,59	1,05	73,76	67	0 / 2 = **0,002**
	2	37,71	9,63	1,18	92,77	67	1 / 2 = 0,378
sek. 60	0	42,06	10,38	1,27	107,84	67	0 / 1 = 0,262
	1	39,37	9,13	1,12	83,31	67	0 / 2 = 0,052
	2	38,05	10,36	1,27	107,43	67	1 / 2 = 0,722

3.6.2. Gruppe A (<50ml O_2/min/kg) (n=21)

Der O_2-Mehrbedarf nach intensiver Belastung wie in Kapitel 3.5.2 für alle Probanden (n=67) beschrieben, bestätigt sich auch bei isolierter Betrachtung der untrainierten Probanden in Gruppe A. Dies betrifft insbesondere die ersten 30 Sekunden der Nachbelastung (siehe Abbildung 29; Tabelle 33).

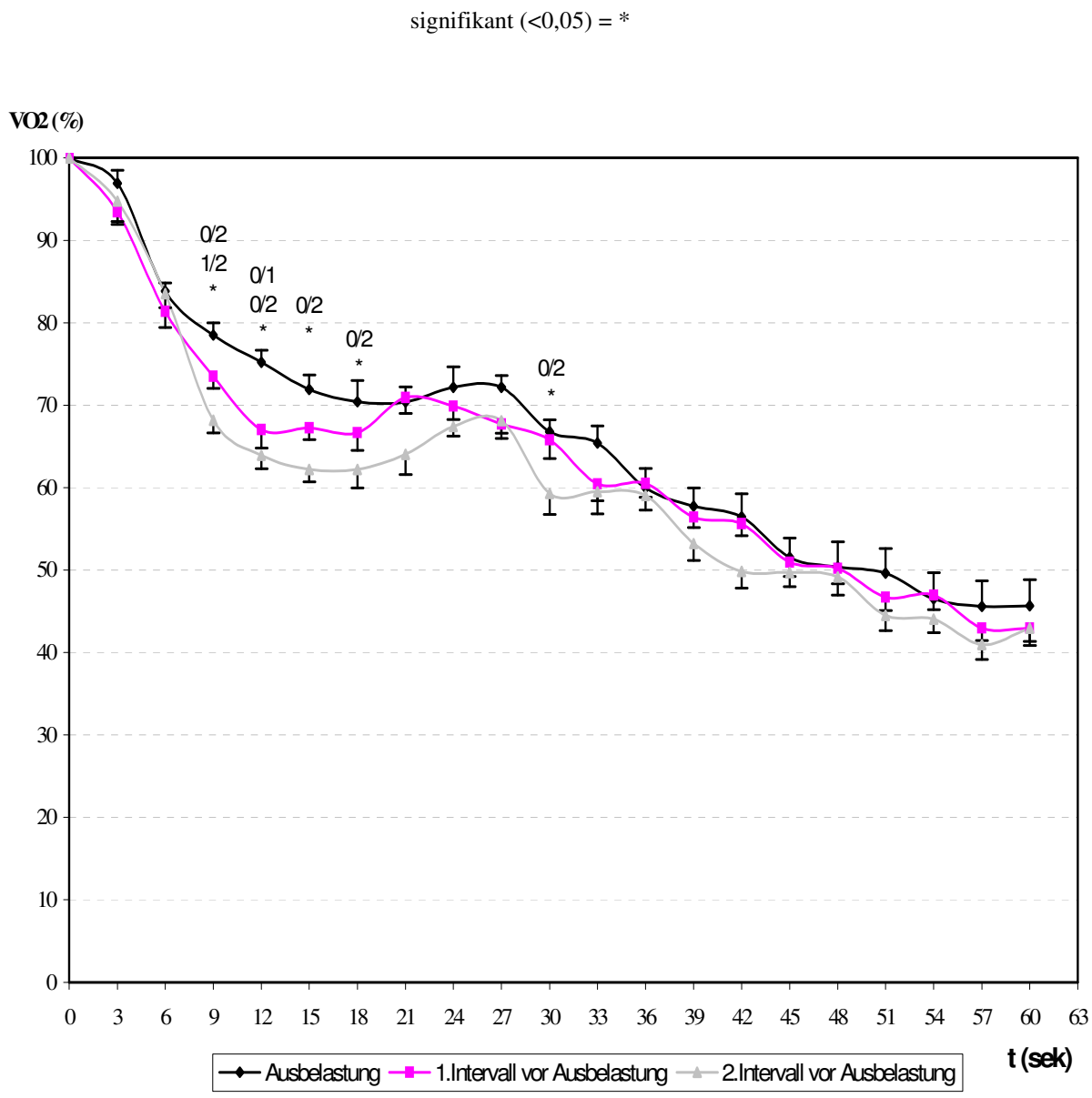


Abb. 29: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung (0) 13,05±1,36km/h, 1.Intervall vor Ausbelastung (1) 11,05±1,36km/h, 2.Intervall vor Ausbelastung (2) 9,05±1,36km/h; Gruppe A (<50ml O_2/min/kg).

Tab. 33: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung (0) 13,05±1,36km/h, 1.Intervall vor Ausbelastung (1) 11,05±1,36km/h, 2.Intervall vor Ausbelastung (2) 9,05±1,36km/h; Gruppe A (<50ml O_2/min/kg) n=21

	Intervall	**MW** (%)	**Stabw.** (%)	**SEM** (%)	**Var.** (%)	**n**	**p-Wert** (**fett**, falls p<0,05) Tukey HSD-Test
sek. 3	0	96,92	7,27	1,59	52,80	21	0 / 1 = 0,444
	1	93,47	5,38	1,17	28,95	21	0 / 2 = 0,727
	2	94,77	13,00	2,84	168,93	21	1 / 2 = 0,890
sek. 6	0	83,82	4,70	1,03	22,07	21	0 / 1 = 0,540
	1	81,39	8,97	1,96	80,44	21	0 / 2 = 0,992
	2	83,54	7,90	1,72	62,34	21	1 / 2 = 0,617
sek. 9	0	78,52	6,71	1,46	44,99	21	0 / 1 = 0,053
	1	73,51	6,81	1,49	46,33	21	0 / 2 = **0,0001**
	2	68,16	6,94	1,51	48,14	21	1 / 2 = **0,036**
sek. 12	0	75,21	6,64	1,45	44,13	21	0 / 1 = **0,006**
	1	67,04	10,25	2,24	105,04	21	0 / 2 = **0,0002**
	2	63,90	7,34	1,60	53,87	21	1 / 2 = 0,440
sek. 15	0	71,90	8,07	1,76	65,20	21	0 / 1 = 0,097
	1	67,24	6,39	1,39	40,79	21	0 / 2 = **0,0003**
	2	62,22	6,95	1,52	48,29	21	1 / 2 = 0,068
sek. 18	0	70,42	11,72	2,56	137,43	21	0 / 1 = 0,499
	1	66,67	10,01	2,18	100,10	21	0 / 2 = **0,042**
	2	62,21	10,42	2,27	108,48	21	1 / 2 = 0,376
sek. 21	0	70,39	8,31	1,81	69,01	21	0 / 1 = 0,982
	1	70,92	8,86	1,93	78,58	21	0 / 2 = 0,091
	2	64,06	11,35	2,48	128,87	21	1 / 2 = 0,061
sek. 24	0	72,15	11,53	2,52	132,90	21	0 / 1 = 0,665
	1	69,88	7,56	1,65	57,10	21	0 / 2 = 0,175
	2	67,40	5,20	1,14	27,07	21	1 / 2 = 0,613
sek. 27	0	72,16	6,43	1,40	41,39	21	0 / 1 = 0,125
	1	67,72	8,04	1,75	64,65	21	0 / 2 = 0,177
	2	68,13	7,16	1,56	51,23	21	1 / 2 = 0,982
sek. 30	0	66,78	6,64	1,45	44,10	21	0 / 1 = 0,941
	1	65,78	10,22	2,23	104,40	21	0 / 2 = **0,040**
	2	59,28	11,66	2,54	135,84	21	1 / 2 = 0,086
sek. 33	0	65,43	9,49	2,07	90,12	21	0 / 1 = 0,282
	1	60,48	9,38	2,05	87,97	21	0 / 2 = 0,167
	2	59,51	12,25	2,67	150,06	21	1 / 2 = 0,952
sek. 36	0	59,96	10,82	2,36	117,02	21	0 / 1 = 0,979
	1	60,50	7,70	1,68	59,22	21	0 / 2 = 0,940
	2	59,03	7,96	1,74	63,43	21	1 / 2 = 0,855
sek. 39	0	57,77	10,11	2,21	102,14	21	0 / 1 = 0,870
	1	56,42	5,75	1,25	33,05	21	0 / 2 = 0,211
	2	53,22	9,42	2,06	88,74	21	1 / 2 = 0,457
sek. 42	0	56,46	12,82	2,80	164,41	21	0 / 1 = 0,961
	1	55,63	6,80	1,48	46,22	21	0 / 2 = 0,088
	2	49,83	9,38	2,05	87,89	21	1 / 2 = 0,152
sek. 45	0	51,54	10,67	2,33	113,75	21	0 / 1 = 0,975
	1	50,95	7,92	1,73	62,65	21	0 / 2 = 0,786
	2	49,72	7,81	1,70	60,94	21	1 / 2 = 0,896
sek. 48	0	50,38	13,85	3,02	191,92	21	0 / 1 = 0,998
	1	50,19	8,51	1,86	72,41	21	0 / 2 = 0,932
	2	49,15	10,10	2,21	102,11	21	1 / 2 = 0,950
sek. 51	0	49,62	13,82	3,02	190,90	21	0 / 1 = 0,628
	1	46,70	7,43	1,62	55,24	21	0 / 2 = 0,247
	2	44,51	8,39	1,83	70,35	21	1 / 2 = 0,769
sek. 54	0	46,50	14,51	3,17	210,51	21	0 / 1 = 0,988
	1	46,98	8,02	1,75	64,34	21	0 / 2 = 0,730
	2	44,04	7,43	1,62	55,26	21	1 / 2 = 0,639
sek. 57	0	45,57	14,41	3,15	207,78	21	0 / 1 = 0,690
	1	42,94	6,75	1,47	45,53	21	0 / 2 = 0,325
	2	40,96	8,22	1,79	67,53	21	1 / 2 = 0,809
sek. 60	0	45,65	14,67	3,20	215,24	21	0 / 1 = 0,709
	1	42,94	7,34	1,60	53,81	21	0 / 2 = 0,715
	2	42,97	9,86	2,15	97,13	21	1 / 2 = 0,999

3.6.3. Gruppe B (50-60ml O2/min/kg) (n=34)

Auch bei den trainierten Probanden der Gruppe B besteht ein erhöhter O_2-Bedarf in der initialen Nachbelastung intensiverer Belastungen (siehe Abbildung 30; Tabelle 34).

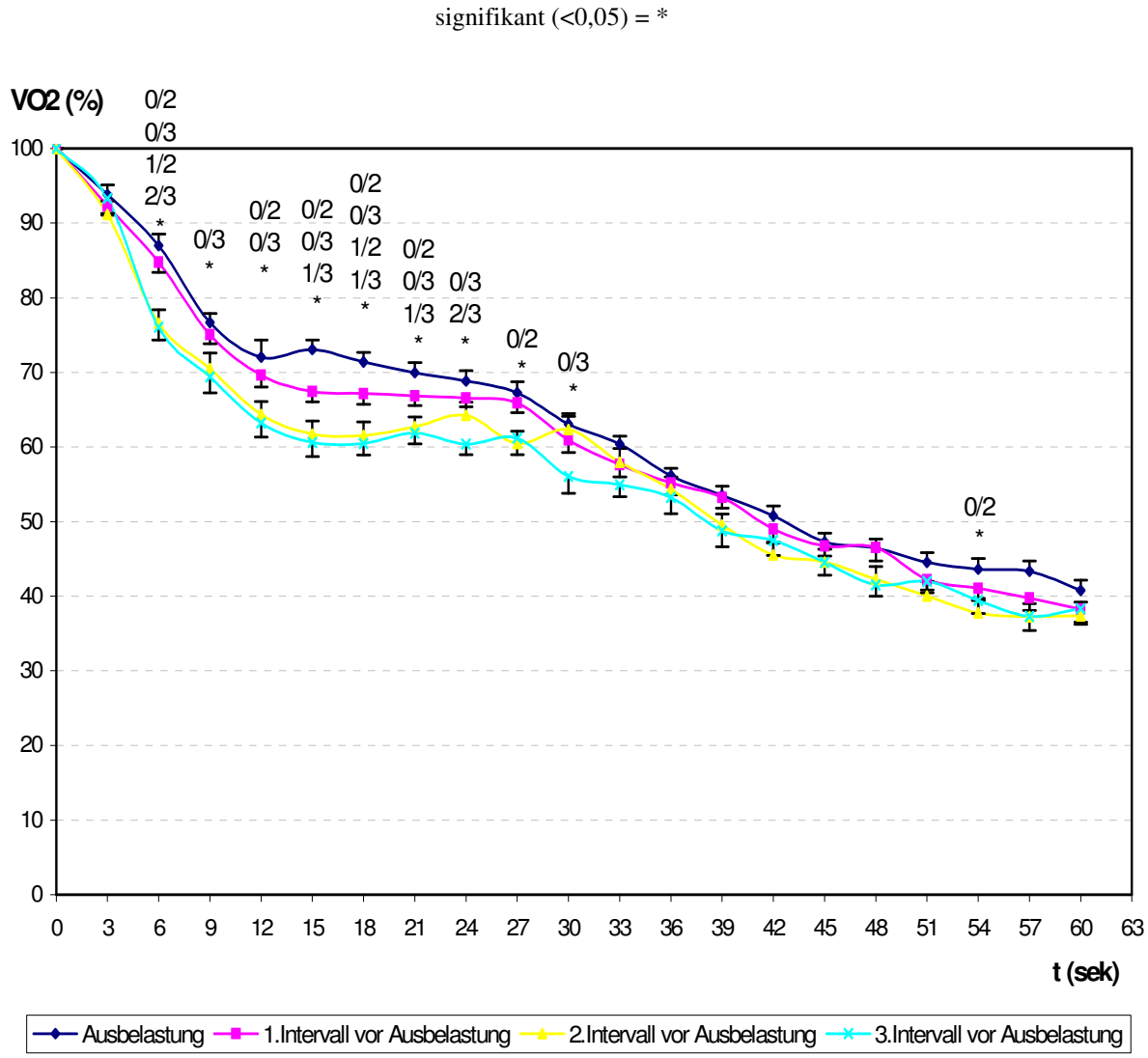


Abb. 30: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung (0) 16,18±1,87km/h, 1.Intervall vor Ausbelastung (1) 14,18±1,87km/h, 2.Intervall vor Ausbelastung (2) 12,18±1,87km/h, 3.Intervall vor Ausbelastung (3) 10,18±1,87km/h; Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg).

Tab. 34: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung (0) 16,18±1,87km/h, 1.Intervall vor Ausbelastung (1) 14,18±1,87km/h, 2.Intervall vor Ausbelastung (2) 12,18±1,87km/h, 3.Intervall vor Ausbelastung (3) 10,18±1,87km/h; Gruppe B (50-60ml O_2/min/kg). (n=34)

	Intervall	MW (%)	Stabw. (%)	SEM (%)	Var. (%)	n	p-Wert (**fett**, falls p<0,05) Tukey HSD-Test	
sek. 3	0	93,81	7,66	1,31	58,63	34	0 / 1 = 0,921	; 1 / 2 = 0,957
	1	92,35	7,34	1,26	53,94	34	0 / 2 = 0,663	; 1 / 3 = 0,975
	2	91,17	10,49	1,80	110,05	34	0 / 3 = 0,999	; 2 / 3 = 0,788
	3	93,32	11,84	2,03	140,18	34		
sek. 6	0	87,01	8,81	1,51	77,60	34	0 / 1 = 0,762	; 1 / 2 = **0,002**
	1	84,78	8,06	1,38	64,98	34	0 / 2 = **0,00004**	; 2 / 3 = **0,0007**
	2	76,59	10,70	1,83	114,39	34	0 / 3 = **0,00002**	; 2 / 3 = 0,994
	3	76,02	9,92	1,70	98,36	34		
sek. 9	0	76,68	6,97	1,19	48,53	34	0 / 1 = 0,901	; 1 / 2 = 0,240
	1	75,05	7,14	1,22	50,91	34	0 / 2 = 0,053	; 1 / 3 = 0,090
	2	70,51	12,14	2,08	147,43	34	0 / 3 = **0,014**	; 2 / 3 = 0,967
	3	69,39	12,38	2,12	153,37	34		
sek. 12	0	72,02	13,28	2,28	176,31	34	0 / 1 = 0,806	; 1 / 2 = 0,198
	1	69,63	9,17	1,57	84,12	34	0 / 2 = **0,021**	; 1 / 3 = 0,075
	2	64,37	10,02	1,72	100,44	34	0 / 3 = **0,005**	; 2 / 3 = 0,972
	3	63,21	11,05	1,90	122,12	34		
sek. 15	0	73,08	7,29	1,25	53,18	34	0 / 1 = 0,061	; 1 / 2 = 0,054
	1	67,45	8,16	1,40	66,61	34	0 / 2 = **0,00001**	; 1 / 3 = **0,013**
	2	61,71	10,24	1,76	104,81	34	0 / 3 = **0,000008**	; 2 / 3 = 0,961
	3	60,61	11,05	1,90	122,12	34		
sek. 18	0	71,39	7,68	1,32	58,93	34	0 / 1 = 0,219	; 1 / 2 = **0,049**
	1	67,17	8,50	1,46	72,32	34	0 / 2 = **0,00005**	; 1 / 3 = **0,012**
	2	61,52	10,78	1,85	116,20	34	0 / 3 = **0,00001**	; 2 / 3 = 0,965
	3	60,48	8,95	1,54	80,14	34		
sek. 21	0	69,97	7,82	1,34	61,11	34	0 / 1 = 0,343	; 1 / 2 = 0,130
	1	66,82	7,55	1,29	56,98	34	0 / 2 = **0,0007**	; 1 / 3 = **0,043**
	2	62,69	7,53	1,29	56,72	34	0 / 3 = **0,0001**	; 2 / 3 = 0,970
	3	61,85	8,33	1,43	69,36	34		
sek. 24	0	68,82	8,30	1,42	68,96	34	0 / 1 = 0,684	; 1 / 2 = 0,669
	1	66,54	6,72	1,15	45,10	34	0 / 2 = 0,112	; 1 / 3 = **0,014**
	2	64,22	10,38	1,78	107,69	34	0 / 3 = **0,0002**	; 2 / 3 = 0,240
	3	60,37	8,08	1,39	65,36	34		
sek. 27	0	67,24	8,87	1,52	78,64	34	0 / 1 = 0,947	; 1 / 2 = 0,106
	1	65,93	7,74	1,33	59,85	34	0 / 2 = **0,025**	; 1 / 3 = 0,195
	2	60,49	9,42	1,62	88,68	34	0 / 3 = 0,055	; 2 / 3 = 0,992
	3	61,17	12,81	2,20	163,98	34		
sek. 30	0	63,08	8,13	1,39	66,14	34	0 / 1 = 0,832	; 1 / 2 = 0,946
	1	60,92	9,76	1,67	95,26	34	0 / 2 = 0,991	; 1 / 3 = 0,223
	2	62,32	10,28	1,76	105,62	34	0 / 3 = **0,030**	; 2 / 3 = 0,066
	3	56,04	13,24	2,27	175,30	34		
sek. 33	0	60,37	6,42	1,10	41,19	34	0 / 1 = 0,600	; 1 / 2 = 0,998
	1	57,63	9,61	1,65	92,45	34	0 / 2 = 0,701	; 1 / 3 = 0,611
	2	57,98	10,52	1,80	110,69	34	0 / 3 = 0,065	; 2 / 3 = 0,508
	3	54,92	9,31	1,60	86,60	34		
sek. 36	0	56,17	5,56	0,95	30,93	34	0 / 1 = 0,975	; 1 / 2 = 0,983
	1	55,20	9,35	1,60	87,36	34	0 / 2 = 0,862	; 1 / 3 = 0,825
	2	54,36	9,30	1,60	86,53	34	0 / 3 = 0,576	; 2 / 3 = 0,960
	3	53,21	12,63	2,17	159,39	34		
sek. 39	0	53,49	7,45	1,28	55,47	34	0 / 1 = 0,999	; 1 / 2 = 0,372
	1	53,24	8,62	1,48	74,22	34	0 / 2 = 0,314	; 1 / 3 = 0,199
	2	49,58	8,19	1,40	67,01	34	0 / 3 = 0,160	; 2 / 3 = 0,984
	3	48,76	12,43	2,13	154,59	34		
sek. 42	0	50,76	7,90	1,35	62,41	34	0 / 1 = 0,889	; 1 / 2 = 0,498
	1	48,98	10,67	1,83	113,86	34	0 / 2 = 0,146	; 1 / 3 = 0,925
	2	45,54	9,96	1,71	99,30	34	0 / 3 = 0,536	; 2 / 3 = 0,863
	3	47,46	11,66	2,00	135,89	34		
sek. 45	0	47,27	6,73	1,15	45,29	34	0 / 1 = 0,994	; 1 / 2 = 0,742
	1	46,74	7,93	1,36	62,81	34	0 / 2 = 0,586	; 1 / 3 = 0,722
	2	44,61	9,81	1,68	96,30	34	0 / 3 = 0,564	; 2 / 3 = 0,999
	3	44,54	9,88	1,70	97,71	34		
sek. 48	0	46,47	6,86	1,18	47,12	34	0 / 1 = 0,999	; 1 / 2 = 0,220
	1	46,54	10,56	1,81	111,50	34	0 / 2 = 0,233	; 1 / 3 = 0,107
	2	42,28	9,84	1,69	96,83	34	0 / 3 = 0,115	; 2 / 3 = 0,986
	3	41,52	8,95	1,53	80,11	34		
sek. 51	0	44,53	7,76	1,33	60,19	34	0 / 1 = 0,720	; 1 / 2 = 0,762
	1	42,20	7,97	1,37	63,46	34	0 / 2 = 0,178	; 1 / 3 = 0,999
	2	40,04	11,30	1,94	127,77	34	0 / 3 = 0,660	; 2 / 3 = 0,815
	3	41,99	9,05	1,55	81,92	34		

sek. 54	0	43,61	8,35	1,43	69,71	34	0 / 1 = 0,656	; 1 / 2 = 0,437
	1	41,06	7,74	1,33	59,89	34	0 / 2 = **0,040**	; 1 / 3 = 0,883
	2	37,74	9,79	1,68	95,92	34	0 / 3 = 0,233	; 2 / 3= 0,870
	3	39,44	10,29	1,77	105,98	34		
sek. 57	0	43,32	8,21	1,41	67,45	34	0 / 1 = 0,449	; 1 / 2 = 0,726
	1	39,74	9,63	1,65	92,68	34	0 / 2 = 0,057	; 1 / 3 = 0,746
	2	37,23	10,45	1,79	109,19	34	0 / 3 = 0,062	; 2 / 3 = 0,999
	3	37,31	11,28	1,94	127,32	34		
sek. 60	0	40,77	8,13	1,39	66,12	34	0 / 1 = 0,763	; 1 / 2 = 0,984
	1	38,30	10,38	1,78	107,72	34	0 / 2 = 0,541	; 1 / 3 = 0,999
	2	37,39	10,54	1,81	111,15	34	0 / 3 = 0,772	; 2 / 3 = 0,982
	4	38,34	12,29	2,11	151,02	34		

3.6.4. Gruppe C (>60ml O_2/min/kg) (n=12)

Wie die Gruppen A und B, zeigt sich auch bei den hochausdauertrainierten Probanden der Gruppe C eine gesteigerte O_2-Aufnahme nach Ausbelastung. In der Nachbelastung submaximaler Belastungsstufen wird weniger Sauerstoff benötigt als nach den hochintensiven Belastungsstufen (siehe Abbildung 31; Tabelle 35).

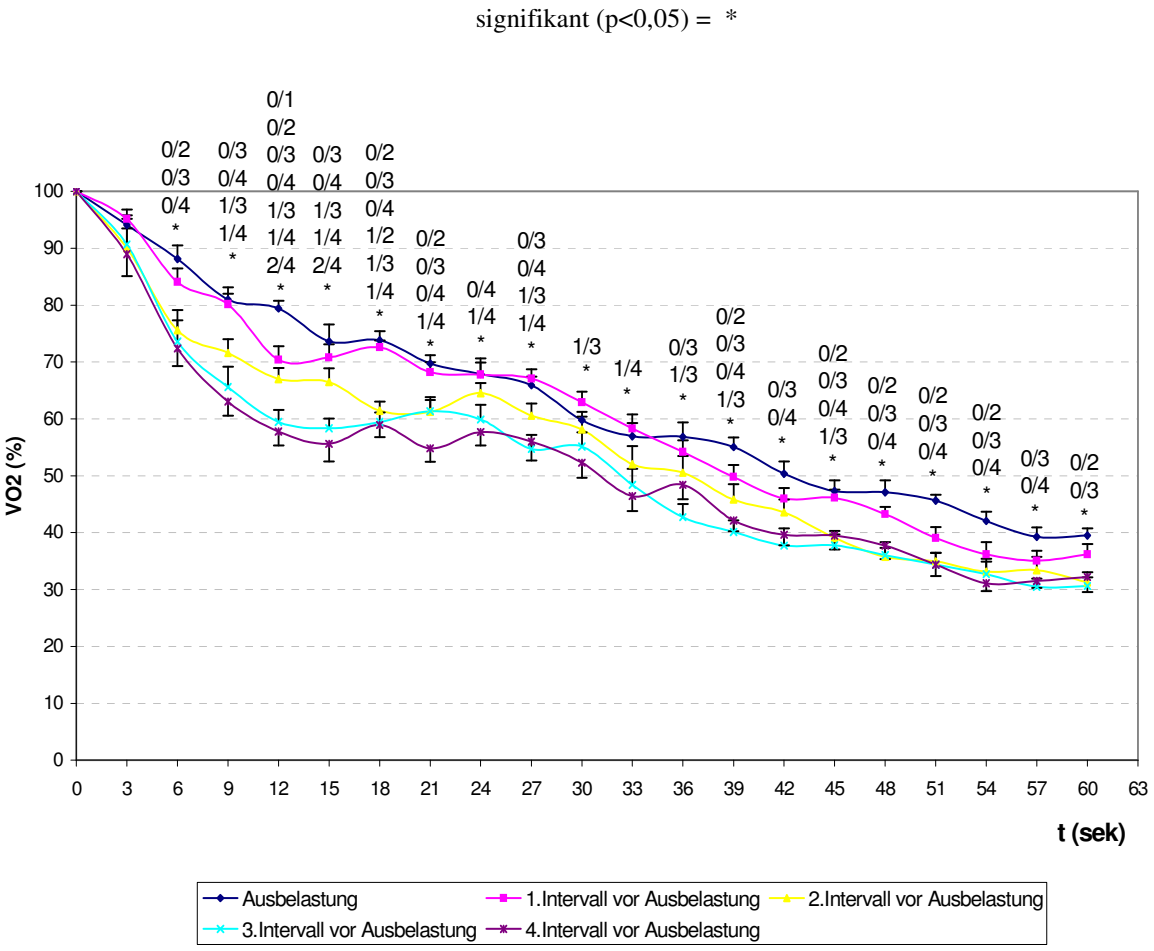


Abb. 31: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung (0) 18,17±1,59km/h, 1.Intervall vor Ausbelastung (1) 16,17±1,59km/h, 2.Intervall vor Ausbelastung (2) 14,17±1,59km/h, 3.Intervall vor Ausbelastung (3) 12,17±1,59km/h, 4.Intervall vor Ausbelastung (4) 10,17±1,59km/h; Gruppe C (>60ml O_2/min/kg).

Tab. 35: Multipler Mittelwertvergleich der O_2-Kinetik (prozentuale Darstellung) nach Ausbelastung (0) 18,17±1,59km/h, 1.Intervall vor Ausbelastung (1) 16,17±1,59km/h, 2.Intervall vor Ausbelastung (2) 14,17±1,59km/h, 3.Intervall vor Ausbelastung (3) 12,17±1,59km/h, 4.Intervall vor Ausbelastung (4) 10,17±1,59km/h; Gruppe C (>60ml O_2/min/kg) (n=12)

	Gruppe	MW (%)	Stabw. (%)	SEM (%)	Var. (%)	n	p-Wert (fett, falls p<0,05) Tukey HSD-Test
sek. 3	0	94,06	6,09	1,76	37,09	12	0 / 1 = 0,999 ; 1 / 3 = 0,871
	1	95,12	5,82	1,68	33,93	12	0 / 2 = 0,904 ; 1 / 4 = 0,673
	2	90,01	12,09	3,49	146,18	12	0 / 3 = 0,948 ; 2 / 3 = 0,999
	3	90,67	15,62	4,51	244,09	12	0 / 4 = 0,804 ; 2 / 4 = 0,999
	4	88,96	13,46	3,88	181,12	12	1 / 2 = 0,803 ; 3 / 4 = 0,996
sek. 6	0	88,10	8,27	2,39	68,46	12	0 / 1 = 0,884 ; 1 / 3 = 0,130
	1	84,04	8,25	2,38	68,08	12	0 / 2 = **0,044** ; 1 / 4 = 0,072
	2	75,58	12,22	3,53	149,29	12	0 / 3 = **0,013** ; 2 / 3 = 0,990
	3	73,57	13,02	3,76	169,45	12	0 / 4 = **0,006** ; 2 / 4 = 0,949
	4	72,40	10,76	3,11	115,87	12	1 / 2 = 0,309 ; 3 / 4 = 0,999
sek. 9	0	80,97	7,40	2,13	54,69	12	0 / 1 = 0,999 ; 1 / 3 = **0,002**
	1	80,11	6,52	1,88	42,51	12	0 / 2= 0,087 ; 1 / 4 = **0,0003**
	2	71,58	8,55	2,47	73,09	12	0 / 3 = **0,0009** ; 2 / 3 = 0,423
	3	65,59	12,38	3,57	153,21	12	0 / 4 = **0,0002** ; 2 / 4 = 0,142
	4	63,01	8,51	2,46	72,36	12	1 / 2 = 0,145 ; 3 / 4 = 0,954
sek. 12	0	79,41	4,82	1,39	23,26	12	0 / 1 = **0,028** ; 1 / 3 = **0,004**
	1	70,42	8,22	2,37	67,54	12	0 / 2 = **0,001** ; 1 / 4 = **0,00008**
	2	67,00	6,71	1,94	45,04	12	0 / 3 = **0,0001** ; 2 / 3 = 0,094
	3	59,47	7,30	2,11	53,33	12	0 / 4 = **0,0001** ; 2 / 4 = **0,023**
	4	57,78	8,48	2,45	71,95	12	1 / 2 = 0,774 ; 3 / 4 = 0,979
sek. 15	0	73,63	10,19	2,94	103,94	12	0 / 1 = 0,933 ; 1 / 3 = **0,009**
	1	70,80	7,96	2,30	63,43	12	0 / 2 = 0,284 ; 1 / 4 = **0,0009**
	2	66,49	8,35	2,41	69,68	12	0 / 3 = **0,0009** ; 2 / 3 = 0,169
	3	58,33	6,00	1,73	36,02	12	0 / 4 = **0,0002** ; 2 / 4 = **0,029**
	4	55,59	10,64	3,07	113,11	12	1 / 2 = 0,750 ; 3 / 4 = 0,939
sek. 18	0	73,83	5,46	1,58	29,82	12	0 / 1 = 0,983 ; 1 / 3 = **0,0001**
	1	72,56	4,31	1,25	18,62	12	0 / 2 = **0,0002** ; 1 / 4 = **0,0001**
	2	61,42	5,51	1,59	30,33	12	0 / 3 = **0,0001** ; 2 / 3 = 0,916
	3	59,44	5,80	1,67	33,65	12	0 / 4 = **0,0001** ; 2 / 4 = 0,827
	4	58,93	7,38	2,13	54,44	12	1 / 2 = **0,0003** ; 3 / 4 = 0,999
sek. 21	0	69,76	5,04	1,46	25,42	12	0 / 1 = 0,985 ; 1 / 3 = 0,153
	1	68,21	6,12	1,77	37,48	12	0 / 2 = **0,042** ; 1 / 4 = **0,0004**
	2	61,20	9,10	2,63	82,84	12	0 / 3 = **0,047** ; 2 / 3 = 0,999
	3	61,33	6,99	2,02	48,91	12	0 / 4 = **0,0002** ; 2 / 4 = 0,214
	4	54,84	8,27	2,39	68,45	12	1 / 2 = 0,140 ; 3 / 4 = 0,198
sek. 24	0	67,87	9,55	2,76	91,29	12	0 / 1 = 1,000 ; 1 / 3 = 0,142
	1	67,75	7,46	2,15	55,67	12	0 / 2 = 0,850 ; 1 / 4 = **0,029**
	2	64,52	6,11	1,76	37,30	12	0 / 3 = 0,131 ; 2 / 3 = 0,637
	3	59,90	9,01	2,60	81,18	12	0 / 4 = **0,0266** ; 2 / 4 = 0,253
	4	57,68	8,12	2,34	65,99	12	1 / 2 = 0,866 ; 3 / 4 = 0,962
sek. 27	0	65,90	5,36	1,55	28,68	12	0 / 1 = 0,996 ; 1 / 3 = **0,003**
	1	67,09	5,70	1,64	32,46	12	0 / 2 = 0,475 ; 1 / 4 = **0,011**
	2	60,55	7,29	2,10	53,16	12	0 / 3 = **0,010** ; 2 / 3 = 0,391
	3	54,74	8,34	2,41	69,52	12	0 / 4 = **0,029** ; 2 / 4 = 0,635
	4	56,02	11,54	3,33	133,11	12	1 / 2 = 0,274 ; 3 / 4 = 0,995
sek. 30	0	59,77	5,25	1,52	27,60	12	0 / 1 = 0,853 ; 1 / 3 = 0,109
	1	62,92	6,56	1,89	42,98	12	0 / 2 = 0,984 ; 1 / 3 = **0,011**
	2	58,11	7,89	2,28	62,20	12	0 / 3 = 0,578 ; 2 / 3 = 0,875
	3	55,12	8,79	2,54	77,19	12	0 / 4 = 0,137 ; 2 / 4 = 0,357
	4	52,30	9,24	2,67	85,44	12	1 / 2 = 0,546 ; 3 / 4 = 0,897
sek. 33	0	56,93	8,15	2,35	66,46	12	0 / 1 = 0,996 ; 1 / 3 = 0,081
	1	58,32	8,44	2,44	71,25	12	0 / 2 = 0,699 ; 1 / 4 = **0,022**
	2	52,04	10,99	3,17	120,73	12	0 / 3 = 0,178 ; 2 / 3 = 0,872
	3	48,39	9,73	2,81	94,68	12	0 / 4 = 0,056 ; 2 / 4 = 0,577
	4	46,40	8,92	2,58	79,59	12	1 / 2 = 0,470 ; 3 / 4 = 0,985
sek. 36	0	56,87	8,65	2,50	74,74	12	0 / 1 = 0,939 ; 1 / 3 = **0,016**
	1	54,18	7,04	2,03	49,55	12	0 / 2 = 0,380 ; 1 / 4 = 0,480
	2	50,53	10,18	2,94	103,59	12	0 / 3 = **0,002** ; 2 / 3 = 0,185
	3	42,70	8,03	2,32	64,55	12	0 / 4 = 0,129 ; 2 / 4 = 0,975
	4	48,42	8,80	2,54	77,36	12	1 / 2 = 0,835 ; 3 / 4 = 0,486
sek. 39	0	55,04	5,77	1,67	33,28	12	0 / 1 = 0,414 ; 1 / 3 = **0,017**
	1	49,79	7,31	2,11	53,41	12	0 / 2 = **0,026** ; 1 / 4 = 0,094
	2	45,80	9,42	2,72	88,73	12	0 / 3 = **0,0002** ; 2 / 3 = 0,328
	3	40,09	7,20	2,08	51,82	12	0 / 4 = **0,0008** ; 2 / 4 = 0,738
	4	42,13	6,57	1,90	43,19	12	1 / 2 = 0,674 ; 3 / 4 = 0,960
sek. 42	0	50,36	7,48	2,16	56,02	12	0 / 1 = 0,657 ; 1 / 3 = 0,088
	1	46,00	6,42	1,85	41,19	12	0 / 2 = 0,229 ; 1 / 4 = 0,286
	2	43,57	7,71	2,22	59,37	12	0 / 3 = **0,002** ; 2 / 3 = 0,371
	3	37,70	10,66	3,08	113,63	12	0 / 4 = **0,013** ; 2 / 4 = 0,734
	4	39,61	6,32	1,83	39,98	12	1 / 2 = 0,942 ; 3 / 4 = 0,976

	0	47,31	6,52	1,88	42,51	12	0 / 1 = 0,991	; 1 / 3 = **0,019**
	1	46,11	5,09	1,47	25,93	12	0 / 2 = **0,022**	; 1 / 4 = 0,100
sek. 45	2	39,08	4,21	1,22	17,77	12	0 / 3 = **0,005**	; 2 / 3 = 0,986
	3	37,75	6,83	1,97	46,67	12	0 / 4 = **0,033**	; 2 / 4 = 1,000
	4	39,51	8,52	2,46	72,62	12	1 / 2 = 0,069	; 3 / 4 = 0,962
	0	47,10	7,26	2,10	52,73	12	0 / 1 = 0,623	; 1 / 3 = 0,087
	1	43,26	4,43	1,28	19,60	12	0 / 2 = **0,001**	; 1 / 4 = 0,280
sek. 48	2	35,75	5,43	1,57	29,54	12	0 / 3 = **0,002**	; 2 / 3 = 1,000
	3	36,06	7,86	2,27	61,79	12	0 / 4 = **0,011**	; 2 / 4 = 0,955
	4	37,70	8,26	2,38	68,25	12	1 / 2 = 0,067	; 3 / 4 = 0,976
	0	45,62	3,58	1,03	12,82	12	0 / 1 = 0,074	; 1 / 3 = 0,332
	1	39,06	6,70	1,93	44,89	12	0 / 2 = **0,0007**	; 1 / 4 = 0,329
sek. 51	2	34,93	5,35	1,54	28,58	12	0 / 3 = **0,0004**	; 2 / 3 = 0,999
	3	34,38	7,04	2,03	49,54	12	0 / 4 = **0,0004**	; 2 / 4 = 0,999
	4	34,36	6,87	1,98	47,26	12	1 / 2 = 0,461	; 3 / 4 = 1,000
	0	42,06	5,65	1,63	31,88	12	0 / 1 = 0,230	; 1 / 3 = 0,720
	1	36,17	7,46	2,15	55,63	12	0 / 2 = **0,018**	; 1 / 4 = 0,376
sek. 54	2	33,11	8,01	2,31	64,15	12	0 / 3 = **0,012**	; 2 / 3 = 1,000
	3	32,67	7,63	2,20	58,28	12	0 / 4 = **0,002**	; 2 / 4 = 0,952
	4	31,11	4,85	1,40	23,54	12	1 / 2 = 0,807	; 3 / 4 = 0,980
	0	39,25	5,69	1,64	32,33	12	0 / 1 = 0,432	; 1 / 3 = 0,341
	1	35,07	6,20	1,79	38,48	12	0 / 2 = 0,130	; 1 / 4 = 0,588
sek. 57	2	33,39	8,07	2,33	65,08	12	0 / 3 = **0,006**	; 2 / 3 = 0,756
	3	30,49	4,89	1,41	23,92	12	0 / 4 = **0,019**	; 2 / 4 = 0,935
	4	31,49	4,27	1,23	18,21	12	1 / 2 = 0,959	; 3 / 4 = 0,994
	0	39,47	4,51	1,30	20,30	12	0 / 1 = 0,723	; 1 / 3 = 0,235
	1	36,17	6,30	1,82	39,72	12	0 / 2 = **0,025**	; 1 / 4 = 0,573
sek. 60	2	31,28	6,08	1,75	36,92	12	0 / 3 = **0,012**	; 2 / 3 = 0,999
	3	30,61	5,28	1,53	27,91	12	0 / 4 = 0,061	; 2 / 4 = 0,997
	4	32,22	9,25	2,67	85,50	12	1 / 2 = 0,360	; 3 / 4 = 0,973

4. Diskussion

4.1. Vergleichbare Versuchsbedingungen während der Online- und Nachatmungstests

Um gleiche Testvoraussetzungen in beiden Tests (online/Nachatmung) zu belegen, wurden physiologische und physikalische Parameter erhoben und auf Signifikanz geprüft (siehe Kapitel 3.1).

Die Luftfeuchtigkeit und Raumtemperatur zeigten keine signifikanten Unterschiede und sorgten für gleiche Testvoraussetzungen des Raumklimas (siehe Tabellen 3, 5, 7). Die Raumtemperatur unterschied sich nur in Gruppe B signifikant im Mittel um 0,4°Celsius (siehe Tabelle 5), was jedoch keine Auswirkungen auf die physiologischen Parameter der betroffenen Sportler hatte (siehe Tabelle 6). Sowohl die Maximalwerte von Laktat und Herzfrequenz, als auch die physiologischen Parameter unter Belastung, hier objektiviert durch die Laktatwerte, die Geschwindigkeit und die Herzfrequenz an der individuellen aerob-anaeroben Schwelle (IAS) nach Simon [99], zeigten in allen Gruppen keine Unterschiede zwischen den Messungen (siehe Tabellen 4, 6, 8).

Die Probanden traten zu beiden Terminen mit signifikant nicht unterschiedlichen körperlichen Voraussetzungen an (siehe Tabellen 3, 5, 7). Die Kreatinkinase in Ruhe (Ruhe-CK) lag vor den Spiroergometrien bei fast allen Gruppen im Mittel knapp über dem laborchemischen Grenzwert (171 U/l[79]). Da die CK, als intrazellulärer Marker einer Muskelschädigung aufgrund vorangegangener Belastungen[31, 110] oder als Marker einer Kohlenhydratverarmung[31, 110], durch das regelmäßige Training der Sportler langfristig erhöht sein kann und ein CK-Abbau mehrere Tage benötigt[110], sind Rückschlüsse von der Ruhe-CK auf das Befinden des Athleten erst im intraindividuellen, langfristigen Vergleich erlaubt[31, 109, 110]. Es konnte somit nicht pauschal von einer Glykogenverarmung oder von einer unzureichenden Regeneration ausgegangen werden, was zu einer potentiellen Verfälschung der erhobenen physiologischen Parameter hätte führen können.

Der fehlende signifikante Unterschied der Ruhe- CK beim Vergleich beider Messungen in der jeweiligen Gruppe, sprach in jedem Fall für eine gleiche muskuläre Vorbelastung der Probanden.

Bei den hochausdauertrainierten Probanden in Gruppe C kam es zu einem signifikanten Unterschied zwischen dem Ruhe-RQ im online-Test und im Nachatmungstest (siehe Tabelle 7).

Uhrhausen[109] beschreibt den Zusammenhang zwischen erniedrigtem Ruhe-RQ, erhöhter maximaler Herzfrequenz und erniedrigter maximaler Laktatwerte als Ausdruck einer Glykogenverarmung.

Die in der Online-Messung signifikant erhöhte maximale Herzfrequenz der Hochtrainierten der Gruppe C (siehe Tabelle 8), ließe sich als Folge des niedrigeren Respiratorischen Quotienten (Ruhe-RQ) in Ruhe sehen. Der Ruhe-RQ schien aber noch nicht so stark erniedrigt, dass auch die maximalen Laktatwerte erniedrigt wären[109] (siehe Tabelle 8).

Ein Ruhe-RQ von 0,80 beschreibt nach Meyer et al. ein Mischverhältnis in der Energiegewinung von 33,4% Kohlenhydratverbrennung zu 66,6% Fettverbrennung[73].

Der beschriebene niedrigere Ruhe-RQ von 0,85 in Gruppe C (siehe Tabelle 7) ließ demnach keinen Rückschluß auf eine komplette Glykogenverarmung der Probanden zu.

Ein Einfluss eines erniedrigten Ruhe-RQ`s auf die zu erreichende VO_2max wurde in der Studie von Miura et al. (Ruhe-RQ 0,84) nicht festgestellt[1].

Zusammenfassend konnte in der aktuellen Studie, trotz des erniedrigten Ruhe-RQ`s, nicht von signifikanten Unterschieden des Zielparameters VO_2max ausgegangen werden.

Auch die Selbsteinschätzung der Läufer anhand der Borg-Skala[13] bestätigte eine nahezu gleich intensiv gefühlte Belastung. Anders als in den Gruppen A und B (siehe Tabellen 4, 6), führte die Atemmaske in Gruppe C nicht zu einer Zunahme der gefühlten Anstrengung während des letzten Belastungsintervalls (siehe Tabelle 8). Erklärend hierfür wären die von den Hochtrainierten geäußerten früheren Erfahrungen mit Spiroergometrien.

4.2. Ausbelastungskriterien bei Bestimmung der VO_2max

Die Bestimmung einer VO_2max setzt definitionsgemäß die maximale Ausbelastung des Probanden voraus.

In dieser Studie wurde aufgrund des Studiendesigns generell von der VO_2peak gesprochen, da eine ungenügende Ausbelastung einzelner Probanden nicht ausgeschlossen werden konnte.

Zur Gewährleistung des O_2-steady-states vor Aufzeichnung der Sauerstoffkinetik nach jeder Belastungsstufe, durften die Probanden die Belastung nicht innerhalb eines 3-Minuten-Intervalls abbrechen. Eine Fortführung der Spiroergometrie setzte immer das Durchlaufen des begonnenen 3-Minuten-Intervalls voraus. Ein kurzes Anlaufen und Abbrechen der nächst höheren Belastungsstufe war durch das Studiendesign nicht möglich.

Zur Überprüfung der allgemeinen Ausbelastung dienten, neben der subjektven Einschätzung über die Borg-RPE-Skala, auch objektive physiologische Ausbelastungskriterien (siehe Tabellen 9-11).
Die Erhebung dieser Parameter erfolgte mitunter durch Bildung von Mittelwerten innerhalb der letzten Minute vor Belastungsabbruch. Da bei den Nachatmungstests nur die physiologischen Parameter während der Belastungspausen erfasst werden konnten, gelang der Nachweis der Ausbelastung für die Nachatmungstests nur anhand der Borg-Skala und der maximalen Laktatkonzentration (siehe Tabellen 9-11).
Die Übereinstimmung der Ausbelastungskriterien im Online- und Nachatmungstest auf der Borg-RPE-Skala und in der maximalen Laktatkonzentration (siehe Tabellen 9-11), die fast identische O_2-Kurvenkinetik beider Testversionen nach Ausbelastung (siehe Kapitel 3.4) und der nicht-signifikante Unterschied der errechneten zur gemessenen VO_2peak bei Belastungsabbruch (siehe Kapitel 3.3) belegte die deckungsgleiche Beanspruchung der Athleten im Online-Test und im Nachatmungstest.
Die überwiegende Erfüllung der Ausbelastungskriterien im Online-Test konnte somit auch im Nachatmungstest angenommen werden.
Zusammanfassend konnte von einer großen Übereinstimmung zwischen Nachatmungs- und Online-Test ausgegangen werden.

Nach Betrachtung der Regenerationsparameter, der Erfüllung der Ausbelastungskriterien und der meist nicht-signifikanten Unterschiede der physiologischen Parameter unter Belastungbedingungen, konnte sowohl von einer ausreichenden Regeneration als auch von einer Ausbelastung der Probanden in beiden Testversionen ausgegangen werden.

4.3. Vergleich VO_2peak: Online-Messung (3-sek-Intervalle) vs. Retroextrapolation (20-sek-Intervalle)

Die von Léger[55] 1980 postulierte monoexponentielle Retroextrapolation (4x20-Sekunden-Intervalle) gilt als genauso valide wie die Online-Messung zur Bestimmung der VO_2max bei Belastungsabbruch nach aerober Belastung und nach Maximalbelastung[16, 21, 52, 54, 56, 76, 77, 88, 100].

Die Gültigkeit konnte auch mit den Daten dieser Studie für Männer unterschiedlicher Ausdauerleistungsfähigkeit nachgewiesen werden (siehe Kapitel 3.3.1-3.3.3).

Interessanterweise liegt die Darstellung der O_2-Verlaufskurve mit den gleichen Rohdaten, wenn auf vier 20-Sekunden-Intervalle geglättet, über der O_2-Kurve mit den 3-Sekunden-Intervallen (siehe Tabellen 12, 13, 14).

Neben Demarie[22], Lucia[61] und Rodriguez[91] beschreibt auch P. Wenzel in seiner Dissertation[115] einen höheren Kurvenverlauf der Sauerstoffaufnahme im mixing-chamber. Wenzel beschreibt ihn als einen *systematischen Fehler*, der durch Mittelwertbildung von O_2-Werten bei der Erstellung *exponentieller* Messintervalle im mixing-chamber entstünde. Durch die Mittelwertbildung der O_2-Aufnahme eines 20-sek exponentiell absteigenden Datenverlaufes, falle dieser nicht in gleicher Weise wie der Mittelwert von Sekunde x bis Sekunde x+20 ab, sondern läge immer etwas mehr in Richtung Zeitpunkt Null, das heißt in Richtung des Endes der vorangegangenen Belastungsstufe[115]. Die Mittelwerte bei exponentiellen Datenverlauf liegen demnach im mixing-chamber-Modus umso höher gegenüber denen des breath-by-breath-Modus, desto größer die Messintervalle gewählt werden.

Weiterhin ist auffallend, dass sich durch die Wahl von 3-Sekunden-Intervallen, bereits innerhalb der ersten Sekunden ein biphasischer Kurvenanteil der O_2-Verbrauchskurve darstellen lässt (siehe Abbildungen 8, 9, 10).

Auch die von di Prampero berichtete Plateaubildung der O_2-Werte auf dem Niveau der VO_2max in den ersten 25 Sekunden nach Ausbelastung und der sich daran anschließende rein monoexponentielle Kurvenabfall[24] konnte durch die aktuelle Studie nicht bestätigt werden.

Da die dargestellten 3-Sek-Intervalle in der Tendenz einer breath-by-breath-Messung gedeutet werden können, ist davon auszugehen, dass sich bei einer breath-by-breath-Messung, mit Abbildung eines jeden Atemzuges während der Nachbelastung, der nicht-monoexponentielle O_2-Kurvenaneil in den ersten 30 Sekunden der Nachbelastung noch ausgeprägter darstellt.

4.4. Vergleich VO_2peak: Online-Messung (3-sek-Intervalle) vs. Retroextrapolation (3-sek-Intervalle)

Die Sauerstoffaufnahmekurven der Online- und der Nachatmungstests lagen im Verlauf der Nachbelastung aller Belastungsstufen der drei Probandengruppen nahezu deckungsgleich übereinander (siehe Abbildungen 11-22). Ein signifikanter Unterschied beim paarweisen Vergleich der jeweiligen 3-sekündigen Nachbelastungsintervalle

(Sekundenintervall 9 - 81) war in der Gesamtheit nicht nachzuweisen (siehe Tabellen 15-26).

Dies stimmt mit den Beobachtungen Légers überein, der in seiner Studie eine identische O_2-Kinetik der 20-Sekunden-Intervalle nach Ausbelastung in online- und im Nachatmungsmodus beschreibt[55].

Zusammenfassend scheint die O_2-Kinetik in der Nachbelastungsphase unabhängig von der Messmodalität (online vs. Nachatmungsmethode) reliabel darstellbar zu sein.

Die Auswahl der Intervallänge bei Bildung eines mixing-chambers hatte einen Einfluss auf die O_2-Kinetik und Abweichung der retrograd monoexponentiell extrapolierten VO_2peak (siehe oben).

Bei Darstellung des Datensatzes in 3-Sekunden-Intervallen zeigte sich in allen 3 Gruppen (A,B,C) nach jeder Belastungsstufen ein stets nicht streng monoexponentieller Kurvenanteil der O_2-Verbrauchskurve in den ersten Sekunden der Nachbelastung (siehe Abbildungen 11-22).

Die tatsächliche in den online-Spirometrien ermittelte VO_2peak, wurde nach Ausbelastung im Mittel um 10,2% (siehe Tabelle 27) und nach den submaximalen Belastungsintervallen im Mittel um bis zu 22,1% (siehe Tabelle 30) signifikant unterschätzt ($p<0,001$).

Die drei Gruppen unterschiedlicher Ausdauerleistungsfähigkeit (A,B,C) zeigten untereinander keinen signifikanten Unterschied in der prozentualen Abweichung zum tatsächlichen VO_2peak-Wert ($p>0,05$; siehe Tabellen 27-30).

Die graphische Darstellung der VO_2 in der Nachbelastungsphase mit kleinen Messintervallen und die signifikante Unterschätzung der VO_2peak im Vergleich zu der korrespondierenden Online-Messung führen zu der Annahme, dass nicht die gesamte schnelle Komponente der O_2-Kurve (siehe Kapitel 4.4.1.) in der Nachbelastungsphase der Funktion $y=ae^{-bx}$ folgt.

Zusammenfassend setzt die Nutzung der monoexponentiellen Retroextrapolation mit 3-sekündigen Messintervallen die Anwendung eines Korrekturfaktors im Mittel von 10,2 ± 11,4% nach Ausbelastung voraus, um auf valide VO_2max-Werte zu kommen (siehe Tabelle 27).

Da die durch Training zu messenden Änderungen der VO_2max im Leistungssportbereich in wenigen ml O_2/min/kg angenommen werden können, haftet dem Korrekturfaktor eine große Unsicherheit an, kleine Leistungsfortschritte zu übersehen.

Bis zur endgültigen Entwicklung eines breath-by-breath-Algorhythmus im Nachatmungsmodus sind weiterhin 20-Sekunden-Intervalle zur monoexponentiellen Retroextrapolation oder die Online-Methode zur VO_2peak-Erhebung zu favorisieren.

4.4.1. Zusammenhang zwischen O_2-Kinetik und PCr-Resynthese in der Nachbelastungsphase

Der abnehmende biphasische Verlauf der Sauerstoffaufnahme nach Maximalbelastung könnte sich durch die O_2 -Abhängigkeit der Kreatinphosphatresynthese (PCr) erklären:

Die Resynthese von Kreatinphosphat, als am schnellsten verfügbare alaktazide Energiequelle[71], benötigt als eine Komponente der oxidativen Rephosphorylierung von Kreatin im Cytosol der Muskelzelle den Sauerstoff [37, 69, 86, 104].

Die Auffüllung der muskulären PCr-Speicher ist nach etwa 2 Minuten dynamischer Muskelarbeit zu 84%[37] abgeschlosssen[45, 85].

Aus dem abnehmenden Verlauf der O_2-Aufnahmekurve in der Nachbelastung kann meistens ein direkter Rückschluss auf die Kinetik der Kreatinphosphatresynthese gezogen werden[71].

Die direkte O_2-Abhängigkeit der Kreatinphosphokinase, und der somit direkte Zusammenhang zwischen O_2-Kurvenkinetik und PCr-Resynthesegeschwindigkeit, konnte für die gesamte Zeitspanne der PCr-Resynthese nach aeroben Belastungen[71] und für die *schnelle Komponente* der PCr-Resynthese (t½=22[37]-35sek[19, 84]) nach Maximalbelastungen nachgewiesen werden[95].

Während die O_2-Aufnahmekurve, und damit auch die PCr-Resynthese, nach moderaten Belastungen im gesamten Kurvenverlauf einer monoexponentiellen Funktion folgt[26, 65, 72], verläuft die O_2-Aufnahmekurve und damit auch die PCr-Resynthese nach Maximalbelastungen bi-exponentiell[10, 37, 78, 104].

Nach Maximalbelastungen fällt die O_2-Aufnahmekurve in der *schnellen Komponente* rasch exponentiell ab (t½ der *schnellen Komponente* =25[66]-27[26]sek) und geht dann nach zirka 80 Sekunden[55] in die *langsame Komponente*, eine zweite exponentielle Kurve über, die nach etwa 15-20 Minuten den Ausgangswert der O_2-Aufnahme vor Belastungsbeginn erreicht[26].

Diese *langsame Komponente* der O_2-Aufnahmekurve nach maximaler Ausbelastung dient, neben der restlichen PCr-Resynthese (t½=170sek[37]), auch der Regulierung des pH-Werts. Die PCr-Resynthese wird in der langsamen Komponente nicht allein vom O_2-Angebot, sondern ganz entscheidend von der H^+-Konzentration in der Muskelzelle beeinflusst. Eine im Rahmen einer Azidose erhöhte H^+-Konzentration ist mit einer reduzierten PCr-

Resynthese, d.h. einer Veränderung der O_2-Kinetik der langsamen Komponente der PCr-Resynthese, assoziiert [4, 9, 60, 67, 94, 95, 103].

Léger[55] umging bei der Validierung der monoexponentiellen Nachatmungsmethode das Problem des ihm bekannten biphasischen O_2-Kurvenverlaufs nach Maximalbelastung[55], indem er bewusst lediglich die O_2-Werte der ersten 80sek der Nachbelastung in seine Berechnung einbezog. Léger diskutierte den unterschätzenden Einfluss der langsamen Komponente der O_2-Kurve nach Ausbelastung auf die monoexponentielle Retroextrapolation der VO_2max und hielt diesen gezielt klein, ohne in seiner Publikation auf den Zusammenhang zwischen O_2-Kinetik und PCr-Resynthese einzugehen. Dadurch konnte er über vier gemittelte 20-Sek-Intervalle monoexponentiell valide retroextrapolieren[55].

Die Bestätigung Légers retrograder Extrapolationsmethode durch Studien anderer Forschungsgruppen, unter Verwendung von 20-Sekunden-Intervallen nach maximalen[16, 21, 52, 56, 76, 88] und submaximalen Belastungen[54, 77, 100], könnte durch eine identische Kurvenkinetik der O_2-Aufnahme bei Verwendung von gemittelten 20-Sekunden-Intervallen in der 80-sekündigen schnellen Komponente der PCr-Resynthese nach unterschiedlichen Belastungsintensitäten erklärt werden.

Bei Verwendung von 3-Sekunden-Intervallen wie in der aktuellen Studie, konnte kein identischer O_2-Kurvenverlauf dargestellt werden. Es zeigte sich ein signifikant unterschiedlicher exponentieller Verlauf der O_2-Aufnahmekurven auf submaximalen Belastungsstufen (siehe Abbildungen 28-31).

Analog zur Studie Légers, wurde in der aktuellen Studie der Einfluss der langsamen Komponente der O_2-Kurve auf die retrograde Extrapolation gering gehalten. Die Ursache der Unterschätzung der VO_2peak bei Verwendung von 3-Sekunden-Intervallen (siehe Tabellen 11-22), läge damit in der Kinetik der schnellen Komponente der PCr-Resynthese.

Zusammenfassend kann von einem in der Literatur bisher nicht beschriebenen biphasischen Verlauf der PCr-Speicherauffüllung nach Belastungsabbruch ausgegangen werden. Dadurch folgt die O_2-Aufnahmekurve nach Ausbelastung, sofern in kleineren Zeitintervallen dargestellt, nicht mehr der Funktion $y=ae^{-bx}$.

4.4.2. Überdeckung der initialen O_2-Kinetik durch gemittelte 20-Sekunden-Intervalle

Die Annahme, dass es allein durch die Wahl von gemittelten 20-Sekunden-Intervallen zu einer Überdeckung der biphasischen O_2-Kinetik innerhalb der ersten 20 Sekunden nach Ausbelastung kommt, wird durch die Ergebnisse von Carré[16] und Costill[21] gestützt.

Diese Studien beschreiben eine hohe Korrelation zwischen der gemessenen und der errechneten VO_2max durch monoexponentielle Retroextrapolation von je 1x20-Sek-Intervalls nach Maximal[16]- und Submaximalbelastungen[16, 21].

Eine Mittelung der ersten 20-Sekunden scheint demnach schon auszureichen die initiale biphasische O_2-Kinetik zu überdecken und zu validen retroextrapolierten VO_2max- Werten zu kommen.

Andere Studienergebnisse von Morgan et al widersprechen dieser Annahme. Sie beschreiben in ihrer Studie weiterhin eine gemittelte Unterschätzung der monoexponentiell errechneten VO_2peak von 3,7-5,8%, die mit höherer Belastung geringer wird[77].

Auch in der vorliegenden Studie stieg die prozentuale Abweichung der errechneten VO_2peak auf submaximalen Stufen im Mittel aller Gruppen auf bis zu 22,3% an und unterstützte diesen Teil von Morgans Ergebnissen.

Erklärend für die größere mittlere Unterschätzung der VO_2peak im Vergleich zu Morgan, könnte die Wahl kleinerer Messintervalle, mit einer damit verbundenen steileren Kinetik der O_2-Verlaufskurve in den ersten Sekunden nach Belastungsabbruch, und zum anderen die längere Datenerhebung in der aktuellen Studie sein (81 Sekunden in der aktuellen Studie vs. 15-,20-,25 Sekunden bei Morgan et al.).

Je größer der Anteil der flacher werdenden O_2-Kinetik rechnerisch einbezogen wird, desto größer ist generell der unterschätzende Einfluss auf die monoexponentiell retrograd extrapolierte VO_2max[55].

Weiterhin machte Morgan keine sekundengenaue Angabe zur Zeit zwischen Belastungsabbruch und Beginn der spirometrischen Aufzeichnung im Nachatmungsmodus[77]. Es besteht eine allgemein gültige Übereinstimmung über die Notwendigkeit einer möglichst kleinen Pause zur validen Retroextrapolation auf die Sekunde 0 bei Belastungsabbruch[16, 21, 52, 54, 56, 76, 77, 88, 100]. Léger akzeptierte in seiner Studie zur Validierung der monoexponentiellen Retroextrapolation (4x20-Sek-Intervalle) eine Aufzeichnungslücke von 3 Sekunden im Nachatmungsmodus und räumte in einem Setting seiner Studie sogar eine zirka 5%ige Unterschätzung der VO_2max ein, die nach nicht näher erläuterter Korrektur um die 3-sekündige Aufzeichnungslücke zu validen Ergebnissen führte[55]. Eine solche Korrekturbedürftigkeit der errechneten VO_2peak mit 4x20-Sek-Intervallen konnte in der aktuellen Studie nicht beobachtet werden (siehe Kapitel 3.3).

Da die Aufzeichnungslücke der O_2-Aufnahmekurve in der aktuellen Studie mit 6 Sekunden größer als diejenige in den genannten Studien war, es zu einer ausgeprägteren Unterschätzung der VO_2peak kam und ein Einfluss der langsamen Komponente der O_2-Aufnahmekurve weitgehend ausgeschlossen wurde, ist neben den anderen methodischen

Unterschieden von einem Einfluss der Länge der Aufzeichnungslücke auf die Korrekturbedürftigkeit der errechneten VO_2peak auszugehen.

Es ist anzunehmen dass eine kleinere Aufzeichnungslücke in der aktuellen Studie zu genaueren VO_2peak-Werten geführt hätte, da der steilere O_2-Kurvenverlauf in den ersten 6 Sekunden mehr mit einbezogen würde.

Der Länge der 6-sekündigen Aufzeichnungslücke der aktuellen Studie entsprach der Zeit von Belastungsabbruch bis zum Stillstand des Laufbands, dem gefahrlosen Aufsetzen der Spirometermaske und der Darstellung der ersten, artefaktfreien, realistischen O_2-Werte des Spirometers. Es scheint realistisch diese Zeitspanne in den Feldversuch zu übertragen, wenn zum Beispiel Läufer auf der Bahn nach Beendigung intensiver Belastungsintervalle erst einige Meter auslaufen bevor diese zum Stillstand kommen und in die Spirometermaske atmen können.

4.5. Multiple Mittelwertvergleiche der O_2-Kinetik nach Ausbelastung zwischen den Gruppen A, B, C (prozentuale Darstellung der VO_2)

Zur Erklärung der identischen prozentualen Unterschätzung der monoexponentiell errechneten VO_2peak gegenüber der online gemessenen VO_2peak nach allen Belastungsstufen, wurde die prozentuale O_2-Aufnahmekinetik aller drei Gruppen in den ersten Minuten nach Ausbelastung und deren Kurvenvergleich dargestellt.

Es stellten sich überwiegend keine Unterschiede in der prozentualen O_2-Kurvenkinetik zwischen den Gruppen unterschiedlicher Ausdauer-leistungsfähigkeit dar ($p>0,05$).

4.5.1. nach Ausbelastung

In Abbildung 27 zeigt sich die identische prozentuale O_2-Kinetik der drei Gruppen A, B und C in den ersten 181 Sekunden nach Ausbelastung (siehe Kapitel 3.5).

Die anfänglich steil abfallende O_2 -Kurve flacht zunehmend ab, um dann nach etwa 27-30 Sekunden erneut steil abzufallen.

Durch die Ausbelastung aller drei Gruppen kann von identisch erschöpften Kreatinphosphatreserven aller beanspruchten Muskelfasern ausgegangen werden[17, 91, 106].

Die durch Ausdauertraining entwickelten ST-(Typ 1) Muskelfasern haben eine erhöhte Kapillarisierung[2, 3] und eine größere Mitochondriendichte[35], die mit einer größeren oxidativen Enzymaktivität in den Muskeln der Trainierten assoziiert ist[34]. Dadurch seien die Muskeln dieser Sportler zu einer schnelleren PCr-Speicherauffüllung fähig[34, 35].

Interessanterweise ist die prozentuale Kinetik der O_2-Aufnahmekurve nach maximaler Ausbelastung bei allen drei Probandengruppen identisch (siehe Abbildung 27). Die Teilauffüllung der PCr-Speicher nach Ausbelastung scheint bei allen Gruppen einer einheitlichen Enzymkinetik in einem identisch langen Zeitintervall zu unterliegen.

Cooke[19] und Petersen[84] unterstützen die aktuellen Ergebnisse einer prozentual einheitlichen PCr-Kinetik. Sie beschreiben eine prozentual identische PCr-Speicherauffüllung in der Nachbelastung bei hochtrainierten und untrainierten Probanden, sofern diese im Vorfeld prozentual gleich intensiv belastet werden.

Womit genau die prozentual identische PCr-Resynthese zusammenhängt bleibt unbeantwortet.

Die aktuellen Ergebnisse stehen dabei nur vordergründig im Widerspruch zu dem allgemein beschriebenen positiven Einfluss von Ausdauertraining auf die Geschwindigkeit der PCr-Resynthese [68-70, 103, 118]. Zu beachten ist, dass die aktuelle Studie die prozentuale VO_2-Kinetik in den ersten 81 Sekunden beschreibt, wohingegen die Autoren [68-70, 103, 118] von der absoluten Wiederauffüllung der PCr-Speicher sprechen.

Da in der Literatur keine Studien über trainingsabhängige Aktivitätsunterschiede auf molekularer Enzymebene der Kreatinphosphokinase oder über einen trainingsabhängig unterschiedlichen Enzymgehalt pro Muskelmasse gefunden wurden, könnten die aktuellen Ergebnisse auch zu der Annahme eines stets proportionalen Verhältnisses zwischen Muskelmasse, PCr-Speicher und Kreatinphosphokinase führen. Die Unterschiede in der absoluten Auffüllung der PCr-Speicher zwischen unterschiedlich ausdauertrainierten Athleten könnte dann letztlich auch in der *langsamen Komponente* der O_2-Kurve liegen, wo der Sauerstoff nicht mehr allein der PCr-Resynthese zur Verfügung steht, sondern zusätzlich verschiedene Stoffwechselprozesse um den Sauerstoff konkurrieren [4, 9, 60, 67, 94, 95, 103].

4.5.2. nach submaximalen Belastungsstufen

Ein Vergleich der prozentualen O_2-Kurvenkinetik der drei unterschiedlich ausdauertrainierten Gruppen auf den submaximalen Belastungsstufen (z.B. 1.-Intervall vor Ausbelastung der Gruppen A,B und C) wurde in der aktuellen Studie nicht statistisch ausgewertet und auf signifikante Unterschiede geprüft.

Betrachtet man jedoch die optisch ähnliche O_2-Kurvenkinetik der Gruppen A-C nach den submaximalen Belastungsstufen (siehe Tabellen 28-31), bedenkt die stets einheitliche Unterschätzung der VO_2peak auf allen Belastungsstufen ($p>0,05$; siehe Tabellen 27-30) und bezieht die obigen Ergebnisse von Cooke[19] und Petersen[84] ein , so ist mit großer

Wahrscheinlichkeit auch ein stets signifikant gleicher O_2-Kurvenverlauf der Gruppen A-C nach allen submaximalen Belastungsstufen anzunehmen.

Zusammenfassend ist eine identische prozentuale PCr-Resynthesekinetik bei Probanden unterschiedlichen Trainingszustandszustandes eine mögliche Erklärung für die identischen Abweichungen zwischen errechneter und gemessener VO_2peak.

Voraussetzung hierfür ist, wie in der aktuellen Studie geschehen, eine prozentual gleich intensive Belastung der unterschiedlich ausdauertrainierten Probanden (Maximale Ausbelastung/ 1.Intervall vor Ausbelastung/ 2.Intervall vor Ausbelastung/ 3.Intervall vor Ausbelastung).

4.6. Multiple Mittelwertvergleiche der O_2-Kinetik zwischen Ausbelastung und submaximalen Belastungsstufen (prozentuale Darstellung der VO_2)

Die Zunahme der biphasischen O_2-Kurvenkinetik stellt sich nach niedrigeren Intensitäten deutlich dar (siehe Abbildungen 28-31) und ist aufgrund dessen weniger genau durch eine monoexponentielle Funktion ($y = ae^{-bx}$) darstellbar. Dies erklärt die größer werdende Unterschätzung auf submaximalen Stufen (siehe Tabellen 27-30).

Die Sauerstoffabhängigkeit der schnellen Phase der Kreatinphosphatresynthese ($t½$=22[37]-35sek[19, 84]) verdeutlicht sich auch bei Betrachtung der unterschiedlichen Belastungsintensitäten (siehe Abbildung 28). Der O_2-Bedarf zur Teilauffüllung der muskulären PCr-Speicher in den ersten 60 Sekunden der Nachbelastung ist nach Maximalbelastungen signifikant stärker ausgeprägt, als nach den vorangegangenen submaximalen Belastungen. Dies gilt für alle drei Probandengruppen (siehe Abbildungen 29-31).

Die Ergebnisse stehen in Widerspruch zu den Studienergebnissen Sleiverts[100] , der in seiner Studie eine identische prozentuale Kinetik der schnellen Komponente der O_2-Erholungskurve auf unterschiedlich intensiven submaximalen Belastungsstufen beschreibt. Eine mögliche Erklärung für den Widerspruch von Sleiverts Ergebnissen zu denen der aktuellen Studie könnte sein, dass Sleivert in einem gröberen Mischkammermodus als in der vorliegenden Studie gemessen hat[100].

5. Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, die Anwendung der Nachatmungsmethode mit einem breath-by-breath-Spirometriegerät neuester Generation ($K4b^2$, Cosmed S.r.l, Rom, Italien) zu überprüfen.

Drei männliche Probandengruppen

Gruppe A [VO_2 peak: < 50ml O_2/min/kg]: n=21 [Alter: 27,7 Jahre (± 3,8); Größe: 182 cm (± 6,3);KG: 78,3 kg (± 8,8); BMI: 23,6 kg/m^2 (± 1,8); Körperfett: 17,7 % (± 4,2)]

Gruppe B [VO_2 peak: 50-60ml O_2/min/kg]: n=34 [Alter: 27,4 Jahre (± 3,6); Größe: 183,5 cm (± 5,9);KG: 75,4 kg (± 6,1); BMI: 22,4 kg/m^2 (± 1,75); Körperfett: 13,2 % (± 2,8)]

Gruppe C [VO_2 peak: > 60ml O_2/min/kg]: n=12 [Alter: 27,3 Jahre (± 5); Größe: 181,7 cm (± 4,2);KG: 73 kg (± 5); BMI: 22,1 kg/m^2 (± 1,3); Körperfett: 11,7 % (± 3)]

führten in randomisierter Reihenfolge jeweils zwei identische Stufentests auf einem Laufbandergometer durch. Die spirometrischen Daten wurden mittels der online-Methode und der Nachatmungsmethode erhoben.

Es konnte kein signifikanter Unterschied im Verlauf der O_2-Aufzeichnung zwischen der Online- und der Nachatmungsmethode festgestellt werden ($p>0,05$).

Die Validität der monoexponentiellen Retroextrapolation mit 4x20-Sekunden-Intervallen, konnte durch diese Studie für männliche Sportler unterschiedlichsten Trainingszustandes, bestätigt und die bisherigen sportmedizinischen Erkenntnisse zur Nachatmung untermauert werden ($p<0,05$).

Die Anwendung der monoexponentiellen Retroextrapolation auf die ersten 81 Sekunden der Nachbelastung nach Ausbelastung, bzw. die ersten 60 Sekunden nach submaximalen Belastungsstufen, mit 3-sekündigen Messintervallen, führte zu stets signifikanten Abweichungen der errechneten VO_2max ($p<0,001$). Die Abweichungen nahmen auf submaximalen Belastungsstufen (geringere Belastungsintensität) zu und zeigten keinen Unterschied zwischen den unterschiedlich ausdauertrainierten Gruppen ($p>0,05$).

Von der Anwendung der monoexponentiellen Retroextrapolation mit Messintervallen < 20 Sekunden wird abgeraten.

In den ersten 181Sekunden nach Ausbelastung zeigte sich eine identische Kinetik der O_2-Kurven aller drei Gruppen ($p>0,05$). Anhand der Darstellung der Kreatinphosphatresynthese durch die Kinetik der O_2-Kurven ist davon auszugehen, dass die initiale Geschwindigkeit der PCr-Speicherauffüllung unabhängig von der Ausdauerleistungsfähigkeit der Probanden ist.

6. Ausblick

Um gegenüber den älteren mixing-chamber-Geräten einen Anwendungsvorteil der neuen Spirometriegeräte, mit der Möglichkeit einer breath-by-breath-Messung, zur validen retrograden Bestimmung der VO_2max im Nachatmungsmodus zu haben, sind weitere Studien mit der Entwicklung einer neuen mathematischen Formel nötig.

Dabei müssten, wie bei der validen exponentiellen Retroextrapolation nach Léger, standardisierte Messabläufe entwickelt werden, um die retrograd errechneten VO_2peak-Werte nach unterschiedlichen Belastungsstufen stets valide reproduzieren zu können.

Während es durch den Belastungsabbruch bei der Bestimmung der VO_2-max zu keiner zeitlichen Einschränkung in der Erhebung der respiratorischen Parameter kommt und die Datensammlung über 20, besser 80 Sekunden, zur validen Anwendung der monoexponentiellen Retroextrapolation möglich ist, ergäbe sich ein Anwendungsvorteil der breath-by-breath-Messung durch eine Verkürzung der Pausendauer nach submaximalen Belastungsstufen zur Einschätzung der sportartspezifischen Bewegungsökonomie.

7. Literaturverzeichnis

1. Akira Miura, Hironori Sato, Haruhiko Sato, Brian J Whipps, Yoshiyuki Fukuba,. The effect of glycogen depletion on the curvature constant parameter of the power-duration curve for cycle ergometry. *Ergonomics*. 43:133-141, 2000.
2. Andersen P. Capillary density in skeletal muscle of man. *Acta Physiol Scand*. 95:203-205, 1975.
3. Andersen P, Henriksson J. Capillary supply of the quadriceps femoris muscle of man. *J Physiol*. 270:677-690, 1977.
4. Arnold DL, Matthews PM, Radda GK. Metabolic recovery after exercise and the assessment of mitochondrial function in vivo in human skeletal muscle by means of 31P-NMR. *Magn Reson Med*. 1:307-315, 1984.
5. Åstrand PO and Staltin B. Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity. *J Appl Physiol*. 16: 977-981, 1961.
6. Bassan L. On the evidential strength of the heart stroke rate as a physiological measurement entity in performance physiology. Radiotelemetric studies. *Int Arch Arbeitsmed*. 22:262-281, 1966.
7. Beaver Wl, Lamarra N, and Wassermann K. Breath-by-breath measurement of true alveolar gas exchange. In: Roecker K, Prettin S, Sorichter S: Gas Exchange Measurements with High Temporal Resolution: The Breath-by-Breath Approach. Int J Sports Med 26(1):S11-S18, 2005.
8. Beaver Wl, Wassermann K, and Whipp BJ. On-line computer analysis and breath-by-breath graphical display of exercise function tests. In: Roecker K, Prettin S, Sorichter S: Gas Exchange Measurements with High Temporal Resolution: The Breath-by-Breath Approach. Int J Sports Med 26(1):S11-S18, 2005.
9. Bendahan D, Confort-Gouny S, Kozak-Reiss G, et al. Heterogeneity of metabolic response to muscular exercise in humans: new criteria in invariance derived by phosphorus-311 NMR spectroscopy. *FEBS Lett*. 272:155-158, 1990.
10. Bogdanis GC, Nevill ME, Boobis LH, et al. Recovery of power output and muscle metabolites following 30s of maximal sprint cycling in man. *J Physiol*. 482:467-480, 1995.
11. Bonen A, Wilson BA, Yarkony M, and Belcastro AN. Maximal oxygen uptake during free, tethered and flume swimming. *J Appl Physiol*. 48:232-235, 1980.

12. Boone WT and Boone T. Influence of a 36-h fast on the central and peripheral components of VO2 during submaximal exercise and peak oxygen uptake. *J Sports Sci*. 13:279-282, 1995.
13. Borg G. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehab*. 2:57-64, 1985.
14. Braumann KM and Holz J. Spiroergometry in the swimming flume. *Int J Sports Med*. 17:23ff, 1996.
15. Capelli C, Zamparo P, Cigalotto A, Francescato MP, Soule RG, Termin B, Pendergast DR, and di Prampero PE. Bioenergetics and biomechanics in front crawl swimmimg. *J Appl Physiol*. 78:674-679, 1995.
16. Carre F, Dassonville J, Beillot J, Prigent JY, and Rochcongar P. Use of oxygen uptake recovery curve to predict peak oxygen uptake in upper body exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 69:258-261, 1994.
17. Casey A, Consatin-Teodosiu D, Howell S, et al. Metabolic response of type 1 and 2 muscle fibres during repeated bouts of maximal exercise in humans. *Am J Physiol*. 271:E38-43, 1996.
18. Chatard JC, Lavoie JM, and Lacour JR. Analysis of determinants of swimming economy in front crawl. *Eur J Appl Physiol*. 61:88-92, 1990.
19. Cooke SR, Petersen SR, Quinney HA. The influence of maximal aerobic power on recovery of skeletal muscle following anaerobic exercise. *Eur J Appl Physiol*. 75:512-519, 1997.
20. Costill DL, Flynn MG, Kirwan JP, Houmard JA, Mitchell JB, Thomas R, and Park SH. Effects of repeated days of intensified training on muscle glycogen and swimming performance. *Med Sci Sports Exerc*. 20:249-254, 1988.
21. Costill DL, Kovaleski J, Porter D, Kirwan J, Fielding R, and King D. Energy expenditure during front crawl swimming: predicting success in middle-distance events. *Int J Sports Med*. 6:266-270, 1985.
22. Demarie S, Sardella F, Billat V, Magini W, and Faina M. The VO2 slow component in swimming. *Eur J Appl Physiol*. 84:95-99, 2001.
23. Di Prampero PE and Ferretti G. The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts. *Respiration Physiology*. 118:103-115, 1999.
24. di Prampero PE, Peeters L, and Margaria R. Alactic O2 debt and lactic acid production after exhausting exercise in man. *J Appl Physiol*. 34:628-632, 1973.

25. di Prampero PE, Cortilli G, Mognoni P, Saibene F. Energy cost of speed skating and efficiency of work against air resistance. *J Appl Physiol*. 40, 1976.
26. di Prampero, Margaria R. Mechanical efficiency of phosphagen (ATP+CP) splitting and its speed of resynthesis. *Pfluegers Arch*. 308:197-202, 1969.
27. Duffin J and Whitwam JG. A spirometer for breath-by-breath measurement of VE. In: Roecker K, Prettin S, Sorichter S: Gas Exchange Measurements with High Temporal Resolution: The Breath-by-Breath Approach. Int J Sports Med 26(1):S11-S18, 2005.
28. Duncan GE, Howley ET, and Johnson BN. Applicability of VO2max criteria: discontinuous versus continuous protocols. *Med Sci Sports Exerc*. 29:273-278, 1983.
29. Fardy PS and Hellerstein HK. A comparison of continuous and intermittent progressive multistage exercise testing. *Med Sci Sports Exerc*. 10:7-12, 1978.
30. Farmery AD and Hahn CEW. Response-time enhancement of a clinical gas analyzer facilitates measurement of breath-by-breath gas exchange. *J Appl Physiol*. 89:581-589, 2000.
31. Fry RW, Morton A, Keast D. Overtraining in athletes. *Sports Med*. 12:32-65, 1991.
32. Glaser RM, Magel JR, and Mc Ardle WD. A radiotelemetry transmitter for monitoring heart rate during swimming. *Res Q*. 41:200-202, 1970.
33. Gleser MA, Horstmann DH, and Mello RP. The effect on VO2max of adding arm work to maximal leg work. *Med Sci Sports Exerc*. 6:104-107, 1974.
34. Gollnick PD, Armstrong R, Saubert CW, et al. Enzyme activity and fibre composition in skeletal muscle of untrained and trained men. *J Appl Physiol*. 33:312-319, 1972.
35. Gollnick PD, King DW. Effects of exercise and training on mitochondria of rat skeletal muscle. *Am J Physiol*. 216:1502-1509, 1969.
36. Green S. Measurement of anaerobic work capacities in humans. *Sports Med*. 19:32-42, 1995.
37. Harris RC, Edwarts RHT, Hultman E, et al. The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of quadriceps muscle in man. *Pfluegers Arch*. 367:137-142, 1976.
38. Heck H, Mader A, Liesen H, and Hollmann W. Vorschlag zur Standardisierung leistungsdiagnostischer Untersuchungen auf dem Laufband. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*. 33:304-307, 1982.

39. Hill AV. The physiological basis of athletic records. *Scientific monthly*. 21:409-428, 1925.

40. Hill DW, Stephens LP, Blumoff-Ross SA, Poole DC, and Smith JC. Effect of sampling strategy on measures of VO2peak obtained using commercial breath-by-breath systems. In: Roecker K, Prettin S, Sorichter S: Gas Exchange Measurements with High Temporal Resolution: The Breath-by-Breath Approach. Int J Sports Med 26(1):S11-S18, *2005.*

41. Holmér I. Physiology of swimming man. *Acta Physiol Scand Suppl*. 407:1-55, 1974.

42. Holmér I, Lundin A, and Eriksson BO. Maximum oxygen uptake during swimming and running by elite swimmers. *J Appl Physiol*. 36:711-714, 1974.

43. Hughes EF, Turner SC, and Brooks GA. Effects of glycogen depletion and pedaling speed on "anaerobic threshold". *J Appl Physiol*. 52:1598-1607, 1982.

44. Hughson RL, Northey DR, Xing HC, Dietrich BH, and Cochrane JE. Alignment of ventilation and gas fraction for brath-by-breath respiratory gas exchange calculations in exercise. In: Roecker K, Prettin S, Sorichter S: Gas Exchange Measurements with High Temporal Resolution: The Breath-by-Breath Approach. Int J Sports Med 26(1):S11-S18, 2005.

45. Hultman E, Bergström J, and McLennon Andersen N. Break-down and resynthesis of phosphorycreatine and adenosine-triphosphate in connection with muscular work in man. *Scand J Lab Invest*. 19:56-66, 1967.

46. Johnson JS, Carlson JJ, VanderLaan RL, and Langholz DE. Effects of sampling interval on peak oxygen consumption in patients evaluated for heart transplantation. In: Roecker K, Prettin S, Sorichter S: Gas Exchange Measurements with High Temporal Resolution: The Breath-by-Breath Approach. Int J Sports Med 26(1):S11-S18, 2005.

47. Katch VL. Kinetics of oxygen uptake and recovery for supramaximal work of short duration. *Int Z Angew Physiol*. 31, 1873.

48. Kearney JT and VanHandel PJ. Economy: a physiological perspective. In: Sharkey BJ (ed) Advances in sports medicine and fitness. *Year Book Medical Publishers, Chicago*:57-89, 1989.

49. Keul J, Kindermann W, and Simon G. Die aerobe und anaerobe Kapazität als Grundlage für die Leistungsfähigkeit. *Leistungssport*. 8:22-32, 1978.

50. Kindermann W and Keul J. Anaerobe Energiebereitstellung im Hochleistungssport. *Schorndorf: Verlag Karl Hofmann*:61-95, 1977.

51. Knipping HW. Ein einfacher Apparat zur exakten Gasstoffwechselmessung. *Z Exp Med*. 41:363-378, 1924.

52. Lavoie JM, Léger LA, Montpetit RR, and Chabot S. Backward extrapolation of VO2max from O2 recovery curve after a voluntary maximal 400-m swim. In: Biomechanics and medicine in swimming. Hollander AP, Huijing PA, de Groot G (Eds.) Champaign. *Human Kinetics*:222-227, 1983.

53. Lavoie JM and Montpetit RR. Applied Physiology in swimming. *Sports Medicine*. 3:165-189, 1986.

54. Léger LA, Montpetit RR, Lambert J, and Chartrand D. Retroextrapolation of submaximal values from O2 recovery curve. *Scand J Sports Sci*. 4:71-73, 1983.

55. Léger LA, Seliger V, and Brassard L. Backward extrapolation of VO2max from the O2 recovery curve. *Med Sci Sports Exerc*. 12:24-27, 1980.

56. Lemon PW, Hagberg JM, and Hermiston RT. Exercise VO2 estimation using recovery sampling. *Can J Appl Sport Sci*. 5:64-68, 1980.

57. Lentner C (ed.). Geigy Scientific Tables-Volume 5: Heart and Circulation. *CIBA-GEIGY, Basel*:209-213, 1990.

58. Linnarsson D and Lindborg B. Breath-by-breath measurement of respiratory gas exchange using on-line analog computation. In: Roecker K, Prettin S, Sorichter S: Gas Exchange Measurements with High Temporal Resolution: The Breath-by-Breath Approach. Int J Sports Med 26(1):S11-S18, 2005.

59. Lipsky JA and Angelone A. Breath-by-brath CO2 elimination by analog computer techniques. In: Roecker K, Prettin S, Sorichter S: Gas Exchange Measurements with High Temporal Resolution: The Breath-by-Breath Approach. Int J Sports Med 26(1):S11-S18, 2005.

60. Lodi R, Kemp GJ, Iotti S, et al. Influence of cytosolic pH on in vivo assessment of human muscle mitochondrial respiration by phosphorus magnetic resonance spectroscopy. *MAGMA*. 5:165-171, 1997.

61. Lucia A, Fleck SJ, Gotshall RW, and Kearney JT. Validity and reliability of the Cosmed K2 instrument. *Int J Sports Med*. 14:380-386, 1993.

62. Mader A, Liesen H, Heck H, Philippi H, Rost R, Schürch P, and Hollmann W. Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. *Sportarzt Sportmed*. 32:7ff, 1981.

63. Magel JR, Guido FF, McArdle WD, Gutin B, Pechar GS, and Katch FI. Specifity of swim training on maximum oxygen uptake. *J Appl Physiol*. 40, 1974.

64. Magel JR, McArdle WD, and Glaser RM. Telemetered heart rate response to selected competitive swimming events. *J Appl Physiol*. 26, 1969.

65. Mahler M. First-order kinetics of muscle oxygen consumption, and an equivalent proportionality betwee, QO2 and phosphorylcreatine level. *J Gen Physiol*. 86:135-165, 1985.

66. Margaria R, Edwards T, and Dill DB. The possible mechanism of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. In: di Prampero PE, Peeters L, and Margaria R, Alactic O2 debt and lactic acid production after exhausting exercise in man. Journal of applied Physiology 34(5): p. 628-632, 1973.

67. McCann DJ, Mole PA, Caton JR. Phosphocreatine kinetics in humans during exercise and recovery. *Med Sci Sports Exerc*. 27:378-387, 1995.

68. McCully KK, Boden BP, Tuchler M. Wrist flexor muscles of elite rowers measured with magnetic resonance spectroscopy. *J Appl Physiol*. 75:813-819, 1989.

69. McCully KK, Kakiria H, Vandenborne K, et al. Noninvasive measurement of activity-induced changes in muscle metabolism. *J Biomech*. 24:153-161, 1991.

70. McCully KK, Vanborne K, DeMeirleir K, et al. Muscle metabolism in track athletes, using 31P magnetic spectroscopy. *Can J Physiol Pharmacol*. 70:1353-1359, 1992.

71. McMahon S and Jenkins D. Factors affecting the rate of phosphocreatine reynthesis following intense exercise. *Sports Med*. 32:761-784, 2002.

72. Meyer RAA. Linear model of muscle respiration explains mono-exponential phosphocreatine changes. *Am J Physiol*. 254:C548-553, 1988.

73. Meyer T. Der Respiratorische Quotient (RQ). *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*. 54:29-30, 2003.

74. Miller D. Biomechanics of swimming. In: Wilmore, J H, Keogh, J F (Hrsg) Exercise and sports sciences reviews. *Academic press, New York.*:219-248, 1975.

75. Mitchell JB and Huston JS. The effect of high- and low-intensity warm-up on the physioloical responses to a standardized swim and tethered swimming performance. *J Sports Sci*. 11:159-165, 1993.

76. Montpetit R, Léger LA, Lavoie J-M, and Cazorla G. Vo2 peak during free swimming using the backward extrapolation of the O2 recovery curve. *Eur J Appl Physiol*. 47:385-391, 1981.

77. Morgan D, Daniels J, Carlson P, Filarski K, and Landle K. Use of recovery VO2 to predict running economy. *Eur J Appl Physiol*. 62:420-423, 1991.

78. Nevill AM, Jones DA, McIntyre D, et al. A model for phosphocreatine resynthesis. *J Appl Physiol*. 82:329-335, 1997.

79. Norddeutsche Laborgemeinschaft, G. m., 21079 Hamburg.

80. Ogita F, Hara M, and Tabata I. Anaerobic capacity and maximal oxygen uptake duirng arm stroke, leg kicking and whole body swimming. *Acta Physiol Scand*. 157:435-441, 1996.

81. Parizkova J and Buzkova P. Relationship between skinfold thickness measured by Harpenden caliper and densitometric analysis of total body fat in men. *Hum Biol*. 43:16-21, 1971.

82. Parizkova J and Roth Z. The assessment of depot fat in children from skinfold thickness measurements by Holtain (Tanner-Whitehouse) caliper. *Hum Biol*. 44:613-620, 1972.

83. Pendergast DR, Di Prampero PE, Craig AB, Wilson DR, and Rennie DW. Quantitative analysis of the front crawl in men and women. *J Appl Physiol*. 43:475-479, 1977.

84. Petersen SR, Cooke SR. Effects of endurance training on recovery from high intensity exercise. In: Bell FI. Van Gyn GH, editors. Proceedings of the 10th Commonwealth and Internatonal Scientific Congress; 1994 Aug 10-14; Victoria (BC).Victoria BC: University of Victoria, Department of Physical Education, 1994:227-31. 1994.

85. Piiper J and Spiller P. Repayment of O2 debt and resynthesis of high energy phosphates in gastrocnemius muscle of the dog. *J Appl Physiol*. 28:657-662, 1970.

86. Quistorff B, Johansen L, Sahlin K. Absence of phosphocreatine resynthesis in human calf muscle during ischaemic recovery. *Biochem J*. 291:681-686, 1992.

87. Ribeiro JP, Cadavid E, Baena J, Monsalete E, Barna A, and de Rose EH. Metabolic predictors of middle distance swimming performance. *Br J Sports Med*. 24:196-200, 1990.

88. Ricci J and Leger LA. VO2max of cyclists from Treadmill, Bicycle Ergometer and Velodrome Tests. *Eur J Appl Physiol*. 50:283-289, 1983.

89. Rinehardt KF, Kraemer RR, Gormely S, and Colan S. Comparison of maximal oxygen uptakes from the tethered, the 183- and the 457-meter unimpeded supramaximal freestyle swims. *Int J Sports Med*. 12:6-9, 1991.

90. Roberts JA and Alspaugh JW. Specifity of training effects resulting from programs of treadmill running and bicycle ergometer riding. *Med Sci Sports Exerc*. 4:6-10, 1972.

91. Rodriguez FA. Maximal oxygen uptake and cardiorespiratory response to maximal 400-m free swimming, running and cycling tests in competitive swimmers. *J Sports Med Phys Fitness*. 40:87-95, 2000.

92. Roecker K, Prettin S, Sorichter S. Gas Exchange Measurements with High Temporal Resolution: The Breath-by-Breath Approach. *Int J Sports Med*. 26:S11-S18, 2005.

93. Roston WL, Whipp BJ, Davis J, Cunningham DA, Effros RM, Wasserman K. Oxygen uptake kinetics and lactate concentration during exercise in humans. *Am Rev Respir Dis*. 135:1080-1084, 1987.

94. Sahlin K, Harris RC, Hultman E. Creatine kinase equilibrium and lactate content compared with muscle ph in tissue samples obtained after ispmetric exercise. *Biochem J*. 152:173-180, 1975.

95. Sahlin K, Harris RC, Hultman E. esythesis of creatine phosphates in human muscle after exercise in realation to intramuscular pH and availability of oxygen. *Scand J Clin Lab Invest*. 39:551-558, 1979.

96. Secher NH, Ruberg-Larsen, Binkhorst RA, and Bonde-Petersen F. Maximal oxygen uptake during arm cranking and combined arm plugs leg exercise. *J Appl Physiol*. 36:515-518, 1974.

97. Sietsema KE, Cooper DM, Perloff JK, Rosove MH, Child JS, Cannobio MM, Whipp BJ, and Wassermann K. Dynamics of oxygen uptake during exercise in adults with cyanotic congenital heart disease. In: Roecker K, Prettin S, Sorichter S, 2005: Gas Exchange Measurements with High Temporal Resolution: The Breath-by-Breath Approach. Int J Sports Med 26(1):S11-S18, 2005.

98. Simon G. Laktat zur aeroben und anaeroben Leistungsdiagnostik im Schwimmen. In: Clasing, D, Weicker, Böning (Hrsg) Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, New York., 1994.

99. Simon G, Berg A, Dickhuth HH, Simon-Alt A, and Keul J. Bestimmung der anaeroben Schwelle in Abhängigkeit vom Alter und von der Leistungsfähigkeit. D*eutsche Zeitschrift für Sportmedizin*. 32:7-14, 1981.

100. Sleivert G and Mackinnon LT. The validation of backward extrapolation of submaximal oxygen consumption from the oxygen recovery curve. *Eur J Appl Physiol*. 63:135-139, 1991.

101. Steinacker JM, Liu Y, and Reißnecker S. Abbruchkriterien bei der Ergometrie. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*. 53:228-229, 2002.

102. Sue DY, Hansen JE, Blais M, and Wassermann K. Measurement and analysis of gas exchange during exercise using programmable calculator. In: Roecker K, Prettin S, Sorichter S: Gas Exchange Measurements with High Temporal Resolution: The Breath-by-Breath Approach. Int J Sports Med 26(1):S11-S18, 2005.

103. Takahashi H, I. M., Fujimoto K, et al. Control of the rate of phosphocreatine resynthesis after exercise in trained and untrained human quadriceps muscles. *Eur J Appl Physiol*. 71:396-404, 1995.

104. Taylor DJ, Bore P, Styles P, et al. Bioenergetics of intact human muscle. a 31P nuclear magnetic resonance study. *Mol Biol Med*. 1:77-94, 1983.

105. Taylor HL, Buskirk E, and Henschel A. Maximal Oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *J Appl Physiol*. 8:73-80, 1955.

106. Tesch PA, Thorsson A, Fujitsuka N. Creatine phosphate in fibre types of skeletal muscle before and after exhaustive exercise. *J Appl Physiol*. 66:1756-1759, 1989.

107. Toussaint HM and Hollander AP. Energetics of competitive swimming. Implications for training programmes. *Sports Med*. 18:384-405, 1994.

108. Toussaint HM, Meulemans A, de Groot G, Hollander AP, Schreurs AW, and Vervoorn K. Respiratory valve for oxygen uptake measurements during swimming. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 56:363-366, 1987.

109. Uhrhausen A, Kindermann W. Aktuellle Marker für die Diagnostik von Überlastungszuständen in der Trainingspraxis. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*. 51:226-233, 2000.

110. Uhrhausen A, Kindermann W. Übertraining. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*. 53:121-122, 2002.

111. Wakayoshi K, D´Acquisto LJ, Cappaert JM, and Troup JP. Relationship between oxygen uptake, stroke rate and swimming velocity in competitive swimming. *Int J Sports Med*. 16:19-23, 1995.

112. Wakayoshi K, Yoshida T, Udo M, Kasai T, Moritani T, Mutoh Y, and Miyashita M. A simple method for determining critical speed as swimming fatigue threshold in competitive swimming. *Int J Sports Med*. 13:367-371, 1992.

113. Ward SA, Wasserman K, Davis J, and Whipp BJ. Breathing-valve encumbrance and arterial blood gas and acid-bace status in exercise in man. *Eur J Appl Physiol*. 58:382-288, 1989.

114. Wassermann K and Whipp BJ. Breath-by-breath analysis of pulmonary gas exchange and the hyperpnea of exercise under non-steady-state conditions. In:

Roecker K, Prettin S, Sorichter S: Gas Exchange Measurements with High Temporal Resolution: The Breath-by-Breath Approach. Int J Sports Med 26(1):S11-S18, 2005.

115. Wenzel P. Spiroergometrie im Schwimmen: Vergleich der leistungsphysiologischen Parameter und der Ökonomie zwischen Kanalschwimmen und freiem Schwimmen. Med. Dissertation. Universität Hamburg. Standort: *Staats-und Universitätsbibliothek Hamuburg*. Signatur: 2003 U 2341. Seite 20, 2003.

116. Whipp BJ Dynamics of pulmonary gas exchange. *Circulation*. 76:Vl 18-28, 1987.

117. Yoshida T. Effect of dietary modifications on lactate threshold and onset of blood lactate accumulation during incremental exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 53:200-205, 1984.

118. Yoshida T, Watari H. Metabolic consequences of repeated exercise in long distance runners. *Eur J Appl Physiol*. 67:261-265, 1993.

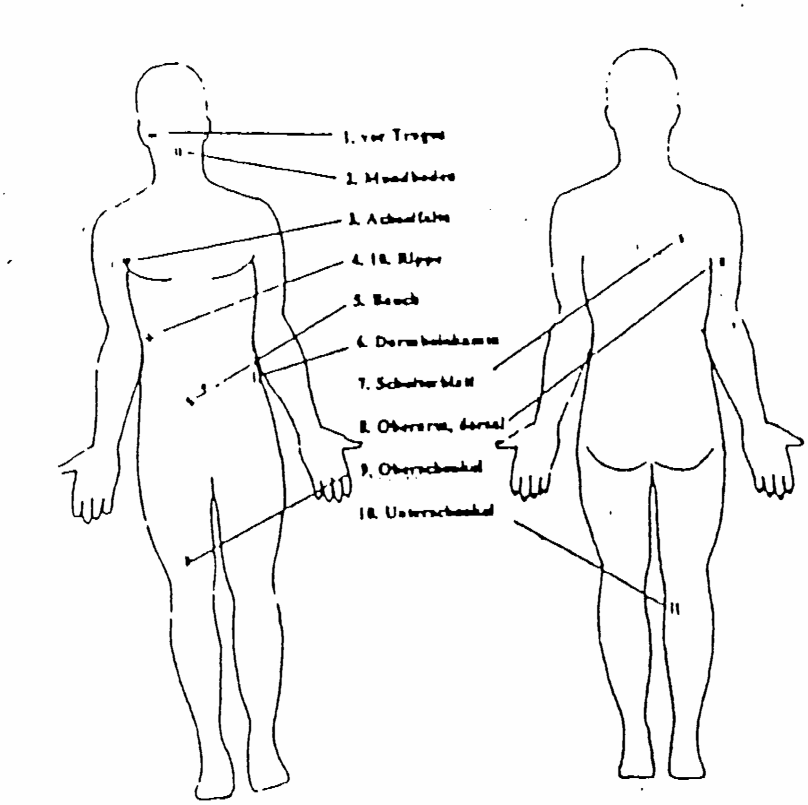
8. Anhang

8.1. Borg-RPE-Skala

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	

8.2. Kalipermetrie

8.2.1. Messpunkte



8.2.2. Umrechnungstabelle

Hautfalten (mm) 10 Messpunkte	Körperfett (%) Männer	Hautfalten (mm) 10 Messpunkte	Körperfett (%) Männer	Hautfalten (mm) 10 Messpunkte	Körperfett (%) Männer
30	1,5	70	12,2	110	17,9
31	1,9	71	12,3	111	18
32	2,3	72	12,5	112	18,1
33	2,7	73	12,7	113	18,2
34	3,1	74	12,9	114	18,3
35	3,5	75	13	115	18,4
36	3,8	76	13,2	116	18,5
37	4,1	77	13,3	117	18,6
38	4,5	78	13,5	118	18,7
39	4,8	79	13,7	119	18,8
40	5,1	80	13,8	120	18,9
41	5,4	81	14	121	19
42	5,7	82	14,2	122	19,1
43	6	83	14,3	123	19,2
44	6,3	84	14,5	124	19,4
45	6,6	85	14,6	125	19,5
46	6,9	86	14,8	126	19,6
47	7,1	87	14,9	127	19,7
48	7,4	88	15	128	19,8
49	7,7	89	15,2	129	19,9
50	8,1	90	15,3	130	20
51	8,2	91	15,5	131	20,1
52	8,4	92	15,6	132	20,1
53	8,7	93	15,7	133	20,2
54	8,9	94	15,9	134	20,4
55	9,1	95	16	135	20,4
56	9,4	96	16,1	136	20,5
57	9,5	97	16,3	137	20,6
58	9,8	98	16,4	138	20,7
59	10	99	16,5	139	20,8
60	10,2	100	16,7	140	20,9
61	10,4	101	16,8	141	21
62	10,6	102	16,9	142	21,1
63	10,8	103	17	143	21,2
64	11	104	17,1	144	21,3
65	11,2	105	17,3	145	21,3
66	11,4	106	17,4	146	21,4
67	11,6	107	17,5	147	21,5
68	11,8	108	17,6	148	21,6
69	12	109	17,7	149	21,7

8.3. Anamnesebogen

Institut für Sport- und Bewegungsmedizin
Universität Hamburg

Hamburg, den _____._____.20__
Tag Monat Jahr

Anamnesebogen

1. Persönliche Daten

Name:	Geschlecht:
Vorname:	Größe:
Geb.-Datum:	Gewicht:
Adresse:	Telefon: Telefax: E-mail:

Letzte sportmedizinische Untersuchung: Datum: _____._____. _____ in _____

Hiermit erteile ich mein Einverständnis zur sportärztlichen Untersuchung und zur Speicherung und Auswertung meiner Daten.

_____ _____
Ort und Datum Unterschrift (Sportler, Patient, gesetzl. Vertreter)

2. Sport früher und aktuell

Sportart	Zeitraum (von-bis)	Trainingseinheiten / Woche	Trainingsstunden / Woche

a) Aktueller Leistungssport (nur für Leistungssportler)

Hauptsportart: _____ Hauptdisziplin: _____
Kader: A ❒, B ❒, C ❒, D ❒, anderer: _____ Verband: _____
Verbandsarzt: _____ Bundes-/Landestrainer: _____
Heimtrainer: _____ Wöchentliche Trainingsbelastung: _____
Trainingseinheiten pro Woche: _____ Trainingsstunden pro Woche: _____
Anzahl der Trainingsjahre in Hauptsportart: _____ Jahre
Trainingspausen (Letzten 12 Monate):
Wann: _____ Warum: _____
Wie wurde am Tag vor der Untersuchung trainiert? _____

3. Krankenanamnese:

a) Bestehen zur Zeit **aktuelle** Beschwerden, wenn ja, welche, seit wann und bisherige Therapie?
❒ nein, ❒ ja

_____
_____
_____

b) Besteht irgendeine **Grunderkrankung / chronische Erkrankung**, wenn ja, welche, seit wann und Therapie?
❒ nein, ❒ ja

_____
_____

Häufigkeiten von Infekten der oberen Luftwege (Husten, Schnupfen, Halsschmerzen):
_____ mal (ca. _____ Tage) pro Jahr.

1

c) Bestehen **Allergien** bzw. **Unverträglichkeiten** (z.B. Heuschnupfen, Asthma etc.)? ❒ nein, ❒ ja, gegen (Therapie, falls vorhanden): _____
_____

d) Welche **Kinderkrankheiten** lagen vor?
❒ Masern, ❒ Mumps, ❒ Röteln, ❒ Windpocken, ❒ Scharlach, ❒ Keuchhusten, ❒ Mandel-OP (wann__)
Welche Impfungen wurden wann (möglichst mit Jahresangabe) durchgeführt (Tetanus, Kinderlähmung, Röteln, Masern, Mumps, Diphtherie, Keuchhusten, Tuberkulose, Grippe etc.)?
- Im Kindesalter: _____
- Jetziger Impfschutz: _____

e) Bestanden **frühere** Erkrankungen, Verletzungen, Knochenbrüche, Unfälle, Operationen, Krankenhausaufenthalte?
(Augen, Ohren, Schilddrüse, Herzkreislaufsystem, Atemwege (inklusive Mandeln und Polypen), Magen/Darm, Leber, Gallenblase, Bauchspeicheldrüse, Harnwege/Nieren, Geschlechtsorgane, Haut, Nervensystem, Blut etc.
Bewegungsapparat: Wirbelsäule, Schulter, Ellenbogen, Unterarm, Hand, Finger, Hüfte, Becken, Kniegelenk, Sprunggelenk, Füße, Muskulatur etc.)
❒ nein, ❒ ja (Jahresangabe, Art der Erkrankung, kurze Angabe über Therapie + Verlauf):
_____
_____
_____
_____
_____
_____

f) NUR für Frauen:
Eintritt der ersten Menstruation? _____ Zyklusdauer? _____ Zeitpunkt der letzten Menstruation? _____ Dauer der Menstruation? _____ Beschwerden/Auffälligkeiten? _____ Ist die Leistungsfähigkeit während der Menstruation herabgesetzt ? ❒ ja ❒ nein
Schwangerschaftsschutz (z.B. "Pille" (seit wann, Name und Dosierung), Spirale etc.)? _____
_____ Wieviele Geburten? _____ Kinder Anzahl: _____

g) Vegetative Anamnese:
Appetit normal? ❒ ja, ❒ nein; Schlaf normal? ❒ ja, ❒ nein; Stuhlgang normal? ❒ ja, ❒ nein;
Wasserlassen normal? ❒ ja, ❒ nein; Wasserlassen nachts? ❒ ja, ❒ nein;
Husten bzw. Auswurf? ❒ ja, ❒ nein

Medikamente (seit wann, Name und Dosierung)	
Vitaminpräparate? Mineralstoffe (Elektrolyte)?	
Nikotin (seit wann, Art und Menge)	
Alkohol (seit wann, Art und Menge)	

h) Sind bei **Großeltern, Eltern oder Geschwistern** besondere Erkrankungen aufgetreten?
(z.B. Fettstoffwechselstörungen, Bluthochdruck, Herzinfarkt (Lebensalter?), Gehirnschlag (Lebensalter?), Diabetes mellitus, Rheuma/Gicht, Allergien, Krebserkrankungen (Lebensalter) u.a.)
❒ nein, ❒ ja (Art der Erkrankung, Lebensalter und bei wem?):
_____
_____
_____

4. Soziale Anamnese:

Schulabschluß (Hochschulstudium, Abitur, Realschule, Hauptschule, Gesamtschule etc.): _____

Beruf: _____ ledig: ❒, verheiratet: ❒, geschieden: ❒, verwitwet: ❒, Anzahl der Kinder: ____

8.4. Handout zur Nachatmungsstudie

Institut für Sport- und Bewegungsmedizin e.V.

Ärztlicher Leiter: Prof. Dr. med. Klaus-Michael Braumann
Mollerstr.10 (Sportpark Rotherbaum); 20148 Hamburg Tel. 040 4 28 38-6339/49, FAX 040 4 28 38-2646

Handout zur Nachatmungsstudie

Liebe Probanden,
herzlichen Dank für Eure Bereitschaft uns bei unserer Studie zu unterstützen.
Im folgenden Text seien kurz Studie und Belastungen näher beschrieben.
Bei noch offenen Fragen scheut Euch nicht mich anzurufen.

Mit freundlichen Grüssen,
Ole Guderjahn

Tel.: 0176 - 600 27 20 7

Studie: In dieser Studie soll eine Methode zur Ermittlung der individuellen max. Sauerstoffaufnahmekapazität (VO_2max) näher untersucht werden, die sich von der bisher angewendeten Methode dadurch unterscheidet, daß die Spirometermaske nicht die gesamte Belastungszeit auf dem Gesicht des Sportlers positioniert sein muss. Der Sportler muss dann nur noch nach der Belastung in die Maske atmen, um die Atemgase zu messen.

Studienablauf: Jeder von Euch hat 2 Belastungstermine, im Abstand von einer Woche. Beide Termine verlaufen nach dem selben Muster. Der einzige Unterschied ist die Tatsache, dass Ihr den zweiten Termin ohne Spirometermaske lauft und nur in den Pausen und nach der Belastung in die Maske atmen müsst.
Ansonsten läuft es folgendermassen ab:

1. Wiegen, Messen
2. 5min auf der Liege ausruhen. In der Zeit: Bestimmung des Ruhe-RQ mittels Atemgasmessung und Blutabnahme für die laborchemische Untersuchung zur Überprüfung des Regenerationszustandes. Abnahme von Ruhelaktat, Messen des Ruhepulses und Ruheblutdruckes.
3. Einweisung in das Laufband und das Laufprogramm: 5min bei 5km/h eingehen; dann Laufbeginn der Intervalle bei 8km/h für 3min.; zwischen den Intervallen 60sec.Pause zur Laktatabnahme und Messung der Nachatmung; Intervallsteigerung je 2km/h je Stufe.
4. Laufen bis zur Erschöpfung. Bitte versucht immer nur ganze Intervalle (3min) zu laufen und nicht mittendrin aufzuhören, da Ihr Euch sonst nicht im „steady-state“ befindet und sich unsere Auswertung erschwert (d.h. das jeweils nächste Intervall nur anlaufen, wenn Ihr fest daran glaubt es auch durchzuhalten).
5. Stoppen des Laufbandes.
6. 5min. Nachbeobachtung mit Laktatabnahme und Spirometrie.
7. ! DUSCHEN!

Wichtig

- **2 Tage** vor jedem Belastungstermin **kein** Training! Ruhetage! Viel Kohlenhydrate essen und viel trinken. Ansonsten kann es zu Verfälschungen Euer Laktatwerte kommen und das würde sich auf Eure Trainingempfehlung negativ auswerten, indem ihr falsche Trainingsempfehlungen erhaltet.
- In der Zeit mit Spirometermaske besteht für Euch Probanden **Redeverbot!** Denn durch Reden kommt es zur Messfehlern und uns interessiert Eure Sauerstoffaufnahmekurve in den Belastungspausen und ganz besonders nach Belastungsabbruch. Reden nur im Notfall! Wir machen vor Laufbeginn bestimmte Handzeichen ab und Ihr werdet häufig gefragt, ob es Euch gut geht und ob Ihr weiterlaufen wollt.
- Beim 2.Termin müsst Ihr genauso lange/schnell wie beim ersten Termin laufen.
- Kommt mit viel Spaß und motiviert zu den Belastungen. Jeder Termin dauert ca. 2 Stunden

Bis bald !

8.5. Datenschutzerklärung / Einverständniserklärung

Institut für Sport- und Bewegungsmedizin e.V.

Ärztlicher Leiter: Prof. Dr. med. Klaus-Michael Braumann
Mollerstr.10 (Sportpark Rotherbaum); 20148 Hamburg Tel. 040 4 28 38-6339/49, FAX 040 4 28 38-2646

Einverständniserklärung

Proband:

Name, Vorname:_____Geburtsdatum:____._____._____

Straße:_____PLZ, Ort:_____Telefon:_____

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die während der wissenschaftlichen Studie erhobenen [leistungs-] physiologischen Daten in einer anonymisierten Form wissenschaftlich ausgewertet und veröffentlicht werden dürfen.

Ich wurde über den Versuchsablauf und das Studienziel aufgeklärt. Alle meine Fragen wurden mir zu meiner vollsten Zufriedenheit beantwortet.

Bei mir besteht momentan Beschwerdefreiheit, ich fühle mich momentan voll belastbar.

Chronische Erkrankungen sind bei mir nicht bekannt.

Hamburg, / / 2004 _____

Ort, Datum Unterschrift

8.6. Checkliste

Institut für Sport- und Bewegungsmedizin e.V.

Ärztlicher Leiter: Prof. Dr. med. Klaus-Michael Braumann
Mollerstr.10 (Sportpark Rotherbaum); 20148 Hamburg Tel. 040 4 28 38-6339/49, FAX 040 4 28 38-2646

Checkliste

Hamburg, / / 2004

Probandenname:

Test: Zum Randomisieren vor Test 1(**!**) Münze werfen:

Zahl = online	**O**
Kopf **=** Nachatmung	**O**

Vorbereitung Spirometer:

1. Spirometer an Stromquelle anschliessen	**O**
2. Betriebstemperatur von mindestens 35 ° C abwarten	**O**
3. Spirometer kalibrieren (Gas, Turbine, Umgebung, Verzögerung)	**O**
4. Pulsempfänger ans Spirometer anschliessen	**O**
5. Speicherplatz überprüfen (bei > 50% = löschen)	**O**

Vorbereitung Stoffwechselplatz:

Bereitlegen von

1. Kapillaren	**O**
2. Tupfern	**O**
3. Handschuhen	**O**
4. Solofix-Lanzetten	**O**
5. Probegefäßen mit Systemlösung, randständig durchnumeriert	**O**
6. Desinfektionsspray	**O**
7. Stauschlauch, Spritzen, Kanülen, Abwurf	**O**
8. Blutdruckmanschette, Stethoskop	**O**
9. Belastungsbogen	**O**

Proband muss schriftliche Einwilligung mit Datenschutzerklärung unterschrieben haben	**O**
Eventuelle noch offene Fragen des Probanden beantworten	**O**

Vorbereitung Patient:

1. Bestimmung Körpergewicht, Körpergrösse und Körperfettanteil	**O**
2. Anlegen von Pulsgurt und Spirometermaske	**O**
3. Probandendaten und Luftfeuchtigkeit ins Spirometer eingeben	**O**
4. Probanden auf Liege legen; Start 5min Ruhespirometrie	**O**
5. Handschuhe anziehen. Blutentnahme	**O**
6. Bestimmung von Ruheblutdruck, Ruhepuls, Ruhe-RQ	**O**

Vorbereitung Belastung:

1. Schweisstuch bereitlegen	**O**
2. Probanden auf dem Laufband positionieren, Spirometer einhängen	**O**
3. Ruhelaktat abnehmen	**O**
4. Probanden nochmals über das Laufbandprogramm und das sonstige Procedere informieren	**O**
5. Nochmals Abbruchsignale eindeutig zeigen und auf das Redeverbot ab Belastungsbeginn hinweisen	**O**
6. Laufbandprogramm „91“ wählen, simultan mit dem dritten Startsignal das Spirometer starten	**O**

Start der Belastung

!!! Nach der Belastung Daten auslesen und auf dem Server sichern !!!	**O**

8.7. Danksagung

Für die guten Rahmenbedingungen und die Nutzung des Labors inklusive aller notwendigen Geräte und Materialien, bedanke ich mich bei Prof. Dr. med. Klaus-Michael Braumann.

Für die Hilfe bei der Beschaffung finanzieller Drittmittel über das *Bundesinstitut für Sportwissenschaft* und die regelmäßige Unterstützung bei Problemlösungen aller Art während der Datenerhebung und deren anschließender Interpretation, bedanke ich mich besonders bei meinem Betreuer Dr. med. Marc Ziegler.

Zusammen mit Prof. Dr. med. Rüdiger Reer stand er mir jederzeit bei der Interpretation der Studienergebnisse mit Rat und Tat zur Seite.

Frau Regina Kruse danke ich für die freundliche Terminorganisation der parallel zum Institutsbetrieb stattgefundenen Spiroergometrien.

Meinen Eltern danke ich für deren Verständnis und Unterstützung auf dem langen Weg bis zur erfolgreichen Fertigstellung dieser Studie.

Ein großer Dank geht weiterhin an meine Freundin Heike für ihr ebenfalls langjähriges großes Verständnis und ihre stets geduldige Motivation diese Studie erfolgreich abzuschliessen.

8.8. Lebenslauf

8.9. Erklärung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe und dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Hamburg, 30.08.2008 Ole Guderjahn