Aus der
Klinik für Kinderkardiologie und angeborene Herzfehler
am Herz- und Diabeteszentrum NRW
-Universitätsklinik-
der Ruhr-Universität Bochum
Direktor: Prof. Dr. med. Stephan Schubert

Referenzwerte für die spiroergometrische Leistungsdiagnostik auf dem Fahrrad für gesunde Kinder Jugendliche/Erwachsene für Sauerstoffpuls und Herzfrequenz in Ruhe, an der ventilatorisch bestimmten Schwelle und bei Belastungsabbruch

Vergleich der Ergebnisse für Fahrrad- und Laufbandergometer

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades der Medizin
einer
Hohen Medizinischen Fakultät
Ruhr-Universität Bochum

vorgelegt von
Ezgi Sönmez
aus Istanbul
2023

Dekanin: Prof. Dr. med. Andrea Tannapfel
Referent: Dr. med. Karl-Otto Dubowy
Korreferent: PD. Dr. med. Frank van Buuren
Tag der Mündlichen Prüfung: 30.11.2023

Abstrakt

Ezgi Sönmez

Referenzwerte für die spiroergometrische Leistungsdiagnostik auf dem Fahrrad für gesunde Kinder Jugendliche/Erwachsene für Sauerstoffpuls und Herzfrequenz in Ruhe, an der ventilatorisch bestimmten Schwelle und bei Belastungsabbruch Vergleich der Ergebnisse für Fahrrad- und Laufbandergometer

Einleitung: Das Ziel unserer Arbeit ist es, durch eine standardisierte Fahrradergometrie die kardiozirkulatorischen Parameter -HF und O_2-Puls- von gesunden Probanden im Alter von 5 bis 81 Jahren in Ruhe an der ventilatorisch bestimmten Schwelle und bei Belastungsabbruch auszuarbeiten. Im Anschluss wurde in dieser Studie untersucht, ob Unterschiede in submaximalen und maximalen Kennwerten zwischen der Fahrrad- und Laufbandergometrie bestehen bzw. ob Zusammenhänge unter diesen Belastungsformen nachweisbar sind.

Methode: Zwischen 2005-2008 erfolgte in der Ambulanz der Klinik für angeborene Herzfehler am Herz- und Diabeteszentrum NRW die systematische Belastungsuntersuchung der gesunden Probanden im Alter von 5 bis 81 Jahren. Es wurden insgesamt 779 gesunde Kinder, Jugendliche und Erwachsene nach dem Protokoll der DGPK von Dubowy et al. untersucht. Bei jedem Probanden erfolgte die Messung der respiratorischen und kardiozirkulatorischen Parameter. Es wurde sowohl eine kontinuierliche Basismonitoring (EKG Ableitung und Blutdruckmessung) als auch die Messung der respiratorischen und kardiozirkulatorischen Parameter in Ruhe, an der ventilatorisch bestimmten Schwelle und bei Ausbelastung durchgeführt. Die erhobenen Daten werden nach der von Cole und Green beschriebenen LMS-Methode statistisch ausgewertet und alters- und geschlechtsbezogene Referenzwerte und Perzentilenkurven erstellt. Im Anschluss vergleichen wir die 50. Perzentile der HF und des O_2-Pulses an der ventilatorischen Schwelle und bei Ausbelastung zwischen dem Fahrrad- und dem Laufbandergometer. Der Vergleich dieser Werte mit denen des Laufbandes basiert auf einem t-Test für unabhängige Stichproben. Als Signifikanzniveau wurde p = 0,05 festgelegt.

Ergebnis: Im Vergleich zum Fahrrad war der O_2-Puls an der ventilatorischen Schwelle auf dem Laufbandergometer, bei den weiblichen Probanden, signifikant höher (p <0.001). Die P50-Werte des O_2-Pulses an der ventilatorischen Schwelle unterscheiden sich beim männlichen Geschlecht nicht signifikant voneinander (p= 0,552). Bei den weiblichen Probanden unterscheidet sich der Mittelwert des O_2-Pulses bei Ausbelastung signifikant zugunsten des Laufbandes (p= 0,002). Bei den männlichen Probanden ist dieser Unterschied nicht signifikant (p= 0,623). Für beide Geschlechter unterscheidet sich der Mittelwert der HF an der ventilatorischen Schwelle nicht signifikant zwischen Fahrrad- und Laufbandergometer ($p_{weiblich}$ = 0,152; $p_{männlich}$ = 0,071). Beim Vergleich der maximalen HF der Probanden bei Ausbelastung, konnte ein signifikanter Unterschied zwischen dem Fahrrad und dem Laufband festgestellt werden. Bei beiden Geschlechtern zeigten sich für die maximale HF bei Ausbelastung auf dem Laufbandergometer deutlich höhere Mittelwerte ($p_{weiblich}$ = 0,004; $p_{männlich}$ < 0,001).

Diskussion: Im Vergleich zur Fahrradspiroergometrie ergab die Laufbandspiroergometrie für HF und O_2-Puls die höhere Werte. Die Maximalwerte der HF bei männlichen und weiblichen Probanden auf dem Laufband- und Fahrradergometer sind signifikant unterschiedlich. Besonders an der ventilatorischen Schwelle sowie bei der Ausbelastung bei den weiblichen Probanden zeigte der O_2-Puls einen signifikanten Unterschied zugunsten der Laufbandbelastung. Bei den männlichen Probanden konnte hingegen für O_2-Puls zwischen der Fahrrad- und Laufbandergometrie kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden. Aufgrund dieser signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Belastungsformen, sollten die Trainingsempfehlungen, die bei einer spezifischen Belastungsuntersuchung ermittelt werden, nicht direkt auf andere Belastungsform übertragen werden. Die gewonnenen Referenzwerte werden als Bausteine in der spiroergometrische Untersuchung verwendet. Dadurch werden die erarbeiteten Daten für den klinischen Alltag (präventive Beratung, Begutachtung und Risikoabschätzung, Therapiekontrolle sowie Abschätzung der Prognose, Beurteilung im Langzeitverlauf) zugänglich gemacht.

Allen Herzkindern
und all ihren Eltern.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ..... - 7 -

1.1 Belastungsuntersuchung ..... - 7 -

1.1.1 Ergometrische Testverfahren ..... - 8 -

1.1.2 Belastungsprotokolle auf dem Fahrrad- und Laufbandergometer: ..... - 9 -

1.1.3 Spiroergometrie ..... - 10 -

1.2 Lungenfunktionsdiagnostik: Spirometrie, Bodyplethysmographie ..... - 11 -

2 Zielsetzung ..... - 13 -

2.1 Fragestellungen: ..... - 13 -

3 Methoden ..... - 14 -

3.1 Probandenstichprobe ..... - 14 -

3.2 Das verwendete Spirometrieverfahren ..... - 14 -

3.3 Ermittlungen der Vitalparameter, angewendete Standardmessgrößen ..... - 15 -

3.3.1 Basismonitoring ..... - 15 -

3.3.2 Herzfrequenz ..... - 15 -

3.3.3 Maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{O2max}}$) ..... - 16 -

3.3.4 Sauerstoffpuls ..... - 16 -

3.3.5 Ventilatorische Schwelle ..... - 17 -

3.3.6 Ermittlung der anaeroben Schwelle (VAT) ..... - 19 -

3.4 Technisch-apparative Voraussetzungen ..... - 21 -

3.5 Ablauf der Untersuchung ..... - 23 -

3.5.1 Einschlusskriterien ..... - 23 -

3.5.2 Ausschlusskriterien ..... - 23 -

3.6 Untersuchungsprotokoll ..... - 24 -

3.7 Ausbelastungskriterien ..... - 25 -

3.8 Abbruchkriterien der Ergometrie ..... - 25 -

3.9 Datenverarbeitung und statistische Verfahren ..... - 26 -
3.9.1 Ermittlung der statischen Signifikanz ..... - 27 -
4 Ergebnisse ..... - 28 -
4.1 Sauerstoffpuls ..... - 28 -
4.1.1 Sauerstoffpuls in Ruhe ..... - 28 -
4.1.2 Sauerstoffpuls an der ventilatorisch bestimmten Schwelle ..... - 30 -
4.1.3 Sauerstoffpuls bei Ausbelastung ..... - 31 -
4.2 Herzfrequenz ..... - 32 -
4.2.1 Herzfrequenz in Ruhe ..... - 33 -
4.2.2 Herzfrequenz an der ventilatorisch bestimmten Schwelle ..... - 34 -
4.2.3 Herzfrequenz bei Ausbelastung ..... - 36 -
4.3 Vergleich der Ergebnisse für Sauerstoffpuls und Herzfrequenz zwischen dem Fahrrad- und Laufbandergometer ..... - 37 -
4.3.1 Sauerstoffpuls ..... - 37 -
4.3.2 Herzfrequenz ..... - 40 -
5 Diskussion ..... - 43 -
5.1 Kritische Betrachtung zum Design der Studie ..... - 43 -
5.2 Herzfrequenz in Relation zum Alter ..... - 46 -
5.3 Sauerstoffpuls in Relation zum Alter ..... - 47 -
6 Zusammenfassung ..... - 48 -
7 Literaturverzeichnis ..... - 50 -

Abkürzungsverzeichnis

AF	Atemfrequenz
AT	anaerobe Schwelle, ventilatory anaerobic threshold
AZV	Atemzugvolumen
BGA	Blutgasanalyse
cm	Zentimeter
CO_2	Kohlendioxid, Kohlenstoffdioxid
DGPK	Deutsche Gesellschaft für Pädiatrische Kardiologie und Angeborene Herzfehler e.V.
EKG	Elektrokardiogramm
EQ	Atemäquivalent
EQ_{CO2}	Atemäquivalent Kohlendioxid
EQ_{O2}	Atemäquivalent Sauerstoff
ERV	exspiratorische Reservevolumen
EVC	exspiratorische Vitalkapazität
FeV1	forcierte Einsekundenkapazität
FRC	funktionelle Residualkapazität
Hb	Hämoglobin
HF	Herzfrequenz
HF_{max}	maximale Herzfrequenz
HF_{Ruhe}	Herzfrequenz in Ruhe
HF_{peak}	Tatsächlich erreichte maximale Herzfrequenz
HRR	Herzfrequenzreserve
HZV	Herzminutenvolumen
IRV	inspiratorische Reservevolumen
IVC	inspiratorische Vitalkapazität
KG	Körpergewicht
kg	Kilogramm
lauf	Laufband
m	männlich
m^2	Quadratmeter
min	Minute

ml	Milliliter
mm	Millimeter
mmHg	Millimeter Quecksilbersäule
n	Größe der Stichprobe
n.a.	nicht verfügbar
n.sig.	nicht signifikant
O_2	Sauerstoff
O_2-Puls	Sauerstoffpuls
P	Signifikanzwert
PetCO_2	Partialdruck des endtidalen CO_2
P50	50. Perzentile
rad	Fahrrad
RCP	Respiratorischer Kompensationspunkt
RER	Respiratorischer Quotient
RR	Blutdruck
RV	Residualvolumen
Sek	Sekunde
SD	Standardabweichung
t	Zeit
TLC	Totale Lungenkapazität
VAT	Ventilatory anaerobic threshold
VC	Vitalkapazität
$\dot{V}_{CO2}$	Kohlendioxidabgabe
$\dot{V}$	Atemminutenvolumen
$\dot{V}_{O2}$	Sauerstoffaufnahme
$\dot{V}_{O2max}$	Maximale Sauerstoffaufnahme
V_t	Tidalvolumen
VT_1	Ventilatorische Schwelle 1
VT_2	Ventilatorische Schwelle 2
W	Watt
w	weiblich
W_{max}	maximale Leistungsfähigkeit
%	Prozent

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Darstellung von Stufentest (links) und Rampentest (rechts) [17] ..... - 10 -
Abbildung 3.1 Altersverteilung der untersuchten Probanden..... - 14 -
Abbildung 3.2 Schematische Darstellung des aerob-anaeroben Übergangs [44]..... - 18 -
Abbildung 3.3 Der aerob-anaerober Übergang in der Darstellung des Panels 5 zeigte drei "Knickpunkte" [24]..... - 20 -
Abbildung 4.1 Perzentile O_2-Puls in Ruhe weiblich ..... - 29 -
Abbildung 4.2 Perzentile O_2-Puls in Ruhe männlich ..... - 29 -
Abbildung 4.3 Perzentile O_2-Puls an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, weiblich- 30 -
Abbildung 4.4 Perzentile O_2-Puls an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, männlich... - 30 -
Abbildung 4.5 Perzentile O_2-Puls bei Ausbelastung weiblich ..... - 31 -
Abbildung 4.6 Perzentile O_2-Puls bei Ausbelastung männlich ..... - 32 -
Abbildung 4.7 Perzentile Herzfrequenz in Ruhe, weiblich ..... - 33 -
Abbildung 4.8 Perzentile Herzfrequenz in Ruhe, männlich ..... - 33 -
Abbildung 4.9 Perzentile Herzfrequenz an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, weiblich..... - 35 -
Abbildung 4.10 Perzentile Herzfrequenz an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, männlich..... - 35 -
Abbildung 4.11 Perzentile Herzfrequenz bei Ausbelastung, weiblich ..... - 36 -
Abbildung 4.12 Perzentile Herzfrequenz bei Ausbelastung, männlich ..... - 36 -
Abbildung 4.13 Vergleich O_2-Puls an der VAT, weiblich ..... - 38 -
Abbildung 4.14 Vergleich O_2-Puls an der VAT, männlich ..... - 38 -
Abbildung 4.15 Vergleich O_2-Puls bei Ausbelastung, weiblich ..... - 39 -
Abbildung 4.16 Vergleich O_2-Puls bei Ausbelastung, männlich ..... - 39 -
Abbildung 4.17 Vergleich HF an der VAT, weiblich ..... - 40 -
Abbildung 4.18 Vergleich HF an der VAT, männlich ..... - 40 -
Abbildung 4.19 Vergleich HF bei Ausbelastung, weiblich ..... - 41 -
Abbildung 4.20 Vergleich HF bei Ausbelastung, männlich ..... - 41 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 9.1 Sauerstoffpuls basal, weiblich ..... - 63 -
Tabelle 9.2 Sauerstoffpuls basal, männlich ..... - 64 -
Tabelle 9.3 Sauerstoffpuls an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, weiblich ..... - 66 -
Tabelle 9.4 Sauerstoffpuls an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, männlich ..... - 67 -
Tabelle 9.5 Sauerstoffpuls bei der Ausbelastung, weiblich ..... - 69 -
Tabelle 9.6 Sauerstoffpuls bei der Ausbelastung, männlich ..... - 70 -
Tabelle 9.7 Herzfrequenz (HF) basal, weiblich ..... - 72 -
Tabelle 9.8 Herzfrequenz (HF) basal, männlich ..... - 74 -
Tabelle 9.9 Herzfrequenz an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, weiblich ..... - 75 -
Tabelle 9.10 Herzfrequenz an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, männlich ..... - 77 -
Tabelle 9.11 Herzfrequenz bei der Ausbelastung, weiblich ..... - 78 -
Tabelle 9.12 Herzfrequenz bei der Ausbelastung, männlich ..... - 80 -
Tabelle 9.13 t-Test Berechnung mit p-Werte für Sauerstoffpuls und Herzfrequenz auf dem Fahrrad- und Laufbandergometer ..... - 82 -
Tabelle 9.14 Anthropometrische Größen der untersuchten Probanden ..... - 82 -

1 Einleitung

1.1 Belastungsuntersuchung

Belastungsuntersuchungen bieten in Praxis und Klinik wichtige Informationen zur Erweiterung diagnostischer Erkenntnis, sie ermöglichen präventive und/oder therapeutische Folgerungen. In der Arbeitsmedizin (Begutachtungen), in der Sport- und Rehabilitations-Medizin sind Belastungstests unverzichtbare Grundlage für eine fundierte Beratung und Beurteilung [1].

Im Gegensatz zu Untersuchungen unter Ruhebedingungen erfassen Belastungstest, neben Koordinationsfähigkeit und Motivation des Patienten, Funktionen mehrerer Organsysteme: Lunge, Herz und periphere Muskulatur [2]. Belastungsuntersuchungen liefern wertvolle Hinweise über das kardiorespiratorische System sowohl in Ruhe als auch unter Belastung, da die Mechanismen für innere und äußere Atmung unter Belastung häufig Auffälligkeiten darlegen, welche in Ruhe nicht ersichtlich sind. Darüber hinaus können typische Lungen- und Herzfunktionsuntersuchungen, die in Ruhe durchgeführt werden, nicht zuverlässig den Trainingsumfang bzw. die spezifischen Mechanismen, denen die Belastungsintoleranz der einzelnen Probanden mit einer Herz- oder Lungenerkrankung unterliegt, bestimmen [3].

Anhand der Fragestellung und des Untersuchungsziels (Trainingsberatung, Trainingskontrolle, Diagnostik latenter Erkrankungen, Therapieüberprüfung, Interventionsüberwachung) sowie verschiedener Leistungsfaktoren wird die geeignete Testmethode (wie zum Beispiel Fahrradergometrie, Laufbandergometrie, Ruderergometrie, Feldstufentest, Drehkurbelergometrie, liegende Fahrradergometrie, Kletterstufentest, 6-Minuten-Gehtest) herangezogen. Bei Belastungstests wird die symptomlimitierte maximale Belastbarkeit oder die Ausdauer, bei der eine konstante Belastung durchgeführt werden kann, gemessen [2]. Zur Bestimmung der Ausdauer ist ein Protokoll mit einer konstanten Belastungsstufe vorzuziehen. Die meisten Belastungstests werden symptomlimitiert durchgeführt, dabei werden für die Bewertung einer Belastungsuntersuchung als „maximale“ Belastung („Ausbelastung“) unterschiedliche Variablen herangezogen. Am umfangreichsten sind die Ausbelastungskriterien für die Spiroergometrie beschrieben: maximale Herzfrequenz, Laktatwert, Plateau der Sauerstoffaufnahme, pH-Abfall und respiratory exchange ratio (RER) [2, 4].

Kardiopulmonale Belastungsuntersuchungen auf dem Fahrrad oder Laufband haben in der Medizin einen hohen Stellenwert. Sie dienen einerseits zur Feststellung der körperlichen

Leistungsfähigkeit, andererseits auch zum Beweis oder Ausschluss kardiopulmonaler Erkrankung [5]. Bei Patienten mit chronischen Erkrankungen ist schon im Kindesalter wichtig, ein geeignetes Belastungsprotokoll zu wählen, damit eine Langzeitbeobachtung des Patienten auch in der Adoleszenz und im Übergang bis zum Seniorenalter ermöglicht werden kann [6].

1.1.1 Ergometrische Testverfahren

Ergometrische Belastungen führen zu einer Steigerung des Herz-Zeit-Volumens (Schlagvolumen- und Herzfrequenzanstieg) und des myokardialen Sauerstoffverbrauchs [7]. Durch Beobachtung und Messung von klinischem Befinden, Herzfrequenz, Blutdruck, EKG, Atemzeitvolumen sowie Sauerstoffaufnahme und weiteren Parametern kann auf pathologische Veränderungen hingewiesen werden, um mögliche Risiken durch latente oder manifeste Erkrankungen zu erkennen [8]. Sie wird sowohl bei Patienten zur Diagnostik und Verlaufskontrolle von Krankheitsbildern angewendet, als auch bei Gesunden in der Leistungsdiagnostik. Je nach Fragestellung und Zielgruppen werden verschiedene Belastungsschemata verwendet, die sich hinsichtlich Anfangsleistung, Leistungsanstieg im Zeitverlauf und Belastungsdauer deutlich unterscheiden können [9, 10]. Die häufigsten ergometrischen Standardmethoden sind in Europa die Fahrradergometrie und in den USA die Laufbandergometrie [11,12,13]. Andere Testverfahren, wie zum Beispiel Ruderergometrie, Feldstufentest, Drehkurbelergometrie, liegende Fahrradergometrie, Kletterstufentest, 6-Minuten-Gehtest, Kraftdiagnostik, werden im Rahmen sportartspezifischer Leistungsdiagnostik und spezieller klinischer Fragestellungen eingesetzt [9, 13, 14]. Die Belastungsformen Rad- und Laufbandergometrie haben Vor- und Nachteile. Der Vorteil der Fahrradergometrie liegt in der relativ ruhigen Haltung des Oberkörpers und der Arme, was eine gute EKG-Ableitung sowie eine akzeptable Qualität der Blutdruckmessung und Pulsoxymetrie ermöglicht [15, 16, 17]. Die Blutdruckmessung ist bei der Fahrradergometrie einfacher, da der Arm hierbei ruhiger gehalten werden kann und störende Laufgeräusche entfallen [15]. Der andere Vorteil des Fahrradergometers ist ein geringer Platzbedarf. Des Weiteren kann die Trittfrequenz, die Kurbellänge, Sattelhöhe sowie die Lenkerstellung standardisiert werden. Alle Zusatzuntersuchungen sind im Sitzen ohne Unterbrechung der Belastung möglich.

Die Kinder können die Belastungsuntersuchung erst ab dem Alter ausführen, ab dem sie laufen bzw. Rad fahren können. Ein Nachteil der Fahrradergometrie ist, dass bei jungen bzw.

kleinen Kindern aufgrund der geringen Kraft der Quadrizepsmuskulatur sowie nicht ausreichender Körperlänge eine Ausbelastung häufig nicht gelingt.

Bei der Belastungsuntersuchung mittels Laufbandes werden mehr Muskelgruppen aktiviert. Auf dem Laufbandergometer wird bei gleicher Wattzahl höhere HF und $\dot{V}_{O2max}$. nachweisbar. Die Belastbarkeit auf dem Laufband ist 10 % bis 20 % höher als auf einem Fahrradergometer. Aufgrund dessen sollen die Referenzen testspezifisch sein [3].

1.1.2 Belastungsprotokolle auf dem Fahrrad- und Laufbandergometer:

Für Belastungsuntersuchungen auf dem Fahrrad- und Laufbandergometer sind unterschiedliche Protokolle etabliert, die sich nach der Fragestellung an die Untersuchung richten [2]:

- Progressives Rampenprotokoll mit gleichmäßiger Steigerung der Belastung bis zum symptomlimitierten Abbruch
- Stufenprotokolle mit Steigerung der Belastung um 0,5 W/kg Körpergewicht nach jeweils 2-5 Minuten
- Stufenprotokoll mit zwei Belastungsstufen über je 5-6 min zur Analyse des Gasaustausches, da die relevanten Gasaustauschparameter erst in der 5. Belastungsminute einen steady state zeigen
- Protokoll mit einer konstanten Belastungsstufe zur Bestimmung der Ausdauer

Grundsätzlich sind stufen- von rampenförmigen Belastungen im Rahmen der Fahrradergometrie zu unterscheiden. Bei einem ausgewählten Stufenprotokoll auf dem Fahrradergometer wird eine Belastungsstufe für 2 Minuten beibehalten und es erfolgt nach Ablauf der Zeit eine Steigerung um eine vorher definierte Belastung, die für eine gewisse Zeit konstant bleibt. Bei einer Drehzahl von 50 bis 60 Umdrehungen pro Minute wird jede Belastungsstufe zwei Minuten lang ausgeführt. Die Belastung steigt stufenförmig um 0,5 W/ kg Körpergewicht. Bei der rampenförmigen Belastung wird die Belastung wiederum kontinuierlich nach Einstellung der Anfangslast (ebenfalls zumeist 50 W) gesteigert [18].

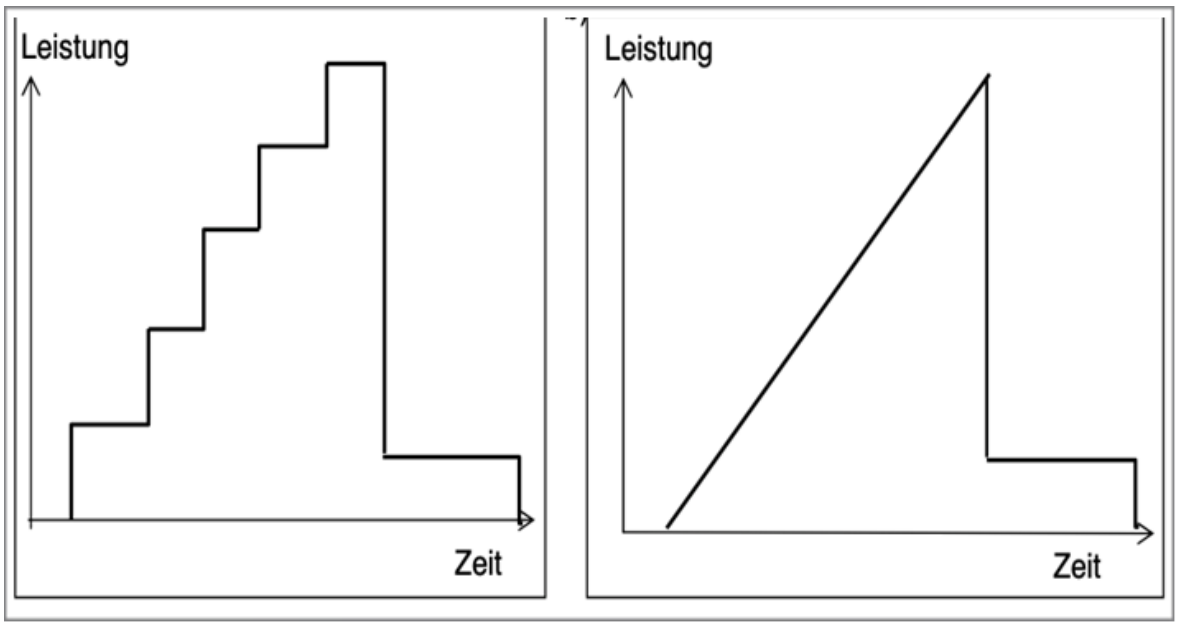

Abbildung 1.1 Darstellung des Ablaufs einer Fahrradergometrie mittels Stufen- (links) bzw. Rampenbelastung (rechts) [17]

1.1.3 Spiroergometrie

Die Spiroergometrie ist eine Untersuchungsmethode, die unter ständig steigender Belastung die großen Funktionsgruppen (Lunge, Herz-Kreislauf und Energiebereitstellung im Muskel) abbildet [19].

Eine spiroergometrische Untersuchung dient in der klinischen Anwendung dazu, objektive und quantitative Aussagen zur metabolischen Anpassung auf eine kontinuierlich steigende Belastungsintensität zu treffen. Hierzu zählen [2]:

- die maximale Sauerstoffaufnahme
- das Einsetzen des anaeroben Stoffwechsels
- die Effizienz des Kreislaufs unter Belastung
- die Effizienz der Ventilation unter Belastung

Mit dieser Methode wird qualitativ und quantitativ die Reaktion und das Zusammenspiel von Herz, Kreislauf, Atmung und Stoffwechsel während einer kontinuierlich ansteigenden Belastung analysiert [20]. Die Atemmaske**,** die die Testperson während der Untersuchung trägt, ist mit einem Messgerät verbunden, durch dieses können die Atemgase analysiert werden. Bei den modernen Geräten werden diese Parameter bei jedem Atemzug mittels

schneller Analysatoren gemessen (Breath-by-breath-Analyse) und online mittels einer entsprechenden Software verarbeitet [21, 22, 23]. Bei der sogenannten breath-by-breath-Analyse kann die Gaskonzentration eines jeden einzelnen Atemzuges bestimmt werden.

Direkt gemessene Parameter der Spiroergometrie:

- Atemvolumina
- Atemfrequenz
- Atemflüsse
- endexpiratorischer Sauerstoff- und Kohlendioxidpartialdruck ($PETO_2$, $PETCO_2$)

Weitere Parameter werden automatisiert berechnet:

- Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}_{O2}$)
- Kohlendioxidgabe ($\dot{V}_{CO2}$)
- respiratorischer Quotient V_{CO2}/V_{O2} (Respiratory Exchange Ratio, RER)
- Sauerstoffpuls (O_2-Puls)
- Atemäquivalente für O_2 und CO_2
- Alveolo-arterielle Partialdruckdifferenz ($AaDO_2$)

Die klinische Fragestellung einer Belastungsuntersuchung erfordert es, eine Testmethode zu nutzen, die in möglichst optimaler Weise die individuell erreichbare Leistungsfähigkeit abgreift und damit die gewünschte Fragestellung beantwortet [24].

1.2 Lungenfunktionsdiagnostik: Spirometrie, Bodyplethysmographie

Vor der Fahrradergometrie erfolgte bei jedem Probanden eine Lungenfunktionsdiagnostik. Die Lungenfunktionsdiagnostik setzte sich aus Spirometrie und Ganzkörperbodyplethysmographie zusammen. Die Spirometrie ist eine einfache Lungenfunktionsuntersuchung zur Diagnostik obstruktiver Ventilationsstörungen und zur Bestimmung von Lungenvolumina. Spirometrische Messparameter: Man unterscheidet zwischen statischen und dynamischen Lungenfunktionsparametern. Unter den statischen Lungenfunktionsparametern versteht man Lungenvolumina, deren Messwerte nicht vom zeitlichen Ablauf der Spirometrie abhängen (z.B. IVC). Unter dynamischen Lungenfunktionsparametern versteht man Messwerte, die vom zeitlichen Verlauf abhängig sind (z. B. FEV_1) [25].

Das Volumen, welches nach maximaler Inspiration mittels forcierter Expiration in der ersten Sekunde ausgeatmet werden kann, wird als (absolute) Einsekundenkapazität (FEV_1) bezeichnet. Als forcierte Expiration wird das Manöver bezeichnet, bei dem der Proband zügig bis zur TLC einatmet und sofort danach, ohne Pause, mit maximaler Anstrengung über mehrere Sekunden bis zum Residualvolumen ausatmet. Bei dem forcierten Expirationsmanöver werden das forcierte Volumen in der ersten Sekunde (FEV_1) sowie die maximalen expiratorischen Atemstromstärken (FEFxx) bestimmt. Dabei wird sowohl das Volumen gegen die Zeit aufgetragen (Volumen-Zeit-Kurve), als auch die Atemstromstärke gegen das Lungenvolumen (Fluss-Volumen-Kurve). Mit der Spirometrie können Lungenvolumina und ihre dynamische Veränderung mittels der beiden Kurven aufgezeichnet werden [25]. Die Spirometrie dient eine Differenzierung zwischen obstruktiven und restriktiven Lungenerkrankungen.

Eine obstruktive Ventilationsstörung ist durch eine Verminderung des Tiffeneau-Index (FEV_1/FVC) auf Werte unterhalb des unteren 5. Perzentils definiert. Eine verminderte Vitalkapazität (FVC) kann Ausdruck einer restriktiven Ventilationsstörung sein, die durch eine Verminderung der Totalen Lungenkapazität (TLC) auf Werte unterhalb des 5. Perzentils definiert ist [25]. Mithilfe der Bodyplethysmographie konnten ergänzende atemphysiologische Parameter, wie Atemwegwiderstand, totale Lungenkapazität und Residualvolumen gewonnen werden. Zur sicheren Diagnose von restriktiven und obstruktiven Erkrankungen ist daher eine bodyplethysmographische Messung der totalen Lungenkapazität notwendig.

2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist, Referenzwerte der kardiozirkulatorischen Parameter -Herzfrequenz und Sauerstoffpuls- bei gesunden Probanden im Alter von 5 bis 81 Jahren, die eine Radspiroergometrie absolviert haben, in Ruhe, an der ventilatorisch bestimmten Schwelle und bei Belastungsabbruch auszuarbeiten.

2.1 Fragestellungen:

Wie stellen sich die kardiozirkulatorische Parameter -Herzfrequenz und Sauerstoffpuls- in Ruhe, an der ventilatorisch bestimmten Schwelle und bei Belastungsabbruch in den verschiedenen Altersstufen dar?

Weisen die untersuchten kardiozirkulatorischen Parameter eine Altersabhängigkeit auf?

Wenn ja, welche physiologische Grundlagen erklären die altersspezifischen Perzentile?

Gibt es signifikante Unterschiede der gewonnenen Daten unter Belastung zwischen Fahrradergometrie und Laufbandergometer?

3 Methoden

3.1 Probandenstichprobe

Zwischen 2005 und 2008 erfolgte in der Ambulanz der Klinik für angeborene Herzfehler am Herz- und Diabeteszentrum NRW die systematische Belastungsuntersuchung der gesunden Probanden im Alter von 5 bis 81 Jahren. Mithilfe der körperlichen Untersuchung und Anamnese wurden kranke Probanden ausgeschlossen und nur gesunde Probanden eingeschlossen. Das Votum der Ethikkommission liegt vor. Es wurden insgesamt 779 gesunde Kinder, Jugendliche und Erwachsene untersucht, wobei sich die Gesamtanzahl in 361 weibliche und 418 männliche Probanden aufteilte.

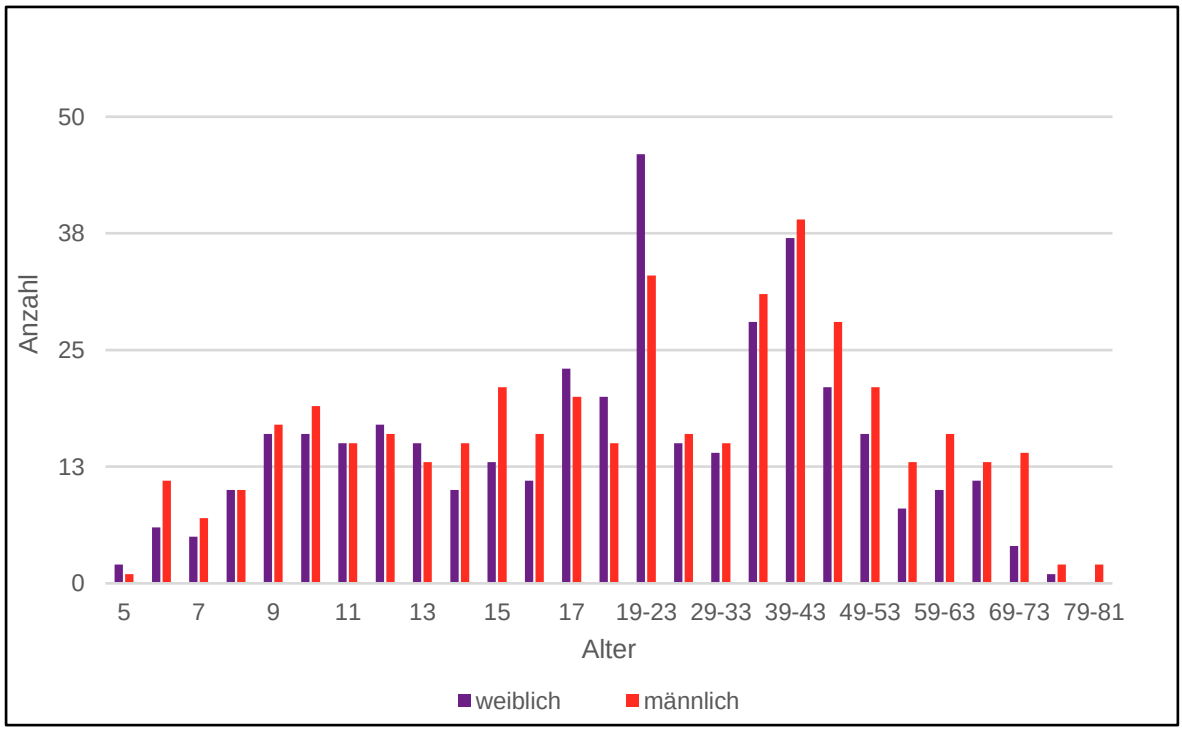

Abbildung 3.1 Altersverteilung der untersuchten Probanden.

3.2 Das verwendete Spirometrieverfahren

In unserer Studie kam ein offenes Spirometriesystem zum Einsatz, bei dem die Volumina indirekt durch Druckdifferenz über eine variable Blende gemessen wurden. An der variablen Blende entsteht beim Ein- und Ausatmen eine Druckdifferenz, welche durch Sensoren (elektronische Manometer) vor und hinter der Blende gemessen werden konnten. Computergestützt wurde die Atemstromstärke mittels Pneumotachographen in eine Fluss-Volumenkurve grafisch umgewandelt, sodass Atemzugvolumen und Atemfrequenz berechnet werden konnten. Eine Pumpe führte die Gasproben zur Analyseeinheit (ZAN 600). Mit 2

Gasanalysatoren, die eine Reaktionszeit von <90 Millisekunden besitzen, konnten die Messungen von Gasvolumen der CO_2 und O_2 durchgeführt werden. Dabei erfolgte die Analyse des Kohlenstoffdioxids durch eine Infrarotabsorptionszelle mit einer Messgenauigkeit von ± 0,1 %. Die Messung des Sauerstoffs fand durch ein optisches Spektrometer statt. Die Blutgasanalyse mit Laktatbestimmung erfolgte in Ruhe vor der Belastung, annähernd an der ventilatorisch bestimmten Schwelle (RQ ≥ 0,98) und nach Belastungsabbruch (2 Minuten nach Belastungsende) [26].

3.3 Ermittlungen der Vitalparameter, angewendete Standardmessgrößen

3.3.1 Basismonitoring

Bei jedem Probanden erfolgte eine kontinuierliche EKG-Ableitung und manuelle Blutdruckmessung nach der Methode von Riva-Rocci in Ruhe, während jeder Belastungsstufe, an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, unter Ausbelastung und nach Belastungsende. Ergänzend dazu erfolgte eine kontinuierliche Messung des Atemminutenvolumens, der Kohlendioxidabgabe und Sauerstoffaufnahme vor, während und nach der Fahrradergometrie. Die kapilläre Blutgasanalyse mit Bestimmung des Hb, der Elektrolyte, des Blutzuckers und des Laktatwertes erfolgte mit dem ABL725 Gerät der Firma Radiometer Kopenhagen. Die spiroergometrisch erhobenen Werte wurden automatisch in einer Datenbank gespeichert und nur die Werte für Blutdruck und Laktat wurden manuell eingegeben.

3.3.2 Herzfrequenz

Unter körperlicher Anstrengung trägt das sympathische Nervensystem dazu bei, dass unser kardiovaskuläres System rasch reagieren kann. Der Anstieg der Herzfrequenz geschieht mit einer Reduktion des parasympathischen sowie der Erhöhung des sympathischen Anteiles des vegetativen Nervensystems. Die Herzfrequenzantwort auf eine Belastung ist von mehreren Einflussfaktoren abhängig: Alter, Aktivitätsmuster, Fitness-Level, Medikamenteneinnahme, kardiale Vorerkrankungen, Umwelt [27]. Beim gesunden Menschen steigt die Herzfrequenz linear mit zunehmender Belastung. Die Herzfrequenzreserve (heart rate reserve, HRR) beschreibt die Differenz von geschätzter maximaler Herzfrequenz und tatsächlich erreichter maximaler Herzfrequenz (HRpeak). Beim Gesunden sollte die HRR beim

Belastungsmaximum annähernd 0 betragen (dies zeigt eine maximale Anstrengung des Patienten) [28].

3.3.3 Maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}_{O2max}$)

Die Standardmessgröße der aeroben Leistungsfähigkeit ist die höchstmögliche Sauerstoffaufnahme während der maximalen Belastung ($\dot{V}_{O2max}$). Dabei handelt es sich um die Menge O_2, die vom inhalierten Gas pro Zeiteinheit extrahiert wird [20,27,29]. Im aeroben Bereich besteht eine lineare Beziehung zwischen O_2 -Aufnahme und Leistung (Watt), die allerdings spezifisch für die Art der erbrachten Leistung ist (Fahrradergometer, Laufband, Drehkurbelergometer) und vom Einsatz unterschiedlicher Muskelmassen und dem jeweiligen Wirkungsgrad abhängt. Hierzu berichten verschiedene Autoren unterschiedliche Korrelationen. Die Korrelation ist bei geringer Belastung gut, bei höherer Belastung jedoch weniger gut [24]. Unterhalb der anaeroben Schwelle steigt die Sauerstoffaufnahme mit zunehmender Belastung weitgehend linear an. Ab einer bestimmten Belastungsintensität wird ein Plateau erreicht, dabei kommt es zu keiner weiteren Steigerung der Sauerstoffaufnahme, trotz Steigerung der Belastung. Die maximale Sauerstoffmenge, die vom Körper während einer maximalen Ausbelastung aufgenommen werden kann, wird als maximale Sauerstoffaufnahme bezeichnet [30]. Von Kindern wird die maximale Sauerstoffaufnahme während einer Belastungsuntersuchung auf dem Fahrradergometer jedoch in den meisten Fällen nicht erreicht [30]. In diesen Fällen spricht man von der $\dot{V}_{O2peak}$. Pettersen weist in einer Publikation zu diesem Thema darauf hin, dass bei Kindern und Jugendlichen die maximale Sauerstoffaufnahme bezogen auf das Körpergewicht keine befriedigende Aussage über die Ausdauerfähigkeit zulässt [31]. Damit begründet er den in mehreren Publikationen nicht bzw. nur unzureichend nachzuweisenden Anstieg der $\dot{V}_{O2max}$ trotz angestiegener Laufperformance [9, 16,33,34]. Nach Pettersen gilt als Faustregel bis zur Pubertät, dass als Normwert für die $\dot{V}_{O2peak}$ ein Wert von 40± 7 ml/kg/min angenommen werden kann [30].

3.3.4 Sauerstoffpuls

Der O_2-Puls entspricht der Sauerstoffaufnahme pro Herzschlag ($\dot{V}_{O2max}$/HR) und steigt unter Belastung an [35]. Dieser Wert erlaubt Rückschlüsse auf die kardiozirkulatorische Leistungsfähigkeit eines Probanden [36]. Korrekterweise muss man von einem

Sauerstoffverbrauch pro Herzschlag ausgehen, da der Sauerstoffpuls direkt von der arteriovenösen Sauerstoffdifferenz abhängt [20, 27, 37, 38, 39]. Erniedrigte Hämoglobinwerte, eine geringe Oxygenierung oder das Bestehen eines intrakardialen Rechts-Links-Shunts können zu reduzierten Sauerstoffpulswerten führen.

Normalerweise steigt der Sauerstoffpuls unter Belastung kontinuierlich an und bildet schließlich ein Plateau, das in der Regel erst bei einer Ausbelastung erreicht wird [30]. Er ist eine wichtige Größe zur Abschätzung der myokardialen Funktion unter Belastung und wird als Korrelat des Schlagvolumens angesehen [20]. Als Normalwerte gelten in Ruhe: 4-6 ml/beat, bei Maximalbelastung ca. 10-20 ml/beat (Untrainierte) und 25-30 ml/beat (Ausdauertrainierte) [21]. Jedoch fehlen valide Referenzwerte für Kinder und Jugendliche.

3.3.5 Ventilatorische Schwelle

Bei niedriger körperlicher Belastungsintensität erfolgt die Energiebereitstellung zum großen Teil über aerobe Stoffwechselwege. Während die $\dot{V}_{O2max}$ das Kriterium für die Beurteilung der aeroben Kapazität darstellt, besteht über die Messung des Laktatspiegels die Möglichkeit, einen Überblick über den anaeroben Stoffwechsel zu erhalten. Bei höheren Belastungen erhöht sich der durch anaerobe Glykolyse gewonnene Anteil der Energiebereitstellung [40, 41]. Nach Wasserman definiert sich die ventilatorische Schwelle als “diejenige Sauerstoffaufnahme, an der eine Unterstützung der Energiebereitstellung durch anaerobe Mechanismen einsetzt” [20,21]. Die erste Schwelle ist von Wasserman et al. als anaerobe und die zweite Schwelle als respiratorischer Kompensationspunkt (RCP) bezeichnet worden. Es erscheint aber sinnvoll hier eine klare Benennung und Trennung in ventilatorische Schwelle 1 (VT_1) und ventilatorische Schwelle 2 (VT_2) vorzunehmen. Dabei findet an der VT_1 eine Steigerung der Ventilation und der CO_2-Abgabe jeweils im Verhältnis zur Sauerstoffaufnahme aufgrund von vermehrt anfallendem CO_2 aus der Laktatpufferung statt. Die VT_2 ist gekennzeichnet durch eine erkennbare respiratorische Kompensation einer im weiteren Verlauf der Belastung auftretenden metabolischen Azidose [40, 42, 43].

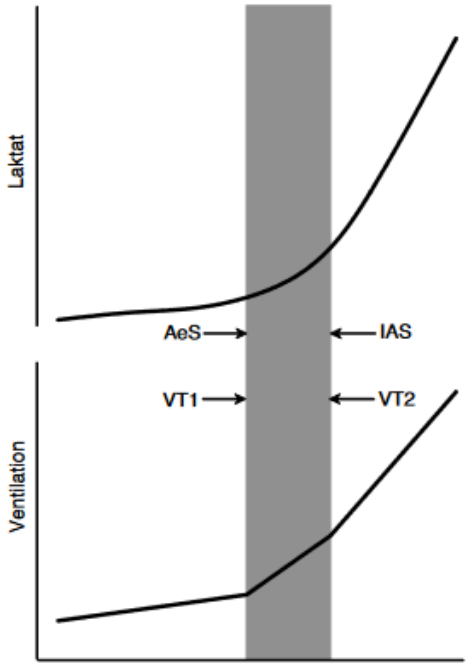

Abbildung 3.2 Schematische Darstellung des aerob-anaeroben Übergangs [44]

Laktat-Leistungskurve (oben) und Ventilation (unten) bei ansteigender Belastungsintensität. AeS: aerobe Schwelle; IAS: individuelle anaerobe Schwelle; VT_1: ventilatorische Schwelle [44]

Neue „Schwellen-Termini“ nach Positionspapier der AG Spiroergometrie, Westhoff et al. 2013 [24, 40]:

- Die von Wasserman als „AT“ (VAT) bezeichnete Schwelle, die den Beginn des aerob-anaeroben Übergangs beschreibt wird als VT_1 bezeichnet.
- Der respiratorische Kompensationspunkt „RCP“ nach Wasserman, der die ventilatorische Kompensation der Laktatazidose kennzeichnet wird als VT_2 bezeichnet.

Die ventilatorische Schwelle gilt als objektiver Index der funktionellen Kapazität sowohl bei Gesunden als auch bei Patienten mit kardiovaskulären Erkrankungen und erlaubt eine objektive Einschätzung der aeroben Leistungsfähigkeit ohne maximale Ausbelastung und ohne willentliche Beeinflussung des Patienten [21, 45, 46, 47]. Mit der aerob-anaeroben Schwelle wird der Punkt bestimmt, an dem die Laktatbildung und -utilisation im Gleichgewicht stehen und somit auch gleichzeitig die Ausdauerleistungsgrenze darstellt. Sie spielt insbesondere bei Trainingsempfehlungen und -steuerung eine übergeordnete Rolle [36, 48, 49, 50]. Nach Hollmann übertrifft die aerob-anaerobe Schwelle in der heutigen Leistungsdiagnostik sogar

die Zuverlässigkeit und Aussagekraft der maximalen Sauerstoffaufnahme [51]. Der Bereich der VAT beschreibt den submaximalen Belastungsbereich und entspricht dem "Punkt des optimalen Wirkungsgrades, POW" nach Hollmann [52]. Während die maximale Leistung in hohem Maße von mentalen Faktoren abhängt, ist der Bereich der VAT besser reproduzierbar und von der Mitarbeit weitgehend unabhängig [24].

3.3.6 Ermittlung der anaeroben Schwelle (VAT)

Zur Bestimmung der anaeroben Schwelle unterscheidet man invasive Methoden mit Messung des Laktat- oder Bicarbonatspiegels von nicht invasiven Methoden, die auf Veränderungen ventilatorischer Parameter unter körperlicher Belastung beruhen. Angelehnt an Wasserman et al. lässt sich die VAT durch 4 Methoden bestimmen: V-Slope Methode nach Beaver, Zunahme des Atemäquivalents für Sauerstoff, Zunahme des endexpiratorischen O_2-Partialdrucks ($PETO_2$), Zunahme des respiratorischen Quotienten (RQ) [24, 53]. Die Bestimmung der ventilatorischen Schwelle erfolgt mithilfe der computerbasierten Breath-by-breath Technik, durch die die Veränderungen der Atemgase während einer Belastungsuntersuchung kontinuierlich gemessen werden können. Bei der Breath-by-Breath-Technik werden die Ausatemkonzentrationen O_2 und CO_2 über das ausgeatmete Volumen integriert. Es werden hierfür schnelle Gasanalysatoren benötigt [24, 53]. Die ventilatorische Schwelle wurde mit dem Erreichen eines respiratorischen Quotienten von 0,98 angenommen. Die Ergebnisse der computerbasierten VAT Bestimmung wurden mit den ermittelten Wasserman-Kurven verglichen. Dabei konnte die VAT mithilfe der Atemäquivalente für Sauerstoff (EQ_{O2}) und Kohlendioxid (EQ_{CO2}) sowie durch Anwendung der V-Slope-Methode der Wasserman-Kurve Feld 5 ermittelt werden [26]. Bei der sogenannten V-Slope-Methode nach Beaver wird die CO_2-Abgabe und O_2-Aufnahme mithilfe einer graphischen Darstellung im Koordinationssystem gegeneinander aufgetragen.

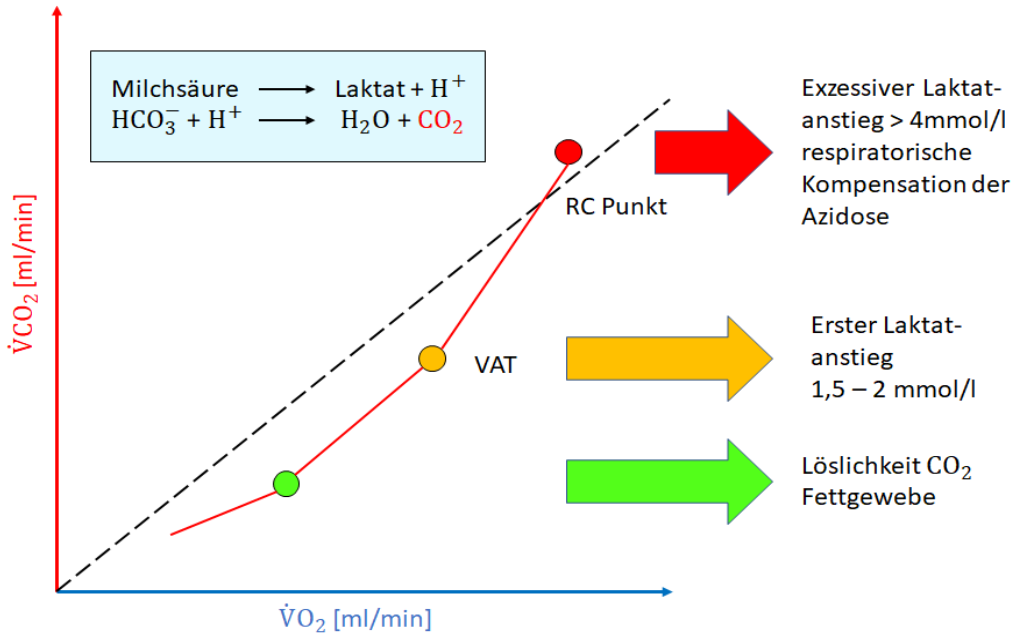

Abbildung 3.3 Der aerob-anaerober Übergang in der Darstellung des Panels 5 zeigte drei "Knickpunkte" [24]

Im sicheren aeroben Bereich (unterhalb des Grünen Punktes) wird Energie vorwiegend durch Beta-Oxidation der Fettsäuren gewonnen und es wird zunächst weniger CO_2 abgegeben, da CO_2 im Fettgewebe gespeichert wird. Die ventilatorisch bestimmte "anaerobe Schwelle" (gelb) entspricht einem Laktatanstieg von 1 bis 2 mmol. Der RC-Punkt (rot) zeigt den Beginn des exzessiven Laktatanstiegs mit respiratorischer Kompensation der metabolisch bedingten Azidose [24]. Entscheidend für den Zeitpunkt des Übergangs zwischen aerobem und anaerobem Stoffwechsel unter Belastung ist das Verhältnis zwischen Sauerstoffangebot und Sauerstoffbedarf. Wenn der Sauerstoffbedarf in der Muskulatur nicht mehr vollständig durch das verfügbare Sauerstoffangebot gedeckt werden kann, setzt zusätzlich zum aeroben Metabolismus der anaerobe Metabolismus ein. Der anaerobe Stoffwechselweg ist in Bezug auf die Energieausbeute wesentlich ineffektiver, funktioniert jedoch mit einer deutlich höheren Umsatzgeschwindigkeit. Zusätzlich wird Säure in Form von Laktat freigesetzt [54]. Die vermehrte Laktatanhäufung im Blut führt zu einer Steigerung des Atemminutenvolumens [34, 55]. Zur Aufrechterhaltung eines physiologischen pH-Wertes werden überschüssige H^+-Ionen durch Bicarbonat abgepuffert. Das dabei entstehende Kohlendioxid bewirkt eine zusätzliche Stimulation der Ventilation [27, 31, 34, 55, 56]. Der Beginn des anaeroben Metabolismus und die erste ventilatorische Antwort auf den Beginn des Laktatanstiegs, wird bei der Gasaustauschmessung als "Ventilatory Threshold 1" (VT_1) bezeichnet.

Der physiologisch ebenfalls bedeutsame "respiratorische Kompensationspunkt" wird im Rahmen der Gasaustauschmessung als VT_2 bezeichnet. An diesem Punkt reflektiert die überschießende Steigerung des Atemminutenvolumens eine Änderung des Atemregulationsmechanismus. Nicht nur CO_2, sondern zusätzlich auch der pH-Wert des arteriellen Blutes nehmen ab diesem Punkt Einfluss auf die Atmung [54]. Der Bereich oberhalb der VT_1 gibt die höchstmögliche Belastungsintensität an, welcher ohne zunehmende Übersäuerung aufrechterhalten werden kann. Dieser weist einen messbar erhöhten, jedoch konstanten Laktatspiegel auf. Laktatproduktion und -elimination befinden sich in einem Gleichgewichtszustand. Oberhalb dieses Bereiches, wenn der Laktatspiegel trotz gleichbleibender Leistung stetig ansteigt, ist die Fortführung der körperlichen Arbeit nur noch zeitlich begrenzt möglich und führt zur Erschöpfung [54]. Es wird angenommen, dass in diesem Intensitätsbereich die aus der Milchsäure anfallenden Wasserstoffionen nicht mehr vollständig abgepuffert werden können, sodass der abfallende pH-Wert die Atmung zusätzlich stimuliert [34, 56, 57]. Die VT_2 entspricht dem von Wasserman et al. beschriebenen respiratorischen Kompensationspunkt, der gekennzeichnet ist durch eine überproportionale Ventilation infolge einer zunehmenden metabolischen Azidose [58]. Die VT_2 wird über das Verhältnis von $\dot{V}_E$ zu $\dot{V}_{CO2}$ (i.e. $\dot{V}_E/\dot{V}_{CO2}$-Slope), das Atemäquivalent für CO_2 und/oder den $PetCO_2$ bestimmt [42]. Dies bedeutet, dass das Atemäquivalent für CO_2 einen Nadir aufweist bzw. ansteigt, das $PetCO_2$ abfällt, ein Anstieg der $\dot{V}_E$ gegenüber der $\dot{V}_{CO2}$ stattfindet und im V-Slope ($\dot{V}_{CO2}$vs. $\dot{V}_{O2}$) ein nochmaliger Knick mit einer nachfolgenden Kurvensteigung von größer als eins nachweisbar ist. Für die Bestimmung sind die Panels 4,6 und 9 der Wasserman 9-Felder-Tafel heranzuziehen. Sofern keine eindeutige Bestimmbarkeit über diese Panels möglich ist, können das Panel 5 und 1 zusätzlich herangezogen werden [40].

3.4 Technisch-apparative Voraussetzungen

Räumliche Voraussetzung

Raumtemperaturen zwischen 18 und 22 Grad Celsius und einer Luftfeuchtigkeit zwischen 40 und 60% wurden eingehalten.

Geräte und Kalibration

Die Durchführung der Belastungsuntersuchung erfolgte mit nachstehenden Geräten:

- Blutgasanalysegerät ABL 725 (Firma Radiometer Copenhagen)

- EKG-Aufzeichnungsgerät ZAN 800 ECG
- Computergesteuertes Ergometrierad (Firma Ergoline)
- Flowsensor/Analysatoreinheit ZAN 600 Ergo Test
- PC-System mit Gerätesoftware der Firma ZAN (GPI 200)
- Blutdruckmanschetten und Manometer der Firma Welch-Allyn

Voraussetzung für die korrekte Bestimmung der Atemgase ist die Kalibration und Eichung. Die Flowsensoren sind sehr empfindlich und bedürfen regelmäßiger Kontrolle, um eine einwandfreie Funktion der Membran im Atemrohr gewährleisten zu können. Entsprechend dem Standard unseres Funktionslabors und den Empfehlungen der Gerätehersteller wurden interne und externe Qualitätsprüfungen durchgeführt. Die interne Qualitätssicherung wurde durch Gaskalibration mittels Prüfgasen (15,9 % Sauerstoff, 5 % Kohlendioxid) nach jedem Gerätekaltstart und vor jeder Messung nach einer Warmlaufphase von 15 bis 20 Minuten ausgeführt. Zusätzlich erfolgten regelmäßige Kalibrationen von Gas und Volumen. Die externe Qualitätsprüfung wurde im halbjährlichen Abstand durchgeführt. Die elektronischen Komponenten wurden automatisch geräteintern kontrolliert [26].

EKG und Monitoring

Während der Belastungsuntersuchung ist die kontinuierliche Aufzeichnung eines 12-Kanal-EKGs mit Standardextremitäten und Brustwandableitungen obligat [59].

Notfallausstattung

Defibrillator, Ausrüstung zur Intubation sowie zur Infusionstherapie, Notfallmedikamente, Vorkehrungen zur sofortigen O_2-Gabe, Telefon im Ergometrieraum [59].

Personelle Voraussetzungen

Die Verantwortung für die Belastungsuntersuchungen liegt bei einem Arzt mit umfangreichen Erfahrungen bei der Durchführung von Belastungsuntersuchungen sowie Kenntnissen der Leistungsphysiologie. Dieser ist verantwortlich für die apparative Ausstattung des Ergometrie-Labors sowie für die Schulung der Mitarbeiter. Bei allen Probanden war ein Arzt anwesend [17].

3.5 Ablauf der Untersuchung

Zuerst wurde eine ausführliche Anamnese erhoben und es erfolgte eine körperliche Untersuchung. Im Anschluss wurden die anthropometrischen Daten (Körpergröße und Gewicht) der Probanden erhoben. Vor der Fahrradergometrie erfolgte bei jedem Probanden eine Lungenfunktionsdiagnostik. Zur Vorbereitung der Fahrradergometrie wurden EKG-Elektroden zur Ableitung eines 12-Kanal-EKGs angebracht, entsprechend dem Oberarmdiameters der Probanden Blutdruckmanschetten befestigt und passende Atemmasken angelegt. Mit dieser Ausrüstung wurden vor der Belastungsuntersuchung die Daten und Parameter in Ruhe (Blutdruckmessung, und spiroergometrische Daten) erhoben. Dazu erfolgte eine kapilläre Blutgasanalyse mit Messung von pH, Laktat, Säure-Base-Status, Hb und Blutzucker. Die personellen und gerätetechnischen Voraussetzungen der Deutschen Gesellschaft für pädiatrische Kardiologie wurden erfüllt [17].

3.5.1 Einschlusskriterien

Angelehnt an Washington et al. mussten die Probanden folgende Voraussetzungen erfüllen [60]:

- allgemeine Erklärung des Testverfahrens der Eltern bzw. der Erziehungsberechtigten
- Einverständniserklärung der Eltern bzw. der Erziehungsberechtigten
- leichte Kost 1,5 Stunden vor der Untersuchung
- Infektfreiheit, sowie subjektives Wohlbefinden
- bequeme Kleidung und Schuhe, vorzugsweise flexible Sportschuhe

3.5.2 Ausschlusskriterien

Vor der Belastungsuntersuchung sollen absolute und relative Kontraindikationen ausgeschlossen werden, damit ein risikoarmer Untersuchungsablauf gewährleisten kann. Die nachstehenden Kontraindikationen sind angelehnt an Deutschen Gesellschaft der Kardiologie, Leitlinien zur Ergometrie [59]:

Absolute Kontraindikationen

- Akuter Myokardinfarkt
- Instabile Angina pektoris
- symptomatische Herzrhythmusstörungen und/oder eingeschränkter Hämodynamik
- Symptomatische schwere Aortenstenose
- Dekompensierte Herzinsuffizienz
- Akute Lungenembolie
- Akute Myokarditis
- Akute Perikarditis
- Akute Aortendissektion
- Relative Kontraindikationen
- Hauptstammstenose
- Klappenerkrankungen mäßigen Schweregrades
- Bekannte Elektrolytstörungen
- Arterielle Hypertonie (RR >200 mm Hg systolisch, >110 mm Hg diastolisch)
- Tachyarrhythmie oder Bradyarrhythmie
- Hypertrophe Kardiomyopathie und andere Formen der Ausflussbahnobstruktion
- Höhergradige AV-Blockierungen
- Physische und/oder psychische Beeinträchtigungen

3.6 Untersuchungsprotokoll

Bei dieser Arbeit wird ein Stufenprotokoll basierend auf den Vorarbeiten von Klemt und nach Entscheidung der DGPK ein gewichtsbezogenes Protokoll mit Belastungsstufen von 0,5 W/kg Körpergewicht (KG) und Steigerung der Belastung alle 2 Minuten verwendet. [17, 36]

- Aufwärmphase: 2 min im Leerlauf
- Belastungsphase: Beginn mit 0,5 W/kgKG, Steigerung alle 2 min um 0,5 W/kgKG
- Erholungsphase: 2 min im Leerlauf

Während aller Phasen sollte eine gleichmäßige Trittfrequenz von ca. 50-60/min eingehalten werden. Dieses Protokoll hat den Vorteil, dass insbesondere kleinere Kinder sowie Patienten mit eingeschränkter Belastungsfähigkeit mehrere Belastungsstufen erreichen [17].

3.7 Ausbelastungskriterien

Wesentliche Kriterien der Ausbelastung sind maximal erreichte Leistung, maximale Herzfrequenz (HF_{max}), maximaler Laktatwert, maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}_{O2max}$), respiratorischer Quotient und Atemäquivalent. Die Ausbelastungskriterien sind altersabhängig und bei über 65-Jährigen niedriger anzusetzen. Erst wenn mindestens einer der Anhaltswerte überschritten wird, kann von einer Ausbelastung gesprochen werden. Der gesunde Proband kann und sollte sich nach Erreichen dieser Anhaltswerte weiter bis zur Erschöpfung ausbelasten [9, 61, 62, 63, 64].

3.8 Abbruchkriterien der Ergometrie

Folgende Kriterien werden als absolute Abbruchkriterien bewertet, die zum sofortigen Abbruch der Untersuchung führen sollen [7, 65, 66, 67]:

- kardiale Ischämiezeichen (ST-Strecken-Senkung ≥ 3 mm, ST-Strecken Hebung ≥ 1 mm)
- anhaltende ventrikuläre Tachykardie >30 s
- subjektive Beschwerden (Schwindel, Dyspnoe)
- subjektive Erschöpfung des Patienten
- Technische Probleme mit Versagen der Überwachungsgeräte (defekte EKG-Registrierung, Monitorausfall)
- Blutdruckabfall >10 mm Hg (Vergleich zum Ausgangsblutdruck) mit Zeichen einer myokardialen Ischämie (Angina Pektoris, ST-Senkung)

Darüber hinaus wurden folgende Kriterien als relative Abbruchkriterien bewertet [7, 65, 66, 67]:

- Hypertensive Fehlregulation (RRsyst 230-260 mm Hg, RRdiast ≥ 115 mm Hg)
- Blutdruckabfall > 10 mm Hg (Vergleich zum Ausgangswert) ohne Zeichen einer myokardialen Ischämie (keine Angina pectoris, keine ST-Senkung)
- Zyanose
- Bradyarrhythmien
- Supraventrikuläre Tachykardien
- Auftreten von Überleitungsstörungen (höhergradiger AV-Block, Schenkelblock)
- zunehmende Angina pectoris Symptomatik

3.9 Datenverarbeitung und statistische Verfahren

Die Erfassung der anthropometrischen Daten und die Eingabe der Werte der Blutgasanalyse, des Laktats und des Blutdrucks erfolgten manuell. Dabei wurden die Daten einer pseudonymisierten Probandennummer zugeordnet. Die spiroergometrisch erhobenen Daten wurden vor, während und nach der Untersuchung automatisch durch die eigene Software der Firma ZAN (GPI 2000) computertechnisch erfasst. Im Anschluss an die Untersuchung erfolgte die Übertragung der Analyseergebnisse zur Weiterverarbeitung in eine Datenbank. Die anschließenden Berechnungen und Auswertungen der Rohdaten erfolgte mithilfe des Microsoftprogramms Excel 2000. Nach Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen erfolgte die weitere statistische Verarbeitung mithilfe des Instituts für Biometrie und Medizinische Informatik der Universität Magdeburg. Anhand der statistischen Berechnungen wurden geschlechtsspezifische Perzentilenkurven erstellt, basierend auf der von Cole und Green beschriebenen LMS Methode [68]. Die beobachteten Werte wurden einem Glättungsverfahren unterworfen, um Zufallsschwankungen in den Perzentilen auszugleichen und diese als glatte Funktion des Alters darstellen zu können. Alle Kurven wurden nach Geschlecht getrennt erstellt. Die LMS-Methode beschreibt die Verteilung eines Messwertes durch seinen Median (M), seinen Korrelationskoeffizienten (S) sowie ein Maß für die Abweichung (L). L-, M- und S-Wert sind abhängig vom Alter und für diese 3 Parameter wird ein stetiger und glatter Funktionsverlauf in Abhängigkeit zum Alter angenommen. Zur Schätzung des Verlaufes wird ein penalisierter Likelihood-Ansatz verwendet. Die LMS-Methode nach Cole und Green ermöglicht auch bei nicht normal verteilten die Berechnung von Standard Deviation Scores (SDS) [46, 69]. SDS-Werte geben an, um ein wie viel Faches einer Standardabweichung ein individueller Parameter ober- oder unterhalb des Medianwertes liegt.

Würde man einfach die beobachteten Perzentile pro Altersjahrgang tabellieren, wären die interessierenden Perzentile am unteren bzw. oberen Rand des Wertebereichs immer noch großen zufälligen Schwankungen unterworfen. Andererseits dürfen die Modellannahmen nicht zu restriktiv sein, um die beobachteten Daten gut abzubilden. Dies leistet die LMS-Methode. Sie ist einerseits flexibel, enthält aber andererseits einfachere Verfahren als Spezialfall, so etwa den Fall, dass die Daten in allen Altersgruppen einer Normalverteilung mit konstanter Standardabweichung folgen und nur der Mittelwert sich im Altersverlauf verändert [70]. Aus diesem Grund ist die LMS-Methode in der Pädiatrie ein häufig angewandtes biometrisches Verfahren zur Darstellung von Perzentilen.

3.9.1 Ermittlung der statischen Signifikanz

Für den statistischen Mittelwertvergleich zwischen Laufband- und Fahrradergometrie wurde der zweiseitige t-Test für unabhängige Stichproben verwendet. Die p-Werte sind in der Tabelle A13 detailliert aufgeführt. Anhand der statistischen Berechnungen wurden geschlechtsspezifische Perzentilenkurven erstellt, sodass die geglätteten Perzentilenkurven getrennt nach dem Geschlecht dargestellt sind. Aufgrund dessen verzichten wir in unserer Studie darauf, die statistische Signifikanz zwischen männlichen und weiblichen Probanden zu berechnen. Stattdessen berechnen wir in unserer Studie die statistische Signifikanz zwischen Fahrradergometer und Laufbandergometer.

4 Ergebnisse

4.1 Sauerstoffpuls

In den unten aufgeführten Grafiken werden die erhobenen Werte des Sauerstoffpulses in Ruhe, an der ventilatorisch bestimmten Schwelle und bei Ausbelastung dargestellt. Den Perzentilen für Frauen und Männer werden einzeln abgebildet.

4.1.1 Sauerstoffpuls in Ruhe

Die niedrigsten Werte lassen sich bei weiblichen Probanden mit 5 Jahren finden (w: 1,91 ml/beat). Im 50. Perzentil zeigen 5-jährige Mädchen einen niedrigeren Sauerstoffpuls als Jungen (w: 1,91 ml/beat, m: 2,37 ml/beat). Für beide Geschlechter zeigt sich eine Zunahme des Sauerstoffpulses vom Kindes- bis zum jungen Erwachsenenalter. Bei weiblichen Probanden im mittleren Lebensabschnitt (zwischen 35 und 45 Jahre) gehen die Werte des Sauerstoffpulses in eine Plateauphase über. Mit Ende 40 Jahren steigen die Sauerstoffpulswerte im 50. Perzentil bei weiblichen Probanden wieder langsam an, der höchste Wert wird in einem Lebensalter von 60 Jahren erreicht.

Bei weiblichen Probanden wird der höchste Wert (5,59 ml/beat) im 60. Lebensalter erreicht. Im letzten Lebensabschnitt (ab dem Alter von 60 Jahren) ist bei weiblichen Probanden ein Abfall des Sauerstoffpulses nachweisbar. Ebenfalls und erwartungsgemäß lassen sich die niedrigsten Werte bei männlichen Probanden im Vorschulalter finden (5-jährige P50 m: 2,37 ml/beat). Bei männlichen Probanden steigen die Werte des Sauerstoffpulses bis zum mittleren Lebensabschnitt sehr steil an, dabei wird der höchste Wert mit 42 Jahren erreicht (42-jährige P50 m: 7,45 ml/beat), anschließend erfolgt ein Abfall bis ins hohe Lebensalter.

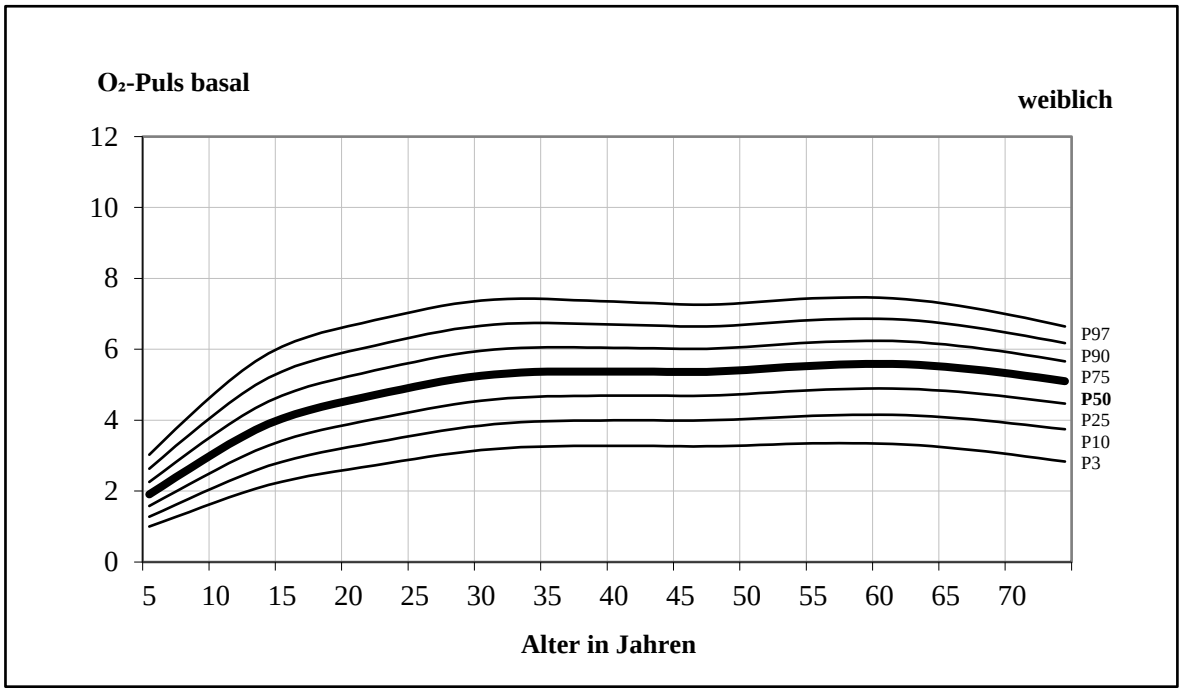

Abbildung 4.1 Perzentile O_2-Puls in Ruhe weiblich

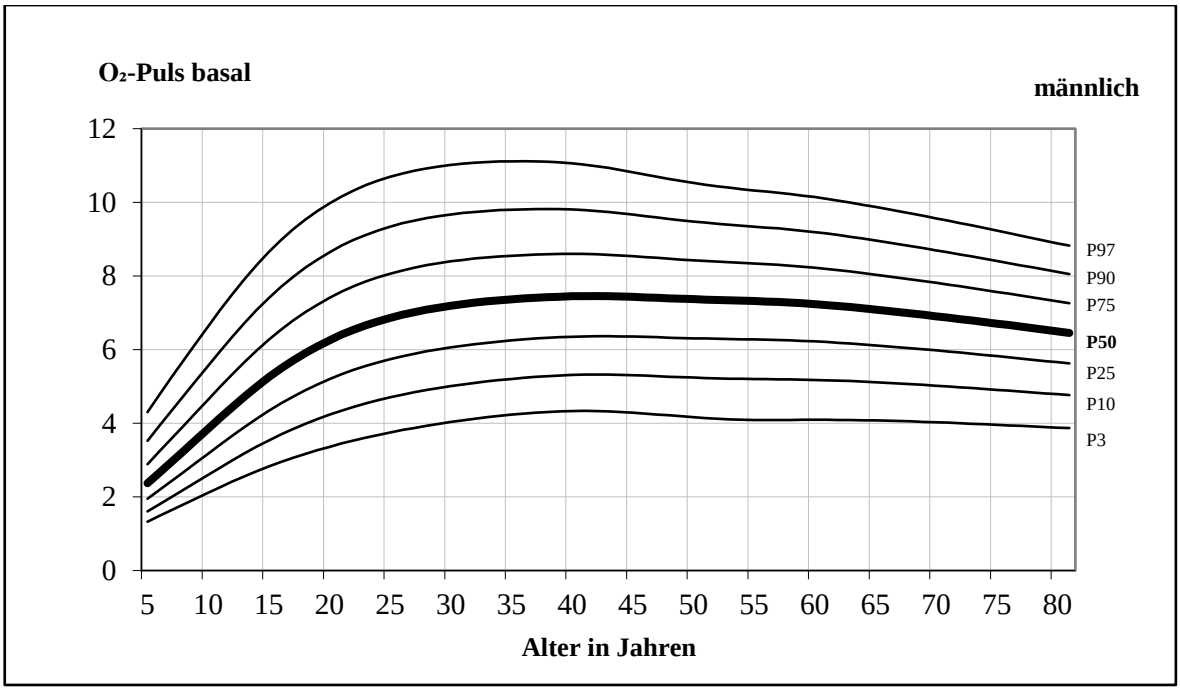

Abbildung 4.2 Perzentile O_2-Puls in Ruhe männlich

4.1.2 Sauerstoffpuls an der ventilatorisch bestimmten Schwelle

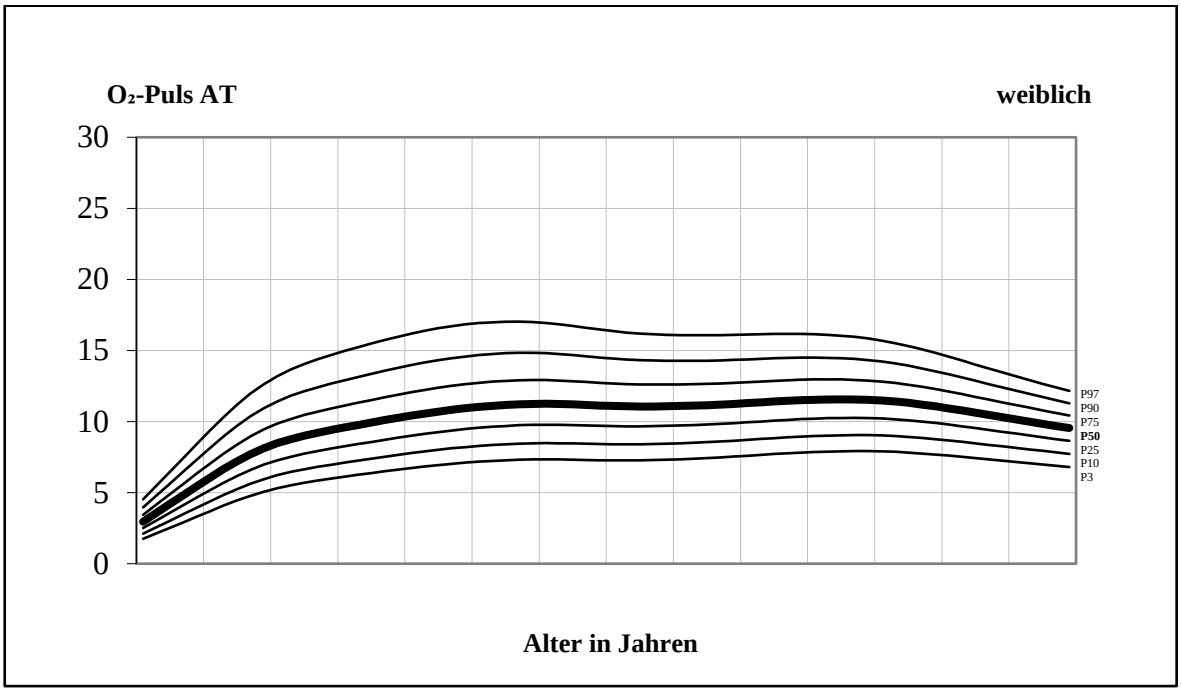

Abbildung 4.3 Perzentile O_2-Puls an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, weiblich

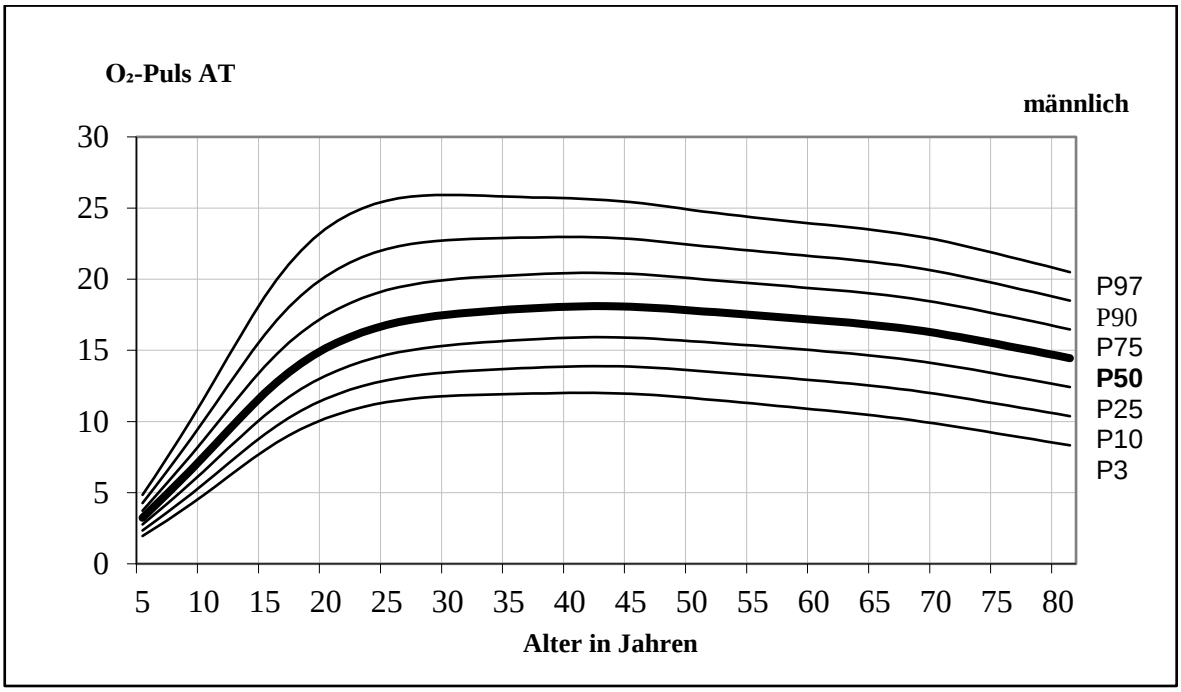

Abbildung 4.4 Perzentile O_2-Puls an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, männlich

Die niedrigsten Sauerstoffpulswerte im 50. Perzentil finden sich bei beiden Geschlechtern im Kindesalter. Bei den 5-Jährigen lässt sich ein Sauerstoffpuls Unterschied nachweisen, dabei liegt der Median der Jungen höher als der Median der Mädchen (w: 2,96 ml/beat, m: 3,23 ml/beat). Bei beiden Geschlechtern im Kindes- sowie im Jugendalter lässt sich ein linearer Anstieg des Sauerstoffpulswertes im 50. Perzentil erkennen. Dieser geht ab der Pubertät in einen kurvenförmigen Verlauf über. Bei weiblichen Probanden findet sich der erste Sauerstoffpuls Abfall in einem Alter von 36 Jahren. Der höchste Wert im 50. Perzentil wird mit 57 Jahren erreicht (w: 11,56 ml/beat). Bei männlichen Probenden steigt der Sauerstoffpulswert bis er den höchsten Wert im Alter von 42 bzw.43 erreicht (m: 42,43 J. 18,11 ml/beat). Anschließend beginnt ein linearer Abfall des Sauerstoffpulses, hierbei erreichen die weiblichen Probenden mit 74 Jahren etwa den gleichen Wert, wie im Alter von 20 Jahren (w: 20 J. 9,58 ml/beat, w: 74 J. 9,54 ml/beat).

4.1.3 Sauerstoffpuls bei Ausbelastung

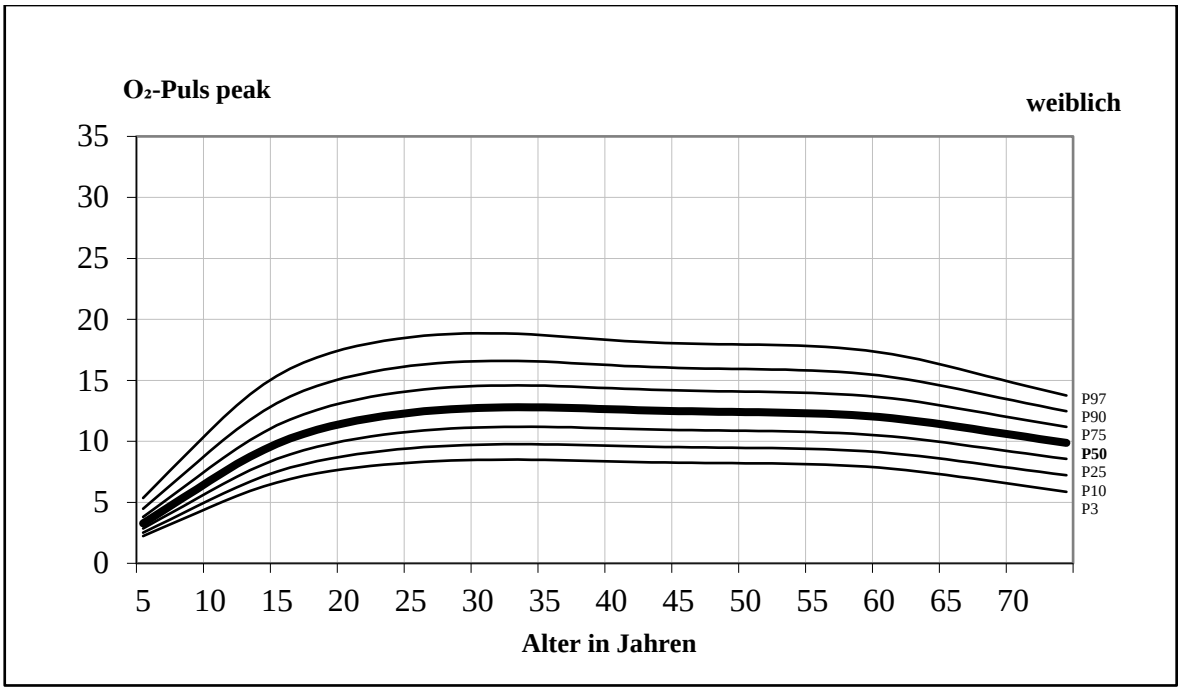

Abbildung 4.5 Perzentile O_2-Puls bei Ausbelastung weiblich

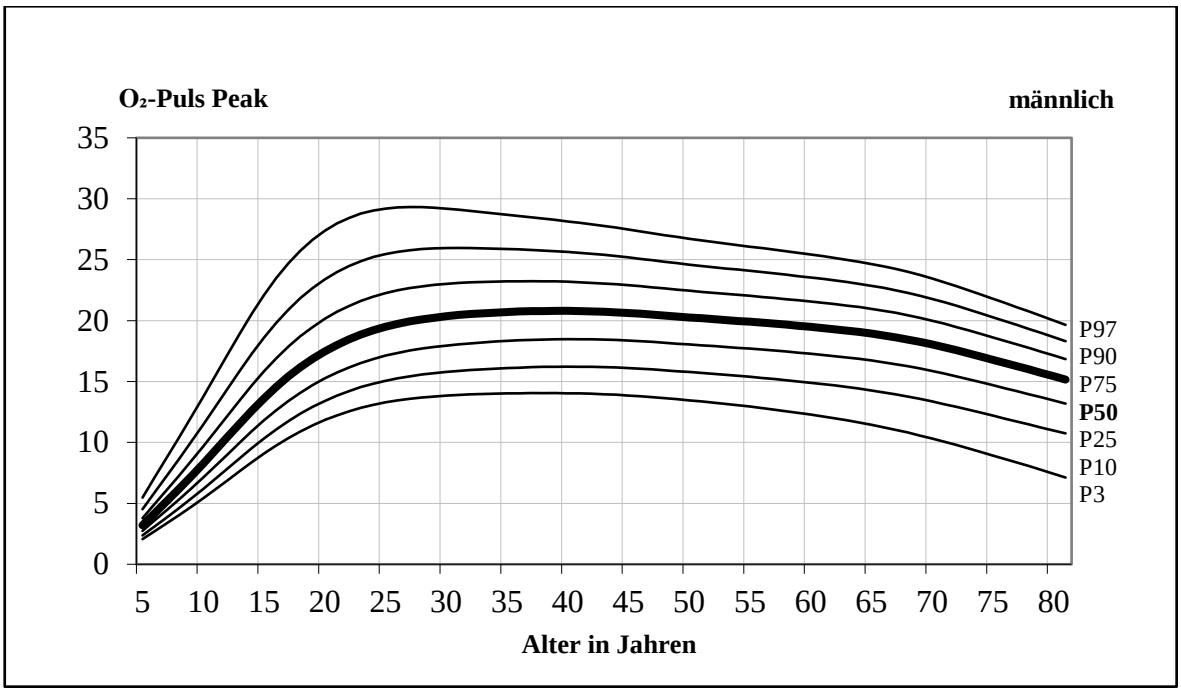

Abbildung 4.6 Perzentile O_2-Puls bei Ausbelastung männlich

Bei den männlichen Probanden nimmt der Wert des 50. Perzentils vom Kindesalter bis zum jungen Erwachsenenalter stetig zu, dabei handelt es sich um einen linearen Verlauf. Dieser geht anschließend in einen kurvenförmigen Verlauf über, welcher im mittleren Erwachsenenalter in eine Plateauphase übergeht. Der Höchstwert wird mit 39 Jahren erreicht (m: 39 J. 20,8 ml/beat).

Nach dem Erreichen des maximalen Wertes sinkt der Sauerstoffpulswert sowohl bei den weiblichen Probanden als auch bei den männlichen Probanden ab. Beim Vergleich der Sauerstoffpulswerte des 50. Perzentils von den weiblichen sowie den männlichen Probanden, erreichen die weiblichen Probanden das Maximum sechs Jahre früher (w: 33 J. 12,8 ml/beat m: 39 J. 20,80 ml/beat). Des Weiteren nimmt ab dem Kindesalter die Differenz zwischen dem weiblichen und männlichen Sauerstoffpulswert stark zu. Im mittleren Erwachsenenalter erreicht die Differenz ihren größten Wert. Ab dem 40. Lebensjahr nimmt der Unterschied zwischen den weiblichen und männlichen Werten kontinuierlich ab (40 J. w: 12,63 ml/beat, m: 20,8 ml/beat; 74 J. w: 9,88 ml/beat, m: 17,06 ml/beat).

4.2 Herzfrequenz

In den unten geführten Graphiken werden die aufgehobene Werte der Herzfrequenz in Ruhe, an der ventilatorisch bestimmten Schwelle und bei Belastung dargestellt. Die Perzentile für Frauen und Männer werden einzeln abgebildet.

4.2.1 Herzfrequenz in Ruhe

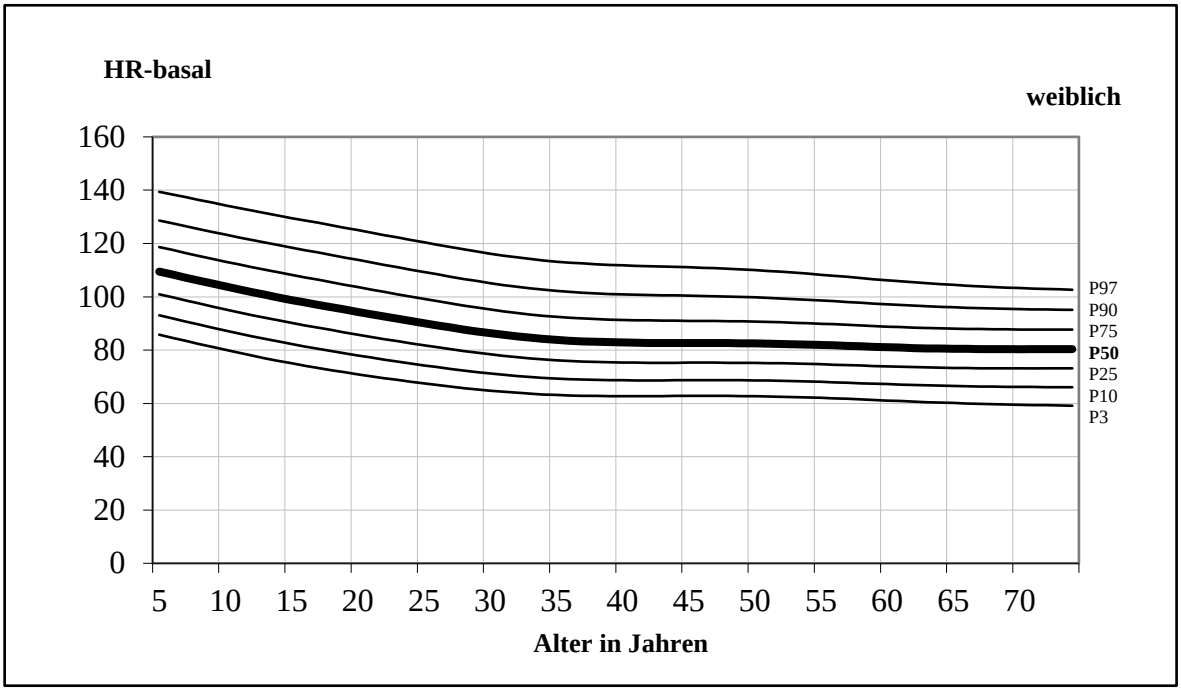

Abbildung 4.7 Perzentile Herzfrequenz in Ruhe, weiblich

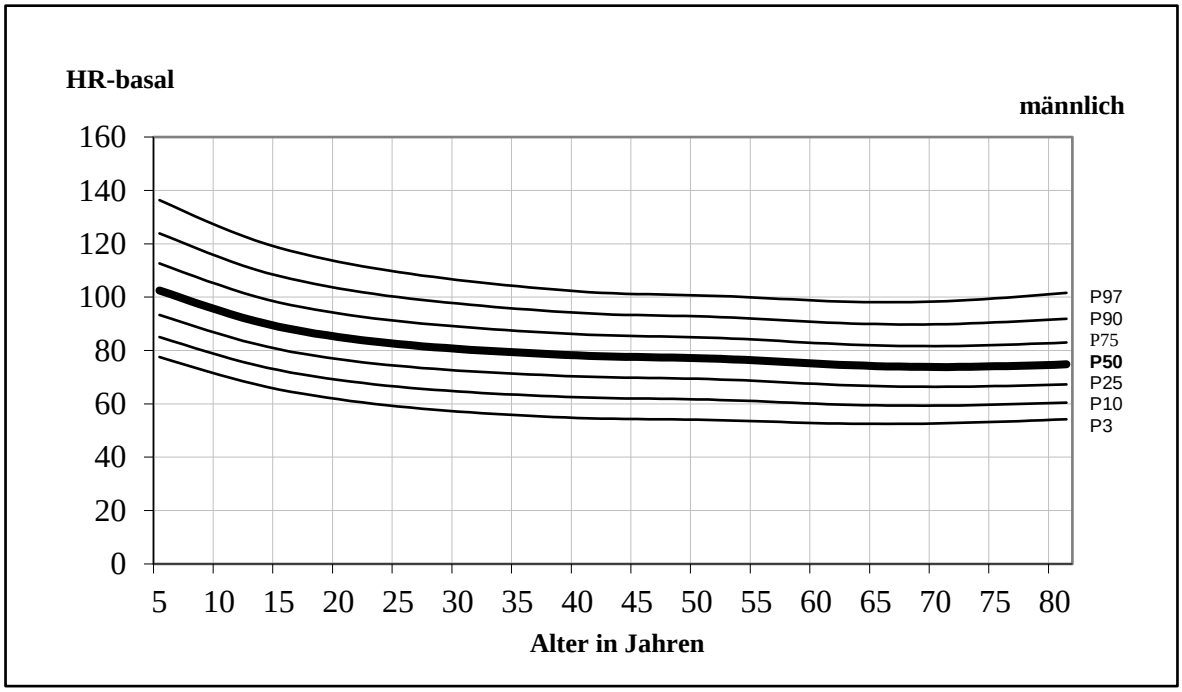

Abbildung 4.8 Perzentile Herzfrequenz in Ruhe, männlich

Je geringer das Herzvolumen, desto weniger Blut wird pro Herzschlag durch den Körper gepumpt. Aufgrund des kleineren Herzvolumens bei Frauen muss das weibliche Herz den gleichen Sauerstoffbedarf durch einen schnelleren Herzschlag ausgleichen [33,71]. Aus diesem Grund weisen Frauen lebenslang höhere Herzfrequenzwerte als Männer auf. Die höchsten Herzfrequenzwerte im 50. Perzentil finden sich bei beiden Geschlechtern im Kindesalter (w: 5 J. 109,44/min, m: 5 J. 102,49/min). Bei beiden Geschlechtern fällt der 50. Perzentil linear vom Kindes- bis zum Jugendalter ab. Anschließend nimmt der Wert einen kurvenförmigen Verlauf ein, bis die Herzfrequenz den niedrigsten 50. Perzentil Wert erreicht. Dieser wird mit einem Alter von 70 Jahren durch beide Geschlechter erreicht (70 J. w: 80,31 m: 73,81/min). Nachdem die Herzfrequenz den kleinsten 50. Perzentil erreicht hat, steigt der Wert wieder leicht an. Der nachweisbare Genderunterschied zwischen den beiden Kurvenverläufen, bleibt vom Kindesalter bis zum hohen Erwachsenenalter konstant.

4.2.2 Herzfrequenz an der ventilatorisch bestimmten Schwelle

Sowohl bei den weiblichen als auch bei den männlichen Probanden ist der höchste Herzfrequenzwert des 50. Perzentils im Kindesalter zu finden. (5 J. w: 167,31 m: 160,37). Die Herzfrequenzwerte des 50. Perzentils der weiblichen sowie der männlichen Probanden an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, zeigen ähnliche Verläufe. Bei den weiblichen Probanden zeigt sich ein stetiger Abfall des 50. Perzentils im gesamten betrachteten Zeitraum. Bei den männlichen Probanden zeigt sich ebenfalls ein stetiger Abfall des Wertes, jedoch nach dem Erreichen des Minimums steigt der Herzfrequenzwert des 50. Perzentils wieder an. Die Abnahme der Herzfrequenz im Alter bei beiden Geschlechtern ist auf die Ökonomisierung zurückzuführen. Bei den weiblichen Probanden stellt sich bis zum 60. Lebensjahr ein Abfall der Herzfrequenzwerte des 50. Perzentils dar. Nach Überschreiten dieses Alters geht dieser in einen kurvenförmigen Verlauf über. Der niedrigste Wert wird in einem Alter von 74 Jahren erreicht (74 J. W: 124,18). Analog zu den weiblichen Probenden ist auch bei den männlichen Probanden ein Abfall der Herzfrequenzwerte des 50. Perzentils zu erkennen, welcher anschließend in einen kurvenförmigen Verlauf übergeht. Der niedrigste Wert wird im Alter von 70 Jahren erreicht (70 J. m: 123,75). Die Kurvenverläufe der weiblichen und der männlichen Probanden kreuzen sich in einem Alter von 74 Jahren (74 J. w: 124,18 m: 124,09). Dabei fällt die Kurve der weiblichen Probanden, wobei die Kurve der männlichen Probanden

steigt. Des Weiteren weisen die männlichen Probanden in der Standardabweichung im zunehmenden Altersverlauf eine höhere Intervallbreite auf.

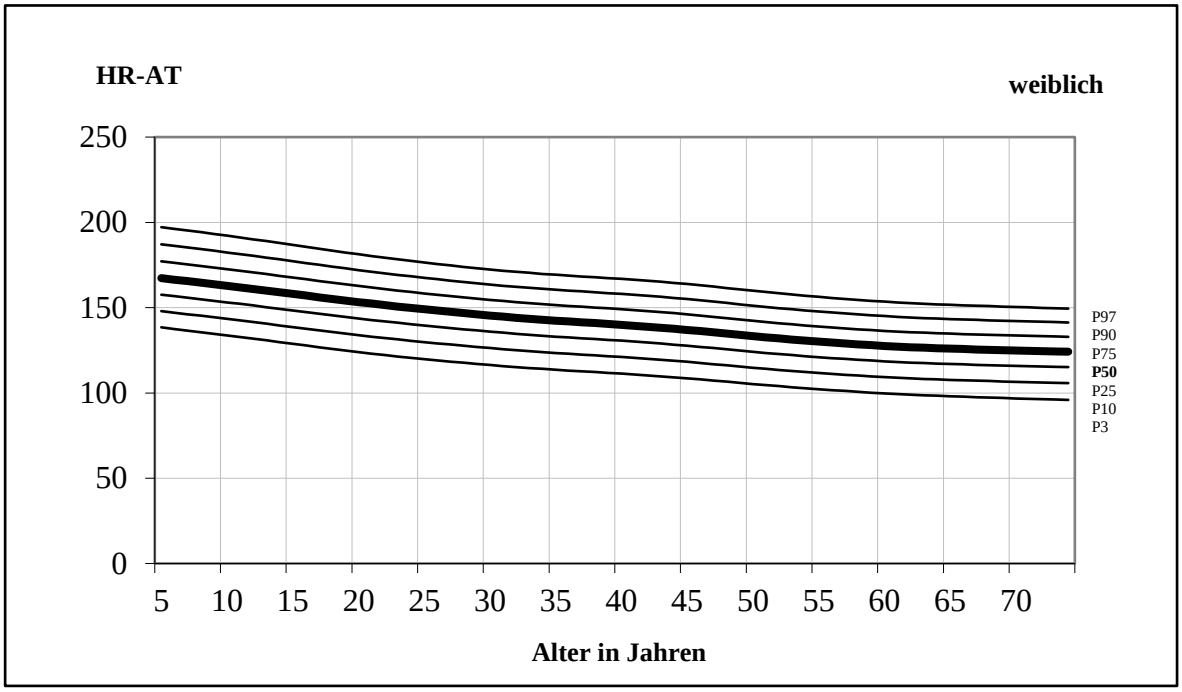

Abbildung 4.9 Perzentile Herzfrequenz an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, weiblich

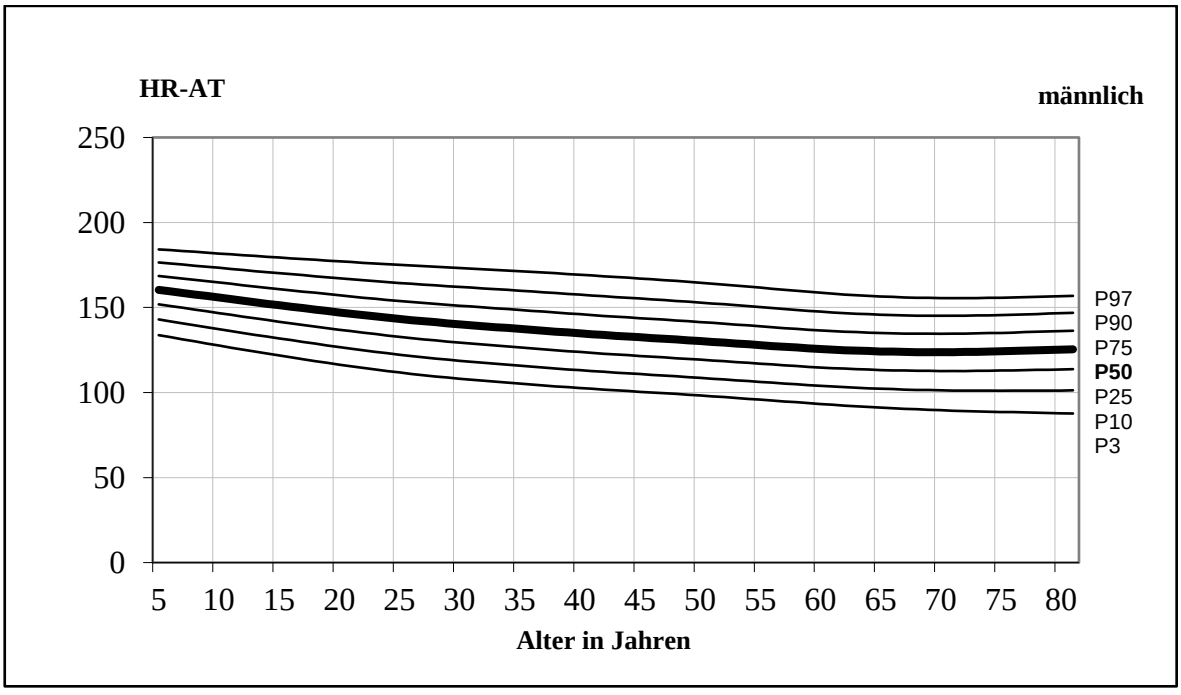

Abbildung 4.10 Perzentile Herzfrequenz an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, männlich

4.2.3 Herzfrequenz bei Ausbelastung

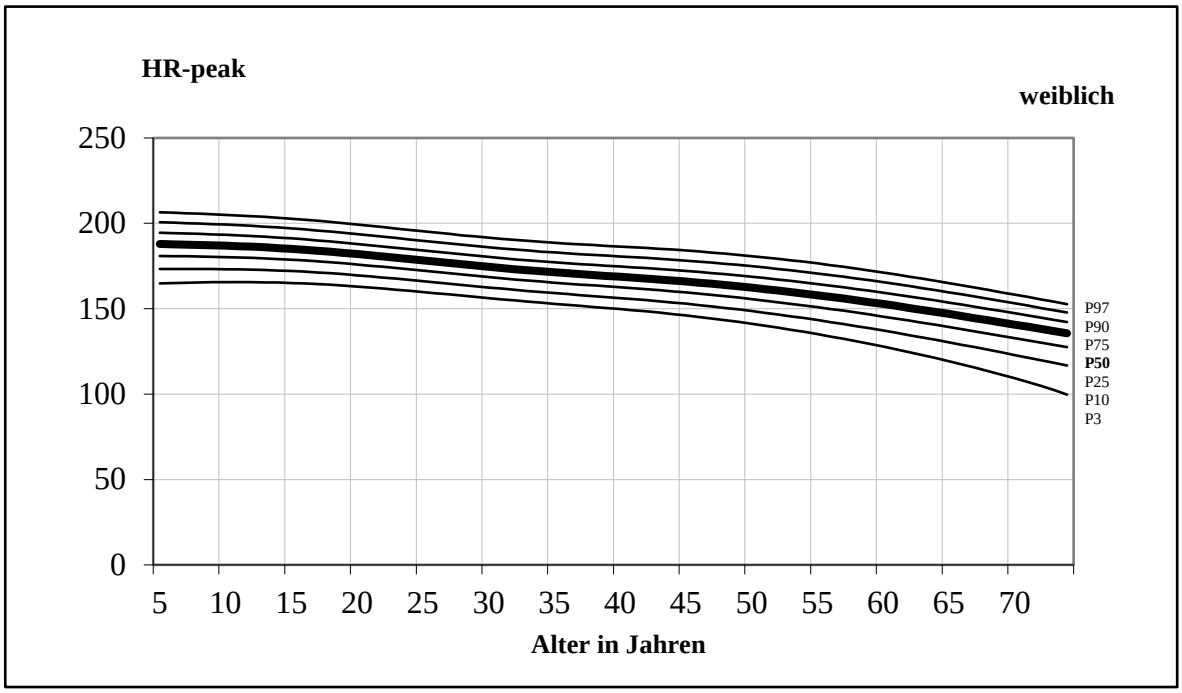

Abbildung 4.11 Perzentile Herzfrequenz bei Ausbelastung, weiblich

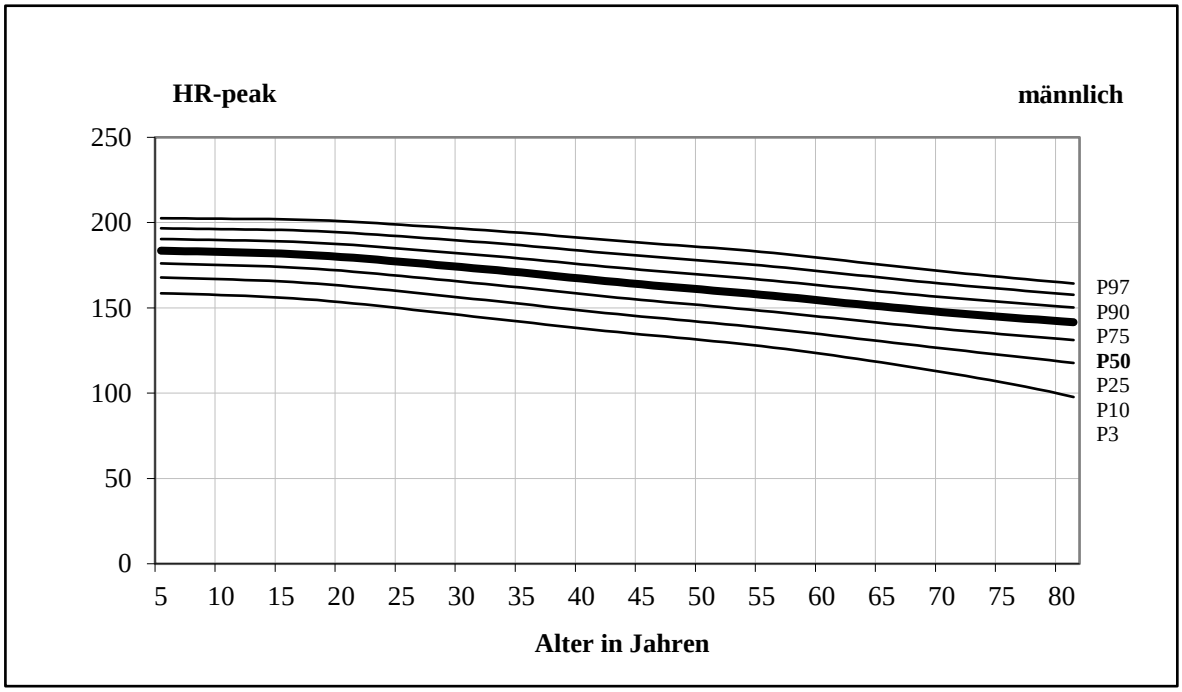

Abbildung 4.12 Perzentile Herzfrequenz bei Ausbelastung, männlich

Die höchsten Werte im 50. Perzentil befinden sich in der jeweils jüngsten Probandengruppe (5-jährige P50 w: 187,93 /min m: 183,55 /min). Im Vorschulalter liegt der Median der männlichen Probanden etwa bei 4-5 Herzschlägen über dem Median der weiblichen Probanden. Mit steigendem Alter wird der Unterschied größer und im höheren Erwachsenenalter liegt der Median der männlichen Probanden bei 7-8 Herzschlägen über dem der weiblichen Probanden. Die Perzentile unter maximaler Ausbelastung zeigen bei beiden Geschlechtern einen annähernd gleichen Kurvenverlauf mit einer kontinuierlichen Herzfrequenzabnahme im gesamten Altersverlauf bei Frauen von 5 bis 74 Jahren und bei Männern von 5 bis 81 Jahren.

4.3 Vergleich der Ergebnisse für Sauerstoffpuls und Herzfrequenz zwischen dem Fahrrad- und Laufbandergometer

Wir vergleichen die mittleren Kurven (50. Perzentil) der kardiozirkulatorischen Parameter zwischen dem Fahrrad- und dem Laufbandergometer. Die basalen Werte sind erwartungsgemäß von der Methodik der Belastung unabhängig.

4.3.1 Sauerstoffpuls

4.3.1.1 Sauerstoffpuls an der VAT

Im Vergleich zu Radergometrie war der Sauerstoffpuls an der ventilatorischen Schwelle auf dem Laufbandergometer, bei den weiblichen Probanden, signifikant höher ($p < 0.001$). Es zeigte sich ein Unterschied für den Mittelwert des Sauerstoffpulses von ca. 1 ml/Herzschlag zugunsten des Laufbandes. Die P50-Werte des Sauerstoffpulses an der ventilatorischen Schwelle unterscheiden sich beim männlichen Geschlecht nicht signifikant voneinander ($p = 0{,}552$). Auch die Kurven der P3-Werte präsentieren sich sehr ähnlich und weichen kaum voneinander ab.

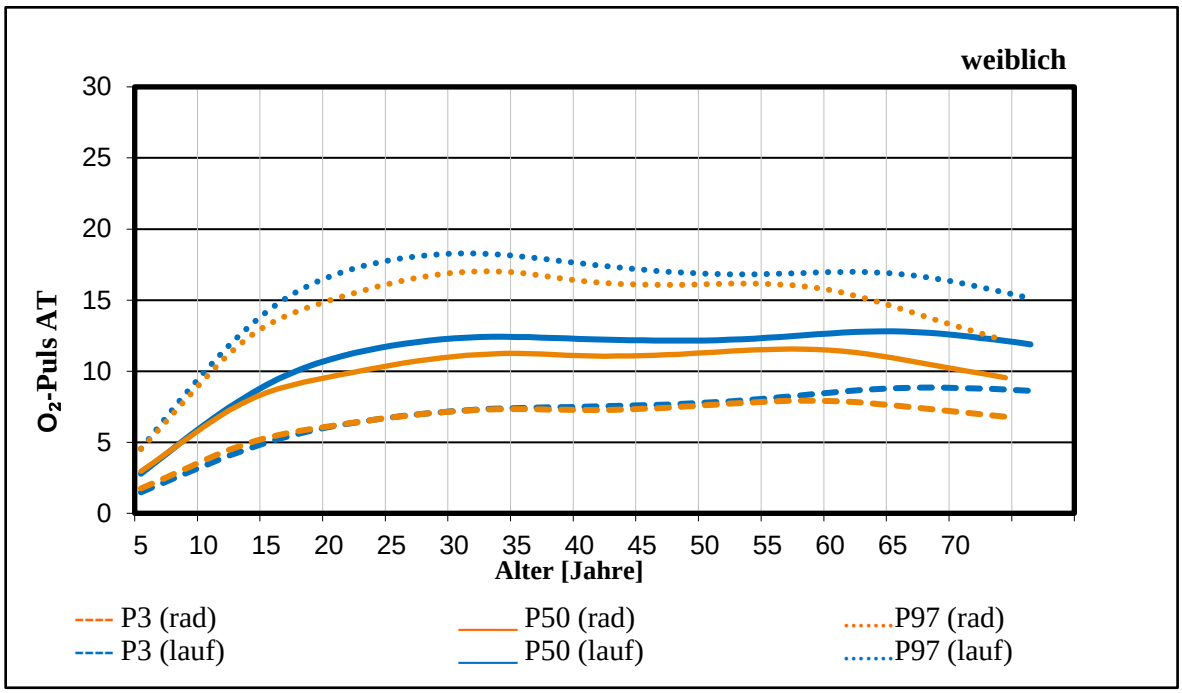

Abbildung 4.13 Vergleich O_2-Puls an der VAT, weiblich

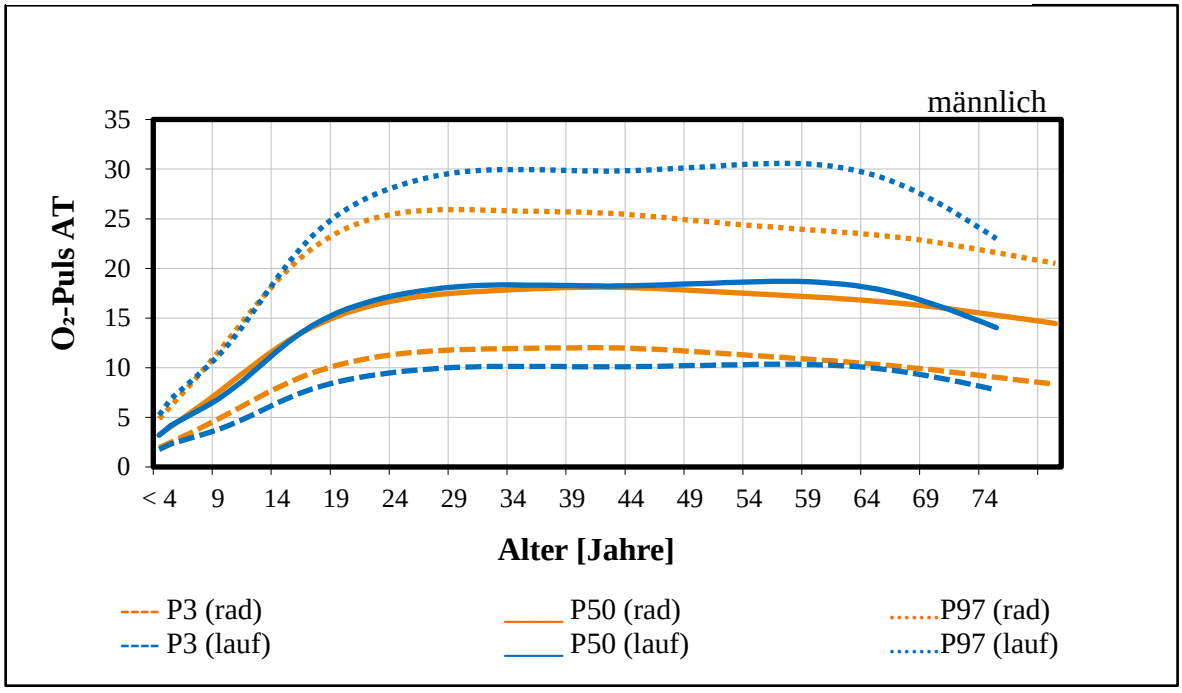

Abbildung 4.14 Vergleich O_2-Puls an der VAT, männlich

4.3.1.2 Sauerstoffpuls bei Ausbelastung

Bei den weiblichen Probanden unterscheidet sich der Mittelwert des Sauerstoffpulses bei Ausbelastung signifikant zwischen Fahrrad- und Laufbandergometer: Das

Signifikanzniveau beträgt p = 0,002. Der Mittelwert des Sauerstoffpulses der Laufbandergometrie für die weiblichen Probanden liegt ca. 0,9 ml/Herzschlag über dem des Fahrrads. Bei den männlichen Probanden konnte jedoch kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden. Die dargestellten Perzentilen P3 und P50 präsentieren beim männlichen Geschlecht einen sehr ähnlichen Verlauf.

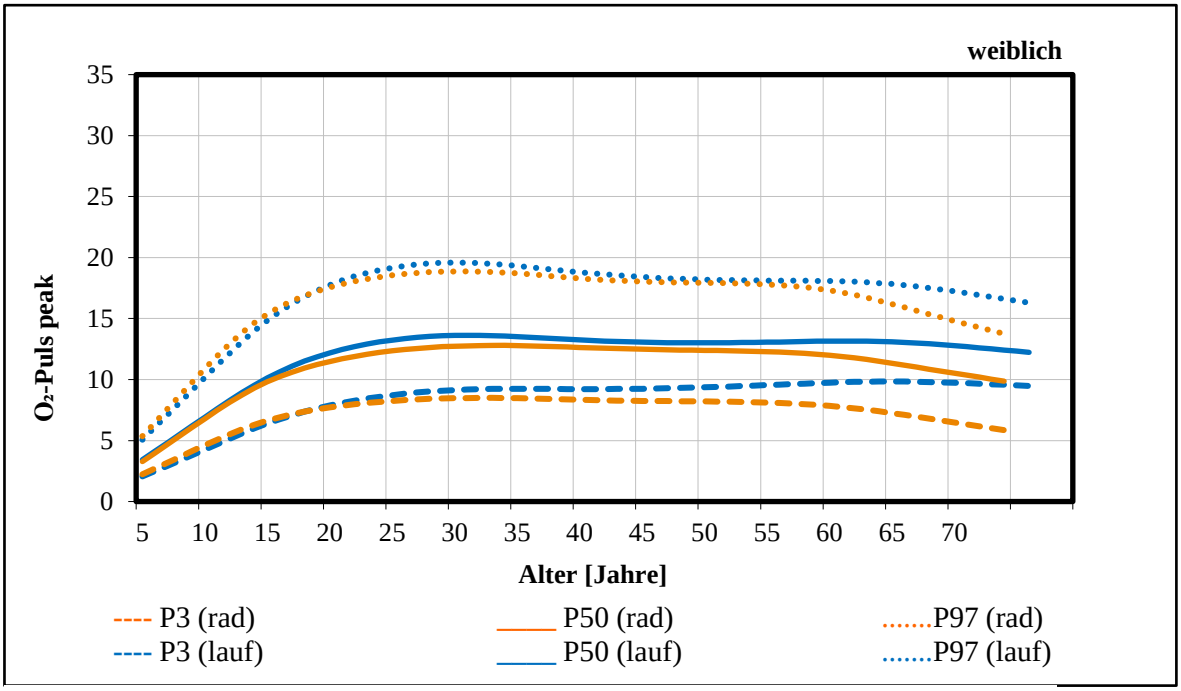

Abbildung 4.15 Vergleich O_2-Puls bei Ausbelastung, weiblich

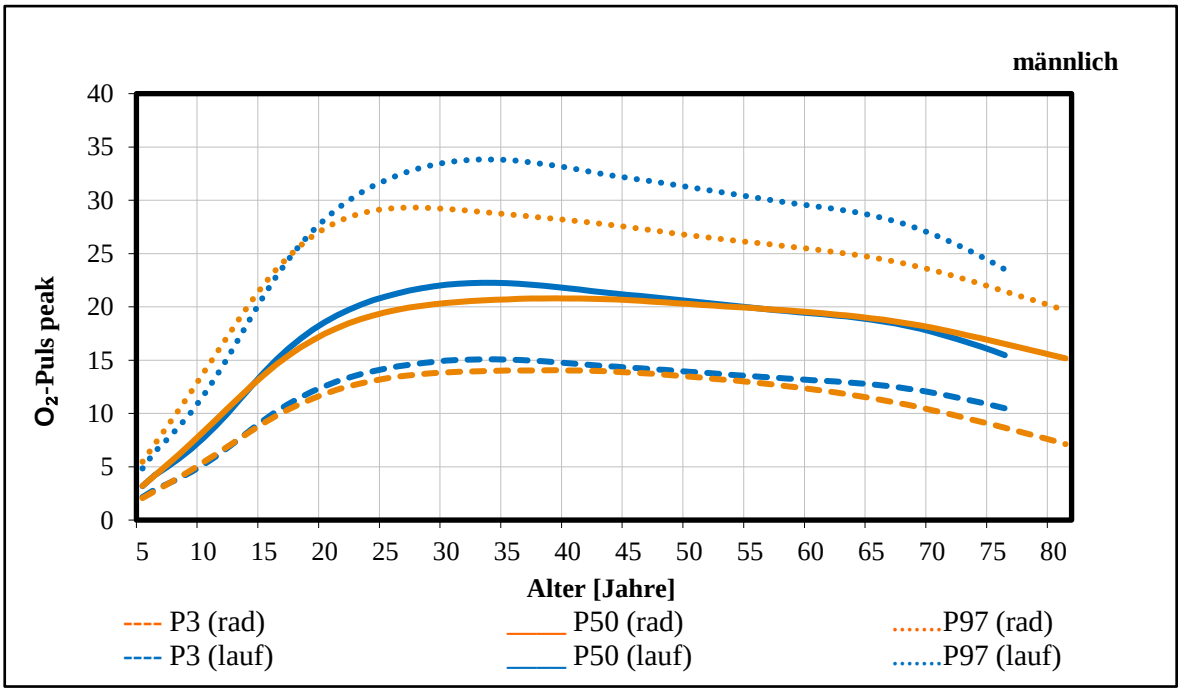

Abbildung 4.16 Vergleich O_2-Puls bei Ausbelastung, männlich

4.3.2 Herzfrequenz

4.3.2.1 Herzfrequenz an der VAT

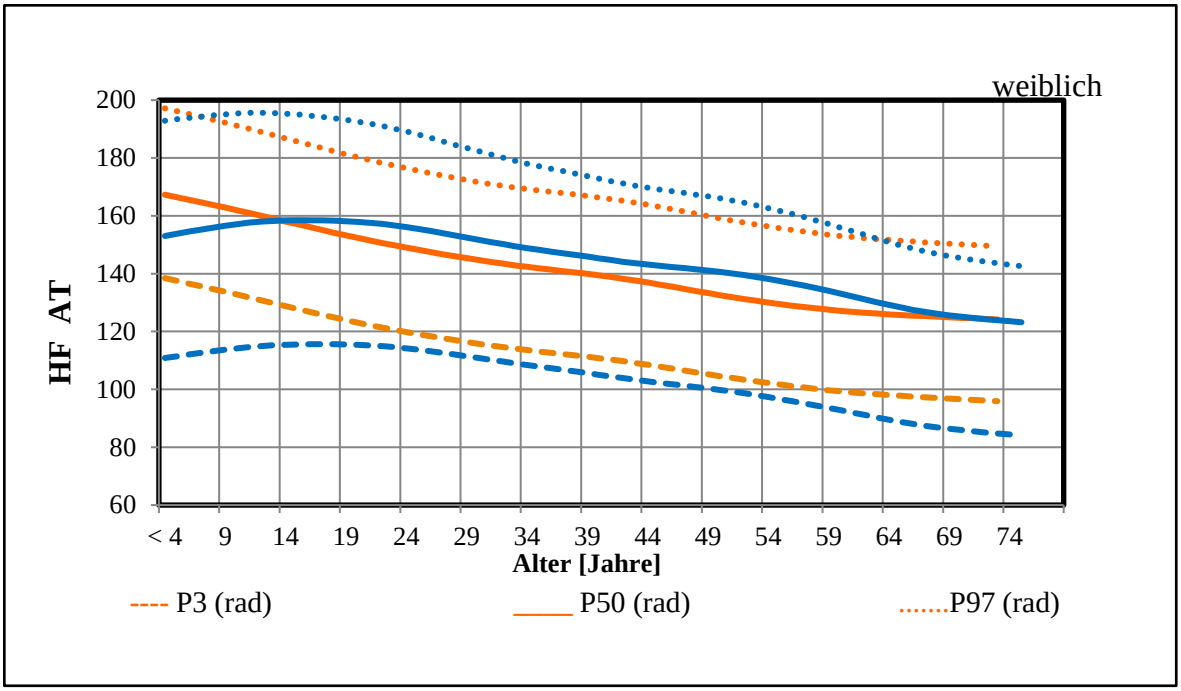

Abbildung 4.17 Vergleich HF an der VAT, weiblich

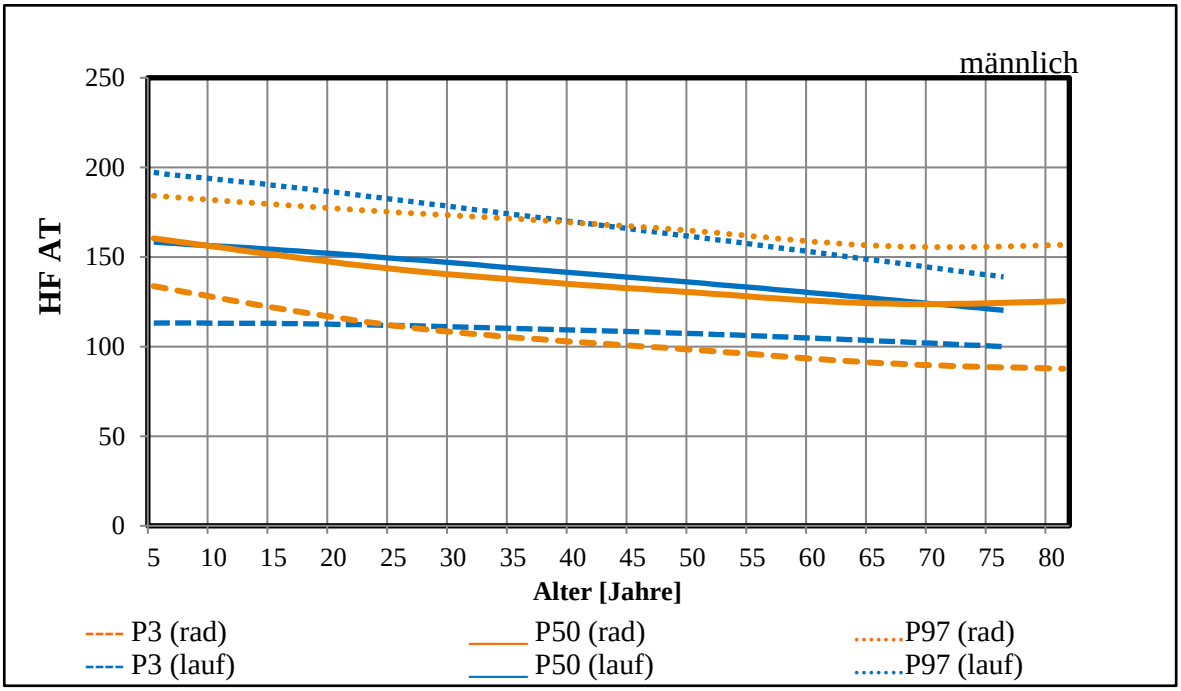

Abbildung 4.18 Vergleich HF an der VAT, männlich

Für beide Geschlechter unterscheidet sich der Mittelwert der Herzfrequenz an der ventilatorischen Schwelle nicht signifikant zwischen Fahrrad- und Laufbandergometer. (p_w = 0,152;

$p_m = 0{,}071$). Vor allem im Alter zwischen 25 und 55 Jahren weisen beide Graphen eine hohe Übereinstimmung auf.

4.3.2.2 Herzfrequenz bei Ausbelastung

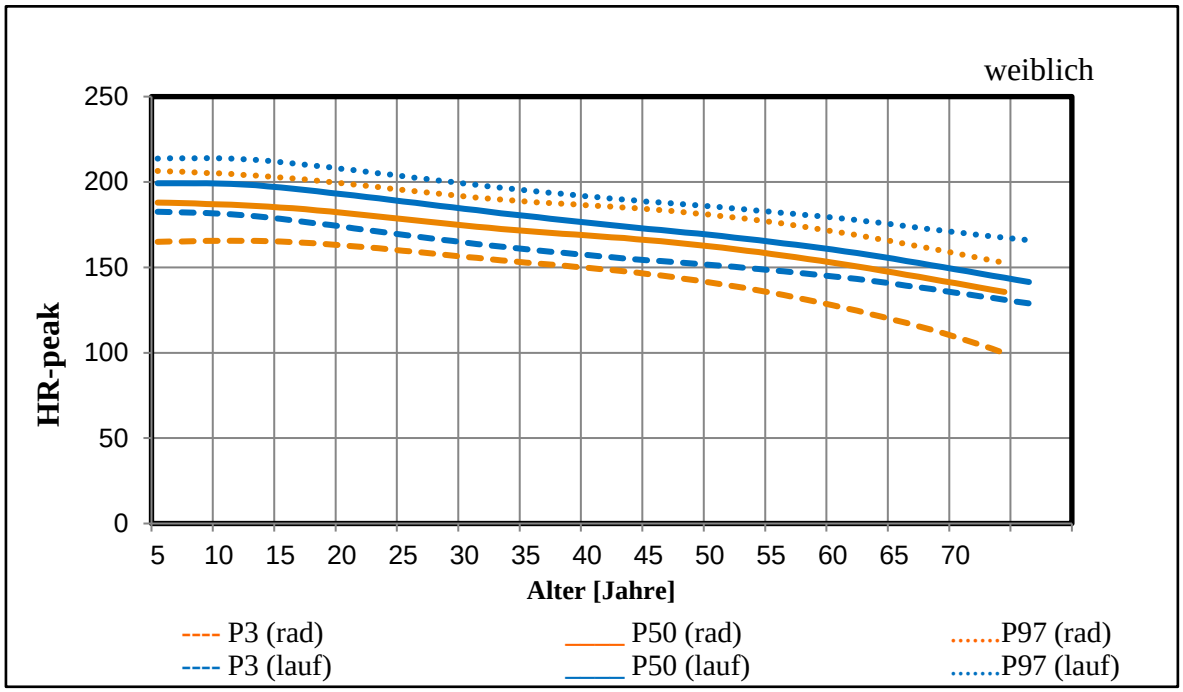

Abbildung 4.19 Vergleich HF bei Ausbelastung, weiblich

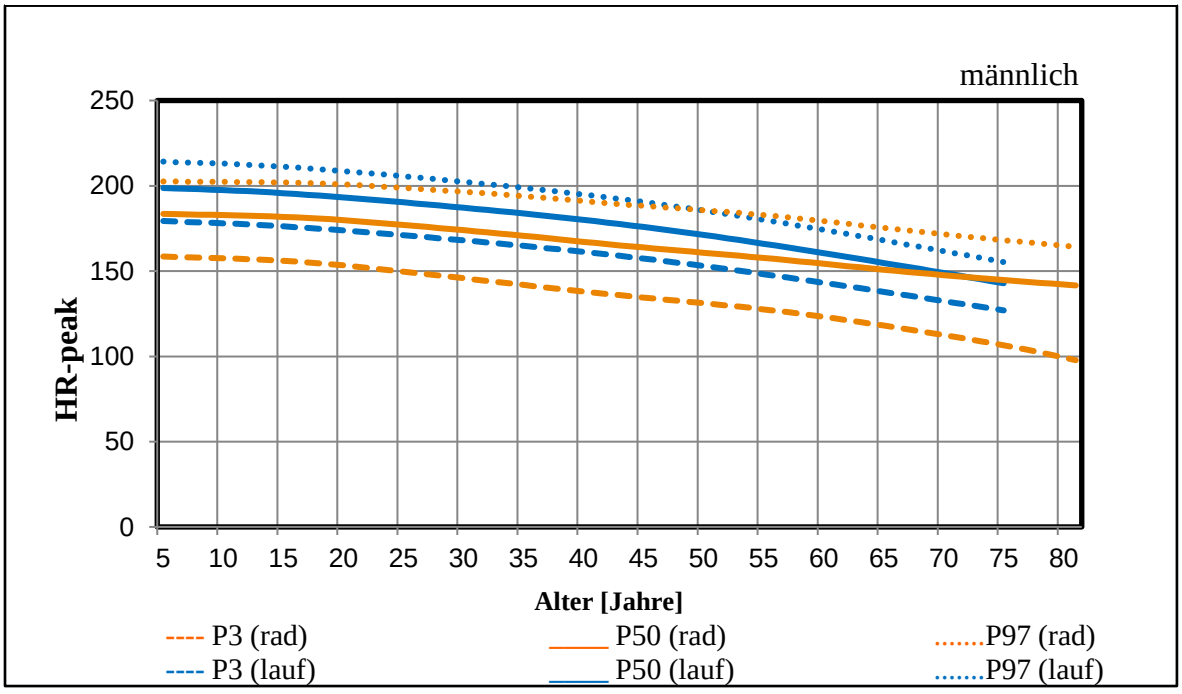

Abbildung 4.20 Vergleich HF bei Ausbelastung, männlich

Beim Vergleich der Herzfrequenz der Probanden bei Ausbelastung, konnte ein signifikanter Unterschied zwischen dem Fahrrad und dem Laufband festgestellt werden. Bei beiden Geschlechtern zeigte sich auf dem Laufbandergometer ein deutlich höherer Mittelwert für die Herzfrequenz (P50 Laufband w: 175,1, m: 176,7; Rad w: 167.1, m: 166,9). Für die weiblichen Probanden betrug der Unterschied zwischen dem Mittelwert für die Herzfrequenz bei Ausbelastung auf dem Fahrrad und Laufband 8 Herzschläge pro Minute. Bei männlichen Probanden hingegen 10 Schläge pro Minute.

Bei den männlichen Probanden lässt sich ein methodenspezifischer Unterschied auf einem Signifikanzniveau von < 0.001 und bei den weiblichen Probanden von 0.004 nachweisen. Die Herzfrequenzwerte bei Ausbelastung auf dem Laufbandergometer zeigten sich signifikant höher als auf dem Radergometer.

5 Diskussion

5.1 Kritische Betrachtung zum Design der Studie

Die in unserer Studie gewonnenen Referenzwerte für Herzfrequenz und Sauerstoffpuls basieren auf Untersuchung mit dem Fahrradergometer. Die für unsere Studie gewählte ergometrische Belastungsmethode, Fahrradergometrie, ist im Kleinkindesalter nur schwer durchführbar; ab Kindesalter ist diese standardisiert durchführbar. Aufgrund der flexiblen Einstellung des Ergometers (Einstellung der Kurbellänge, Sattelhöhe, des Lenkers; Durchführung der Untersuchung im Sitzen) ist die Untersuchung ohne Einschränkung oder ohne Unterbrechung der Belastung möglich. Trotzdem wird in der Literatur ein Nachteil für diese Belastungsform genannt. Bei kleinen Kindern wird nicht immer die Ausbelastung, durch die in Kapitel 3.3.2 genannten Kriterien erreicht [3]. Der Grund hierfür ist die geringere Kraft der Quadrizepsmuskulatur.

Um diesen Nachteil möglichst gering zu halten, wird in unserer Studie ein Stufenprotokoll verwendet. Dieses basiert auf den Vorarbeiten von Klemt und der Entscheidung der DGPK, ein gewichtsbezogenes Protokoll mit Belastungsstufen von 0,5 W/kg Körpergewicht (KG) mit Steigerung der Belastung alle 2 Minuten zu verwenden. Dieses gewichtsbezogene Belastungsschema hat den Vorteil, dass trotz wachstumsbedingter Änderung der Körpermaße bei Verlaufskontrollen ein guter intraindividueller Vergleich möglich ist.

Bei unserer Studie konnten wir selbst bei einigen der jüngsten Probanden die Ausbildung eines Plateaus der Sauerstoffaufnahme nachweisen, trotz Steigerung der Belastung, sodass wir dieses Ausbelastungskriterium bei den Kindern, die in unsere Studie eingeschlossen sind, dokumentieren konnten. Nachteilig ist, dass übergewichtige und adipöse Probanden in Relation zu ihrer Muskelmasse höher belastet und ungünstiger bewertet werden als normalgewichtige Probanden [17, 36]. Die in unserer Studie eingeschlossenen Probanden zeigen in allen Altersgruppen und bei beiden Geschlechtern ein Normalgewicht im Median. Bisherige Belastungsstudien zur Ausarbeitung der Referenzwerte im submaximalen und maximalen Belastungsbereich betrachten oft partielle Altersabschnitte. Es fehlen vor allem Daten im Vorschulalter und Schulalter, dies verhindert die Beurteilung der Referenzwerte im gesamten Altersverlauf. Die von uns gewonnenen Daten sind nicht nur bei der präventiven Beratung und Steuerung für den Alltagssport hilfreich, sondern ermöglichen es, in unserer Studie den Effekt des Alterns herauszustellen.

Heutzutage kennen wir die genetischen, epigenetischen und hormonellen Einflüsse des biologischen Geschlechts auf die Physiologie und die Krankheiten [72]. Um den Effekt des Alters sowie die Geschlechterunterschiede zu berücksichtigen, wurden in dieser Studie alters- und geschlechtsbezogene Referenzwerte gewonnen.

In vergleichbaren Arbeiten wurden größtenteils weniger Probanden getestet. Armstrong et al. untersuchten 177 Probanden (76 weibliche Probanden und 101 männliche Probanden) im Alter von 8-11 Jahren auf dem Laufbandergometer, Jones et al. untersuchten 100 Probanden (50 weibliche Probanden und 50 männliche Probanden) im Alter von 15-71 Jahren auf dem Fahrradergometer, die Studie von Fairbarn et al. umfasste 231 Probanden im Alter von 20-80 Jahren auf dem Fahrradergometer [73, 74, 75]. In der Studie von Drinkwater et al. wurden in der Altersgruppe 10-68 Jahren 109 aktive und inaktive weibliche Probanden inkludiert [76]. Diese Studie ist eine der wenigen Studien, die die essenzielle Gruppe der Kinder im Vorschul- und Schulalter sowie präpubertäre Jugendliche einschließt. Trotzdem umfasst diese Studie nur weibliche Probanden und im Vergleich zu unserer Studie schließt diese weniger Probanden ein.

Godehardt erfasste 1195 Probanden im Alter von 3-75 Jahren auf dem Laufbandergometer [26]. Hier wurden im Alter zwischen 3 und 18 Jahren insgesamt 813 Probanden eingeschlossen. Damit können die dargelegten Ergebnisse als repräsentative Stichprobe von gesunden Kindern, Jugendlichen sowie Erwachsenen gewertet werden. Bei dieser Studie wurden die Referenzwerte für ventilatorische Parameter und das Atemäquivalent auf dem Laufbandergometer gewonnen.

In der Studie von Prudlo wurden insgesamt 813 Probanden im Alter von 3-18 eingeschlossen [77]. Die hier dargestellten Daten wurden als Ergebnisse einer repräsentativen Stichprobe gesunder Kinder und Jugendlicher aus Deutschland im Alter von 3-18 Jahren angesehen werden. Auch in dieser Studie wurden die Referenzwerte für kardiozirkulatorische Parameter und Blutdruck auf dem Laufbandergometer gewonnen.

Die psychische Bereitschaft des Kindes an die Grenze seiner körperlichen Leistungsfähigkeit heranzugehen ist, ist oftmals weniger ausgeprägt als bei Erwachsenen [36]. Durch eine optimale Einstimmung auf die Untersuchung sowie motivierendes Zureden während der Fahrradergometrie wurden die Probanden im Vorschul- und Schulkindalter auf die Belastung vorbereitet. Nicht zu unterschätzen sind, vor allem bei Kindern, die motivierende Einflüsse seitens des Untersuchers, aber auch die Stimmungslage und die Mitarbeit der

Testperson [34, 78]. Bei unserer Studie wurden insgesamt 375 gesunde Kinder und Jugendlicher im Alter von 5-18 Jahren eingeschlossen. Zu erwähnen ist, dass die Probandenzahl in den jüngsten Probandenkollektiven relativ niedrig ist. Dies ist auf die schwierige Rekrutierung und Motivation zurückzuführen.

In dieser Studie vergleichen wir die 50. Perzentile der Herzfrequenz unter Belastung zwischen dem Fahrrad- und dem Laufbandergometer. Mit diesem Vergleich konnte festgestellt werden, dass bei Ausbelastung männlicher und weiblicher Probanden auf dem Laufbandergometer ein signifikanter höherer Mittelwert für die Herzfrequenz erreicht werden konnte. Bei Ausbelastung auf dem Fahrradergometer wird hauptsächlich die Quadrizepsmuskulatur in Bewegung gesetzt. Beim Laufbandergometer werden jedoch nahezu alle Muskeln des Körpers in Bewegung gesetzt. Die Belastungsintensität auf dem Laufbandergometer ist somit höher als beim Fahrradergometer. Damit lässt sich die Aussage treffen, dass die Herzfrequenz unter Belastung mit der Belastungsintensität positiv korreliert.

In der Literatur kann man ähnliche Studien finden. Jedoch ist zu sagen, dass in diesen Studien weniger Probanden eingeschlossen sind. Eine dieser Studien, ist die von Putz. Diese untersuchte, ob Unterschiede in submaximalen und maximalen Kennwerten bei der Fahrrad-, Laufband- und Armkurbelspiroergometrie von kardialen Patienten bestehen, bzw. ob Zusammenhänge unter den einzelnen Belastungsformen nachweisbar sind [79]. In dieser Studie hatten die Patienten am Laufband die jeweils höchste und an der Armkurbel die niedrigste Herzfrequenz. Es konnte aber bei der Maximalbelastung in allen drei Belastungsformen kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden. In dieser Studie waren Herzfrequenzen auf dem Laufbandergometer an der aeroben- und an der anaeroben Schwelle signifikant höher, als am Fahrrad und an der Armkurbel ($p<0,05$). An der anaeroben Schwelle war die HF bei allen drei Belastungsformen signifikant unterschiedlich ($p < 0,05$). Die Studie von Putz umfasst nur 10 männliche Patienten im Alter von 53 ± 9, die im Rahmen einer stabilen koronaren Herzkrankheit stationär waren, sodass sich diese Studie mit ihrer begrenzten Altersgruppe und dem Einschließen der Patienten statt Probanden von unserer Studie deutlich unterscheidet [79].

Roecker et al. untersuchte, ob die bei einer Fahrradergometerbelastung ermittelten Herzschlagfrequenzwerte bei 4 mmol/l Blutlaktat auf die Laufbandergometerbelastung angewendet werden können [80]. Hierzu wurden die Daten von 371 Probanden (304 männliche, 67 weibliche Probanden) im Alter von 30.9 ± 12.5 analysiert. In dieser Studie weist die

Herzfrequenz bei individueller anaerober Schwelle oder bei 4mmol/l Laktat zwischen dem Radfahren und Laufen keine Korrelation auf [80].

In unserer Studie ist die Herzfrequenz an der ventilatorischen Schwelle bei beiden Geschlechtern im Vergleich zwischen Fahrrad- und Laufbandergometer nicht signifikant. Jedoch konnte beim Vergleich der Herzfrequenz der Probanden bei Ausbelastung bei beiden Geschlechtern, ein signifikanter Unterschied zwischen dem Fahrrad und dem Laufband festgestellt werden. Somit kamen wir zu der gleichen Schlussfolgerung wie die Studie von Roecker et al.: Ein sportartspezifischer Test scheint eine Voraussetzung für verlässliche Empfehlungen für die Herzschlagfrequenz zu sein.

In unserer Studie konnte festgestellt werden, dass im Vergleich zum Fahrrad der Sauerstoffpuls an der ventilatorischen Schwelle und bei Ausbelastung auf dem Laufbandergometer, bei den weiblichen Probanden signifikant höher ist. Bei den männlichen Probanden konnte kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden. Jedoch war in der Studie von Putz mit 10 männlichen Patienten der Sauerstoffpuls an der anaeroben Schwelle und bei Maximalbelastung auf dem Laufband signifikant höher im Vergleich zum Fahrrad- und Armkurbelergometer [79]. Hierzu sollte erwähnt werden, dass diese Studie nur männliche Patienten umfasst und im Vergleich zu unserer Studie nicht nur weniger Probanden einschließt, sondern auch die essenzielle Gruppe der Kinder im Vorschul- und Schulalter sowie präpubertären Jugendlichen ausschließt.

Kleinrath untersuchte 10 gesunden Leistungssportler (9 männlich, 1 weiblich), die im Mittel 35,2 ± 10,6 (min: 19, max: 54) Jahre alt sind [81]. In dieser Studie konnte festgestellt werden, dass der Sauerstoffpuls während des gesamten Belastungsverlaufs am Laufband im Vergleich zu Fahrrad höher ist, es konnte jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Belastungsformen nachgewiesen werden. In unserer Studie wurden alle Altersgruppen untersucht. Außerdem wurden kranke Probanden in unserer Studie genauso nicht mit untersucht, wie auch Leistungssportler. Infolgedessen kann unsere Studie als repräsentativ gewertet werden.

5.2 Herzfrequenz in Relation zum Alter

Sowohl in Ruhe als auch unter körperlicher Belastung fällt eine deutliche Abnahme der Herzfrequenz vom Kindes- zum Erwachsenenalter hinauf. Auch in früheren Studien sind

vergleichbare Veränderungen der Herzfrequenz zu finden. Nach Nöcker und Portela weisen jüngere Personen gegenüber älteren eine höhere Schlagfrequenz des Herzens auf [82, 83].

Kinder weisen gegenüber Jugendlichen und letztere wiederum gegenüber Erwachsenen aufgrund des kleineren Herzens und dem daraus resultierenden geringeren Schlagvolumen eine höhere Herzschlagfrequenz auf [83, 84, 85, 86]. Nach Demeter beträgt die Verminderung der Herzfrequenz etwa 2 Herzschläge/Minute pro Jahr [87]. Unsere Studie bestätigt die Absenkung im Alternsgang, das Ausmaß der Reduktion der Herzfrequenz in Ruhe beträgt bei 5- bis 18-jährigen Probanden jährlich 1,2 Herzschläge/min. Das Ausmaß der Frequenzreduktion beträgt nach Bar-Or bis zum Erwachsenenalter jährlich 0,7 bis 0,8 Herzschläge/min [88]. Die Untersuchungen von Klemt führten zu vergleichbaren Ergebnissen [36]. Bei 10- bis 18-jährigen Probanden wies er eine durchschnittliche Reduktion von 0,6 Schläge/min pro Jahr nach. Dabei ist zu beachten, dass ein Absinken der HF_{max} pro Lebensjahr zwar für jeden Menschen gilt, aber die HF_{max} des einzelnen Individuums einer Streuung von 15 Herzschlägen pro Minute unterliegt [27, 32, 89].

5.3 Sauerstoffpuls in Relation zum Alter

Bei beiden Geschlechtern fällt eine deutliche Zunahme des Sauerstoffpulses unter körperlicher Belastung vom Kindes- bis zum Erwachsenenalter hinauf. Auch in früheren Studien finden sich vergleichbare Veränderungen im Sauerstoffpuls [77, 80]. Bei heranwachsenden Kindern steigt zunächst die aerobe Kapazität an und nach dem Erreichen des Maximums im mittleren Erwachsenenalter nimmt sie durch den Altersprozess stetig ab. Der Sauerstoffpuls errechnet sich aus dem Quotienten von $\dot{V}_{O2}$ und HF und wird in ml/Herzschlag angegeben. Im Rahmen des Alterungsprozesses verkleinert sich die Gasaustauschfläche des Lungengewebes, wodurch die Sauerstoffaufnahme abnimmt. Anhand des Sauerstoffpulses können Rückschlüsse auf das Schlagvolumen des Herzens gezogen werden [90, 91]. Im Alter vergrößert sich das Herz etwas, bekommt dickere Wände und etwas größere Kammern. Die altersbedingte Versteifung der Herzwände führt dazu, dass sich der linke Ventrikel nicht so gut füllt [92]. Auch in unserer Studie konnte gezeigt werden, dass es ab dem 60. Lebensjahr aufgrund der verminderten Auswurfleistung des Herzens unter steigender Belastung zu einer frühen Plateaubildung mit resultierendem erniedrigten maximalen Sauerstoffpuls kommt.

6 Zusammenfassung

Das Zusammenspiel von Herz und Lunge ist Voraussetzung für einen suffizienten Gasaustausch und eine stabile Hämodynamik [93]. Bislang fehlten altersübergreifende Referenzwerte von gesunden Probanden für Herzfrequenz und Sauerstoffpuls. Mit unserer Studie umfassen wir ein umfangreiches Bild kardialer sowie pulmonaler Funktions- und Regulationsmechanismen in Ruhe und unter körperlicher Belastung. In allen untersuchten Lebensabschnitten wurden die Daten auf dem Fahrrad- und dem Laufbandergometer anhand des standardisierten Belastungsprotokolls von Dubowy et al. erhoben [6, 94].

Durch die rasche Online-Analyse der Atemgase mit Software unterstützter Auswertung erlauben aktuelle Spiroergometrie Systeme ohne wesentlichen zusätzlichen zeitlichen Aufwand die rasche Beurteilung der kardiorespiratorischen Situation [27]. Aus diesem Grund sollte die Spiroergometrie sowohl in der Abklärung von kardialen Patienten, aber auch in der präventiven Beratung, Begutachtung und Risikoabschätzung öfters verwendet werden. Das Fahrradergometer bietet Vorteile hinsichtlich der leichteren Messung der Vitalparameter (Herzfrequenz, Blutdruck, Sauerstoffpuls, etc.) sowie leichteren Abnahmen von Blut, z.B. zur Laktatbestimmung. Die meisten Referenzwerte auf dem Laufbandergometer wurden in den USA erhoben. Die Europäer sind im Vergleich zu den Amerikanern nicht nur eine Geh- bzw. Laufbelastung gewohnt, sondern auch eine Fahrradbelastung [6, 95]. Dabei ist die Erhebung der Referenzwerte am Fahrrad von großer Bedeutung.

Bei der objektiven Beurteilung der körperlichen Leistungsfähigkeit gesunder Kinder und Erwachsener spielen die Referenzwerte für den Sauerstoffpuls und die Herzfrequenz eine wichtige Rolle. Bislang waren die Referenzwerte für das Kindes- und Jugendalter, für die Herzfrequenz und für den Sauerstoffpuls bei Belastung auf dem Fahrradergometer nicht ausreichend. Mit dieser Arbeit ist es gelungen, Referenzwerte vom Kindes- bis zum Erwachsenenalter für den Sauerstoffpuls sowie die Herzfrequenz auf dem Fahrradergometer zu erzeugen, welche auf die gesunde Bevölkerung übertragbar sind. Dadurch konnte die Lücke für Kinder zwischen 5 und 18 Jahren abgedeckt werden.

In dieser Studie wurde gezeigt, dass auf dem Laufbandergometer höhere kardiozirkulatorische Parameter generiert werden als auf dem Fahrradergometer. Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, liegt der Grund in der stärkeren Belastung der Oberschenkelmuskulatur auf dem Fahrrad. Infolgedessen kommt es häufiger zum Abbruch der Untersuchung, ohne die Kriterien der Ausbelastung zu erreichen. Beim Laufbandergometer

werden jedoch nahezu alle Muskeln des Körpers in Bewegung gesetzt. Da die kardiozirkulatorische Parameter auf dem Laufbandergometer verlässlicher erhoben werden können, sollte bei chronisch Kranken das Laufband bevorzugt werden.
Die Prognose einer Erkrankung sowie die Operabilität und das Risiko einer Operation für einen Patienten können mithilfe einer standardisierten Belastungsuntersuchung eingeschätzt werden. Es kann festgestellt werden, ob die Leistungseinschränkung kardial oder ventilatorisch bedingt ist und ob der Patient ausbelastet ist [96]. An dieser Stelle spielen die Referenzwerte in jeden Altersabschnitt eine große Rolle. Aufgrund des Wachstums, der körperlichen Entwicklung und der Reifung der Organe und Gewebe, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, sind die Referenzwerte altersabhängig. Um die Belastungsuntersuchungen bei chronisch kranken Kindern zur Einschätzung der Prognose oder Verlaufskontrolle einzusetzen, sollen die alters- und geschlechtsabhängige Referenzwerte berücksichtigt werden.

Die von uns gewonnenen Daten sind nicht nur für die Diagnostik kardiopulmonaler Erkrankungen und deren Therapien hilfreich, sondern ermöglichen, die physiologischen Veränderungen des wachsenden und alternden Organismus herauszustellen. Zum Beispiel weist ein pathologisch erniedrigter Sauerstoffpuls auf die Störung der Kardiozirkulation hin. Andererseits ist ein Abfall des Sauerstoffpulses ab dem mittleren Erwachsenenalter physiologisch. Somit helfen die Perzentile sowohl in der punktuellen Untersuchung als auch in der sequenziellen Untersuchung physiologische sowie altersbedingte Veränderungen von krankheitsbedingten Veränderungen zu unterscheiden. Bei chronisch Kranken spielen die Belastungsuntersuchungen als nicht invasive Untersuchung zur Verlaufskontrolle eine große Rolle. Zum Beispiel, wenn der chronisch kranke Patient im Rahmen sequentieller Untersuchungen aus den Perzentilen `herausfällt´, könnte weitere Diagnostik oder eine Therapieänderung indiziert sein.

Aufgrund der signifikanten Unterschiede in den Werten des Sauerstoffpulses und der Herzfrequenz zwischen Rad- und Laufbandergometer konnte durch diese Studie gezeigt werden, dass es nicht möglich ist, die beim Laufbandergometer ermittelte Herzfrequenz auf das Fahrradergometer zu übertragen. In weiteren Studien sollte der Vergleich für weitere kardiorespiratorische Parameter durchgeführt werden. Zusammengefasst könnte man die Aussage treffen, dass die Herzfrequenz und der Sauerstoffpuls von der angewandten Form der Belastungsuntersuchung abhängen.

7 Literaturverzeichnis

[1] Kroidl, RF, Schwarz S, Lehnigk B (2007). Historische Aspekte zu Belastungsuntersuchungen, Spiroergometrie. Pneumologie 2007; 61(05): 291-294

[2] Meyer FJ, Borst MM , Buschmann HC, Claussen M, Dumitrescu D, Ewert R, Friedmann-Bette B, Gläser S, Glöckl R, Haring K, Lehnigk B, Ochmann U et al. (2018) Belastungsuntersuchungen in der Pneumologie- Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e.V. Pneumonologie 2018; 72 (10): 687-731

[3] Balady GJ, Arena R, Sietsema K, Myers J, Coke L, Fletcher GF, Forman D, Franklin B, Guazzi M, Gulati M, Keteyian SJ, Lavie CJ et al. (2010) Clinician's Guide to cardiopulmonary exercise testing in adults: a scientific statement from the American Heart Association. Circulation, 122(2), 191–225

[4] Shephard RJ (1984). Tests of maximum oxygen intake. A critical review. Sports Med, 1:99 – 124

[5] Engl T, Appel K, Müller J, Kühn A, Oberhoffer R, Vogt M (2020). Ergospirometrische Belastungsuntersuchungen in der Pädiatrie. Kinder- und Jugendmedizin 2020; 20(06): 375-383

[6] Pucher J, Buehler R, Seinen M (2011). Bicycling Renaissance in North America? An update and re-appraisal of cycling trends and policies. Transportation Research A: Policy and Practice, Vol. 45, 451-475

[7] Wonisch M, Berent R, Klicpera M, Laimer H, Marko C, Pokan R, Schmid P, Schwann H (2008). Praxisleitlinien Ergometrie. Journal für Kardiologie -Austrian Journal of Cardiology 2008; 15 (Supplementum A - Praxisleitlinien Ergometrie), 3-17

[8] Kenn C, May AE (2018). Ergometrie- Schritt für Schritt. Deutsche Medizinische Wochenschrift 2018; 143: 1252-1257

[9] Löllgen H, Leyk D (2018). Ergometrische Belastungsuntersuchungen in der Sportmedizin. Deutsches Ärzteblatt, Jg. 115, Heft 24, 409-416

[10] Fletcher GF, Ades PA, Kligfield P, Arena R, Balady GJ, Bittner VA, Coke L A, Fleg JL, Forman DE, Gerber TC, Gulati M, Madan K et al. (2013) Exercise standards for testing and training: a scientific statement from the American Heart Association. Circulation, 128(8), 873–934

[11] Löllgen H, Erdmann E, Gitt AK (2010). Ergometrie: Belastungsuntersuchungen in Klinik und Praxis. Springer, Berlin, Heidelberg

[12] Pescatello LS, Arena R, Riebe D, Thompson PD (2014). ACSM‘s guidelines for exercise testing and prescription. Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia

[13] Löllgen H (2005). Kardiopulmonale Funktionsdiagnostik. Novartis Pharma GmbH, Nürnberg

[14] McArdle WD, Katch FI, Katch VL (2015). Essentials of exercise physiology. Lippincott Williams & Wilkins

[15] Rowland TW (1993) Aerobic exercise. In: Rowland TW (ed) Pediatric laboratory exercise testing. Clinical guide lines. Human Kinetic Publ, Champaign/IL, pp 19–41

[16] Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Stringer WW, Sietsema KE, Sun XG, Whipp BJ (2011). Principles of Exercise Testing and Interpretation. 5. Auflage, Lippincott, Williams & Wilkins, Philadelphia

[17] Lawrenz W, Dubowy KO, Baden W, Hager A (2018). Ergometrie und Spiroergometrie bei Kindern und Jugendlichen. Positionspapier der DGPK.

[18] Sammito S, Heblich F, Güttler N (2020). Die Fahrradergometrie in der arbeitsmedizinischen Vorsorge. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie 70:240–246

[19] Schwarz S, Lehnigk B, Schwittai W (2018). Lungenfunktionsdiagnostik und Spiroergometrie. Thieme Verlag, Stuttgart, 168-205

[20] Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Casaburi R, Whipp BJ (1999) Principles of exercise testing & interpretation. Including pathophysiology and clinical applications (3rd edn) Lippincott Williams & Wilkins Philadelphia, S 63–94, S 115–142

[21] Pokan R, Förster H, Hofmann P, Hörtnagel H, Ledl-Kurkowski E, Wonisch M (2004). Kompendium der Sportmedizin: Physiologie, Innere Medizin und Pädiatrie. Springer Verlag, Wien

[22] Macfarlane DJ (2001). Automated metabolic gas analysis systems. Sports Medicine 31(12): 841-61

[23] Winter UJ, Gitt AK, Fritsch J, Berge PG, Pothoff G, Hilger HH (1994). Methodische Aspekte der modernen, computerisierten Ergospirometrie (CPX): Rampenprogramm, konstanter Belastungstest und CO_2- Rückatmungsmethode. Z Kardiol; 83 (Suppl 3): 13–26

[24] Kroidl R, Schwarz S, Lehnigk B, Fritsch J (2015) Kursbuch Spiroergometrie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart

[25] Criée C-P, Baur X, Berdel D, Bösch D, Gappa M, Haidl P, Husemann K, Jörres RA, Kabitz H-J, Kardos P, Köhler D, Magnussen H et al. (2015) Leitlinie zur Spirometrie. Pneumologie 2015; 69(03): 147-164

[26] Godehardt K (2018). Referenzwerte gesunder Probanden für ventilatorische Parameter und das Atemäquivalent in Ruhe und unter Belastung auf dem Laufbandergometer im Alter von 4 bis 74 Jahren. Disertation, Ruhr Universität Bochum

[27] Wonisch M, Fruhwald FM, Hofmann P, Hödl R, Klein W, Kraxner W, Maier R, Pokan R, Smekal G, Watzinger N (2003). Spiroergometrie in der Kardiologie - Grundlagen der Physiologie und Terminologie. Journal für Kardiologie - Austrian Journal of Cardiology 2003 10 (9), 383-390

[28] Rassouli F, Thurnheer R (2015). Spiroergometrie – Indikation, Durchführung und Interpretation. Swiss Medical Forum- Schweizerisches Medizin-Forum 2015;15(14–15):315–321

[29] Jones NL (1997). Clinical exercise testing. 4th ed., WB Saunders, Philadelphia

[30] Haas NA, Kleideiter U (2011). Kinderkardiologie. Thieme Verlag. S. 49-55

[31] Wasserman K, Whipp BJ, Koyl SN, Beaver WL (1973). Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. Journal of applied physiology, 35(2), 236–243

[32] Tanaka H, Monahan KD, Seals DR (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. J Am Coll Cardiol 2001; 37: 153–6

[33] Carter R, Watenpaugh DE, Smith ML (2001). Gender differences in cardiovascular regulation during recovery from exercise. Journal of Applied Physiology, 91(4), 1902-1907

[34] Bernitzki S (2006). Referenzwerte gesunder Kinder und Jugendlicher für die Sauerstoffaufnahme in Ruhe, an der individuellen anaeroben Schwelle und bei Ausbelastung auf dem Laufbandergometer. Dissertation, Ruhr Universität Bochum

[35] Shephard RJ (1984). Tests of maximum oxygen intake. A critical review. Sports Med, 1: 99 – 124

[36] Klemt U (1988) Die kardiopulmonale Leistungsfähigkeit im Kindes- und Jugendalter. Sport und Buch Strauß, Köln

[37] Buchfuhrer MJ, Hansen JE, Robinson TE, Sue DY, Wasserman K, Whipp BJ (1983). Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. J Appl Physiol; 55: 1558–64

[38] Zhang YY, Johnson MC 2nd, Chow N, Wasserman K (1991). Effect of exercise testing protocol on parameters of aerobic function. Medicine and science in sports and exercise, 23(5), 625–630

[39] Pina IL, Balady GJ, Hanson P, Labovitz AJ, Madonna DW, Myers J (1995). A statement for healthcare professionals from the Committee on Exercise and Cardiac Rehabilitation, American Heart Association. Circulation 91: 912–921

[40] Westhoff M, Rühle KH, Greiwing A, Schomaker R, Eschenbacher H, Siepmann M, Lehnigk B (2013). Ventilatorische und metabolische (Laktat-)Schwellen. Positionspapier der Arbeitsgemeinschaft Spiroergometrie. Deutsche Medizinische Wochenschrift, 138(6), pp. 275-280

[41] Roecker K, Prettin S, Pottgiesser T, Schumacher YO, Dickhuth HH (2010). Metabolische Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung in der Sportmedizin. Sport- und Präventivmedizin, 40(1), pp. 6-12.

[42] Binder RK, Wonisch M, Corra U, Cohen-Solal A, Vanhees L, Saner H, Schmid JP (2008). Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. European journal of cardiovascular prevention and rehabilitation: official journal of the European Society of Cardiology, Working Groups on Epidemiology & Prevention and Cardiac Rehabilitation and Exercise Physiology, 15(6), 726–734

[43] Skinner JS, McLellan TM (1980). The transition from aerobic to anaerobic metabolism. Research quarterly for exercise and sport, 51(1), 234–248.

[44] Kindermann W (2004). Anaerobe Schwelle. Dt. Zeitschrift f. Sportmedizin, Jahrgang 55(Nr.6): p. 161-162.

[45] Itoh H, Taniguchi K, Koike A, Doi M (1990). Evaluation of severity of heart failure using ventilatory gas analysis. Circulation, 81(1 Suppl), II31–II37

[46] Fleg JL, Piña IL, Balady GJ, Chaitman BR, Fletcher B, Lavie C, Limacher MC, Stein RA, Williams M, Bazzarre T (2000). Assessment of functional capacity in clinical and research applications: An advisory from the Committee on Exercise, Rehabilitation, and Prevention, Council on Clinical Cardiology, American Heart Association. Circulation, 102(13), 1591–1597

[47] Wasserman, K (1988). The Dickinson W. Richards lecture. New concepts in assessing cardiovascular function. Circulation, 78(4), 1060-1071

[48] Mader A, Heck H, Foehrenbach R, Hollmann W (1979). Das statische und dynamische Verhalten des Laktats und des Säure-Basen-Status im Bereich niedriger bis maximaler Azidosen bei 400- und 800-m-Läufern bei beiden Geschlechtern nach Belastungsabbruch. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 30(7), pp. S. 203-211, 8, S. 249-261

[49] Liesen H, Mader A, Heck H, Hollmann W (1977). Die Ausdauerleistungsfähigkeit bei verschiedenen Sportarten unter besonderer Berücksichtigung des Metabolismus: Zur Ermittlung der optimalen Belastungsintensität im Training. Beiheft Leistungssport 9, 63

[50] Keul J, Simon G, Berg A, Dickhuth H, Goerttler I, Kuebel R (1979). Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle zur Leistungsbewertung und Trainingsgestaltung. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 30(7), pp. S. 212-218

[51] Rost R, Hollmann W (1982). Belastungsuntersuchungen in der Praxis. Grundlagen, Technik und Interpretation ergometrischer Untersuchungsverfahren. Thieme Verlag, Stuttgart

[52] Hollmann W (1959). The relationship between pH, lactic acid, potassium in the arterial and venous blood, the ventilation, PoW and pulse frequency during increasing spiro-ergometric work in endurance-trained and untrained persons. Pan-American Congr Sports Med, Chicago 1959

[53] Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ (1973). On-line computer analysis and breath-by-breath graphical display of exercise function tests. Journal of applied physiology, 34(1), 128–132

[54] Dumitrescu D., Rosenkranz S. Atlas Spiroergometrie und Pulmonale Hypertonie. 4. überarbeitete Auflage, September 2017.

[55] Hardarson T, Skarphedinsson JO, Sveinsson T (1998). Importance of the lactate anion in control of breathing, Journal of Applied Physiology 84 (2), 411-416

[56] Kindermann W (2014). Standards der Sportmedizin. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 2014; 65: 325-326

[57] McLellan TM (1987). The anaerobic threshold: concept and controversy, Australian-Journal of Science and Medicine in Sport 19 (2), 3-8

[58] Whipp BJ, Ward SA, Lamarra N, Davis JA, Wasserman K (1982). Parameters of ventilatory and gas exchange dynamics during exercise. Journal of applied physiology: respiratory, environmental and exercise physiology, 52(6), 1506-1513

[59] Klingenheben T, Löllgen H, Bosch R, Trappe HJ (2018). Der Kardiologe. https://doi.org/10.1007/s12181-018-0265-2

[60] Washington RL, Bricker J T, Alpert BS, Daniels SR, Deckelbaum R J, Fisher EA, Gidding SS, Isabel-Jones J, Kavey RE, Marx GR (1994). Guidelines for exercise testing in the pediatric age group. From the Committee on Atherosclerosis and Hypertension in Children, Council on Cardiovascular Disease in the Young, the American Heart Association. Circulation, 90(4), 2166–2179. https://doi.org/10.1161/01.cir.90.4.2166

[61] Edvardsen E, Hem E, Anderssen, SA (2014). End criteria for reaching maximal oxygen uptake must be strict and adjusted to sex and age: a cross-sectional study. PloS one, 9(1), e85276

[62] Löllgen H, Erdmann E, Gitt AK (2010). Ergometrie: Belastungsuntersuchungen in Klinik und Praxis. Springer, Berlin, Heidelberg

[63] Froelicher VF, Myers J (2006). Exercise and the heart. 5th ed. Saunders Elsevier, Philadelphia

[64] Guazzi M, Arena R, Halle M, Piepoli MF, Myers J, Lavie CJ (2016). 2016 Focused Update: Clinical Recommendations for Cardiopulmonary Exercise Testing Data Assessment in Specific Patient Populations. Circulation, 133(24), e694–e711.

[65] Trappe JH, Löllgen H (2000) Leitlinien zur Ergometrie. Z Kardiol 89:821–837

[66] Washington RL, Bricker JT, Alpert BS, Daniels SR, Deckelbaum RJ, Fisher EA, Gidding SS, Isabel-Jones J, Kavey R-EW, Marx GR, Strong WB, Teske DW et al. (1994). Guidelines for Exercise Testing in the Pediatric Age Group. Circulation 90(4):2166-2179

[67] Steinacker JM, Liu Y, Reißnecker S (2002). Standards der Sportmedizin -Ergometrie. Dtsch Z Sportmed 53 (7+8):228-229

[68] Cole, T. J., & Green, P. J. (1992). Smoothing reference centile curves: the LMS method and penalized likelihood. Statistics in medicine, 11(10), 1305–1319

[69] Przybilla PV (2008). Vergleich von Gesamtkörperfettmasse und anthropometrischen Methoden zur Bestimmung des Körperfettgehaltes anhand des Gesundheitsrisikos bei übergewichtigen und adipösen deutschen Kindern und Jugendlichen – Ermittlung von risikobezogenen Grenzwerten. Dissertation, Medizinischen Fakultät der Ernst-Moritz-Arndt Universität, Greifswald

[70] Neuhauser H, Schienkiewitz A, Schaffrath Rosario A, Dortschy R (2013). Referenzperzentile für anthropometrische Maßzahlen und Blutdruck aus der Studie zur Gesundheit von Kindern und Jugendlichen in Deutschland (KiGGS). Robert Koch-Institut, Berlin

[71] McArdle WD, Katch FI, Katch VL (2014). Exercise Physiology: Nutrition, Energy and Human Performance. Lippincot-Raven, 8 Edition

[72] Mauvais-Jarvis F, Bairey Merz N, Barnes PJ, Brinton RD, Carrero JJ, DeMeo DL, De Vries GJ, Epperson CN, Govindan R, Klein SL, Lonardo A, Maki PM et al. (2020) Sex and gender: modifiers of health, disease, and medicine. Lancet. 396(10250): 565–582

[73] Armstrong N, Kirby BJ, McManus AM, Welsman JR (1997). Prepubescents' ventilatory responses to exercise with reference to sex and body size. Chest, 112(6), 1554–1560

[74] Jones NL, Makrides L, Hitchcock C, Chypchar T, McCartney N (1985). Normal standards for an incremental progressive cycle ergometer test. The American review of respiratory disease, 131(5), 700–708

[75] Fairbarn MS, Blackie SP, McElvaney NG, Wiggs BR, Paré PD, Pardy RL (1994). Prediction of heart rate and oxygen uptake during incremental and maximal exercise in healthy adults. Chest, 105(5), 1365–1369

[76] Drinkwater BL, Horvath SM, Wells CL (1975). Aerobic power of females, ages 10 to 68. Journal of gerontology, 30(4), 385–394

[77] Prudlo AC (2012). Referenzwerte kardiozirkulatorischer Parameter und Blutdruck bei spiroergometrischen Belastungsuntersuchungen unter Belastung auf dem Laufbandergometer für Kinder und Jugendliche Diplomarbeit, Medizinische Fakultät der Ruhr-Universität Bochum

[78] Cumming GR, Langford S (1985). Comparison of nine exercise tests used in Pediatric Cardiology, In: Brinkhorst RA, Kemper HCG, Saris WHM (1985). Children and Exercise XI, International Series on Sport Sciences (15), 58-68

[79] Putz B (2010). Vergleich unterschiedlicher ergometrischer Belastungsformen beim kardialen Patienten. Diplomarbeit, Medizinische Universität Graz

[80] Roecker K, Striegel H, Dickhuth HH (2003). Heart-rate recommendations: Transfer between running and cycling exercise? International Journal of Sports Medicine, 24(3), 173-178

[81] Kleinrath N (2011). Vergleich unterschiedlicher ergometrischer Belastungsformen bei Läufern. Diplomarbeit aus der Medizinische Universität Graz

[82] Nöcker J (1964). Physiologie der Leibesübungen für Sportlehrer, Trainer, Sportstudenten und Sportärzte. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart

[83] Cruz Portela LO (1996). Aerobe und anaerobe Ausdauer bei Kindern und Jugendlichen. Sportphysiologische und sportmedizinische Befunde und ihre Bedeutung für die Trainingspraxis. Butzbach-Griedel: Afra-Verl.

[84] Belayneh, MD (2000). Die Dynamik der submaximalen Ergometer- und Leistungsfähigkeit bei Kindern und Jugendlichen in Abhängigkeit von den sportlichen Freizeitaktivitäten (Parameter sind Ruheherzfrequenz, Wattpuls bzw. Sauerstoffpuls bei Laktatwerten von 2,3 und 4 mmol/l). Dissertation, Universität Chemnitz.

[85] Hollmann W (1991). Leistungsentwicklung und Belastbarkeit im Kindes- und Jugendalter. Monatsschrift Kinderheilkunde, 139(6), S. 742-748.

[86] Bergmann J (2008). Zusammenhang zwischen der Ruheherzschlagfrequenz und der motorischen Leistungsfähigkeit im Schulkindalter. Dissertation, Universität Potsdam

[87] Demeter A (1981). Sport im Wachstums- und Entwicklungsalter. Leipzig: J.A. Barth Verlag.

[88] Bar-Or O (1986). Die Praxis der Sportmedizin in der Kinderheilkunde. Springer Verlag, Berlin

[89] Whaley MH, Kaminsky LA, Dwyer GB, Getchell LH, Norton JA (1992). Predictors of over- and underachievement of age-predicted maximal heart rate. Medicine and science in sports and exercise, 24(10), 1173–1179.

[90] Whipp BJ, Higgenbotham MB, Cobb FC (1996). Estimating exercise stroke volume from asymptotic oxygen pulse in humans. Journal of applied physiology, 81(6), 2674–2679

[91] Oesemann, AM (2021). Körperliche Leistungsfähigkeit und Lungenfunktion von Patienten mit angeborenen Herzfehlern. Dissertation, Klinik für angeborene Herzfehler/ Kinderkardiologie des Deutschen Herzzentrums Berlin

[92] Gupta JI , Shea MJ (2019). Auswirkungen des Älterwerdens auf Herz und Blutgefäße. MSD Manual

[93] Herkenrath SD (2020). Interaktionen der Lunge: Funktionelle Einheiten erfassen und beachten. Kompass Pneumologie 2020; 8: 123-124.

[94] Dubowy KO, Baden W, Bernitzki S, Peters B (2008). A practical and transferable new protocol for treadmill testing of children and adults. Cardiology in the young, 18 (6), 615-623

[95] Sivak M, Schoettle B (2011). Recent Changes in the Age Composition of US Drivers: Implications for the Extent, Safety and Environmental Consequences of Personal Transportation. Traffic Injury Prevention Volume 12, Issue 6

[96] Vonbank K (2016). Spiroergometrie-Wozu brauchen wir sie im klinischen Alltag? Journal für Pneumonologie 2016; 4 (Sonderheft 1), 4-5

Anhang

Tabelle 9.1 Sauerstoffpuls basal, weiblich

Age	L	M	S	P3	P10	P25	P50	P75	P90	P97
5	0,609	1,908	0,266	1,002	1,279	1,581	1,908	2,259	2,632	3,027
6	0,615	2,149	0,263	1,137	1,447	1,785	2,149	2,539	2,954	3,392
7	0,620	2,390	0,260	1,274	1,617	1,989	2,390	2,819	3,274	3,754
8	0,627	2,629	0,257	1,412	1,786	2,193	2,629	3,095	3,588	4,108
9	0,635	2,864	0,254	1,549	1,955	2,394	2,864	3,365	3,895	4,452
10	0,645	3,095	0,251	1,685	2,121	2,592	3,095	3,629	4,193	4,785
11	0,656	3,320	0,248	1,819	2,285	2,786	3,320	3,885	4,480	5,104
12	0,670	3,532	0,246	1,947	2,441	2,970	3,532	4,125	4,748	5,400
13	0,685	3,725	0,243	2,065	2,584	3,138	3,725	4,342	4,988	5,662
14	0,703	3,895	0,240	2,172	2,713	3,288	3,895	4,532	5,196	5,887
15	0,721	4,044	0,237	2,267	2,827	3,420	4,044	4,695	5,373	6,076
16	0,741	4,171	0,234	2,350	2,927	3,535	4,171	4,834	5,521	6,231
17	0,761	4,281	0,231	2,424	3,015	3,635	4,281	4,952	5,645	6,359
18	0,781	4,379	0,228	2,491	3,094	3,724	4,379	5,056	5,753	6,469
19	0,802	4,468	0,225	2,553	3,168	3,807	4,468	5,149	5,849	6,565
20	0,823	4,552	0,223	2,613	3,238	3,885	4,552	5,236	5,937	6,653
21	0,843	4,633	0,220	2,671	3,306	3,961	4,633	5,321	6,023	6,738
22	0,861	4,712	0,218	2,730	3,374	4,035	4,712	5,403	6,107	6,822
23	0,877	4,791	0,215	2,789	3,441	4,110	4,791	5,485	6,191	6,906
24	0,890	4,870	0,213	2,849	3,509	4,183	4,870	5,567	6,274	6,989
25	0,903	4,946	0,211	2,909	3,576	4,256	4,946	5,646	6,355	7,071
26	0,914	5,020	0,209	2,967	3,640	4,325	5,020	5,722	6,432	7,149
27	0,926	5,088	0,207	3,022	3,702	4,391	5,088	5,793	6,504	7,221
28	0,939	5,151	0,205	3,072	3,758	4,451	5,151	5,857	6,568	7,283
29	0,954	5,205	0,203	3,117	3,807	4,503	5,205	5,911	6,621	7,334
30	0,970	5,251	0,201	3,155	3,850	4,549	5,251	5,956	6,664	7,374
31	0,987	5,290	0,199	3,188	3,887	4,588	5,290	5,993	6,697	7,403
32	1,006	5,321	0,198	3,215	3,918	4,620	5,321	6,022	6,722	7,422
33	1,025	5,344	0,196	3,236	3,942	4,645	5,344	6,042	6,737	7,431
34	1,045	5,359	0,195	3,252	3,959	4,662	5,359	6,052	6,742	7,429
35	1,065	5,367	0,193	3,262	3,971	4,673	5,367	6,056	6,740	7,419
36	1,086	5,372	0,192	3,268	3,980	4,680	5,372	6,056	6,733	7,405
37	1,105	5,374	0,191	3,273	3,986	4,685	5,374	6,053	6,725	7,389
38	1,124	5,374	0,190	3,276	3,990	4,689	5,374	6,049	6,715	7,373
39	1,142	5,375	0,189	3,278	3,994	4,691	5,375	6,046	6,706	7,358
40	1,159	5,375	0,188	3,279	3,997	4,694	5,375	6,042	6,698	7,344
41	1,177	5,375	0,187	3,279	3,999	4,695	5,375	6,039	6,690	7,330
42	1,194	5,372	0,187	3,277	3,998	4,695	5,372	6,033	6,680	7,316
43	1,211	5,369	0,186	3,273	3,997	4,693	5,369	6,027	6,670	7,300
44	1,227	5,364	0,186	3,269	3,994	4,690	5,364	6,019	6,658	7,284
45	1,242	5,360	0,185	3,264	3,992	4,688	5,360	6,013	6,648	7,269
46	1,256	5,361	0,185	3,262	3,992	4,689	5,361	6,011	6,644	7,262
47	1,269	5,366	0,184	3,264	3,997	4,695	5,366	6,016	6,647	7,262
48	1,281	5,378	0,184	3,269	4,006	4,706	5,378	6,027	6,657	7,271
49	1,293	5,396	0,184	3,278	4,019	4,722	5,396	6,046	6,675	7,288

50	1,304	5,418	0,183	3,290	4,036	4,742	5,418	6,069	6,699	7,311
51	1,316	5,443	0,183	3,303	4,055	4,765	5,443	6,095	6,726	7,339
52	1,328	5,469	0,183	3,316	4,074	4,789	5,469	6,123	6,755	7,368
53	1,341	5,495	0,182	3,329	4,093	4,812	5,495	6,150	6,783	7,396
54	1,355	5,518	0,182	3,339	4,110	4,832	5,518	6,174	6,807	7,419
55	1,371	5,536	0,182	3,346	4,123	4,849	5,536	6,193	6,826	7,437
56	1,389	5,552	0,181	3,351	4,134	4,864	5,552	6,209	6,840	7,449
57	1,409	5,566	0,181	3,354	4,144	4,876	5,566	6,223	6,852	7,458
58	1,431	5,577	0,181	3,354	4,151	4,886	5,577	6,233	6,860	7,463
59	1,455	5,585	0,180	3,350	4,155	4,894	5,585	6,239	6,863	7,462
60	1,481	5,588	0,180	3,343	4,155	4,897	5,588	6,240	6,860	7,455
61	1,508	5,585	0,179	3,332	4,151	4,895	5,585	6,234	6,850	7,440
62	1,538	5,575	0,179	3,315	4,141	4,887	5,575	6,221	6,832	7,415
63	1,569	5,558	0,179	3,292	4,125	4,872	5,558	6,199	6,804	7,380
64	1,601	5,534	0,178	3,265	4,105	4,851	5,534	6,170	6,768	7,336
65	1,635	5,506	0,178	3,234	4,080	4,827	5,506	6,136	6,727	7,287
66	1,671	5,474	0,177	3,200	4,053	4,799	5,474	6,098	6,681	7,232
67	1,707	5,438	0,177	3,162	4,022	4,768	5,438	6,055	6,630	7,172
68	1,745	5,398	0,176	3,120	3,987	4,732	5,398	6,007	6,574	7,106
69	1,783	5,353	0,176	3,076	3,950	4,693	5,353	5,955	6,513	7,035
70	1,822	5,306	0,176	3,029	3,910	4,651	5,306	5,900	6,448	6,961
71	1,860	5,256	0,175	2,981	3,869	4,608	5,256	5,842	6,381	6,884
72	1,899	5,205	0,175	2,933	3,827	4,563	5,205	5,783	6,313	6,806
73	1,937	5,154	0,174	2,884	3,785	4,518	5,154	5,724	6,244	6,727
74	1,975	5,102	0,174	2,834	3,742	4,473	5,102	5,663	6,175	6,648

Tabelle 9.2 Sauerstoffpuls basal, männlich

Age	L	M	S	P3	P10	P25	P50	P75	P90	P97
5	-0,042	2,371	0,294	1,326	1,607	1,951	2,371	2,888	3,522	4,303
6	-0,001	2,666	0,292	1,486	1,805	2,194	2,666	3,240	3,937	4,785
7	0,041	2,961	0,291	1,644	2,004	2,438	2,961	3,591	4,349	5,259
8	0,083	3,257	0,289	1,802	2,202	2,682	3,257	3,942	4,757	5,725
9	0,126	3,553	0,287	1,958	2,400	2,927	3,553	4,292	5,163	6,183
10	0,170	3,850	0,285	2,113	2,599	3,173	3,850	4,641	5,564	6,634
11	0,214	4,145	0,283	2,266	2,796	3,419	4,145	4,988	5,960	7,075
12	0,258	4,437	0,281	2,416	2,991	3,661	4,437	5,329	6,347	7,503
13	0,301	4,721	0,279	2,561	3,180	3,898	4,721	5,659	6,720	7,913
14	0,344	4,994	0,277	2,698	3,362	4,125	4,994	5,974	7,073	8,298
15	0,384	5,250	0,275	2,827	3,534	4,340	5,250	6,269	7,402	8,652
16	0,422	5,488	0,273	2,948	3,694	4,540	5,488	6,541	7,702	8,974
17	0,455	5,707	0,271	3,061	3,844	4,725	5,707	6,789	7,975	9,266
18	0,484	5,907	0,269	3,167	3,983	4,896	5,907	7,016	8,223	9,529
19	0,509	6,090	0,267	3,267	4,113	5,054	6,090	7,220	8,445	9,764
20	0,531	6,255	0,265	3,361	4,232	5,197	6,255	7,404	8,644	9,973
21	0,549	6,405	0,262	3,449	4,343	5,329	6,405	7,570	8,821	10,159
22	0,564	6,540	0,260	3,531	4,445	5,448	6,540	7,717	8,978	10,321
23	0,577	6,660	0,258	3,609	4,538	5,556	6,660	7,847	9,116	10,463
24	0,587	6,767	0,256	3,682	4,624	5,654	6,767	7,962	9,236	10,587

25	0,595	6,862	0,254	3,750	4,703	5,742	6,862	8,063	9,340	10,692
26	0,601	6,946	0,252	3,814	4,775	5,820	6,946	8,150	9,429	10,782
27	0,606	7,020	0,250	3,874	4,841	5,891	7,020	8,226	9,506	10,858
28	0,609	7,085	0,248	3,930	4,901	5,954	7,085	8,291	9,571	10,921
29	0,611	7,142	0,246	3,983	4,956	6,010	7,142	8,348	9,625	10,973
30	0,612	7,192	0,244	4,033	5,007	6,061	7,192	8,396	9,671	11,015
31	0,613	7,236	0,242	4,079	5,054	6,107	7,236	8,437	9,709	11,049
32	0,614	7,275	0,240	4,122	5,096	6,148	7,275	8,473	9,740	11,075
33	0,615	7,309	0,238	4,163	5,136	6,186	7,309	8,503	9,765	11,094
34	0,617	7,339	0,236	4,200	5,172	6,219	7,339	8,529	9,785	11,107
35	0,620	7,365	0,234	4,233	5,204	6,249	7,365	8,550	9,800	11,115
36	0,625	7,388	0,233	4,263	5,233	6,276	7,388	8,567	9,811	11,116
37	0,633	7,408	0,231	4,288	5,259	6,300	7,408	8,581	9,816	11,111
38	0,644	7,425	0,230	4,309	5,280	6,320	7,425	8,591	9,817	11,101
39	0,658	7,438	0,228	4,324	5,298	6,337	7,438	8,598	9,814	11,083
40	0,677	7,448	0,227	4,334	5,311	6,350	7,448	8,600	9,804	11,058
41	0,701	7,453	0,225	4,337	5,319	6,359	7,453	8,597	9,788	11,025
42	0,729	7,454	0,224	4,334	5,322	6,364	7,454	8,589	9,766	10,983
43	0,761	7,450	0,223	4,324	5,320	6,364	7,450	8,575	9,737	10,933
44	0,797	7,442	0,222	4,308	5,314	6,360	7,442	8,557	9,703	10,876
45	0,836	7,431	0,220	4,287	5,304	6,353	7,431	8,536	9,665	10,816
46	0,877	7,419	0,219	4,264	5,291	6,344	7,419	8,513	9,625	10,754
47	0,917	7,406	0,218	4,239	5,278	6,335	7,406	8,490	9,586	10,692
48	0,958	7,393	0,217	4,214	5,265	6,325	7,393	8,468	9,548	10,634
49	0,997	7,381	0,216	4,189	5,252	6,316	7,381	8,446	9,512	10,578
50	1,034	7,370	0,216	4,165	5,240	6,308	7,370	8,426	9,478	10,526
51	1,068	7,359	0,215	4,143	5,229	6,300	7,359	8,407	9,447	10,478
52	1,099	7,348	0,214	4,124	5,219	6,293	7,348	8,389	9,417	10,434
53	1,125	7,338	0,213	4,108	5,211	6,286	7,338	8,372	9,390	10,394
54	1,145	7,328	0,212	4,097	5,205	6,280	7,328	8,355	9,364	10,358
55	1,160	7,318	0,211	4,091	5,201	6,274	7,318	8,339	9,340	10,324
56	1,170	7,307	0,211	4,089	5,198	6,268	7,307	8,322	9,316	10,292
57	1,176	7,294	0,210	4,090	5,195	6,260	7,294	8,302	9,290	10,259
58	1,179	7,278	0,209	4,092	5,191	6,250	7,278	8,280	9,261	10,224
59	1,180	7,259	0,208	4,093	5,186	6,238	7,259	8,255	9,229	10,185
60	1,180	7,236	0,207	4,094	5,178	6,223	7,236	8,225	9,193	10,142
61	1,180	7,211	0,207	4,093	5,169	6,205	7,211	8,192	9,152	10,095
62	1,179	7,182	0,206	4,091	5,157	6,185	7,182	8,156	9,109	10,044
63	1,179	7,152	0,205	4,087	5,144	6,163	7,152	8,117	9,062	9,990
64	1,179	7,119	0,204	4,082	5,129	6,139	7,119	8,076	9,013	9,933
65	1,180	7,086	0,203	4,076	5,113	6,114	7,086	8,034	8,963	9,875
66	1,181	7,051	0,202	4,068	5,096	6,088	7,051	7,991	8,912	9,815
67	1,183	7,016	0,201	4,059	5,079	6,062	7,016	7,948	8,859	9,754
68	1,186	6,981	0,201	4,049	5,060	6,035	6,981	7,904	8,807	9,693
69	1,188	6,944	0,200	4,039	5,041	6,007	6,944	7,859	8,753	9,631
70	1,191	6,907	0,199	4,027	5,021	5,978	6,907	7,813	8,698	9,567
71	1,194	6,869	0,198	4,014	5,000	5,949	6,869	7,765	8,642	9,502
72	1,198	6,829	0,197	4,001	4,978	5,918	6,829	7,717	8,585	9,436
73	1,201	6,789	0,197	3,987	4,955	5,886	6,789	7,668	8,527	9,369
74	1,205	6,748	0,196	3,972	4,932	5,854	6,748	7,618	8,468	9,301

75	1,208	6,707	0,195	3,957	4,908	5,822	6,707	7,568	8,409	9,232
76	1,211	6,665	0,194	3,942	4,884	5,789	6,665	7,517	8,349	9,164
77	1,214	6,623	0,193	3,928	4,861	5,756	6,623	7,466	8,289	9,095
78	1,217	6,581	0,193	3,913	4,836	5,723	6,581	7,415	8,230	9,027
79	1,220	6,539	0,192	3,897	4,812	5,690	6,539	7,364	8,170	8,958
80	1,222	6,497	0,191	3,882	4,788	5,657	6,497	7,313	8,110	8,889
81	1,225	6,454	0,190	3,867	4,763	5,623	6,454	7,262	8,050	8,821

Tabelle 9.3 Sauerstoffpuls an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, weiblich

Age	L	M	S	P3	P10	P25	P50	P75	P90	P97
5	0,426	2,955	0,234	1,751	2,113	2,514	2,955	3,438	3,963	4,532
6	0,396	3,575	0,234	2,131	2,563	3,043	3,575	4,159	4,797	5,491
7	0,365	4,199	0,233	2,518	3,019	3,578	4,199	4,885	5,638	6,460
8	0,335	4,826	0,233	2,911	3,479	4,116	4,826	5,614	6,482	7,436
9	0,303	5,450	0,232	3,306	3,939	4,652	5,450	6,339	7,324	8,411
10	0,271	6,065	0,231	3,700	4,396	5,181	6,065	7,054	8,155	9,377
11	0,238	6,659	0,231	4,086	4,839	5,693	6,659	7,744	8,958	10,313
12	0,207	7,210	0,230	4,448	5,254	6,171	7,210	8,384	9,705	11,185
13	0,178	7,703	0,229	4,777	5,627	6,598	7,703	8,956	10,372	11,967
14	0,150	8,127	0,228	5,064	5,952	6,968	8,127	9,447	10,945	12,641
15	0,123	8,480	0,228	5,309	6,225	7,276	8,480	9,855	11,422	13,202
16	0,098	8,767	0,227	5,514	6,451	7,529	8,767	10,187	11,810	13,662
17	0,075	9,008	0,226	5,689	6,642	7,742	9,008	10,463	12,133	14,046
18	0,052	9,217	0,225	5,846	6,812	7,929	9,217	10,703	12,414	14,382
19	0,030	9,406	0,224	5,989	6,966	8,098	9,406	10,919	12,666	14,683
20	0,012	9,584	0,223	6,124	7,112	8,257	9,584	11,121	12,901	14,962
21	-0,003	9,756	0,222	6,254	7,253	8,412	9,756	11,317	13,127	15,228
22	-0,013	9,928	0,222	6,381	7,392	8,565	9,928	11,510	13,349	15,486
23	-0,021	10,097	0,221	6,506	7,529	8,717	10,097	11,701	13,566	15,736
24	-0,025	10,263	0,220	6,626	7,662	8,865	10,263	11,887	13,776	15,973
25	-0,026	10,420	0,219	6,740	7,789	9,007	10,420	12,062	13,972	16,192
26	-0,025	10,567	0,218	6,846	7,907	9,139	10,567	12,225	14,151	16,389
27	-0,020	10,703	0,217	6,943	8,017	9,261	10,703	12,375	14,314	16,564
28	-0,013	10,827	0,216	7,031	8,117	9,373	10,827	12,509	14,457	16,712
29	-0,003	10,935	0,215	7,108	8,205	9,472	10,935	12,625	14,577	16,832
30	0,009	11,028	0,215	7,175	8,282	9,558	11,028	12,723	14,675	16,924
31	0,023	11,107	0,213	7,232	8,347	9,631	11,107	12,803	14,751	16,988
32	0,039	11,170	0,212	7,277	8,402	9,691	11,170	12,865	14,805	17,024
33	0,058	11,217	0,211	7,312	8,443	9,737	11,217	12,907	14,834	17,031
34	0,079	11,243	0,210	7,332	8,469	9,766	11,243	12,925	14,835	17,003
35	0,100	11,248	0,209	7,339	8,479	9,776	11,248	12,917	14,806	16,940
36	0,123	11,233	0,208	7,333	8,474	9,768	11,233	12,886	14,750	16,846
37	0,145	11,201	0,206	7,317	8,457	9,747	11,201	12,836	14,672	16,728
38	0,166	11,161	0,205	7,297	8,436	9,719	11,161	12,778	14,585	16,600
39	0,187	11,122	0,204	7,279	8,415	9,692	11,122	12,719	14,498	16,474
40	0,206	11,090	0,202	7,267	8,401	9,671	11,090	12,669	14,421	16,361
41	0,222	11,068	0,201	7,264	8,396	9,660	11,068	12,631	14,360	16,267
42	0,237	11,059	0,200	7,271	8,401	9,661	11,059	12,607	14,315	16,195

43	0,248	11,063	0,198	7,290	8,418	9,672	11,063	12,598	14,288	16,143
44	0,258	11,076	0,197	7,316	8,443	9,693	11,076	12,600	14,274	16,109
45	0,266	11,096	0,195	7,349	8,474	9,720	11,096	12,610	14,270	16,085
46	0,272	11,122	0,194	7,388	8,510	9,753	11,122	12,626	14,273	16,072
47	0,277	11,154	0,192	7,431	8,552	9,791	11,154	12,649	14,284	16,067
48	0,283	11,193	0,190	7,480	8,600	9,836	11,193	12,681	14,304	16,072
49	0,289	11,241	0,189	7,535	8,654	9,888	11,241	12,721	14,334	16,088
50	0,296	11,294	0,187	7,593	8,714	9,945	11,294	12,768	14,371	16,111
51	0,305	11,351	0,186	7,654	8,775	10,005	11,351	12,817	14,410	16,136
52	0,316	11,406	0,184	7,713	8,835	10,065	11,406	12,865	14,447	16,156
53	0,330	11,456	0,182	7,768	8,892	10,120	11,456	12,907	14,475	16,166
54	0,346	11,498	0,181	7,816	8,941	10,167	11,498	12,938	14,491	16,162
55	0,365	11,530	0,179	7,857	8,983	10,206	11,530	12,958	14,494	16,140
56	0,388	11,551	0,177	7,889	9,016	10,235	11,551	12,965	14,481	16,101
57	0,414	11,560	0,175	7,912	9,039	10,254	11,560	12,958	14,451	16,041
58	0,443	11,552	0,174	7,924	9,049	10,258	11,552	12,933	14,401	15,957
59	0,476	11,526	0,172	7,921	9,045	10,246	11,526	12,886	14,325	15,844
60	0,512	11,479	0,170	7,904	9,023	10,215	11,479	12,815	14,222	15,700
61	0,551	11,408	0,168	7,869	8,983	10,163	11,408	12,716	14,089	15,524
62	0,593	11,313	0,166	7,819	8,925	10,090	11,313	12,593	13,927	15,316
63	0,637	11,199	0,164	7,754	8,851	10,000	11,199	12,446	13,741	15,081
64	0,682	11,069	0,162	7,680	8,766	9,896	11,069	12,283	13,537	14,828
65	0,728	10,929	0,160	7,599	8,672	9,783	10,929	12,109	13,321	14,563
66	0,775	10,781	0,157	7,513	8,572	9,662	10,781	11,926	13,096	14,291
67	0,823	10,627	0,155	7,423	8,468	9,537	10,627	11,738	12,867	14,014
68	0,871	10,471	0,153	7,332	8,362	9,409	10,471	11,547	12,637	13,738
69	0,920	10,314	0,151	7,241	8,256	9,280	10,314	11,357	12,407	13,464
70	0,969	10,158	0,149	7,151	8,149	9,152	10,158	11,167	12,179	13,194
71	1,018	10,002	0,147	7,061	8,043	9,023	10,002	10,978	11,953	12,927
72	1,067	9,846	0,144	6,971	7,937	8,895	9,846	10,791	11,730	12,664
73	1,116	9,691	0,142	6,883	7,831	8,767	9,691	10,604	11,509	12,406
74	1,166	9,536	0,140	6,795	7,726	8,639	9,536	10,419	11,291	12,151

Tabelle 9.4 Sauerstoffpuls an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, männlich

Age	L	M	S	P3	P10	P25	P50	P75	P90	P97
5	0,475	3,231	0,223	1,955	2,343	2,768	3,231	3,731	4,269	4,845
6	0,389	4,069	0,222	2,497	2,970	3,493	4,069	4,700	5,388	6,133
7	0,303	4,911	0,221	3,053	3,605	4,223	4,911	5,674	6,516	7,441
8	0,219	5,760	0,220	3,623	4,251	4,961	5,760	6,656	7,658	8,773
9	0,138	6,625	0,219	4,213	4,914	5,715	6,625	7,657	8,825	10,144
10	0,062	7,513	0,218	4,825	5,600	6,490	7,513	8,685	10,027	11,562
11	-0,009	8,422	0,217	5,456	6,305	7,286	8,422	9,737	11,259	13,022
12	-0,073	9,343	0,216	6,100	7,021	8,093	9,343	10,801	12,507	14,506
13	-0,130	10,259	0,215	6,745	7,738	8,898	10,259	11,860	13,749	15,985
14	-0,178	11,150	0,214	7,376	8,437	9,682	11,150	12,887	14,953	17,419
15	-0,217	11,990	0,213	7,972	9,098	10,423	11,990	13,854	16,082	18,762
16	-0,246	12,762	0,212	8,523	9,708	11,105	12,762	14,739	17,112	19,980
17	-0,265	13,461	0,211	9,021	10,261	11,724	13,461	15,537	18,035	21,063
18	-0,276	14,086	0,210	9,468	10,757	12,279	14,086	16,248	18,850	22,010

19	-0,279	14,642	0,209	9,864	11,199	12,773	14,642	16,876	19,565	22,826
20	-0,276	15,133	0,208	10,214	11,590	13,211	15,133	17,427	20,184	23,522
21	-0,266	15,565	0,206	10,519	11,933	13,596	15,565	17,908	20,716	24,106
22	-0,251	15,941	0,205	10,783	12,232	13,933	15,941	18,323	21,169	24,589
23	-0,231	16,265	0,204	11,009	12,490	14,225	16,265	18,678	21,547	24,978
24	-0,206	16,542	0,203	11,199	12,710	14,474	16,542	18,977	21,858	25,283
25	-0,177	16,777	0,202	11,356	12,896	14,687	16,777	19,227	22,110	25,514
26	-0,144	16,976	0,201	11,486	13,052	14,867	16,976	19,435	22,310	25,681
27	-0,107	17,144	0,200	11,590	13,182	15,019	17,144	19,607	22,467	25,796
28	-0,067	17,285	0,199	11,674	13,290	15,148	17,285	19,748	22,588	25,868
29	-0,025	17,405	0,198	11,740	13,381	15,257	17,405	19,863	22,679	25,906
30	0,018	17,507	0,197	11,792	13,457	15,351	17,507	19,959	22,747	25,918
31	0,063	17,594	0,196	11,833	13,521	15,432	17,594	20,038	22,798	25,910
32	0,108	17,671	0,195	11,865	13,576	15,503	17,671	20,105	22,834	25,890
33	0,152	17,738	0,194	11,891	13,623	15,566	17,738	20,162	22,862	25,862
34	0,196	17,800	0,193	11,912	13,667	15,624	17,800	20,214	22,884	25,831
35	0,237	17,856	0,192	11,930	13,706	15,677	17,856	20,260	22,902	25,800
36	0,277	17,909	0,191	11,947	13,743	15,726	17,909	20,302	22,919	25,771
37	0,312	17,957	0,191	11,964	13,778	15,773	17,957	20,342	22,935	25,747
38	0,344	18,002	0,190	11,981	13,812	15,816	18,002	20,378	22,950	25,727
39	0,373	18,041	0,189	11,996	13,841	15,854	18,041	20,409	22,962	25,707
40	0,399	18,072	0,189	12,008	13,865	15,885	18,072	20,432	22,967	25,683
41	0,422	18,094	0,188	12,013	13,881	15,907	18,094	20,445	22,964	25,653
42	0,445	18,105	0,188	12,011	13,889	15,920	18,105	20,448	22,950	25,613
43	0,467	18,105	0,187	12,001	13,888	15,922	18,105	20,439	22,924	25,562
44	0,488	18,093	0,187	11,980	13,875	15,912	18,093	20,417	22,885	25,497
45	0,511	18,067	0,186	11,947	13,850	15,890	18,067	20,381	22,831	25,416
46	0,533	18,029	0,186	11,904	13,814	15,856	18,029	20,332	22,763	25,321
47	0,557	17,981	0,186	11,851	13,769	15,813	17,981	20,272	22,684	25,215
48	0,581	17,925	0,186	11,789	13,715	15,761	17,925	20,205	22,597	25,101
49	0,606	17,864	0,186	11,721	13,655	15,704	17,864	20,133	22,507	24,984
50	0,630	17,802	0,186	11,650	13,593	15,645	17,802	20,060	22,416	24,868
51	0,654	17,739	0,186	11,576	13,529	15,585	17,739	19,988	22,328	24,756
52	0,678	17,677	0,186	11,500	13,463	15,524	17,677	19,917	22,243	24,649
53	0,700	17,614	0,187	11,423	13,397	15,462	17,614	19,848	22,160	24,547
54	0,721	17,552	0,187	11,344	13,329	15,400	17,552	19,779	22,079	24,448
55	0,741	17,488	0,188	11,265	13,260	15,337	17,488	19,711	22,000	24,353
56	0,760	17,423	0,188	11,185	13,190	15,271	17,423	19,641	21,921	24,259
57	0,777	17,356	0,189	11,103	13,118	15,204	17,356	19,570	21,841	24,166
58	0,793	17,288	0,189	11,020	13,044	15,135	17,288	19,498	21,762	24,075
59	0,807	17,220	0,190	10,938	12,970	15,067	17,220	19,428	21,684	23,987
60	0,821	17,153	0,191	10,856	12,897	14,998	17,153	19,358	21,609	23,903
61	0,833	17,085	0,191	10,773	12,822	14,928	17,085	19,288	21,534	23,820
62	0,844	17,014	0,192	10,689	12,745	14,856	17,014	19,215	21,457	23,735
63	0,855	16,938	0,193	10,601	12,665	14,779	16,938	19,138	21,375	23,647
64	0,865	16,857	0,194	10,509	12,580	14,698	16,857	19,055	21,288	23,552
65	0,875	16,770	0,195	10,413	12,490	14,610	16,770	18,966	21,193	23,451
66	0,885	16,677	0,196	10,313	12,394	14,518	16,677	18,869	21,091	23,341
67	0,895	16,576	0,197	10,207	12,294	14,418	16,576	18,765	20,980	23,221
68	0,904	16,467	0,198	10,096	12,186	14,311	16,467	18,650	20,858	23,089

69	0,914	16,348	0,199	9,978	12,071	14,195	16,348	18,524	20,723	22,943
70	0,924	16,216	0,200	9,853	11,947	14,070	16,216	18,385	20,573	22,779
71	0,935	16,075	0,201	9,722	11,816	13,935	16,075	18,234	20,410	22,601
72	0,945	15,926	0,202	9,586	11,679	13,793	15,926	18,074	20,236	22,410
73	0,956	15,770	0,203	9,447	11,539	13,647	15,770	17,906	20,054	22,211
74	0,966	15,612	0,204	9,307	11,396	13,498	15,612	17,735	19,867	22,007
75	0,976	15,450	0,205	9,166	11,252	13,347	15,450	17,560	19,676	21,798
76	0,986	15,287	0,205	9,026	11,107	13,195	15,287	17,383	19,483	21,587
77	0,995	15,122	0,206	8,885	10,962	13,042	15,122	17,205	19,288	21,373
78	1,004	14,957	0,207	8,745	10,817	12,888	14,957	17,024	19,091	21,157
79	1,013	14,790	0,208	8,606	10,672	12,733	14,790	16,843	18,893	20,940
80	1,022	14,623	0,209	8,466	10,527	12,578	14,623	16,661	18,693	20,721
81	1,031	14,455	0,210	8,327	10,382	12,423	14,455	16,477	18,493	20,501

Tabelle 9.5 Sauerstoffpuls bei der Ausbelastung, weiblich

Age	L	M	S	P3	P10	P25	P50	P75	P90	P97
5	-0,571	3,276	0,214	2,233	2,515	2,856	3,276	3,803	4,476	5,356
6	-0,553	3,973	0,214	2,707	3,049	3,464	3,973	4,608	5,417	6,470
7	-0,535	4,673	0,213	3,182	3,586	4,075	4,673	5,418	6,361	7,583
8	-0,516	5,376	0,213	3,660	4,126	4,689	5,376	6,230	7,306	8,693
9	-0,497	6,080	0,212	4,136	4,666	5,303	6,080	7,041	8,249	9,795
10	-0,477	6,782	0,212	4,611	5,204	5,916	6,782	7,849	9,184	10,884
11	-0,455	7,471	0,211	5,077	5,732	6,518	7,471	8,641	10,098	11,942
12	-0,430	8,132	0,211	5,522	6,238	7,096	8,132	9,400	10,970	12,944
13	-0,400	8,749	0,210	5,934	6,710	7,635	8,749	10,105	11,775	13,857
14	-0,366	9,309	0,209	6,306	7,137	8,124	9,309	10,743	12,497	14,667
15	-0,330	9,806	0,209	6,632	7,514	8,559	9,806	11,307	13,129	15,364
16	-0,293	10,238	0,208	6,914	7,842	8,937	10,238	11,796	13,673	15,955
17	-0,257	10,615	0,207	7,158	8,127	9,267	10,615	12,219	14,140	16,456
18	-0,223	10,945	0,207	7,371	8,377	9,556	10,945	12,588	14,544	16,884
19	-0,191	11,231	0,206	7,554	8,593	9,807	11,231	12,907	14,891	17,247
20	-0,160	11,480	0,205	7,713	8,782	10,027	11,480	13,184	15,189	17,555
21	-0,129	11,700	0,205	7,852	8,948	10,220	11,700	13,427	15,448	17,818
22	-0,100	11,895	0,204	7,973	9,095	10,392	11,895	13,641	15,674	18,045
23	-0,072	12,068	0,203	8,080	9,224	10,544	12,068	13,831	15,872	18,241
24	-0,046	12,220	0,203	8,174	9,338	10,678	12,220	13,996	16,044	18,407
25	-0,021	12,351	0,202	8,253	9,437	10,794	12,351	14,138	16,190	18,546
26	0,003	12,462	0,202	8,320	9,520	10,893	12,462	14,257	16,310	18,657
27	0,026	12,555	0,201	8,375	9,590	10,975	12,555	14,356	16,407	18,743
28	0,048	12,631	0,201	8,419	9,646	11,043	12,631	14,434	16,482	18,804
29	0,069	12,690	0,200	8,452	9,690	11,096	12,690	14,494	16,536	18,842
30	0,091	12,734	0,200	8,475	9,723	11,137	12,734	14,538	16,571	18,859
31	0,112	12,766	0,199	8,490	9,747	11,166	12,766	14,567	16,590	18,858
32	0,133	12,787	0,199	8,497	9,761	11,186	12,787	14,584	16,595	18,842
33	0,155	12,798	0,198	8,497	9,768	11,197	12,798	14,588	16,586	18,810
34	0,178	12,797	0,198	8,488	9,766	11,198	12,797	14,580	16,563	18,762
35	0,201	12,786	0,197	8,473	9,755	11,189	12,786	14,561	16,527	18,699
36	0,222	12,765	0,197	8,451	9,738	11,172	12,765	14,530	16,478	18,625

37	0,243	12,736	0,197	8,424	9,714	11,147	12,736	14,490	16,421	18,541
38	0,261	12,701	0,196	8,395	9,686	11,118	12,701	14,445	16,359	18,455
39	0,276	12,665	0,196	8,367	9,658	11,088	12,665	14,398	16,297	18,371
40	0,289	12,629	0,196	8,340	9,631	11,058	12,629	14,353	16,238	18,293
41	0,297	12,595	0,195	8,316	9,606	11,029	12,595	14,311	16,184	18,224
42	0,303	12,564	0,195	8,296	9,583	11,003	12,564	14,272	16,137	18,164
43	0,305	12,535	0,195	8,280	9,564	10,980	12,535	14,238	16,095	18,114
44	0,305	12,509	0,195	8,265	9,545	10,957	12,509	14,206	16,058	18,071
45	0,302	12,484	0,195	8,252	9,529	10,937	12,484	14,177	16,025	18,035
46	0,298	12,461	0,194	8,241	9,513	10,917	12,461	14,151	15,997	18,005
47	0,294	12,441	0,194	8,231	9,500	10,900	12,441	14,129	15,973	17,980
48	0,289	12,423	0,194	8,223	9,487	10,885	12,423	14,109	15,953	17,961
49	0,284	12,408	0,195	8,215	9,477	10,872	12,408	14,093	15,937	17,946
50	0,280	12,394	0,195	8,207	9,467	10,860	12,394	14,079	15,923	17,934
51	0,277	12,381	0,195	8,198	9,456	10,847	12,381	14,065	15,909	17,922
52	0,276	12,365	0,195	8,186	9,442	10,832	12,365	14,049	15,893	17,906
53	0,276	12,345	0,195	8,170	9,425	10,814	12,345	14,028	15,871	17,882
54	0,279	12,320	0,195	8,147	9,402	10,790	12,320	14,001	15,840	17,848
55	0,285	12,289	0,195	8,119	9,373	10,761	12,289	13,966	15,801	17,803
56	0,294	12,250	0,196	8,083	9,338	10,725	12,250	13,924	15,752	17,744
57	0,306	12,203	0,196	8,040	9,295	10,681	12,203	13,871	15,690	17,668
58	0,322	12,146	0,196	7,986	9,243	10,627	12,146	13,806	15,612	17,573
59	0,342	12,076	0,196	7,921	9,179	10,562	12,076	13,726	15,517	17,455
60	0,367	11,991	0,197	7,843	9,103	10,484	11,991	13,629	15,401	17,312
61	0,397	11,891	0,197	7,751	9,013	10,392	11,891	13,513	15,262	17,141
62	0,432	11,775	0,197	7,645	8,910	10,286	11,775	13,379	15,100	16,941
63	0,472	11,642	0,197	7,525	8,793	10,165	11,642	13,226	14,916	16,714
64	0,517	11,497	0,197	7,394	8,665	10,033	11,497	13,058	14,714	16,465
65	0,566	11,342	0,198	7,253	8,528	9,892	11,342	12,878	14,498	16,201
66	0,619	11,181	0,198	7,105	8,386	9,745	11,181	12,692	14,274	15,926
67	0,674	11,017	0,198	6,953	8,240	9,596	11,017	12,501	14,045	15,646
68	0,731	10,852	0,198	6,798	8,093	9,445	10,852	12,309	13,815	15,366
69	0,790	10,687	0,198	6,643	7,945	9,295	10,687	12,118	13,585	15,087
70	0,849	10,523	0,198	6,487	7,799	9,146	10,523	11,928	13,358	14,812
71	0,909	10,360	0,199	6,331	7,654	8,998	10,360	11,739	13,133	14,541
72	0,968	10,199	0,199	6,175	7,509	8,851	10,199	11,552	12,911	14,274
73	1,028	10,038	0,199	6,020	7,366	8,705	10,038	11,366	12,690	14,010
74	1,088	9,878	0,199	5,863	7,222	8,559	9,878	11,181	12,470	13,749

Tabelle 9.6 Sauerstoffpuls bei der Ausbelastung, männlich

Age	L	M	S	P3	P10	P25	P50	P75	P90	P97
5	-0,394	3,206	0,241	2,062	2,369	2,743	3,206	3,784	4,519	5,469
6	-0,396	4,188	0,239	2,704	3,103	3,589	4,188	4,936	5,885	7,110
7	-0,398	5,174	0,237	3,353	3,843	4,440	5,174	6,090	7,249	8,742
8	-0,400	6,174	0,235	4,016	4,598	5,305	6,174	7,256	8,623	10,380
9	-0,401	7,199	0,232	4,700	5,375	6,194	7,199	8,449	10,024	12,045
10	-0,403	8,256	0,230	5,410	6,180	7,113	8,256	9,675	11,461	13,746
11	-0,405	9,341	0,228	6,144	7,010	8,059	9,341	10,930	12,926	15,476

12	-0,407	10,442	0,226	6,894	7,857	9,020	10,442	12,200	14,405	17,215
13	-0,409	11,538	0,224	7,647	8,704	9,981	11,538	13,460	15,867	18,927
14	-0,410	12,605	0,222	8,386	9,535	10,919	12,605	14,683	17,278	20,571
15	-0,409	13,618	0,220	9,092	10,327	11,813	13,618	15,837	18,602	22,100
16	-0,405	14,556	0,217	9,752	11,066	12,644	14,556	16,900	19,812	23,480
17	-0,397	15,410	0,215	10,359	11,745	13,404	15,410	17,862	20,895	24,698
18	-0,384	16,179	0,213	10,909	12,360	14,092	16,179	18,720	21,849	25,749
19	-0,366	16,865	0,210	11,401	12,911	14,708	16,865	19,478	22,677	26,639
20	-0,341	17,472	0,208	11,838	13,402	15,256	17,472	20,141	23,386	27,373
21	-0,310	18,004	0,206	12,221	13,835	15,740	18,004	20,714	23,985	27,966
22	-0,273	18,467	0,204	12,554	14,214	16,164	18,467	21,205	24,481	28,431
23	-0,231	18,865	0,201	12,839	14,541	16,531	18,865	21,620	24,886	28,780
24	-0,183	19,205	0,199	13,080	14,822	16,846	19,205	21,965	25,207	29,030
25	-0,131	19,492	0,197	13,281	15,061	17,115	19,492	22,249	25,455	29,193
26	-0,074	19,732	0,195	13,446	15,262	17,343	19,732	22,479	25,640	29,285
27	-0,015	19,933	0,192	13,581	15,430	17,536	19,933	22,664	25,775	29,320
28	0,048	20,100	0,190	13,690	15,572	17,699	20,100	22,811	25,866	29,310
29	0,112	20,240	0,188	13,777	15,691	17,837	20,240	22,926	25,924	29,265
30	0,177	20,355	0,186	13,846	15,790	17,954	20,355	23,015	25,954	29,196
31	0,243	20,451	0,184	13,900	15,874	18,053	20,451	23,083	25,964	29,109
32	0,309	20,532	0,182	13,943	15,945	18,139	20,532	23,135	25,958	29,010
33	0,374	20,599	0,181	13,976	16,006	18,212	20,599	23,173	25,940	28,905
34	0,437	20,656	0,179	14,002	16,059	18,276	20,656	23,201	25,915	28,798
35	0,498	20,703	0,177	14,021	16,104	18,331	20,703	23,220	25,882	28,689
36	0,557	20,741	0,176	14,035	16,141	18,377	20,741	23,231	25,844	28,581
37	0,613	20,770	0,174	14,043	16,172	18,416	20,770	23,233	25,802	28,473
38	0,665	20,791	0,173	14,047	16,196	18,446	20,791	23,228	25,754	28,366
39	0,714	20,801	0,171	14,045	16,212	18,466	20,801	23,213	25,699	28,256
40	0,761	20,799	0,170	14,035	16,219	18,475	20,799	23,187	25,636	28,141
41	0,805	20,785	0,169	14,017	16,215	18,472	20,785	23,150	25,562	28,020
42	0,847	20,761	0,168	13,990	16,201	18,459	20,761	23,102	25,480	27,893
43	0,887	20,726	0,167	13,955	16,178	18,436	20,726	23,045	25,391	27,761
44	0,927	20,682	0,166	13,910	16,145	18,403	20,682	22,979	25,293	27,623
45	0,965	20,627	0,165	13,855	16,102	18,360	20,627	22,903	25,186	27,477
46	1,004	20,563	0,165	13,790	16,049	18,306	20,563	22,818	25,072	27,326
47	1,043	20,492	0,164	13,716	15,988	18,246	20,492	22,727	24,953	27,171
48	1,082	20,417	0,164	13,635	15,921	18,180	20,417	22,633	24,832	27,016
49	1,121	20,340	0,163	13,547	15,849	18,111	20,340	22,539	24,713	26,863
50	1,160	20,264	0,163	13,456	15,776	18,042	20,264	22,447	24,597	26,718
51	1,199	20,191	0,163	13,361	15,701	17,974	20,191	22,360	24,488	26,579
52	1,238	20,119	0,163	13,263	15,626	17,906	20,119	22,275	24,383	26,448
53	1,278	20,049	0,163	13,161	15,549	17,838	20,049	22,193	24,282	26,321
54	1,317	19,977	0,163	13,054	15,468	17,768	19,977	22,111	24,181	26,197
55	1,357	19,904	0,163	12,941	15,384	17,696	19,904	22,027	24,080	26,072
56	1,396	19,827	0,163	12,822	15,296	17,620	19,827	21,941	23,977	25,947
57	1,436	19,748	0,164	12,698	15,204	17,540	19,748	21,853	23,873	25,820
58	1,475	19,665	0,164	12,567	15,107	17,457	19,665	21,761	23,765	25,692
59	1,514	19,579	0,164	12,431	15,006	17,370	19,579	21,667	23,655	25,562
60	1,553	19,490	0,165	12,289	14,901	17,280	19,490	21,569	23,543	25,429
61	1,591	19,395	0,165	12,139	14,790	17,184	19,395	21,466	23,424	25,291

62	1,630	19,293	0,166	11,981	14,672	17,081	19,293	21,355	23,299	25,145
63	1,668	19,183	0,166	11,813	14,546	16,971	19,183	21,237	23,165	24,991
64	1,706	19,064	0,167	11,636	14,412	16,852	19,064	21,108	23,021	24,827
65	1,744	18,934	0,167	11,448	14,269	16,723	18,934	20,967	22,863	24,649
66	1,782	18,789	0,168	11,248	14,113	16,581	18,789	20,811	22,689	24,453
67	1,820	18,628	0,169	11,036	13,946	16,425	18,628	20,637	22,496	24,237
68	1,857	18,450	0,169	10,810	13,764	16,253	18,450	20,443	22,281	23,998
69	1,894	18,253	0,170	10,572	13,570	16,065	18,253	20,229	22,045	23,736
70	1,931	18,038	0,171	10,320	13,361	15,861	18,038	19,994	21,786	23,450
71	1,968	17,808	0,172	10,058	13,142	15,644	17,808	19,742	21,508	23,144
72	2,005	17,566	0,172	9,787	12,914	15,417	17,566	19,477	21,217	22,823
73	2,042	17,315	0,173	9,510	12,681	15,183	17,315	19,203	20,915	22,492
74	2,078	17,058	0,174	9,227	12,444	14,944	17,058	18,921	20,605	22,152
75	2,113	16,796	0,174	8,941	12,204	14,701	16,796	18,634	20,289	21,806
76	2,148	16,530	0,175	8,650	11,962	14,454	16,530	18,342	19,968	21,455
77	2,183	16,260	0,175	8,355	11,719	14,205	16,260	18,046	19,643	21,100
78	2,218	15,988	0,176	8,057	11,474	13,954	15,988	17,747	19,315	20,742
79	2,252	15,714	0,177	7,753	11,229	13,702	15,714	17,445	18,985	20,381
80	2,286	15,438	0,177	7,444	10,983	13,449	15,438	17,142	18,652	20,019
81	2,320	15,162	0,178	7,128	10,738	13,196	15,162	16,839	18,319	19,657

Tabelle 9.7 Herzfrequenz (HF) basal, weiblich

Age	L	M	S	P3	P10	P25	P50	P75	P90	P97
5	0,029	109,438	0,121	85,780	93,052	100,923	109,438	118,650	128,614	139,388
6	0,031	108,306	0,123	84,610	91,888	99,770	108,306	117,547	127,549	138,375
7	0,034	107,176	0,125	83,449	90,730	98,623	107,176	116,444	126,484	137,357
8	0,037	106,055	0,126	82,303	89,585	97,486	106,055	115,348	125,422	136,340
9	0,040	104,950	0,128	81,176	88,459	96,366	104,950	114,266	124,372	135,334
10	0,043	103,864	0,129	80,071	87,353	95,267	103,864	113,200	123,336	134,337
11	0,047	102,796	0,131	78,990	86,271	94,189	102,796	112,150	122,312	133,348
12	0,050	101,751	0,132	77,938	85,216	93,135	101,751	111,119	121,303	132,369
13	0,054	100,733	0,134	76,922	84,194	92,113	100,733	110,112	120,313	131,404
14	0,057	99,749	0,135	75,949	83,212	91,128	99,749	109,135	119,349	130,459
15	0,060	98,800	0,137	75,022	82,274	90,182	98,800	108,189	118,412	129,539
16	0,060	97,884	0,138	74,141	81,377	89,273	97,884	107,272	117,501	128,641
17	0,059	96,987	0,139	73,297	80,511	88,388	96,987	106,368	116,598	127,748
18	0,056	96,092	0,140	72,479	79,662	87,514	96,092	105,460	115,686	126,843
19	0,050	95,200	0,141	71,684	78,830	86,649	95,200	104,549	114,765	125,925
20	0,043	94,315	0,142	70,916	78,017	85,797	94,315	103,640	113,842	125,003
21	0,034	93,440	0,142	70,175	77,226	84,960	93,440	102,735	112,920	124,079
22	0,022	92,577	0,143	69,463	76,459	84,141	92,577	101,838	112,003	123,158
23	0,009	91,728	0,144	68,779	75,714	83,341	91,728	100,951	111,091	122,240
24	-0,005	90,893	0,144	68,122	74,992	82,559	90,893	100,074	110,187	121,328
25	-0,021	90,075	0,145	67,492	74,293	81,796	90,075	99,210	109,293	120,424
26	-0,037	89,273	0,145	66,886	73,617	81,054	89,273	98,360	108,410	119,529
27	-0,055	88,493	0,145	66,309	72,968	80,336	88,493	97,529	107,544	118,650
28	-0,073	87,743	0,146	65,763	72,349	79,648	87,743	96,727	106,706	117,797
29	-0,091	87,030	0,146	65,254	71,768	78,998	87,030	95,962	105,904	116,980

30	-0,110	86,361	0,146	64,785	71,228	78,390	86,361	95,240	105,145	116,205
31	-0,128	85,738	0,146	64,359	70,733	77,829	85,738	94,566	104,433	115,478
32	-0,147	85,167	0,146	63,977	70,285	77,317	85,167	93,945	103,776	114,804
33	-0,164	84,657	0,146	63,646	69,892	76,863	84,657	93,387	103,182	114,196
34	-0,182	84,215	0,146	63,371	69,559	76,474	84,215	92,900	102,663	113,662
35	-0,198	83,843	0,146	63,154	69,288	76,150	83,843	92,487	102,220	113,207
36	-0,214	83,539	0,146	62,989	69,075	75,890	83,539	92,144	101,850	112,825
37	-0,229	83,295	0,145	62,872	68,914	75,686	83,295	91,865	101,544	112,507
38	-0,241	83,102	0,145	62,792	68,797	75,530	83,102	91,638	101,290	112,237
39	-0,252	82,950	0,145	62,743	68,713	75,413	82,950	91,454	101,078	112,004
40	-0,260	82,833	0,144	62,717	68,659	75,327	82,833	91,306	100,901	111,801
41	-0,266	82,751	0,144	62,713	68,631	75,274	82,751	91,194	100,758	111,628
42	-0,269	82,703	0,143	62,730	68,629	75,250	82,703	91,118	100,649	111,482
43	-0,268	82,679	0,143	62,758	68,644	75,248	82,679	91,066	100,562	111,350
44	-0,264	82,668	0,143	62,788	68,666	75,257	82,668	91,027	100,484	111,219
45	-0,257	82,663	0,142	62,814	68,688	75,269	82,663	90,993	100,406	111,077
46	-0,246	82,656	0,142	62,830	68,704	75,279	82,656	90,956	100,321	110,919
47	-0,232	82,639	0,141	62,830	68,708	75,277	82,639	90,907	100,220	110,736
48	-0,215	82,607	0,141	62,811	68,694	75,261	82,607	90,842	100,097	110,523
49	-0,195	82,559	0,141	62,770	68,663	75,229	82,559	90,759	99,952	110,279
50	-0,172	82,494	0,140	62,709	68,613	75,179	82,494	90,658	99,785	110,008
51	-0,147	82,412	0,140	62,624	68,542	75,111	82,412	90,538	99,596	109,708
52	-0,119	82,310	0,140	62,516	68,451	75,024	82,310	90,397	99,383	109,381
53	-0,088	82,191	0,140	62,386	68,340	74,918	82,191	90,238	99,150	109,028
54	-0,056	82,057	0,139	62,238	68,213	74,798	82,057	90,064	98,900	108,657
55	-0,021	81,911	0,139	62,072	68,072	74,665	81,911	89,877	98,636	108,268
56	0,015	81,754	0,139	61,890	67,916	74,519	81,754	89,679	98,359	107,865
57	0,053	81,586	0,139	61,693	67,748	74,363	81,586	89,469	98,070	107,449
58	0,093	81,411	0,139	61,486	67,572	74,200	81,411	89,253	97,774	107,026
59	0,134	81,237	0,138	61,274	67,394	74,036	81,237	89,038	97,479	106,604
60	0,176	81,069	0,138	61,062	67,218	73,877	81,069	88,829	97,191	106,191
61	0,220	80,915	0,138	60,856	67,052	73,730	80,915	88,636	96,920	105,796
62	0,264	80,779	0,138	60,661	66,900	73,599	80,779	88,462	96,669	105,424
63	0,309	80,664	0,138	60,479	66,765	73,487	80,664	88,310	96,443	105,078
64	0,356	80,569	0,138	60,310	66,645	73,394	80,569	88,180	96,239	104,759
65	0,402	80,492	0,137	60,153	66,541	73,318	80,492	88,069	96,058	104,464
66	0,449	80,431	0,137	60,007	66,450	73,257	80,431	87,976	95,895	104,192
67	0,497	80,384	0,137	59,870	66,370	73,208	80,384	87,897	95,748	103,938
68	0,544	80,348	0,137	59,741	66,301	73,171	80,348	87,831	95,616	103,702
69	0,591	80,325	0,137	59,620	66,241	73,145	80,325	87,778	95,499	103,483
70	0,639	80,314	0,136	59,508	66,192	73,130	80,314	87,738	95,397	103,283
71	0,687	80,315	0,136	59,402	66,152	73,126	80,315	87,712	95,309	103,101
72	0,734	80,325	0,136	59,301	66,119	73,130	80,325	87,695	95,233	102,934
73	0,782	80,341	0,136	59,202	66,091	73,140	80,341	87,685	95,166	102,777
74	0,830	80,360	0,136	59,104	66,065	73,153	80,360	87,679	95,103	102,627

Tabelle 9.8 Herzfrequenz (HF) basal, männlich

Age	L	M	S	P3	P10	P25	P50	P75	P90	P97
5	-0,085	102,486	0,141	77,554	85,043	93,323	102,486	112,633	123,879	136,353
6	-0,053	100,946	0,142	76,185	83,638	91,864	100,946	110,979	122,067	134,328
7	-0,021	99,411	0,142	74,822	82,240	90,410	99,411	109,328	120,258	132,306
8	0,011	97,890	0,143	73,474	80,856	88,971	97,890	107,693	118,466	130,304
9	0,042	96,399	0,144	72,153	79,500	87,560	96,399	106,089	116,708	128,342
10	0,073	94,952	0,145	70,869	78,183	86,190	94,952	104,533	115,004	126,440
11	0,104	93,565	0,145	69,635	76,918	84,877	93,565	103,043	113,372	124,620
12	0,134	92,255	0,146	68,462	75,720	83,634	92,255	101,636	111,831	122,901
13	0,164	91,036	0,147	67,362	74,600	82,476	91,036	100,327	110,398	121,301
14	0,193	89,920	0,148	66,344	73,568	81,413	89,920	99,130	109,086	119,834
15	0,222	88,910	0,148	65,411	72,628	80,449	88,910	98,047	107,899	118,503
16	0,252	88,002	0,149	64,559	71,776	79,579	88,002	97,074	106,829	117,299
17	0,281	87,178	0,150	63,775	70,997	78,789	87,178	96,190	105,853	116,195
18	0,312	86,418	0,150	63,042	70,275	78,059	86,418	95,372	104,946	115,162
19	0,343	85,711	0,151	62,354	69,601	77,381	85,711	94,610	104,095	114,185
20	0,374	85,052	0,151	61,706	68,971	76,748	85,052	93,896	103,294	113,260
21	0,406	84,438	0,152	61,097	68,382	76,159	84,438	93,229	102,541	112,385
22	0,438	83,868	0,152	60,527	67,834	75,613	83,868	92,608	101,836	111,559
23	0,470	83,343	0,152	59,994	67,327	75,109	83,343	92,032	101,179	110,785
24	0,502	82,859	0,153	59,499	66,858	74,645	82,859	91,500	100,567	110,060
25	0,534	82,413	0,153	59,036	66,425	74,218	82,413	91,007	99,996	109,379
26	0,565	82,001	0,153	58,604	66,024	73,824	82,001	90,548	99,462	108,737
27	0,596	81,617	0,153	58,199	65,650	73,458	81,617	90,119	98,958	108,127
28	0,627	81,257	0,153	57,818	65,300	73,116	81,257	89,713	98,478	107,544
29	0,658	80,917	0,153	57,459	64,972	72,795	80,917	89,328	98,019	106,983
30	0,688	80,595	0,153	57,120	64,663	72,493	80,595	88,961	97,579	106,443
31	0,717	80,289	0,153	56,801	64,373	72,207	80,289	88,609	97,156	105,921
32	0,745	79,999	0,153	56,501	64,101	71,938	79,999	88,273	96,750	105,420
33	0,772	79,727	0,153	56,223	63,848	71,687	79,727	87,956	96,364	104,943
34	0,798	79,470	0,153	55,964	63,613	71,453	79,470	87,655	95,997	104,488
35	0,823	79,228	0,153	55,723	63,393	71,232	79,228	87,369	95,648	104,055
36	0,846	78,997	0,153	55,498	63,187	71,024	78,997	87,096	95,313	103,641
37	0,867	78,773	0,152	55,287	62,991	70,823	78,773	86,831	94,989	103,243
38	0,886	78,556	0,152	55,089	62,805	70,630	78,556	86,573	94,676	102,859
39	0,903	78,348	0,152	54,908	62,630	70,447	78,348	86,328	94,379	102,498
40	0,918	78,158	0,152	54,748	62,474	70,279	78,158	86,102	94,107	102,169
41	0,929	77,989	0,152	54,613	62,339	70,133	77,989	85,901	93,866	101,879
42	0,938	77,845	0,151	54,504	62,226	70,008	77,845	85,730	93,661	101,635
43	0,944	77,726	0,151	54,419	62,136	69,907	77,726	85,590	93,494	101,436
44	0,948	77,631	0,151	54,355	62,065	69,826	77,631	85,478	93,361	101,280
45	0,950	77,553	0,151	54,305	62,008	69,759	77,553	85,387	93,256	101,159
46	0,950	77,485	0,151	54,264	61,958	69,700	77,485	85,309	93,169	101,062
47	0,949	77,417	0,151	54,223	61,907	69,640	77,417	85,234	93,089	100,978
48	0,946	77,341	0,151	54,179	61,849	69,572	77,341	85,154	93,006	100,894
49	0,941	77,251	0,151	54,124	61,778	69,489	77,251	85,059	92,910	100,801
50	0,935	77,142	0,151	54,055	61,691	69,388	77,142	84,946	92,797	100,692

51	0,928	77,012	0,151	53,973	61,586	69,268	77,012	84,812	92,664	100,565
52	0,920	76,861	0,152	53,876	61,464	69,128	76,861	84,657	92,510	100,418
53	0,911	76,688	0,152	53,765	61,324	68,967	76,688	84,478	92,333	100,248
54	0,900	76,491	0,152	53,639	61,165	68,785	76,491	84,275	92,131	100,055
55	0,888	76,273	0,152	53,502	60,991	68,584	76,273	84,050	91,907	99,841
56	0,875	76,039	0,152	53,357	60,805	68,369	76,039	83,807	91,667	99,611
57	0,860	75,795	0,153	53,209	60,613	68,145	75,795	83,555	91,416	99,374
58	0,844	75,547	0,153	53,065	60,420	67,917	75,547	83,298	91,164	99,137
59	0,826	75,301	0,153	52,929	60,232	67,693	75,301	83,045	90,917	98,910
60	0,805	75,066	0,153	52,809	60,057	67,480	75,066	82,804	90,686	98,703
61	0,783	74,846	0,153	52,708	59,898	67,282	74,846	82,580	90,475	98,523
62	0,758	74,645	0,154	52,627	59,758	67,101	74,645	82,377	90,289	98,373
63	0,732	74,464	0,154	52,567	59,637	66,941	74,464	82,197	90,131	98,256
64	0,705	74,306	0,154	52,526	59,537	66,801	74,306	82,043	90,001	98,173
65	0,676	74,170	0,154	52,504	59,456	66,681	74,170	81,912	89,899	98,123
66	0,647	74,054	0,154	52,499	59,392	66,580	74,054	81,804	89,823	98,104
67	0,617	73,957	0,154	52,508	59,344	66,497	73,957	81,718	89,772	98,114
68	0,586	73,883	0,155	52,535	59,315	66,434	73,883	81,656	89,750	98,157
69	0,554	73,834	0,155	52,580	59,308	66,394	73,834	81,624	89,760	98,239
70	0,523	73,812	0,155	52,645	59,322	66,379	73,812	81,622	89,806	98,362
71	0,490	73,818	0,155	52,730	59,358	66,387	73,818	81,651	89,886	98,526
72	0,457	73,848	0,155	52,832	59,415	66,419	73,848	81,707	89,999	98,728
73	0,424	73,902	0,155	52,950	59,489	66,471	73,902	81,790	90,143	98,966
74	0,391	73,976	0,156	53,082	59,580	66,541	73,976	81,897	90,313	99,236
75	0,357	74,067	0,156	53,225	59,684	66,626	74,067	82,022	90,506	99,534
76	0,323	74,171	0,156	53,377	59,799	66,723	74,171	82,162	90,716	99,853
77	0,290	74,285	0,156	53,536	59,921	66,829	74,285	82,314	90,940	100,190
78	0,256	74,405	0,156	53,699	60,048	66,941	74,405	82,472	91,173	100,539
79	0,222	74,529	0,157	53,863	60,179	67,056	74,529	82,635	91,412	100,896
80	0,188	74,656	0,157	54,029	60,311	67,173	74,656	82,801	91,654	101,261
81	0,154	74,783	0,157	54,195	60,444	67,291	74,783	82,969	91,900	101,631

Tabelle 9.9 Herzfrequenz an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, weiblich

Age	L	M	S	P3	P10	P25	P50	P75	P90	P97
5	0,426	2,955	0,234	1,751	2,113	2,514	2,955	3,438	3,963	4,532
6	0,396	3,575	0,234	2,131	2,563	3,043	3,575	4,159	4,797	5,491
7	0,365	4,199	0,233	2,518	3,019	3,578	4,199	4,885	5,638	6,460
8	0,335	4,826	0,233	2,911	3,479	4,116	4,826	5,614	6,482	7,436
9	0,303	5,450	0,232	3,306	3,939	4,652	5,450	6,339	7,324	8,411
10	0,271	6,065	0,231	3,700	4,396	5,181	6,065	7,054	8,155	9,377
11	0,238	6,659	0,231	4,086	4,839	5,693	6,659	7,744	8,958	10,313
12	0,207	7,210	0,230	4,448	5,254	6,171	7,210	8,384	9,705	11,185
13	0,178	7,703	0,229	4,777	5,627	6,598	7,703	8,956	10,372	11,967
14	0,150	8,127	0,228	5,064	5,952	6,968	8,127	9,447	10,945	12,641
15	0,123	8,480	0,228	5,309	6,225	7,276	8,480	9,855	11,422	13,202
16	0,098	8,767	0,227	5,514	6,451	7,529	8,767	10,187	11,810	13,662
17	0,075	9,008	0,226	5,689	6,642	7,742	9,008	10,463	12,133	14,046

18	0,052	9,217	0,225	5,846	6,812	7,929	9,217	10,703	12,414	14,382
19	0,030	9,406	0,224	5,989	6,966	8,098	9,406	10,919	12,666	14,683
20	0,012	9,584	0,223	6,124	7,112	8,257	9,584	11,121	12,901	14,962
21	-0,003	9,756	0,222	6,254	7,253	8,412	9,756	11,317	13,127	15,228
22	-0,013	9,928	0,222	6,381	7,392	8,565	9,928	11,510	13,349	15,486
23	-0,021	10,097	0,221	6,506	7,529	8,717	10,097	11,701	13,566	15,736
24	-0,025	10,263	0,220	6,626	7,662	8,865	10,263	11,887	13,776	15,973
25	-0,026	10,420	0,219	6,740	7,789	9,007	10,420	12,062	13,972	16,192
26	-0,025	10,567	0,218	6,846	7,907	9,139	10,567	12,225	14,151	16,389
27	-0,020	10,703	0,217	6,943	8,017	9,261	10,703	12,375	14,314	16,564
28	-0,013	10,827	0,216	7,031	8,117	9,373	10,827	12,509	14,457	16,712
29	-0,003	10,935	0,215	7,108	8,205	9,472	10,935	12,625	14,577	16,832
30	0,009	11,028	0,215	7,175	8,282	9,558	11,028	12,723	14,675	16,924
31	0,023	11,107	0,213	7,232	8,347	9,631	11,107	12,803	14,751	16,988
32	0,039	11,170	0,212	7,277	8,402	9,691	11,170	12,865	14,805	17,024
33	0,058	11,217	0,211	7,312	8,443	9,737	11,217	12,907	14,834	17,031
34	0,079	11,243	0,210	7,332	8,469	9,766	11,243	12,925	14,835	17,003
35	0,100	11,248	0,209	7,339	8,479	9,776	11,248	12,917	14,806	16,940
36	0,123	11,233	0,208	7,333	8,474	9,768	11,233	12,886	14,750	16,846
37	0,145	11,201	0,206	7,317	8,457	9,747	11,201	12,836	14,672	16,728
38	0,166	11,161	0,205	7,297	8,436	9,719	11,161	12,778	14,585	16,600
39	0,187	11,122	0,204	7,279	8,415	9,692	11,122	12,719	14,498	16,474
40	0,206	11,090	0,202	7,267	8,401	9,671	11,090	12,669	14,421	16,361
41	0,222	11,068	0,201	7,264	8,396	9,660	11,068	12,631	14,360	16,267
42	0,237	11,059	0,200	7,271	8,401	9,661	11,059	12,607	14,315	16,195
43	0,248	11,063	0,198	7,290	8,418	9,672	11,063	12,598	14,288	16,143
44	0,258	11,076	0,197	7,316	8,443	9,693	11,076	12,600	14,274	16,109
45	0,266	11,096	0,195	7,349	8,474	9,720	11,096	12,610	14,270	16,085
46	0,272	11,122	0,194	7,388	8,510	9,753	11,122	12,626	14,273	16,072
47	0,277	11,154	0,192	7,431	8,552	9,791	11,154	12,649	14,284	16,067
48	0,283	11,193	0,190	7,480	8,600	9,836	11,193	12,681	14,304	16,072
49	0,289	11,241	0,189	7,535	8,654	9,888	11,241	12,721	14,334	16,088
50	0,296	11,294	0,187	7,593	8,714	9,945	11,294	12,768	14,371	16,111
51	0,305	11,351	0,186	7,654	8,775	10,005	11,351	12,817	14,410	16,136
52	0,316	11,406	0,184	7,713	8,835	10,065	11,406	12,865	14,447	16,156
53	0,330	11,456	0,182	7,768	8,892	10,120	11,456	12,907	14,475	16,166
54	0,346	11,498	0,181	7,816	8,941	10,167	11,498	12,938	14,491	16,162
55	0,365	11,530	0,179	7,857	8,983	10,206	11,530	12,958	14,494	16,140
56	0,388	11,551	0,177	7,889	9,016	10,235	11,551	12,965	14,481	16,101
57	0,414	11,560	0,175	7,912	9,039	10,254	11,560	12,958	14,451	16,041
58	0,443	11,552	0,174	7,924	9,049	10,258	11,552	12,933	14,401	15,957
59	0,476	11,526	0,172	7,921	9,045	10,246	11,526	12,886	14,325	15,844
60	0,512	11,479	0,170	7,904	9,023	10,215	11,479	12,815	14,222	15,700
61	0,551	11,408	0,168	7,869	8,983	10,163	11,408	12,716	14,089	15,524
62	0,593	11,313	0,166	7,819	8,925	10,090	11,313	12,593	13,927	15,316
63	0,637	11,199	0,164	7,754	8,851	10,000	11,199	12,446	13,741	15,081
64	0,682	11,069	0,162	7,680	8,766	9,896	11,069	12,283	13,537	14,828
65	0,728	10,929	0,160	7,599	8,672	9,783	10,929	12,109	13,321	14,563
66	0,775	10,781	0,157	7,513	8,572	9,662	10,781	11,926	13,096	14,291
67	0,823	10,627	0,155	7,423	8,468	9,537	10,627	11,738	12,867	14,014

68	0,871	10,471	0,153	7,332	8,362	9,409	10,471	11,547	12,637	13,738
69	0,920	10,314	0,151	7,241	8,256	9,280	10,314	11,357	12,407	13,464
70	0,969	10,158	0,149	7,151	8,149	9,152	10,158	11,167	12,179	13,194
71	1,018	10,002	0,147	7,061	8,043	9,023	10,002	10,978	11,953	12,927
72	1,067	9,846	0,144	6,971	7,937	8,895	9,846	10,791	11,730	12,664
73	1,116	9,691	0,142	6,883	7,831	8,767	9,691	10,604	11,509	12,406
74	1,166	9,536	0,140	6,795	7,726	8,639	9,536	10,419	11,291	12,151

Tabelle 9.10 Herzfrequenz an der ventilatorisch bestimmten Schwelle, männlich

Age	L	M	S	P3	P10	P25	P50	P75	P90	P97
5	0,475	3,231	0,223	1,955	2,343	2,768	3,231	3,731	4,269	4,845
6	0,389	4,069	0,222	2,497	2,970	3,493	4,069	4,700	5,388	6,133
7	0,303	4,911	0,221	3,053	3,605	4,223	4,911	5,674	6,516	7,441
8	0,219	5,760	0,220	3,623	4,251	4,961	5,760	6,656	7,658	8,773
9	0,138	6,625	0,219	4,213	4,914	5,715	6,625	7,657	8,825	10,144
10	0,062	7,513	0,218	4,825	5,600	6,490	7,513	8,685	10,027	11,562
11	-0,009	8,422	0,217	5,456	6,305	7,286	8,422	9,737	11,259	13,022
12	-0,073	9,343	0,216	6,100	7,021	8,093	9,343	10,801	12,507	14,506
13	-0,130	10,259	0,215	6,745	7,738	8,898	10,259	11,860	13,749	15,985
14	-0,178	11,150	0,214	7,376	8,437	9,682	11,150	12,887	14,953	17,419
15	-0,217	11,990	0,213	7,972	9,098	10,423	11,990	13,854	16,082	18,762
16	-0,246	12,762	0,212	8,523	9,708	11,105	12,762	14,739	17,112	19,980
17	-0,265	13,461	0,211	9,021	10,261	11,724	13,461	15,537	18,035	21,063
18	-0,276	14,086	0,210	9,468	10,757	12,279	14,086	16,248	18,850	22,010
19	-0,279	14,642	0,209	9,864	11,199	12,773	14,642	16,876	19,565	22,826
20	-0,276	15,133	0,208	10,214	11,590	13,211	15,133	17,427	20,184	23,522
21	-0,266	15,565	0,206	10,519	11,933	13,596	15,565	17,908	20,716	24,106
22	-0,251	15,941	0,205	10,783	12,232	13,933	15,941	18,323	21,169	24,589
23	-0,231	16,265	0,204	11,009	12,490	14,225	16,265	18,678	21,547	24,978
24	-0,206	16,542	0,203	11,199	12,710	14,474	16,542	18,977	21,858	25,283
25	-0,177	16,777	0,202	11,356	12,896	14,687	16,777	19,227	22,110	25,514
26	-0,144	16,976	0,201	11,486	13,052	14,867	16,976	19,435	22,310	25,681
27	-0,107	17,144	0,200	11,590	13,182	15,019	17,144	19,607	22,467	25,796
28	-0,067	17,285	0,199	11,674	13,290	15,148	17,285	19,748	22,588	25,868
29	-0,025	17,405	0,198	11,740	13,381	15,257	17,405	19,863	22,679	25,906
30	0,018	17,507	0,197	11,792	13,457	15,351	17,507	19,959	22,747	25,918
31	0,063	17,594	0,196	11,833	13,521	15,432	17,594	20,038	22,798	25,910
32	0,108	17,671	0,195	11,865	13,576	15,503	17,671	20,105	22,834	25,890
33	0,152	17,738	0,194	11,891	13,623	15,566	17,738	20,162	22,862	25,862
34	0,196	17,800	0,193	11,912	13,667	15,624	17,800	20,214	22,884	25,831
35	0,237	17,856	0,192	11,930	13,706	15,677	17,856	20,260	22,902	25,800
36	0,277	17,909	0,191	11,947	13,743	15,726	17,909	20,302	22,919	25,771
37	0,312	17,957	0,191	11,964	13,778	15,773	17,957	20,342	22,935	25,747
38	0,344	18,002	0,190	11,981	13,812	15,816	18,002	20,378	22,950	25,727
39	0,373	18,041	0,189	11,996	13,841	15,854	18,041	20,409	22,962	25,707
40	0,399	18,072	0,189	12,008	13,865	15,885	18,072	20,432	22,967	25,683
41	0,422	18,094	0,188	12,013	13,881	15,907	18,094	20,445	22,964	25,653
42	0,445	18,105	0,188	12,011	13,889	15,920	18,105	20,448	22,950	25,613

43	0,467	18,105	0,187	12,001	13,888	15,922	18,105	20,439	22,924	25,562
44	0,488	18,093	0,187	11,980	13,875	15,912	18,093	20,417	22,885	25,497
45	0,511	18,067	0,186	11,947	13,850	15,890	18,067	20,381	22,831	25,416
46	0,533	18,029	0,186	11,904	13,814	15,856	18,029	20,332	22,763	25,321
47	0,557	17,981	0,186	11,851	13,769	15,813	17,981	20,272	22,684	25,215
48	0,581	17,925	0,186	11,789	13,715	15,761	17,925	20,205	22,597	25,101
49	0,606	17,864	0,186	11,721	13,655	15,704	17,864	20,133	22,507	24,984
50	0,630	17,802	0,186	11,650	13,593	15,645	17,802	20,060	22,416	24,868
51	0,654	17,739	0,186	11,576	13,529	15,585	17,739	19,988	22,328	24,756
52	0,678	17,677	0,186	11,500	13,463	15,524	17,677	19,917	22,243	24,649
53	0,700	17,614	0,187	11,423	13,397	15,462	17,614	19,848	22,160	24,547
54	0,721	17,552	0,187	11,344	13,329	15,400	17,552	19,779	22,079	24,448
55	0,741	17,488	0,188	11,265	13,260	15,337	17,488	19,711	22,000	24,353
56	0,760	17,423	0,188	11,185	13,190	15,271	17,423	19,641	21,921	24,259
57	0,777	17,356	0,189	11,103	13,118	15,204	17,356	19,570	21,841	24,166
58	0,793	17,288	0,189	11,020	13,044	15,135	17,288	19,498	21,762	24,075
59	0,807	17,220	0,190	10,938	12,970	15,067	17,220	19,428	21,684	23,987
60	0,821	17,153	0,191	10,856	12,897	14,998	17,153	19,358	21,609	23,903
61	0,833	17,085	0,191	10,773	12,822	14,928	17,085	19,288	21,534	23,820
62	0,844	17,014	0,192	10,689	12,745	14,856	17,014	19,215	21,457	23,735
63	0,855	16,938	0,193	10,601	12,665	14,779	16,938	19,138	21,375	23,647
64	0,865	16,857	0,194	10,509	12,580	14,698	16,857	19,055	21,288	23,552
65	0,875	16,770	0,195	10,413	12,490	14,610	16,770	18,966	21,193	23,451
66	0,885	16,677	0,196	10,313	12,394	14,518	16,677	18,869	21,091	23,341
67	0,895	16,576	0,197	10,207	12,294	14,418	16,576	18,765	20,980	23,221
68	0,904	16,467	0,198	10,096	12,186	14,311	16,467	18,650	20,858	23,089
69	0,914	16,348	0,199	9,978	12,071	14,195	16,348	18,524	20,723	22,943
70	0,924	16,216	0,200	9,853	11,947	14,070	16,216	18,385	20,573	22,779
71	0,935	16,075	0,201	9,722	11,816	13,935	16,075	18,234	20,410	22,601
72	0,945	15,926	0,202	9,586	11,679	13,793	15,926	18,074	20,236	22,410
73	0,956	15,770	0,203	9,447	11,539	13,647	15,770	17,906	20,054	22,211
74	0,966	15,612	0,204	9,307	11,396	13,498	15,612	17,735	19,867	22,007
75	0,976	15,450	0,205	9,166	11,252	13,347	15,450	17,560	19,676	21,798
76	0,986	15,287	0,205	9,026	11,107	13,195	15,287	17,383	19,483	21,587
77	0,995	15,122	0,206	8,885	10,962	13,042	15,122	17,205	19,288	21,373
78	1,004	14,957	0,207	8,745	10,817	12,888	14,957	17,024	19,091	21,157
79	1,013	14,790	0,208	8,606	10,672	12,733	14,790	16,843	18,893	20,940
80	1,022	14,623	0,209	8,466	10,527	12,578	14,623	16,661	18,693	20,721
81	1,031	14,455	0,210	8,327	10,382	12,423	14,455	16,477	18,493	20,501

Tabelle 9.11 Herzfrequenz bei der Ausbelastung, weiblich

Age	L	M	S	P3	P10	P25	P50	P75	P90	P97
5	2,957	187,930	0,054	164,894	173,248	180,881	187,930	194,496	200,655	206,465
6	2,877	187,748	0,054	165,069	173,256	180,774	187,748	194,266	200,398	206,196
7	2,797	187,563	0,053	165,233	173,257	180,664	187,563	194,033	200,137	205,924
8	2,718	187,366	0,053	165,374	173,243	180,542	187,366	193,788	199,863	205,637
9	2,640	187,149	0,053	165,485	173,205	180,398	187,149	193,522	199,569	205,329
10	2,564	186,903	0,052	165,556	173,133	180,224	186,903	193,228	199,246	204,991

11	2,490	186,618	0,052	165,577	173,017	180,009	186,618	192,896	198,883	204,612
12	2,419	186,290	0,051	165,540	172,852	179,749	186,290	192,520	198,477	204,190
13	2,351	185,923	0,051	165,447	172,639	179,447	185,923	192,107	198,034	203,730
14	2,287	185,515	0,051	165,296	172,376	179,101	185,515	191,656	197,554	203,233
15	2,226	185,062	0,050	165,081	172,059	178,705	185,062	191,161	197,031	202,694
16	2,170	184,557	0,050	164,796	171,680	178,255	184,557	190,618	196,461	202,107
17	2,117	183,998	0,050	164,440	171,237	177,745	183,998	190,021	195,839	201,470
18	2,067	183,381	0,050	164,011	170,729	177,176	183,381	189,370	195,164	200,779
19	2,021	182,714	0,050	163,517	170,162	176,552	182,714	188,671	194,442	200,043
20	1,977	182,011	0,050	162,972	169,551	175,889	182,011	187,939	193,689	199,277
21	1,936	181,288	0,050	162,391	168,910	175,202	181,288	187,190	192,922	198,499
22	1,897	180,552	0,050	161,781	168,246	174,496	180,552	186,430	192,146	197,714
23	1,861	179,802	0,050	161,142	167,561	173,774	179,802	185,661	191,365	196,926
24	1,827	179,042	0,050	160,477	166,855	173,037	179,042	184,885	190,578	196,135
25	1,796	178,275	0,050	159,790	166,133	172,289	178,275	184,105	189,791	195,345
26	1,767	177,505	0,050	159,085	165,399	171,534	177,505	183,325	189,007	194,561
27	1,741	176,736	0,050	158,367	164,659	170,776	176,736	182,550	188,230	193,786
28	1,717	175,975	0,050	157,645	163,918	170,023	175,975	181,786	187,467	193,027
29	1,695	175,229	0,050	156,923	163,183	169,280	175,229	181,040	186,724	192,291
30	1,675	174,501	0,051	156,207	162,459	168,553	174,501	180,315	186,006	191,581
31	1,658	173,796	0,051	155,501	161,750	167,844	173,796	179,617	185,316	190,902
32	1,642	173,119	0,051	154,810	161,061	167,160	173,119	178,949	184,660	190,259
33	1,628	172,474	0,051	154,138	160,396	166,504	172,474	178,317	184,043	189,658
34	1,616	171,864	0,052	153,487	159,757	165,878	171,864	177,723	183,466	189,101
35	1,606	171,286	0,052	152,854	159,141	165,281	171,286	177,165	182,929	188,585
36	1,600	170,738	0,052	152,235	158,546	164,710	170,738	176,641	182,428	188,107
37	1,598	170,217	0,053	151,627	157,969	164,161	170,217	176,147	181,959	187,663
38	1,601	169,714	0,053	151,022	157,400	163,626	169,714	175,673	181,513	187,242
39	1,608	169,216	0,054	150,407	156,828	163,094	169,216	175,207	181,076	186,831
40	1,620	168,715	0,054	149,773	156,245	162,554	168,715	174,740	180,638	186,420
41	1,638	168,203	0,055	149,113	155,642	162,000	168,203	174,264	180,192	185,999
42	1,662	167,674	0,055	148,421	155,014	161,426	167,674	173,772	179,730	185,561
43	1,693	167,121	0,056	147,689	154,354	160,825	167,121	173,257	179,245	185,098
44	1,730	166,538	0,056	146,912	153,657	160,192	166,538	172,712	178,729	184,602
45	1,774	165,921	0,057	146,086	152,919	159,523	165,921	172,135	178,179	184,069
46	1,824	165,270	0,058	145,211	152,139	158,817	165,270	171,523	177,593	183,496
47	1,881	164,585	0,058	144,284	151,318	158,074	164,585	170,876	176,970	182,884
48	1,944	163,865	0,059	143,308	150,455	157,295	163,865	170,196	176,311	182,233
49	2,012	163,113	0,060	142,284	149,554	156,482	163,113	169,481	175,616	181,541
50	2,086	162,330	0,060	141,215	148,616	155,637	162,330	168,735	174,887	180,813
51	2,165	161,516	0,061	140,099	147,641	154,760	161,516	167,957	174,123	180,045
52	2,249	160,670	0,062	138,935	146,630	153,850	160,670	167,146	173,323	179,236
53	2,338	159,790	0,063	137,723	145,579	152,906	159,790	166,298	172,483	178,383
54	2,432	158,876	0,064	136,460	144,490	151,927	158,876	165,415	171,602	177,486
55	2,531	157,929	0,064	135,148	143,363	150,915	157,929	164,495	170,683	176,546
56	2,633	156,949	0,065	133,785	142,200	149,871	156,949	163,541	169,726	175,562
57	2,740	155,939	0,066	132,372	141,000	148,796	155,939	162,553	168,730	174,537
58	2,850	154,897	0,067	130,909	139,765	147,690	154,897	161,532	167,697	173,470
59	2,964	153,827	0,068	129,396	138,498	146,556	153,827	160,479	166,630	172,364
60	3,081	152,732	0,068	127,835	137,201	145,398	152,732	159,398	165,530	171,223

61	3,200	151,614	0,069	126,227	135,877	144,218	151,614	158,292	164,402	170,049
62	3,321	150,474	0,070	124,572	134,527	143,016	150,474	157,161	163,245	168,845
63	3,444	149,314	0,071	122,870	133,154	141,796	149,314	156,006	162,062	167,610
64	3,568	148,134	0,072	121,118	131,757	140,557	148,134	154,828	160,852	166,347
65	3,693	146,934	0,073	119,312	130,336	139,300	146,934	153,628	159,617	165,056
66	3,820	145,715	0,073	117,448	128,891	138,025	145,715	152,406	158,358	163,738
67	3,948	144,481	0,074	115,523	127,426	136,736	144,481	151,165	157,077	162,397
68	4,077	143,234	0,075	113,533	125,941	135,434	143,234	149,910	155,779	161,038
69	4,205	141,976	0,076	111,473	124,440	134,124	141,976	148,641	154,466	159,662
70	4,334	140,712	0,077	109,336	122,925	132,807	140,712	147,364	153,143	158,275
71	4,463	139,443	0,078	107,111	121,397	131,487	139,443	146,080	151,812	156,880
72	4,592	138,171	0,078	104,779	119,856	130,164	138,171	144,792	150,476	155,479
73	4,720	136,898	0,079	102,318	118,302	128,840	136,898	143,501	149,135	154,073
74	4,849	135,624	0,080	99,696	116,735	127,516	135,624	142,207	147,791	152,664

Tabelle 9.12 Herzfrequenz bei der Ausbelastung, männlich

Age	L	M	S	P3	P10	P25	P50	P75	P90	P97
5	3,271	183,549	0,058	158,554	167,845	176,095	183,549	190,373	196,683	202,564
6	3,237	183,400	0,058	158,364	167,657	175,923	183,400	190,252	196,592	202,505
7	3,202	183,254	0,059	158,176	167,472	175,753	183,254	190,133	196,505	202,451
8	3,168	183,105	0,059	157,982	167,283	175,580	183,105	190,014	196,416	202,396
9	3,135	182,949	0,059	157,772	167,081	175,398	182,949	189,888	196,324	202,338
10	3,101	182,785	0,060	157,543	166,865	175,205	182,785	189,756	196,227	202,278
11	3,069	182,616	0,060	157,296	166,636	175,004	182,616	189,623	196,132	202,223
12	3,037	182,444	0,060	157,028	166,394	174,794	182,444	189,490	196,040	202,173
13	3,005	182,260	0,061	156,734	166,132	174,570	182,260	189,350	195,944	202,121
14	2,974	182,056	0,061	156,406	165,841	174,320	182,056	189,191	195,832	202,056
15	2,943	181,818	0,062	156,034	165,510	174,035	181,818	189,002	195,692	201,965
16	2,912	181,536	0,062	155,609	165,130	173,703	181,536	188,770	195,511	201,834
17	2,881	181,201	0,063	155,127	164,695	173,317	181,201	188,487	195,279	201,653
18	2,850	180,811	0,063	154,588	164,203	172,876	180,811	188,149	194,993	201,419
19	2,819	180,371	0,064	153,997	163,661	172,384	180,371	187,762	194,658	201,136
20	2,789	179,885	0,064	153,359	163,072	171,846	179,885	187,328	194,276	200,805
21	2,760	179,359	0,065	152,679	162,442	171,268	179,359	186,853	193,853	200,434
22	2,732	178,803	0,066	151,967	161,781	170,659	178,803	186,350	193,401	200,034
23	2,704	178,227	0,066	151,232	161,099	170,031	178,227	185,827	192,930	199,614
24	2,678	177,637	0,067	150,480	160,401	169,387	177,637	185,290	192,447	199,182
25	2,652	177,038	0,068	149,714	159,691	168,733	177,038	184,745	191,954	198,742
26	2,626	176,432	0,068	148,939	158,974	168,071	176,432	184,193	191,456	198,297
27	2,601	175,821	0,069	148,158	158,250	167,405	175,821	183,638	190,955	197,848
28	2,577	175,207	0,070	147,372	157,523	166,735	175,207	183,079	190,450	197,396
29	2,552	174,589	0,071	146,584	156,792	166,061	174,589	182,515	189,940	196,940
30	2,528	173,966	0,071	145,794	156,059	165,383	173,966	181,947	189,426	196,479
31	2,504	173,340	0,072	145,006	155,324	164,702	173,340	181,374	188,906	196,012
32	2,479	172,706	0,073	144,218	154,586	164,017	172,706	180,793	188,378	195,535
33	2,454	172,063	0,073	143,431	153,845	163,324	172,063	180,200	187,836	195,045
34	2,428	171,406	0,074	142,644	153,098	162,620	171,406	179,591	187,276	194,534
35	2,402	170,732	0,075	141,859	152,344	161,904	170,732	178,963	186,694	194,001

36	2,374	170,044	0,075	141,078	151,586	161,178	170,044	178,316	186,092	193,446
37	2,344	169,339	0,076	140,299	150,822	160,439	169,339	177,650	185,468	192,867
38	2,314	168,620	0,077	139,523	150,053	159,692	168,620	176,967	184,826	192,269
39	2,284	167,897	0,077	138,755	149,287	158,942	167,897	176,277	184,175	191,660
40	2,254	167,178	0,078	138,000	148,531	158,199	167,178	175,590	183,525	191,051
41	2,223	166,472	0,078	137,265	147,791	157,471	166,472	174,915	182,886	190,453
42	2,193	165,782	0,079	136,548	147,067	156,758	165,782	174,254	182,262	189,870
43	2,163	165,108	0,080	135,848	146,362	156,063	165,108	173,610	181,654	189,303
44	2,135	164,452	0,080	135,165	145,673	155,385	164,452	172,985	181,064	188,754
45	2,107	163,814	0,081	134,497	145,001	154,724	163,814	172,377	180,493	188,224
46	2,081	163,193	0,081	133,839	144,343	154,080	163,193	171,786	179,938	187,710
47	2,057	162,584	0,082	133,188	143,695	153,447	162,584	171,208	179,396	187,207
48	2,036	161,985	0,082	132,536	143,052	152,822	161,985	170,639	178,861	186,710
49	2,018	161,388	0,083	131,880	142,409	152,200	161,388	170,073	178,327	186,210
50	2,004	160,792	0,083	131,212	141,762	151,577	160,792	169,504	177,789	185,703
51	1,995	160,192	0,084	130,531	141,109	150,951	160,192	168,932	177,243	185,183
52	1,991	159,587	0,085	129,830	140,445	150,318	159,587	168,351	176,685	184,646
53	1,993	158,973	0,085	129,106	139,767	149,676	158,973	167,759	176,109	184,084
54	2,002	158,349	0,086	128,356	139,075	149,024	158,349	167,153	175,516	183,497
55	2,017	157,712	0,086	127,577	138,365	148,360	157,712	166,531	174,899	182,878
56	2,039	157,059	0,087	126,764	137,635	147,679	157,059	165,889	174,256	182,225
57	2,069	156,389	0,087	125,914	136,882	146,982	156,389	165,227	173,586	181,535
58	2,106	155,704	0,088	125,029	136,108	146,269	155,704	164,546	172,890	180,812
59	2,149	155,007	0,088	124,109	135,315	145,544	155,007	163,849	172,173	180,059
60	2,198	154,301	0,089	123,157	134,506	144,809	154,301	163,141	171,440	179,284
61	2,252	153,593	0,089	122,177	133,686	144,071	153,593	162,428	170,698	178,495
62	2,312	152,887	0,090	121,174	132,860	143,333	152,887	161,716	169,954	177,699
63	2,375	152,189	0,090	120,149	132,033	142,601	152,189	161,011	169,213	176,902
64	2,443	151,503	0,091	119,107	131,207	141,879	151,503	160,316	168,481	176,111
65	2,514	150,828	0,091	118,048	130,384	141,167	150,828	159,633	167,758	175,327
66	2,587	150,164	0,092	116,970	129,563	140,463	150,164	158,960	167,044	174,551
67	2,663	149,510	0,093	115,873	128,744	139,769	149,510	158,296	166,338	173,781
68	2,740	148,869	0,093	114,760	127,930	139,086	148,869	157,645	165,644	173,022
69	2,819	148,242	0,094	113,633	127,123	138,416	148,242	157,009	164,965	172,278
70	2,898	147,632	0,094	112,491	126,325	137,761	147,632	156,389	164,302	171,551
71	2,977	147,037	0,095	111,330	125,534	137,119	147,037	155,783	163,654	170,840
72	3,057	146,455	0,095	110,148	124,748	136,489	146,455	155,192	163,020	170,143
73	3,137	145,885	0,096	108,942	123,968	135,870	145,885	154,613	162,398	169,459
74	3,217	145,325	0,096	107,708	123,190	135,261	145,325	154,044	161,788	168,787
75	3,298	144,774	0,097	106,441	122,414	134,659	144,774	153,483	161,185	168,123
76	3,378	144,230	0,097	105,134	121,638	134,064	144,230	152,930	160,590	167,468
77	3,458	143,692	0,098	103,782	120,861	133,474	143,692	152,383	160,001	166,820
78	3,538	143,161	0,098	102,376	120,082	132,890	143,161	151,842	159,419	166,178
79	3,618	142,634	0,099	100,909	119,298	132,310	142,634	151,305	158,841	165,542
80	3,698	142,111	0,099	99,369	118,510	131,732	142,111	150,773	158,267	164,911
81	3,778	141,591	0,100	97,742	117,714	131,156	141,591	150,241	157,695	164,281

Tabelle 9.13 t-Test Berechnung mit p-Werte für Sauerstoffpuls und Herzfrequenz auf dem Fahrrad- und Laufbandergometer

Laufband vs Rad		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	p-Wert
O2_puls_at_m	Laufb	15,88501	4,099210	0,483097	
	rad	15,49021	3,777000	0,451438	0,552
O2_puls_peak_m	laufb	18,03238	4,803265	0,566070	
	rad	17,64912	4,459288	0,532987	0,623
HR_at_m	laufb	140,55233	11,345006	1,337022	
	rad	137,11966	11,147889	1,332428	0,071
HR_peak_m	laufb	176,77899	16,944642	2,010959	
	rad	166,90573	12,279921	1,467731	<0.001
O2_puls_at_w	laufb	11,18332	2,407725	0,283753	
	rad	10,01671	2,025044	0,242039	<0,001
O2_puls_peak_w	laufb	12,02921	2,422443	0,285488	
	rad	11,12766	2,236226	0,267280	0,002
HR_at_w	laufb	144,36901	11,563407	1,362761	
	rad	141,37975	13,111673	1,567145	0,152
HR_peak_w	laufb	175,19473	17,370464	2,047129	
	rad	167,16049	15,245691	1,822209	0,004

Tabelle 9.14 Anthropometrische Größen der untersuchten Probanden

Alter	Gewicht w	SD w1	Gewicht m	SD m1	Größe w	SD w2	Größe m	SD m2
5	23,5	3,536	27,0	n.a.	119,5	2,121	125,0	n.a.
6	22,0	2,898	25,7	6,035	120,5	4,231	123,0	4,517
7	25,0	1,871	28,3	1,890	125,2	2,775	132,0	3,651
8	30,9	5,705	31,0	6,515	136,3	5,559	135,4	6,980
9	33,9	5,841	33,5	3,710	138,7	4,527	139,9	3,723
10	36,3	5,770	37,1	4,927	143,6	7,957	144,9	5,027
11	41,9	6,278	43,1	7,526	151,7	7,306	152,9	6,030
12	45,2	8,280	45,7	5,212	156,0	7,133	156,4	5,188
13	50,5	7,596	52,7	13,174	163,5	7,220	162,8	11,847
14	56,2	4,917	64,1	13,682	164,9	7,031	175,7	9,477
15	60,2	6,431	64,4	11,426	168,9	5,708	176,2	7,698
16	59,1	7,918	67,4	7,402	166,8	7,209	178,3	5,961

17	**63,3**	**11,856**	**73,3**	**12,131**	**165,6**	**7,506**	**180,5**	**8,636**
18	**66,4**	**15,723**	**75,5**	**17,308**	**168,3**	**6,967**	**180,5**	**6,917**
19	**70,7**	**20,566**	**76,4**	**16,891**	**165,0**	**7,430**	**180,2**	**6,400**
20-29	**61,3**	**10,397**	**76,7**	**12,166**	**167,3**	**6,090**	**181,3**	**7,159**
30-39	**68,1**	**11,872**	**81,0**	**11,213**	**169,8**	**6,413**	**181,1**	**7,545**
40-49	**67,0**	**9,014**	**84,3**	**11,074**	**167,5**	**5,904**	**181,5**	**6,643**
50-59	**65,4**	**11,641**	**84,3**	**12,494**	**166,0**	**7,077**	**180,0**	**6,437**
60-69	**67,0**	**11,016**	**79,1**	**9,362**	**165,2**	**5,870**	**176,3**	**6,326**
70-79	**63,8**	**6,850**	**73,4**	**7,201**	**159,3**	**4,272**	**173,7**	**5,236**

Danksagung

Zunächst möchte ich Herrn Professor S. Schubert, dem Direktor der Klinik für Angeborene Herzfehler des Herz- und Diabeteszentrums Nordrhein-Westfalen, für die freundliche Überlassung des Themas dieser Dissertation danken.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dr. K.-O. Dubowy, der durch seine fachliche Begleitung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Des Weiteren möchte ich allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der Klinik für Angeborene Herzfehler danken, die einen wesentlichen Anteil zur Umsetzung des Themas beigetragen haben. Nicht zuletzt gilt auch mein Dank allen Probanden/innen, die an dieser Studie teilgenommen haben.

Für die statistische Aufbereitung der Daten bedanke ich mich herzlich bei Frau Peters.

Abschließend möchte ich mich bei Matthias für seine wertvollen Anregungen, Ermutigungen, Hilfe und liebevolle, geduldige Worte bedanken.

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Ezgi Sönmez

Geburtsdatum: 02. November 1993

Geburtsort: Istanbul

Ausbildung und Studium

5/2019	Approbation als Ärztin
5/2018	Fachsprachprüfung und Erteilung einer Berufserlaubnis
10/2015- 7/2016	Studienaustauschjahr an der Charité Universität, Berlin, Deutschland
9/2011- 10/2017	Studium der Humanmedizin, Kocaeli Universität, Medizinische Fakultät, Kocaeli, Türkei Erfolgsgrad: 3.54/4, zweitbeste Medizinstudentin
2007-2011	Schülerin des FMV Erenköy Isik Naturwissenschaftlichen Gymnasiums, mit dem besten Abschluss in meinem Jahrgang
2004-2007	Schülerin der FMV Erenköy Isik Grundschule, mit dem besten Abschluss in meinem Jahrgang

Beruflicher Werdegang

4/2020-bis jetzt	Assistenzärztin in der Weiterbildung Pädiatrie Evangelisches Klinikum Bethel, Universitätsklinik für Kinder- und Jugendmedizin
6/2018- 3/2020	Assistenzärztin in der Weiterbildung Pädiatrie, Kinderkardiologie, Herz- und Diabeteszentrum, Bad Oeynhausen