



MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Überprüfung der Validität zur Bestimmung der $VO_2\text{max}$ mittels
Seismofit® bei Sportler*innen

verfasst von | submitted by

Verena Steinbacher BSc BSc

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien | Vienna, 2026

Studienkennzahl lt. Studienblatt | Degree
programme code as it appears on the
student record sheet:

UA 066 826

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree
programme as it appears on the student
record sheet:

Masterstudium Sportwissenschaft

Betreut von | Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Jürgen Scharhag

Zusammenfassung (Deutsch)

Hintergrund: Zur Messung der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_2max) können verschiedene Methoden, sowie Messgeräte herangezogen werden. Dabei stellt die Spiroergometrie den Goldstandard dar. Die Seismokardiographie (SCG) ist eine neue, nicht belastungs-basierte Technologie zur Schätzung der VO_2max , mithilfe von herzinduzierten Vibrationen an der Brustwand unter der Verwendung eines Beschleunigers. Ziel ist es die Schätzung der VO_2max mittels der SCG (Seismofit®) bzw. mittels der Spiroergometrie bei unterschiedlichen Aktivitätsniveaus zu vergleichen, sowie die Validität der SCG gegenüber der Spiroergometrie zu untersuchen.

Methodik: Bei 70 Personen (34 Leistungssportler*innen, 22 Hobbysportler*innen, 14 Gesundheitssportler*innen) wurde die VO_2max mittels Spiroergometrie gemessen und mit Seismofit® geschätzt. Die Validität der Schätzmethode wurde anhand eines gepaarten t-Tests, des Intraklassenkorrelationskoeffizient (ICC), des mittleren absoluten Fehlers (MAE und MAPE in %) und einer Bland-Altman-Analyse bewertet.

Ergebnisse: In der gesamten Stichprobe war die gemessene VO_2max signifikant höher als die geschätzten Werte ($50,4 \pm 8,9$ vs. $48,5 \pm 7,6$ ml/min/kg; $t(69) = 2,68$, $p = 0,009$; $d = 0,32$), bei starker Korrelation und Reliabilität ($r = 0,768$, $p < 0,001$, $\text{ICC}(3,1) = 0,76$ (CI: 95% [0,64, 0,84]) und moderater Übereinstimmung (MAE = 4,31 ml/min/kg; MAPE = 8,95 %). Die Unterschätzung hoher VO_2max - Werte durch Seismofit®, zeigte die lineare Regression $R^2 = 0,59$ (SEE = 4,92 ml/min/kg) mit einer Steigung < 1 und konnte durch eine Bland-Altman- Analyse bestätigt werden. Die Unterteilung in Aktivitätsniveaus zeigt, dass bei Gesundheitssportler*innen ($p = 0,883$) und Hobbysportler*innen ($p = 0,489$) kein Unterschied zu sehen war. Im Gegensatz wurde bei Leistungssportler*innen ein signifikanter Unterschied ($p < 0,001$) zwischen den gemessenen und geschätzten Werten festgestellt.

Schlussfolgerung: Seismofit® zeigt eine akzeptable Validität für die VO_2max Schätzung bei Gesundheits- und Hobbysportler*innen, jedoch nicht bei Leistungssportler*innen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der derzeitige Algorithmus von Seismofit® für die Anwendung bei Leistungssportler*innen bislang unzureichend trainiert ist, infolgedessen in dieser Zielgruppe nur eine eingeschränkte Validität und Reliabilität der Ergebnisse aufweist und verbessert werden soll.

Abstract (English)

Background: Various methods and measuring devices can be used to measure the maximum oxygen uptake (VO_2max). Spiroergometry is considered as the gold standard. Seismocardiography (SCG) is a new, non-exercise-based technology for estimating the VO_2max using heart-induced vibrations on the chest wall with an accelerometer. The aim of this study is to compare the measurement of VO_2max using SCG (Seismofit®) and spiroergometry at different activity levels, as well as to investigate the validity of SCG relative to spiroergometry.

Method: In 70 participants (34 competitive athletes, 22 recreational athletes, 14 sedentary athletes), VO_2max was measured using spiroergometry and estimated using Seismofit®. The validity of the estimation method was assessed using a paired t-test, the intraclass correlation coefficient (ICC), the mean absolute error (MAE and MAPE in %), and a Bland-Altman plot.

Results: The measured VO_2max was significantly higher than the estimated values (50.4 ± 8.9 vs. 48.5 ± 7.6 ml/min/kg; $t(69) = 2.68$, $p = 0.009$; $d = 0.32$), with strong correlation, reliability ($r = 0.768$, $p < 0.001$, $\text{ICC}(3,1) = 0.76$ (CI: 95% [0.64, 0.84]) and moderate agreement (MAE = 4.31 ml/min/kg; MAPE = 8.95 %). The underestimation of high VO_2max values by Seismofit® was demonstrated by the linear regression $R^2 = 0.59$ (SEE = 4.92 ml/min/kg) with a slope = 0.66 (<1) and was confirmed by a Bland-Altman analysis (Bias = 1.8 ml/kg/min, LoA -9.47 – 13.07). The Subgroup analysis shows that no difference was observed among recreational athletes ($p = 0.883$) and sedentary athletes ($p = 0.489$). In contrast, a significant difference ($p < 0.001$) was found among competitive athletes between the measured and estimated values.

Conclusion: Seismofit® provides acceptable validity for recreational and sedentary athletes, but not for competitive athletes. It should be noted that the current Seismofit® algorithm has not yet been adequately trained for application in elite athletes. Consequently, its validity and reliability within this population remain limited and require further improvement.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung (Deutsch).....	1
Abstract (English).....	2
1. Einleitung	1
2. Methodik.....	9
2.1 Studiendesign	9
2.2 Stichprobe.....	11
2.3 Statistische Auswertung	15
3. Ergebnisse	18
3.1 Vergleich in der gesamten Stichprobe.....	18
3.2 Vergleich innerhalb der Aktivitätsniveaus	22
3.3 Vergleich innerhalb des Geschlechts	27
4. Diskussion.....	31
Literaturverzeichnis	42
Abkürzungsverzeichnis.....	47
Tabellenverzeichnis	48
Abbildungsverzeichnis.....	49

1. Einleitung

Die körperliche Leistungsfähigkeit von Sportler*innen ist maßgeblich für den Erfolg im Wettkampf. Dabei wird diese von einer Vielzahl an Faktoren stark beeinflusst, wobei die aerobe Kapazität die wohl bedeutsamste Komponente im Ausdauersport im allgemeinen Sinne darstellt (Joyner & Coyle, 2008). Aus physiologischer Sicht besteht die Grundlage der körperlichen Leistungsfähigkeit aus der funktionellen Möglichkeit des menschlichen Körpers, die Stoffwechselprozesse an die Anforderungen von körperlicher Belastung anzupassen (Rankovic et al., 2010).

Für die Bestimmung der individuellen Leistungsgrenzen stellen die kardiorespiratorischen Kapazitäten des Körpers eine zentrale Voraussetzung dar. Sie bilden die physiologische Grundlage für die körperliche Belastbarkeit und sind daher von essenzieller Bedeutung für die Ausübung von körperlicher Aktivität beziehungsweise Sport (Rankovic et al., 2010). Laut Rankovic et al. (2010), steht das Ausmaß der körperlichen Leistungsfähigkeit in engem Zusammenhang mit der kardiorespiratorischen Kapazität, wobei hier die aerobe Kapazität den größten Anteil daran nimmt. Diese beschreibt das Ausmaß der oxidativen Stoffwechselprozesse im menschlichen Körper und bildet somit das Fundament der körperlichen Leistungsfähigkeit (Basset & Howley, 2000).

VO₂max

Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO₂max) wird als Indikator für die funktionelle Kapazität des Herz-Kreislaufsystems, des Atmungssystems und der Fähigkeit des Gewebes (Muskeln, Organe, etc.) Sauerstoff aufzunehmen und zu nutzen, bezeichnet. Sie wird in der Literatur wie folgt definiert:

„Die maximale Sauerstoffaufnahme ist definiert als die größtmögliche Menge an Sauerstoff, die der Organismus pro Zeiteinheit während einer körperlichen Belastung mit zunehmender Intensität aufnehmen kann – ein Wert, der sich auch bei weiterer Steigerung der Belastung nicht mehr erhöht“ (Rankovic et al., 2010, S.45).

Die VO₂max wird in absoluten Werten in L/min als auch relativ zum Körpergewicht in ml/min/kg angegeben. Die absolute Sauerstoffaufnahme wird unter anderem von der Körpergröße und der Körpermaße beeinflusst. Größere beziehungsweise schwerer Personen weisen häufig höhere absolute VO₂max – Werte auf. Für einen bessere Vergleichbarkeit der aeroben Leistungsfähigkeit zwischen Individuen wird bevorzugt die relative VO₂max verwendet, bei welcher die maximale Sauerstoffaufnahme auf das Körpergewicht normiert wird (Niebauer, 2015, Lee & Zhang, 2021).

Die VO_2max wird in der Sportphysiologie zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Sportler*innen als eine der Hauptvariablen angesehen (Srivastava et al., 2024). Die Einschätzung der körperlichen Leistungsfähigkeit von Sportler*innen gehört zu den wichtigsten Aufgaben der Sportphysiologie. Diese gibt Auskunft über die aktuelle Leistungsfähigkeit der Athlet*innen, sowie den Fortschritt und der Effektivität einer Trainingsintervention bzw. des Trainingsprozesses (Srivastava et al., 2024). Eine Steigerung der VO_2max gilt in der Sportwissenschaft als ein zentraler und häufig herangezogener Indikator zur objektiven Quantifizierung von Trainingseffekten. Daher wird die VO_2max beispielsweise für die Erstellung von Trainingsplänen, sowie der Trainingssteuerung herangezogen (Bassett & Howley, 2000, Srivastava et al., 2024). Um die VO_2max bzw. die aerobe Kapazität mit hoher Genauigkeit bestimmen zu können, erfolgt eine direkte Messung der maximalen Sauerstoffaufnahme während maximaler körperlicher Ausbelastung unter standardisierten Laborbedingungen. Neben direkter Bestimmungsmethoden ist es auch möglich die VO_2max indirekt zu schätzen. Dabei kommen submaximale Feld- bzw. Labortests zum Einsatz, die aussagekräftige Ergebnisse liefern können (Rankovic et al., 2010). Für die Sicherstellung valider Ergebnisse besteht auch bei indirekten Messverfahren die Anforderung, standardisierte Testbedingungen zu gewährleisten (Rankovic et al., 2010).

Die VO_2max wird nicht nur für die Trainingssteuerung herangezogen, sondern ist auch einer der wichtigsten Indikatoren für die allgemeine kardiorespiratorische Fitness (KRP). Diese steht in einem Zusammenhang mit der allgemeinen, sowie funktionellen Leistungsfähigkeit unter Belastung (Carter et al., 2025). Niedrige KRP-Werte, ausgedrückt als niedriger maximaler Sauerstoffverbrauch (VO_2max) stehen mit einem erhöhten Risiko für Krebserkrankungen, vor allem Brustkrebs und Krebserkrankungen des Verdauungstraktes, in Verbindung. Des Weiteren stellen niedrige KRP-Werte über alle Altersgruppen, Ethnien und Geschlechter eine deutlich höheres Sterberisiko dar als andere kardiale Risikofaktoren (Thunestvedt Hansen et al., 2021, Carter et al., 2025). Im Gegensatz dazu stehen höhere KRP-Werte in Verbindung mit einer verbesserten Leistungsfähigkeit, vor allem im Bezug auf die kognitive Leistungsfähigkeit. Dazu zählen unter anderem die Gedächtnisleistung, die motorischen Fähigkeiten und die exekutiven Funktionen. Die KRP wird als die:

„Fähigkeit des Kreislaufs- und Atmungssystems, die Mitochondrien der Skelettmuskeln mit Sauerstoff für die Energieproduktion, während körperlicher Belastung bzw. Aktivität, zu versorgen“ bezeichnet (Carter et al., 2025, S.2).

Dabei entspricht die VO_2max dem standardisierten Maß zur Beurteilung der KRP. Die American Heart Association (AHA) empfiehlt, dass die Bestimmung von KRP bei erwachsenen Personen im Zuge der Gesundenuntersuchung erfolgen sollte, damit die Patientenversorgung verbessert werden kann (Strasser & Burtcher, 2018). Aufgrund von fehlendem

Fachwissen diesbezüglich, geringem Vertrauen gegenüber des Gesundheitspersonals oder mangelndem Interesse an körperlicher Betätigung wird dieses Angebot von einer Vielzahl an Erwachsenen nicht ausreichend genutzt (Carter et al., 2025). Die Empfehlung der American Heart Association konnte bislang nicht erfolgreich implementiert werden. Die Durchführung regelmäßiger Belastungstests im Rahmen der Gesundenuntersuchung ist weder praktikabel noch flächendeckend realisierbar einzustufen Gründe hierfür sind zum einen der erhebliche zeitliche Aufwand, zum anderen die hohen Kosten und die organisatorische Komplexität der Spiroergometrie (Strasser & Burtscher, 2018).

Messmethoden der $VO_2\text{max}$ (direkt/indirekt)

Zur Messung der $VO_2\text{max}$ können verschiedene Methoden, sowie Messgeräte herangezogen werden. Dabei stellt die Spiroergometrie den Goldstandard dar. Die Spiroergometrie ist ein diagnostisches Verfahren, bei welchem qualitativ und quantitativ das Zusammenspiel und die gegenseitigen Reaktionen des Herzkreislaufsystems (Herz, Stoffwechsel und Atmung), während einer sich stetig steigenden Belastung, untersucht bzw. analysiert wird (Niebauer, 2015).

Testablauf (Spiroergometrie)

Mithilfe einer luftdichten Atemmaske und einer Turbine wird die Atemfrequenz, das Atemzugvolumen und der Sauerstoff- sowie Kohlendioxidgehalt der Atemluft gemessen. Zusätzlich können, neben der Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme, mit der parallel gemessenen Herzfrequenz, weitere wichtige Parameter, wie zum Beispiel der Sauerstoffpuls oder die Herzfrequenzreserve, gemessen beziehungsweise berechnet werden (Niebauer, 2015). Neben der Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme, als das „Bruttokriterium“ der körperlichen Leistungsfähigkeit (Wonisch, 2015, S.217, zit.n. Niebauer, 2025, S.217- 232), erlaubt die Atemgasanalyse, zusammen mit der Herzfrequenzanalyse, Aussagen über das Funktionsverhalten von Herz, Lunge und Muskulatur unter Belastungsbedingungen treffen zu können.

Durch die direkte Messung der Atemgase während einer steigenden Belastung, können Rückschlüsse über die funktionelle Kapazität, den Erfolg einer trainingstherapeutischen Intervention auf die körperliche Leistung, die Graduierung des Schweregrades einer funktionellen Beeinträchtigung, sowie die körperliche Leistungsfähigkeit gegenüber dem Verlauf einer Erkrankung, getroffen werden. Weiters ist die Durchführung einer Spiroergometrie in der Unterscheidung von kardialer vs. pulmonaler Limitierung der körperlichen Leistungsfähigkeit ausschlaggebend (Niebauer, 2015).

In der Regel wird für die Untersuchung der körperlichen Leistungsfähigkeit ein stufenförmiger Belastungsanstieg bis zur maximalen Ausbelastung im Zuge einer Ergometrie am

Laufband oder am Fahrrad durchgeführt (Carter et al., 2025). Aufgrund des hohen Zeitaufwandes und einer hohen körperlichen Anstrengung, welche für die Durchführung einer Spiroergometrie notwendig sind, werden oftmals submaximale Belastungstests zur Schätzung der $VO_2\text{max}$ herangezogen. Ein Beispiel dafür ist der Astrand-Ryhming-Nomogramm Test auf dem Fahrradergometer oder auch der Chester Step-Test. Diese Methoden sind im Gegensatz zur Spiroergometrie nur Schätzmodelle zur Bestimmung der $VO_2\text{max}$ die ohne maximaler Belastung angewendet werden können. Diese Problematik schränkt die Anwendung dieser Methoden im Rahmen der Gesundheitsuntersuchung wiederum sehr ein (Carter et al., 2025).

Für die Bestimmung der aeroben Leistungsfähigkeit ist die höchstest mögliche Sauerstoffaufnahme während einer maximalen Ausbelastung ($VO_2\text{max}$) die wichtigste Standardmessgröße (Niebauer, 2015). Die $VO_2\text{max}$ wird aus nachstehender Formel berechnet und absolut in l/min angegeben:

$VO_2\text{max} = \text{Einatemvolumen} * (O_2\text{-Konzentration der Einatemluft} - \text{Ausatemvolumen} * O_2\text{-Konzentration der Ausatemluft})$ (Niebauer, 2015).

Für die Bestimmung der relativen $VO_2\text{max}$ wird die absolute Sauerstoffaufnahme pro Minute (VO_2) durch das Körpergewicht in Kilogramm dividiert. Damit sie anschließend in Milliliter pro Minute angegeben kann, multipliziert man sie zusätzlich mit 1000 (Niebauer, 2015). Das obere Limit des kardiopulmonalen Systems wird durch die $VO_2\text{max}$ definiert. Es liegen diverse Formeln für die Berechnung der $VO_2\text{max}$ vor, egal ob diese im Zuge einer fahrradergometrischen Belastung in Watt oder einer Belastung am Laufband in Kilometer pro Stunde (km/h) gemessen wird. Aufgrund erheblichen Einflussfaktoren sind diese Untersuchungen jedoch gravierenden Schwankungen unterworfen. Dadurch sind nur gemessene Werte reproduzierbar und zuverlässig. Daher ist eine direkte Messung einer indirekten Messung der maximalen Sauerstoffaufnahme vorzuziehen (Niebauer, 2015).

$VO_2\text{Peak}$

Die $VO_2\text{max}$ wurde ursprünglich als ein sogenanntes „Leveling-off“ in der VO_2 -Leistungsbeziehung definiert. Obwohl die Belastung stetig steigt, kommt es zu keinem weiteren Anstieg der $VO_2\text{max}$. Während der Belastung am Laufband können die Belastungsphasen durch unterschiedlich lange Pausen unterbrochen werden. Grund dafür ist die Laktatabnahme, welche jedoch nicht zwingend für eine Bestimmung der $VO_2\text{max}$ notwendig ist. Daher wurde Kritik an dem „Leveling-off“ Konzept geäußert. Auch in anderen Verfahren mit kontinuierlicher Belastungssteigerung (Rampverfahren), sowie neueren Technologien (z.B. Breath-by-Breath Analysen), konnte kein „Leveling-off“ der $VO_2\text{max}$ entdeckt werden. Im klinischen Alltag wird die $VO_2\text{max}$ daher als $VO_2\text{Peak}$ definiert. Die $VO_2\text{Peak}$ ist jene

Sauerstoffaufnahme, welche bei Abbruch der Belastung gemessen wurde. Die Normalwerte der VO_2 Peak sind zwischen Männern und Frauen unterschiedlich und nehmen im Laufe des Lebens, aufgrund des natürlichen physiologischen Alterungsprozesses, ab (Niebauer, 2015).

Die VO_2 max hängt im Gegensatz zu einer erreichten Maximalleistung beziehungsweise einer gemessenen Testdauer weniger von dem gewählten Belastungsprotokoll und der Belastungssteigerung ab. Voraussetzung dafür ist die Absolvierung des Belastungstests zwischen acht und siebzehn Minuten. Wenn diese vorgegebene Untersuchungszeit eingehalten wird, kann die Reproduzierbarkeit und auch die Präzision der individuellen Leistungsbeurteilung verbessert werden. Jedoch liegt im Zuge des gewählten Belastungstests am Laufband oder am Fahrrad ein Unterschied in den gemessenen VO_2 max -Werten vor (Srivastava et al., 2024). Im Rahmen eines Belastungstests am Laufband fallen die gemessenen VO_2 max - Werte infolge der Beteiligung einer größeren Anzahl aktivierter Muskelgruppen, um etwa 10 - 15% höher aus (Niebauer, 2015, Srivastava et al., 2024). Diese Abweichungen werden im Rahmen dieses Forschungsprojektes jedoch vernachlässigt.

Aktueller Forschungsstand und bestehende Problematik

Die Spiroergometrie ist mit einem erhöhten apparativen und organisatorischen Aufwand verbunden und setzt die Verfügbarkeit eines spezialisierten diagnostischen Labors, einen höheren finanziellen Aufwand, einen gewissen Zeitbedarf, sowie ausgebildetes Personal voraus. Vor diesem Hintergrund könnte ein alternatives Verfahren, wie beispielsweise die Seismokardiographie (SCG), zu einer deutlichen Reduktion des medizinisch-diagnostischen Aufwands beitragen (Thunestvedt Hansen et al., 2021).

Seismokardiographie (Seismofit®)

Die SCG misst als neue, nicht invasive Methode die mechanischen Schwingungen, die durch die Pumpaktivität des Herzens am Sternum (Brustbein) entstehen (VentriJect, 2025). In dieser Studie kommt diese Methodik beim System Seismofit® zum Einsatz. Die SCG - Messung beruht auf der Registrierung von mikroskopisch kleinen Beschleunigungen sowie Vibrationen, welche durch die Herzmuskelbewegungen (Kontraktion während der Systole, sowie Entspannung der Herzkammern während der Diastole) und dem Blutfluss entstehen und über das Brustbein übertragen werden. Es werden folgende Signale über die SCG Technologie detektiert:

- Herzfrequenz
- Schlagvolumen
- Kontraktilität des Herzens
- Zeitliche Abfolge der Herzbewegungen (Systolische Phase und Diastolische Phase)

Durch die Aufzeichnung dieser Signale kann die SCG- Technologie einen guten Einblick in die Herzleistung erzeugen und stellt damit ein wertvolles Instrument zur Überwachung der kardiovaskulären Gesundheit dar (VentirJect, 2025).

Das Seismofit® - System beinhaltet zudem eine App, über welcher das Gerät gesteuert und die Daten übertragen werden können. Das Gerät arbeitet mit einem cloudbasierten Machine-Learning Algorithmus, mit welchem die $VO_2\text{max}$ geschätzt wird. Es werden ca. 40 Sekunden SCG - Signal während einer Messung in Ruhe aufgezeichnet. Auf Basis der Signalcharakteristik (Morphologie) sowie verschiedener demografischer Daten, darunter Alter, Körpergröße, Körpergewicht und Geschlecht- wird durch den Algorithmus die $VO_2\text{max}$ berechnet. Mittels 549 Aufzeichnungen von 398 Personen, ohne bekannte Herzkrankheiten, welche zusätzlich eine Spiroergometrie durchführten, wurde das Messsystem entwickelt und validiert. 300 von diesen erhobenen Datensätzen dienten dem Training, 98 davon wurden für die Testung des Modells herangezogen (Schmidt et al., 2022)

Bislang war die Komplexität der SCG - Signale eine Herausforderung, jedoch zeigen neue Forschungsergebnisse und Fortschritte in der Entwicklung deutliche Verbesserungen in der Signalverarbeitung (Schulenburg et al., 2024). Des Weiteren gibt es nun viel kleinere, leichtere und kostengünstigere Sensoren. Diese Entwicklungen führten zu einer Relevanz für klinische Anwendungen der Seismokardiographie. Die SCG wird zunehmend in der sportmedizinischen Leistungsbeurteilung und in der kardiovaskulären Diagnostik erforscht (Schulenburg et al., 2024).

Das maximale Herzzeitvolumen (maximale Herzfrequenz und Schlagvolumen) ist der primär begrenzende Faktor für die $VO_2\text{max}$ bei gesunden Personen (Hansen et al., 2023). Dies hängt stark von der diastolischen Funktion ab. Dadurch würde eine Verbesserung der diastolischen Füllung, sowie eine verbesserte Relaxation zu einer Erhöhung des Herzzeitvolumens führen und somit auch die $VO_2\text{max}$ erhöhen (Hansen et al., 2023). Zudem zeigte sich eine bestehende Korrelation zwischen Punkten im SCG-Ruhsignal und bestimmten, charakteristischen Ereignissen im Herzzyklus, wie dem Öffnen und Schließen der Herzklappen (Sørensen et al., 2020). Zeitintervalle aus dem SCG – Ruhsignal konnten bereits mit echokardiographischen Parametern, sowohl bei gesunden Proband*innen als auch Patient*innen mit Herzinsuffizienz korreliert werden. Damit können mithilfe des SCG – Signals kardiale Zeitintervalle abgeleitet werden (Sørensen et al., 2020).

Für den Vergleich und der Validierung mit der kardiopulmonalen Belastungsuntersuchung wurde ein $VO_2\text{Peak}$ - Schätzmodell herangezogen, welche systolische SCG - Informationen als auch diastolische Informationen im Ruhezustand heranzieht. Dadurch konnte ein neuer, kabelloser Sensor entwickelt werden, welcher sich aus einem integriertem

Beschleunigungsmesser, einer kompatiblen Smartphone App und einer Cloud für die automatisierte Verarbeitung der SCG-Signale (Seismofit® - System) zusammensetzt. Das Seismofit® - System wurde bei Personen im klinischen Bereich, welche beispielsweise sehr eingeschränkt mobil sind, als Alternative zur Goldstandard Methode der Spiroergometrie zur $VO_2\text{max}$ - Schätzung entwickelt (Carter et al., 2025). Folgende Anwendungsgebiete und Vorteile bietet das SCG - Schätzsystem: Die SCG ermöglicht einen Schnelltest zur Schätzung der $VO_2\text{max}$, welcher sowohl bei Sportler*innen als auch bei Personen im Rahmen der Vorsorge und im Zuge der Rehabilitation Anwendung finden kann. Dabei ist besonders die Eignung für nicht-laborbasierte Settings, wie zum Beispiel Trainingszentren, Fitnessstudios oder auch der häusliche Bereich hervorzuheben. Im Gegensatz zur Spiroergometrie erfordert die Seismokardiographie keine Ausbelastung beziehungsweise vollständige Erschöpfung. Insgesamt ist der notwendige Aufwand zur Bestimmung der $VO_2\text{max}$ mittels SCG geringer, wodurch sie eine deutlich kostengünstigere Alternative darstellt. Die SCG weist ein großes Potenzial für einen breiten Einsatz im Sport auf. Ihre Anwendungsgebiete beschränken sich dabei nicht nur auf den Spitzensport, sondern erstrecken sich auch auf den Breiten- und Freizeitsport, sowie auf Prävention, Rehabilitation und den Gesundheitssport (Carter et al., 2025).

In gesunden Populationen gilt die Bestimmung der $VO_2\text{max}$ im Zuge der SCG als zuverlässig und ist deutlich genauer als andere Methoden (zum Beispiel algorithmische Berechnungen, welche die Ruheherzfrequenz heranziehen). Die SCG könnte eine sinnvolle Ergänzung zu den bisher durchgeführten Gesundheitsuntersuchungen sein, da sie kostengünstig und den Bedarf an doch sehr zeitintensiven Belastungstests reduziert (Carter et al., 2025).

Ziel der Forschungsarbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, die Gültigkeit und Zuverlässigkeit des Seismofit® - Systems zur Schätzung der $VO_2\text{max}$ mit der Spiroergometrie der gesamten Stichprobe, sowie auch zwischen Menschen mit unterschiedlich Aktivitätsniveaus, an einer gesunden, sportlichen, körperlich aktiven Personen zu untersuchen. Es wurden folgende Hypothesen aufgestellt: Seismofit® stellt eine gültige und zuverlässige Schätzmethode dar, um die $VO_2\text{max}$ bestimmen zu können mit einem absoluter prozentualer Fehler (MAPE) von unter 10% zwischen den beiden Methoden. Die Seismofit® - Schätzung der $VO_2\text{max}$ unterscheidet sich nicht maßgeblich bei Personen mit unterschiedlich hohem Aktivitätsniveau. Hierfür wurde die $VO_2\text{max}$ standardisiert einerseits mittels Spiroergometrie unter stufenförmig ansteigender Belastung gemessen und andererseits durch eine Ruhemessung mittels Seismofit® geschätzt. Die statistische Auswertung umfasste deskriptive und interferenzstatistische Verfahren, zur Überprüfung systematischer Unterschiede, sowie zusätzlich Analysen zur

methodischen Übereinstimmung. Im folgenden Kapitel wird das zugrunde liegende Studiendesign und das methodische Vorgehen detailliert dargestellt.

2. Methodik

2.1 Studiendesign

Datenschutz

Die vorliegende Querschnittsstudie beruht auf einem retrospektiven, sowie prospektiven Datensatz, welche am Österreichischen Institut für Sportmedizin (ÖISM) im Rahmen der übergeordneten „Sportslegend“ Studie erhoben wurden. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden medizinische, sowie personenbezogene Daten erhoben. Daher verpflichtete man alle teilnehmenden Proband*innen, eine datenschutzrechtliche Einwilligungserklärung zu unterschreiben. Die erhobenen Daten wurden in eine Datenbank, in Form von einer Microsoft 365 Excel Tabelle (Microsoft® Office®, 2022, USA), eingetragen. Zur Gewährleistung der datenschutzrechtlichen Anforderungen erfolgte eine Anonymisierung der erhobenen Daten. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit werden ausschließlich Daten verarbeitet, die keinen Rückschluss auf identifizierbare Einzelpersonen zulassen. Es werden keine personenbezogenen Daten veröffentlicht. Die Datenspeicherung, sowie Verarbeitung erfolgte unter Nutzung von Microsoft Azure, sowie durch den zentralen Informatikdienst der Universität Wien. Beide dienten als Datenbankinfrastruktur und die zugrunde liegende Microsoft Excel Tabelle wurde in die Azure – Software integriert und dort weiterverarbeitet. Für die Datenverschlüsselung stellt die transparente Verschlüsselung von Azure (Transparent Data Encryption) ein wesentliches Sicherheitsmerkmal dar. Diese gewährleistet eine automatische und kontinuierliche Verschlüsselung sämtlicher gespeicherter Daten. Dadurch wird ein unbefugter Zugriff auf die Daten, deren Einsicht und deren inhaltliche Interpretation, verhindert. Durch die regelmäßige Überprüfung der Zugriffsberechtigung für Microsoft Azure innerhalb des internen Netzwerks der Universität Wien, wird ein zusätzlicher Schutzmechanismus implementiert, der die Vertraulichkeit der Daten nachhaltig absichert.

Labortestungen

Am Untersuchungstag unterzeichneten die in die Studie eingeschlossenen Proband*innen zunächst die Einwilligungserklärung, sowie einen Aufklärungsbogen zur geplanten Ausbelastungsuntersuchung und füllten im Anschluss einen Fragebogen zum Gesundheitsstatus aus. Anschließend wurden anthropometrische Parameter (Körpergewicht, Körpergröße, Alter, Geschlecht), sowie die aktuelle Trainingsanamnese (Sportart, Trainingseinheiten und Stunden pro Woche, Leistungs- bzw. Aktivitätsniveau) erhoben. Darauf folgte die Vorbereitung der Proband*innen für die Durchführung der SCG- basierten Schätzung. Dafür wurden sie oberkörperfrei im Ruhmessungsraum in Rückenlage auf einer Liege positioniert. Zur Gewährleistung standardisierter Ruhebedingungen verblieben die Proband*innen vor

Beginn der SCG-Schätzung für mindestens fünf Minuten in dieser Position. Danach wurde das Seisomfit® Gerät (SN2313-0101, 50×25×15 mm, 16g) (Carter et al., 2025) auf das Sternum geklebt und die Proband*innen aufgefordert für 40 Sekunden ruhig und ohne zu sprechen zu liegen. Vorab wurden in die VentriJect® App (App Version 1.2.5, Firmware-Version v1.9.24), welche für die SCG Messung im Rahmen des Seisomfit® Systems verwendet wurde, die zuvor erhobenen Anthropometrischen Daten eingetragen. Anschließend erfolgte die Schätzung der $VO_2\text{max}$ der Proband*innen. Nach einer kurzen Analyse der Software wurde der errechnete Wert der $VO_2\text{max}$ in der App, welches mit dem VentriJect®-System gekoppelt ist, angezeigt. Danach erfolgte die Übertragung des geschätzten $VO_2\text{max}$ - Wertes in die Datenbank der VentriJect® Software, sowie in die Excel-Tabelle der Microsoft-Azure Software.

Nach erfolgreicher Ruheuntersuchung, Trainingsanamnese, sowie der SCG - Schätzung der $VO_2\text{max}$ in Ruhe folgte der Belastungstest (Spiroergometrie), je nach ausführender Sportart der Proband*innen am Fahrrad oder am Laufband. Die Untersuchung beruht auf der Analyse der Atemgase während einer stufenweise ansteigenden Belastung. Die Testperson trug dabei eine dicht abschließende Atemmaske der Firma Leupamed, die mit einer Turbine bzw. einem Flusssensor, welche mit dem in dieser Studie verwendeten Gasanalysegerätes (MetaLyzer® 3B), verbunden ist. Während der Belastung wurden folgende Parameter kontinuierlich erhoben:

- Atemfrequenz
- Atemminutenvolumen (VE)
- Sauerstoffkonzentration (O_2), der Ein- und Ausatemluft
- Kohlendioxidkonzentration (CO_2) der Ausatemluft

Die $VO_2\text{max}$ wurde gemäß der Formel berechnet. Anschließend erfolgte die Eintragung der erhobenen Daten in die Datenbank. Die Wahl des Belastungsprotokolls richtete sich nach dem Leistungsniveau der Proband*innen.

Die Stufendauer wurde individuell zwischen 60 Sekunden und 3 Minuten an die Sportler*innen angepasst. Die Testdauer betrug im Durchschnitt zwischen zehn und fünfundzwanzig Minuten, mit dem Ziel einer maximalen Ausbelastung der Sportler*innen. Folgende Kriterien wurden als eine maximale Ausbelastung definiert: Respiratorischer Quotient (RER) über 1,1 und/oder eine Borg-Skala (Rating of Percieved Exertion) von 18-20. Jegliche Proband*innen, welche diese Ausbelastungskriterien nicht erfüllten, wurden aus dieser Studie ausgeschlossen. Zusätzlich zur Spiroergometrie wurde das Laktat mitbestimmt.

Für die Spiroergometrie am Fahrrad wurde das Lode Excalibur Sport von Süssmed und für den Belastungstest am Laufband das Laufband von h/p/cosmosvpara graphics®, ebenfalls

von Süssmed, verwendet. Zur Erhebung der Belastungsdaten wurde, wie bereits erwähnt, der MetaLyzer® 3B und die dazugehörige MetaSoft®-Studio - Software verwendet. Der MetaLyzer®3B ist ein Spiroergometrie - System, welches mit einer Breath-by-Breath Technologie arbeitet. Das portable System ermöglicht eine vollständige Analyse der Funktion von Lunge, Stoffwechsel und Herz. Die Anwendungsgebiete erstrecken sich von Leistungstests im Sport, als auch zu einer kompletten kardiologischen Untersuchung (CORTEX Biophysik GmbH, 2023).

2.2 Stichprobe

Die Stichprobengröße betrug $n = 70$, mit gesunden, sportlichen und regelmäßig körperlich aktiven Proband*innen (siehe Tabelle 1 und Tabelle 4), welche ein durchschnittliches Alter von 26 ± 9 Jahren aufwiesen. Des Weiteren wurden die Proband*innen im Rahmen dieser Studie in drei Gruppen mit unterschiedlich hohen Aktivitätsniveaus, differenziert nach Trainingsstunden pro Woche, eingeteilt:

- Leistungssportler*innen
- Hobbysportler*innen
- Gesundheitssportler*innen bzw. Nichtsportler*innen

Tabelle 1 Deskriptive Statistik zur Stichprobe

Geschlecht	n	Alter [Jahre]	Größe [cm]	Gewicht [kg]
Männer	52	24 ± 8	183 ± 7	80 ± 10
Frauen	18	28 ± 10	168 ± 6	67 ± 9

Daten werden als Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung dargestellt.

In Bezug auf das Aktivitätsniveau beziehungsweise den körperlich aktiven Stunden pro Woche waren die Proband*innen, durchschnittlich 9 ± 6 Stunden körperlich aktiv. Dabei verteilten sich die Stunden der durchschnittlichen körperlichen Aktivität wie folgt: Ausdauer (Laufen, Rudern, Radfahren) $11 \pm 7,9$ Stunden, Kraftsport (Krafttraining im Fitnessstudio) $5 \pm 2,6$ Stunden, Sportsportarten (Fußball) $11 \pm 2,2$ Stunden und Skillsportarten (Akaido, Jiu-Jitsu, Parcours, Bouldern) $7 \pm 2,9$.

Die Einteilung in diese drei Gruppen erfolgte auf der Basis unterschiedlicher Trainingsumfänge, Trainingsziele und Leistungsniveaus. Diese Unterteilung ist in der praktischen Leistungsdiagnostik, sowie auch in der sportwissenschaftlichen Forschung maßgeblich und dient der zielgerichteten leistungsdiagnostischen Beurteilung und der Trainingssteuerung (Weineck, 2021).

Leistungssportler*innen werden in der Literatur als Sportler*innen definiert, welche den Sport kompetitiv betreiben, um an nationalen oder internationalen Wettkämpfen teilnehmen zu können. Dabei unterliegen sie einem strikten Trainings- bzw. Wettkampfkalender und sind sehr häufig Teil von Kaderstrukturen (z.B. Bundeskader/Landeskader, Leistungszentren, Sportverbände). In Bezug auf die Trainingshäufigkeit spricht man laut aktueller Literatur von Leistungssportler*innen ab einem Trainingsumfang von zehn bzw. über zehn Stunden pro Woche (Weineck, 2021).

Im Gegensatz zu Leistungssportler*innen betreiben Hobbysportler*innen ihren Sport regelmäßig, jedoch ohne primär kompetitive bzw. leistungsorientierte Zielsetzung. Im Vordergrund stehen vielmehr die Förderung der Gesundheit, die Freude an der Bewegung, sowie die gelegentliche Teilnahme an freizeitbasierten Wettkämpfen (z.B. Hobbyläufe oder Hobbyskifahren). Die Trainingshäufigkeit entspricht im Durchschnitt zwei bis vier Einheiten pro Woche und der Trainingsumfang beschränkt sich auf drei bis acht Stunden pro Woche. Zielsetzung von Hobbysportler*innen ist es, die individuelle Fitness zu steigern, persönliche Ziele zu erreichen, sowie Spaß an der Bewegung zu haben. Dabei liegt in den meisten Fällen keine systematische Leistungssteuerung, im Vergleich zu Leistungssportler*innen vor (McKinney et al., 2019).

Gesundheitssportler*innen betreiben den Sport primär zur Gesundheitsförderung und oder zur Prävention. Häufig in Form von betrieblichen Gesundheitsprogrammen, in Kontext einer Bewegungstherapie oder im Rehabilitationssport. Trainingshäufigkeit ist oftmals nicht regelmäßig und beschränkt sich auf ein bis drei Einheiten pro Woche mit einem Trainingsumfang von weniger als vier Stunden pro Woche. Als Ziel gilt es, die Gesundheit zu verbessern, das Reduzieren von Risikofaktoren, sowie die Prävention von chronischen Erkrankungen. Regelmäßige körperliche Aktivität stellt dabei eine zentrale Rolle zur Verbesserung der Lebensqualität (Garber et al., 2011, Brehm & Rütten, 2004). Folgende Sportarten werden beispielsweise von Gesundheitssportler*innen gerne betrieben: Nordic Walking, Radfahren, Spazierengehen, Wassergymnastik (Froböse. 2023, WHO 2020, Brehm & Rütten, 2004).

In der Studie von McKinney et al. (2019) erfolgte die Einteilung der Sportler*innen in unterschiedliche Aktivitätsniveaus anhand klar definierter Kriterien. Diese Kriterien beinhalten die Wettkampfab sicht, das Wettkampfniveau, sowie den Trainingsumfang (angegeben in Stunden pro Woche). Die entsprechende Kategorisierung und deren spezifischen Merkmale sind in Tabelle 2 dargestellt.

*Tabelle 2: Klassifikation von Athlet*innen und aktiven Personen in fünf verschiedene Kategorien*

Unterkategorie	Wettkampfabsicht	Trainingsumfang (Stunden/Woche*)	Wettkampfniveau
Elite-Athlet*innen	ja	≥ 10	Regional- oder Nationalteam, Olympiateilnehmende, Profisportler und einige College-Athleten
Wettkampf – Athlet*innen	ja	≥ 6	Offizielle Wettkämpfe** (zum Beispiel. Schul- oder College-Sport)
Freizeit-Athlet*innen	ja	≥ 4	Registrierte Freizeitlichen, offene Sportveranstaltungen
Sportlich Aktive	nein	$\geq 2,5$	Individuelle Fitness
Körperlich inaktive	nein	$< 2,5$	Erreicht nicht die empfohlenen Mindestwerte für körperliche Aktivität niedriger Intensität

*Beim wöchentlichen Trainingsumfang werden nur Aktivitäten moderater bis hoher Intensität berücksichtigt

** Offizielle Sportwettkämpfe (lokal, regional, national oder international) sind organisierte Einzel- oder Mannschaftssportarten, bei denen sportliche Leistung im Vordergrund steht und die von anerkannten Sportverbänden ausgerichtet werden

Quelle: mod. n. McKinney et al. (2019, S. 532–535)

Auf Grundlage der bereits in Tabelle 2 dargestellten Kriterien nach McKinney et al. (2019) wurden für die vorliegende Studie ebenfalls spezifische Kategorien sowie die dazugehörigen Merkmale zur Einordnung des Aktivitätsniveaus abgeleitet. Damit können die Proband*innen systematisch klassifiziert werden und es ermöglicht eine differenzierte Analyse im Hinblick auf das individuelle Aktivitätsniveau. In Tabelle 3 werden die daraus resultierenden Kategorien und Merkmalsausprägungen (Trainingsumfang pro Woche, Zielsetzung, organisatorischer Rahmen) dargestellt.

Tabelle 3 Charakterisierung und Differenzierung der sportlichen Kategorien

Kategorie	Trainingsumfang pro Woche	Zielsetzung	Organisatorischer Rahmen
Leistungssport	≥ 10 h	Leistungsorientierung, Wettkampfteilnahme	Profi-Team, Ver- band, Verein
Hobbysport	5-10h	Fitness, Spaß, Sporte- vents	Verein oder Individu- ell
Gesundheitssport bzw. kein Sport	0–5 h	Gesundheit und Präven- tion	Rehabilitation, thera- peutisch

Bei der Zusammensetzung der Stichprobe wurde angestrebt, eine möglichst gleichmäßige Verteilung auf die genannten Gruppen zu gewährleisten, um eine adäquate Vergleichbarkeit zwischen den Ausprägungen des sportlichen Aktivitätsniveaus sicherzustellen. Die Rekrutierung von Nicht-Sportler*innen beziehungsweise gesundheitsorientiert aktiven Personen erwies sich vergleichsweise herausfordernd, da in dieser Population typischerweise kein ausgeprägtes intrinsisches Interesse an leistungsdiagnostischen Untersuchungen, insbesondere an der Messung der $VO_2\text{max}$, besteht.

Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die gewonnenen Ergebnisse für sie weder im Rahmen einer sportlichen Betätigung noch für Trainingsplanung oder -steuerung von unmittelbarer Relevanz sind. Wohingegen die Rekrutierung von Leistungs- und Hobbysportler*innen deutlich einfacher war, da am Österreichischen Institut für Sportmedizin (ÖISM) regelmäßig zahlreiche Personen untersucht werden, die ihren Sport entweder wettkampforientiert oder mit hoher Ambition betreiben. In dieser Gruppe besteht folglich ein ausgeprägteres Interesse, an einer $VO_2\text{max}$ Bestimmung im Rahmen einer Leistungsdiagnostik teilzunehmen. Folgende Tabelle 4 stellt die Verteilung der Proband*innen auf die drei definierten Kategorien, sowie auf die Geschlechter der Studie dar. Zudem zeigt sie die $VO_2\text{max}$ – Werte (Mittelwert, Streuung und Wertebereich), die mithilfe beider Methoden erhoben wurden.

Tabelle 4: Deskriptive Statistik der VO₂max (Mittelwert, Streuung, Wertebereich) mit Teilnehmerverteilung nach Leistungsniveau und Geschlecht

Kategorie	n Frauen Männer			VO ₂ max	VO ₂ max
				Spiroergometrie [ml/min/kg]	Seismofit® [ml/min/kg]
Gesundheitssportler*innen	15	5	10	41 ± 9,1 (29-58)	42 ± 8,5 (26-54)
Hobbysportler*innen	22	7	15	48 ± 6,8 (31-56)	47 ± 5,3 (39-57)
Leistungssportler*innen	33	6	27	56 ± 5,2 (43-70)	53 ± 5,7 (40-65)

VO₂max - Werte werden als Mittelwerte ± Standardabweichung (Wertebereich) dargestellt

Ein- und Ausschlusskriterien

Um eine methodisch gute Datengrundlage zu gewährleisten, war es erforderlich, klare Ein- und Ausschlusskriterien zu definieren. Diese Kriterien dienten dazu, die Vergleichbarkeit der untersuchten Gruppen sicherzustellen und potenzielle Störfaktoren, die das Ergebnis der Untersuchung hätten beeinflussen können, zu minimieren.

Die Einschlusskriterien sahen vor, dass nur Personen in die Studie aufgenommen wurden, die keine kardiovaskulären oder pulmonalen Erkrankungen aufwiesen und keine Einschränkungen der Mobilität hatten. Ein zu hoher Blutdruck ($\geq 130/90$), orthopädische Erkrankungen, eine akute Infektion, sowie ein vorzeitiger Erschöpfungsabbruch der Spiroergometrie, galten als Ausschlusskriterien (Schulenburg et al., 2024). Zudem war die Teilnahme auf eine Altersgruppe zwischen 18 und 65 Jahren begrenzt, um sowohl jüngere als auch ältere Erwachsene in die Untersuchung einzuschließen und gleichzeitig eine gewisse Vergleichbarkeit hinsichtlich physiologischer Voraussetzungen sicherzustellen. Des Weiteren waren eine bis fünf Stunden Sport oder körperliche Aktivität pro Woche Voraussetzung für die Studienteilnahme, sowie auch ein hohes Aktivitätsniveau von über zehn Stunden pro Woche.

2.3 Statistische Auswertung

Die gesammelten Daten wurden in einer Excel-Tabelle (Microsoft® Excel® für Microsoft 365 MSO (Version 2602 Build 16.0.19725.20126) 64 Bit), eingetragen und im Anschluss in das Statistik Programm SPSS (IBM® SPSS® Statistics, Version 29, USA) übertragen und ausgewertet.

Die durchgeführte deskriptive Statistik zur Analyse der erhobenen Daten, zeigt einen Überblick über die zentralen Tendenzen und Streuungsmaße der Stichprobe. Für die deskriptive

Statistik wurden Mittelwert, Standardabweichung (SD), Max, Min, sowie Konfidenzintervalle der Stichprobe berechnet. Zur Überprüfung der Hypothese, dass zwischen den VO_2max -Werten der beiden Messmethoden (SCG und Spiroergometrie) ein statistisch signifikanter Unterschied besteht, wurde ein t-Test für abhängige Stichproben (paired-samples test) angewendet. Da es sich bei den Messungen um verbundene Daten handelt, die von denselben Proband*innen mit zwei unterschiedlichen Messmethoden erhoben wurden, kam dieses statistische Verfahren zur Anwendung.

Zur Validierung der beiden Messverfahren in den definierten Aktivitätsniveaus, wurde die Stichprobe in folgende Subgruppen unterteilt: Leistungssportler*innen, Hobbysportler*innen, Gesundheitssportler*innen. Anschließend erfolgte innerhalb jeder Subgruppe eine Überprüfung des statistisch signifikanten Unterschiedes. Dadurch konnte überprüft werden, ob sich innerhalb der Gruppen ein signifikanter Unterschied der VO_2max - Werte zwischen den beiden Messmethoden zeigt. Hierzu wurde der t-Test für abhängige Stichproben, sowie der Wilcoxon Test für verbundene Stichproben herangezogen. Des Weiteren kommt dem Vergleich zwischen den Geschlechtern zur Validierung ebenfalls eine Bedeutung zu. Daher wurden die mittels beider Methoden ermittelten VO_2max – Werte innerhalb der jeweiligen Geschlechtsgruppen, hinsichtlich statistisch signifikanter Unterschiede untersucht. Hierfür kamen ebenfalls sowohl ein t-Test für abhängige Stichproben, sowie auch der Wilcoxon-Test zur Anwendung.

Vor der Durchführung der statistischen Tests wurde zunächst die Voraussetzung der Normalverteilung der Differenzwerte zwischen den beiden Methoden überprüft. Für die gesamte Stichprobe ($n = 70$) kam dabei, aufgrund der Stichprobengröße > 30 , der Kolmogorov-Smirnov-Test zum Einsatz. In den Subgruppen (Leistungssport, Hobbysport, Gesundheitssport) wurde aufgrund der kleineren Stichprobengrößen (≤ 30) der Shapiro-Wilk-Test verwendet. Bei einer signifikanten Abweichung der Normalverteilung wurde zusätzlich eine nichtparametrische Alternative zum t-Test für abhängige Stichproben, der Wilcoxon-Test, herangezogen. Das Signifikanzniveau α wurde auf $\alpha = 0,05$ (zweiseitig) festgelegt. Wenn der berechnete p-Wert kleiner als 0,05 war, gilt das Ergebnis als statistisch signifikant. Für alle t-Tests wurde ein 95%-Konfidenzintervall (CI) angegeben, um die Präzision der Schätzung verdeutlichen zu können. Damit die praktische Relevanz der Ergebnisse beurteilt werden konnte, wurde die Effektstärke nach Cohen's d berechnet. Die darauffolgende Interpretation erfolgte gemäß der Richtlinien nach Cohen (1988): $d < 0,2$: geringer Effekt, $d = 0,5$: mittlerer Effekt, $d \geq 0,8$: großer Effekt (Cohen, 2009).

Zur Weiteren besseren, statistischen Veranschaulichung der gewonnen Ergebnisse wurden Bland-Altman-Analysen durchgeführt, sowie der mittlere absolute prozentuale Fehler (MAPE) und der mittlere absolute Fehler (MAE) berechnet. Damit eine bessere Beurteilung

der Übereinstimmung der Schätzung der VO_2max mittels Seismofit®-System und der Spiroergometrie (Referenzmessung) ermöglicht werden konnte. Die Bland-Altman-Analyse gilt als Goldstandardmethode zur Beurteilung der Übereinstimmung zweier quantitativer Messmethoden, da Korrelationen allein oft keine Aussage über Austauschbarkeit erlauben (Bland & Altman, 1986; Giavarina, 2015). Wichtig und entscheidend ist dabei sowohl der mittlere Bias, als auch die Breite der Grenzen der Übereinstimmung („Limits of Agreement“), welche mit 95% festgelegt sind. Ergänzend zu den t-Tests und der Mittelwertanalyse wurde ein Scatterplot erstellt, um den Zusammenhang zwischen den mittels Spiroergometrie gemessenen VO_2max - Werten und den durch das Seismofit®-System geschätzten Werten zu untersuchen. Die statistischen Abbildungen wurden mittels Graphpad Prism 11.0.0 (Graphpad Software, Boston, MA), sowie Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redmond, WA) und sowie SPSS (IBM® SPSS® Statistics, Version 29, USA) erstellt.

3. Ergebnisse

3.1 Vergleich in der gesamten Stichprobe

Der Mittelwert $50,4 \text{ ml/min/kg} \pm 8,9$ der VO_2max , gemessen mittels Spiroergometrie, war höher als der Mittelwert $48,5 \text{ ml/min/kg} \pm 7,6$ der VO_2max , geschätzt durch das Seismofit®-System. Zur Überprüfung der Unterschiede zwischen den beiden Messmethoden zur Erhebung der VO_2max wurde, aufgrund normalverteilter Differenzdaten (Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,084$ zweiseitige Signifikanz), ein t-Test für abhängige Stichproben durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen den Methoden ($p = 0,009$, zweiseitig), sowie eine starke Korrelation ($r = 0,768$). Die berechnete Effektstärke nach Cohen (1988) betrug $d = 0,33$ und entspricht einem mittleren Effekt. Es zeigte sich in der Differenz zwischen den beiden Messmethoden ein MAE von $4,31 \text{ ml/min/kg}$, was einem MAPE von $8,95\%$ entspricht. Des Weiteren wurde die Übereinstimmung beider Messmethoden mit dem Intraklassenkorrelationskoeffizienten berechnet. Dabei zeigte sich eine gute Reliabilität mit $\text{ICC}(3,1) = 0,76$ (CI: $95\% [0,64, 0,84]$ und $p < 0,001$).

Abbildung 1 zeigt ein Boxplot-Diagramm zum Vergleich der VO_2max in ml/min/kg zwischen den beiden Messmethoden Spiroergometrie und Seismofit®. Dargestellt sind jeweils Mittelwert, Median, Interquartilsabstand, sowie die Spannweite der Messwerte. Es lässt sich ebenfalls erkennen, dass die mittels Spiroergometrie bestimmten VO_2max – Werte tendenziell höher ausfallen als die mit Seismofit® geschätzten Werte. Wie der Mittelwert, liegt auch der Median bei der Spiroergometrie leicht über den entsprechenden Kennwerten der Seismofit®-Schätzung. Die Streuung der Daten ist bei beiden Verfahren gut vergleichbar. Jedoch weist die Spiroergometrie eine geringfügig größere Spannweite in den VO_2max – Werten auf. In der Seismofit® - Schätzung ist zudem ein deutlicher Ausreißer im oberen Wertebereich erkennbar. Der angegebene $p = 0,009$ deutet auf den statistisch signifikanten Unterschied zwischen den beiden Messmethoden hin.

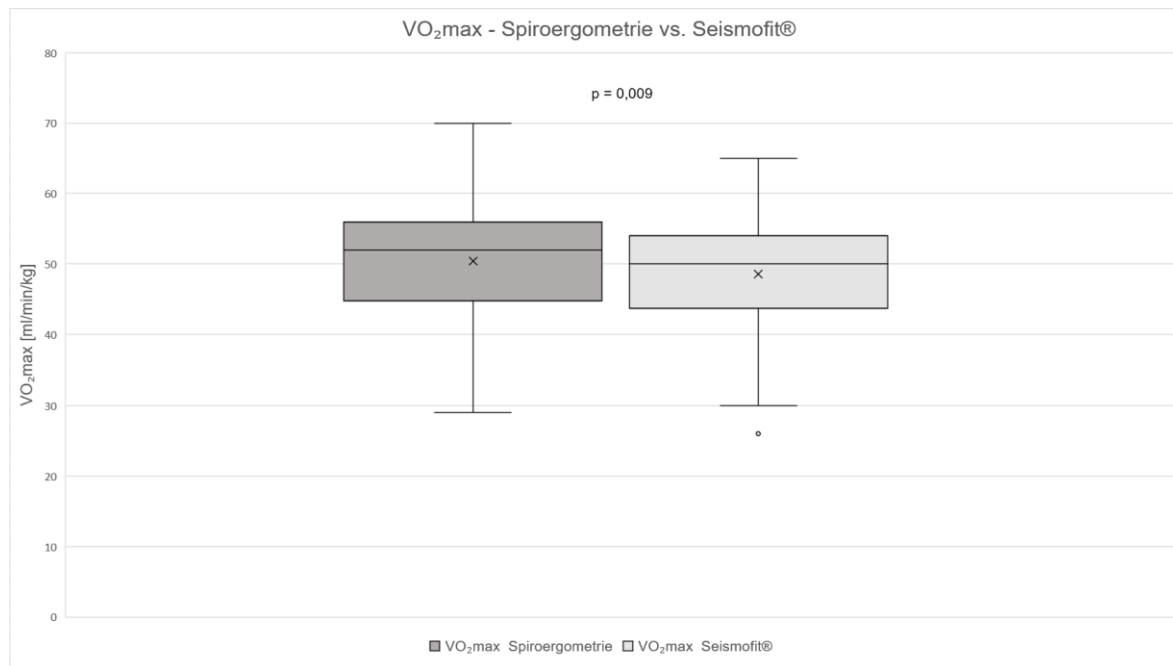


Abbildung 1: Boxplot Diagramm zur Darstellung der Streuung der VO₂max zwischen den beiden Messmethoden (Spiroergometrie und Seismofit®) unter Angabe des Signifikanzniveaus zur Bewertung des statistischen Unterschieds

Zur zusätzlichen Veranschaulichung des statistisch signifikanten Unterschieds der VO₂max – Werte zwischen der Spiroergometrie und Seismofit® ($p = 0,009$) sind in der nachstehenden Abbildung 2 die Differenzen der VO₂max - Werte (Spiroergometrie - Seismofit®) dargestellt. Der Median der Differenzen liegt leicht über 0 (ca. 1-2 ml/min/kg), was eine tendenziell leichte Unterschätzung der VO₂max durch Seismofit® verdeutlicht. Die Interquartilsabstände liegen zwischen -1 bis +4 ml/min/kg, sprich die meisten Messabweichungen sind moderat. Jedoch besteht eine deutlich erkennbare Variabilität zwischen den beiden Methoden. Zusätzlich zeigen sich mehrere Ausreißer, welche zum Beispiel im negativen Bereich bei ca. 10 ml/min/kg und im positiven Bereich bei ca. 19 ml/min/kg liegen. Dies zeigt, dass es in Einzelfällen zu deutlichen Abweichungen zwischen den Methoden kommt und die Streuung der Differenzen relativ breit ist. Des Weiteren ist die Übereinstimmung nicht durchgehend stabil und der statistisch signifikante Unterschied ($p = 0,009$) zwischen Spiroergometrie und Seismofit® somit plausibel. Die ermittelten VO₂max – Werte der beiden Methoden weichen systematisch voneinander ab.

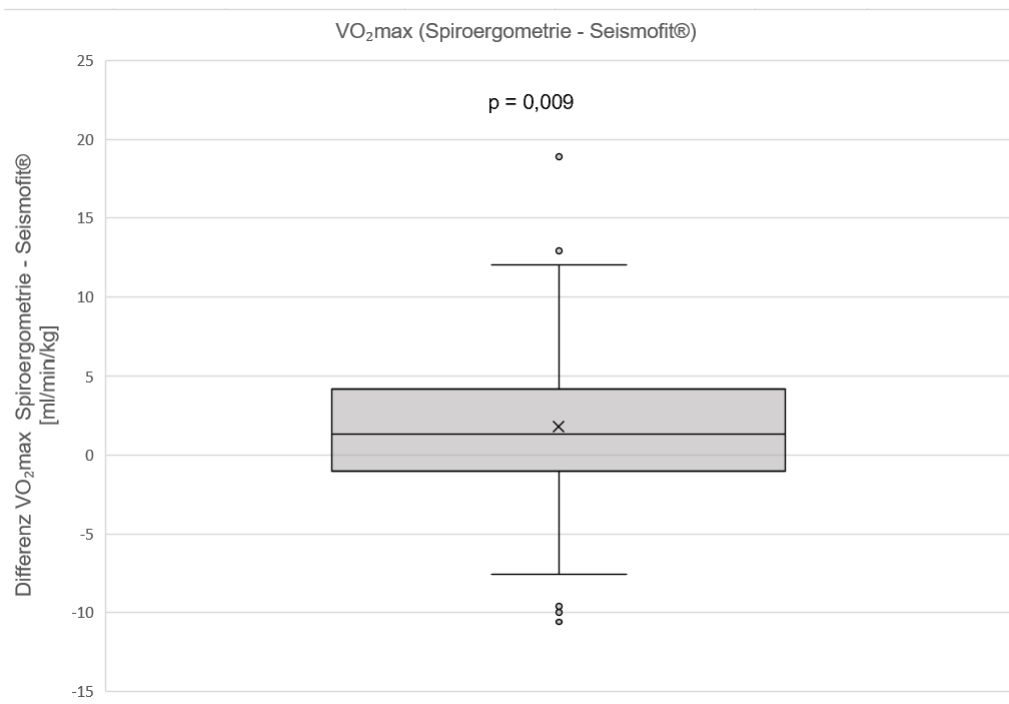


Abbildung 2: Boxplot Diagramm zur Darstellung der Streuung der Differenzen der $VO_2\max$ zwischen den beiden Messmethoden (Spiroergometrie - Seismofit®)

Ergänzend zur Mittelwert- bzw. Mediananalyse verdeutlicht der Scatter-Plot in Abbildung 3, sowie die berechnete Spearman-Korrelation ($p < 0,001$, $\rho = 0,759$), jedoch den starken Zusammenhang zwischen den mittels Spiroergometrie gemessenen $VO_2\max$ - Werten und den durch das Seismofit®-System geschätzten Werten. Es zeigte sich eine signifikante lineare Beziehung zwischen beiden Messmethoden ($p < 0,001$), wobei das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,590$ darauf hinweist, dass 59 % der Varianz der Seismofit®-Messwerte durch die Spiroergometrie-Werte erklärt werden können. Die Steigung < 1 (0,66) und der Achsenabschnitt > 0 (15,29) deuten drauf hin, dass Seismofit® tendenziell die $VO_2\max$ bei hohen Werten unterschätzt und bei niedrigen Werten überschätzt.

Der Standardfehler der Schätzung ($SEE = 4,92$ ml/min/kg) verdeutlicht zudem eine relevante Streuung der individuellen Messwerte um die Regressionslinie. Diese Beobachtungen bestätigen, dass trotz einer hohen Korrelation zwischen den beiden Messmethoden keine vollständige Übereinstimmung vorliegt und individuelle Abweichungen insbesondere im oberen Leistungsbereich zunehmen.

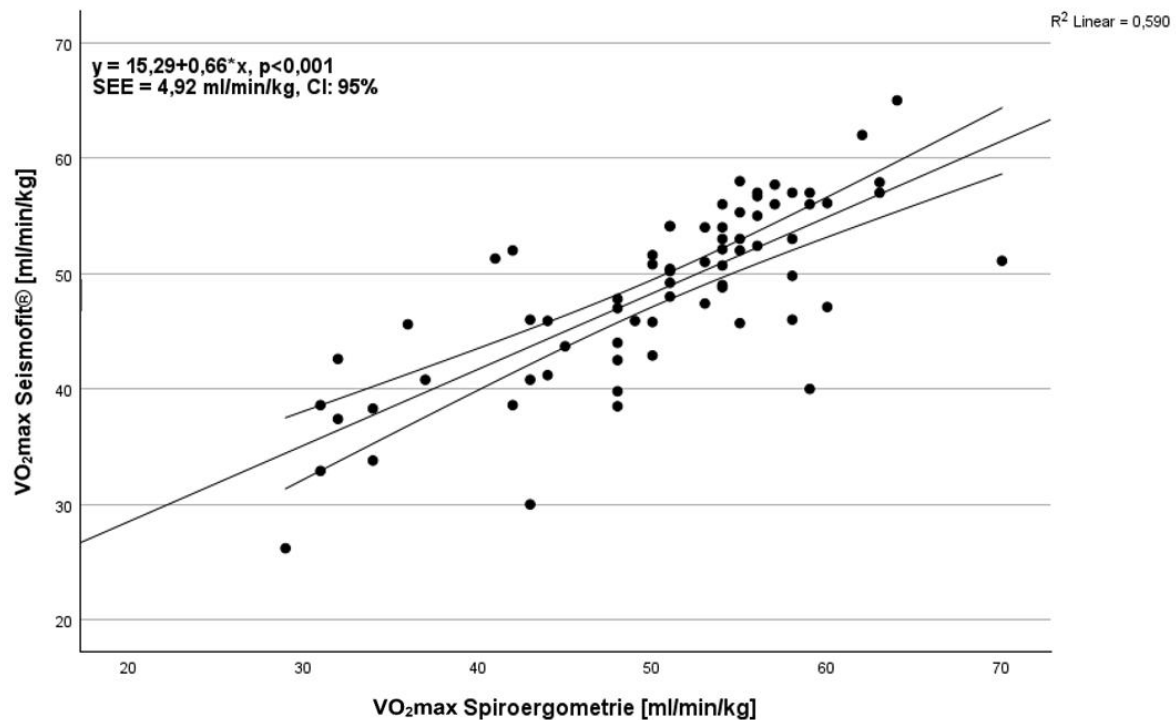


Abbildung 3: Scatter-Plot zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen der VO_{2max} gemessen mittels Spiroergometrie und den durch das Seismofit®-System geschätzten VO_{2max} - Werten [ml/min/kg]. Die durchgezogene Linie stellt die lineare Regressionslinie dar. Angegeben sind die Regressionsgleichung, das Bestimmtheitsmaß (R^2), der p-Wert sowie der Standardfehler der Schätzung (SEE) und das Konfidenzintervall (CI: 95%).

Zur weiteren Beurteilung der Validität zwischen der Spiroergometrie und Seismofit® zeigte die Bland-Altman-Analyse (Abbildung 4) einen mittleren Unterschied (Bias) zwischen den beiden Messmethoden von $+1,8 \text{ ml/min/kg}$. Dies weist darauf hin, dass die VO_{2max} - Werte durch Seismofit® im Durchschnitt höher eingeschätzt werden, im Vergleich zur Spiroergometrie. Die Standardabweichung der Differenz lag bei $5,75 \text{ ml/min/kg}$ und die 95% „Limits of Agreement“ (LoA) waren bei $-9,47 \text{ ml/min/kg}$ bis $+13,07 \text{ ml/min/kg}$. 95% der individuellen Messdifferenzen lagen innerhalb dieses Bereiches. Im Hinblick dazu zeigt die graphische Darstellung (Abbildung 4) keine ausgeprägte, proportionale, systematische Verzerrung über den gesamten Messbereich. Währenddessen die Streuung der Differenzen jedoch bei höheren mittleren VO_{2max} - Werten tendenziell zunahm. Ebenfalls sind einzelne Ausreißer erkennbar. Insgesamt zeigt sich eine geringe mittlere systematische Abweichung bei gleichzeitig relativ breiter Streuung der individuellen Differenzen.

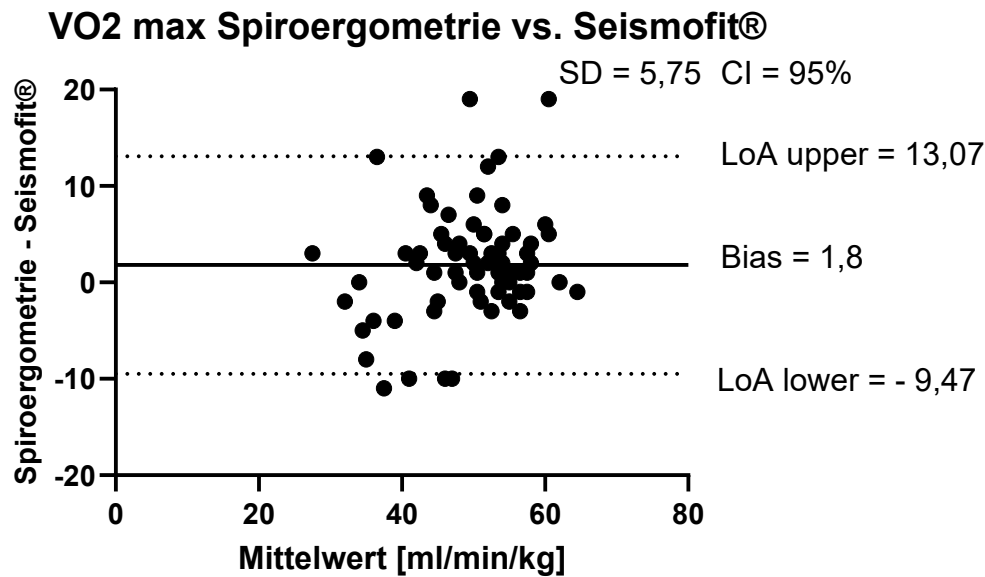


Abbildung 4: Bland-Altman-Plot Analyse zur Übereinstimmung der VO₂max zwischen Spiroergometrie und Seismofit®

3.2 Vergleich innerhalb der Aktivitätsniveaus

Zur Untersuchung der Übereinstimmung, sowie potenzieller Unterschiede zwischen den mittels Spiroergometrie gemessenen und den durch Seismofit® geschätzten VO₂max – Werten, innerhalb der drei festgelegten Aktivitätsniveaus, wurde für die Gruppe der Leistungssportler*innen, aufgrund der nicht normalverteilten Differenzdaten (Shapiro-Wilk-Test: $p < 0,001$, zweiseitig), ein Wilcoxon Test für verbundene Stichproben durchgeführt und für die Gruppe der Hobbysportler*innen, sowie Gesundheitssportler*innen (normalverteilte Differenz-Daten, Shapiro-Wilk-Test: $p = 0,158$, $p = 0,843$) jeweils ein t-Test für gepaarte Stichproben angewendet.

Für die Proband*innen der Leistungssportgruppe ($n=34$) zeigte sich ein hoch signifikanter Unterschied ($p < 0,001$, zweiseitig, $Z = -3,631$) zwischen den beiden Messmethoden. Die Teststatistik Z deutet darauf hin, dass die VO₂max – Werte der Spiroergometrie tendenziell höher ausfallen als die der Seismofit® - Schätzung. Auch die Betrachtung der Mediane (Mdn) der mittels Spiroergometrie gemessenen VO₂max (Mdn = 55,5 (54-59) ml/min/kg) lag signifikant höher, als die geschätzte VO₂max von Seismofit® (Mdn = 53,5 (48,7-57) ml/min/kg). Die Effektgröße nach Cohen's d (1988) betrug $d = 0,62$ und kann damit als mittlerer Effekt gewertet werden. Der MAE zwischen den beiden Messmethoden in der Gruppe der Leistungssportler*innen lag bei 3,9 ml/min/kg, was einer prozentualen Abweichung von 6,75% (MAPE) entspricht. Der ICC, zur Überprüfung der Übereinstimmung der VO₂max zwischen den beiden Messmethoden und innerhalb der Gruppe der

Leistungssportler*innen, lag bei 0,51 (CI: 95% [0,216, 0,723], $p < ,001$), was wiederum einem moderatem ICC entspricht.

Im Vergleich zur Gruppe der Leistungssportler*innen ergab sich in der Gruppe der Hobbysportler*innen kein signifikanter Unterschied zwischen den $VO_2\text{max}$ - Werten der beiden verwendeten Methoden. Hier betrug die MAE 4,4 ml/min/kg, sowie einem MAPE von 10,04%. Der Mittelwert der $VO_2\text{max}$ der Spiroergometrie (MW = 47,6 ml/min/kg $\pm$ 6,8) unterschied sich statistisch nicht von dem des Seismofit®-Systems (MW = 46,8 ml/min/kg $\pm$ 5,3), $t(21) = 0,71$, $p = 0,489$, zweiseitig $< 0,05$, CI der gepaarten Differenzen: 95% [-1,57, 3,19]. Mit $d = 0,15$ nach Cohen's d (1988) ist die Effektgröße gering und weist somit auf eine hohe Übereinstimmung der beiden Messmethoden hin. Hierzu ergab sich erneut ein moderater ICC von 0,60 (CI: 95% [0,26, 0,817], $p < ,001$).

Ebenfalls konnte kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Methoden in der Gruppe der Gesundheitssportler*innen nachgewiesen werden. Die mittels Spiroergometrie gemessene $VO_2\text{max}$ (MW = 40,9 ml/min/kg $\pm$ 9,0) unterschied sich mit $p = 0,883$ (zweiseitig $< 0,05$, CI der gepaarten Differenzen: 95% [-4,07, 3,54]) nicht signifikant von der geschätzten $VO_2\text{max}$ des Seismofit® - Systems (MW = 41,2 ml/min/kg $\pm$ 8,5). Hier lag die Effektstärke mit $d = -0,04$ im vernachlässigbaren Bereich. Jedoch der MAE bei 5,2 ml/min/kg und der MAPE bei 12,69%. Der ICC war mit 0,71 (CI: 95% [0,32, 0,9] $p < ,001$) gut.

Tabelle 5 zeigt eine zusammenfassende Darstellung der berechneten statistischen Kennwerte (Cohen's d , MAE, MAPE, p -Wert und ICC) für die drei definierten Leistungskategorien, um die Unterschiede und die Genauigkeit der Methoden innerhalb der Leistungskategorien übersichtlich darzustellen.

Tabelle 5: Übersicht der Effektstärken, Schätzfehler, Signifikanzniveaus, sowie der ICC innerhalb der jeweiligen Leistungskategorie in Bezug auf die beiden Messmethoden

Leistungskategorie	Cohens'd	MAE [ml/min/kg]	MAPE [%]	p	ICC
Leistungssportler*innen	0,62	3,9	6,75	$< 0,001$	0,51
Hobbysportler*innen	0,15	4,4	10,04	0,489	0,60
Gesundheitssportler*innen	-0,04	5,2	12,69	0,883	0,71

Cohen's d beschreibt die Effektstärke, der MAE (ml/min/kg) die absolute Abweichung, der Mape (%) die relative Abweichung, der p – Wert gibt statistische Signifikanz an und der ICC die quantifizierte Übereinstimmung der beiden Verfahren

Die nachfolgende Abbildung 5 veranschaulicht, mittels Boxplot-Diagramme, den Vergleich der VO_2max - Werte (angegeben in ml/min/kg) zwischen den beiden Methoden in Abhängigkeit vom jeweiligen Aktivitätsniveau. Es werden sowohl die mittels Spiroergometrie direkt gemessenen VO_2max - Werte als auch die durch Seismofit® geschätzten VO_2max – Werte innerhalb der Gruppen (Hobbysport, Gesundheitssport und Leistungssport) gegenübergestellt. Dargestellt sind wiederum jeweils Mittelwert, Median, Interquartilsabstand, sowie die Spannweite der Messwerte. Beginnend beim Hobbysport liegen die VO_2max – Werte beider Bestimmungsmethoden eng beieinander und es liegt kein statistisch signifikanter Unterschied vor ($p = 0,489$). Ein ähnliches Bild lässt sich im Gesundheitssport erkennen. Die VO_2max – Werte sind hier ebenfalls vergleichbar und es konnte kein statistisch signifikanter Unterschied ($p = 0,883$) zwischen den beiden Methoden festgestellt werden. Im Gegensatz dazu zeigt der Boxplot im Leistungssport, dass die mittels Spiroergometrie ermittelten VO_2max – Werte tendenziell höhere Werte aufweisen als jene geschätzten Werte von Seismofit®. Dieser Unterschied ist statistisch signifikant ($p < 0,001$). Dadurch zeigen sich im Leistungssport deutliche systematische Abweichungen. Insgesamt ermöglicht Abbildung 5 eine differenzierte Betrachtung der Validität innerhalb der einzelnen Aktivitätsniveaus, sowie einen guten visuellen Vergleich zwischen den beiden Messmethoden.

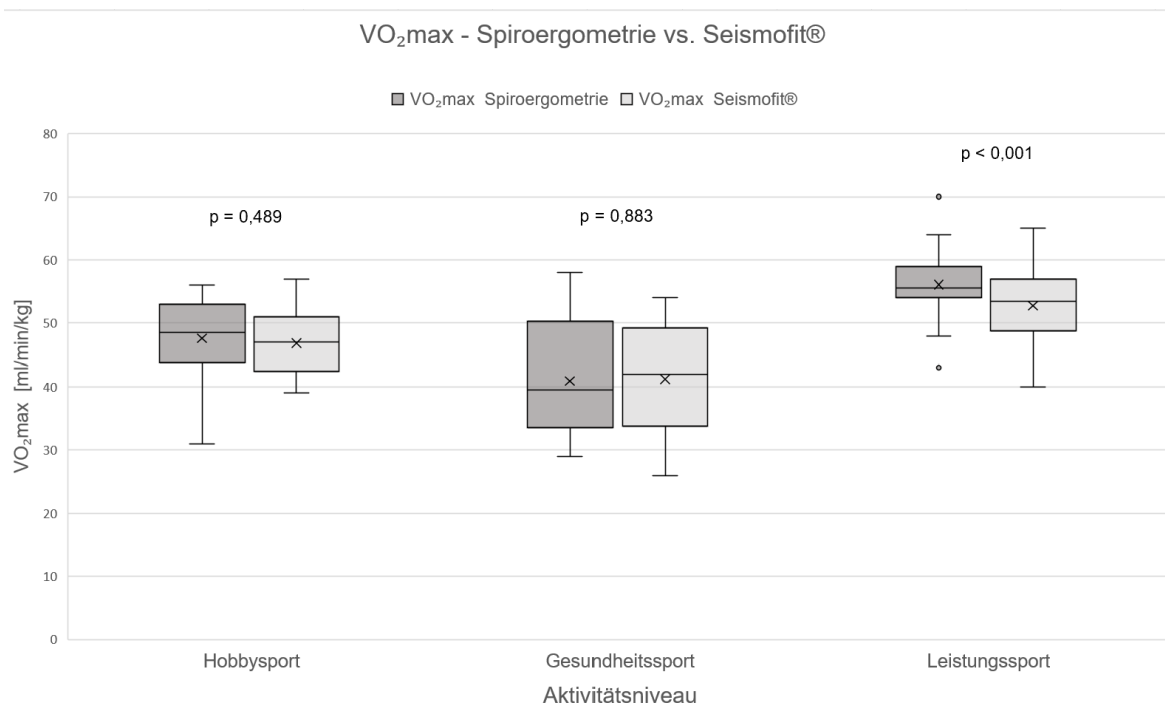


Abbildung 5: Boxplot Diagramm zur Darstellung der Streuung der VO_2max - Werte zwischen der Spiroergometrie und Seismofit® innerhalb der drei definierten Leistungskategorien (Hobbysport, Gesundheitssport und Leistungssport) unter Angabe der Signifikanzniveaus zur Bewertung der statistischen Unterschiede

Die Bland-Altman-Plots (Abbildung 6, 7, 8) für die Beurteilung der Übereinstimmung zwischen der Spiroergometrie und Seismofit® innerhalb und zwischen den drei Kategorien (Leistungssport, Hobbysport und Gesundheitssport) zeigen die mittlere Differenz (Bias), die Standardabweichung (SD) der Differenz und die mit 95% festgelegten „Limits of Agreement“.

In der Stichprobe der Leistungssportler*innen zeigte sich ein Bias von 3,35 ml/min/kg. Die SD der Differenzen betrug 5,4 ml/min/kg, aus welcher sich folgende LoA ergaben obere Grenze von 13,87 ml/min/kg und untere Grenze von -7,16 ml/min/kg. Die positive Differenz zwischen Spiroergometrie und Seismofit® zeigt, dass Seismofit® die $VO_2\text{max}$ im Mittel unterschätzt. Die Spannweite der LoA mit ≈ 21 ml/min/kg weist auf eine erhebliche Streuung hin und einzelne Ausreißer liegen deutlich außerhalb des oberen Limits, was ebenfalls auf eine ausgeprägte Unterschätzung durch das Seismofit® hindeutet. Eine klare systematische Zunahme der Differenz ist bei höheren Mittelwerten (proportionaler Fehler) visuell nicht eindeutig zu sehen, dennoch zeigt sich bei einer höheren $VO_2\text{max}$ tendenziell eine größere positive Abweichung. In der Gruppe der Leistungssportler*innen weist Seismofit® eine deutliche, systematische Unterschätzung mit zusätzlich sehr breiten LoA auf und ist somit für eine individuelle, exakte Leistungsdiagnostik im Hochleistungssport nur eingeschränkt geeignet.

Im Kollektiv der Hobbysportler*innen trat ein Bias von 0,72 ml/min/kg auf und ist damit sehr gering und klinisch vermutlich nicht relevant. Die SD betrug 5,3 ml/min/kg und die dazu errechneten 95% - LoA zwischen 11,19 ml/min/kg (obere Grenze) und -9,73 ml/min/kg (untere Grenze). Hier zeigen sich ebenfalls breite LoA (Spannweite von ≈ 21 ml/min/kg) und einzelne negative Ausreißer (starke Überschätzung durch Seismofit®). Bei den Hobbysportler*innen besteht im Mittel eine gute Übereinstimmung zwischen Spiroergometrie und Seismofit® und keine relevante systematische Verzerrung. Dennoch ist auch bei den Hobbysportler*innen die individuelle Streuung hoch, sodass die Methode für Einzelbeurteilungen vermutlich nur eingeschränkt valide ist.

Vergleicht man dazu noch die Stichprobe der Gesundheitssportler*innen (Bias = - 0,28 ml/min/kg, SD = 6,5, Übereinstimmungsgrenzen: 12,63 ml/min/kg bis -13,21 ml/min/kg) sind die Ergebnisse zu den Hobbysportler*innen sehr ähnlich. Die minimale Überschätzung der $VO_2\text{max}$ durch Seismofit® ist sehr gering und die Spannweite der LoA mit ≈ 26 ml/min/kg ebenfalls sehr breit. Auch hier, bei insgesamt niedrigen $VO_2\text{max}$ - Werten, lässt sich kein proportionaler Fehler erkennen. Es besteht kein systematischer Fehler, dennoch limitiert auch hier die große Streuung die Aussagekraft bei individuellen Messungen.

VO2 Max Spiroergometrie vs. Seismofit® - Leistungssport

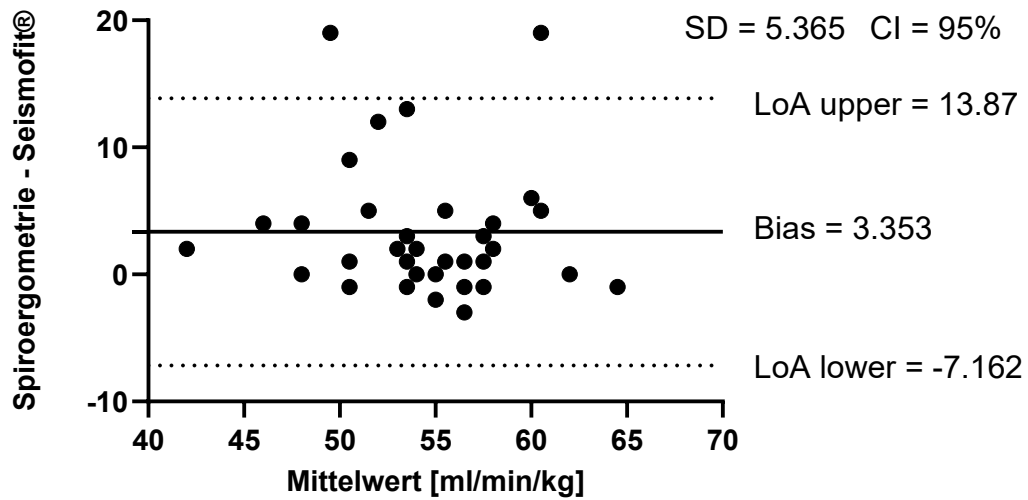


Abbildung 6: Bland Altman Plot- Analysen zur Übereinstimmung der VO₂max zwischen Seismofit® und der Spiroergometrie im Leistungssport

VO2 Max Spiroergometrie vs. Seismofit® - Hobbysport

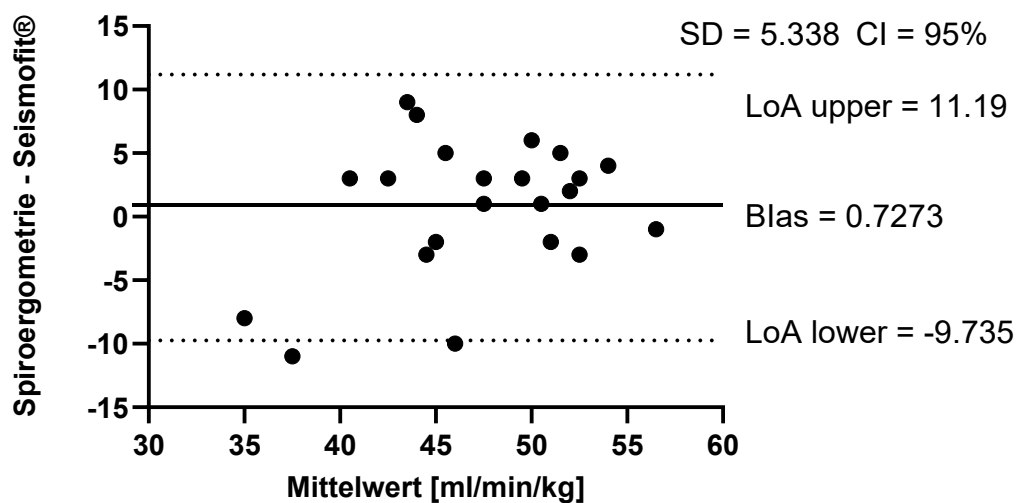


Abbildung 7: Bland Altman Plot- Analysen zur Übereinstimmung der VO₂max zwischen Seismofit® und der Spiroergometrie im Hobbysport

VO₂ Max Spiroergometrie vs. Seismofit® - Gesundheitssport

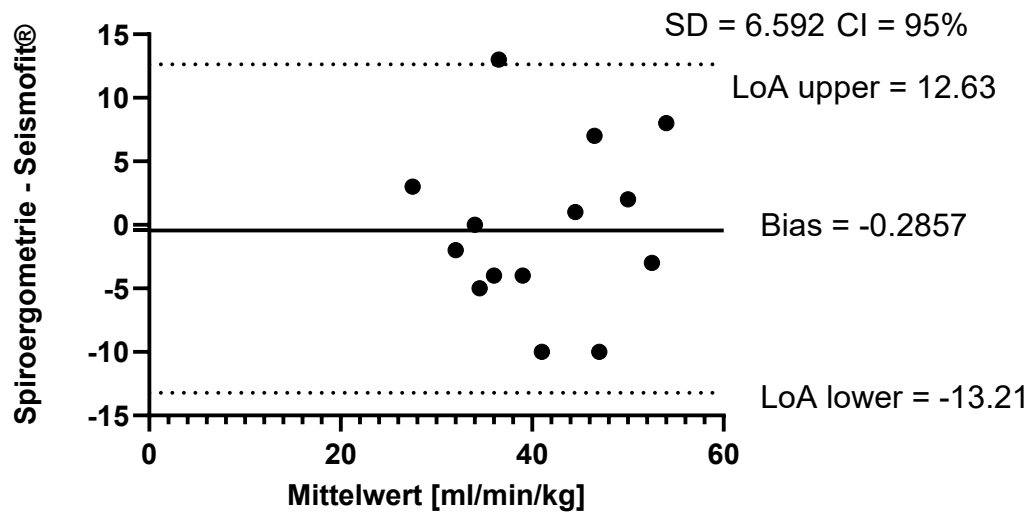


Abbildung 8: Bland Altman Plot- Analysen zur Übereinstimmung der VO₂max zwischen Seismofit® und der Spiroergometrie im Gesundheitssport

3.3 Vergleich innerhalb des Geschlechts

Die Normalverteilung der Differenz der VO₂max – Werte zwischen der Spiroergometrie und Seismofit® wurde getrennt nach Geschlecht mittels Shapiro-Wilk-Test überprüft. Für die Stichprobe der Frauen zeigte sich keine signifikante Abweichung von der Normalverteilung ($p = 0,407$), sodass hier von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann. In der Gruppe der Männer hingegen war der Shapiro-Wilk-Test signifikant ($p = 0,010$), was einer Verletzung der Normalverteilung entspricht. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse wurde überprüft, ob sich die VO₂max zwischen den beiden Messmethoden innerhalb der Geschlechter unterscheidet. Für die Frauen kam ein t-Test für abhängige Stichproben zur Anwendung und für die Männer ein Wilcoxon Test für verbundene Stichproben.

Der t-Test für abhängige Stichproben zeigte mit $p = 0,069$ (zweiseitig, $> 0,05$) keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den VO₂max – Werten der Spiroergometrie und Seismofit®. Das 95% Konfidenzintervall $([-6,667 - 0,279])$ umfasst den Wert 0, was ebenfalls für keinen signifikanten Unterschied spricht. Der Mittelwert der VO₂max – Differenz zwischen den beiden Methoden lag bei $-3,2$ ml/min/kg, was darauf hindeutet, dass Seismofit® im Mittel niedrigere Werte als die Spiroergometrie schätzt. Jedoch ist dieser Unterschied nicht statistisch abgesichert. Bei den Frauen besteht lediglich eine Tendenz zu niedrigeren VO₂max – Werten, geschätzt durch Seismofit®, jedoch kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Methoden.

Betrachtet man im Gegensatz dazu die Gruppe der Männer, ergab der Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben mit $p = 0,028$ (zweiseitig, $< 0,05$, $Z = -2,2$) einen statistisch signifikanten Unterschied. Die Effektstärke betrug $d = 0,31$ und entspricht nach Cohen's d einem mittleren Effekt. Deskriptiv zeigten sich aber auch in der Gruppe der Männer niedrigere $VO_2\max$ – Werte durch Seismofit® (Median = 52 (47-56) ml/min/kg) im Vergleich zu den Werten gemessen durch die Spiroergometrie (Median = 54 (50-57) ml/min/kg) wobei die mittlere Differenz der $VO_2\max$ – Werte mit $\approx 1,3$ ml/min/kg relativ klein ist.

Die Abbildung 9, zeigt ein Boxplot-Diagramm zur Veranschaulichung der Streuung der beiden Messmethoden hinsichtlich der $VO_2\max$ - Werte, differenziert nach Geschlecht. Dadurch wird eine getrennte Betrachtung für weibliche und männliche Proband*innen ermöglicht und dient der genaueren Analyse geschlechterspezifischer Unterschiede zwischen den erhobenen $VO_2\max$ - Werten. Erneut werden jeweils Mittelwert, Median, Interquartielabstand, sowie die Spannweite der Messung dargestellt.

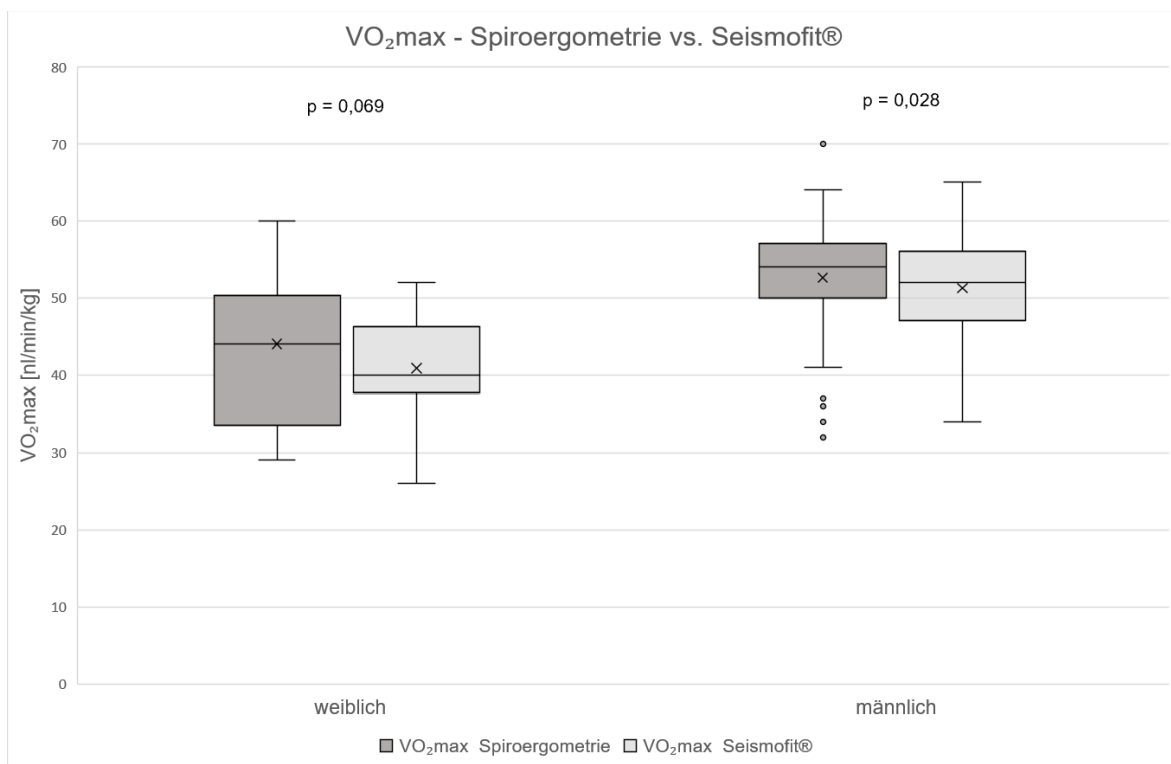


Abbildung 9: Boxplot Diagramm zur Darstellung der Streuung der $VO_2\max$ – Werte zwischen den beiden Messmethoden (Spiroergometrie und Seismofit®) innerhalb des Geschlechts (weiblich, männlich) unter Angabe des Signifikanzniveaus zur Bewertung der statistischen Unterschiede.

Die Bland-Altman-Analyse in Abbildung 10 zur Beurteilung der Übereinstimmung zwischen der Spiroergometrie und Seismofit® ergab bei den Probanden einen mittleren Bias von 1,33 ml/min/kg. Die Standardabweichung der Differenzen betrug 5,26 ml/min/kg, woraus sich 95% - LoA von -8,99 ml/min/kg (untere Grenze) und eine obere Grenze von 11,65 ml/min/kg ergaben. Der geringe Bias weist auf eine nur sehr kleine systematische Abweichung zwischen den beiden Messmethoden in der Gruppe der Probanden hin. Die Streuung der Differenz zeigt keine eindeutige Tendenz zu Zunahme bei höheren mittleren VO_2max - Werten. So ist kein ausgeprägter proportionaler Bias erkennbar (siehe Abbildung 10).

VO₂ max Spiroergometrie vs. Seismofit® - Männer

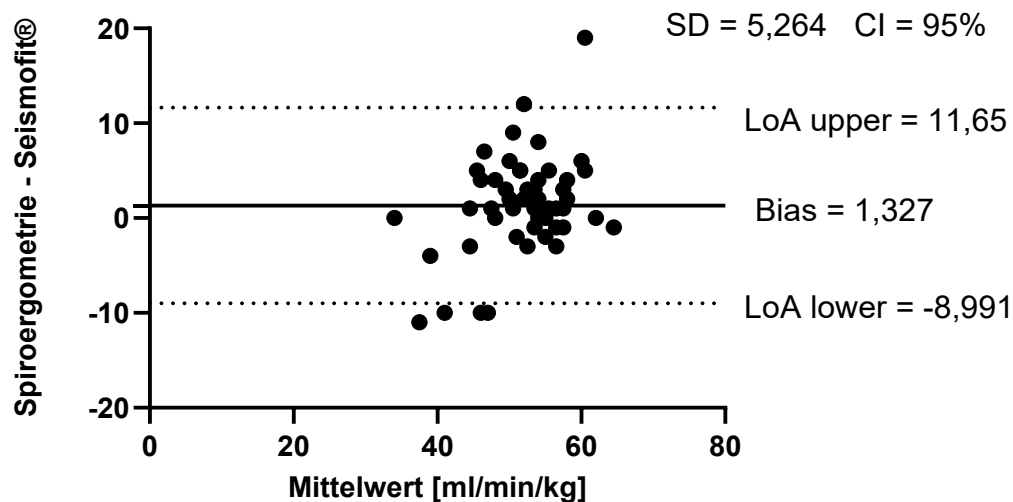


Abbildung 10: Bland-Altman-Plot-Analyse zur Übereinstimmung der VO_2max zwischen Spiroergometrie und Seismofit® in der Gruppe der Probanden

Im Vergleich dazu zeigte sich in der Bland-Altman-Analyse in der Gruppe der Frauen, siehe dazu Abbildung 11, ein mittlerer Bias von 3 ml/min/kg, eine Standardabweichung von 7,5 ml/min/kg und 95% - LoA von -11,65 ml/min/kg (untere Grenze) und 17,65 ml/min/kg (obere Grenze). Die Probandinnen weisen eine deutlich größere Streuung der Differenzen als die Probanden auf. Auch hier ist visuell kein klarer proportionaler Bias erkennbar, jedoch war die Variabilität über den gesamten Leistungsbereich erhöht.

VO₂ max Spiroergometrie vs. Seismofit® - Frauen

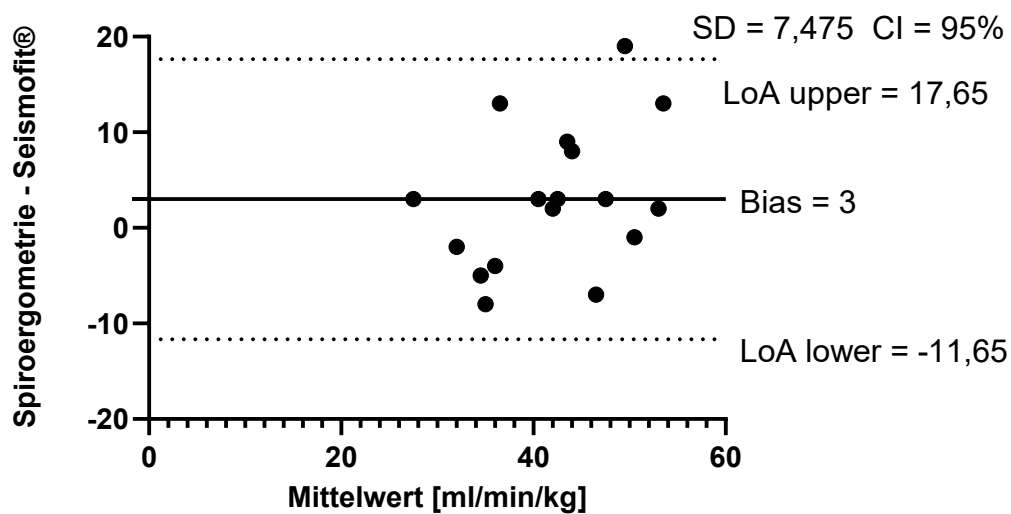


Abbildung 11: Bland-Altman-Plot Analyse zur Übereinstimmung der VO₂max zwischen Spiroergometrie und Seismofit® in der Gruppe der Probandinnen

4. Diskussion

Die VO_2max ist in der Physiologie ein wichtiger Parameter, welcher die Wechselwirkung zwischen dem Herz-Kreislauf-System, der Lunge und dem Muskelsystem beim Transport von Sauerstoff zu den arbeitenden Muskeln beschreibt. Sie wird nicht nur in der Sportmedizin zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Sportler*innen als Hauptmarker angesehen, sondern gilt weltweit auch als das Standard-Beurteilungsmaß der aeroben Kapazität (Bassett & Howley, 2000, Srivastava et al., 2024). Die VO_2max wird in der Regel mittels Spiroergometrie bestimmt (Srivastava et al., 2024). Dieses Messverfahren ist jedoch mit einem vergleichsweise hohen organisatorischen, sowie labortechnischen Aufwand verbunden und kann zudem sehr kostenintensiv, körperlich erschöpfend und zeitintensiv sein. Dadurch ist die praktische Anwendbarkeit im klinischen, sowie im Sportalltag häufig eingeschränkt (Schulenburg et al., 2024). Daher wurde neben anderen sub-maximalen Methoden, welche die maximale Sauerstoffaufnahme berechnen bzw. schätzen, eine neuer seismokardiographischer Sensor (Seismofit®, VentriJect DK, Hellerup, Dänemark) zur Schätzung der VO_2max ohne körperliche Anstrengung, entwickelt (Schulenburg et al., 2024). Seismofit® bietet eine schnelle, unkomplizierte, sowie objektive Methode zur Schätzung der VO_2max . Dies könnte die Bestimmung der VO_2max zukünftig in Bezug auf Gesundheitsuntersuchungen, Lebensstilinterventionen, Untersuchung der sportlichen Leistungsfähigkeit und Risikobewertung im Rahmen des Monitorings erleichtern (Schulenburg et al., 2024). Die im Folgenden aufgeführten Studien und die vorliegende Untersuchung zielt darauf ab, die Validität des Seismofit®-Systems bei der Schätzung der maximalen Sauerstoffaufnahme im direkten Vergleich zur Goldstandardmethode der Spiroergometrie zu überprüfen.

Interpretation der Ergebnisse

Die Analyse aller Daten zeigte eine hohe Korrelation zwischen den beiden Messmethoden ($r = 0,768$, zweiseitig $p < 0,001$), sowie einem guten ICC (0,76), wodurch das Seismofit®-System die individuellen Unterschiede in der VO_2max gut erfasst. Jedoch ergab der Vergleich der Mittelwerte einen signifikanten Unterschied zwischen der Spiroergometrie und dem Seismofit®-System ($\text{MW_Spiroergometrie} = 50,4 \pm 8,8 \text{ ml/min/kg}$, $\text{MW_Seismofit®} = 48,5 \pm 7,6 \text{ ml/min/kg}$; $t(69) = 2,68$, $p = 0,009$), wobei die Effektgröße nach Cohen (1988) mit $d = 0,33$ einen kleinen bis mittelgroßen Effekt beschreibt. Die berechneten Ergebnisse ergaben einen mittleren Bias von $+1,8 \text{ ml/min/kg}$ zwischen Seismofit® und der Spiroergometrie welcher vergleichbar mit der Studie von Hansen et al. (2023) ist, welche 20 gesunde Erwachsene (davon zehn Frauen) untersuchten und eine signifikante Abweichung des Seismofit® - Systems von $-3,1 \pm 2,4 \text{ ml/min/kg}$ zeigte. Ein Bias von dieser Größe wird bei

indirekter oder nicht- belastungsbasierter VO_2max Schätzverfahren häufig als akzeptabel angesehen, vor allem wenn die Anwendung hauptsächlich präventiv und zu Screening zwecken erfolgt (American College of Sports Medicine, 2021). Schulenburg et al. (2024) beschreiben ebenso eine hohe Korrelation zwischen Seismofit® und der Spiroergometrie ($r \approx 0,83$), welche sich im Mittel nicht signifikant unterscheiden (VO_2max - Werte der Spiroergometrie $37,2 \pm 8,6$ ml/min/kg, VO_2max - Werte der Seismofit® Schätzung $37,5 \pm 8,1$ ml/min/kg ($p = 0,28$) und $37,3 \pm 7,8$ ml/min/kg ($p = 0,66$). Untersucht wurde eine Stichprobe von 94 gesunden Proband*innen (52% Frauen, $48 \pm 8,7$ Jahre alt). Der ICC zwischen der ersten und zweiten Seismofit®-Schätzung betrugen 0,993, und deuten auf einen sehr hohen Zusammenhang und eine gute Reliabilität zwischen den beiden Methoden hin. In einer Forschungsarbeit von Schmidt et al. (2022) in welcher 74 Personen untersucht wurden, betrug die SCG - $\dot{\text{V}}\text{O}_2\text{max}$ $45 \pm 9,3$ ml/min/kg und war damit vergleichbar mit der $\dot{\text{V}}\text{O}_2\text{max}$ der Spiroergometrie von $44,3 \pm 10,1$ ml/min/kg ($p = 0,09$). Die Standardabweichungen der gemessenen und geschätzten VO_2max - Werte von Schulenburg et al. (2024) und Schmidt et al. (2022) ähnelten den Abweichungen der vorliegenden Arbeit, auch wenn die Mittelwerte sich, aufgrund eines anderen, untersuchten Kollektivs, von dieser Arbeit unterscheiden. Auch bei Schulenburg et al. (2024) und Schmidt et al. (2022) zeigen sich bei einem Vergleich der Mittelwerte zunächst keine deutlichen Unterschiede zwischen den beiden Messmethoden. Dennoch weisen die Mittelwerte in den Stichproben der herangezogenen Studien, sowie in der Stichprobe der vorliegenden Arbeit statistische signifikante Differenzen auf, während gleichzeitig hohe Standardabweichungen beobachtet werden. Dies spricht wiederum insgesamt gegen eine sehr hohe Validität von Seismofit® gegenüber der Spiroergometrie. Hansen et al. (2023) berichten trotz der limitierten Validität jedoch über eine hohe Reliabilität des Seismofit®-Systems mit einem ICC (0,95) zwischen den Untersuchungstagen, sowie einer geringen Variation in der Test-Retest-Analyse. Daraus schließen Hansen et al. (2023), dass das Seismofit®-System zwar reliable Ruhemessungen liefert, die Messgenauigkeit jedoch aktuell nicht ausreicht, um die Spiroergometrie als klinischen Goldstandard zu ersetzen. Die hohe Test-Retest-Reliabilität weist jedoch auf ein erhebliches Potenzial für algorithmische Weiterentwicklungen und zukünftige Optimierungen des Seismofit® - Systems hin.

Durch die in dieser Studie ermittelten Fehlermaße ($\text{MAE} = 4,31$ ml/min/kg, $\text{MAPE} = 8,59\%$) wird eine eingeschränkte Validität von Seismofit® angedeutet. Im Vergleich mit früheren Studien zeigen sich jedoch ähnliche beziehungsweise teilweise höhere Abweichungen. Schulenburg et al. (2024) berichten über einen MAPE von 11,2 – 11,4% und einem SEE von 4,9 ml/min/kg. Schmidt et al. (2022) berechneten einen MAPE von 8,7% und Hansen et al.(2023) zeigten einen SEE von 6,6 ml/min/kg und einen MAPE von 12%. Im Gegensatz

zu den herangezogenen Studien liegt die mittlere Abweichung von Seismofit® gegenüber der Spiroergometrie, sowohl absolut als auch prozentual, auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Die Differenz zwischen den beiden Methoden erscheint damit insgesamt moderat. Der Schätzfehler von Seismofit® kann entsprechend zum Beispiel im Rahmen der Gesundheitsbewertung, als akzeptabel eingeordnet werden.

Jedoch gibt es für die Akzeptanz des Schätzfehlers noch keine klare Definition. Hansen et al. (2023) empfehlen eine MAPE von $< 10\%$, welcher in der Studie von Schulenberg et al. (2024) mit einem MAPE von $11,2 - 11,4\%$ nicht erreicht wurde. In der vorliegenden Forschungsarbeit ergab sich ein MAPE von $8,59\%$, welcher deutlich unter dem von Hansen et al. (2023) definierten Grenzwert von $< 10\%$ liegt. Dies würde für einen akzeptablen prozentualen Schätzfehler in der vorliegenden Forschungsarbeit sprechen. Jedoch argumentierten Molina-Garcia et al. (2022), dass klinische Tests eine absolute Veränderung der $VO_2\text{max}$ von $1,75 - 3,5 \text{ ml/min/kg}$ erkennen sollen, wodurch die in der vorliegenden Forschungsarbeit ermittelte durchschnittliche absolute Abweichung von $4,31 \text{ ml/min/kg}$ für den klinischen Einsatz zu hoch ist. Im klinischen Bereich ist der absolute Schätzfehler dem prozentualen vorzuziehen, da dies die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlich Personen präziser darstellt. Zusammengefasst liegt zwar in dieser Studie in der gesamten Stichprobe eine akzeptable prozentuale Abweichung vor, jedoch sind die absoluten Abweichungen zu hoch, was wiederum gegen einen klinischen Einsatz spricht.

Schulenberg et al. (2024) verglichen ihre Ergebnisse ebenfalls mit dem FRIENDS-Algorithmus (Kaminsky et al., 2015) zur Schätzung der $VO_2\text{max}$. Der MAPE dieses Algorithmus betrug $15,2\%$ und war damit größer als der MAPE der Seismofit® - Schätzungen von Schulenberg et al. (2024) und der vorliegenden Arbeit. Darüber hinaus betrug laut Schulenberg et al. (2024) die Korrelation zwischen dem FRIENDS Algorithmus (Kaminsky et al., 2015) und der Spiroergometrie $0,752$, welche im Vergleich zu Seismofit® ($p = 0,003$) eine schlechtere Leistung zeigt. Die aktuelle Algorithmus Version $4,7$ zeigte im Vergleich zur früheren Prototyp- Algorithmus Version eine deutlich höhere Korrelation ($r = 0,832$ und $r = 0,826$ vs. $r = 0,73$), sowie geringeren Schätzfehler ($4,9 \text{ ml/min/kg}$ vs. $5,9 \text{ ml/min/kg}$) (Schulenberg et al., 2024). Insgesamt belegte diese Studie, sowie auch die vorliegende Forschungsarbeit, dass das Seismofit®- System bei gesunden Erwachsenen eine praktikable und valide Option zur $VO_2\text{max}$ Schätzung darstellt.

Validität von Seismofit® im Vergleich zur Spiroergometrie in Abhängigkeit des Trainingsniveaus

In der Literatur wurde bislang kein Unterschied in Bezug auf die unterschiedlichen Leistungsniveaus zwischen der Spiroergometrie und Seismofit® untersucht. Die vorliegende Forschungsarbeit, in welcher die Unterschiede in drei Kategorien (Leistungssport,

Hobbysport, Gesundheitssport) zwischen den beiden Messmethoden untersucht wurden, zeigt das die Übereinstimmung zwischen Seismofit® und der Spiroergometrie leistungsabhängig ist. Im Hobby- und Gesundheitssport wurde kein systematischer Messfehler erkannt, jedoch im Leistungssport (Mdn_Spiroergometrie = 55,5 (54-59) ml/min/kg, Mdn_Seismofit® = 53,5 (48,7 – 57) ml/min/kg, MAE = 3,9 ml/min/kg, MAPE = 6,7%) wurde die VO₂max von Seismofit® systematisch unterschätzt. Hansen et al. (2024) beobachteten in der Schätzung der VO₂max bei sub - Elite Fußballspieler*innen (n=61) eine starke Korrelation zwischen der SCG basierten Messung und der Spiroergometrie (r = 0,86). Gleichzeitig beobachteten die Autoren einen signifikanten negativen Bias von -2,8 bis -3,5 ml/min/kg, abhängig vom verwendeten Modell, wobei die Abweichung auch hier mit steigender VO₂max zunahm. Die VO₂max, geschätzt durch SCG, war im Durchschnitt um 17% niedriger als die gemessene VO₂max mittels Spiroergometrie. Der MAE lag bei 3,6 ml/min/kg und der MAPE bei 6-8%, was wiederum einer großen absoluten Abweichung entspricht. Die Bland-Altman Analyse von Hansen et al. (2024) beobachtete auch eine große negative Verzerrung (p < 0,001) gemeinsam mit großen 95 %-LoA. Schulenburg et al. (2024) zeigten ebenfalls, dass Proband*innen mit einem aktiven Lebensstil einen signifikant höheren, gemessen mittels Spiroergometrie, VO₂max - Wert (42,4 ± 7,1 ml/min/kg) aufweisen als Proband*innen mit einem sitzenden Lebensstil (32,0 ± 7,1 ml/min/kg). Gleich wie die Spiroergometrie schätzte das Seismofit® - System die VO₂max bei Proband*innen mit aktivem Lebensstil mit 41,2 ± 6,3 ml/min/kg signifikant höher (p < 0,0001), als bei Personen mit sitzendem Lebensstil (33,7 ± 7,7 ml/min/kg). Laut Schulenburg et al. (2024) neigte das Seismofit®-System zu einer Überschätzung der VO₂max bei Proband*innen mit einem sitzenden Lebensstil von 1,5 ml/min/kg. Umgekehrt dazu unterschätzte Seismofit® im Mittel bei Proband*innen mit einem aktiven Lebensstil um -1,4 ml/min/kg. Dazu verglichen zeigte es eine Überschätzung der VO₂max bei Proband*innen mit einem niedrigen Fitnessniveau (2,7 ml/min/kg, MAPE = 10,7%) und eine Unterschätzung bei Proband*innen mit hohem Fitnessniveau (-3,4 ml/min/kg, MAPE = -6,7%). Im Gegensatz dazu wurden bei der Untersuchung nach Geschlecht, Gewichtsklassen und Altersgruppen keine signifikanten Unterschiede festgestellt (Schulenburg et al., 2024). Auch im Vergleich zu publizierten LoA Werten ± 5-8 ml/min/kg von Hansen et al. (2023) fallen die beobachteten LoA in dieser Forschungsarbeit (± 12-13 ml/min/kg) deutlich breiter aus, was wiederum auf eine geringe individuelle Präzision von Seismofit® hindeutet. Ein weiteres vergleichbares Ergebnis zwischen Streuung und Bias wurde bereits von Ashouri & Inan (2017) für SCG basierte Parameter beschrieben. Dabei betonen die Autoren, dass systematische Abweichungen vor allem dann auftreten, wenn die physiologischen Randbereiche der Trainingspopulation extrapoliert werden. Die breite individuelle Streuung, sowie die breiten LoA's der vorliegenden Arbeit (im Sinne der Kriterien von Bland und Altman (1986), sowie der dazu verglichenen Studien (Hansen et al.,

2024, Schulenburg et al., 2024, Ashouri & Inan, 2017) sprechen deutlich gegen eine individuelle Austauschbarkeit beider Verfahren im Leistungssportbereich.

Im Leistungssport – bzw. Spitzensport gibt es bislang keine offizielle definierte Fehlertoleranz für VO_2max – Messungen bzw. Schätzungen. Dennoch zeigt die Literatur, dass unter standardisierten Laborbedingungen eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der VO_2max erzielt werden kann. Schoffelen et al. (2019) berichten von einer Test- Retest Variabilität der Spiroergometrie mit einem Variationskoeffizienten (CV) von 1-3%. Dazu verglichen konnten Kleinloog et al. (2021) eine nahezu perfekte Übereinstimmung zwischen mehrfachen Messungen (Spiroergometrie mit einer Atemmaske bzw. ergometrischer Belastungstest in einer Respirationskammer) einen „Lin's Konkordanzkorrelationskoeffizient“ (CCC) = 0,99 und einem Variationskoeffizienten von $4,2 \pm 3,2\%$ aufzeigen. Laut Kleinloog et al. (2021) wird häufig eine intraindividuelle Variabilität von 2-6% beschrieben, wobei gut kontrollierte Labortests im unteren Bereich dieser Spanne zu finden sind. Um nun trainingsinduzierte Leistungsänderungen, welche in Bezug auf die VO_2max im Bereich von 2-5 ml/min/kg liegen können (Midgley et al., 2007; Bassett & Howley, 2000) zuverlässig zu detektieren, sollen Messabweichungen zwischen verschiedenen Messmethoden der VO_2max nicht außerhalb der genannten methodischen Variabilität sein. Messabweichungen, welche aus diesem Bereich rausfallen, können speziell im Leistungssportbereich die Interpretation erschweren und die Identifizierung von leistungsrelevanter Anpassungen im Bezug auf die VO_2max deutlich einschränken (Kleinloog et al., 2021).

Bei Hobby- (MW_Spiroergometrie = 47,6 ml/min/kg $\pm$ 6,8, MW_Seismofit® = 46,8 ml/min/kg $\pm$ 5,3, $p = p = 0,489$) bzw. Gesundheitssportler*innen (MW_Spiroergometrie = 40,9 ml/min/kg $\pm$ 9,0, MW_Seismofit® = 41,2 ml/min/kg $\pm$ 8,5, $p = 0,883$) zeigte die vorliegende Forschungsarbeit keine systematischen Mittelwertsunterschiede, keine systematischen Schätzfehler, sowie moderate bis gute Intraklassenkorrelationskoeffizienten. Dies spricht für eine gute Übereinstimmung der beiden Messmethoden im mittleren bzw. niedrigen Leistungsbereich, dennoch zeigten auch hier die großen Streuungen, sowie die großen LoA eine geringe individuelle Präzision von Seismofit® und eine geringe Austauschbarkeit zwischen Spiroergometrie und Seismofit®. Wie schon erwähnt konnte Schulenburg et al. (2024) eine Überschätzung der VO_2max bei Proband*innen mit niedrigem Fitnessniveau aufweisen (MAE = 2,7 ml/min/kg, MAPE = 10,7%) was sich wiederum mit den Ergebnissen der Hobbysportler*innen (MAE 4,37ml/min/kg, sowie einem MAPE von 10,04%) und Gesundheitssportler*innen (MAE bei 5,17 ml/min/kg und der MAPE bei 12,69%) deckt. Die Ergebnisse zeigen, dass Seismofit® auch bei Personen mit niedriger VO_2max beziehungsweise geringem Fitnessniveau eine hohe Messgenauigkeit aufweist.

Für den Vergleich bei Proband*innen mit niedrigem Fitnessniveau demonstrierten Hansen et al. (2025) bei einer Stichprobe mit Übergewicht und Adipositas ($MW_SCG = 26,9 \pm 1,9$ ml/min/kg, $MW_Spiroergometrie = 26,6 \pm 1,6$ ml/min/kg) eine sehr gute Übereinstimmung mit der gemessenen VO_{2max} , was durch eine geringe mittlere Differenz (Bias $0,3 \pm 1,0$ ml/min/kg), sowie eine starke Korrelation ($r = 0,78$, $p < 0,0001$) untermauert wird. Des Weiteren zeigten Hansen et al. (2025), dass mittels SCG – Schätzung der VO_{2max} , Veränderungen infolge einer 14- wöchigen Lebensstilinterventionen zuverlässig abgebildet werden kann. Sowohl die mittels Spiroergometrie gemessene VO_{2max} als auch die geschätzte VO_{2max} durch SCG zeigten dabei einen signifikanten Anstieg der VO_{2max} . Wobei sich zwischen den beiden Messmethoden kein signifikanter Unterschied ergab. Hier konnten Hansen et al. (2025) nur eine moderate Korrelation zwischen den Veränderungen feststellen ($r = 0,37$). Trotz guter durchschnittlicher Übereinstimmung, limitiert laut Hansen et al. (2025) auch hier die beobachtete, große individuelle Streuung ($LoA \pm 9,8$ ml/min/kg, $SEE = 5,0$ ml/min/kg) die Anwendbarkeit der Methode für exakte individuelle Diagnosen. Dadurch betonten Hansen et al. (2025) erneut, dass die SCG-Methode eine praktikable, sowie objektive Alternative zur VO_{2max} Schätzung ist, vor allem wenn eine aufwändige direkte Messung im Rahmen einer Spiroergometrie nicht möglich ist. Jedoch für den Einsatz in der klinischen Praxis oder für eine genaue individuelle Verlaufsbeurteilung, sollen die breiten Streuungen und Limitationen der Methode berücksichtigt werden.

Nels et al. (2011) stellten in einer sehr großen Stichprobe ($n > 4000$) eine Korrelation von $r = 0,9$, zwischen einer belastungsbasierten VO_{2max} - Schätzung und gemessener VO_{2max} durch die Spiroergometrie fest. Es ergab sich ein durchschnittlicher Schätzfehler von $3,5$ ml/min/kg (vergleichbar mit einem Met). Der mittlere Bias war trotz individueller Abweichungen von $\pm 20\%$ statistisch nicht signifikant. Laut Nels et al. (2011) unterstützt dies wiederum die Verwendung von solchen Modellen im klinischen Bereich. Ähnliche Ergebnisse lieferten Myers et al. (2015), welche die VO_{2max} als „klinisches Vitalzeichen“ etablierten. In dieser Forschungsarbeit lagen die MAE-Werte nicht - belastungsbasierter Verfahren (die VO_{2max} wurde mittels einer Regressionsgleichung, welche aus dem FRIEND-Register abgeleitet wurde, mit der Validierungsstichprobe, sowie zwei häufig verwendete Gleichungen (Wassermann und European) verglichen), zwischen $4,0$ und $6,0$ ml/min/kg, bei nicht signifikanten Unterschieden zwischen den Mittelwerten im Vergleich zur Spiroergometrie.

In der Studie von Myer et al. (2015) wurden nicht-belastungsbasierte Verfahren zur Schätzung der VO_{2max} untersucht. Die VO_{2max} wurde mithilfe einer aus dem „FRIEND-Register“ abgeleiteten Regressionsgleichung, sowie zwei sehr häufig zur Abwendung kommenden Gleichungen (Wassermann und European-Formel) berechnet. Die MAE lagen dabei zwischen $4,0$ und $6,0$ ml/min/kg. Myers et al. (2015) konnten keine signifikanten

Unterschiede zwischen den geschätzten Werten und den durch die Spiroergometrie gemessenen VO_2max – Werten gezeigt werden. Es wurde argumentiert, dass die Fehlergrößen im klinischen Kontext akzeptabel sind, da bereits Unterschiede von einem MET mit relevanten Änderungen der Mortalität assoziiert sind. Während im Vergleich dazu kleinere Abweichungen auf Populationsebene weniger ins Gewicht fallen (Myers et al., 2015). Matabuena et al. (2018) verglich ebenfalls ein neues Modell zur VO_2max Schätzung zu einem maximalen Ausbelastungstest und verwendeten dabei ein Regressionsmodell mit funktionalen Daten (Sauerstoffverbrauch pro kg Körpergewicht, sowie Herzfrequenz während eines submaximalen Tests, maximale Herzfrequenz der Athlet*innen, etc.). Der Root Mean Square Error (RMSE) betrug 2,8 ml/min/kg, welcher laut Matabuena et al. (2018) ein niedriger Wert im Vergleich zu anderen typischen submaximalen Vorhersagen von Laufbandtests ist, die häufig zwischen 4-6 ml/min/kg liegen (Foster et al. 1996; Mier & Gibson 2004).

Sørensen et al. (2020) führte eine weitere Validierungsstudie des Seismofit®-Systems durch, um die leistungsabhängigen Unterschiede in Bezug zur VO_2max erklären zu können. Für diese Studie wurden insgesamt 26 Personen, darunter 17 Frauen, herangezogen, und das durchschnittliche Alter betrug $38 \pm 9,1$ Jahre. Bei den Proband*innen wurde eine SCG-Messung durchgeführt, sowie ein Echokardiogramm in Ruhe aufgezeichnet. Die VO_2max wurde mittels Spiroergometrie am Fahrradergometer ermittelt. Aus der SCG Schätzung wurden die Amplituden und Zeitintervalle extrahiert und zusammen mit demografischen Daten (Größe, Gewicht, Alter, BMI, Geschlecht) in ein Nicht-Belastungsmodell für die VO_2max integriert. Die Amplitude nach dem Schluss der Aortenklappe, welche aus der SCG - Schätzung abgeleitet wurde, zeigte eine signifikante Korrelation von 0,80 ($p < 0,001$) zur VO_2max . Anhand dieses Merkmals konnte eine, in Kombination mit Alter, BMI und Geschlecht Korrelation zur VO_2max von 0,90 ($p < 0,001$, 95%-CI: 0,83–0,94) sowie ein Standardschätzfehler von 3,21 ml/min/kg festgestellt werden. Sørensen et al.(2020) beobachteten, dass trainierte Personen eine signifikant geringere intraindividuelle SCG-Variabilität aufweisen ($\text{CV} < 5\%$) als untrainierte Personen ($\text{CV} \approx 8\text{-}10\%$), zudem aber gleichzeitig veränderte Amplituden- und Timing- Parameter. Diese Signalverschiebungen können statistisch zu stabilen, aber systematisch verzerrten Schätzungen der VO_2max führen, was sich in moderaten Effektstärken bei gleichzeitig niedrigen Fehlermaßen widerspiegelt. Dieses Muster konnte auch in der vorliegenden Arbeit beobachtet werden. Hansen et al. (2024) diskutieren hierzu, sowohl einen algorithmischen Trainingsbias als auch physiologische Besonderheiten des sogenannten „Sportherzes“. Hochtrainierte Personen weisen, ein erhöhtes Schlagvolumen, eine veränderte ventrikuläre Compliance, sowie modifizierte zeitliche Muster der systolischen und diastolischen Phasen auf (Levine, 2008). Durch diese große Kapazität der LV-Füllung und Ausstoßung kann eine Aufrechterhaltung des Blutdrucks bei

außergewöhnlich hohen Muskelblutflussraten, sowie Sauerstofftransportraten ermöglicht werden, die einen hohen anhaltenden oxidativen Stoffwechsel unterstützen (Levine, 2008). Diese Anpassungen verändern die Beziehung zwischen den Ruheparametern der SCG-Methode und der maximalen Sauerstoffaufnahme. Dadurch ist die lineare Übertragbarkeit von SCG-Signalen auf hohe VO_2max - Werte in Frage zu stellen. Des Weiteren behaupten auch Hansen et al. (2024), dass Leistungssportler*innen in den Trainingsdatensätzen der zugrundeliegenden Regressionsmodelle der SCG-Methode unterrepräsentiert sind, wodurch Spitzenwerte systematisch konservativ geschätzt werden.

Diese Beobachtungen lassen sich gut in den aktuellen Stand der VO_2max - Forschung einordnen, wonach die interindividuelle Variabilität der maximalen Sauerstoffaufnahme primär durch zentrale Determinanten erklärt wird. Lundby et al. (2017) definieren das Blutvolumen, die Gesamtmenge an Hämoglobin, sowie das Schlagvolumen des Herzens, als die wichtigsten Einflussgrößen, die gemeinsam das Herzzeitvolumen bestimmen und damit auch die maximale Sauerstoffkapazität. Im Kontext von Ausdauertraining zeigen sich zunächst schnelle Anpassungen in Form einer Expansion des Plasmavolumens, gefolgt von einer höheren Erythrozyten-Masse und einer Erhöhung des Gesamtvolumens. Dies führt in weiterer Folge zu einer besseren venösen Rückführung, einem größeren enddiastolischen Volumen, sowie einer Steigerung des Schlagvolumens, was wiederum eine Erhöhung der VO_2max zur Folge hat (Lundby et al., 2017). Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass die Variabilität der VO_2max überwiegend durch strukturelle, sowie funktionelle Anpassungen des kardiovaskulären Systems erklärbar ist. Vergleichsweise dazu spielen die mitochondriale Kapazität oder die Muskeldurchblutung eine eher geringere Rolle bei der Bestimmung der VO_2max (Lundby et al., 2017).

Zusammengenommen verdeutlicht die vorliegende Arbeit, dass die Übereinstimmung zwischen den beiden Messmethoden – Spiroergometrie und Seismofit® - leistungsabhängig ist. Gemessene quantitative Kennwerte, wie eine Korrelation von $r = 0,85 - 0,88$, ein MAE um 4 ml/min/kg und ein MAPE unter 10% in der Gruppe der Leistungssportler*innen, liegen sehr gut in der Bandbreite vergleichbarer Forschungsarbeiten. Die beobachtete, deutliche Unterschätzung der VO_2max durch Seismofit® bei Leistungssportler*innen ist nicht als methodisches Versagen zu interpretieren, sondern spiegelt einen erwartbaren Effekt eines populationsbasierten Regressionsansatzes, als auch spezifische physiologische Anpassungen des „Sportherzens“ wider. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass Seismofit® die VO_2max bei leistungsstarken, trainierten Proband*innen mit aktivem Lebensstil unterschätzt, während die VO_2max bei Proband*innen mit niedrigen Werten und/oder sitzender Lebensweise leicht durch Seismofit® überschätzt wird. Trotzdem stellt das Seismofit® - System im mittleren und niedrigen Leistungsbereich eine praktikable, valide Alternative zur

Spiroergometrie dar, insbesondere für gesundheitsorientierte, präventive Ziele und im Breitensportbereich. Um das Seismofit® - System weiterzuentwickeln und die Schätzgenauigkeit über die unterschiedlichen Aktivitätsniveaus hinweg weiter zu verbessern, ist eine Optimierung und eine Anpassung des Algorithmus erforderlich. Des Weiteren hängt die praktische Aussagekraft von Seismofit® stark vom Anwendungsziel ab. Während moderate systematische Abweichungen der VO_2max im Gesundheit- und Breitensport akzeptabel sind, können diese im Leistungssport bereits relevant sein und sollten bei der Interpretation der Schätzwerte von Seismofit® berücksichtigt werden. Insgesamt bestätigen jedoch die Ergebnisse, dass SCG basierte und nicht belastungsbasierte Verfahren eine effiziente, objektive und wissenschaftlich fundierte Ergänzung zur klassischen, spiroergometrischen VO_2max - Referenzmessung darstellen.

Validität von Seismofit® im Vergleich zur Spiroergometrie in Bezug auf den Vergleich zwischen Frauen und Männer

Der geringe Bias von 1,33 ml/min/kg bei Männern deutet auf eine gute systematische Übereinstimmung hin. Jedoch betragen die Limits of Agreement ± 10 ml/min/kg. Trainingsinduzierte Veränderungen der VO_2max können im Bereich von 2-5 ml/min/kg liegen (Midgley et al., 2007; Bassett & Howley, 2000), jedoch überschreiten die individuellen Abweichungen zwischen den Methoden bei den Männern den potenziellen Bereich trainingsrelevanter Anpassungen. Dadurch erscheint Seismofit® bei Männern für populationsbezogene oder Screening orientierte Anwendung geeignet, aber nur eingeschränkt für eine individuelle Trainingssteuerung.

Bei den Frauen zeigte sich ein höherer Bias und eine deutlich größere Streuung der Differenzen zwischen den beiden Messmethoden. Die LoA umfassen eine Spannweite von 30ml/min/kg. Eine derart hohe Variabilität schränkt die individuelle Austauschbarkeit der beiden Methoden deutlich ein (Giavarina, 2015). Mögliche Ursachen für diesen großen Unterschied im Gegensatz zu den männlichen Probanden können geschlechterspezifische Unterschiede im Zuge der Körperzusammensetzung, Sauerstoffkapazität, sowie eine relative VO_2max - Normierung sein (Bassett & Howley, 2000). Auch Myers et al. (2017) stellten bei der Verwendung von häufig verwendeten Schätzmodellen (Referenzgleichungen) für die VO_2max , insbesondere bei Frauen deutliche Unterschiede fest. Hier kam es bei den männlichen Probanden sowohl bei der Wassermann- als auch bei der europäischen Gleichung zu einer signifikanten Verzerrung ($3,5 \pm 3,1$ ml/min/kg, $p < 0,001$). Im Vergleich dazu war die Schwankung der geschätzten VO_2max bei den Proband*innen, bei welchen sowohl die Wassermann- als auch die europäische Gleichung zu Verzerrungen von $5,9 \pm 3,1$ ml/min/kg ($< 0,001$), deutlich stärker als die der Männer. Frauen sind bezüglich Studien, welche diverse Schätzmodelle zur Bestimmung der VO_2max untersuchen, nach wie vor

noch sehr unterrepräsentiert (Myers et al., 2017). Die vorliegenden Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Seismofit® als ein weiteres Schätzmodell für die VO_2max bei Frauen keine ausreichende individuelle Austauschbarkeit mit der Spiroergometrie aufweist.

Limitationen

Die Stärke der vorliegenden Forschungsarbeit liegt, wie bei Schulenburg et al. (2024), in der Validierung von Seismofit® in einer heterogenen, gesunden, körperlich aktiven Stichprobe, welche Personen mit einem geringen Aktivitäts- und Fitnessniveau und Personen mit einem sehr hohem körperlichem Leistungsniveau umfasst. Durch die kombinierte Darstellung eines Bland-Altman-Plots, sowie einer modellbasierten LoA über verschiedenen Mittelwerte, konnte ein gute Transparenz im Zusammenhang zwischen dem Bias und den Mittelwerten hergestellt werden. Für die Diskussion bzw. Interpretation der Ergebnisse sind dennoch Limitationen zu berücksichtigen. Zunächst basiert das Seismofit® - System auf einem Modell, dessen algorithmische Grundlagen nicht vollständig öffentlich zugänglich sind, was wiederum die direkte Vergleichbarkeit dieser Forschungsarbeit mit anderen Validierungsstudien erschwert. Des Weiteren werden die Seismofit®- Schätzungen aus den Brustwandsignalen abgeleitet, die respiratorische und metabolische Komponenten der VO_2max bei der Seismofit® - Schätzung nicht berücksichtigen (Schulenburg et al., 2024). Allgemein ist die Stichprobengröße zu klein, sowie auch die Stichprobengrößen der Subgruppen. Vor allem die Rekrutierung der Proband*innen für die Gruppe der Gesundheitssportler*innen stellte sich besonders herausfordernd dar. Bei größeren Samples könnte es zu anderen Signifikanzmustern bzw. Ergebnissen führen. Im Zuge der Spiroergometrie und der Schätzung mit dem Seismofit® - System wurden eventuelle Einflussfaktoren, wie Tagesform, individuelle Bewegungserfahrung nicht vollständig beachtet.

Abschließende Betrachtung & Ausblick

Diese neue, nicht invasive Methode zur Schätzung der VO_2max , als einfach anzuwendendes, mobiles und nicht invasives Instrument, eröffnet aus sportmedizinischer Sicht neue Perspektiven für den Einsatz im Leistungsdiagnostikkontext als auch im Präventionskontext. Speziell wenn eine Belastungsuntersuchung aus zeitlichen, finanziellen, organisatorischen oder auch schlichtweg aufgrund gesundheitlicher Einschränkungen nicht möglich ist, stellt das Seismofit® eine Alternative dar.

Seismofit® erscheint, obwohl die absolute Genauigkeit im Vergleich zur Spiroergometrie begrenzt ist, für den Breiten- und Gesundheitssport oder in der Trainingssteuerung, bei welcher eine wiederholte ressourcenschonende Erfassung der VO_2max von Vorteil ist, sehr nützlich. Untersucht man nun aber Leistungssportler*innen sollte Vorsicht gelten und eine Validierung der VO_2max - Werte gegebenenfalls durch eine Spiroergometrie erfolgen. Ziel zukünftiger Studien soll es sein, die Genauigkeit des Seismofit®-Systems bei

unterschiedlichen Leistungsniveaus, Trainingszuständen und Altersgruppen zu überprüfen. Es sollen gezielt Leistungssportler*innen mit sehr hohen VO_2max - Werten miteinbezogen werden, um die Validität des Seismofit®-Systems im Leistungssportbereich weiter verbessern zu können und das hinterlegte algorithmische Modell gegebenenfalls anzupassen. Durch solch differenzierte Betrachtungsweisen könnte eine systematische Verzerrung im oberen Messbereich der VO_2max frühzeitig identifiziert und besser eingeordnet werden. Mögliche Kooperationen mit dem Hersteller, welche beispielsweise zur Integration extern validierter Datensätze oder zur Entwicklung möglicher, spezifischer Korrekturfunktionen für hohe VO_2max - Werte, herangezogen werden könnten, können die Schätzgenauigkeit, speziell in den oberen Randbereichen der Verteilung verbessern. Dies wäre insbesondere für das maschinelle Lernverfahren des Seismofit®-Systems relevant, da es sehr stark von der Repräsentativität der zugrunde liegenden Trainingsdaten für den Algorithmus abhängig ist. Des Weiteren sind Untersuchungen der Sensitivität des Seismofit®-Systems nach unterschiedlichen Trainingsanpassungen von Interesse, damit der praktische Nutzen in der Sportmedizin (Betreuung) weiter verbessert werden kann. Für klinische oder wissenschaftliche Fragestellungen, für welche eine präzise Quantifizierung der maximalen Sauerstoffaufnahme erforderlich ist, bleibt die Spiroergometrie jedoch weiterhin die Methode der Wahl.

Im Zuge der praktischen Anwendung ergibt sich aus den Ergebnissen die Empfehlung, dass die VO_2max , geschätzt mit Seismofit® bei höheren Leistungsniveaus mit entsprechender Vorsicht zu interpretieren ist. Vor allem bei leistungsorientierten Anwender*innen soll- sofern klinisch oder sportwissenschaftlich im Zuge genauer Trainingsplanung und Trainingssteuerung relevant- eine zusätzliche Messung bzw. Validierung durch eine etablierte Referenzmethode, wie beispielsweise die Spiroergometrie, erfolgen. Sofern zukünftig neue algorithmische Anpassungen erfolgen, welche empirisch validiert wurden, kann das Seismofit®-System alternativ genutzt werden. Vor dem Hintergrund, dass bereits geringe Veränderungen der VO_2max klinisch und trainingspraktisch relevant sein können (Molina-Garcia et al., 2022), sollen alternative Messverfahren nur dann als austauschbar gelten, wenn die LoA innerhalb eines akzeptablen klinischen Bereichs liegen. Diese Empfehlungen unterstreichen nochmals das Potential des SCG basierten Verfahrens zur Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme, gleichzeitig jedoch auch die Notwendigkeit einer kontextsensitiven Anwendung, sowie einer fortlaufenden methodischen Weiterentwicklung.

Literaturverzeichnis

- Araújo, C. G. S., & Scharhag, J. (2016). Athlete: A working definition for medical and health sciences research. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(1), 4–7. <https://doi.org/10.1111/sms.12632>
- Ashouri, H., & Inan, O. T. (2017). Automatic Detection of seismocardiogram sensor misplacement for robust pre-ejection period estimation in unsupervised settings. *IEEE Sensors Journal*, 17(12), 3805–3813. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2701349>
- Barmeyer, A., & Meinertz, T. (2002). Anaerobic threshold and maximal oxygen uptake in patients with coronary artery disease and stable angina before and after percutaneous transluminal coronary angioplasty. *Cardiology*, 98(3), 127–131. <https://doi.org/10.1159/000066320>
- Bassett, D. R., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(1), 70–84. <https://doi.org/10.1097/00005768-200001000-00012>
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 1(8476), 307–310.
- Brehm, W., & Rütten, A. (2004). Gesundheitssport: Ziele, Zielgruppen und Wirkungen. *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz*, 47(3), 251–258. <https://doi.org/10.1007/s00103-003-0793-0>
- Carter, A. M., Humphreys, L., Beswick, A., Kesterton, S., Bugg, A., & Platts, K. (2025). The acceptability of a novel seismocardiography device for measuring VO2 max in a workplace setting: A mixed methods approach. *BMC Public Health*, 25(1), 347. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-21480-6>
- Cohen, J. (2009). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. ed., reprint). New York: Psychology Press.
- Criée, C.-P., Baur, X., Berdel, D., Bösch, D., Gappa, M., Haidl, P., Husemann, K., Jörres, R. A., Kabitz, H.-J., Kardos, P., Köhler, D., Magnussen, H., Merget, R., Mitfessel, H., Nowak, D., Ochmann, U., Schürmann, W., Smith, H.-J., Sorichter, S., & Worth, H. (2015). Standardization of spirometry: 2015 update. *Pneumologie (Stuttgart, Germany)*, 69(3), 147–164. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1391345>
- CORTEX Biophysik GmbH. (Oktober 2023). Cortex. METALYZER® 3B [Brochüre]. Zugriff am 14. November 2025 unter <https://cortex->

medical.com/media/userfiles/Broschueren/2023/METALYZER%203B_DEUTSCH_web_2023.pdf.

Froböse, I. (2023). Muskeln – die Gesundmacher: Warum Bewegung so wichtig ist und wie wir sie richtig dosieren. Ullstein.

Garber, C. E., Blissmer, B., Deschenes, M. R., Franklin, B. A., Lamonte, M. J., Lee, I.-M., Nieman, D. C., & Swain, D. P. (2011). Quantity and quality of exercise for Developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: Guidance for prescribing exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(7), 1334–1359. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318213fefb>

Hansen, M. T., Gronfeldt, B. M., Romer, T., Fogelstrom, M., Sorensen, K., Schmidt, S. E., & Helge, J. W. (2021). Determination of maximal oxygen uptake using seismocardiography at rest. *Computing in Cardiology (CinC)*, 1–4. <https://doi.org/10.23919/CinC53138.2021.9662756>

Hansen, M. T., Husted, K., Modvig, J. L., Lange, K. K., Weinreich, C. M., Tranberg, C., Rømer, T., Ingersen, A., Dela, F., & Helge, J. W. (2025). $\dot{V}O_{2peak}$ estimation in people with overweight and obesity before and after a 14-week lifestyle intervention. *International Journal of Obesity (2005)*. <https://doi.org/10.1038/s41366-025-01713-9>

Hansen, M. T., Rømer, T., Højgaard, A., Husted, K., Sørensen, K., Schmidt, S. E., Dela, F., & Helge, J. W. (2023). Validity and reliability of seismocardiography for the estimation of cardiorespiratory fitness. *Cardiovascular Digital Health Journal*, 4(5), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.cvdhj.2023.08.020>

Hansen, M. T., Rømer, T., Lange, K. K., Dela, F., & Helge, J. W. (2024). Accuracy of a non-exercise method using seismocardiography for the estimation of $\dot{V}O_{2peak}$ in sub-elite football players. *European Journal of Sport Science*, 24(7), 889–898. <https://doi.org/10.1002/ejsc.12147>

Healthcare-Bulletin. (2024). Cardiovascular adaptations to exercise: A systematic review of molecular, structural, and functional changes in response to different training modalities. Healthcare Bulletin. <https://www.healthcare-bulletin.co.uk/article/cardiovascular-adaptations-to-exercise-a-systematic-review-of-molecular-structural-and-functional-changes-in-response-to-different-training-modalities-4039/>

- Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: The physiology of champions. *The Journal of Physiology*, 586(1), 35–44. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.143834>
- Kaminsky, L. A., Imboden, M. T., Arena, R., & Myers, J. (2017). Reference standards for cardiorespiratory fitness measured with cardiopulmonary exercise testing using cycle ergometry: Data from the Fitness Registry and the Importance of Exercise National Database (FRIEND) Registry. *Mayo Clinic Proceedings*, 92(2), 228–233. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2016.10.003>
- Kleinloog, J. P. D., Van Laar, S. P. G. A., Schoffelen, P. F. M., & Plasqui, G. (2021). Validity and reproducibility of VO₂ max testing in a respiration chamber. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 31(6), 1259–1267. <https://doi.org/10.1111/sms.13944>
- Levine, B. D. (2008). .VO₂max: What do we know, and what do we still need to know? *The Journal of Physiology*, 586(1), 25–34. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.147629>
- Lundby, C., Montero, D., & Joyner, M. (2017). Biology of VO₂ max: Looking under the physiology lamp. *Acta Physiologica*, 220(2), 218–228. <https://doi.org/10.1111/apha.12827>
- Matabuena, M., Vidal, J. C., Hayes, P. R., & Huelin Trillo, F. (2018). A 6-minute sub-maximal run test to predict VO₂ max. *Journal of Sports Sciences*, 36(22), 2531–2536. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1468149>
- McKinney, J., Velghe, J., Fee, J., Isserow, S., & Drezner, J. A. (2019). Defining athletes and exercisers. *The American Journal of Cardiology*, 123(3), 532–535. <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2018.11.001>
- Molina-Garcia, P., Notbohm, H. L., Schumann, M., Argent, R., Hetherington-Rauth, M., Stang, J., Bloch, W., Cheng, S., Ekelund, U., Sardinha, L. B., Caulfield, B., Brønd, J. C., Grøntved, A., & Ortega, F. B. (2022). Validity of estimating the maximal oxygen consumption by consumer wearables: A Systematic review with meta-analysis and expert Statement of the INTERLIVE Network. *Sports Medicine*, 52(7), 1577–1597. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01639-y>
- Myers, J., Kaminsky, L. A., Lima, R., Christle, J. W., Ashley, E., & Arena, R. (2017). A reference equation for normal standards for VO₂ Max: Analysis from the Fitness Registry and the Importance of Exercise National Database (FRIEND Registry).

- Progress in Cardiovascular Diseases*, 60(1), 21–29.
<https://doi.org/10.1016/j.pcad.2017.03.002>
- Nes, B. M., Janszky, I., Wisløff, U., Støylen, A., & Karlsen, T. (2013). Age-predicted maximal heart rate in healthy subjects: The HUNT fitness study. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 23(6), 697–704. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2012.01445.x>
- Niebauer, J. (Hrsg.). (2015). *Sportkardiologie* (1. Aufl. 2015). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43711-7>
- Rankovic, G., Mutavdzic, V., Toskic, D., Preljevic, A., Kocic, M., Nedin Rankovic, G., & Damjanovic, N. (2010). Aerobic capacity as an indicator in different kinds of sports. *Bosnian Journal of Basic Medical Sciences*, 10(1), 44–48. <https://doi.org/10.17305/bjbms.2010.2734>
- Schmidt, S. E., Hansen, M. T., Roemer, T., Soegaard, P., & Helge, J. W. (2022). Estimation of cardiorespiratory fitness using a chest mounted accelerometer. *European Heart Journal*, 43(Supplement_2), ehac544.276. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehac544.2769>
- Schoffelen, P. F. M., Den Hoed, M., Van Breda, E., & Plasqui, G. (2019). Test-retest variability of VO₂max using total-capture indirect calorimetry reveals linear relationship of VO₂ and Power. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 29(2), 213–222. <https://doi.org/10.1111/sms.13324>
- Schulenburg, R., Schmidt, S. E., Schröder, J., Harth, V., & Reer, R. (2024). Evaluating seismocardiography as a non-Exercise Method for estimating maximal Oxygen uptake. *Healthcare*, 12(21), 2162. <https://doi.org/10.3390/healthcare12212162>
- Srivastava, S., Tamrakar, S., Nallathambi, N., Vrindavanam, S. A., Prasad, R., & Kothari, R. (2024). Assessment of maximal oxygen uptake (VO₂ Max) in athletes and non-athletes assessed in sports physiology laboratory. *Cureus*, 16(5), e61124. <https://doi.org/10.7759/cureus.61124>
- Sørensen, K., Poulsen, M. K., Karbing, D. S., Søgaard, P., Struijk, J. J., & Schmidt, S. E. (2020). A Clinical method for estimation of VO₂max using seismocardiography. *International Journal of Sports Medicine*, 41(10), 661–668. <https://doi.org/10.1055/a-1144-3369>

- Strasser, B., & Burtcher, M. (2018). Survival of the fittest: VO2max, a key predictor of longevity? *Frontiers in Bioscience (Landmark Edition)*, 23(8), 1505–1516. <https://doi.org/10.2741/4657>
- Thunestvedt Hansen, M., Roemer, T., Hoejgaard, A., Husted, K., Soerensen, K., Schmidt, S., Dela, F., & Wulff Helge, J. (2021). Validity and reliability of a clinical non-exercise method for assessment of cardiorespiratory fitness using seismocardiography. *European Heart Journal*, 42(Supplement_1), ehab724.3172. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehab724.3172>
- VentriJect B.V.(2024). *Seismofit® validation guide*. FutureMedics. Zugriff am 23. September 2025 unter <https://www.futuremedics.nl/userdata/file/Seismofit%20Validation%20Guide.pdf>
- VentriJect (2025). Die Technik hinter Seismofit®. Zugriff am 24. Februar 2026 unter <https://ventriject.com/de/die-technik-hinter-seismofit/>
- Weineck, J. (2014). *Optimales Training: Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder- und Jugendtrainings* (16. Aufl.).Balingen: Spitta Verlag.
- Wonisch, M. (2015). Spiroergometrie. In J. Niebauer (Hrsg.), *Sportkardiologie* (S. 217–232).Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-43711-7_17

Abkürzungsverzeichnis

ICC	Intraklassenkorrelationskoeffizient
MW	Mittelwert
Mdn	Median
MAPE	Mittlerer absoluter prozentualer Fehler
MAE	Mittlerer absoluter Fehler
RMSE	Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
SCG	Seismokardiographie
SEE	Standardfehler der Schätzung
VO ₂ max	Maximale Sauerstoffaufnahme
AHA	American Hearts Association
KRP	Kardiorespiratorische Fitness
Max	Maximum
Min	Minimum
CV	Korrelationskoeffizient
CCC	Lin's Konkordanzkorrelationskoeffizient

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Deskriptive Statistik zur Stichprobe	11
Tabelle 2: Klassifikation von Athlet*innen und aktiven Personen in fünf verschiedene Kategorien.....	13
Tabelle 3 Charakterisierung und Differenzierung der sportlichen Kategorien	14
Tabelle 4: Deskriptive Statistik der VO ₂ max (Mittelwert, Streuung, Wertebereich) mit Teilnehmerverteilung nach Leistungsniveau und Geschlecht.....	15
Tabelle 5: Übersicht der Effektstärken, Schätzfehler, Signifikanzniveaus, sowie der ICC innerhalb der jeweiligen Leistungskategorie in Bezug auf die beiden Messmethoden	23

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Boxplot Diagramm zur Darstellung der Streuung der $VO_2\text{max}$ zwischen den beiden Messmethoden (Spiroergometrie und Seismofit®) unter Angabe des Signifikanzniveaus zur Bewertung des statistischen Unterschieds	19
Abbildung 2: Boxplot Diagramm zur Darstellung der Streuung der Differenzen der $VO_2\text{max}$ zwischen den beiden Messmethoden (Spiroergometrie - Seismofit®)	20
Abbildung 3: Scatter-Plot zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen der $VO_2\text{max}$ gemessen mittels Spiroergometrie und den durch das Seismofit®-System geschätzten $VO_2\text{max}$ - Werten [ml/min/kg]. Die durchgezogene Linie stellt die lineare Regressionslinie dar. Angegeben sind die Regressionsgleichung, das Bestimmtheitsmaß (R^2), der p-Wert sowie der Standardfehler der Schätzung (SEE) und das Konfidenzintervall (CI: 95%). ...	21
Abbildung 4: Bland-Altman-Plot Analyse zur Übereinstimmung der $VO_2\text{max}$ zwischen Spiroergometrie und Seismofit®.....	22
Abbildung 5: Boxplot Diagramm zur Darstellung der Streuung der $VO_2\text{max}$ - Werte zwischen der Spiroergometrie und Seismofit® innerhalb der drei definierten Leistungskategorien (Hobbysport, Gesundheitssport und Leistungssport) unter Angabe der Signifikanzniveaus zur Bewertung der statistischen Unterschiede.....	24
Abbildung 6: Bland Altman Plot- Analysen zur Übereinstimmung der $VO_2\text{max}$ zwischen Seismofit® und der Spiroergometrie im Leistungssport	26
Abbildung 7: Bland Altman Plot- Analysen zur Übereinstimmung der $VO_2\text{max}$ zwischen Seismofit® und der Spiroergometrie im Hobbysport	26
Abbildung 8: Bland Altman Plot- Analysen zur Übereinstimmung der $VO_2\text{max}$ zwischen Seismofit® und der Spiroergometrie im Gesundheitssport	27
Abbildung 9: Boxplot Diagramm zur Darstellung der Streuung der $VO_2\text{max}$ – Werte zwischen den beiden Messmethoden (Spiroergometrie und Seismofit®) innerhalb des Geschlechts (weiblich, männlich) unter Angabe des Signifikanzniveaus zur Bewertung der statistischen Unterschiede.....	28
Abbildung 10: Bland-Altman-Plot-Analyse zur Übereinstimmung der $VO_2\text{max}$ zwischen Spiroergometrie und Seismofit® in der Gruppe der Probanden	29
Abbildung 11: Bland-Altman-Plot Analyse zur Übereinstimmung der $VO_2\text{max}$ zwischen Spiroergometrie und Seismofit® in der Gruppe der Probandinnen	30