

Aus dem Medical Center Berlin

DISSERTATION

Einfluss verschiedener Trainingsformen auf spiroergometrische und
hämodynamische Parameter im Nachwuchsleistungssport

Influence of different training types on spiroergometric and hemodynamic
parameters in young elite athletes

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor rerum medicinalium (Dr. rer. medic.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Timo Kirchenberger

aus Berlin

Datum der Promotion: 25.11.2022

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Abstract.....	3
Einführung.....	4
Methodik.....	6
Ergebnisse	9
Diskussion.....	10
Literaturverzeichnis	18
Eidesstattliche Versicherung	26
Anteilerklärung an den erfolgten Publikationen.....	27
Druckexemplare.....	28
Hemodynamics in young athletes following high-intensityinterval or moderate-intensity continuous training	31
Effects of Moderate- versus Mixed-Intensity Training on VO₂peak in Young Well-Trained Rowers.....	40
Lebenslauf	49
Publikationsliste	50
Danksagung	51

Zusammenfassung

Hintergrund: In der vorliegenden Arbeit wurden die Auswirkungen eines moderaten kontinuierlichen Ausdauertrainings (MKT) und einer Kombination aus MKT und hochintensivem Intervalltraining (HIIT) auf die Ausdauerleistungsfähigkeit sowie ausgewählte hämodynamische Parameter bei Nachwuchssportlern untersucht.

Methoden: 17 männliche Ruderer ($15,1 \pm 1,2$ Jahren) wurden in eine Interventionsgruppe (IG) ($n = 10$) und eine Kontrollgruppe (KG) ($n = 7$) randomisiert. Während einer achtwöchigen Interventionsphase führte die IG zusätzlich zum normalen Training auf dem Ruderergometer 3x MKT/Woche (70 – 90 Min., $\approx 70\%$ der maximalen Herzfrequenz (HF_{\max}) + 2 x zusätzlich Krafttraining/Woche) zweimal wöchentlich ein HIIT auf dem Ruderergometer durch (2 x 4 x 2Min. $\approx 95\%$ HF_{\max} , 60 Sek. passive Pause). Die KG absolvierte (neben den drei MKT- und zwei Krafttrainingseinheiten) statt der zwei HIIT-Einheiten zwei weitere MKT-Einheiten pro Woche. Vor und nach der Intervention wurde in beiden Gruppen ein 2000m - Rudertest sowie eine spiroergometrische Untersuchung (Stufentest) durchgeführt. Zusätzlich wurden verschiedene hämodynamische Parameter nicht-invasiv erfasst.

Ergebnisse: Signifikante Verbesserungen wurden in der IG hinsichtlich der absoluten $VO_2\max.$ ($p = 0,04$), der relativen $VO_2\max$ ($p = 0,02$), des systolischen ($p = 0,01$) und diastolischen ($p = 0,05$) peripheren Blutdrucks (BD), des systolischen ($p = 0,05$) und diastolischen ($p = 0,03$) zentralen BDs und der Pulswellengeschwindigkeit (PWV) ($p = 0,05$) gemessen. Die Analyse der Interventionseffekte ergab signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen beim zentralen diastolischen BD ($p = 0,05$), beim Augmentationsdruck (AD) ($p = 0,02$) und beim Augmentationsindex (AIx) ($p = 0,006$) zugunsten der IG. Ferner zeigte sich durch das HIIT eine signifikante Verbesserung hinsichtlich der absoluten Ruderzeit im Stufentest ($p = 0,001$) sowie der 2000m - Zeit ($p = 0,003$). In der KG waren hingegen keine signifikanten Veränderungen dieser Parameter nach der Intervention nachweisbar.

Schlussfolgerung: Die Integration eines HIITs zeigte nicht nur begünstigende Effekte auf die Ausdauerleistungsfähigkeit, sondern auch auf verschiedene hämodynamische Parameter. Das HIIT erwies sich in der vorliegenden Untersuchung als eine zeitökonomische Alternative bzw. effektive Ergänzung zum reinen MKT bei Nachwuchssportlern im Ruderleistungssport.

Abstract

Background: The present study assessed the effects of moderate-intensity continuous training (MICT) and a combination of MICT and high-intensity interval training (HIIT) on rowing performance, VO_2peak and hemodynamic parameters in young athletes.

Methods: Seventeen well-trained rowers (aged 15 ± 1.2 years) were randomly assigned to an intervention (IG) ($n = 10$) and control group (CG) ($n = 7$). During an eight-week intervention, both groups participated in the regular rowing training (3 x /week MICT, 70–90 min, 65–70% of HRpeak + 2 x /week resistance training). The IG completed an additional high-intensity interval training twice weekly (2 x 4 x 2 min. at 95% of HRpeak, 60 sec. passiv rest). Instead of the HIIT, the CG completed two more MICT sessions (70–90 min., 65–70% of HRpeak). Before and after the intervention hemodynamic parameters were recorded non-invasively, a 2000m time trial and an exercise test were performed in both groups.

Results: After the intervention, there were a significant decrease in peripheral systolic ($p = 0,01$) and diastolic ($p = 0,05$) blood pressure (BP), as well as in central systolic ($p = 0,05$) and diastolic BP ($p = 0,03$) in the IG. Furthermore, pulse wave velocity (PWV) ($p = 0,05$) was significantly reduced. Analysis of intervention effects revealed significant between group differences in central diastolic BP ($p = 0,05$), in augmentation pressure (AP) ($p = 0,02$), and in augmentation index (AIx) ($p = 0,006$) favoring IG. The IG showed a significant improvement regarding the absolute rowing time in the graded exercise test ($p = 0,001$), a significant increase in relative VO_2peak ($p = 0,02$), a significant increase in absolute VO_2peak ($p = 0,04$), a significant increase in graded exercise test (GXT) ($p = 0,001$), and a significant improvement in the 2000m time trail ($p = 0,003$). The CG showed no significant changes in the respected parameters after the intervention.

Conclusion: A mixed-intensity training, including HIIT, showed positive effects on rowing performance, VO_2peak , on peripheral and central BP as well as on PWV, AP and AIx in highly trained athletes.

Einführung

Zur Ausbildung der aeroben Leistungsfähigkeit hat sich das moderat-kontinuierliche Ausdauertraining (MKT), sowohl im Leistungssport als auch in Rehabilitations- und Präventionskonzepten fest etabliert. MKT wird als ununterbrochene Dauerbelastung bei niedriger bis moderater Intensität beschrieben (Batacan RB, et al. 2017). Seit einigen Jahren finden neben dem MKT neuere, intensitätsorientierte Trainingskonzepte wie das hochintensive Intervalltraining (HIIT) in Forschung und Praxis Einzug, die sich durch eine hohe Wirksamkeit und Effizienz hinsichtlich verschiedener Gesundheits- und Leistungsparameter auszeichnen (ebd.).

Ein hochintensives Intervalltraining (HIIT) besteht aus mehreren aufeinanderfolgenden Belastungsphasen (Sätzen) mit hoher bis maximaler Anstrengung, die von kurzen Phasen passiver oder aktiver Ruhe bei niedriger Intensität unterbrochen werden (Laursen & Jenkins 2002). Verschiedene Studien belegen bereits den positiven Einfluss eines HIITs auf die kardiorespiratorische Gesundheit und Leistungsfähigkeit bei Gesunden, bei Risikopatienten (Batacan et al. 2017) und auch bei bereits gut trainierten Ausdauerathleten (Milanovi et al. 2015; Laursen & Jenkins 2002).

Da durch HIIT bei geringerem Zeitaufwand vergleichbare oder sogar günstigere leistungsphysiologische Anpassungen im Vergleich zum MKT beobachtet wurden (Milanovi et al. 2015), scheint es insbesondere bei Sportarten mit einem hohen Trainingsumfang eine vielversprechende und zeitökonomische Alternative oder Ergänzung zum MKT zu sein. So lässt sich bei Ausdauerathleten verschiedener Sportarten feststellen, dass häufig erfolgreich nach dem sogenannten polarisierten Trainingsmodell trainiert wird, bei dem verschiedene Trainingsmethoden zu einem Konzept verbunden werden (HIIT, Laktatschwellen Training, MKT, etc.) (Stöggl & Sperlich 2002). Polarisiertes Training findet im Rudern aktuell nur selten Anwendung, obwohl diese Sportart aufgrund der unterschiedlichen physiologischen Anforderungen für die Kombination von Trainingsmethoden prädestiniert zu sein scheint. (Deutscher Ruderverband e.V. 2014; Guellich et al. 2009). Da die Ruderleistung primär durch die aerobe Leistungsfähigkeit der Athletinnen/Athleten beeinflusst wird, ist das MKT bis heute die dominierende Methode im Leistungstraining (Mäestu et al. 2005).

Erste Studien bei erwachsenen Ruderern zeigen allerdings, dass auch ein HIIT die Leistungsfähigkeit verbessern kann (Cosgrove et al. 1999; Driller et al. 2009; Ingham et al. 2008; Ingham et al. 2002). Dabei zeigt sich, dass ein HIIT einem MKT gegenüber durchaus

ebenbürtig oder sogar überlegen war. Abgesehen von einem reinen HIIT scheint sich auch die Ergänzung eines traditionellen MKTs durch ein HIIT positiv auf verschiedene physiologische Parameter ($VO_2\text{max}$, PH-Pufferkapazität, Laktat-Schwelle) auszuwirken (Ní Chéilleachair et al. 2017).

Ogleich die positiven Effekte des HIITs hinsichtlich kardiorespiratorischer Fitness und gesundheitsbezogener Marker bei Erwachsenen umfassend belegt sind (Gibala et al. 2012), so gibt es bisher nur wenig Erfahrung bei jugendlichen Nachwuchssportlern (Ketelhut et al. 2017). Dies ist erstaunlich, obwohl Kinder und Jugendliche hochintensive intermittierende Belastungen sehr gut zu vertragen scheinen und optimale physiologische Voraussetzungen für diese Belastungsformen besitzen (Hebestreit et al. 1993). So weisen sie gegenüber Erwachsenen eine größere Ermüdungsresistenz und eine schnellere Erholung bei hoher bis maximaler Trainingsintensität auf (Birat et al. 2018). Besonders für den Nachwuchsbereich stellt das HIIT somit eine zeiteffiziente und abwechslungsreiche Alternative oder adjuvante Trainingsstrategie zum MKT dar, die im Wesentlichen auch die Trainingsmotivation zu steigern vermag (Lambrick et al. 2015).

Neben der Entwicklung der Leistungsfähigkeit stehen beim Sport vor allem auch die gesundheitsphysiologischen Anpassungen des HIIT im Fokus der Forschung. So gibt es schon seit längerem Hinweise, dass nicht nur die Dauer des Trainings, sondern vor allem die relative Intensität Anpassungen im kardiovaskulären und kardiopulmonalen System moduliert und mit der Gesamtmortalität korreliert (Schnohr et al. 2012). In diesem Zusammenhang hat sich HIIT nicht nur im leistungsorientierten Sport, sondern auch in der Prävention und Rehabilitation von Herz-Kreislauf-Erkrankungen etabliert (Milanovi et al. 2015; Hannan et al. 2018). Unter der Prämisse, dass sich kardiovaskuläre Erkrankungen meist erst im fortgeschrittenen Alter manifestieren, allerdings bereits Kinder und Jugendliche Prädispositionen mit entsprechenden Ausprägungen an den Endorganen und speziell im Gefäßsystem aufweisen, (Urbina et al. 2011), ist es unerlässlich, effektive Trainingsprogramme zu identifizieren, um frühzeitig mit der Prävention beginnen zu können. Es ist hinlänglich bekannt, dass bereits im Kindes- und Jugendalter ein MKT aber auch ein HIIT das kardiovaskuläre Risikoprofil günstig beeinflussen und entsprechende Trainingskonzepte präventiv eingesetzt werden können (Eddolls et al. 2017). Hierbei zeigte sich ähnlich wie im Erwachsenenalter, dass ein HIIT einem MKT überlegen zu sein scheint (Ketelhut et al. 2020). Bisherige Studien haben sich allerdings hauptsächlich auf Inaktive

oder Risikogruppen konzentriert. Ob auch bereits gut trainierte Sportler von einem HIIT nicht nur hinsichtlich leistungsphysiologischer Parameter, sondern auch bezüglich ausgewählter hämodynamischer Parameter profitieren können, ist bisher nicht bekannt. Da es nicht unüblich ist, dass auch ausdauertrainierte Athletinnen/Athleten ein kardiovaskuläres Risikoprofil aufweisen (Leddy & Izzo 2009), hätten diese Erkenntnissedurchaus auch eine therapeutische Relevanz.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, zu überprüfen, wie sich die Integration eines HIITs in ein MKT auf leistungsphysiologische Parameter und die Ruderleistung sowie auf den Blutdruck (BD) und weitere hämodynamische Parameter (arterielle Gefäßsteifigkeit) als frühe Marker für kardiovaskuläre Risiken bei jungen, trainierten Probanden auswirken.

Methodik

17 junge männliche Ruderer (Alter $15,3 \pm 1,2$ Jahre; BMI $22,11 \pm 2,61$ kg/m²) nahmen an der Studie teil. Bei allen Teilnehmern handelte es sich um gut trainierte männliche Nachwuchsathleten, die auf nationaler und internationaler Ebene rudern. Das Trainingsalter der Athleten lag zwischen fünf und acht Jahren und der wöchentliche Trainingsumfang bei 14 – 20 Stunden. Durch eine ausgiebige Anamnese wurden im Vorfeld zentrale Ausschlusskriterien wie regelmäßiger Nikotinkonsum, eine antihypertensive, medikamentöse Therapie oder das Vorliegen chronischer oder akuter Erkrankungen ausgeschlossen. Vor Beginn der Studie wurden die teilnehmenden Athleten und ihre Eltern über Inhalt und Struktur der Studie sowie über mögliche Risiken der Testverfahren aufgeklärt. Sowohl von den Athleten als auch von den entsprechenden Erziehungsberechtigten wurde vor Beginn der Studie eine schriftliche Einwilligung zur Studienteilnahme eingeholt.

Die Studie wurde in Übereinstimmung mit der Helsinki-Deklaration (2002) durchgeführt und von der Ethikkommission der Charité-Universitätsmedizin Berlin genehmigt (EA2/093/18).

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine randomisierte, kontrollierte Interventionsstudie. Die Untersuchungen erfolgten vor (Prä) und nach (Post) einer achtwöchigen Interventionszeit und wurden jeweils zur gleichen Tageszeit und am gleichen Wochentag durchgeführt. Alle Messungen wurden von speziell geschultem Studienpersonal unter standardisierten Bedingungen und kontrollierter Raumtemperatur ($22,7 \pm 1,3^\circ$ C) durchgeführt. Die Messungen wurden zu beiden Untersuchungsterminen vom selben Untersucher vorgenommen. Die Teilnehmer wurden angewiesen, vor den Untersuchungsterminen (Prä und Post) mindestens vier Stunden lang auf den Konsum

koffeinhaltiger oder alkoholischer Getränke zu verzichten. Ferner wurden sie gebeten, 24 Stunden vor den Untersuchungen keiner intensiven körperlichen Belastung mehr nachzugehen. Zu Beginn der Untersuchungen wurden verschiedene anthropometrische Parameter erfasst bzw. ermittelt (Alter, Gewicht, Größe, BMI und Taillenumfang). Darüber hinaus wurde das körperliche Aktivitätsverhalten erfragt. Im Anschluss erfolgten verschiedene hämodynamische Messungen sowie ein Stufentest auf einem Ruderergometer. Nach der Eingangsuntersuchung wurden die Teilnehmer einer Interventionsgruppe (IG) (n = 10) und einer Kontrollgruppe (KG)(n = 7) randomisiert.

Die hämodynamischen Messungen wurden nichtinvasiv mit dem Mobil-O-Graph (PWA-Monitor, IEM, Stolberg Deutschland) als klinisch validiertes Gerät durchgeführt (Franssen et al. 2010). Nach einer zehnmütigen Ruhephase erfolgten bei jedem Probanden zwei Messungen. Während der Messungen saßen die Probanden in einer entspannten Position. Gemessen wurde am rechten Oberarm mittels einer individuell angepassten Oberarmmanschette. Um standardisierte Bedingungen zu gewährleisten, wurden die Empfehlungen der "Clinical Applications of Arterial Stiffness, Task Force III" (Van Bortel 2002) befolgt.

Nach den hämodynamischen Messungen absolvierten die Probanden zur Ermittlung der maximalen aeroben Kapazität ($VO_2\max$) und der maximalen Herzfrequenz (HF_{\max} ; Polar Electro OY, Kempele, Finnland) eine maximale spiroergometrische Untersuchung (Metalyzer 3B-R2 Cortex) auf einem Ruderergometer (Modell D; Concept 2, USA). Die Expiration wurde kontinuierlich (Atemzug für Atemzug) hinsichtlich der O_2 - und CO_2 -Konzentration analysiert und der höchste 30 - Sek. - VO_2 - Wert während der Belastung wurde als $VO_2\max$ definiert. Vor jedem Test wurde das Gerät gemäß der Richtlinien des Herstellers kalibriert.

Als Belastungsprotokoll wurde das standardisierte Stufenprotokoll des Deutschen Ruderverbands e.V. (9) verwendet. Der Test startete bei einer Belastung von 150 Watt bei den Leichtgewichten (< 65 kg) und 200 Watt bei den Schwergewichten (> 65 kg). Alle 4 Minuten wurde die Belastung um 50 Watt bis zur maximalen Ausbelastung gesteigert. Zwischen den Stufen erfolgte eine passive Erholung von jeweils 30 Sek. Dauer. Die Schlagfrequenz wurde in der ersten Stufe auf 18 – 20 Schläge pro Minute (s/min.) festgelegt und für jede weitere Stufe um zwei s/min. erhöht. Nach der vierten Stufe war die Schlagfrequenz frei wählbar. Der Widerstandsfaktor (Dragfaktor) wurde entsprechend der Empfehlung des Deutschen Ruderverbands e.V. für

Nachwuchsathletinnen/Nachwuchsathleten (Nevill et al. 2010) auf 130 gesetzt. Um sicherzustellen, dass jeder Teilnehmer einen gültigen $VO_2\text{max}$ erreicht, mussten mindestens drei der folgenden Kriterien erfüllt sein:

1. Plateau der Sauerstoffaufnahme
2. Respiratorischer Quotient $> 1,1$
3. Fehlender Anstieg der Herzfrequenz bei weiter steigender Belastung
4. Subjektives Belastungsempfinden ≥ 17 auf der Borg-RPE-Skala
5. Willkürliche Erschöpfung (Unfähigkeit, eine Schlagfrequenz von ≥ 15 /min. aufrechtzuerhalten).

Das Zeitfahren wurde auf dem selben Ruderergometer mindestens 48 Stunden nach dem Stufentest durchgeführt. Da das 2000m-Zeitfahren ein integraler Bestandteil der Ruderleistungsmessung ist, waren alle Probanden mit dem Test vertraut. Vor Beginn des Tests führten die Probanden eine zehnminütige, selbstgewählte Erwärmung durch. Die Gesamtzeit des Zeitfahrens wurde aufgezeichnet. Die Schlagfrequenz war von jedem Probanden frei wählbar und der Dragfaktor war auf 130 eingestellt. Um die psychologische Motivation zu standardisieren, wurde auf eine verbale Motivation verzichtet.

Beide Gruppen absolvierten während der achtwöchigen Interventionsphase sieben Trainingseinheiten pro Woche. Die KG führte das normale umfangsorientierte Rudertraining durch. Dieses bestand aus fünf MKT- (70 – 90 Min.; $\approx 70\%$ HF_{max}) sowie zwei Krafteinheiten. Die IG absolvierte hingegen nur drei Einheiten MKT (70 – 90 Min.; $\approx 70\%$ HF_{max}), zwei Krafteinheiten sowie zwei HIIT-Einheiten.

Das HIIT bestand aus zehn Minuten Erwärmung bei 40 % der HF_{max} auf dem Ruderergometer, gefolgt von zwei HIIT-Blöcken bestehend aus je vier 2-minütigen Intervallen bei 95 % der HF_{max} . Zwischen den Intervallen erfolgte eine einminütige aktive Pause. Zwischen HIIT-Blocken und zwei gab es eine passive Serienpause von sieben Minuten, nach dem zweiten HIIT-Block folgte ein zehnminütiges lockeres Cool-down, ebenfalls auf dem Ruderergometer (Abb. 1). Die Gesamtdauer der Trainingseinheit betrug 49 Minuten, die effektive Trainingsdauer jedoch nur 29 Minuten. Alle Rudereinheiten wurden auf dem Ruderergometer durchgeführt.

Alle statistischen Analysen wurden mit IBM SPSS Statistics 25.0 (SPSS, Chicago, IL, USA) durchgeführt. Um die Unterschiede zwischen den Gruppen zum Zeitpunkt der Eingangsmessung zu überprüfen, wurden t-Tests für unabhängige Stichproben angewandt.

Mit dem Levene-Test wurde die Homoskedastizität überprüft. Für den Prä- und Posttestvergleich innerhalb der Gruppen wurde der t-Test für abhängige Stichproben angewandt. Unterschiede der Parameter beider Gruppen und Zeitpunkte wurden mittels zweifaktorieller ANOVA mit Messwiederholung bestimmt. Das statistische Signifikanzniveau wurde bei $p < 0,05$ festgelegt.

Ergebnisse

Die IG zeigte nach der Interventionsphase eine signifikante Verbesserung der 2000m Zeit (IG: $-5,21 \pm 3,18$ Sek., $p = 0,003$), während die Veränderung in der KG nicht signifikant war (KG: $-3,00 \pm 3,50$ Sek., $p = 0,09$). Die Interaktionseffekte zwischen IG und KG waren nicht signifikant ($p = 0,239$). Im Stufentest konnten sich die Athleten der IG nach dem Interventionszeitraum signifikant verbessern, während bei der KG keine Veränderungen gemessen wurden (IG: $+58,0 \pm 38,2$ Sek., $p = 0,001$; KG: $+22,5 \pm 62,9$ Sek., $p = 0,351$). Die Interaktionseffekte waren nicht signifikant ($p = 0,226$). Die IG zeigte einen signifikanten Anstieg in der relativen $VO_2\max$ ($59,44 \pm 2,29$ ml/min. auf $62,89 \pm 3,14$ ml/min., $p = 0,02$), wobei in der KG keine signifikanten Veränderungen beobachtet wurden ($58,43 \pm 5,65$ ml/min. auf $58,29 \pm 6,42$ ml/min., $p = 0,937$). Die Interaktionseffekte zwischen IG und KG waren nicht signifikant ($p = 0,1$). Die Veränderungen der absoluten $VO_2\max$ in der IG waren statistisch signifikant ($4371,30 \pm 845,50$ ml/min. auf $4651,70 \pm 799,70$ ml/min., $p = 0,04$) wobei die KG keine signifikanten Veränderungen nach dem Interventionszeitraum aufweisen konnte ($4331,57 \pm 890,20$ ml/min. auf $4271,29 \pm 743,94$ ml/min., $p = 0,601$).

Die IG zeigte eine signifikante Abnahme von Prä nach Post sowohl im systolischen ($130,3 \pm 14,8$ mmHg auf $118,9 \pm 6,3$ mmHg, $p = 0,01$) als auch im diastolischen peripheren BD ($70,9 \pm 13,1$ mmHg auf $65,6 \pm 8,2$ mmHg, $p = 0,05$). Die Reduktion in der KG war weder beim systolischen ($124,1 \pm 11,4$ mmHg auf $120,4 \pm 7,7$ mmHg, $p = 0,16$) noch beim diastolischen peripheren BD ($63,5 \pm 8,5$ mmHg auf $61,1 \pm 6,9$ mmHg, $p = 0,35$) signifikant. Beim zentralen BD zeigt sich ein ähnliches Bild. Auch hier kam es in der IG zu einer signifikanten Abnahme im systolischen ($106,4 \pm 14,0$ mmHg auf $99,4 \pm 6,7$ mmHg ($p = 0,05$), und diastolischen zentralen BD ($73,4 \pm 13,2$ mmHg auf $67,4 \pm 8,4$ mmHg, $p = 0,03$). In der KG zeigt sich hingegen weder im systolischen ($101,1 \pm 10,6$ mmHg auf $98,4 \pm 3,5$ mmHg, $p = 0,44$) noch im diastolischen peripheren BD eine Veränderung ($65,6 \pm 8,9$ mmHg auf $62,9 \pm 7,9$ mmHg, $p = 0,28$). Die IG zeigte eine signifikante Abnahme der PWV über den Interventionszeitraum ($5,0 \pm 0,5$ m/s auf $4,8 \pm 0,3$ m/s, $p = 0,05$), wohingegen in der KG keine signifikanten Veränderungen gemessen wurden ($4,9 \pm 0,3$ m/s auf $4,9 \pm 0,2$ m/s, $p = 0,86$). Hinsichtlich

des AD zeigte sich in der KG ein signifikanter Anstieg ($2,1 \pm 1,2$ mmHg auf $4,0 \pm 1,5$ mmHg, $p = 0,08$), wohingegen die IG keine Veränderungen aufwies ($3,4 \pm 1,7$ mmHg auf $2,6 \pm 0,9$ mmHg, $p = 0,83$). Zwischen den Gruppen stellte sich ein signifikanter Interventionseffekt dar ($p = 0,03$). Der AIx zeigte weder in der IG noch in der KG eine Veränderung (IG: $5,9 \pm 7,2$ mmHg auf $3,7 \pm 5,8$ mmHg, $p = 0,23$; KG: $3,6 \pm 8,3$ mmHg auf $11,3 \pm 7,8$ mmHg, $p = 0,20$). Es wurde jedoch ein signifikanter Interventionseffekt zwischen den Gruppen gemessen ($p = 0,01$).

Die Ergebnisse sind in den folgenden Publikationen umfassend dargestellt:

Ketelhut, S., Kirchenberger, T. und Ketelhut, R., 2020. Hemodynamics in young athletes following high-intensity interval or moderate-intensity continuous training. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 60(9), S. 1202-1208.

Kirchenberger, T., Ketelhut, S. und Ketelhut R., 2021. Effects of moderate versus mixed-intensity training on VO_2 peak in young well – trained rowers. *Sports* 9(7), S. 92.

Diskussion

Regelmäßiges, kontinuierliches Training im moderaten Intensitätsbereich kann nicht nur zu einer Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit sondern zugleich auch zu einer Verbesserung des kardiovaskulären Risikoprofils führen. Neben einem reinen MKT scheint auch HIIT die Leistungsfähigkeit und die Risikofaktoren bei Nicht-Sportlern oder Risikopatienten mindestens gleichwertig oder sogar stärker positiv zu beeinflussen (Milanovi et al. 2015; Weston et al. 2014; Hannan et al. 2018; Ramos et al. 2015). Wie sich allerdings eine Modifikation des Trainingsvolumens und der Trainingsintensität bei gesunden jugendlichen Leistungsrudern auswirkt, wurde noch nicht hinlänglich analysiert. Das Ziel dieser Studie war es daher, zu überprüfen, wie sich die Integration eines achtwöchigen HIIT ergänzend zum gewohnten MKT auf die Ausdauerleistungsfähigkeit, die ruderspezifische Leistung sowie verschiedene hämodynamische Parameter bei gesunden Nachwuchsathletinnen/Nachwuchsathleten auswirkt. So zeigte sich, dass IG durch die Integration des HIITs sowohl die 2000-m-Ruderleistung, die relative VO_2 max. als auch die Leistungsfähigkeit im Stufentest signifikant verbessern konnte (Kirchenberger et al., 2021). In der KG, die ein reines MKT durchführte, zeigten sich hingegen keine signifikanten Veränderungen (ebd.).

Obwohl im Rudern circa 75 % des Trainingsvolumen mit MKT im niederschweligen Intensitätsbereich unterhalb der Laktat- und der ventilatorischen Schwelle stattfindet (Esteve-Lanao et al. 2007), vollzieht sich die Wettkampfbelastung zu 96 – 98 % im Bereich der maximalen Sauerstoffaufnahme (Hagerman 1979). So stellten schon Billat et al. (2001) heraus, dass bei gut trainierten Ausdauersportlerinnen/Ausdauersportler ein höheres Leistungsniveau und leistungsphysiologisch assoziierte Anpassungen ($VO_2max.$, Laktatschwelle, oxidative Enzyme) durch vermehrtes aerobes Training bei niedrigen-moderaten Intensitäten schwieriger zu erreichen sind. Durch das HIIT rudern die Sportler in Intensitäten nahe der Wettkampfbelastung und können sich somit auf die wettkampfspezifischen Belastungen besser vorbereiten (Kirchenberger et al., 2021). Ni Chèilleachair und Kollegen (2017) zeigten bei adulten Ruderern (22 ± 4 Jahre) nach einer achtwöchigen Trainingsintervention in der HIIT-Gruppe stärkere Verbesserungen im 2000m - Test (sieben Sekunden oder entsprechend 4,25 Bootslängen) sowie eine signifikante Steigerung der durchschnittlichen Wattleistung während der letzten vier Minuten im Stufentest (Peak Power Output) im Vergleich zur MKT-Gruppe. Signifikante Interaktionseffekte mit der MKT-Gruppe wurden in der absoluten VO_2max gemessen. Auch in den Untersuchungen von Driller et al. (2009) verbesserten sich die adulten Ruderer der HIIT Gruppe signifikant stärker als die der MKT-Gruppe, sowohl im 2000m-Test, der durchschnittlichen Wattleistung über 2000m als auch in der relativen VO_2max .

Da die Effektivität der unterschiedlichen HIIT - Protokolle sowie die optimale Dauer der HIIT - Interventionen noch nicht geklärt sind, ist es empfehlenswert, regelmäßig den Trainingsstatus zu überprüfen und die Belastungsparameter entsprechend anzupassen (Laursen & Jenkins 2002). Retrospektiv betrachtet wäre es auch in der vorliegenden Untersuchung interessant gewesen, eine Leistungsüberprüfung nach vier Wochen zu erheben, um die Wirksamkeit der HIIT - Ergänzung über die Interventionsdauer besser analysieren zu können.

Die zu diskutierenden Ursachen hinsichtlich der höheren Effektivität des HIITs sind vielfältig. So kann unter anderem ein Anstieg der mitochondrialen Masse (Gibala et al. 2012), eine Zunahme der Muskelkapillardichte, eine verbesserte oxidative Enzymaktivität, metabolisch effizientere Formen kontraktiler und regulatorischer Proteine (Birat et al. 2018; Burgomaster et al. 2008; Gibala et al. 2008; Ramos et al. 2015), eine Steigerung der Muskelpufferkapazität sowie der Glykogen-Superkompensation (Hood et al. 2006) für die erhöhte Wirksamkeit des HIIT verantwortlich sein. Ferner wird dem HIIT zugeschrieben,

durch die Stimulation des Peroxisom–Proliferator-aktivierten Rezeptor– γ -Coaktivator (PGC-1 α) die mitochondriale Masse zu erhöhen, da dieser als entscheidender Regulator der mitochondrialen Biogenese im Muskel gilt (Wu et al. 1999). Dabei scheint die Intensität des Trainings der Schlüsselfaktor zur Aktivierung des PGC-1 α im Skelettmuskel zu sein (Egan et al. 2010). Es wird vermutet, dass die Trainingsanpassungen durch HIIT oder MKT zwar unterschiedliche intrazelluläre Reize auslösen (Aktivierung der AMP-Proteinkinase, der CaM-Kinase II sowie der p38- mitogenaktivierte Proteinkinasen (p38-MAKP)), schließlich jedoch in gleichen Stoffwechselkaskaden (Gibala et al. 2008) resultieren. Dies könnte eine Erklärung dafür sein, dass HIIT vergleichbare Ergebnisse wie MKT erzielt. Da diverse Untersuchungen sogar die Überlegenheit von HIIT herausstellen, kann vermutet werden, dass die durch HIIT induzierten Reize effizientere metabolische Reaktionen hervorrufen. Zwar sind weiterführende Forschungen der verschiedenen molekularen Signalreaktionen in der Skelettmuskulatur als Reaktion auf unterschiedliche Trainingsimpulse nötig, jedoch scheint sich HIIT als äußerst effektive Methode zur physiologischen Modulation herauszustellen. Neben den Anpassungen auf muskulärer Ebene, begründen sich die Verbesserungen der VO₂max vornehmlich durch die zentrale Sauerstoffzufuhr und Adaptionen des kardiovaskulären Systems (Burgomaster et al. 2008). So wird eine Verbesserung zentraler, kardiopulmonaler Effekte (gestiegene maximale Herzleistung, Gesamthämoglobingehalt und Blutplasma-Volumen) (Astorino et al. 2012) sowie der Hypertrophie des Myokards (Lepretre et al. 2004) diskutiert. Die höhere Belastungsintensität sowie die längere Belastungszeit nahe der VO₂max., die durch die intermittierende Belastung ermöglicht wird, scheinen hierbei die entscheidenden physiologischen Adaptionen hervorzurufen. Mehrere Minuten bei einer Intensität zwischen 90 und 100 % der VO₂max, wie sie beim HIIT erreicht werden können, führen zu einer längeren Trainingsdauer bei maximalem Schlagvolumen (SV). Dies gilt als ein entscheidender Stimulus für kardiale Adaptionen (Billat et al. 2001; Midgley et al. 2007). Neben der verbesserten Leistungsfähigkeit zeichnet sich ein HIIT insbesondere auch durch eine wesentlich kürzere Trainingszeit aus, was sich insbesondere auch günstig auf die Motivation auswirken kann. Somit scheint HIIT nicht nur eine effektive Methode zu sein, um bei bereits gut trainierten Sportlerinnen/Sportlern weitere physiologische Anpassungen hervorzurufen, sondern stellt zudem noch eine ökonomische Komponente in der Trainingssteuerung im Leistungssport dar (Kirchenberger et al., 2021). Athletinnen/Athleten mit bereits hohem Trainingspensum profitieren durch eine zusätzliche Steigerung des Trainingsvolumens in der Ausdauerleistung kaum, da die physiologischen Parameter auf eine Steigerung des Volumens nur geringe Resonanzen zeigen (Billat et al. 2001). Das wurde auch

in der vorliegenden Untersuchung in der KG deutlich. Laursen (2010) sieht im sogenannten polarisierten Trainingsansatz, bei dem ~ 75 % des gesamten Trainingsvolumens bei niedrigen Intensitäten und 10 – 15 % bei supramaximalen Intensitäten durchgeführt werden, die optimale Trainingsintensitätsverteilung für Spitzensportlerinnen/Spitzensportler im Ausdauerbereich. Die Wochenplanung der IG unserer Untersuchung fügt sich in diese Empfehlungen ein (Guellich et al. 2009). Im Hochleistungsrudern werden zwischen 20 und 30 Stunden pro Woche trainiert (Deutscher Ruderverband 2014), wobei neben Schlafen, Essen und aktiven bzw. passiven Regenerationsmaßnahmen nur wenig Zeit für Schule oder einen zweiten Bildungsweg bleibt. In Anbetracht dieser zeitlichen Einschränkungen, scheint HIIT aufgrund seiner Zeiteffizienz ein vielversprechender Ansatz für die Praxis zu sein.

Aber nicht nur im Hochleistungssport, sondern auch im Freizeitsport wird der zeitsparende Effekt von HIIT sehr geschätzt (Kimm et al. 2006). Darüber hinaus wird bei den Untersuchungen häufig festgestellt, dass das intermittierende Trainingsprotokoll des HIIT mehr Spaß macht als ein längeres kontinuierliches Trainingsprogramm, was sich gleichfalls mit den Beobachtungen der vorliegenden Untersuchung deckt (Bartlett et al. 2011; Kirchenberger et al., 2021; Lambrick et al. 2015). Das dadurch erreichte Commitment der Athleten wirkt sich wiederum günstig auf die Trainingsmotivation und das Trainingsengagement aus. Zudem ermöglicht die Integration von HIIT-Protokollen einen Trainingsreiz an der Wettkampfbelastung oder sogar darüber hinaus, wodurch nicht nur die physischen Leistungsparameter verbessert sondern vor allem auch positive Effekte auf die Entwicklung der technischen Fähigkeiten bei der Wettkampfgeschwindigkeit hervorgerufen werden (Kirchenberger et al., 2021).

Gerade für das Kindes- und Jugendalter scheint das HIIT eine vielversprechende Trainingsmethode darzustellen. Laut Literatur scheint ein HIIT für Kinder und Jugendliche sogar besser geeignet zu sein als kontinuierliches Ausdauertraining (Falk & Dontan 2006; Birat et al. 2018), da Kinder einerseits eine höhere Ermüdungsresistenz und andererseits auch eine schnellere Erholung nach Belastungen mit hohen bis maximalen Intensitäten aufweisen (Ketelhut et al., 2020). Größenbedingte Einflüsse (kürzere Stoffwechselstrecken, kürzere Kreislaufzeit, schnellere Reaktion der Herzfrequenz bzw. Sauerstoffaufnahme) und reifungsbedingte Umstände (geringe relative und absolute Leistungsabgabe), die zu günstigeren, metabolischen Voraussetzungen führen (Falk & Dotan 2006), scheinen hierfür verantwortlich zu sein. Zugleich liefern eine höhere oxidative Aktivität der Muskulatur, eine geringere Produktion von Stoffwechselabbauprodukten (Kumulation der H⁺-Ionen, Laktat,

u.a.) und eine geringere Beeinträchtigung der neuromuskulären Aktivierung bei Kindern und Jugendlichen optimale Voraussetzungen für HIIT (Ratel et al. 2006). In einer Studie von Birat et al. (2018) zeigten Heranwachsende ein Stoffwechselprofil, das mit dem gut trainierter erwachsener Ausdauersportlerinnen/Ausdauersportler vergleichbar oder diesem sogar überlegen war. So könnte man Kinder und Jugendliche durchaus als die perfekten „HIIT-Sportler“ bezeichnen (Ketelhut et al., 2020).

Hinsichtlich der hämodynamischen Parameter zeigte die IG eine signifikante Verbesserung des peripheren und zentralen BDs und der PWV nach der Intervention, während bei der KG keine Veränderungen beobachtet wurden. Beim AD und beim AIx zeigten sich ferner signifikante Interaktionseffekte. Die positiven Effekte des HIITs auf den peripheren BD stehen im Einklang mit verschiedenen Untersuchungen, die an Risikogruppen durchgeführt wurden, die vorher sportlich nicht aktiv waren (Garcia-Hermoso et al. 2016; Racil et al. 2016). In einer zwölfwöchigen Untersuchung an adipösen Probandinnen konnten Racil et al. (2016) stärkere Verbesserungen nach HIIT beim Blutdruck, den Leptin- und Insulinlevels sowie der Körpermasse und im Körperfettanteil zeigen als nach MKT. Die Meta-Studie von Garcia-Hermoso et al. (2016) analysierte an adipösen Jugendlichen die Auswirkungen von HIIT-Interventionen und bestätigte in Ergebnissen von neun Untersuchungen und insgesamt 274 Probandinnen die Überlegenheit von HIIT gegenüber MKT hinsichtlich der Auswirkungen auf den Bluthochdruck sowie die $VO_2\text{max}$. Die vorliegende Studie ist somit die erste, die vergleichbare Ergebnisse bei bereits sehr gut ausdauertrainierten Nachwuchsrudern nachweisen konnte. Gerade weil HIIT nur als Ergänzung (Ersatz zweier MKT-Einheiten/Woche durch HIIT) zu einem bereits hohen Trainingsvolumen untersucht wurde, sind sowohl die leistungssteigernden als auch die hämodynamischen Effekte der IG umso beeindruckender (Ketelhut et al., 2020). Die Ergebnisse dieser Studie präsentieren eine klinische Relevanz, da ein erhöhter BD bereits im jugendlichen Alter zu Veränderungen vaskulärer und kardialer Strukturen führen kann (Urbina et al. 2011). Zudem ist ein erhöhter BD in der Kindheit bereits prädiktiv für ein höheres kardiovaskuläres Risiko im Erwachsenenalter (Berenson et al. 1998). Eine frühzeitige Senkung des BD, wie in der vorliegenden Studie erzielt wurde, kann daher durchaus der Gefahr einer möglichen Hochdruckentwicklung entgegenwirken und somit die Gefahr zukünftiger kardiovaskulärer Morbidität reduzieren (Berenson et al. 1998). Da die arterielle Hypertonie zudem die häufigste kardiovaskuläre Erkrankung unter Trainierten ist (Bruno et al. 2011), unterstreichen die vorliegenden Ergebnisse die Bedeutung des HIITs auch für die kardiovaskuläre Prävention im

Leistungssport. Schleich et al. (2016) definieren als ultimatives Ziel im Umgang mit hypertensiven Athletinnen/Athleten die angemessene Behandlung des BDs, um langfristige kardiovaskuläre Komplikationen zu minimieren aber gleichzeitig Auswirkungen auf die sportliche Leistung gering zu halten. Da die Auswahl medikamentöser Behandlungen oft durch den Code der World Anti-Doping Agentur eingeschränkt ist und einige Medikamente zudem leistungslimitierende Auswirkungen haben können (z. B. Diuretika), sind Lifestyle-Veränderungen aber auch Veränderungen im Trainingssystem manchmal unerlässlich (Schleich et al., 2016). Auch junge Spitzenathletinnen/Spitzenathleten im Rudersport können somit trotz eines hohen Trainingsumfangs von der Integration eines HIITs, nicht aber durch eine Erhöhung des MKTs, hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit (Billat et al. 2001) als auch ausgewählter kardiovaskulärer Risikoparameter profitieren. Obgleich der periphere BD als primärer und wesentlicher Risikofaktor für kardiovaskuläre Erkrankungen gilt, zeigten Ohte et al. (2007), dass der zentrale BD stärker mit präklinischen Organschäden assoziiert wird und ein besserer Prädiktor kardiovaskulärer Gesundheit ist (Roman et al. 2007). Das unterstreicht die Bedeutung der vorliegenden Ergebnisse, da die IG neben der signifikanten Reduktion im peripheren auch eine Abnahme im zentralen BD aufweist. Die Implementierung von nur zwei HIIT-Einheiten in das Rudertraining senkte bereits nach acht Wochen bei den jungen, gesunden Leistungssportlern der Interventionsgruppe signifikant auch den zentralen BD und damit auch das zukünftige kardiovaskuläre Risiko (Roman et al. 2007).

Die PWV spiegelt die arterielle Gefäßsteifigkeit wider und ist als Hinweis struktureller Gefäßveränderungen bereits im jungen Alter erhöht, noch bevor eine BD-Erhöhung nachweisbar ist (Kucеров et al. 2006). Die PWV gilt zugleich als wichtiger Prädiktor für die kardiovaskuläre Morbidität und Mortalität (Ben-Shlomo et al. 2014). Beck et al. (2013) konnten bei Erwachsenen zeigen, dass bereits eine Bewegungsintervention über acht Wochen in der Lage ist, die PWV zu senken. Weitere Untersuchungen an adulten Probanden deuten darauf hin, dass HIIT-Interventionen effizienter und effektiver die PWV senken können als MKT (Ramírez-Vélez et al. 2019; Rakobowchuk et al. 2008). Bei den jugendlichen Nachwuchsathleten der IG dieser Untersuchung konnte im Gegensatz zur KG ebenfalls eine signifikante Reduktion der PWV festgestellt werden. Neben der PWV besitzt der AIX als indirekter Parameter der arteriellen Steifigkeit ebenfalls eine hohe prognostische Relevanz. Nürnberger et al. (2002) beschreiben die Korrelation der Pulswellenreflexion mit mehreren kardiovaskulären Risikoscores (ESC Risiko Chart, absolutes Risk (%) und SMART). Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen dabei bei den Ruderern, dass auch der AIX,

als wesentlicher Marker der Gefäßsteifigkeit unabhängig von bekannten Einflussvariablen (Alter, BMI, Körpergröße), signifikant durch die HIIT-Ergänzung profitiert.

Die durch HIIT induzierten Mechanismen, die zu einer verbesserten hämodynamischen Reaktion führen, sind bis heute noch nicht gänzlich erforscht. Es wird allerdings vermutet, dass sich speziell das HIIT auf den endothelialen Scherstress, den oxidativen Stress, die sympathische Aktivitätsmodulation und auch auf das Renin – Angiotensin – Aldosteron - System (RAAS) auswirkt und so vasoaktive Funktionen moduliert. Scherstressinduzierte Verbesserungen der Endothelfunktion werden auf die Freisetzung vasoaktiver Substanzen zurückgeführt (Beck et al. 2013). Es ist bekannt, dass Scherstress durch einen mechanischen Stimulus Kaliumkanäle aktiviert, die die Kalziumaufnahme in die Endothelzellen erleichtern. Der Anstieg des intrazellulären Kalziums aktiviert somit die endotheliale Stickstoffmonoxid-Synthase (eNOS), was zu einer Erhöhung der NO-Bioverfügbarkeit führt (Michel & Vanhoutte 2010). Mitranun et al. (2014) konnten zeigen, dass die Bioverfügbarkeit von NO nach HIIT signifikant höher war als nach einem MKT. Es ist anzunehmen, dass die höhere Belastungsintensität beim HIIT zu einem höheren Sauerstoffbedarf in der arbeitenden Muskulatur führt, wodurch es konsekutiv zu einer Zunahme des Blutflusses kommt. Dies führt wiederum zu einer höheren mechanischen Reibung an der Innenseite der Blutgefäße, wodurch die scherstressinduzierte NO-Ausschüttung ansteigt.

Erhöhter oxidativer Stress beeinflusst ebenfalls die Bioverfügbarkeit von NO, jedoch über einen anderen Stoffwechselweg. Als Nebenprodukt der mitochondrialen Zellatmung entstehen vermehrt reaktive Sauerstoffspezies (ROS), welche zu einer schnellen oxidativen Inaktivierung von Stickstoff und zur Bildung von toxischem Peroxynitrat führen. Peroxynitrat entkoppelt die endotheliale NO-Synthase (eNOS), wodurch eNOS nicht mehr Stickstoff, sondern Superoxid -Anionen produziert, welche die vaskuläre Dysfunktion steigern (Förstermann 2010). Es hat sich gezeigt, dass HIIT den belastungsinduzierten oxidativen Stress stärker reduziert als MKT (Weston et al. 2014), wodurch wiederum die NO-Produktion positiv beeinflusst und die gefäßschützende Funktion von eNOS aufrechterhalten wird.

Ein weiterer Mechanismus, der die positiven Effekte von HIIT erklären könnte, ist eine stärkere Reduktion der sympathischen Aktivität (Halliwill et al. 1996). Ketelhut et al. (2017) konnten zeigen, dass eine regelmäßige Bewegungsintervention mit intermittierenden Belastungen bei moderaten bis hohen Intensitäten sich positiv auf die kardiale autonome

Kontrolle (Herzfrequenzvariabilität) bei Kindern auswirkt. So konnten sie eine Erhöhung der kardial vagalen Aktivität mit einem signifikanten Anstieg des RMSSD (Root Mean Sum of Squared Distance) sowie einer Abnahme des Verhältnisses von „Low Frequency-Power“ zu „High Frequency-Power“ feststellen (Ketelhut et al. 2017). Darüber hinaus müssen weitere Auswirkungen auf das RAAS in Betracht gezogen werden. DeOliveira et al. (2017) zeigten in Mausexperimenten, dass HIIT positive Effekte auf die Proteinexpression im RAAS des linken Ventrikels hat. Die Autoren vermuten, dass aerobes Training als Blocker des RAAS wirksam sein könnte, da es die RAAS - Aktivität im Gehirn reduziert und damit den arteriellen Druck sowie die sympathische Überaktivität senkt (Patel & Zheng 2011). Da verschiedene Studien gezeigt haben, dass HIIT einen größeren Einfluss auf die sympathische Regulierung und den BD hat, kann erwartet werden, dass HIIT indirekte Effekte im RAAS erzielt (Tucker et al. 2015; De Oliveira et al. 2017; Tjønnå et al. 2008). Letztere müssen aber noch in Humanstudien nachgewiesen werden. Die günstigen Effekte auf verschiedene hämodynamische Parameter unterstreicht die bereits mehrfach bestätigte günstige Wirksamkeit durch ein HIIT. Anders als bei vorangegangenen Studien, konnten in der vorliegenden Arbeit selbst bei gesunden ausdauertrainierten Nachwuchssportlern günstige Effekte auf das Herz-Kreislauf-System erzielt werden (Ketelhut et al., 2020). Diese Effekte blieben bei der KG, die lediglich ein MKT durchführte, aus. Es lässt sich annehmen, dass insbesondere Sportlerinnen/Sportler mit einem erhöhten BD davon profitieren könnten, indem hochintensiveintermittierende Belastungen in Form eines polarisierten Trainingsmodells in das Trainingsprogramm integriert und somit auf eine möglicherweise erforderliche medikamentöse Therapie verzichtet werden kann. Weitere Studien speziell an hypertonen Ausdauerathletinnen/Ausdauerathleten wären in diesem Zusammenhang wünschenswert.

Die im Rahmen der Dissertation durchgeführten Studien konnte zeigen, dass sich die Integration eines HIITs in ein umfangsorientiertes Trainingsprogramm im Nachwuchsleistungssport bei Ruderern vorteilhaft auf die ruderspezifische Leistung, die Ausdauerleistungsfähigkeit und ausgewählte hämodynamische Parameter auswirken kann. Die Ergebnisse unterstützen damit die Annahme, dass ein polarisiertes Trainingskonzept im Ausdauerleistungssport effektiver ist als ein reines MKT. Darüber hinaus konnten durch die Ergebnisse erstmals gezeigt werden, dass sich ein solcher Trainingsansatz bei bereits sehr gut trainierten Nachwuchsathleten auch begünstigend auf das kardiovaskuläre Risiko auswirken könnte. Somit lässt sich vermuten, dass ein HIIT ein möglicher Therapieansatz insbesondere bei hypertonen Sportlern sein könnte. Hier bedarf es weiterer umfassenderer Studien speziell an Sportlerinnen/Sportlern mit einem erhöhten Blutdruckprofil.

Literaturverzeichnis

Astorino, T., Allen, R., Roberson, D. und Jurancich, M., 2012. Effect of High-Intensity Interval Training on Cardiovascular Function, VO₂max, and Muscular Force. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(1), S. 138–145.

Bartlett, J., Close, G., MacLaren, D., Gregson, W., Drust, B. und Morton, J., 2011. High-intensity interval running is perceived to be more enjoyable than moderate-intensity continuous exercise: Implications for exercise adherence. *Journal of Sports Sciences*, 29(6), S. 547–553.

Batacan, R., Duncan, M., Dalbo, V., Tucker, P. und Fenning, A., 2017. Effects of high-intensity interval training on cardiometabolic health: a systematic review and meta-analysis of intervention studies. *British Journal of Sports Medicine*, 51(6), S. 494–503.

Beck, D., Martin, J., Casey, D. und Braith, R., 2013. Exercise Training Reduces Peripheral Arterial Stiffness and Myocardial Oxygen Demand in Young Prehypertensive Subjects. *American Journal of Hypertension*, 26(9), S. 1093–1102.

Ben-Shlomo, Y., Spears, M., Boustred, C., May, M., Anderson, S., Benjamin, E., Boutouyrie, P., Cameron, J., Chen, C., Cruickshank, J., Hwang, S., Lakatta, E., Laurent, S., Maldonado, J., Mitchell, G., Najjar, S., Newman, A., Ohishi, M., Pannier, B., Pereira, T., Vasani, R., Shokawa, T., Sutton-Tyrell, K., Verbeke, F., Wang, K., Webb, D., Willum Hansen, T., Zoungas, S., McEniery, C., Cockcroft, J. und Wilkinson, I., 2014. Aortic pulse wave velocity improves cardiovascular event prediction. *Journal of the American College of Cardiology*, 63(7), S. 636–646.

Berenson, G., Srinivasan, S., Bao, W., Newman, W., Tracy, R. und Wattigney, W., 1998. Association between multiple cardiovascular risk factors and atherosclerosis in children and young adults. *New England Journal of Medicine*, 338(23), S. 1650–1656.

Billat, L., 2001. Interval training for performance: a scientific and empirical practice: special recommendations for middle- and long-distance running. Part I: aerobic interval training. *Sports Medicine*, 31(1), S. 13–31.

- Birat, A., Bourdier, P., Piponnier, E., Blazeovich, A., Maciejewski, H., Duché, P. und Ratel, S., 2018. Metabolic and fatigue profiles are comparable between prepubertal children and well-trained adult endurance athletes. *Frontiers in Physiology*, 9, S. 387.
- Bruno, R., Cartoni, G. und Taddei, S., 2011. Hypertension in special populations: athletes. *Future Cardiology*, 7(4), S. 571–584.
- Burgomaster, K., Howarth, K., Phillips, S., Rakobowchuk, M., MacDonald, M., McGee, S. und Gibala, M., 2008. Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. *The Journal of Physiology*, 586(1), S. 151–160.
- Cosgrove, M., Wilson, J., Watt, D. und Grant, S., 1999. The relationship between selected physiological variables of rowers and rowing performance as determined by a 2000 m ergometer test. *Journal of Sports Sciences*, 17(11), S. 845–852.
- De Oliveira Sá, G., dos Santos Neves, V., de Oliveira Fraga, S., Souza-Mello, V. und Barbosa-da-Silva, S., 2017. High-intensity interval training has beneficial effects on cardiac remodeling through local renin-angiotensin system modulation in mice fed high-fat or high-fructose diets. *Life Sciences*, 189, S. 8–17.
- Deutscher Ruderverband, 2014. *Trainingsmethodische Grundkonzeption*. Deutscher Ruderverband e.V., S. 44–47.
- Driller, M., Fell, J., Gregory, J., Shing, C. und Williams, A., 2009. The effects of high-intensity interval training in well-trained rowers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 4(1), S. 110–121.
- Eddolls, W., McNarry, M., Stratton, G., Winn, C. und Mackintosh, K., 2017. High-intensity interval training interventions in children and adolescents: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 47(11), S. 2363–2374.
- Egan, B., Carson, B., Garcia-Roves, P., Chibalin, A., Sarsfield, F., Barron, N., McCaffrey, N., Moyna, N., Zierath, J. und O’Gorman, D., 2010. Exercise intensity-dependent regulation of peroxisome proliferator-activated receptor γ coactivator-1 α mRNA abundance is

associated with differential activation of upstream signalling kinases in human skeletal muscle. *The Journal of Physiology*, 588(10), S. 1779–1790.

Esteve-Lanao, J., Foster, C., Seiler, S. und Lucia, A., 2007. Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3), S. 943.

Falk, B. und Dotan, R., 2006. Child-Adult Differences in the recovery from high-intensity exercise. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 34(3), S. 107–112.

Förstermann, U., 2010. Nitric oxide and oxidative stress in vascular disease. *Pflügers Archiv –European Journal of Physiology*, 459(6), S. 923–939.

Franssen, P. und Imholz, B., 2010. Evaluation of the Mobil-O-Graph new generation ABPM device using the ESH criteria. *Blood Pressure Monitoring*, 15(4), S. 229–231.

García-Hermoso, A., Cerrillo-Urbina, A., Herrera-Valenzuela, T., Cristi-Montero, C., Saavedra, J. und Martínez-Vizcaíno, V., 2016. Is high-intensity interval training more effective on improving cardiometabolic risk and aerobic capacity than other forms of exercise in overweight and obese youth? A meta-analysis. *Obesity Reviews*, 17(6), S. 531–540.

Gibala, M. und McGee, S., 2008. Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 36(2), S. 58–63.

Gibala, M., Little, J., MacDonald, M. und Hawley, J., 2012. Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. *The Journal of Physiology*, 590(5), S. 1077–1084.

Guellich, A., Seiler, S. und Emrich, E., 2009. Training methods and intensity distribution of young world-class rowers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 4(4), S. 448–460.

Hagerman, F., Hagerman, G. und Mickelson, T., 1979. Physiological profiles of elite rowers. *The Physician and Sportsmedicine*, 7(7), S. 74–83.

Halliwill, J., Taylor, J. und Eckberg, D., 1996. Impaired sympathetic vascular regulation in humans after acute dynamic exercise. *The Journal of Physiology*, 495(1), S. 279–288.

Hannan, A., Hing, W., Simas, V., Climstein, M., Coombes, J., Jayasinghe, R., Byrnes, J. und Furness, J., 2018. High-intensity interval training versus moderate-intensity continuous training within cardiac rehabilitation: a systematic review and meta-analysis. *Open Access Journal of Sports Medicine*, Volume 9, S. 1–17.

Hebestreit, H., Mimura, K. und Bar-Or, O., 1993. Recovery of muscle power after high-intensity short-term exercise: comparing boys and men. *Journal of Applied Physiology*, 74(6), S. 2875–2880.

Hood, D., Irrcher, I., Ljubicic, V. und Joseph, A., 2006. Coordination of metabolic plasticity in skeletal muscle. *Journal of Experimental Biology*, 209(12), S. 2265–2275.

Ingham, S., Carter, H., Whyte, G. und Doust, J., 2008. Physiological and performance effects of low versus mixed-intensity rowing training. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(3), S. 579–584.

Ingham, S., Whyte, G., Jones, K. und Nevill, A., 2002. Determinants of 2,000 m rowing ergometer performance in elite rowers. *European Journal of Applied Physiology*, 88(3), S. 243–246.

Ketelhut, SR., Ketelhut, S., Riedel, S., Willich, S., Meyer-Sabelleck, W., Müssig, K. und Ketelhut, K., 2017. Auswirkung einer moderaten Intervallbelastung auf die Herzfrequenzvariabilität bei Grundschulkindern. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 68, S. 269–274.

Ketelhut, S., Kircher, E., Ketelhut, SR., Wehlan, E. und Ketelhut, K., 2020. Effectiveness of Multi-activity, High-intensity Interval Training in School-aged Children. *International Journal of Sports Medicine*, 41(04), S. 227–232.

Ketelhut, S., Kirchenberger, T. und Ketelhut, R., 2020. Hemodynamics in young athletes following high-intensity interval or moderate-intensity continuous training. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 60(9), S. 1202–1208.

- Kimm, S., Glynn, N., McMahon, R., Voorhees, C., Striegel-Moore, R. und Daniels, S., 2006. Self-perceived barriers to activity participation among sedentary adolescent girls. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 38(3), S. 534–540.
- Kirchenberger, T., Ketelhut, S., Ketelhut, R., 2021. Effects of moderate versus mixed-intensity training on VO₂peak in young well-trained rowers. *Sports*, 9(7), S. 92.
- Kucerova, J., Filipovsky, J., Staessen, J., Cwynar, M., Wojciechowska, W., Stolarz, K., Kuznetsova, T., Gasowski, J., Dolejsova, M. und Grodzicki, T., 2006. Arterial characteristics in normotensive offspring of parents with or without a history of hypertension. *American Journal of Hypertension*, 19(3), S. 264–269.
- Lambrick, D., Westrupp, N., Kaufmann, S., Stoner, L. und Faulkner, J., 2015. The effectiveness of a high-intensity games intervention on improving indices of health in young children. *Journal of Sports Sciences*, 34(3), S. 190–198.
- Laursen, P. und Jenkins, D., 2002. The Scientific Basis for High-Intensity Interval Training. *Sports Medicine*, 32(1), S. 53–73.
- Laursen, P., 2010. Training for intense exercise performance: high-intensity or high-volume training? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20, S. 1–10.
- Leddy, J. und Izzo, J., 2009. Hypertension in Athletes. *The Journal of Clinical Hypertension*, 11(4), S. 226–233.
- Lepretre, P., Koralsztejn, J. und Billat, V., 2004. Effect of exercise intensity on relationship between VO₂max. and cardiac output. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(8), S. 1357–1363.
- Mäestu, J., Jürimäe, J. und Jürimäe, T., 2005. Monitoring of performance and training in rowing. *Sports Medicine*, 35(7), S. 597–617.
- Michel, T. und Vanhoutte, P., 2010. Cellular signaling and NO production. *Pflügers Archiv - European Journal of Physiology*, 459(6), S. 807–816.
- Midgley, A., McNaughton, L. und Jones, A., 2007. Training to Enhance the Physiological

Determinants of Long-Distance Running Performance: can valid recommendations be given to runners and coaches based on current scientific knowledge? *Sports Medicine*, 37(10), S. 857–880.

Milanović, Z., Sporiš, G. und Weston, M., 2015. Effectiveness of High-Intensity Interval Training (HIT) and Continuous Endurance Training for VO₂max Improvements: A Systematic Review and Meta-Analysis of Controlled Trials. *Sports Medicine*, 45(10), S. 1469–1481.

Mitranun, W., Deerochanawong, C., Tanaka, H. und Suksom, D., 2014. Continuous vs interval training on glycemic control and macro- and microvascular reactivity in type 2 diabetic patients. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 24(2), S. e69–e76.

Nevill, A., Beech, C., Holder, R. und Wyon, M., 2010. Scaling concept II rowing ergometer performance for differences in body mass to better reflect rowing in water. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(1), S. 122–127.

Ní Chéilleachair, N., Harrison, A. und Warrington, G., 2017. HIIT enhances endurance performance and aerobic characteristics more than high-volume training in trained rowers. *Journal of Sports Sciences*, 35(11), S. 1052–1058.

Nürnbergger, J., Keflioglu-Scheiber, A., Opazo Saez, A., Wenzel, R., Philipp, T. und Schäfers, R., 2002. Augmentation index is associated with cardiovascular risk. *Journal of Hypertension*, 20(12), S. 2407–2414.

Ohte, N., Saeki, T., Miyabe, H., Sakata, S., Mukai, S., Hayano, J., Niki, K., Sugawara, M. und Kimura, G., 2007. Relationship between blood pressure obtained from the upper arm with a cuff-type sphygmomanometer and central blood pressure measured with a catheter-tipped micromanometer. *Heart and Vessels*, 22(6), S. 410–415.

Patel, K. und Zheng, H., 2012. Central neural control of sympathetic nerve activity in heart failure following exercise training. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 302(3), S. H527–H537.

Racil, G., Coquart, J., Elmontassar, W., Haddad, M., Goebel, R., Chaouachi, A., Amri, M.

und Chamari, K., 2016. Greater effects of high- compared with moderate-intensity interval training on cardio-metabolic variables, blood leptin concentration and ratings of perceived exertion in obese adolescent females. *Biology of Sport*, 33(2), S. 145–152.

Rakobowchuk, M., Tanguay, S., Burgomaster, K., Howarth, K., Gibala, M. und MacDonald, M., 2008. Sprint interval and traditional endurance training induce similar improvements in peripheral arterial stiffness and flow-mediated dilation in healthy humans. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 295(1), S. R236–R242.

Ramírez-Vélez, R., Hernández-Quiñones, P., Tordecilla-Sanders, A., Álvarez, C., Ramírez-Campillo, R., Izquierdo, M., Correa-Bautista, J., Garcia-Hermoso, A. und Garcia, R., 2019. Effectiveness of HIIT compared to moderate continuous training in improving vascular parameters in inactive adults. *Lipids in Health and Disease*, 18(1), S. 1–10.

Ramos, J., Dalleck, L., Tjonna, A., Beetham, K. und Coombes, J., 2015. The Impact of High-Intensity Interval Training Versus Moderate-Intensity Continuous Training on Vascular Function: a Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 45(5), S. 679–692.

Ratel, S., Duche, P. und Williams, C., 2006. Muscle Fatigue during High-Intensity Exercise in Children. *Sports Medicine*, 36(12), S. 1031–1065.

Roman, M., Devereux, R., Kizer, J., Lee, E., Galloway, J., Ali, T., Umans, J. und Howard, B., 2007. Central Pressure More Strongly Relates to Vascular Disease and Outcome Than Does Brachial Pressure. *Hypertension*, 50(1), S. 197–203.

Saco-Ledo, G., Valenzuela, P., Ruiz-Hurtado, G., Ruilope, L. und Lucia, A., 2020. Exercise reduces ambulatory blood pressure in patients with hypertension: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of the American Heart Association*, 9(24), S. 1–13.

Schabort, E., Hawley, J., Hopkins, W. und Blum, H., 1999. High reliability of performance of well-trained rowers on a rowing ergometer. *Journal of Sports Sciences*, 17(8), S. 627–632.

Schleich, K., Smoot, M. und Ernst, M., 2016. Hypertension in athletes and active populations. *Current Hypertension Reports*, 18(11), S. 77.

Stöggl, T. und Sperlich, B., 2014. Polarized training has greater impact on key endurance variables than threshold, high intensity, or high volume training. *Frontiers in Physiology*, 5, S.33.

Tjønnå, A., Lee, S., Rognmo, Ø., Stølen, T., Bye, A., Haram, P., Loennechen, J., Al-Share, Q., Skogvoll, E., Slørdahl, S., Kemi, O., Najjar, S. und Wisløff, U., 2008. Aerobic interval training versus continuous moderate exercise as a treatment for the metabolic syndrome: a pilot study. *Circulation*, 118(4), S. 346–354.

Tucker, P., Scanlan, A. und Dalbo, V., 2015. High intensity interval training favourably affects angiotensinogen mRNA expression and markers of cardiorenal health in a rat model of early-stage chronic kidney disease. *BioMed Research International*, 2015, S. 1–11.

Urbina, E., Khoury, P., McCoy, C., Daniels, S., Kimball, T. und Dolan, L., 2011. Cardiac and vascular consequences of pre-hypertension in youth. *The Journal of Clinical Hypertension*, 13(5), S. 332–342.

Van Bortel, L., Duprez, D., Starmans-Kool, M., Safar, M., Giannattasio, C., Cockcroft, J., Kaiser, D. and Thuillez, C., 2002. Clinical applications of arterial stiffness, Task Force III: recommendations for user procedures. *American Journal of Hypertension*, 15(5), S. 445–452.

Weston, K., Wisløff, U. und Coombes, J., 2013. High-intensity interval training in patients with lifestyle-induced cardiometabolic disease: a systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 48(16), S. 1227–1234.

Wu, Z., Puigserver, P., Andersson, U., Zhang, C., Adelmant, G., Mootha, V., Troy, A., Cinti, S., Lowell, B., Scarpulla, R. und Spiegelman, B., 1999. Mechanisms controlling mitochondrial biogenesis and respiration through the thermogenic coactivator PGC-1. *Cell*, 98(1), S. 115–124.

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Timo Kirchenberger, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Einfluss verschiedener Trainingsformen auf spiroergometrische und hämodynamische Parameter im Nachwuchssport“ („Influence of different training types on spiroergometric and hemodynamic parameters in young elite athletes“) selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Erstbetreuer/in, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; www.icmje.org) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§ 156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

Anteilerklärung an den erfolgten Publikationen

Timo Kirchenberger hatte folgenden Anteil an den Publikationen:

Publikation 1: Ketelhut, S., Kirchenberger, T. und Ketelhut, R., 2020. Hemodynamics in young athletes following high-intensity interval or moderate-intensity continuous training. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 60(9), S. 1202–1208.

Beitrag im Einzelnen:

Die grundlegenden Fragestellungen dieser Arbeit entwickelte ich zusammen mit meinem Betreuer Herrn Prof. Dr. Dr. Ketelhut. Das Studiendesign habe ich entworfen und in Rücksprache mit meinen Betreuern angepasst. Die Stichprobenauswahl sowie Rekrutierung habe ich vorgeschlagen und realisiert. Ferner war ich für die Koordination der Eingangs- und Ausgangsuntersuchungen verantwortlich. Bei der Datenerhebung führte ich die anthropometrischen und spirometrischen Messungen durch. Die hämodynamischen Messungen wurden überwiegend von meinen Betreuern durchgeführt. Die Interventionsinhalte der Interventions- und Kontrollgruppe habe ich geplant. Dabei habe ich die einzelnen Trainingsinhalte entwickelt und zusammen mit dem Rudertrainer Adrian Bretting umgesetzt und betreut. Die Protokollierung des Trainings erfolgte ebenfalls durch mich. Ferner war ich für die Dateneingabe und Aufbereitung der Daten verantwortlich. Die statistische Analyse sowie die Datenauswertung erfolgte durch meine Betreuer. Abbildung 1 und Tabelle 1 habe ich entwickelt. Tabelle 2 wurde von meinen Betreuern entworfen. Beim Verfassen der Publikation stammt die Einleitung und der Methodenteil von mir. Die Diskussion habe ich mit einer umfassenden Literaturrecherche unterstützt. Die Einreichung des Manuskripts erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Erstautor Dr. S. Ketelhut. Bei dem Reviewprozess und der Anpassungen des Manuskripts habe ich meine Betreuer unterstützt.

Publikation 2: Kirchenberger, T., Ketelhut, S., Ketelhut, R., 2021. Effects of moderate versus mixed - intensity training on VO_2 peak in young well-trained rowers. *Sports*, 9(7), S. 92.

Beitrag im Einzelnen:

Die grundlegenden Fragestellungen dieser Arbeit entwickelte ich zusammen mit meinem Betreuer Herrn Prof. Dr. Dr. Ketelhut. Das Studiendesign habe ich entworfen und in Rücksprache mit meinen Betreuern angepasst. Die Stichprobenauswahl sowie Rekrutierung habe ich vorgeschlagen und realisiert. Ferner war ich für die Koordination der Eingangs- und Ausgangsuntersuchungen verantwortlich. Bei der Datenerhebung führte ich die anthropometrischen und spirometrischen Messungen durch. Das Stufenprotokoll der spirometrischen Untersuchung wurde aus der Testbatterie des Deutschen Ruderverbands übernommen. Die Interventionsinhalte der Interventions- und Kontrollgruppe habe ich geplant. Dabei habe ich die einzelnen Trainingsinhalte entwickelt und zusammen mit dem Rudertrainer Adrian Bretting umgesetzt und betreut. Die Protokollierung des Trainings erfolgte ebenfalls durch mich.

Die Durchführung, Beaufsichtigung und Dateneingabe des 2000m Zeitfahrens wurde ebenfalls von mir vorgenommen. Für die Dateneingabe und Aufbereitung war ich verantwortlich. Die statistische Analyse wurden von meinen Betreuern durchgeführt. Die Dateninterpretation erfolgte zusammen mit meinen Betreuern. Die Tabelle 1 sowie die Abbildungen 1 - 5 habe ich entwickelt. Beim Verfassen der Publikation habe ich den ersten Entwurf der Einleitung, des Methodenteils, sowie der Diskussion und der Schlussfolgerungen verfasst. Dieser wurde anschließend gemeinsam mit Dr. S. Ketelhut und Prof. Dr. R. Ketelhut überprüft, bearbeitet und finalisiert. Die Einreichung und der gesamte Reviewprozess erfolgte durch mich und Herrn Dr. S. Ketelhut.

Datum

Unterschrift

Scimagojr

Year: 2019; Subject Category - Physical Therapy, Sports Therapy and Rehabilitation

Gesamtanzahl: 213 Journals

Rank	Title	SJR	SJR Quartile	H index	Total Docs. (2019)	Total Docs. (3 years)	Total Refs.	Total Cites (3 years)
1	British Journal of Sports Medicine	3,71	Q1	171	366	1154	10549	6826
2	Sports Medicine	3,29	Q1	184	163	545	11276	4124
3	American Journal of Sports Medicine	3,24	Q1	221	449	1278	15188	7131
4	International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity	2,64	Q1	117	140	428	7545	3132
5	Medicine and Science in Sports and Exercise	1,89	Q1	224	330	935	10503	4113
6	International Journal of Sports Physiology and Performance	1,78	Q1	66	213	617	6104	2029
7	Exercise and Sport Sciences Reviews	1,72	Q1	99	37	104	1948	392
8	Journal of Physiotherapy	1,47	Q1	68	81	255	1419	479
9	Journal of Science and Medicine in Sport	1,46	Q1	99	254	653	7474	2295
10	Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports	1,37	Q1	115	209	694	8347	2368
11	Journal of Sport Management	1,34	Q1	67	22	127	1337	367
12	Applied Ergonomics	1,24	Q1	98	209	644	9919	2664
13	Journal of Teaching in Physical Education	1,24	Q1	56	13	134	651	272
14	Journal of Strength and Conditioning Research	1,22	Q1	128	414	1275	9232	3106
15	Journal of Head Trauma Rehabilitation	1,22	Q1	99	100	267	4154	888
16	Journal of Sports Sciences	1,2	Q1	137	341	978	14133	2820
17	Sports Health	1,18	Q1	44	70	225	2291	644
18	Physical Therapy	1,15	Q1	150	175	466	7312	1302
19	Journal of Sport and Health Science	1,14	Q1	36	88	229	4022	786
20	Journal of Neurologic Physical Therapy	1,14	Q1	52	47	120	1458	318
21	European Journal of Sport Science	1,13	Q1	55	148	454	5878	1294
22	Archives of Physical Medicine and Rehabilitation	1,11	Q1	188	292	939	11914	2797
23	International Journal of Sports Medicine	1,1	Q1	105	124	431	4547	1013
24	Sport, Exercise, and Performance Psychology	1,05	Q1	20	23	90	937	224
25	Physical Education and Sport Pedagogy	1,05	Q1	36	43	130	2299	405
26	Journal of Athletic Training	1,05	Q1	108	169	407	5391	1042
27	Sport, Education and Society	1,03	Q1	63	74	203	4026	525
28	Clinical Rehabilitation	1,03	Q1	110	190	461	6267	1279
29	Science and Medicine in Football	1,01	Q1	12	54	95	1724	183
30	Clinical Journal of Sport Medicine	1	Q1	102	79	274	1891	666
31	Physiotherapy	0,96	Q1	56	57	187	1863	483
32	Qualitative Research in Sport, Exercise and Health	0,96	Q1	35	46	123	2667	335
33	Sports Medicine - Open	0,95	Q1	23	50	129	3283	360
34	Clinics in Sports Medicine	0,93	Q1	81	55	174	2186	305
35	Ergonomics	0,92	Q1	110	130	433	6064	1131
36	Cartilage	0,92	Q1	33	140	124	5607	371
37	European Physical Education Review	0,92	Q1	44	72	91	3885	217
38	Journal of Rehabilitation Medicine	0,89	Q1	96	127	356	3909	791
39	Research in Sports Medicine	0,89	Q1	35	39	139	1806	361
40	Sociology of Sport Journal	0,84	Q1	57	21	89	1401	166
41	Measurement in Physical Education and Exercise Science	0,84	Q1	40	34	86	1447	148
42	European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine	0,83	Q1	57	109	332	3912	703
43	Physician and Sportsmedicine	0,82	Q1	44	72	203	2836	386
44	BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation	0,77	Q1	22	36	79	1526	192
45	Sports Biomechanics	0,77	Q1	39	130	127	4038	227
46	Sport Science	0,76	Q1	19	41	169	1016	343
47	Biology of Sport	0,76	Q1	27	46	154	1677	332
48	Journal of Hand Therapy	0,76	Q1	62	72	210	2071	301
49	Pediatric Exercise Science	0,76	Q1	63	66	226	2945	361
50	International Biomechanics	0,75	Q1	9	9	27	304	46
51	Musculoskeletal Science and Practice	0,75	Q2	89	123	392	4997	789
52	BMC Obesity	0,73	Q2	18	20	137	996	285
53	Physical Therapy in Sport	0,72	Q2	46	147	287	5871	586
54	Journal of Aging and Physical Activity	0,71	Q2	58	104	237	4922	434
55	Journal of Sports Science and Medicine	0,7	Q2	65	97	255	3913	560

56	Brazilian Journal of Physical Therapy	0,7	Q2	35	70	198	2616	444
57	International Journal of Rehabilitation Research	0,69	Q2	52	60	174	1399	287
58	Strength and Conditioning Journal	0,68	Q2	41	50	229	2471	253
59	Research Quarterly for Exercise and Sport	0,68	Q2	90	77	176	2765	326
60	Sexuality and Disability	0,67	Q2	39	44	108	1766	149
61	Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America	0,65	Q2	58	74	193	2458	384
62	BMJ Open Sport and Exercise Medicine	0,65	Q2	18	115	243	4216	460
63	International Journal of Performance Analysis in Sport	0,62	Q2	29	82	250	2696	407
64	Journal of Sport Rehabilitation	0,61	Q2	51	138	258	2689	346
65	American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation	0,61	Q2	101	252	631	4972	913
66	Journal of Human Kinetics	0,61	Q2	37	125	361	4322	655
67	Physiotherapy Theory and Practice	0,6	Q2	46	234	265	10370	487
68	Rehabilitation Psychology	0,6	Q2	66	56	178	2072	297
69	Journal of Adventure Education and Outdoor Learning	0,6	Q2	22	30	79	1680	135
70	NeuroRehabilitation	0,59	Q2	65	136	327	4853	590
71	PM and R	0,59	Q2	66	186	682	5859	1070
72	European Journal for Sport and Society	0,59	Q2	20	22	73	1156	85
73	Sports Medicine and Arthroscopy Review	0,58	Q2	48	38	123	1618	186
74	Chiropractic and Manual Therapies	0,57	Q2	32	66	131	2982	246
75	Shoulder and Elbow	0,57	Q2	15	84	116	2550	173
76	Disability and Rehabilitation: Assistive Technology	0,56	Q2	41	153	283	5637	591
77	Pediatric Physical Therapy	0,56	Q2	47	97	298	1751	249
78	Journal of Sports Medicine and Physical Fitness	0,53	Q2	65	284	695	9802	912

Das Paper finden sie unter folgendem Link: www.doi.org/10.23736/S0022-4707.20.10814-4

Timo Kirchenberger JCR Journal Results

Journal Data Filtered By: Selected Categories: **SPORT SCIENCES**; Selected Editions: **SCIE**; **SSCI**; **AHCI**; **ESCI**
 Selected JCR Year: 2020 Selected Category Schema: **WOS Selected Open Access: N** Indicator: **Default**; Total Journals: **116**

Rank	Journal name	ISSN	eISSN	Total Citations	2020 JIF	JIF Quartile	2020 JCI	% of OA Gold
1	BRITISH JOURNAL OF SPORTS MEDICINE	0306-3674	1473-0480	30,986	13.8	Q1	3.05	19.37%
2	SPORTS MEDICINE	0112-1642	1179-2035	23,632	11.136	Q1	2.09	27.98%
3	Journal of Sport and Health Science	2095-2546	2213-2961	2,746	7.179	Q1	1.73	100%
4	Qualitative Research in Sport Exercise and Health	2159-676X	2159-6778	1,609	6.736	Q1	1.44	1.57%
5	EXERCISE IMMUNOLOGY REVIEW	1077-5552	1077-5552	1,093	6.308	Q1	0.71	0%
6	EXERCISE AND SPORT SCIENCES REVIEWS	0091-6331	1538-3008	4,053	6.23	Q1	0.9	5.88%
7	AMERICAN JOURNAL OF SPORTS MEDICINE	0363-5465	1552-3365	42,234	6.202	Q1	2.29	2.05%
8	MEDICINE AND SCIENCE IN SPORTS AND EXERCISE	0195-9131	1530-0315	43,775	5.411	Q1	1.76	6.47%
9	Journal of the International Society of Sports Nutrition	N/A	1550-2783	2,467	5.15	Q1	1.19	100%
10	Sports Medicine-Open	2199-1170	2198-9761	1,086	4.83	Q1	0.95	100%
11	PSYCHOLOGY OF SPORT AND EXERCISE	1469-0292	1878-5476	7,897	4.785	Q1	1.13	4.18%
12	ARTHROSCOPY-THE JOURNAL OF ARTHROSCOPIC AND RELATED SURGERY	0749-8063	1526-3231	20,208	4.772	Q1	1.72	1.23%
13	JOURNAL OF ORTHOPAEDIC & SPORTS PHYSICAL THERAPY	0190-6011	1938-1344	9,65	4.751	Q1	1.51	0.81%
14	Research in Sports Medicine	1543-8627	1543-8635	1,372	4.674	Q1	1.32	1.09%
15	INTERNATIONAL JOURNAL OF SPORT NUTRITION AND EXERCISE METABOLISM	1526-484X	1543-2742	3,539	4.599	Q1	1.12	1.41%
16	KNEE SURGERY SPORTS TRAUMATOLOGY ARTHROSCOPY	0942-2056	1433-7347	21,052	4.342	Q1	1.53	14.28%
17	JOURNAL OF SCIENCE AND MEDICINE IN SPORT	1440-2440	1878-1861	10,21	4.319	Q1	1.4	5.19%
18	SCANDINAVIAN JOURNAL OF MEDICINE & SCIENCE IN SPORTS	0905-7188	1600-0838	12,658	4.221	Q1	1.42	16.96%
19	JOURNAL OF TEACHING IN PHYSICAL EDUCATION	0273-5024	1543-2769	2,523	4.155	Q1	1.85	1.42%
20	SPORT EDUCATION AND SOCIETY	1357-3322	1470-1243	3,14	4.119	Q1	1.91	5.21%
21	European Journal of Sport Science	1746-1391	1536-7290	5,19	4.05	Q1	1.3	1.79%
22	International Journal of Sports Physiology and Performance	1555-0265	1555-0273	7,463	4.01	Q1	1.35	0.82%
23	ARCHIVES OF PHYSICAL MEDICINE AND REHABILITATION	0003-9993	1532-821X	30,69	3.966	Q2	1.43	3.16%
24	Sports Health-A Multidisciplinary Approach	1941-7381	1941-0921	2,942	3.843	Q2	1.13	1.83%
25	JOURNAL OF STRENGTH AND CONDITIONING RESEARCH	1064-8011	1533-4287	24,341	3.775	Q2	1.17	0.96%
26	JOURNAL OF SPORT MANAGEMENT	0888-4773	1543-270X	3,61	3.691	Q2	1	0.79%
27	CLINICAL JOURNAL OF SPORT MEDICINE	1050-642X	1536-3724	5,012	3.638	Q2	1.08	0%
28	JOURNAL OF APPLIED SPORT PSYCHOLOGY	1041-3200	1533-1571	2,837	3.585	Q2	1.07	0.78%
29	JOURNAL OF APPLIED PHYSIOLOGY	8750-7587	1522-1601	48,946	3.531	Q2	1.05	3.34%
30	JOURNAL OF SPORTS SCIENCES	0264-0414	1466-447X	17,304	3.337	Q2	1.16	2.14%
31	INTERNATIONAL JOURNAL OF SPORTS MEDICINE	0172-4622	1439-3964	9,853	3.118	Q2	0.9	1.31%
32	Journal of Exercise Science & Fitness	1728-869X	1728-869X	514	3.103	Q2	0.88	100%
33	EUROPEAN JOURNAL OF APPLIED PHYSIOLOGY	1439-6319	1439-6327	19,176	3.078	Q2	0.96	22.48%
34	JOURNAL OF SHOULDER AND ELBOW SURGERY	1058-2746	N/A	16,721	3.019	Q2	1.14	2.65%
35	JOURNAL OF SPORT & EXERCISE PSYCHOLOGY	0895-2779	1543-2904	5,742	3.016	Q2	0.84	1.83%
36	Journal of Sports Science and Medicine	1303-2968	1303-2968	4,651	2.988	Q2	0.89	100%
37	ADAPTED PHYSICAL ACTIVITY QUARTERLY	0736-5829	1543-2777	1,651	2.929	Q2	0.98	0%
38	JOURNAL OF REHABILITATION MEDICINE	1650-1977	1651-2081	6,773	2.912	Q2	0.98	100%
39	QUEST	0033-6297	1543-2750	2,179	2.91	Q2	0.98	0%
40	JOURNAL OF ATHLETIC TRAINING	1062-6050	1938-162X	7,924	2.86	Q2	0.92	2.65%
41	GAIT & POSTURE	0966-6362	1879-2219	18,46	2.84	Q2	0.88	3.2%
42	Sports Biomechanics	1476-3141	1752-6116	1,547	2.832	Q2	0.77	0.38%
43	Science and Medicine in Football	2473-3938	2473-4446	497	2.815	Q2	0.83	2.44%
44	BIOLOGY OF SPORT	0860-021X	2083-1862	1,255	2.806	Q2	0.93	100%
45	Orthopaedic Journal of Sports Medicine	N/A	2325-9671	4,653	2.727	Q3	0.89	99.91%
46	Applied Physiology Nutrition and Metabolism	1715-5312	1715-5320	7,321	2.665	Q3	0.78	5.62%
47	JOURNAL OF ORTHOPAEDIC TRAUMA	0890-5339	1531-2291	10,85	2.512	Q3	0.81	0.81%
48	RESEARCH QUARTERLY FOR EXERCISE AND SPORT	0270-1367	2168-3824	5,627	2.5	Q3	0.74	0.65%
49	JOURNAL OF ELECTROMYOGRAPHY AND KINESIOLOGY	1050-6411	1873-5711	6,544	2.368	Q3	0.75	5.88%
50	PHYSICAL THERAPY IN SPORT	1466-853X	N/A	2,382	2.365	Q3	0.94	1.21%
51	PEDIATRIC EXERCISE SCIENCE	0899-8493	1543-2920	2,327	2.333	Q3	0.86	0%
52	Measurement in Physical Education and Exercise Science	1091-367X	1532-7841	947	2.304	Q3	1.14	1.67%
53	PM&R	1934-1482	1934-1563	4,703	2.298	Q3	0.73	3.13%
54	PHYSICIAN AND SPORTSMEDICINE	0091-3847	2326-3660	1,918	2.241	Q3	0.75	1.16%
55	KNEE	0968-0160	1873-5800	6,011	2.199	Q3	0.82	1.71%
56	Journal of Human Kinetics	1640-5544	1899-7562	2,83	2.193	Q3	0.71	100%
57	CLINICS IN SPORTS MEDICINE	0278-5919	1556-228X	2,732	2.182	Q3	0.95	1.41%
58	HUMAN MOVEMENT SCIENCE	0167-9457	1872-7646	6,137	2.161	Q3	0.69	3.63%
59	AMERICAN JOURNAL OF PHYSICAL MEDICINE & REHABILITATION	0894-9115	1537-7385	7,281	2.159	Q3	0.8	1.52%
60	STRENGTH AND CONDITIONING JOURNAL	1524-1602	1533-4295	1,927	2.143	Q3	0.59	0.94%
61	SOCIOLOGY OF SPORT JOURNAL	0741-1235	1543-2785	1,866	2.134	Q3	0.88	2%
62	CLINICAL BIOMECHANICS	0268-0033	1879-1271	10,509	2.063	Q3	0.68	4.6%
63	SPORTS MEDICINE AND ARTHROSCOPY REVIEW	1062-8592	1538-1951	1,1	1.985	Q3	0.26	0%
64	HIGH ALTITUDE MEDICINE & BIOLOGY	1527-0297	1557-8682	1,57	1.981	Q3	0.57	4.73%
65	JOURNAL OF AGING AND PHYSICAL ACTIVITY	1063-8652	1543-267X	2,679	1.961	Q3	0.61	0.35%
66	International Journal of Performance Analysis in Sport	2474-8668	1474-8185	2,026	1.95	Q3	0.6	1.17%
67	BMC Sports Science Medicine and Rehabilitation	2052-1847	2052-1847	944	1.934	Q4	0.69	100%
68	JOURNAL OF SPORT REHABILITATION	1056-6716	1543-3072	2,377	1.931	Q4	0.84	0.24%
69	JOURNAL OF APPLIED BIOMECHANICS	1065-8483	1543-2688	2,658	1.833	Q4	0.56	0.56%
70	Current Sports Medicine Reports	1537-890X	1537-8918	1,898	1.733	Q4	0.25	0%
71	JOURNAL OF SPORTS MEDICINE AND PHYSICAL FITNESS	0022-4707	1827-1928	4,411	1.637	Q4	0.59	0%
72	WILDERNESS & ENVIRONMENTAL MEDICINE	1080-6032	1545-1534	1,433	1.518	Q4	0.55	3.79%
73	SPORT PSYCHOLOGIST	0888-4781	1543-2793	2,441	1.453	Q4	0.54	0%
74	Kinesiology	1331-1441	1848-638X	761	1.452	Q4	0.55	100%

75	MOTOR CONTROL	1087-1640	1543-2696	874	1.422	Q4	0.5	0.99%
76	Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Fisica y del Deporte	1577-0354	1577-0354	766	1.406	Q4	0.4	100%
77	ACSMS HEALTH & FITNESS JOURNAL	1091-5397	1536-593X	347	1.364	Q4	0.35	0%
78	JOURNAL OF MOTOR BEHAVIOR	0022-2895	1940-1027	2,775	1.328	Q4	0.46	2.23%
79	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part P-Journal of Sports Engineering and Technology	1754-3371	1754-338X	455	1.263	Q4	0.4	3.49%
80	Archives of Budo	1643-8698	1643-8698	441	1.113	Q4	0.44	0%
81	SPORTVERLETZUNG-SPORTSCHADEN	0932-0555	1439-1236	258	1.077	Q4	0.43	0%
82	PHYSIKALISCHE MEDIZIN REHABILITATIONSMEDIZIN KURORTMEDIZIN	0940-6689	1439-085X	197	0.903	Q4	0.24	0.85%
83	SCIENCE & SPORTS	0765-1597	0765-1597	638	0.789	Q4	0.19	0.47%
84	MEDICINA DELLO SPORT	0025-7826	1827-1863	386	0.723	Q4	0.21	0%
85	INTERNATIONAL JOURNAL OF SPORT PSYCHOLOGY	0047-0767	N/A	1,334	0.6	Q4	0.22	0%
86	Revista Brasileira de Medicina do Esporte	1517-8692	1806-9940	903	0.589	Q4	0.13	100%
87	ISOKINETICS AND EXERCISE SCIENCE	0959-3020	1878-5913	587	0.519	Q4	0.16	0%
88	OPERATIVE TECHNIQUES IN SPORTS MEDICINE	1060-1872	1557-9794	398	0.28	Q4	0.14	0%
89	International Journal of Sports Physical Therapy	2159-2896	2159-2896	2373	n/a	n/a	0.5	0%
90	Sports	N/A	2075-4663	1459	n/a	n/a	0.72	100%
	Copyright (c) 2021 Clarivate							

Effects of Moderate- versus Mixed-Intensity Training on VO₂peak in Young Well-Trained Rowers

Timo Kirchenberger¹, Sascha Ketelhut^{2,*} and Reinhard G. Ketelhut³

¹ Campus Virchow-Klinikum, Charité-Universitätsmedizin Berlin, 13353 Berlin, Germany; timo.kirchenberger@charite.de

² Institute of Sport Science, University of Bern, 3012 Bern, Switzerland

³ Medical Center Berlin, 10559 Berlin, Germany; r.ketelhut@t-online.de

* Correspondence: sascha.ketelhut@ispw.unibe.ch; Tel.: +41-31-631-51-03



Citation: Kirchenberger, T.; Ketelhut, S.; Ketelhut, R.G. Effects of Moderate- versus Mixed-Intensity Training on VO₂peak in Young Well-Trained Rowers.

Sports **2021**, *9*, 92. <https://doi.org/10.3390/sports9070092>

Academic Editor: Gerasimos Terzis

Received: 13 May 2021

Accepted: 21 June 2021

Published: 25 June 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: The effects of moderate-intensity continuous training (MICT) and a combination of MICT and high-intensity interval training (HIIT) on rowing performance and VO₂peak were investigated in young athletes. Seventeen well-trained rowers (aged 15 ± 1.3 years) were randomly allocated to an intervention (IG) (*n* = 10) and control group (CG) (*n* = 7). During 8 weeks, both groups took part in the regular rowing training (3×/week MICT, 70–90 min, 65–70% of HRpeak + 2×/week resistance training). The IG completed an additional high-intensity interval training twice weekly (2 × 4 × 2 min at ≈95% of HRpeak, 60 s rest). Instead of the HIIT, the CG completed two more MICT sessions (70–90 min, 65–70% of HRpeak). Before and after the intervention, a 2000 m time trial and an exercise test were performed. The IG showed a significant improvement (*p* = 0.001) regarding the absolute rowing time in the graded exercise test. Furthermore, the intervention group showed a significant increase in relative VO₂peak (*p* = 0.023), a significant increase in absolute VO₂peak (*p* = 0.036), and a significant improvement in the 2000 m time trial (*p* = 0.003). No significant changes could be detected in the CG. The interaction effects were not significant. A mixed-intensity training, including HIIT, was beneficial on rowing performance and VO₂peak in highly trained athletes.

Keywords: rowing performance; endurance training; young athletes; maximal oxygen consumption; high-intensity interval training

1. Introduction

The literature confirms that high-intensity interval training (HIIT) improves performance and aerobic capacity in high-risk patients [1,2], as well as in healthy and endurance-trained athletes [3–5]. HIIT produced similar or even superior changes in cardiorespiratory fitness in different populations compared to moderate-intensity continuous training (MICT) despite significantly reduced time commitment [1]. Thus, HIIT seems to be a promising and time-efficient alternative or addition to commonly used MICT, especially in high-volume sports.

Although numerous studies have highlighted the effectiveness of HIIT, and different HIIT protocols are widely used in different sports, some sports are still neglecting this trend. Rowing training protocols traditionally display a marked emphasis on high training volumes with intensities below the lactate threshold [6,7] despite competing at much higher intensities [8]. Still, little overall focus is placed on higher training intensities, which are considered necessary to develop maximal aerobic power [6]. This may be due in part to the fact that studies evaluating the effects of HIIT in well-trained rowers are sparse. So far, only a few studies have examined the effectiveness of HIIT on endurance performance in this cohort [6,7,9,10].

To the best of our knowledge, controlled studies that included HIIT in the training protocol of junior rowers have not been conducted. However, time-efficient training is particularly convincing for young athletes who must cope with the double burden of

school and competitive sports. In addition, children and adolescents seem to have optimal preconditions for HIIT, as they show a higher fatigue resistance and a fast recovery after exercises with high to maximum intensities compared to adults [11,12].

A retrospective study showed that rowers who are internationally successful as seniors tend to do a higher amount of their total endurance exercises at low intensity and very high intensity as juniors compared to their peers [13]. Accordingly, the combination of large amounts of long-distance training and HIIT can represent a best practice model for developing endurance performance, even in young rowers.

Therefore, the present study examined the effects of MICT and a combination of MICT and HIIT on rowing performance and VO_2peak in young athletes.

2. Materials and Methods

1.1. Subjects

Seventeen well-trained male rowers (age 15.3 ± 1.3 years; BMI 22.1 ± 2.6 kg/m^2 ; VO_2peak 59.0 ± 3.9 $\text{mL}/\text{kg}/\text{min}$ (Table 1)) who competed at the national and international level were included in the study. All had a training history of 5 to 8 years, were non-smokers, and were free of known injuries and acute or chronic illnesses as assessed by the medical history questionnaire. All athletes and their legal guardians gave written informed consent to participate in the study. The experimental procedures of the study were approved by the institutional research committee (Charité-Universitätsmedizin Berlin, Berlin, Germany, EA2/093/18) and carried out according to international standards [14].

Table 1. Participants characteristics at baseline.

Items	Total (n = 17)	IG (n = 10)	CG (n = 7)
Age (years)	15.3 ± 1.26	15.4 ± 1.3	15.3 ± 1.2
Height (cm)	182.9 ± 9.1	183.4 ± 7.7	182.3 ± 11.4
Body mass (kg)	74.5 ± 13.3	74.4 ± 11.7	74.7 ± 16.3
Body mass index (kg/m^2)	22.1 ± 2.6	22.00 ± 2.9	22.3 ± 2.4
VO_2peak ($\text{mL}/\text{kg}/\text{min}$)	59.0 ± 3.9	59.4 ± 2.3	58.4 ± 5.7
Number of light weight rowers (<65 kg)	5	3	2

Values are means \pm SD unless stated otherwise.

1.2. Study Design

The study was conducted as a parallel-arm randomized controlled trial. The examinations of the participants took place at baseline (pre) and after (post) an eight-week training period. Following the baseline assessment, the athletes were randomly assigned to an intervention (IG) ($n = 10$) and a control group (CG) ($n = 7$). The randomization was carried out by using a computer-generated random number table.

For each participant, the testing procedures (pre and post) were carried out in the same order and at the same time of day on the same day of the week. Specially trained staff performed the tests under standardized conditions. The same examiner obtained the pre- and post-parameters with the same devices. All tests were performed in the same temperature-controlled laboratory ($22.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$).

The athletes reported to the laboratory of the Medical Center Berlin in a rested and fasting state. They were instructed to refrain from caffeinated and alcoholic beverages for at least 4 h prior to measurements.

On the first day, all completed a validated physical activity questionnaire, MoMo-AFB [15,16], to assess habitual physical activity apart from rowing training. Anthropometric measures were taken, and subjects completed a graded exercise test (GXT). On the second day (>48 h later) a 2000 m time trial (TT) was conducted. Both tests were performed on an air-braked rowing ergometer (Concept 2, Model D, Morrisville, VT, USA).

1.3. Incremental Exercise Test

On the first day, the participants completed a GXT until voluntary exhaustion. The test protocol was performed according to the guidelines of the German Rowing Association [17]. After a 5-min warm-up, the GXT began with 150 watts for lightweights (<65 kg) and 200 watts for heavyweights (>65 kg) and a stroke frequency of 18–20 strokes/min. Each stage lasted 4 min and was interspersed by 30 s of rest. After each stage, the workload was increased by 50 watts and 2 strokes/min. Following the fourth stage, the stroke frequency was freely selectable by the athletes. The drag factor was set to 130, as recommended by the Deutscher Ruder-Verband e.V. [17].

Heart rate (HR) was monitored by Polar HR-monitor (Polar Electro OY, Kempele, Finland), and HRpeak was the highest recorded value.

Expired air was continuously analyzed (breath-by-breath) for O₂ and CO₂ concentrations, using the Metalyzer 3B-R2 (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Germany). The highest 30 s VO₂ value was recorded as VO₂peak. Before each test, gas analyzers were calibrated as per the manufacturer's guidelines with gases of known composition. To calibrate respiratory volume, a 3 L-volume calibration syringe was used.

1.4. Two-Thousand-Meter Time Trial

The TT was performed on the same rowing ergometer as the GXT. The test-retest reliability of 2000 m TT on the Concept II rowing ergometer has previously been examined with well-trained rowers revealing a coefficient of variation of 2.0% [18]. The TT is an integral part of rowing performance monitoring; thus, all subjects were fully familiar with the test. Before the test, the subjects performed a 10-min self-selected warm-up. The time to complete the TT was recorded. The stroke frequency was freely selectable by each subject, and the drag factor was set to 130. To control psychological motivation, no verbal encouragement was given.

1.5. Intervention

The study was conducted during the preparation phase of the yearly training program. The IG and CG participated in the regular rowing training, which consisted of MICT (on a rowing ergometer) for 70–90 min at 65–70% HRpeak (3×/week) and strength training (2×/week). Both groups performed the same strength-training program throughout the intervention period. The training consisted of different exercises for the upper and lower body. Depending on the exercise, 3 or 4 sets of 2–10 repetitions at 70–92% of one-repetition max were performed.

In addition to this regular training, the athletes performed twice a week either an additional HIIT or MICT on a rowing ergometer.

The HIIT started with a 10-min moderate warm-up. Subsequently, 2 blocks of 4×min were applied at 95% of HRpeak interspersed with 1 min of passive rest. Between the 2 blocks, there was a 7-min passive break. The protocol culminated in 10 min of cooling-down (Figure 1). The total duration of the training was 49 min.

The MICT consisted of 70–90 min ergometer training at an intensity of 65–70% of the HRpeak. All ergometer training sessions were performed on the same device as the GXT. All training sessions were overseen and documented by the two coaches.

1.6. Statistical Analysis

Statistical analysis was performed by using IBM SPSS Statistics v. 25.0 (SPSS, Chicago, IL, USA). Paired samples *t*-tests were used to compare pre- and post-intervention values within groups. The Levene test was used to check the homogeneity of variance. Analysis of variance was performed to identify differences in the means, and a multiple pair-wise comparison was performed, using Bonferroni correction as a post hoc test. Level of significance was $p < 0.05$.

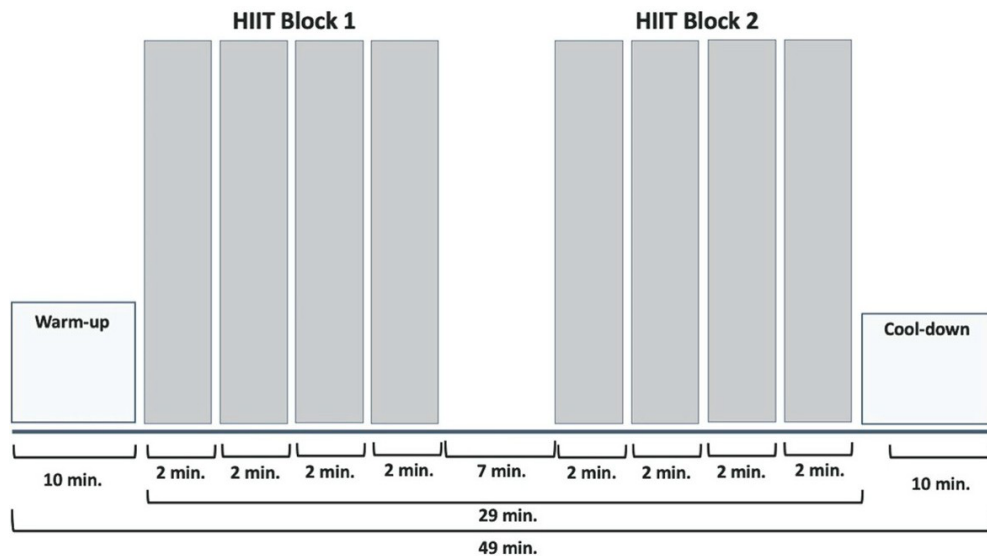


Figure 1. HIIT protocol of the intervention group.

3. Results

The subjects’ characteristics are presented in Table 1. The IG and the CG did not show any significant differences at baseline. During the intervention period, participants reported no significant changes in physical activity (pre: 16.3 ± 2.5 h/week vs. post: 16.6 ± 3.4 h/week). After the intervention, the IG showed a significant improvement in 2000 m TT (53.3 ± 3.2 s, $p = 0.003$), whereas the CG showed no significant changes (3.0 ± 3.5 s, $p = 0.091$) (Figure 2). The interaction effects between IG and CG were not significant ($p = 0.239$). The athletes of both groups improved their time to exhaustion in the GXT. However, only the mixed training was associated with a significant improvement (IG: +58.0 ± 38.2 s, $p = 0.001$; CG: +25.7 ± 67.3 s, $p = 0.351$) (Figure 3). Again, the interaction effects were not significant ($p = 0.226$).

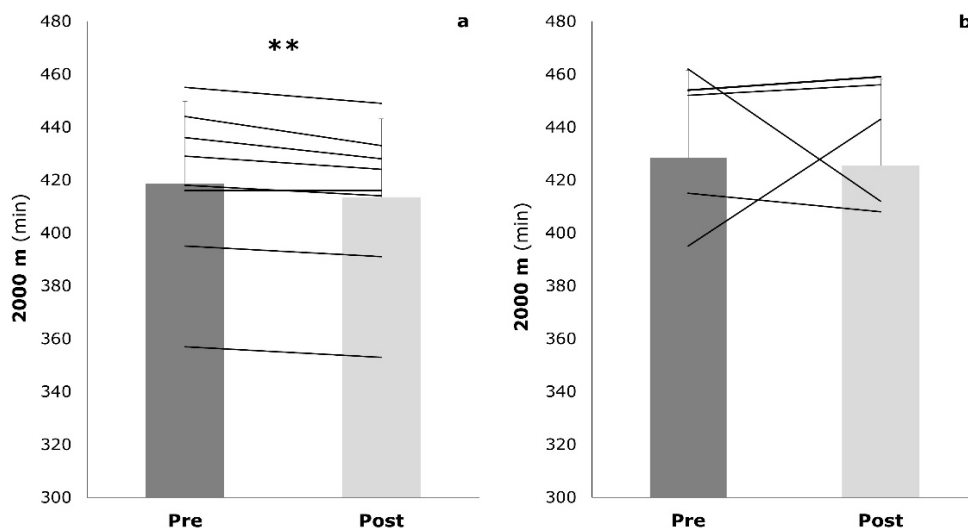


Figure 2. Two-thousand-meter time trial performance at baseline (pre) and post-training (post) in both the intervention group (a) and the control group (b). Values are mean ± SD; ** $p < 0.01$.

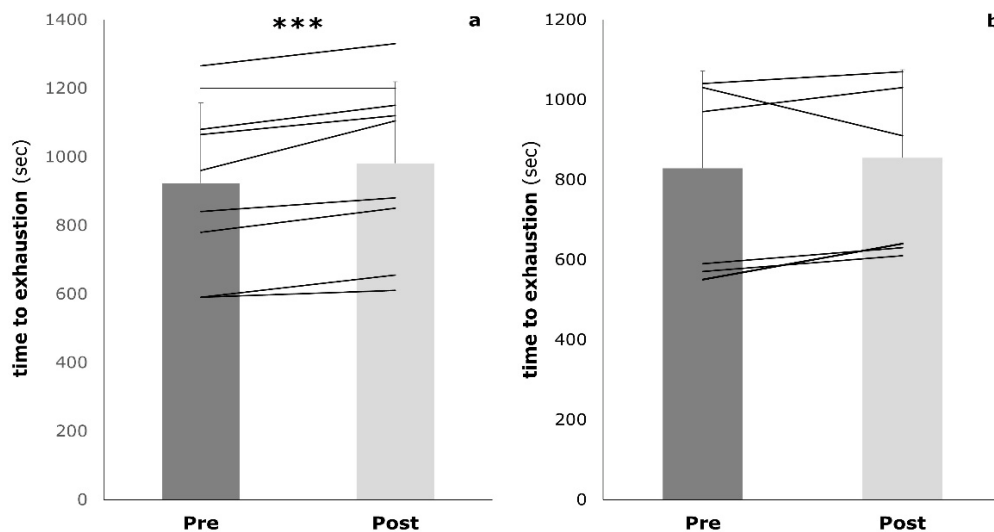


Figure 3. Time to exhaustion during the graded exercise test at baseline (pre) and post-training (post) in both the intervention group (a) and the control group (b); *** $p < 0.001$.

The IG showed a significant increase in absolute VO_{2peak} compared to the initial examination (4371.30 ± 845.5 mL/min to 4651.7 ± 799.7 mL/min, $p = 0.036$). In the CG, there was a slight but not significant decrease in absolute VO_{2peak} after the intervention (4331.6 ± 890.2 mL/min to 4271.3 ± 743.9 mL/min, $p = 0.601$) (Figure 4). The interaction effects approached statistical significance ($p = 0.056$).

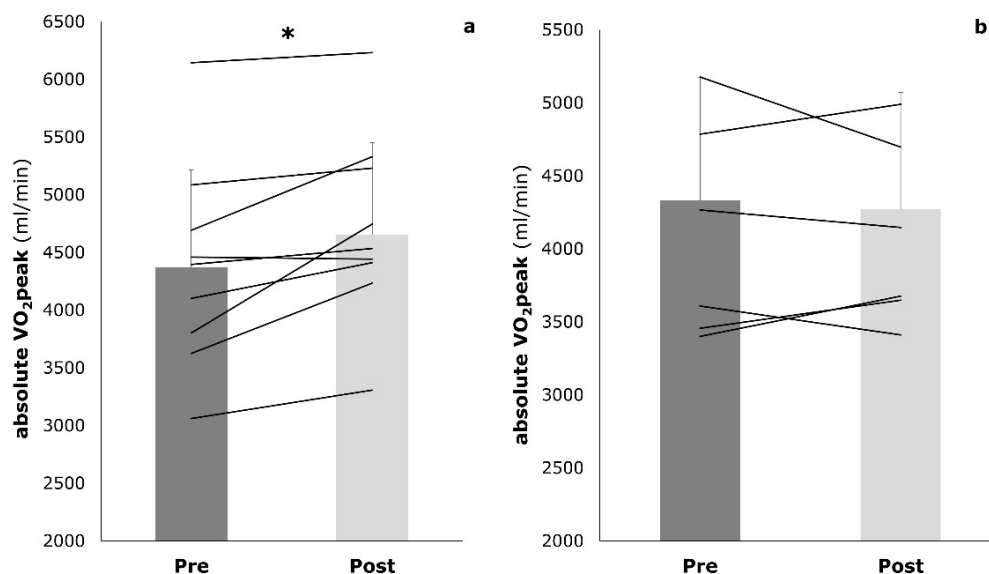


Figure 4. Absolute VO_{2peak} (mL/min) at baseline (pre) and post-training (post) in both the intervention group (a) and the control group (b); * $p < 0.05$.

The mixed training was associated with a significant increase in relative VO_{2peak} (58.4 ± 3.9 mL/kg/min to 62.1 ± 3.9 mL/kg/min, $p = 0.023$). No significant changes were detected for the CG (58.4 ± 5.7 mL/kg/min to 58.3 ± 6.4 mL/kg/min, $p = 0.937$) (Figure 5). The interaction effects did not reach statistical significance ($p = 0.097$).

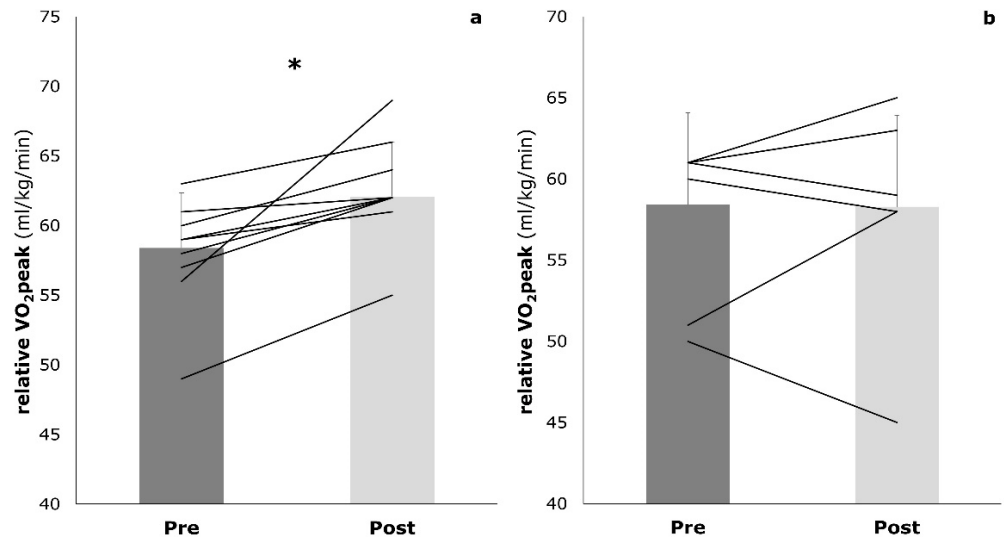


Figure 5. Relative VO₂peak (mL/kg/min) at baseline (pre) and post-training (post) in both the intervention group (a) and the control group (b); * $p < 0.05$.

4. Discussion

The data showed that well-trained young elite rowers achieved an advantage in the development of endurance performance by implementing HIIT in the regular training program.

The 2000 m TT performance, the relative and absolute VO₂peak, and the performance in the GXT were significantly improved in the already well-trained athletes. In contrast, there was no significant change in the CG. The interaction effects for relative and absolute VO₂peak were marginally significant.

Thus, HIIT presents an effective and time-efficient complement to conventional MICT in rowers.

This is in accordance with other studies in well-trained athletes with similar or superior effects of HIIT on endurance performance and VO₂peak [3,5,19]. The research of HIIT on performance in elite rowers is limited.

In a 4-week crossover design, in well-trained rowers, HIIT induced greater improvements in 2000 m TT and relative VO₂peak than the traditional rowing training in the control group [9]. Contrary to our study, where the IG conducted a mixed training, the HIIT group in the study by Diller et al. [9] exclusively participated in a HIIT program throughout the intervention period. This could possibly explain the stronger interaction effects compared to our study.

Like the present study, others have assessed the effects of replacing a part of the endurance-based program with HIIT sessions. Similar to our results, Ni Chèilleachair [6] showed greater improvements in the 2000 m TT performance and VO₂peak in the mixed-intensity training group compared to the MICT group.

Ingham et al. [10], on the other hand, found no differences between a mixed-intensity protocol and a low-intensity protocol on 2000 m TT and VO₂peak.

This is in line with the results from Stevens et al. [7], who compared a combined sprint interval training and endurance training protocol with an endurance-only protocol in trained rowers (aged 18–21 years). The authors found improvements in the 2000 m TT and peak power output in the HIIT group. However, neither group experienced any change in VO₂peak, which the authors attribute to the fact that the regular training of the sample involved a large percentage of high-intensity exercise. Thus, the athletes could already have been accustomed to this kind of stimulus. The athletes in our study mainly performed MICT in their regular training. Therefore, the HIIT may have provided a more novel exercise stimulus for these athletes, consequently eliciting further performance improvements.

Even though the literature on HIIT in well-trained rowers confirms our results, it should be noted that, in previous studies, only adults were recruited. Unfortunately,

the effects of HIIT in children and adolescents have been less studied than in adults. Most studies of HIIT in children and adolescents focus on cardio-respiratory fitness and health-related parameters in untrained or obese people [20,21]. The literature on young, trained athletes is rare. However, some studies in young athletes show an increase in VO_{2peak} [22,23] in connection with HIIT. In young competitive swimmers, a 5-week HIIT resulted in an increase in VO_{2peak} comparable to continuous training, with the training time for HIIT being only half as long as for MICT [24]. A recent review has analyzed various adaptations of HIIT exclusively in young athletes [25]. HIIT did not show any clear superiority in VO_{2peak} compared to alternative training protocols. HIIT showed small mean effect sizes but a considerably higher percentage increase of VO_{2peak} compared to alternative training programs, as well as small and large mean effect sizes on relevant aerobic and anaerobic performance parameters. Unfortunately, no studies have been carried out on young and well-trained rowers.

The mechanisms that are discussed regarding the effectiveness of HIIT are diverse. Regardless of the shorter training duration, various studies have shown similar reactions of the skeletal muscles after HIIT and MICT [26].

It is assumed that the training adjustments through HIIT and MICT trigger different intracellular stimuli (activation of AMP protein kinase, CaM kinase II, and p38-MAPkinase) but ultimately lead to the same metabolic cascades [27]. However, the improvements in performance seem to be mainly explained by the central oxygen supply and adaptations of the cardiovascular system and less by adaptations of the peripheral mechanisms [28]. The stronger effect of HIIT on the maximum oxygen uptake results from a larger left ventricular diastolic filling and thus a larger stroke volume due to a higher work rate and a longer exposure time close to VO_{2max} [29,30]. This seems to be the case, in particular, in children and adolescents, in whom changes in VO_{2max} are mainly due to an increased stroke volume due to an increased preload, a decreased afterload, and an enlarged heart [31].

This study complements the sparse literature on the effects of HIIT in young athletes. HIIT seems to be a time-efficient and appropriate training tool for enhancing aerobic performance. The inclusion of HIIT in the training program for young rowers appears very promising, as the demands of rowing at a high level require a considerable amount of time. In this regard, HIIT could be a suitable training method to improve endurance-parameters and leave enough time to improve sport-specific skills. By including HIIT in their training routine, athletes have the opportunity to train at the intensity levels they are competing at. Not only does this improve physical performance, but it can also affect technical skills, especially at the racing pace. This assumption is supported by a recent study from Papandreou et al. [19]. They compared different physiological and performance variables after 8 weeks of MICT or HIIT in flat water kayak athletes. The authors could show that HIIT was more effective than MICT in improved paddling economy speed [19].

Especially for traditionally trained rowers who have mainly adapted to MICT, HIIT can offer a new type of exercise stimulus that could lead to further improvements in performance. Since HIIT is infinitely variable (intensity, duration, number of intervals, duration, and activity pattern during recovery), it can help modify the training stimuli throughout the season and promote ongoing adaptation.

Anecdotally, the participants in the HIIT group reported that the HIIT was more enjoyable than the MICT. This is supported by survey results from Kilpatrick [32] and highlights the potential of HIIT to increase motivation.

Our study gained meaningful insight into the benefits of HIIT for coaches and for future intervention studies in rowers. However, further research is warranted to optimize the HIIT protocol for well-trained young rowers, with regards to the manipulation of training variables (frequency, intensity, duration, recovery, etc.) and the organization with other training contents.

Limitations

When interpreting these results, certain limitations must be considered. First, the sample size was relatively small. A larger sample size with a more homogeneous group can be beneficial. Second, accelerometry was not used to monitor everyday activities. However, physical activity questionnaires were used, and training protocols analyzed that showed no changes in either IG or CG. Moreover, well-trained, high-volume athletes are not expected to change physical activity during a training cycle. Third, we did not assess recovery stress states during the intervention. It could be argued that HIIT could lead to early signs of fatigue and overtraining and thus reduce the effects. Analysis of recovery-stress states during HIIT interventions, using psychological and physiological methods, would be advisable in assessing the effects of HIIT.

In addition, one could argue that a ramp-wise incremental rowing GXT is superior for determining VO_2peak . However, we opted for the typical stepwise test recommended by the German Rowing Association, and to which the athletes were used.

5. Conclusions

The inclusion of HIIT in the training program of well-trained young elite rowers increases endurance performance and aerobic capacity. According to the results, HIIT offers a time-efficient and suitable training tool for improving aerobic performance in young elite rowers.

Author Contributions: Conceptualization, R.G.K. and S.K.; methodology, R.G.K. and T.K.; formal analysis, T.K.; investigation, T.K. and S.K.; data curation, T.K. and S.K.; writing—original draft preparation, T.K.; writing—review and editing, T.K., S.K. and R.G.K.; visualization, T.K.; supervision, R.G.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: The study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki and approved by the ethics committee of the Charité-Universitätsmedizin Berlin (05.30.2018, reference code: EA2/093/18).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects (and their legal guardians) involved in the study.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

Acknowledgments: The authors would like to thank all athletes and their parents without whom this study would not have been possible. Furthermore, we would like to thank the Medical Center Berlin (MCB) for the opportunity to use their medical equipment and Adrian Bretting for the implementation of the intervention program.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Batacan, R.B., Jr.; Duncan, M.J.; Dalbo, V.J.; Tucker, P.S.; Fenning, A.S. Effects of high-intensity interval training on cardiometabolic health: A systematic review and meta-analysis of intervention studies. *Br. J. Sports Med.* **2017**, *51*, 494–503. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Weston, K.S.; Wisløff, U.; Coombes, J.S. High-intensity interval training in patients with lifestyle-induced cardiometabolic disease: A systematic review and meta-analysis. *Br. J. Sports Med.* **2014**, *48*, 1227–1234. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Kilen, A.; Larsson, T.H.; Jørgensen, M.; Johansen, L.; Jørgensen, S.; Nordborg, N.B. Effects of 12 Weeks High-Intensity & Reduced-Volume Training in Elite Athletes. *PLoS ONE* **2014**, *9*, e95025. [[CrossRef](#)]
4. Milanović, Z.; Sporiš, G.; Weston, M. Effectiveness of High-Intensity Interval Training (HIT) and Continuous Endurance Training for VO_2max Improvements: A Systematic Review and Meta-Analysis of Controlled Trials. *Sports Med.* **2015**, *45*, 1469–1481. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
5. Purkhús, E.; Krstrup, P.; Mohr, M. High-Intensity Training Improves Exercise Performance in Elite Women Volleyball Players During a Competitive Season. *J. Strength Cond. Res.* **2016**, *30*, 3066–3072. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Chéilleachair, N.N.; Harrison, A.J.; Warrington, G.D. HIIT enhances endurance performance and aerobic characteristics more than high-volume training in trained rowers. *J. Sports Sci.* **2016**, *35*, 1052–1058. [[CrossRef](#)]

7. Stevens, A.W.; Olver, T.T.; Lemon, P.W. Incorporating Sprint Training With Endurance Training Improves Anaerobic Capacity and 2000-m Erg Performance in Trained Oarsmen. *J. Strength Cond. Res.* **2015**, *29*, 22–28. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
8. Esteve-Lanao, J.; Foster, C.; Seiler, S.; Lucia, A. Impact of Training Intensity Distribution on Performance in Endurance Athletes. *J. Strength Cond. Res.* **2007**, *21*, 943–949. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
9. Driller, M.W.; Fell, J.W.; Gregory, J.R.; Shing, C.M.; Williams, A.D. The Effects of High-Intensity Interval Training in Well-Trained Rowers. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2009**, *4*, 110–121. [[CrossRef](#)]
10. Ingham, S.A.; Carter, H.; Whyte, G.P.; Doust, J.H. Physiological and Performance Effects of Low- versus Mixed-Intensity Rowing Training. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2008**, *40*, 579–584. [[CrossRef](#)]
11. Birat, A.; Bourdier, P.; Piponnier, E.; Blazevich, A.J.; Maciejewski, H.; Duché, P.; Ratel, S. Metabolic and Fatigue Profiles Are Comparable Between Prepubertal Children and Well-Trained Adult Endurance Athletes. *Front. Physiol.* **2018**, *9*, 387. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
12. Hebestreit, H.; Mimura, K.; Bar-Or, O. Recovery of muscle power after high-intensity short-term exercise: Comparing boys and men. *J. Appl. Physiol.* **1993**, *74*, 2875–2880. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Guellich, A.; Seiler, S.; Emrich, E.; Arne, G.; Stephen, S.; Eike, E. Training Methods and Intensity Distribution of Young World-Class Rowers. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2009**, *4*, 448–460. [[CrossRef](#)]
14. Harriss, D.; Macsween, A.; Atkinson, G. Ethical Standards in Sport and Exercise Science Research: 2020 Update. *Int. J. Sports Med.* **2019**, *40*, 813–817. [[CrossRef](#)]
15. Arvidsson, D.; Slinde, F.; Larsson, S.; Hulthén, L. Energy cost of physical activities in children: Validation of Sense Wear Armband. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2007**, *39*, 2076–2084. [[CrossRef](#)]
16. Jekauc, D.; Wagner, M.O.; Kahlert, D.; Woll, A. Reliabilität und Validität des MoMo- Aktivitätsfragebogens für Jugendliche (MoMo-AFB). *Diagnostica* **2013**, *59*, 100–111. [[CrossRef](#)]
17. Deutscher Ruderverband e.V. (Ed.) *Trainingsmethodische Grundkonzeption*; DRV: Hannover, Germany, 2014; pp. 44–47.
18. Schabert, E.J.; Hawley, J.A.; Hopkins, W.G.; Blum, H. High reliability of performance of well-trained rowers on a rowing ergometer. *J. Sports Sci.* **1999**, *17*, 627–632. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
19. Papandreou, A.; Philippou, A.; Zacharogiannis, E.; Maridaki, M. Physiological Adaptations to High-Intensity Interval and Continuous Training in Kayak Athletes. *J. Strength Cond. Res.* **2020**, *34*, 2258–2266. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
20. Eddolls, W.T.B.; McNarry, M.A.; Stratton, G.; Winn, C.O.N.; Mackintosh, K.A. High-Intensity Interval Training Interventions in Children and Adolescents: A Systematic Review. *Sports Med.* **2017**, *47*, 2363–2374. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
21. García-Hermoso, A.; Cerrillo-Urbina, A.J.; Herrera-Valenzuela, T.; Cristi-Montero, C.; Saavedra, J.M.; Martínez-Vizcaíno, V. Is high-intensity interval training more effective on improving cardiometabolic risk and aerobic capacity than other forms of exercise in overweight and obese youth? A meta-analysis. *Obes. Rev.* **2016**, *17*, 531–540. [[CrossRef](#)]
22. Fernández-Fernández, J.; Sanz-Rivas, D.; Sarabia, J.; Moya, M. Preseason Training: The Effects of a 17-Day High-Intensity Shock Microcycle in Elite Tennis Players. *J. Sports Sci. Med.* **2015**, *14*, 783–791. [[PubMed](#)]
23. Harrison, C.B.; Kinugasa, T.; Gill, N.; Kilding, A.E. Aerobic Fitness for Young Athletes: Combining Game-based and High-intensity Interval Training. *Int. J. Sports Med.* **2015**, *36*, 929–934. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Sperlich, B.; Zinner, C.; Heilemann, I.; Kjendlie, P.-L.; Holmberg, H.-C.; Mester, J. High-intensity interval training improves VO₂peak, maximal lactate accumulation, time trial and competition performance in 9–11-year-old swimmers. *Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* **2010**, *110*, 1029–1036. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Engel, F.A.; Ackermann, A.; Chtourou, H.; Sperlich, B. High-Intensity Interval Training Performed by Young Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Front. Physiol.* **2018**, *9*, 1012. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Gibala, M.J.; McGee, S.L. Metabolic adaptations to short-term high-intensity interval training: A little pain for a lot of gain? *Exerc. Sport Sci. Rev.* **2008**, *36*, 58–63. [[CrossRef](#)]
27. Gibala, M.J.; Little, J.P.; MacDonald, M.J.; Hawley, J.A. Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. *J. Physiol.* **2012**, *590*, 1077–1084. [[CrossRef](#)]
28. Burgomaster, K.A.; Howarth, K.R.; Phillips, S.M.; Rakobowchuk, M.; Macdonald, M.J.; McGee, S.L.; Gibala, M.J. Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. *J. Physiol.* **2008**, *586*, 151–160. [[CrossRef](#)]
29. Astorino, T.A.; Allen, R.P.; Roberson, D.W.; Jurancich, M. Effect of High-Intensity Interval Training on Cardiovascular Function, Vo₂max, and Muscular Force. *J. Strength Cond. Res.* **2012**, *26*, 138–145. [[CrossRef](#)]
30. Lepretre, P.M.; Koralsztein, J.P.; Billat, V.L. Effect of exercise intensity on relationship between VO₂max. and cardiac output. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2004**, *36*, 1357–1363. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
31. Nottin, S.; Vinet, A.; Stecken, F.; N'Guyen, L.-D.; Ounissi, F.; Lecoq, A.-M.; Obert, P. Central and peripheral cardiovascular adaptations to exercise in endurance-trained children. *Acta Physiol. Scand.* **2002**, *175*, 85–92. [[CrossRef](#)]
32. Kilpatrick, M.W.; Greeley, S.J.; Collins, L.H. The Impact of Continuous and Interval Cycle Exercise on Affect and Enjoyment. *Res. Q. Exerc. Sport* **2015**, *86*, 1–8. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Lebenslauf: Timo Kirchenberger

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Publikationsliste

Beiträge in wissenschaftlichen Zeitschriften

Ketelhut, S., Kirchenberger, T. und Ketelhut, R., 2020. Hemodynamics in young athletes following high-intensity interval or moderate-intensity continuous training. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 60(9), S. 1202–1208.

Kirchenberger, T., Ketelhut, S., Ketelhut, R., 2021. Effects of moderate versus mixed-intensity training on VO₂peak in young well – trained rowers. *Sports*, 9(7), S. 92.

Beiträge auf wissenschaftlichen Kongressen/Symposien (Vorträge, Poster)

Kirchenberger, T., Ketelhut S, Ketelhut RG. Einfluss eines hochintensiven Intervalltrainings und eines moderaten Ausdauertrainings auf hämodynamische Parameter bei jugendlichen leistungsorientierten Ruderern. In: Sport im öffentlichen Raum, Schriften der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaft – Band 282. *Feldhaus Edition Czwalina.*, S. 189.

Kirchenberger T, Ketelhut S, Ketelhut RG. Einfluss eines hochintensiven Intervalltrainings und eines moderaten Ausdauertrainings auf hämodynamische Parameter bei jugendlichen leistungsorientierten Ruderern. *Nieren Hochdruck* 2018, 11:558-559.

Danksagung

Hiermit möchte ich mich herzlichst bei meinem Doktorvater Prof. Dr. med. habil. Dr. rer. nat. Prof. h.c. Reinhard G. Ketelhut für sein Vertrauen sowie seine Betreuung und Unterstützung bedanken. Ebenso gilt mein Dank meinem Zweitbetreuer Dr. rer. med. Sascha Ketelhut für die gute Zusammenarbeit bei der Datenerhebung, der Ergebnisauswertung, der statistischen Datenanalyse aber auch der Motivation während des gesamten Promotionsprozesses.

Ferner sei auch den Athleten des Berliner Ruder Clubs für die intensive Trainings- und Untersuchungsbereitschaft gedankt. Außerdem möchte ich mich explizit bei dem Vereinstrainer Adrian Bretting für die akribische Arbeit und hilfreiche Unterstützung während des Interventionsprozesses bedanken.

Dankbar bin ich auch dem gesamten Team des Medical Center Berlin für die Nutzung der Räumlichkeiten und Bereitstellung der medizinischen Geräte, für die hämodynamischen Messungen sowie der Spiroergometrie.