

Parameter zur Diagnostik von Übertraining

Carolin Katharina Thurner Freifrau von Schleinitz

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Medicine and Health der
Technischen Universität München zur Erlangung einer
Doktorin der Medizin (Dr. med.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. Florian Eyer

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr. Johannes Scherr
2. apl. Prof. Dr. Jan Müller

Die Dissertation wurde am 10.06.2024 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die TUM School of Medicine and Health am 19.06.2025
angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	vi
Tabellenverzeichnis.....	vii
1. Einleitung.....	1
2. Wissenschaftlicher Hintergrund	2
2.1. Definitionen und Problematik: OTS, FOR und NFOR	2
2.2. Folgen und Diagnostik.....	4
2.2.1. Fatigue und Leistungsstagnation.....	5
2.2.2. Infektanfälligkeit	5
2.2.3. Verletzungsanfälligkeit	5
2.2.4. Entzündliche Reaktionen und Schlaf	6
2.2.5. Hormonelle und biochemische Veränderungen	6
2.2.6. Kardiovaskuläre Veränderungen	7
2.2.7. Neuromuskuläre Folgen	9
2.2.8. Psychische Folgen	9
3. Ziele und Fragestellung	11
3.1. Studienziel.....	11
3.2. Hypothesen	11
4. Material und Methoden	12
4.1. Design.....	12
4.2. Probanden.....	13
4.2.1. Ein- und Ausschlusskriterien	13
4.2.2. Rekrutierung.....	14
4.3. Untersuchungen und Methodik.....	14
4.3.1. Übersicht und Studienablauf	14
4.3.2. Anthropometrie.....	18
4.3.3. Kardiopulmonaler Ausbelastungstest	18
4.3.4. Erholungs-Belastungs-Fragebogen (EBF Sport)	18
4.3.5. 5-Kilometer-Lauf.....	18

4.3.6.	Herzfrequenzvariabilität (HRV)	18
4.3.7.	Echokardiographie	19
4.3.8.	Sprungkraft	20
4.4.	Statistische Verfahren	21
5.	Ergebnisse.....	22
5.1.	Probandenkollektiv	22
5.1.1.	Dropouts: Flowchart	23
5.1.2.	Baseline-Charakteristika	24
5.2.	5 km-Lauf	25
5.3.	Echokardiographie	27
5.4.	EBF	32
5.5.	HRV	37
5.6.	Vertikale Sprungkraft.....	41
6.	Diskussion	43
6.1.	Diskussion der Ergebnisse	43
6.1.1.	Laufleistung im 5 km-Lauf	43
6.1.2.	Echokardiographie	44
6.1.3.	Fragebogen.....	45
6.1.4.	HRV	46
6.1.5.	Vertikale Sprungkraft.....	46
6.2.	Diskussion der Methoden	47
6.2.1.	Probandenkollektiv	47
6.2.2.	Studienablauf	48
6.2.3.	5 km-Lauf	48
6.2.4.	Echokardiographie	49
6.2.5.	Erholungs-Belastungs-Fragebogen (EBF).....	49
6.2.6.	Herzfrequenzvariabilität (HRV).....	50
6.2.7.	Vertikale Sprungkraft.....	51
7.	Limitationen	52
8.	Zusammenfassung und Ausblick	53

8.1. Zusammenfassung.....	53
8.2. Ausblick.....	54
9. Abstract	55
10. Anhang	56
11. Literaturverzeichnis.....	60
Danksagung	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verhältnis zwischen Belastung und Regeneration	2
Abbildung 2: Mögliche Folgen von Training	4
Abbildung 3: Cross-Over-Design der Pilotstudie	12
Abbildung 4: Studienablauf der neunwöchigen OperaTUM-Studie	16
Abbildung 5: Flowchart	23
Abbildung 6: Verlauf der RVEF	27
Abbildung 7: Verlauf der LVEF	28
Abbildung 8: Verlauf von E/e' mean	29
Abbildung 9: Verlauf von E/A	30
Abbildung 10: Verlauf des Items „Verletzungsanfälligkeit“	33
Abbildung 11: Verlauf des Items „Somatische Erholung“	33
Abbildung 12: Verlauf des Items „Allgemeine Beanspruchung“	34
Abbildung 13: Verlauf der mittleren Herzfrequenz im Liegen in beats per minute (bpm)	37
Abbildung 14: Verlauf der RMSSD im Liegen (ms)	38
Abbildung 15: Verlauf der mittleren Herzfrequenz im Sitzen in beats per minute (bpm)	38
Abbildung 16: Verlauf der RMSSD im Sitzen (ms)	39
Abbildung 17: Verlauf der max. Sprunghöhe (cm) des CMJ	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien	13
Tabelle 2: Untersuchungen während der neunwöchigen Studie	17
Tabelle 3: Anthropometrische Daten und Auswertung des kardiopulmonalen Ausbelastungstest des Probandenkollektivs	24
Tabelle 4: Vergleich der Mittelwerte der Laufzeiten (in Sekunden) der 5km-Läufe.....	26
Tabelle 5: Vergleich der echokardiographische Parameter zwischen den Interventionen	31
Tabelle 6: Vergleich der Items des EBF zwischen den Interventionen	35
Tabelle 7: Vergleich ausgesuchter Parameter der HRV zwischen den Interventionen	40
Tabelle 8: Vergleich der vertikalen Sprungkraft zwischen den Interventionen	42
Tabelle 9: HRV im Studienverlauf	57
Fortsetzung Tabelle 9: HRV im Studienverlauf	57
Tabelle 10: Vertikale Sprungkraft im Studienverlauf	59

1. Einleitung

"Wenn wir jedem Individuum das richtige Maß an Nahrung und Bewegung zukommen lassen könnten, hätten wir den sichersten Weg zur Gesundheit gefunden". Obwohl schon 400 v.Chr. durch Hippokrates formuliert, ist diese Aussage heute treffender denn je. So spielt neben Übergewicht Bewegungsmangel eine entscheidende Rolle in der Entstehung kardiovaskulärer Erkrankungen (Halle, Berg, & Keul, 2000).

Aber auch das andere Extrem, nämlich ein Übermaß an Bewegung, kann zu gesundheitlichen Problemen führen. Hippokrates forderte schließlich nicht „so viel Bewegung wie möglich“, sondern das „richtige Maß“. Falscher Ehrgeiz, ein verzerrtes Körperbild oder Druck von außen können einen (Hobby-) Sportler dazu verleiten, die Signale seines Körpers zu ignorieren, was zu körperlichen und psychischen Problemen führen kann (Bellinger, 2020; Carter, Potter, & Brooks, 2014). Die Folgen eines solchen Übertrainings können für Leistungssportler einen Ausfall von mehreren Monaten bis Jahre bedeuten- schlimmstenfalls führen sie zum Karriereende.

Trotz der gravierenden Folgen gibt es derzeit keinen verlässlichen frühen Indikator, der vor drohender Überlastung warnt. Trainer und Sportler bewegen sich stetig auf einem schmalen Grat zwischen notwendiger Belastung und gefährlicher Überlastung. Das Ziel der vorgelegten Arbeit ist es, geeignete Parameter zu finden, um einen sportbedingten Überlastungszustand frühzeitig zu erkennen. Dadurch sollen gesundheitliche Schäden verhindert und die Trainingsplanung, sowohl für Hobbysportler als auch Spitzensportler, ökonomisiert werden.

2. Wissenschaftlicher Hintergrund

2.1. Definitionen und Problematik: OTS, FOR und NFOR

Training kann nach Meeusen et al. als eine Überlastungsphase („Overload“) bezeichnet werden. Die Homöostase wird gestört und eine akute Erschöpfungsreaktion ist die Folge. Schließt sich aber eine adäquate Regenerationsphase an, führt Training zu einer Leistungssteigerung. Dieses Phänomen wird als Superkompensation bezeichnet (Meeusen et al., 2013), dargestellt in Abbildung 1. Umgekehrt kann mangelhafte Regeneration zu einem Leistungseinbruch führen (Kellmann et al., 2018). Zusätzlich können gesundheitliche Schäden, wie z.B. Ermüdungsbrüche, auftreten (Brenner, 2007). Dieser Pathomechanismus wird allgemein als Überlastung oder „Overreaching“ (OR) bezeichnet (Meeusen et al., 2013; Vogel, 2001).

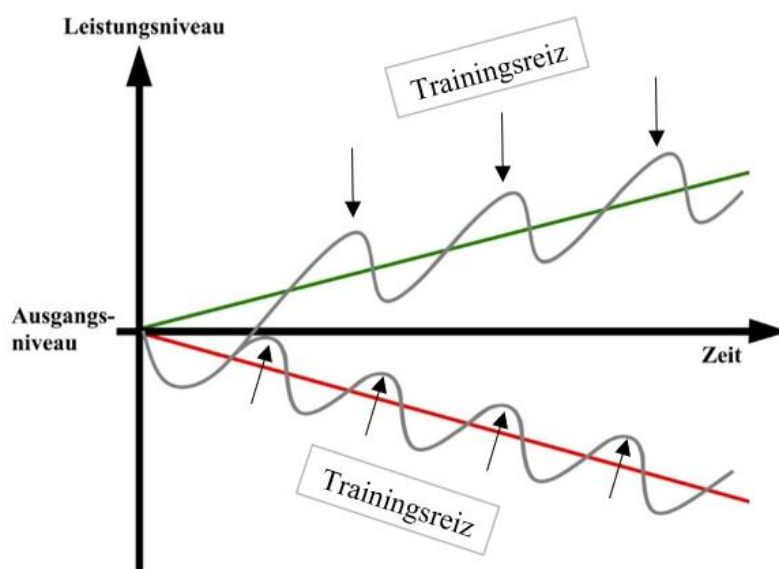


Abbildung 1: Verhältnis zwischen Belastung und Regeneration

Prinzip der Superkompensation (grüne Linie): durch optimales Verhältnis zwischen Trainingsreizen und Erholung kommt es zur Leistungssteigerung. Overreaching-Mechanismus (rote Linie): gestörte Balance zwischen Beanspruchung und Erholung führt zum Leistungseinbruch.

Allerdings gibt es verschiedene Formen von Overreaching. Functional Overreaching (FOR) wird häufig bewusst in den Trainingsalltag integriert: Kurze Phasen von „Overload-Training“ können sich positiv auf die Leistungsfähigkeit von Ausdauerathleten auswirken (Bellinger, Sabapathy, Craven, Arnold, & Minahan, 2020; Skovgaard, Almquist, & Bangsbo, 2017). Allerdings muss sich eine Phase ausreichender Regeneration („Tapering“) anschließen (Meeusen et al., 2013).

Vermieden werden soll sog. Non-Functional Overreaching (NFOR), welches durch prolongiertes intensives Training ohne ausreichend Regeneration entsteht und zu Leistungsstagnation oder -einbruch führt (Meeusen et al., 2013). Schließlich ist Overtraining (OT) gekennzeichnet durch eine systemische Erschöpfung des Athleten, der bereits ein Krankheitswert zuzuschreiben ist (Vogel, 2001). Overtraining ist eher als Prozess denn als Zustand zu verstehen. Dieses, bzw. Overload-Training, führt zu kurzzeitigen Overreaching (FOR), nicht-funktionellem Overreaching (NFOR) oder zum Overtraining Syndrome (OTS) (Halsen & Jeukendrup, 2004; A. Urhausen & Kindermann, 2002). Ein Unterschied zwischen diesen Formen ist die Dauer des sportartspezifischen Leistungsabfalls: Beim OTS hält dieser Zustand trotz Regeneration über Wochen bis Monate an, FOR und NFOR regenerieren innerhalb von Tagen bis Wochen (Meeusen et al., 2013).

Obwohl intuitiv erscheint, dass OTS am Ende einer langen Phase von Übertraining steht (sog. „Overtraining Kontinuum“) (Halsen & Jeukendrup, 2004) sind die Ursachen des OTS multifaktoriell (Meeusen et al., 2013). Diese Bezeichnung wird daher kritisiert, da sie ausschließlich exzessives Training als Ursache fokussiert. Jeder betroffener Athlet zeigt aber eine individuelle Kombination verschiedener Risikofaktoren, die OTS begünstigen: Mangelernährung, körperliche Überbelastung, Schlafstörungen, Probleme im sozialen Umfeld, etc. (Cadegiani & Kater, 2019).

In „The Importance of Recovery for Physical and Mental Health“ fokussieren sich die Autoren auf das Fehlen adäquater Regeneration. Hierbei betonen sie die Rolle der Selbstregulation als Schlüsselkomponente für mangelnde Erholung. So seien „Self-Monitoring“, also die Fähigkeit Diskrepanzen zwischen aktuellem und gewünschtem Zustand, Regulation von Gedanken und Emotionen (u.a. die mentale Abgrenzung von sportbezogenen Gedanken) und Selbstkontrolle wesentlich für die Regenerationsfähigkeit (Balk & Englert, 2020; Michael Kellmann, 2023). Durch die Kombination mangelnder Erholung und NFOR kann sich OTS entwickeln (Kellmann et al., 2018) bzw. das sog. „athlete burnout“ (Fagundes, Noce, Albuquerque, Andrade, & Costa, 2021; Michael Kellmann, 2023).

Eine präzise Definition der verwendeten Ausdrücke fällt also schwer. Zudem ist die Abgrenzung der Begriffe zueinander nicht eindeutig (Meeusen et al., 2013) und individuelle (Über-) Belastungsgrenzen erschweren die Diagnostik (O'Toole, 1998).

Einen Überblick zu den soeben eingeführten Begriffen stellt Abbildung 2 dar.

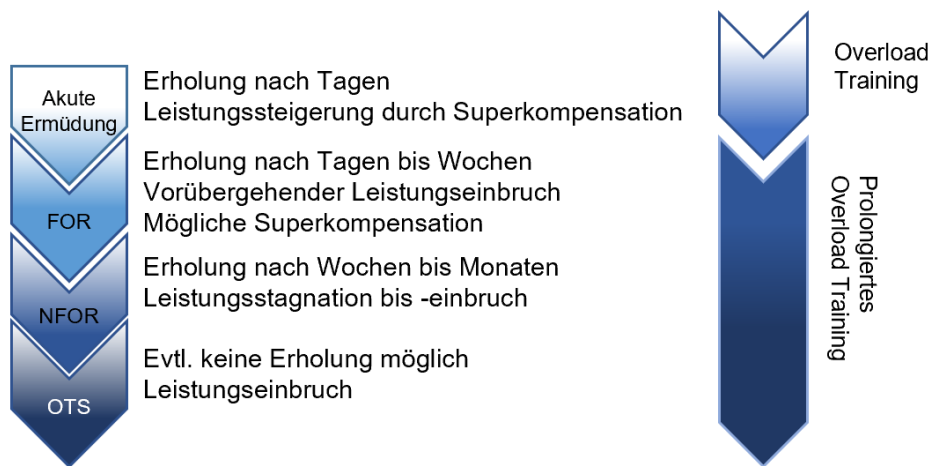


Abbildung 2: Mögliche Folgen von Training

Akute Ermüdung, Overreaching (OR), Non-Functional Overreaching (NFOR) und Overtraining Syndrome (OTS)

Durch (Overload-)Training kommt es zu akuter Erschöpfung mit konsekutiver Leistungssteigerung, wenn sich ausreichend Regeneration anschließt ("Superkompensation"). Dies ist auch nach anhaltendem, aber zeitlich klar begrenztem, Overload-Training möglich (FOR; Functional Overreaching). Erfolgt danach keine entsprechende Regeneration, kann es zu extremen Overreaching oder Non-Functional Overreaching (NFOR) und schließlich zum Overtraining Syndrome (OTS) kommen. Abbildung nach Meeusen et al. (Meeusen et al., 2013).

2.2. Folgen und Diagnostik

In den letzten Jahren wurden Parameter gesucht, die sich durch OR ändern und so als Frühmarker vor drohendem OR und letztlich OTS warnen können.

Optimale Marker für OTS/OR sollen folgende Kriterien erfüllen (Meeusen et al., 2013; Schwellnus et al., 2016):

- Der Marker soll sich **vor** dem Auftreten von OTS verändern
- Die Methode soll eine hohe Sensitivität und Spezifität aufweisen
- Der Marker darf nicht mit physiologischen trainingsbedingten Anpassungen interferieren
- Die Messungen sollen schnell durchführbar und Ergebnisse rasch vorhanden sein
- Ein Ruhe-Wert des Markers ist gefordert, um nicht mit dem Trainingsprozess zu interferieren
- Die Messung darf nicht zu invasiv oder teuer sein

Bisher gibt es keinen Marker, der alle Ansprüche erfüllt. Die Diagnose des OTS solle sich daher auf mehrere Säulen stützen (Meeusen et al., 2013). Carrard et al. führen an, dass OTS eine Ausschlussdiagnose sei (Carrard et al., 2022).

Die nächsten Abschnitte zeigen die Folgen von OR/OTS auf und fassen die sich daraus ergebenden bisherigen Diagnosemittel zusammen.

2.2.1. Fatigue und Leistungsstagnation

Eine zentrale Auswirkung von OR ist Leistungsstagnation und schließlich Fatigue bis hin zum kompletten Leistungseinbruch (Costill et al., 1988; Killer, Svendsen, Jeukendrup, & Gleeson, 2017). Die Pathogenese ist aber unklar. Muskelglykogen und auch Blutglukosewerte werden durch OTS nicht beeinflusst (Snyder, 1998; A Urhausen, Gabriel, Weiler, & Kindermann, 1998). Daher kommt ein diskutierter intramuskulärer Glykogen-Mangel, was eine veränderte Neurotransmittersynthese von Serotonin zur Folge haben soll, nicht als Ursache in Betracht (Kreher & Schwartz, 2012).

Eine andere Erklärung für die Leistungsstagnation ist oxidativer Stress durch Bildung freier Radikale in Folge hoher körperlicher Belastungen (Niess, Fehrenbach, Northoff, & Dickhuth, 2002), was zu einer Entzündungsreaktion und Muskelermüdung führt (Cheng, Jude, & Lanner, 2020; Niess et al., 2002; Tanskanen, Atalay, & Uusitalo, 2010). Allerdings ist nicht geklärt, ob oxidativer Stress Ursache oder Folge des OTS ist (Kreher & Schwartz, 2012) und welche Kofaktoren oxidativen Stress beeinflussen (Tanskanen et al., 2010).

2.2.2. Infektanfälligkeit

Hauswirth et al. fanden heraus, dass Athleten mit FOR-Symptomen in Phasen hochintensiven Trainings krankheitsanfälliger sind (Hauswirth et al., 2014). Niemann beschrieb den Zusammenhang zwischen Trainingsbelastung und der Inzidenz oberer Atemwegsinfektionen: moderate Belastung senke das Risiko, exzessive Belastung erhöhe es (sog. „J-Curve“) (Nieman, 1994). Die direkten Auswirkungen von Overload Training auf das Immunsystem und damit die Infektanfälligkeit werden allerdings diskutiert. Es fehlen aussagekräftige Studien, die untersuchen, ob Athleten tatsächlich öfter an Infektionen leiden und Overload Training an sich ursächlich ist (Schwellnus et al., 2016; Simpson et al., 2020). Svendsen et. al konnten nur moderate immunologische Veränderungen durch OR finden (Svendsen et al., 2016). Auch eine Immunsuppression durch Glutaminmangel in Folge von Overload Training konnte nicht bestätigt werden (Hiscock & Pedersen, 2002).

2.2.3. Verletzungsanfälligkeit

Studien konnten zeigen, dass durch die Kombination wiederholter Überbeanspruchung mit fehlender Regeneration, wie es bei OR der Fall ist, vermehrt sog. „Overuse Injuries“ auftreten (Brenner, 2007). Eine besondere Risikogruppe stellen Kinder und Jugendliche dar: Etwa 50% aller pädiatrischen Sportverletzungen seien auf „Overuse“ zurückzuführen (Micheli, 2006). Der Grund für diese Verletzungen sind Mikrotraumata durch repetitive Belastung; v.a. bei Langstreckenläufern führen diese zu Stressfrakturen (Leumann et al., 2006).

2.2.4. Entzündliche Reaktionen und Schlaf

Mikrotraumata führen auch zu einer- zunächst lokalen- Entzündung mit Zytokinbeteiligung. Proinflammatorische Zytokine (IL-1 β , TNF α und IL6) sind nach einem Marathon erhöht (Bernecker et al., 2013). Diese können eine Reihe von Veränderungen im ZNS verursachen. Dazu gehört ein allgemeines Krankheitsgefühl aber auch eine erhöhte Aktivität der Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinde-Achse sowie Hormonstörungen. Diese systemische Entzündungsreaktion durch OTS kann auch zu Schlafstörungen führen (Smith, 2000). In Phasen von Overload Training ist sowohl die Schlafqualität als auch -quantität reduziert (Hauswirth et al., 2014; Killer et al., 2017; Lastella et al., 2018) und Elitesportler zeigen im Vergleich zur Normalbevölkerung allgemein eine geringere Schlafqualität (Leeder, Glaister, Pizzoferro, Dawson, & Pedlar, 2012).

2.2.5. Hormonelle und biochemische Veränderungen

Eine viel diskutierte Methode zur Erkennung von OR ist die Bestimmung des Kortisol-Testosteron-Verhältnisses. Nach exzessivem Training, aber auch im OTS verringert sich dieses (Fry & Kraemer, 1997; Hoogeveen & Zonderland, 1996) und wird daher als möglicher Frühmarker in Erwägung gezogen (Cadegiani & Kater, 2019). Die Studienlage ist hierzu jedoch nicht einheitlich. Einige Autoren befürworten den Einsatz in der OR/OTS-Problematik (Cadegiani & Kater, 2019; Greenham, Buckley, Garrett, Eston, & Norton, 2018), andere sehen dies kritisch, da sich dieses Ungleichgewicht nicht automatisch als Leistungsver schlechterung widerspiegelt (Hoogeveen & Zonderland, 1996) und eine frühe Diagnose von OTS damit nicht möglich ist (Bellinger, 2020).

Ein wichtiges Kriterium für einen geeigneten Frühmarker ist die Differenzierungsfähigkeit zwischen OR (welches im Training teilweise gewünscht ist) und OTS: Hilfreich könnte hier eine Bestimmung von ACTH und Prolaktin sein (Buyse et al., 2019; Meeusen et al., 2004)

Insgesamt werden weitere Untersuchungen über hormonelle Veränderungen durch OR gefordert (Bellinger, 2020; Greenham et al., 2018). Zudem werden die für Hormonbestimmungen benötigten Laborbedingungen betont, die im Trainingsalltag nicht gegeben sind. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass physiologische Vorgänge nicht von einzelnen Hormonen reguliert, sondern Ergebnis eines komplizierten und sensiblen Zusammenspiels mehrerer Parameter sind (Meeusen et al., 2013).

2.2.6. Kardiovaskuläre Veränderungen

Neben biochemischen Veränderungen haben Sport im Allgemeinen und OR im Speziellen auch Auswirkungen auf das kardiovaskuläre System, welche den Leistungseinbruch durch OR erklären könnten (A. M. Coates et al., 2018; Yann Le Meur et al., 2014).

Myokardiale Veränderungen

Auswirkungen von Sport auf das kardiale System können kurzfristig und reversibel, etwa im Rahmen eines Marathons, sein. Diese Veränderungen lassen sich teilweise echokardiographisch darstellen: So wurde gezeigt, dass lange Ausdauerbelastung zu erniedrigten linksventrikulären enddiastolischen Parametern und einer erhöhten linksventrikulären Wanddicke führt. Außerdem zeigte sich eine Reduzierung der Tricuspid annular plane systolic excursion (TAPSE), die eine Einschränkung der systolischen Funktion des rechten Ventrikels nahelegt (Christou et al., 2020). Eine andere Studie fand bei Freizeit-Läufern reversible Veränderungen des linken Ventrikels nach einem Marathon, was auf myokardiale Erschöpfung durch großen hämodynamischen Stress hindeuten kann (Sengupta, Mahure, Mungulmare, Grewal, & Bansal, 2018). Auch Ultra-Trail-Läufe können zu einer kurzfristigen linksventrikulären systolischen und diastolischen Dysfunktion führen (Jouffroy et al., 2015). Dynamische Bewegung führt zu einer erhöhten kardialen Auswurfleistung durch Steigerung der Herzfrequenz und des Schlagvolumens. Das Schlagvolumen vergrößert sich durch erhöhtes enddiastolisches und erniedrigtes endsystolisches Volumen (Barbier, Ville, Kervio, Walther, & Carré, 2006). Im Zustand des FOR können jedoch unter Belastung verringertes Schlagvolumen und niedrigere Herzfrequenz mit reduzierter Auswurfleistung auftreten (Coates, Millar, & Burr, 2018; Yann Le Meur et al., 2014).

Andererseits kann Sport auch zu langfristigen Veränderungen am Herzen führen. Herzen hochtrainierter Ausdauer- und Kraftathleten zeigen typischerweise eine linkskavitäre Erweiterung mit erhöhter linksventrikulärer Muskelmasse (Barbier et al., 2006). Das bekannte „Sportherz“ beschreibt eine harmonische Vergrößerung aller Herzkammern. Hierbei handelt es sich um eine physiologische exzentrische Hypertrophie durch Ausdauerbelastungen, welche aber nur bei etwa 15% der Sportler zu finden ist (Kindermann & Scharhag, 2014).

Diese sportbedingten kardialen Veränderungen sind vermutlich physiologisch. So konnten bei hochtrainierten Triathleten keine Anzeichen einer links- oder rechtsventrikulären Schädigung gefunden werden (Leischik & Spelsberg, 2014). Die (patho-)physiologischen Veränderungen am Herzen sind Gegenstand aktueller Forschung. So konnten Yang et al. in einer Studie an Mäusen Veränderungen v.a. des linksventrikulären microRNA-Profiles nach exzessiver Laufbandbelastung zeigen, welche möglicherweise zum myokardialen Remodelling beitragen könnten (Yang et al., 2022).

In den letzten Jahren rückte der rechte Ventrikel stärker in den Fokus. Er wird durch exzessives Training disproportional stärker belastet als der linke Ventrikel. Durch die erhebliche hämodynamische Belastung kann es, neben einer vorübergehenden Dysfunktion, auch zu chronischem rechtsventrikulären Remodelling mit proarrhythmischen Potential kommen. Dies wird als „exercise-induced RV cardiomyopathy“ bezeichnet (Gerche, Roberts, & Claessen, 2014; André La Gerche et al., 2011). Vor allem für Personen mit vorbekannten Arrhythmien und pulmonalen oder rechtsventrikulären Pathologien stellt dies ein Risiko dar. Die individuellen Risikofaktoren müssten aber noch genauer untersucht werden (Gerche et al., 2014; A. La Gerche et al., 2015).

Elliott und La Gerche fassen zusammen, dass körperliche Anstrengung ab 90 Minuten eine kurzzeitige rechtsventrikuläre Dysfunktion und Dilatation auslösen kann. Dies scheint eine physiologische und reversible Reaktion zu sein. Unklar bleiben jedoch die Auswirkungen der rechtsventrikulären Dysfunktion auf die kardiale Leistung bei wiederholten Trainingsbelastungen (Elliott & La Gerche, 2015).

Autonome Veränderungen

Neben strukturellen Auswirkungen werden auch Veränderungen des autonomen Nervensystems durch OR diskutiert. So zeigten sich Verschlechterungen der Barorezeptorsensitivität (BRS) bei Athleten mit FOR (Bourdillon et al., 2018; A. M. Coates et al., 2018). Daher wird die BRS für Trainingsmonitoring diskutiert (Bourdillon et al., 2018).

Untersucht wurde außerdem die Herzfrequenzvariabilität (HRV) als Marker für OR/OTS. Hottenrott beschreibt die HRV als „Variation (...) der Herzfrequenz über einen definierten Messzeitraum (...) bei einer Analyse aufeinanderfolgender Herzperioden“ (Kuno Hottenrott, 2001). Diese Variabilität ist als physiologische Anpassungsreaktion des Herzens auf wechselnde endogene und exogene Belastungen zu verstehen (Kuno Hottenrott, 2001). Die Analyse der HRV kann die Risikoeinschätzung bei kardiovaskulären, aber auch neurologischen Erkrankungen erleichtern (Cygankiewicz & Zareba, 2013). Erstmals Beachtung fand sie 1965, als eine abnehmende Variation der Herzschläge bei Föten im hypoxischen Stress beobachtet wurde (Billman, 2011).

Ein Modell für die (patho-)physiologischen Zusammenhänge zwischen HRV und Übertraining ist folgendes: Körperliche Überbelastung führt zu einer Imbalance des vegetativen Nervensystems, einer Dysfunktion zentraler Hormonachsen und einer Desensibilisierung kardialer β -Rezeptoren, weshalb vermutet wird, dass sich die HRV durch OR ändert (K. Hottenrott, Hoos, & Esperer, 2006; Welsh et al., 2005). Trainierte Personen zeigen zwar

allgemein höhere HRV-Werte als Untrainierte, ein zu intensives Training kann jedoch zu einem sympathisch dominierten Zustand mit abfallender HRV führen (Dong, 2016).

Die Rolle der HRV in der OR-Diagnostik war lange unklar und erforderte weitere Untersuchungen (K. Hottenrott et al., 2006), sodass sich in den letzten Jahren mehrere Studien damit befassten. Nach Kajaia et al. zeigen Athleten mit FOR oder OTS eine geringere HRV und parasympathische Aktivität als die ebenfalls hoch trainierte Kontrollgruppe (Kajaia, Maskhulia, Chelidze, Akhalkatsi, & Kakhabrishvili, 2017). Hingegen konnten Dupuy et al. keine Änderung der HRV durch induziertes FOR bei Ausdauerathleten finden (Dupuy et al., 2014). Eine Änderung der Herzfrequenz oder HRV lässt sich aufgrund der starken Tagesvariabilität nicht als alleinigen Marker verwenden. Beobachtete Veränderungen befinden sich oft innerhalb des täglichen Schwankungsbereichs (Bosquet, Merkari, Arvisais, & Aubert, 2008). Ten Haaf et al. erachten die Herzfrequenz als keinen geeigneten Marker für Trainingsmonitoring (Ten Haaf et al., 2019). Eine Kombination aus Herzfrequenz- und Blutlaktatkonzentrationsmessung könnte in der Diagnose des OR allerdings hilfreich sein (Y. Le Meur, Hausswirth, et al., 2013). Es stellt sich aber die Frage, ob Veränderungen der Herzfrequenz eine reduzierte Maximalleistung bedingen oder gemeinsam mit ihr auftreten (Bellinger, 2020).

Insgesamt bleiben die Ergebnisse der HRV-Untersuchungen zum Thema OR nicht eindeutig. Es werden einheitliche Methoden gefordert, um die Studienergebnisse vergleichen und einordnen zu können (Meeusen et al., 2013).

2.2.7. Neuromuskuläre Folgen

Auch das neuromuskuläre System kann durch OR gestört werden (Piirainen et al., 2019). Bei Futsal-Spielern verringerte sich Sprungkraft beim CMJ durch OR (Claudino et al., 2016). Bei Volleyballspielern konnte allerdings keine Veränderung im CMJ durch erhöhte Trainingsintensität festgestellt werden (Freitas, Nakamura, Miloski, Samulski, & Bara-Filho, 2014). 800-Meter-Läufer profitieren wiederum von einem Monitoring des CMJ im Saisonverlauf, da dieser Leistungsveränderungen widerspiegelt und sich so auch für das Erkennen von OR eignet (Bachero-Mena, Pareja-Blanco, & González-Badillo, 2017). Direkt im Anschluss und einen Tag nach einem Spiel zeigten Fußballer eine Verschlechterung des Counter-Movement-Jump (CMJ) mit erhöhten CK-Werten, sodass auch hier ein saisonbegleitendes Monitoring sinnvoll erscheint (Hagstrom & Shorter, 2018).

2.2.8. Psychische Folgen

Neben körperlichen Symptomen äußert sich das OTS psychisch (Bellinger, 2020).

OTS verursacht eine ähnliche mentale Erschöpfung wie hohe geistige Anstrengung (Blain et al., 2019). Phasen von hochintensivem Training können auch zu Stimmungsverschlechterung

führen (Killer et al., 2017). Als mögliche Ursache wird eine überlastungsbedingte veränderte Serotonin-Sensibilität diskutiert (Budgett, Hiscock, Arida, & Castell, 2010; Kreher & Schwartz, 2012).

Aufgrund der psychischen Veränderungen in Folge von OR prüften Studien, ob sich diese als Frühmarker eignen. Eine Möglichkeit der Erfassung psychischer Befindlichkeit stellen Fragebögen dar. Als sensitiver Parameter bzgl. OTS hat sich die Eigenzustandsskala nach Nitsch erwiesen (Morgan, Brown, Raglin, O'Connor, & Ellickson, 1987). Dieser Fragebogen besteht aus mehreren Ebenen und gibt Aufschluss über Handlungsbereitschaft und -fähigkeit des Sportlers (Kellmann & Golenia, 2003). Auch der POMS-Fragebogen (Profile of Mood States) zeigt Veränderungen bei Sportlern in hochintensiven Trainingsphasen: Anspannung, Ärger, Müdigkeit und depressive Stimmung verstärken sich, während positive Gefühle abnehmen (Morgan et al., 1987). Der Erholungs-Belastungs-Fragebogen (EBF) ist womöglich geeignet, OR in frühen Stadien zu erkennen. Daher wird er zur Trainingssteuerung empfohlen (Coutts, Wallace, & Slattery, 2007; González-Boto, Salguero, Tuero, González-Gallego, & Márquez, 2008). Der EBF gibt Aufschluss über die Befindlichkeit der letzten drei Tage, indem er Aspekte zur allgemeinen Beanspruchung und Erholung sowie der sportspezifischen Beanspruchung bzw. Erholung abfragt (Kallus & Kellmann, 2016).

3. Ziele und Fragestellung

Der Grat zwischen effektivem Training und Überbelastung ist schmal. Trainiert ein Sportler zu wenig, bleibt er unter seiner potentiell maximal erreichbaren Leistungsfähigkeit aufgrund des unterschwelligen Trainingsreizes. Durch zu viel Training ohne adäquate Erholung riskiert er u.a. Verletzungen und wird trotz des erhöhten Pensums sein Potential nicht ausschöpfen können.

3.1. Studienziel

Die OperaTUM Pilotstudie will einen Beitrag zu einer effektiveren und nachhaltigeren Trainingsgestaltung leisten. Es sollen Parameter auf ihr prädiktives Potential hin untersucht werden, eine Überbelastung frühzeitig zu erkennen, bevor es zum Auftreten von NFOR kommt.

3.2. Hypothesen

Folgende Hypothesen sollen in dieser Studie geprüft werden:

1. Beginnende Überbelastung zeigt sich in einer Veränderung der Herzfrequenzvariabilität (HRV).
2. Die vertikale Sprungkraft verschlechtert sich infolge von Überbelastung.
3. Subtests des Erholungs-Belastungs-Fragebogens (EBF) verändern sich im Kontext einer Überbelastung.
4. Echokardiographisch lässt sich eine vorübergehende Verschlechterung der rechts- und linksventrikulären Funktion infolge von Überbelastung feststellen.
5. Durch die beobachteten Veränderungen lässt sich ein Frühmarker für FOR bzw. in weiterer Konsequenz für OTS finden.

Darüber hinaus soll für jede Hypothese evaluiert werden, ob es sich bei beobachteten Effekten um kurzfristige (im Bereich von einigen Tagen) oder längerfristige (bis zu zwei Wochen) Veränderungen handelt.

4. Material und Methoden

4.1. Design

Die soeben beschriebenen Theorien sollten im Rahmen einer monozentrischen, randomisierten Pilotstudie im Cross-over-Design überprüft werden. Jeder Proband absolvierte die Interventionen in zufälliger Reihenfolge, sodass am Ende alle Teilnehmer jede Intervention genau einmal durchliefen. Dies stellt Abbildung 3 dar.

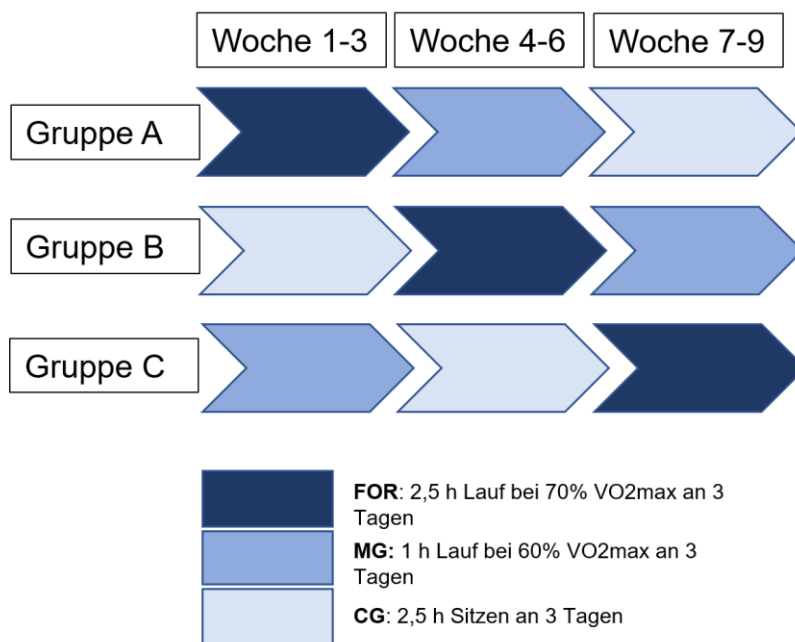


Abbildung 3: Cross-Over-Design der Pilotstudie

Jeder Proband absolvierte innerhalb von neun Wochen folgende Interventionen in zufälliger Reihenfolge (Gruppe A/B/C):

- Functional Overreaching (FOR): 2,5h Lauf bei 70% der VO₂max an 3 folgenden Tagen
- Moderate Group (MG): 1h Lauf bei 60% der VO₂max an 3 folgenden Tagen
- Control Group (CG): 2,5h Sitzen an 3 folgenden Tagen

VO₂max= maximale Sauerstoffaufnahme

4.2. Probanden

4.2.1. Ein- und Ausschlusskriterien

Gesunde Ausdauersportler (männlich/weiblich) wurden in die Studie eingeschlossen. Die Ein- und Ausschlusskriterien werden in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
• Schriftliche Einwilligungserklärung mit Vereinbarung zur normalen Trainingsfortführung • Teilnehmer sind in der Lage, die Einwilligungserklärung zu lesen, zu verstehen und schriftlich die Einwilligung zu bestätigen • Gesunde Ausdauersportler 1. Alter <55 Jahren 2. In der Lage, 2,5 h auf dem Laufband/Tartanbahn zu laufen 3. Erfolgreicher Abschluss eines Halbmarathons/Distanzrennens im letzten Jahr	• Ereignisse wie KHK, Schlaganfall, Diabetes, rheumatoide Arthritis, Bluthochdruck, Nieren-, Leber-, Blut-, Hormon- oder metabolischen Erkrankungen, Krebserkrankungen in den letzten 5 Jahren • Einnahme von Medikamenten vor und während der Studienteilnahme • Gewichtsschwankungen • Verwendung hochdosierter Nahrungsergänzungsmittel >100% der empfohlenen Tagesdosis • Nicht ausgeheilte muskuloskelettale Traumata • Schwangerschaft, Stillen • Geplante relevante Veränderungen der Ernährungsgewohnheiten in den letzten 6 Monaten bzw. während der Studienperiode • Einnahme von Vitaminen/Antioxidantien 2 Wochen vor Beginn der Studie

4.2.2. Rekrutierung

Die Rekrutierung der Teilnehmer fand über den Ambulanzbetrieb des Lehrstuhls für Präventive und Rehabilitative Sportmedizin, Klinikum rechts der Isar, Technische Universität München statt. Des Weiteren wurden lokale Triathlon-Vereine sowie Laufgruppen über Flyer, und soziale Netzwerke kontaktiert.

4.3. Untersuchungen und Methodik

Die folgenden Absätze sollen einen Überblick über das Prozedere sowie die verwendeten Materialien der Studie geben.

4.3.1. Übersicht und Studienablauf

Die Gesamtdauer der Studie betrug 9 Wochen, aufgeteilt in 3x3 Wochen. Nach Aufklärung der Probanden und unterschriebener Einwilligungserklärung fand eine Baseline-Untersuchung 1 Woche vor Interventionsstart zum Ausschluss kardiologischer Erkrankungen sowie relevanter Ausschlusskriterien statt. Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt: Anamnese und internistisch-orthopädische Untersuchung, Körperzusammensetzungsmessungen, Blutabnahme, Ruhe- und Belastungs-EKG sowie einen Belastungstest auf dem Laufband. Außerdem wurden Baseline-Werte für folgende Parameter erhoben: 5km-Laufleistung, vertikale Sprungkraft, EBF und HRV-Messung.

Die Studie lässt sich in drei Abschnitte gliedern. Woche 1, 4 und 7 stellen die eigentlichen „Interventionswochen“ dar. In den Wochen 2, 5 und 8 sowie 3, 6 und 9 fanden Nachuntersuchungen statt. Die folgenden Absätze erläutern den genauen Aufbau.

Woche 1,4,7:

In diesen Wochen fand jeweils am Wochenende (Freitag bis Sonntag) die 3-tägige-Intervention statt: eine Gruppe saß zweieinhalb Stunden (Control Group, CG), während die andere zweieinhalb Stunden bei 70% der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) lief (Functional Overreaching, FOR) und die dritte Gruppe eine Stunde bei 60% der VO_{2max} lief (Moderate Group, MG). Am anschließenden Montag absolvierten alle Probanden gemeinsam den 5km-Lauf und den vertikalen Sprungtest. Freitags und montags fand eine echokardiographische Untersuchung statt. Außerdem füllten die Probanden freitags und montags den EBF aus. Die HRV wurde montags sowie freitags bis sonntags gemessen.

Woche 2, 5, 8:

Auch in diesen Wochen sollten die Teilnehmer montags den 5km-Lauf und vertikalen Sprungtest absolvieren und sie wurden echokardiographisch untersucht. Der Fragebogen sollte montags und donnerstags ausgefüllt werden. Die HRV-Messungen fanden Montag bis

Donnerstag statt. Am Wochenende fand keine Intervention statt; die Untersuchungen dienten der Nachuntersuchung der vorangegangenen Interventionen.

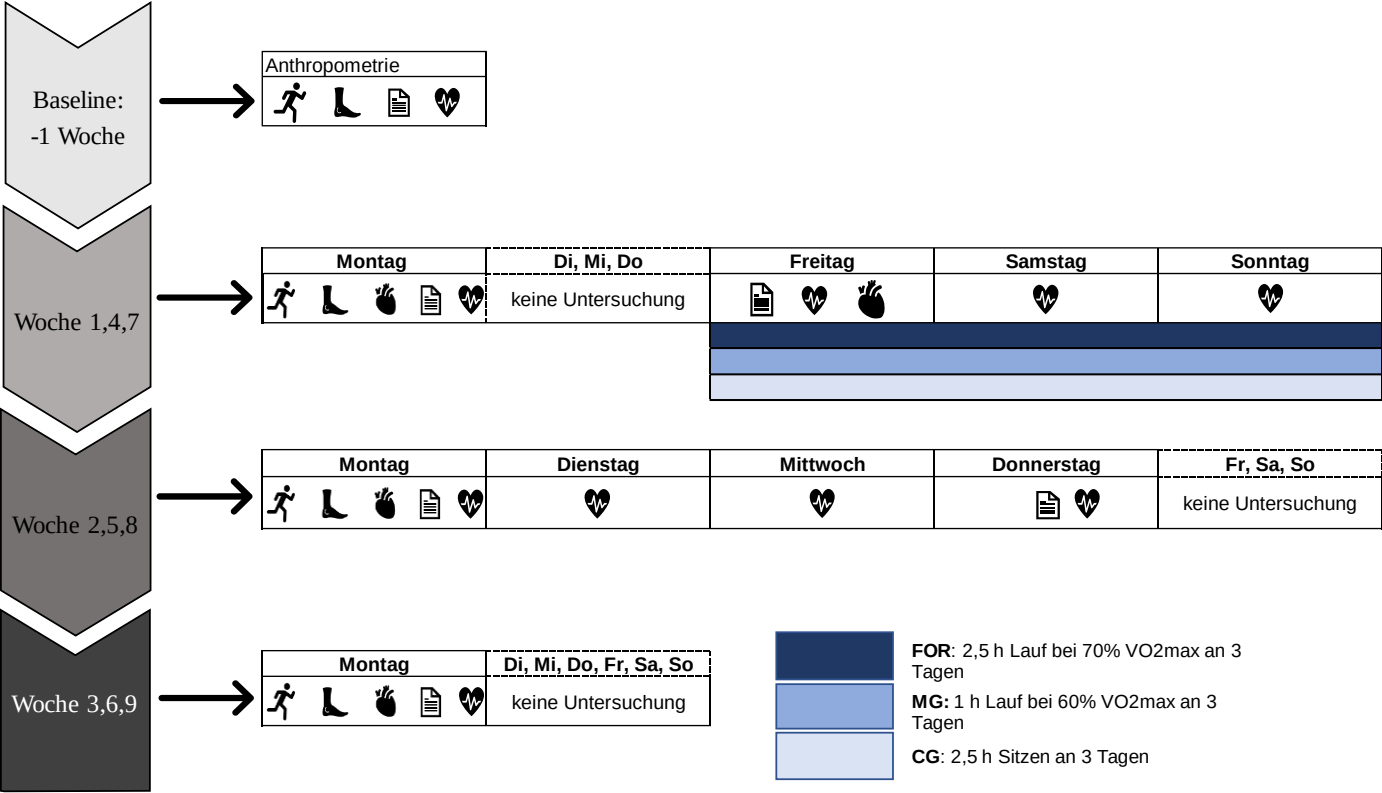
Woche 3, 6, 9:

Während dieser Wochen fanden die Untersuchungen (5km-Lauf, Sprungkraft, HRV, EBF und Echokardiographie) nur montags statt. Auch diese Maßnahmen dienten dem Follow-Up der nun zwei Wochen zurückliegenden Intervention.

Abbildung 4 veranschaulicht den Studienablauf.

Abbildung 4: Studienablauf der neunwöchigen OperaTUM-Studie

FOR= Functional Overreaching, MG = Moderate Group, CG = Control Group, VO₂max = maximale Sauerstoffaufnahme, HRV = Herzfrequenzvariabilität



	HRV
	Echokardiographie
	Fragebogen
	Vertical Jump Test
	5-km-Lauf

Tabelle 2 gibt einen Überblick der durchgeführten Untersuchungen während der Studie:

Tabelle 2: Untersuchungen während der neunwöchigen Studie

Untersuchung	Baseline 7 Tage vor Interventionsbeginn	1. Interventions- woche (Woche 1)	2. Interventions- woche (Woche 4)	3. Interventions- woche (Woche 7)	Zwischenuntersu- chung (Woche 2,3,5,6,8,9)
Anamnese und körperliche Untersuchung	✓				
- Anamnese: Erhebung möglicher Vorerkrankungen, der Sportanamnese und möglicher Medikamenteneinnahme - Körperliche Untersuchung: Zum Ausschluss körperlicher Erkrankungen, die einer Belastung eines regelmäßigen Trainings oder einem Lauf von 2,5h entgegenstehen					
EKG	✓				
Beurteilung des Herzrhythmus					
Echokardiographie	✓	✓	✓	✓	
Größe und Funktion der Ventrikel und der Herzklappen					
Spiroergometrie	✓				
- Messung der Atemgase unter körperlicher Belastung zur Untersuchung des Herz-Kreislauf-Systems, der Atmung, des Metabolismus und der kardiopulmonalen Leistungsfähigkeit - Inklusive Durchführung eines Belastungs-EKGs					
5 km-Lauf	✓	✓	✓	✓	✓
Erfassung der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit					
Vertical-Jump-Test	✓	✓	✓	✓	
Beurteilung der neuromuskulären Leistungsfähigkeit					
Erholungs-Belastungs-Fragebogen (EBF)	✓	✓	✓	✓	✓
Erfassung der befindensorientierten Beanspruchungsbilanz					

4.3.2. Anthropometrie

Im Rahmen der Baseline-Untersuchung wurden folgende anthropometrische Messungen erhoben: Größe und Gewicht wurden mittels SEKA Wage gemessen und der Body-Maß-Index (BMI) berechnet. Der Körperfettgehalt wurde mittels Caliper gemessen und nach 7-Site Skinfold (Jackson & Pollock, 1978) berechnet.

Die Messung des systolischen und diastolischen Blutdrucks wurde im Liegen nach standardisierter Methode durchgeführt. Befragt wurden die Teilnehmer außerdem nach ihrem durchschnittlichen Trainingsumfang pro Woche.

4.3.3. Kardiopulmonaler Ausbelastungstest

Der kardiopulmonale Ausbelastungstest wurde spiroergometrisch mit einem Rampenprotokoll durchgeführt. Die Auswertung erfolgte mithilfe der Software „MetaSoft Studio“ (Cortex Biophysik GmbH). Zusätzlich wurden die individuellen Trainingsbereiche standardisiert angepasst.

Blutdruck sowie Laktat wurden zu Beginn, unmittelbar im Anschluss, sowie nach der 1, 3 und 5 Minute nach der Belastung gemessen. Gleichzeitig wurde eine 12-Kanal-Belastungs-Elektrokardiographie durchgeführt.

4.3.4. Erholungs-Belastungs-Fragebogen (EBF Sport)

Jeder Teilnehmer füllte den EBF Sport aus, um Aufschluss über die Befindlichkeit der letzten 3 Tage zu geben. Der EBF-Sport besteht aus 19 Subtests, die sich aus insgesamt 52 Items zusammensetzen. Dabei geben 7 Subtests die allgemeine Beanspruchung und 5 die allgemeine Erholung wieder. 4 testen die sportspezifische Beanspruchung und 3 die sportspezifische Erholung. Die Bearbeitungszeit beträgt ca. 8-12 Minuten (Kallus & Kellmann, 2016).

4.3.5. 5-Kilometer-Lauf

Die Probanden liefen montags nach der jeweiligen Intervention (FOR, MG, CG), d.h. insgesamt neunmal, 5 Kilometer auf einer überdachten, 200 m langen Tartanbahn. Die Zeiten wurden mittels Stoppuhren gestoppt.

4.3.6. Herzfrequenzvariabilität (HRV)

Die HRV wurde mittels Brustgurte der Firma „acentas“ (*acentas GmbH, 2010*) aufgezeichnet.

Mithilfe des Programms „Kubios HRV Premium“ (Kubios, 2020) wurden die jeweiligen Parameter der Herzfrequenzvariabilität ermittelt. Fokus lag auf der sogenannten RMSSD (Root Mean Square Successive Difference). Sie wird ermittelt, indem man zunächst die Differenzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Herzschlägen (RR-Intervalle) bildet. Anschließend quadriert man diese Differenzen, und berechnet aus der Summe den Mittelwert.

Die Quadratwurzel des Mittelwerts ergibt die RMMSD. Er wird vagal moduliert, gibt also Auskunft über den parasympathischen Einfluss am Herzen und wird der Kurzzeitvariabilität zugeordnet (Kuno Hottenrott, 2002). Die HRV wurde zunächst im Liegen über einen Zeitraum von 3 Minuten gemessen, danach setzten sich die Teilnehmer auf und es erfolgte eine weitere Messung über 3 Minuten.

4.3.7. Echokardiographie

Die echokardiographischen Untersuchungen fanden mit dem Ultraschallgerät iE33 xMATRIX (Philips Healthcare) statt.

Für die echokardiographische Untersuchung kamen 2D- und 3D-Messmethoden zum Einsatz. 3D-Schallköpfe erlauben nahezu verzögerungsfrei die Darstellung eines schmalen pyramidenförmigen Sektors. Für die genaue Darstellung größerer Strukturen wie den linken Ventrikel müssen während 4-7 Herzschlägen benachbarte Segmente registriert und mittels einer Software im Nachgang analysiert werden. Optimalerweise finden diese Aufnahmen in Atemruhelage statt (Franke, 2021). Bestimmt wurde so u.a. die Right Ventricular Ejection Fraction (3D RVEF). Dieser Parameter korreliert gut mit der tatsächlichen RVEF (Huber & Glaser, 2013). Um den enddiastolischen und endsystolischen Frame zu bestimmen, wurde der rechte Ventrikel im apikalen Vierkammerblick sowie in der langen und kurzen Achse beurteilt. Die Software konnte dann automatisch die RVEF berechnen.

Zusätzlich erfolgte die Evaluation der linksventrikulären Funktion. Ein wichtiger Parameter ist die linksventrikuläre Ejektionsfraktion (LVEF). Diese kann berechnet aus der Differenz zwischen enddiastolischen (LVEDV) und endsystolischen Volumen (LVESV) geteilt durch das enddiastolische Volumen:

$$\text{LVEF (\%)} = \frac{\text{EDV} - \text{ESV}}{\text{EDV}}$$

Die Real-Time-3D-Echokardiographie-Software identifiziert automatisch die Endokardgrenzen während der Systole und Diastole und berechnet so die LVEF (Franke, 2021) .

Als Parameter der diastolischen Funktion des LVs diene das Verhältnis der E- zur A-Welle (E/A) sowie E/e' mean. Die Diastole wird in 4 Phasen unterteilt:

- Isovolumetrische Relaxation (keine Füllung des Ventrikels)
- Schnelle passive Füllung (E): passive Leerung des linken Vorhofs durch Druckdifferenz zwischen Vorhof und Ventrikel; für ca. 80% der linksventrikulären Füllung

verantwortlich. Abhängig von LVEDV, atrialer Druck, linksventrikuläre Compliance (Appleton, Firstenberg, Garcia, & Thomas, 2000)

- Diastase: keine Füllung des Ventrikels; diese Phase kann bei hohen Herzfrequenzen fehlen
- Vorhofkontraktion (A): aktive Kontraktion des linken Vorhofs, macht ca. 10-30% der linksventrikulären Füllung aus

Dopplersonographisch können an der Mitralklappe die E-Welle (passive Füllung des LV) und die A-Welle (Vorhofkontraktion) unterschieden werden. Bei diastolischer Dysfunktion oder im Alter nimmt das E/A-Verhältnis ab (Flachskampf & Buck, 2021).

Ein weiterer Parameter der diastolischen Funktion ist das Verhältnis E/e' . Am Mitralannulus spiegeln zwei Wellen (e' und a') die diastolische Bewegung wider und können medial (septal) oder lateral mittels Gewebedoppler gemessen werden; hieraus kann der Mittelwert bestimmt werden. Aus dem Quotienten der maximalen E-Wellen-Geschwindigkeit und der maximalen e' -Wellen-Geschwindigkeit lässt sich der linksventrikuläre enddiastolische Druck schätzen. Eine diastolische Dysfunktion kann sich in einem erhöhten E/e' Verhältnis widerspiegeln (Flachskampf & Buck, 2021).

4.3.8. Sprungkraft

Counter-Movement-Jump (CMJ)

Um die Kraftfähigkeit der Sprungmuskulatur zu testen, wurde der CMJ eingesetzt. Zur Erfassung der Sprungkraft im CMJ kamen Kraftmessplatten der Firma „Contemplas“ (Contemplas GmbH) zum Einsatz.

Die Arme mussten zu jedem Zeitpunkt in der Hüfte fixiert sein, um eine Impulsverstärkung durch Mitschwingen der Arme zu verhindern. Der Sportler wiederholte diesen Ablauf fünfmal; gewertet wurde der beste Sprung, gemessen an der Sprunghöhe. Auszuwertende Parameter waren die Maximalkraft (N), die Sprunghöhe (cm) und der maximale Kraftanstieg (N/s).

Drop-Jump (DJ)

Die Analyse des DJ erfolgte mithilfe des Lichtschrankensystems „Optojump“ der Firma „Microgate“ (Microgate Srl, 2009-2014). Dieses System besteht aus 96 LEDs des Messstabs, welche kontinuierlich mit den korrespondierenden LEDs des Empfängerstabs kommunizieren. Die Messstäbe wurden parallel zueinander platziert und an die Stromversorgung sowie an den PC angeschlossen. Wie auch beim CMJ befanden sich die Hände zu jedem Zeitpunkt in der Hüfte fixiert. Zusätzlich durften die Beine während der Flugphase nicht angezogen werden. Auszuwertende Parameter waren Folgende: die Bodenkontaktzeit (ms), die Flugdauer (ms) sowie der Reaktivkraftindex.

4.4. Statistische Verfahren

Die statistische Analyse wurde mit den Programmiersprachen R (R Core Team, 2020) und Python durchgeführt. Zur Visualisierung der Daten wurde die Matplotlib-Bibliothek (Hunter, 2007) verwendet. Der Shapiro-Wilk-Test prüfte auf Normalverteilung. Bei bestätigter Normalverteilung wurden die Daten durch den Mittelwert und die Standardabweichung charakterisiert; im Falle einer nicht-normalen Verteilung wurden Median und Interquartilsabstand (25. und 75. Perzentil) angegeben.

Zur Untersuchung der Effekte der verschiedenen Interventionen (FOR, MG, CG) wurden die Differenzen zwischen den Messzeitpunkten „Pre“ (bzw. Baseline) und „Post“ berechnet. Um Unterschiede zwischen diesen Differenzen statistisch zu evaluieren, wurde, je nach Verteilungseigenschaften der Daten, entweder der t-Test oder Wilcoxon-Rang-Tests für verbundene Stichproben angewendet.

Das Signifikanzniveau α wurde bei allen statistischen Tests auf 0,05 festgelegt.

5. Ergebnisse

Zunächst soll auf das Probandenkollektiv ($n = 9$) eingegangen werden, bevor die Laufleistung, die Echokardiographie, HRV, Sprungkraft und der Fragebogen analysiert werden.

5.1. Probandenkollektiv

Die folgenden Abschnitte geben Aufschluss über die teilnehmenden Probanden.

5.1.1. Dropouts: Flowchart

Nachfolgende Abbildung stellt die Dropouts und das Cross-over-Design der Pilotstudie dar.

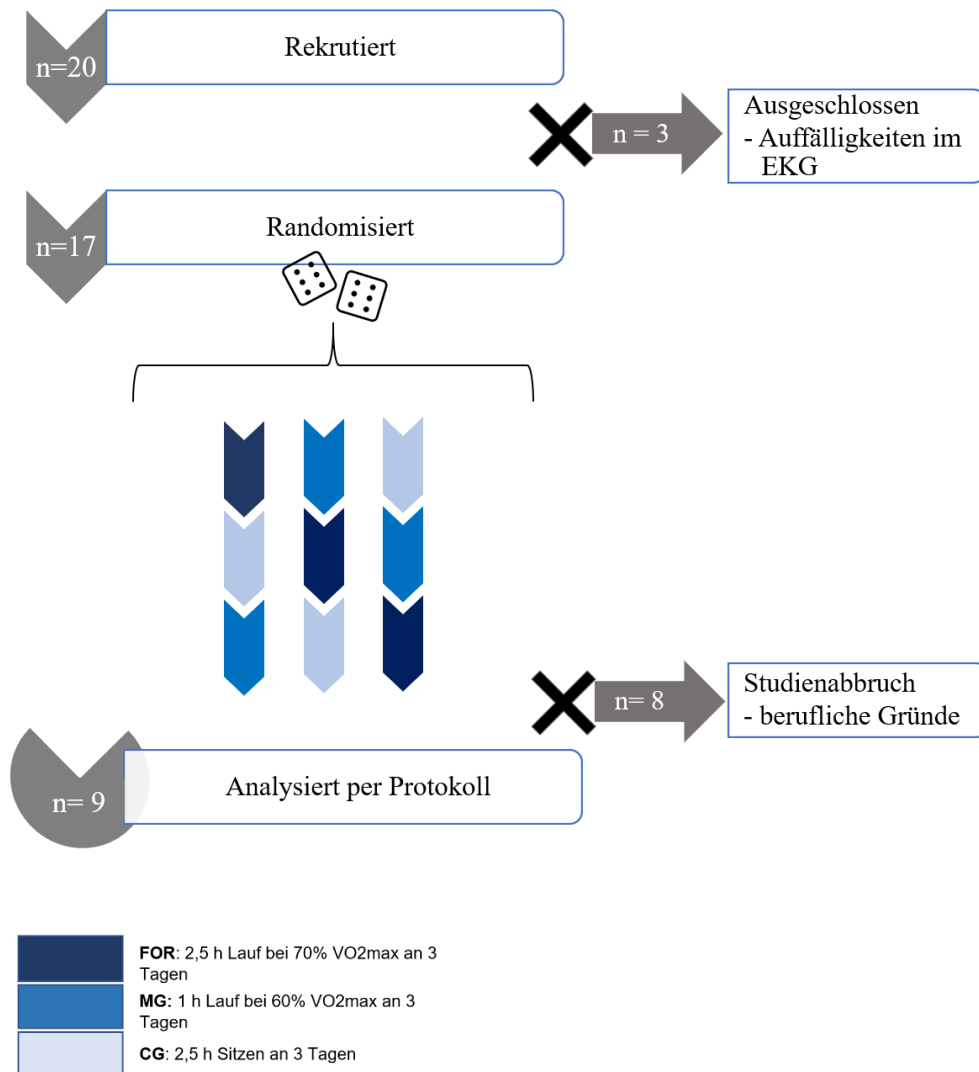


Abbildung 5: Flowchart

Die Probanden durchliefen in zufälliger Reihenfolge die drei Interventionen (Cross-Over-Design):

- Functional Overreaching (FOR): 2,5h Lauf bei 70% der VO₂max an 3 Tagen
- Moderate Group (MG): 1h Lauf bei 60% der VO₂max an 3 Tagen
- Control Group (CG): 2,5h Sitzen an 3 Tagen

VO₂max: maximale Sauerstoffaufnahme

5.1.2. Baseline-Charakteristika

Tabelle 3 zeigt die anthropometrischen Werte (Mittelwert und Standardabweichung) der Teilnehmer. Es nahmen 6 männliche Probanden und 3 weibliche Probandinnen teil.

Tabelle 3: Anthropometrische Daten und Auswertung des kardiopulmonalen Ausbelastungstest des Probandenkollektivs

HF= Herzfrequenz, RER= respiratorische Austauschrate, VO₂max= maximale Sauerstoffaufnahme, HV rel.= relatives Herzvolumen, IVSd= Enddiastolische interventrikuläre Septumdicke

<u>Anthropometrie</u>			
	MW ± SD (gesamt)	MW ± SD ♂	MW ± SD ♀
Größe (cm)	178,8 ± 12,9	184,5 ± 12,1	167,5 ± 2,4
Gewicht (kg)	69,1 ± 8,3	73,4 ± 4,6	60,6 ± 6,0
Alter (Jahren)	38,7 ± 11,6	39,8 ± 12,1	36,3 ± 12,7
BMI (kg/m ²)	21,6 ± 1,9	21,7 ± 1,8	21,5 ± 2,0
Körperfettgehalt (%)	16,3 ± 5,6	14,2 ± 5,1	20,6 ± 3,5
Trainingshäufigkeit/Woche	5,1 ± 2,3	4,5 ± 2,0	7,0 ± 2,0
RR systolisch rechts (mmHg)	118,9 ± 9,6	120,8 ± 10,2	115 ± 7,1
RR diastolisch rechts (mmHg)	77,8 ± 5,1	80,0 ± 3,2	73,3 ± 4,7
RR systolisch links (mmHg)	117,2 ± 13,0	120,8 ± 12,4	110,0 ± 10,8
RR diastolisch links (mmHg)	78,3 ± 6,1	80,8 ± 4,9	73,3 ± 4,7
<u>Kardiopulmonale Parameter</u>			
HF Ruhe (bpm)	54,8 ± 8,7	52,0 ± 6,8	60,3 ± 8,7
HF max. (bpm)	181,0 ± 13,7	182,8 ± 9,4	179,5 ± 7,5
Laktat Ruhe (mmol/l)	0,9 ± 0,2	0,9 ± 0,2	0,8 ± 0,2
Laktat max. (mmol/l)	7,2 ± 1,7	7,6 ± 1,6	6,9 ± 2,0
Laktat + 1 min. nach Belastung (mmol/l)	8,0 ± 1,8	8,5 ± 1,3	6,5 ± 1,8
Laktat +3 min. nach Belastung (mmol/l)	8,3 ± 2,0	9,0 ± 1,4	6,0 ± 2,1
Laktat +5 min. nach Belastung (mmol/l)	8,4 ± 2,2	9,0 ± 1,7	6,0 ± 2,2
RER bei Abbruch	1,5 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,4 ± 0,1
VO ₂ max. (ml*kg ⁻¹ *min ⁻¹)	48,9 ± 6,2	51,1 ± 6,2	44,6 ± 2,8
HV rel. (ml*kg ⁻¹)	11,4 ± 1,5	11,9 ± 1,7	10,4 ± 0,0
IVSd (cm)	0,9 ± 0,1	0,9 ± 0,1	0,8 ± 0,1

5.2. 5 km-Lauf

Die Unterschiede zwischen den Laufleistungen nach den Interventionen waren nicht signifikant ($p = 0,99$). Tabelle 4 vergleicht die Differenzen der Mittelwerte zwischen den Interventionen und der Baseline miteinander.

Tabelle 4: Vergleich der Mittelwerte der Laufzeiten (in Sekunden) der 5 km-Läufe

FOR = functional overreaching, MG = moderate group, CG = control group, Baseline = 1 Woche vor Studienbeginn, Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende, V3 = 1 Woche nach dem Interventionswochenende, V4 = 2 Wochen nach dem I Interventionswochenende, Δ = Differenz zwischen Post und Pre, MW= Mittelwert; SD= Standardabweichung; 95%-KI= 95%-Konfidenzintervall

MW ± SD											Differenz Post-Baseline [95% KI]		
	Baseline	FOR			MG			CG			ΔFOR vs. ΔCG	ΔFOR vs. ΔMG	ΔMG vs. ΔCG
		Post	V3	V4	Post	V3	V4	Post	V3	V4			
Laufzeit	1448,7 ± 177,2	1491,9 ± 183,9	1447,3 ± 174,5	1479,3 ± 147,0	1431,0 ± 117,3	1418,3 ± 153,8	1470,7 ± 133,8	1465,2 ± 144,0	1433,8 ± 163,8	1492,9 ± 159,6	26,7 [-88,6; 35,3]	60,9 [-19,5; 141,3]	34,2 [18,0; 86,5]

5.3. Echokardiographie

Für den Vergleich zwischen den Interventionen wurde die Differenz des jeweiligen Parameters vor und nach der entsprechenden Intervention berechnet. Diese wurden dann mittels t-test ausgewertet. Es zeigten sich hierbei keine signifikanten Unterschiede zwischen den Interventionen (siehe Tabelle 5). Abbildung 6 bis Abbildung 8 stellen den Verlauf der Parameter über den Studienverlauf dar. Als Baseline wurde der erste gemessene Wert der Studie festgelegt (freitags vor der ersten Intervention).

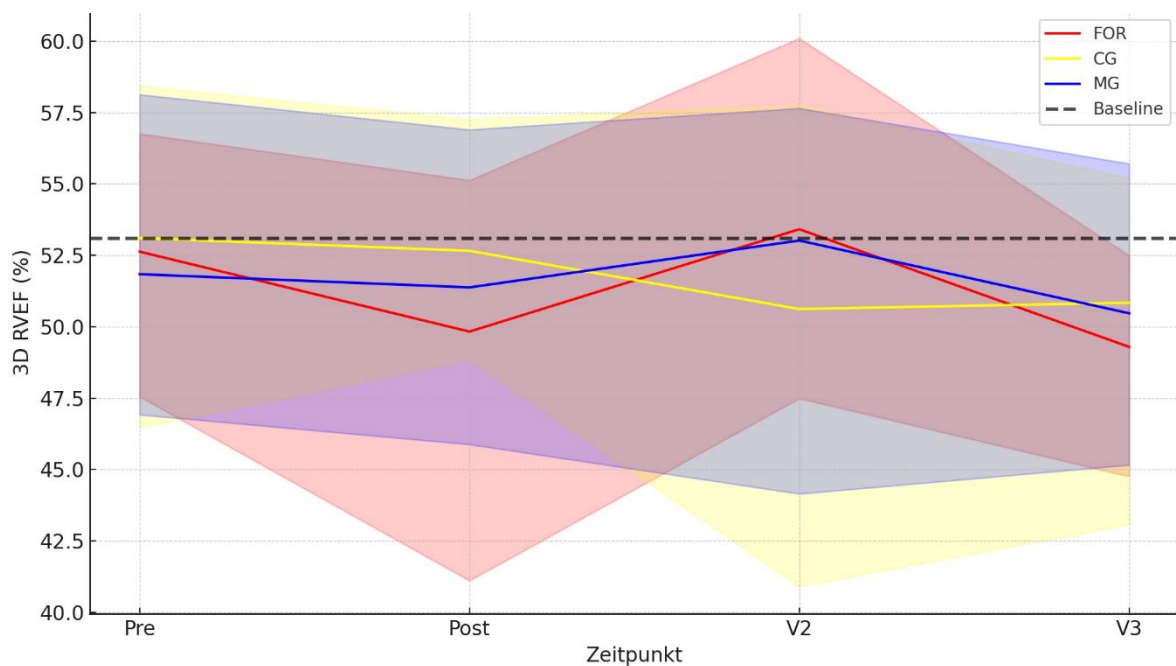


Abbildung 6: Verlauf der RVEF

Pre = Unmittelbar vor der Intervention; Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende; V3 = 1 Woche nach dem Interventionswochenende; V4 = 2 Wochen nach dem Interventionswochenende; FOR = Functional Overreaching; MG = Moderate Group; CG = Control Group; RVEF = right ventricular ejection fraction. Flächig im Hintergrund die Minimal-/Maximal-Werte.

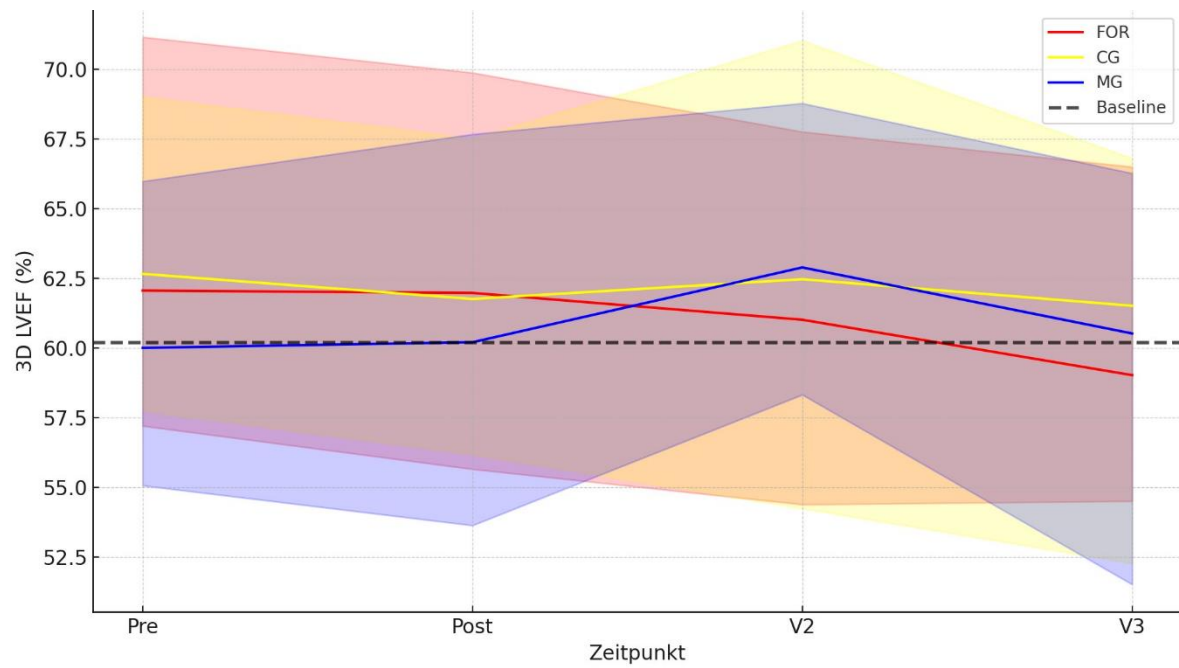


Abbildung 7: Verlauf der LVEF

Pre = Unmittelbar vor der Intervention; Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende; V3 = 1 Woche nach dem Interventionswochenende; V4 = 2 Wochen nach dem Interventionswochenende; FOR = Functional Overreaching; MG = Moderate Group; CG = Control Group; LVEF = left ventricular ejection fraction. Flächig im Hintergrund die Minimal-/Maximal-Werte.

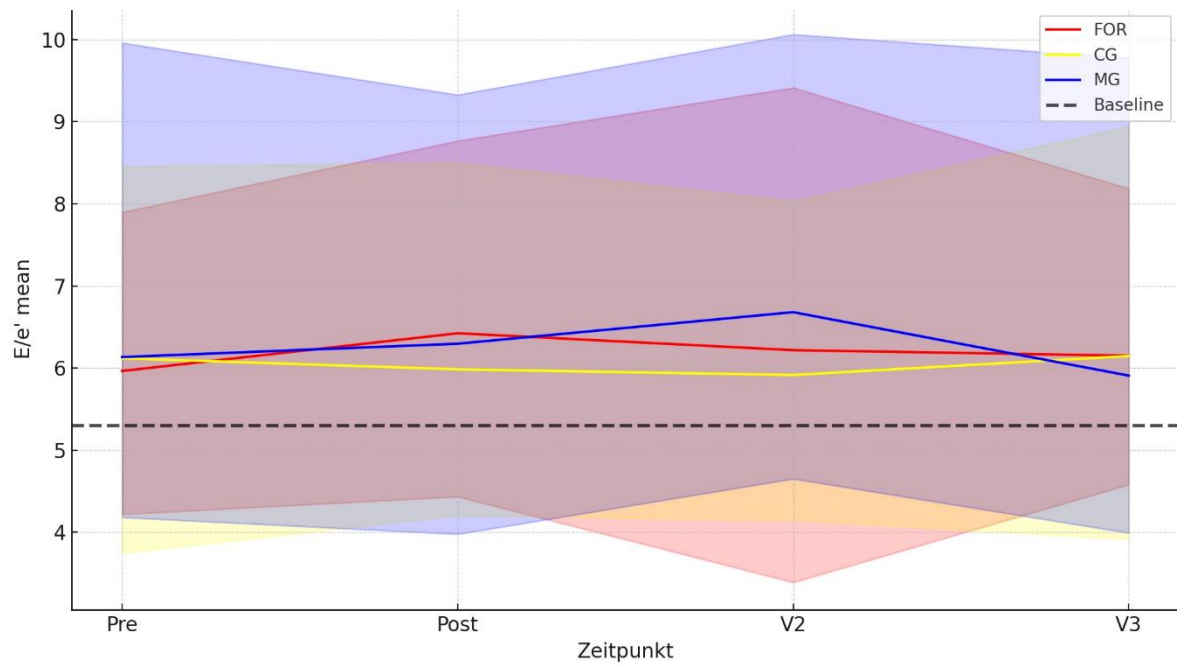


Abbildung 8: Verlauf von E/e' mean

Pre = Unmittelbar vor der Intervention; Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende; V3 = 1 Woche nach dem Interventionswochenende; V4 = 2 Wochen nach dem Interventionswochenende; FOR = Functional Overreaching; MG = Moderate Group; CG = Control Group; E/e' mean: Mittelwert des Quotienten der E-Welle und e'-Welle. Flächig im Hintergrund die Minimal-/Maximal-Werte.

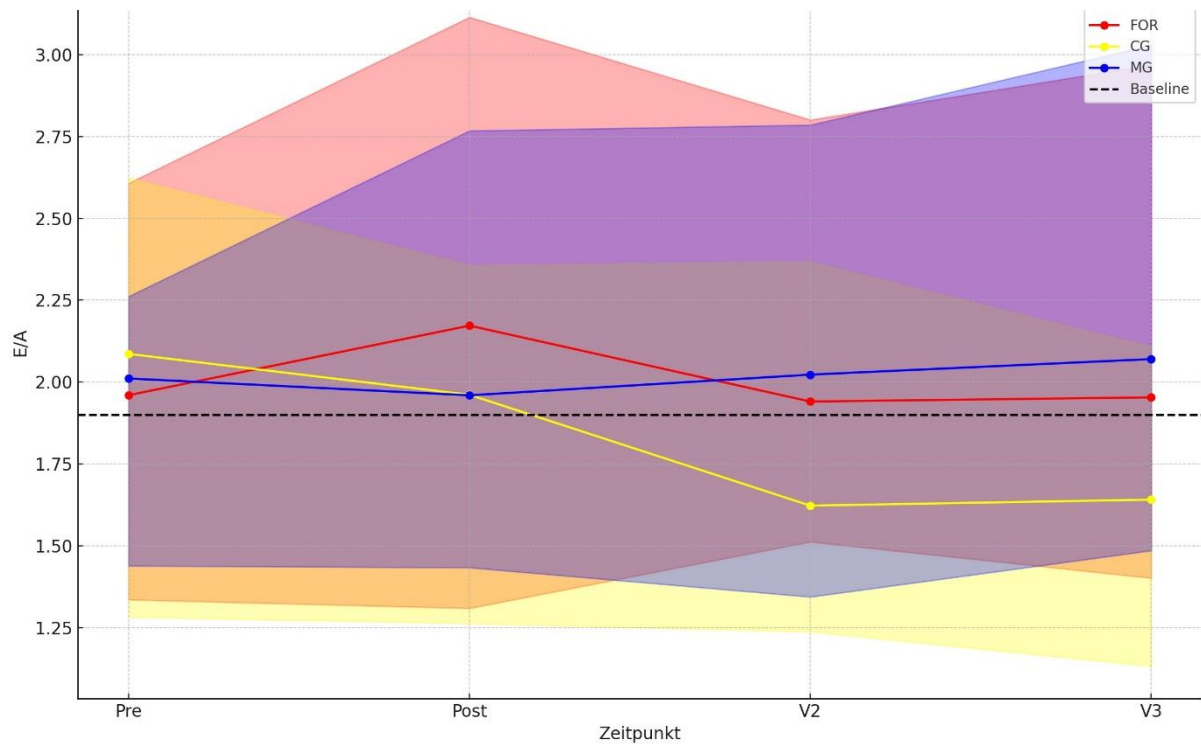


Abbildung 9: Verlauf von E/A

Pre = Unmittelbar vor der Intervention; Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende; V3 = 1 Woche nach dem Interventionswochenende; V4 = 2 Wochen nach dem Interventionswochenende; FOR = Functional Overreaching; MG = Moderate Group; CG = Control Group; E/A: Quotient der E-Welle und A-Welle. Flächig im Hintergrund die Minimal-/Maximal-Werte.

Tabelle 5: Vergleich der echokardiographische Parameter zwischen den Interventionen

FOR = functional overreaching, MG = moderate group, CG = control group, Pre = unmittelbar vor dem Start des Interventionswochenendes, Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende, V3 = 1 Woche nach dem Interventionswochenende, V4 = 2 Wochen nach dem Interventionswochenende, Δ = Differenz zwischen Post und Pre, RVEF = right ventricular ejection fraction, LVEF = left ventricular ejection fraction, E/e' mean = Mittelwert des Quotienten der E- zur e'-Welle, E/A = Quotient der E- zur A-Welle, MW= Mittelwert; SD= Standardabweichung; 95% KI= 95%-Konfidenzintervall

	MW $\pm$ SD												Differenz [95% KI]		
	FOR				MG				CG				Δ FOR vs. Δ CG	Δ FOR vs. Δ MG	Δ MG vs. Δ CG
	Pre	Post	V3	V4	Pre	Post	V3	V4	Pre	Post	V3	V4			
3D RVEF (%)	52,6 $\pm$ 3,4	49,8 $\pm$ 3,9	53,4 $\pm$ 4,4	49,3 $\pm$ 2,4	51,8 $\pm$ 4,2	51,4 $\pm$ 4,2	53,0 $\pm$ 5,2	50,5 $\pm$ 3,6	53,1 $\pm$ 3,7	52,7 $\pm$ 2,4	50,6 $\pm$ 5,9	50,8 $\pm$ 3,9	-2,4 [-7,1; 2,4]	-2,3 [-7,5; 2,9]	0,0 [-5,0; 5,0]
3D LVEF (%)	62,1 $\pm$ 4,3	62,0 $\pm$ 5,0	61,0 $\pm$ 4,5	59,0 $\pm$ 4,6	60,0 $\pm$ 3,7	60,2 $\pm$ 4,7	62,9 $\pm$ 4,9	60,5 $\pm$ 4,6	62,7 $\pm$ 5,1	61,8 $\pm$ 4,0	62,5 $\pm$ 5,6	61,5 $\pm$ 5,1	0,7 [-2,6; 4,1]	-0,5 [-3,9; 3,0]	1,2 [-2,2; 4,6]
E/e' mean	6,0 $\pm$ 1,3	6,4 $\pm$ 1,3	6,2 $\pm$ 1,8	6,2 $\pm$ 1,2	6,1 $\pm$ 2,0	6,3 $\pm$ 1,4	6,7 $\pm$ 1,8	5,9 $\pm$ 1,7	6,1 $\pm$ 1,2	6,0 $\pm$ 1,3	5,9 $\pm$ 1,4	6,1 $\pm$ 1,7	0,6 [-0,3; 1,5]	0,3 [-0,8; 1,4]	0,3 [-0,6; 1,2]
E/A	2,0 $\pm$ 0,4	2,2 $\pm$ 0,7	1,9 $\pm$ 0,4	2,0 $\pm$ 0,5	2,0 $\pm$ 0,3	2,0 $\pm$ 0,4	2,0 $\pm$ 0,5	2,1 $\pm$ 0,5	2,1 $\pm$ 0,4	2,0 $\pm$ 0,4	1,6 $\pm$ 0,4	1,6 $\pm$ 0,3	0,3 [-0,1; 0,7]	0,2 [-0,2; 0,6]	0,1 [-0,2; 0,4]

5.4. EBF

Der Fragebogen wurde zu folgenden Zeitpunkten erhoben: zur Baseline, direkt vor Interventionsstart (Pre), ein Tag nach dem Interventionswochenende (Post), 4 Tage nach dem Interventionswochenende (V2), eine Woche (V3) und 2 Wochen (V4) nach der Intervention. Für die statistische Analyse wurde die Differenz der Pre und Post Werte für jede Intervention gebildet (Δ FOR, Δ MG und Δ CG). Diese wurden dann untereinander mittels Wilcoxon-Rang-Test für verbundene Stichproben verglichen. Zu beachten ist, dass dieser nicht-parametrische Test nur für komplette Paare von Messungen durchgeführt werden kann. Daher wurden Probanden mit fehlenden Werten aus der Analyse ausgeschlossen. Damit wird einer Verfälschung der Ergebnisse entgegengewirkt, jedoch beeinflusst die geringe Stichprobengröße die Testkraft. Nach Bereinigung der Daten ergibt sich ein signifikanter Unterschied im Parameter „Verletzungsanfälligkeit“ zwischen Δ FOR und Δ MG ($p = 0,02$) und Δ FOR und Δ CG ($p = 0,008$) mit jeweils stärkerem Anstieg für FOR. Ebenso war der Unterschied des Parameters „Allgemeine Beanspruchung“ zwischen Δ FOR und Δ CG signifikant ($p = 0,04$). Zuletzt zeigten sich signifikante Unterschiede bei „Somatische Erholung“ für Δ FOR und Δ CG ($p = 0,008$), Δ FOR und Δ MG ($p = 0,04$) und Δ CG und Δ MG ($p = 0,04$). Die übrigen Parameter zeigen keine signifikanten Unterschiede.

Abbildungen 10-12 veranschaulichen den Verlauf dieser Parameter über den Studienverlauf. Tabelle 6 gibt einen Überblick über alle Parameter des EBF.

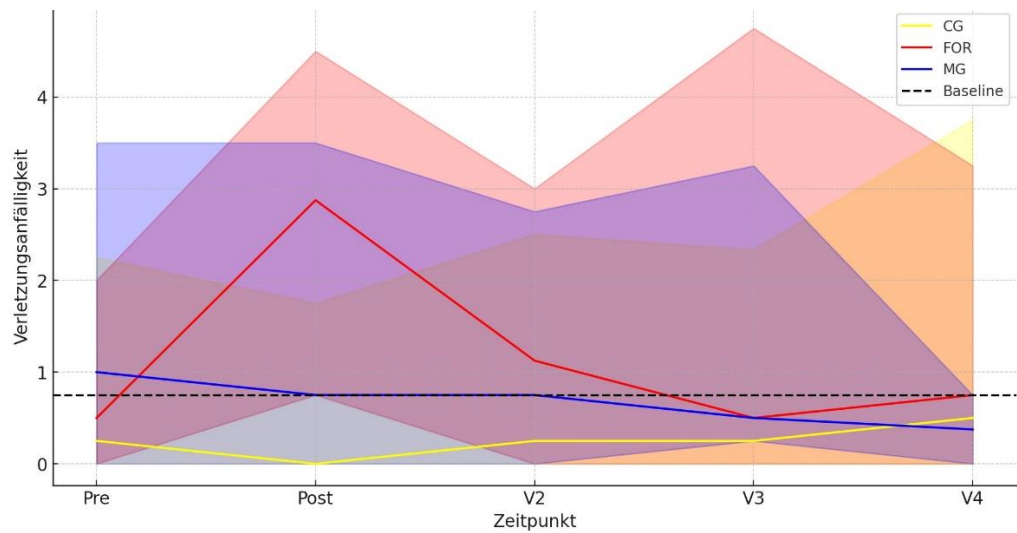


Abbildung 10: Verlauf des Items „Verletzungsanfälligkeit“

Baseline = 1 Woche vor Studienbeginn; Pre = direkt vor dem jeweiligen Interventionsstart; Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende; V2/ V3/ V4 = 4/ 7/14 Tage nach dem Interventionswochenende. Flächig im Hintergrund der Interquartilsbereich.

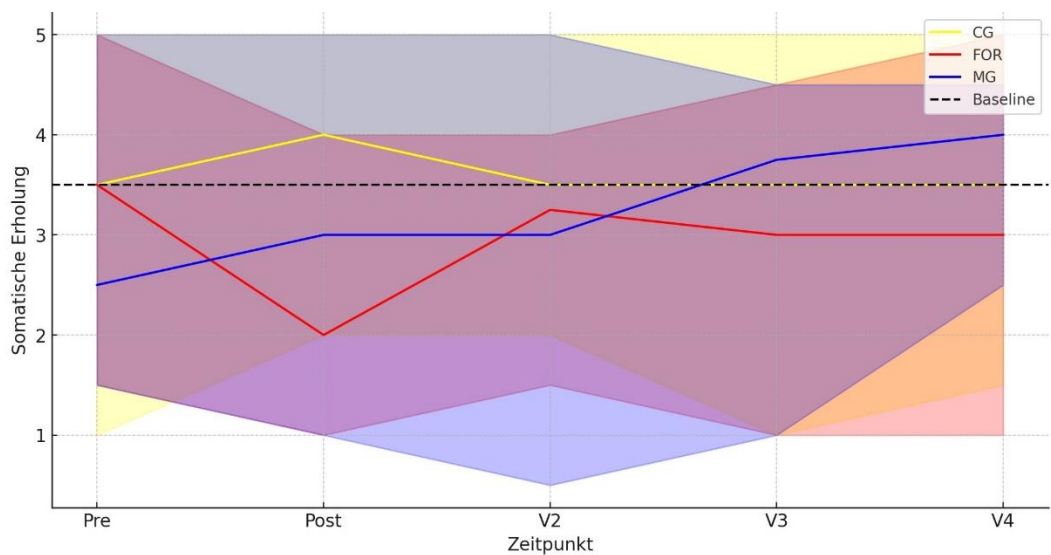


Abbildung 11: Verlauf des Items „Somatische Erholung“

Baseline = 1 Woche vor Studienbeginn; Pre = direkt vor dem jeweiligen Interventionsstart; Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende; V2/ V3/ V4 = 4/ 7/14 Tage nach dem Interventionswochenende. Flächig im Hintergrund der Interquartilsbereich.

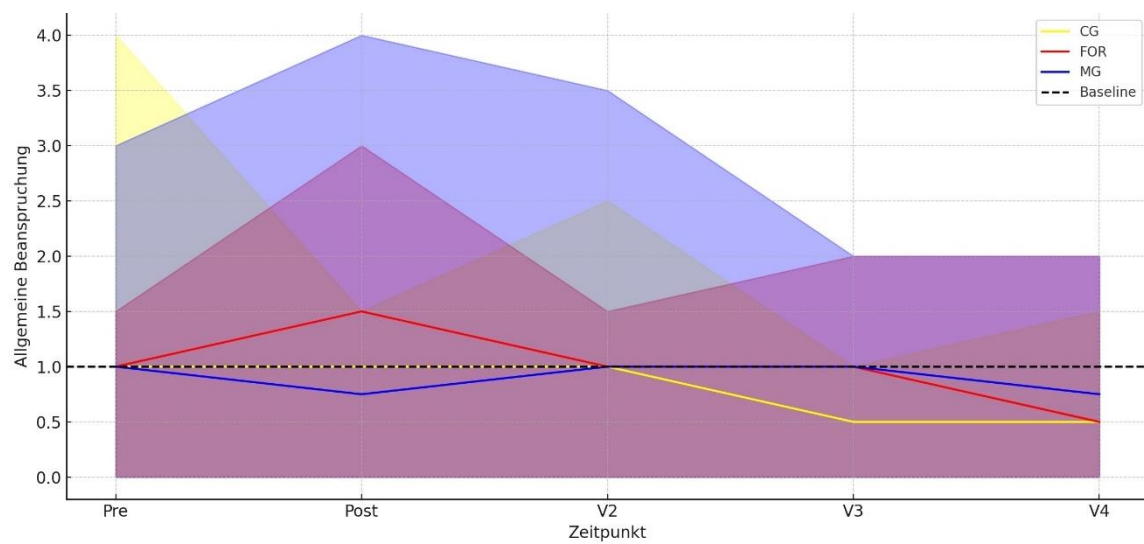


Abbildung 12: Verlauf des Items „Allgemeine Beanspruchung“

Baseline = 1 Woche vor Studienbeginn; Pre = direkt vor dem jeweiligen Interventionsstart; Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende; V2/ V3/ V4 = 4/ 7/14 Tage nach dem Interventionswochenende. Flächig im Hintergrund der Interquartilsbereich

Tabelle 6: Vergleich der Items des EBF zwischen den Interventionen

FOR = functional overreaching, MG = moderate group, CG = control group, Baseline = 1 Woche vor Interventionsstart; Pre = unmittelbar vor dem Start des Interventionswochenendes, Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende; Δ = Differenz zwischen Post und Pre, 95% KI= 95%-Konfidenzintervall; (Q1; Q3) = Interquartilsabstand (25. und 75. Perzentile)

	Median (Q1; Q3)						Differenz (p-Wert)		
	FOR		MG		CG		Δ FOR vs. Δ MG	Δ FOR vs. Δ CG	Δ MG vs. Δ CG
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post			
Allgemeine Beanspruchung	1,0 (1,0; 1,0)	1,5 (1,0; 1,6)	1,0 (1,0; 2,0)	0,8 (0,5; 1,5)	1,0 (0,5; 1,5)	1,0 (0,0; 1,0)	1,0 (p = 0,18)	0,8 (p = 0,04)	0,0 (p = 0,23)
Emotionale Beanspruchung	1,5 (1,0; 2,0)	1,8 (1,4; 2,1)	2,5 (1,5; 3,0)	1,5 (1,0; 2,6)	1,5 (1,0; 2,5)	1,0 (1,0; 1,5)	0,0 (p = 0,50)	0,5 (p = 0,16)	0,5 (p = 0,05)
Soziale Beanspruchung	1,5 (1,0; 1,5)	1,5 (1,2; 2,1)	1,5 (1,0; 2,5)	1,2 (1,0; 2,2)	1,5 (1,0; 2,5)	1,0 (1,0; 1,5)	0,0 (p = 1)	0,3 (p = 0,10)	0,3 (p = 0,67)
Konflikte/Leistungsdruck	2,0 (1,0; 2,0)	1,5 (1,5; 2,1)	1,5 (1,0; 2,5)	1,8 (0,5; 2,6)	2,5 (1,5; 3,0)	1,5 (0,5; 2,0)	1,0 (p = 0,68)	1,3 (p = 0,13)	0,3 (p = 0,17)
Übermüdung	2,0 (1,0; 2,5)	2,5 (2,0; 2,6)	2,0 (1,5; 3,0)	2,2 (0,9; 2,8)	2,5 (1,5; 4,0)	2,0 (2,0; 2,0)	1,0 (p = 0,28)	0,8 (p = 0,21)	0,0 (p = 0,55)
Energielosigkeit	1,5 (0,5; 2,0)	2,2 (1,6 2,5)	1,5 (1,0; 2,0)	2,0 (1,4; 2,5)	2,0 (1,5; 2,5)	1,5 (1,5; 2,0)	0,5 (p = 0,26)	0,8 (p = 0,08)	0,5 (p = 0,11)
Somatische Beanspruchung	0,5 (0,0; 1,0)	1,2 (0,9; 1,5)	1,0 (0,5; 1,0)	0,5 (0,5; 0,8)	0,5 (0,5; 1,0)	0,5 (0,0; 0,5)	0,5 (p = 0,41)	0,5 (p = 0,17)	0,3 (p = 0,80)
Erfolg	2,0 (2,0; 2,5)	2,5 (1,8; 3,0)	2,5 (2,0; 2,5)	2,2 (2,0; 2,8)	2,0 (1,5; 3,0)	2,0 (1,5; 3,0)	-0,5 (p = 0,71)	0,3 (p = 0,17)	0,3 (p = 0,95)
Soziale Erholung	3,0 (2,0; 3,5)	3,0 (2,9; 4,0)	3,0 (2,5; 3,0)	3,5 (3,2; 4,1)	3,0 (2,5; 4,0)	3,0 (2,5; 4,0)	-0,5 (p = 0,92)	-0,3 (p = 0,86)	0,5 (p = 0,60)
Somatische Erholung	3,5 (3,0; 4,0)	2,0 (1,0; 3,0)	2,5 (2,5; 4,0)	3,0 (2,1; 3,5)	3,5 (2,5; 4,0)	4,0 (3,5; 5,0)	-0,5 (p = 0,04)	-1,3 (p = 0,008)	-1,0 (p = 0,04)
Allgemeine Erholung	3,0 (3,0; 4,0)	3,0 (3,0; 4,1)	3,0 (3,0; 4,0)	3,8 (3,0; 4,5)	3,5 (2,5; 4,0)	3,5 (3,0; 4,0)	0,0 (p = 1)	0,0 (p = 0,40)	0,0 (p = 0,70)
Schlaf	4,5 (3,5; 5,0)	2,8 (1,5; 4,1)	3,5 (3,0; 4,5)	3,8 (2,2; 5,0)	4,0 (2,5; 4,5)	3,0 (3,0; 4,5)	0,0 (p = 0,22)	-0,8 (p = 0,12)	-0,8 (p = 0,46)
Gestörte Pause	1,5 (0,2; 1,8)	1,9 (1,2; 2,3)	1,0 (0,5; 1,2)	1,1 (0,0; 2,2)	1,2 (0,5; 1,8)	1,2 (0,2; 1,5)	0,0 (p = 0,25)	0,3 (p = 0,35)	0,3 (p = 0,92)
Emotionale Erschöpfung	0,0 (0,0; 1,0)	0,6 (0,2; 1,3)	0,2 (0,2; 1,0)	0,1 (0,0; 0,7)	0,2 (0,0; 0,5)	0,0 (0,0; 0,1)	0,3 (p = 0,52)	0,3 (p = 0,21)	0,1 (p = 0,24)
Verletzungsanfälligkeit	0,5 (0,2; 1,0)	2,9 (2,4; 3,9)	1,0 (0,5; 1,8)	0,8 (0,2; 1,6)	0,0 (0,0; 0,2)	0,0 (0,0; 0,2)	2,8 (p = 0,02)	2,6 (p = 0,008)	0,3 (p = 0,13)
In Form Sein	3,5 (2,2; 4,0)	2,2 (0,9; 2,8)	2,8 (2,2; 3,8)	3,2 (2,4; 3,9)	3,5 (3,2; 4,0)	4,2 (3,5; 4,8)	-0,8 (p = 0,14)	-1,0 (p = 0,08)	-0,4 (p = 0,06)
Persönliche Verwirklichung	3,2 (3,0; 3,5)	2,6 (0,9; 3,2)	3,2 (3,0; 3,2)	3,1 (2,3; 3,2)	3,2 (1,5; 4,0)	2,9 (2,1; 3,3)	0,5 (p = 0,92)	0,3 (p = 0,69)	-0,3 (p = 0,55)
Selbstwirksamkeitsüberzeugung	3,0 (2,8; 3,5)	2,9 (1,6; 4,3)	2,8 (2,2; 3,5)	2,5 (1,8; 3,4)	3,0 (1,8; 3,5)	2,8 (2,2; 3,0)	-0,5 (p = 0,16)	0,0 (p = 0,50)	0,4 (p = 0,55)
Selbstregulation	3,5 (3,0; 4,2)	3,6 (3,4; 4,9)	3,5 (3,2; 4,2)	3,2 (2,9; 4,1)	3,5 (3,0; 4,8)	3,5 (2,5; 4,8)	0,3 (p = 0,30)	0,7 (p = 0,24)	-0,3 (p = 0,14)

5.5. HRV

Die Messung der HRV-Parameter (RMSSD und Mittlere Herzfrequenz) erfolgte im Sitzen und Liegen. Gemäß Shapiro-Wilk-Test waren die Daten normalverteilt, sodass ein Vergleich der Differenzen mittels t-Test erfolgte.

Es ließen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Interventionen bei der mittleren Herzfrequenz im Sitzen/Liegen oder der RMSSD im Sitzen/Liegen finden. Dies stellt Tabelle 7 dar. Abbildungen 13 bis 15 verdeutlichen den zeitlichen Verlauf für jede Intervention. Im Anhang findet sich eine tabellarische Zusammenfassung.

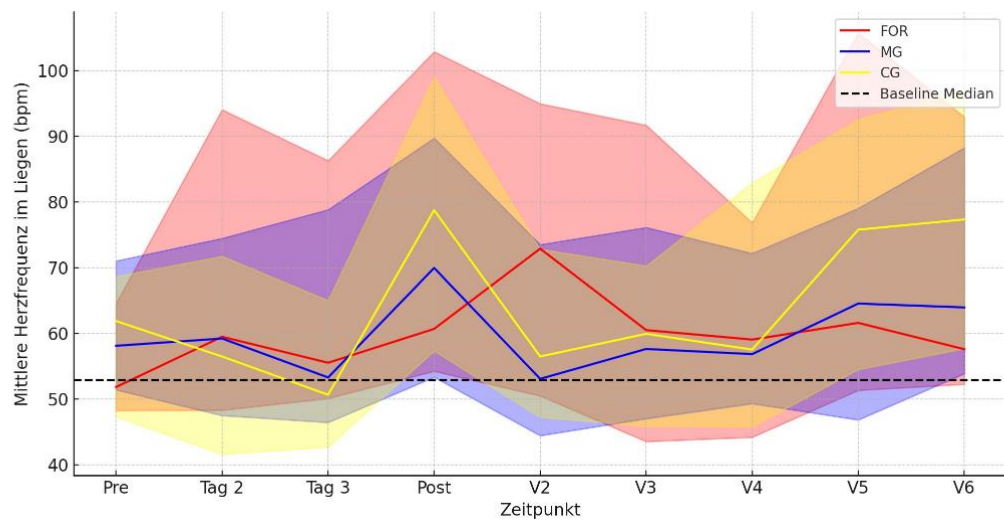


Abbildung 13: Verlauf der mittleren Herzfrequenz im Liegen in beats per minute (bpm)

Baseline = 1 Woche vor Studienbeginn; Pre = direkt vor dem jeweiligen Interventionsstart; Tag 2/ 3 = Samstag/Sonntag des jeweiligen Interventionswochenendes; Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende; V2/ V3/ V4 = 2/ 3/ 4/ 7/ 14 Tage nach dem jeweiligen Interventionswochenende. Flächig im Hintergrund die Minimal/Maximal-Werte.

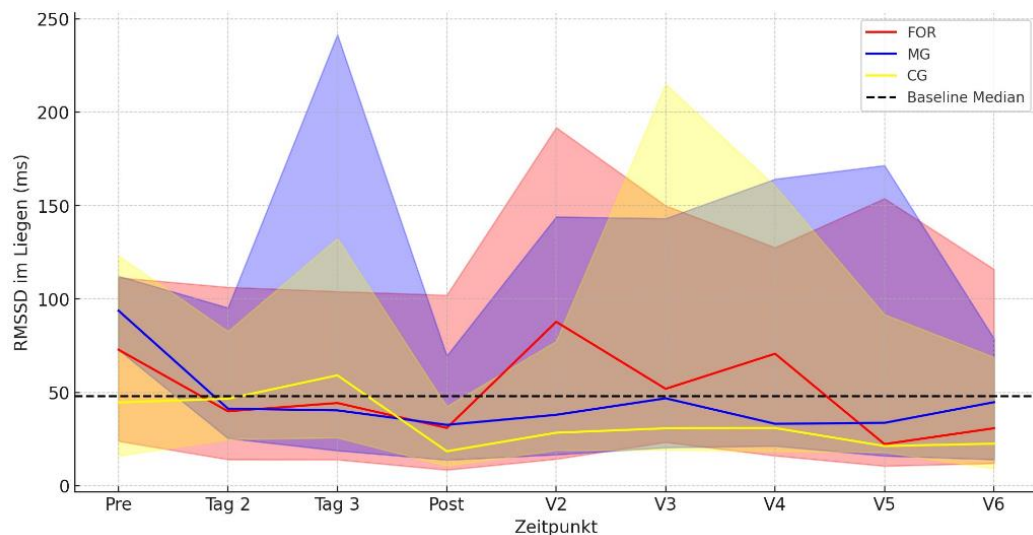


Abbildung 14: Verlauf der RMSSD im Liegen (ms)

Baseline = 1 Woche vor Studienbeginn; Pre = direkt vor dem jeweiligen Interventionsstart; Tag 2/ 3 = Samstag/Sonntag des jeweiligen Interventionswochenendes; Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende; V2/ V3/ V4 = 2/ 3/ 4/ 7/ 14 Tage nach dem jeweiligen Interventionswochenende. Flächig im Hintergrund die Minimal/ Maximal-Werte. RMSSD = Root Mean Square of Successive Differences

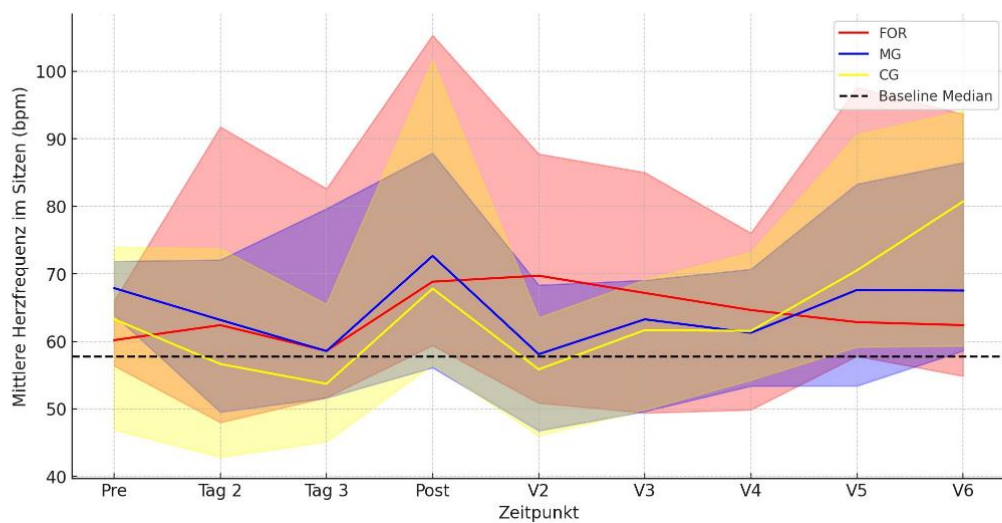


Abbildung 15: Verlauf der mittleren Herzfrequenz im Sitzen in beats per minute (bpm)

Baseline = 1 Woche vor Studienbeginn; Pre = direkt vor dem jeweiligen Interventionsstart; Tag 2/ 3 = Samstag/Sonntag des jeweiligen Interventionswochenendes; Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende; V2/ V3/ V4 = 2/ 3/ 4/ 7/ 14 Tage nach dem jeweiligen Interventionswochenende. Flächig im Hintergrund die Minimal/ Maximal-Werte.

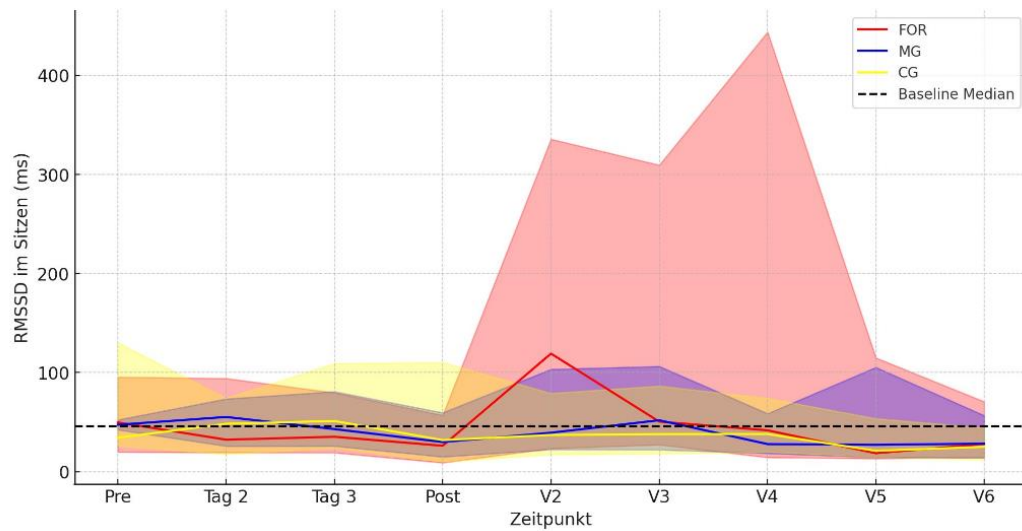


Abbildung 16: Verlauf der RMSSD im Sitzen (ms)

Baseline = 1 Woche vor Studienbeginn; Pre = direkt vor dem jeweiligen Interventionsstart; Tag 2/ 3 = Samstag/Sonntag des jeweiligen Interventionswochenendes; Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende; V2/ V3/ V4 = 2/ 3/ 4/ 7/ 14 Tage nach dem jeweiligen Interventionswochenende. Flächig im Hintergrund die Minimal/ Maximal-Werte. RMSSD = Root Mean Square of Successive Differences

Tabelle 7: Vergleich ausgesuchter Parameter der HRV zwischen den Interventionen

FOR = functional overreaching, MG = moderate group, CG = control group, Pre = unmittelbar vor dem Start des Interventionswochenendes, Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende, Δ = Differenz zwischen Post und Pre, 95% KI= 95%-Konfidenzintervall; MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung, bpm = Beats per minute; RMSSD = Root Mean Square of Successive Differences

	MW $\pm$ SD						Differenz [95% KI]		
	FOR		MG		CG		Δ FOR	Δ FOR	Δ MG
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	vs. Δ CG	vs. Δ MG	vs. Δ CG
Mittlere Herzfrequenz im Liegen (bpm)	54,5 $\pm$ 6,5	70,3 $\pm$ 17,1	60,0 $\pm$ 7,8	70,9 $\pm$ 14,4	59,8 $\pm$ 8,6	77,9 $\pm$ 15,7	-7,5 [-19,8; 4,7]	-4,8 [-16,2; 6,5]	-2,7 [-16,1; 10,8]
Mittlere Herzfrequenz im Sitzen (bpm)	60,7 $\pm$ 4,5	73,4 $\pm$ 15,9	67,9 $\pm$ 5,6	73,0 $\pm$ 11,9	60,6 $\pm$ 11,7	76,8 $\pm$ 18,8	-6,3 [-21,3; 8,7]	-1,3 [-14,4; 11,7]	-5,0 [-24,4; 14,5]
RMSSD im Liegen (ms)	67,9 $\pm$ 40,2	40,1 $\pm$ 31,6	94,7 $\pm$ 14,5	36,6 $\pm$ 19,4	55,1 $\pm$ 38,5	24,7 $\pm$ 11,2	-4,2 [-42,2; 33,8]	21,5 [-10,4; 53,3]	-25,7 [-58,6; 7,3]
RMSSD im Sitzen (ms)	53,7 $\pm$ 33,8	31,5 $\pm$ 18,4	47,3 $\pm$ 7,2	31,0 $\pm$ 14,8	52,1 $\pm$ 40,3	39,5 $\pm$ 33,6	-17,5 [-49,9; 14,9]	-16,7 [62,0; 28,6]	-0,8 [-25,7; 24,2]

5.6. Vertikale Sprungkraft

Zur Auswertung der vertikalen Sprungkraft wurden die Messwerte „Baseline“ mit „Post“ für jede Intervention verglichen und dann mittels Wilcoxon-Tests untereinander verglichen. Dies stellt Tabelle 8 dar. Eine Zusammenfassung der deskriptiven Statistik findet sich im Anhang. Nach Bereinigung der Daten zeigten sich signifikante Unterschiede im CMJ für die maximale Sprunghöhe zwischen ΔFOR und ΔMG ($p = 0,02$) sowie ΔFOR vs. ΔCG ($p = 0,02$) mit jeweils stärkerer Abnahme nach FOR. Dies stellt Abbildung 17 dar.

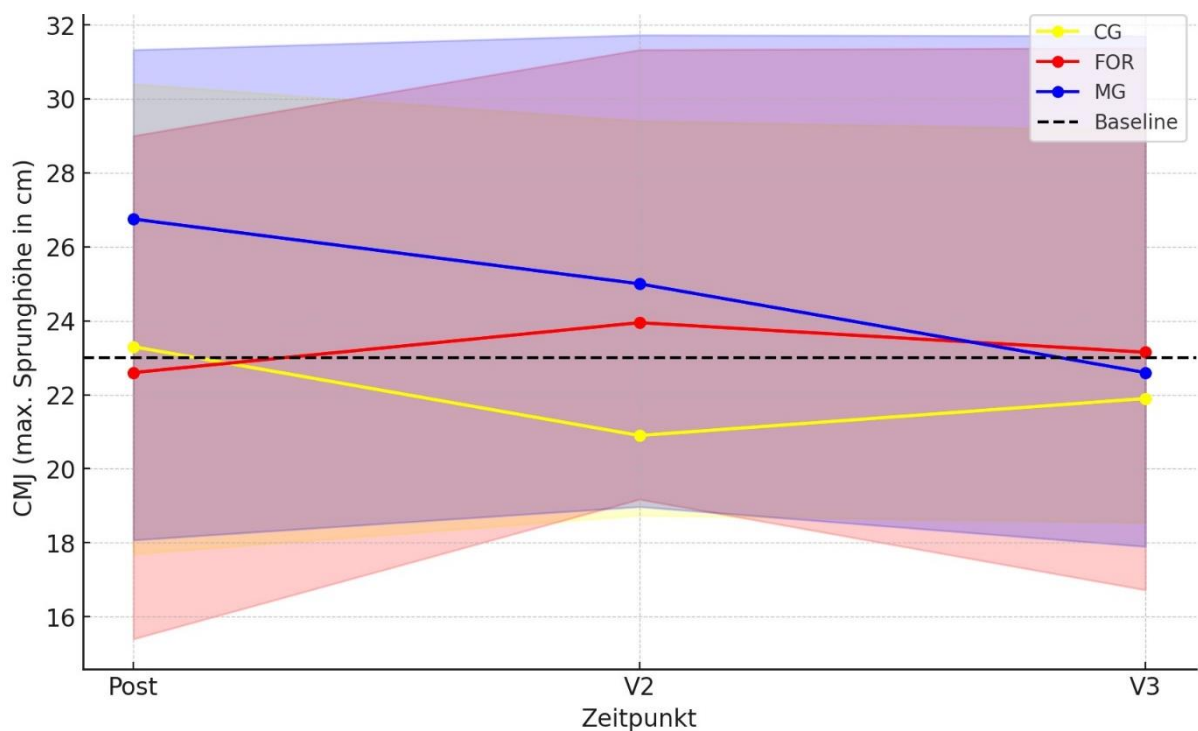


Abbildung 17: Verlauf der max. Sprunghöhe (cm) des CMJ

Baseline = 1 Woche vor Studienbeginn; Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende; V2/ V3 = 1 Woche/ 2 Wochen nach dem jeweiligen Interventionswochenende. Flächig im Hintergrund der Interquartilsbereich. CMJ = Counter Movement Jump

Tabelle 8: Vergleich der vertikalen Sprungkraft zwischen den Interventionen

FOR = functional overreaching, MG = moderate group, CG = control group, Baseline = 1 Woche vor Studienbeginn, Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende, Δ = Differenz zwischen Post und Pre, 95% KI= 95%-Konfidenzintervall; (Q1; Q3) = Interquartilsabstand (25. und 75. Perzentile), CMJ = Counter Movement Jump; DJ = Drop Jump; ms = Milisekunde; Ns = Newton-Sekunde; N/s = Newton pro Sekunde

	Median (Q1; Q3)				Differenz (p-Wert)		
	Baseline	Post FOR	Post MG	Post CG	Δ FOR vs. Δ CG	Δ FOR vs. Δ MG	Δ MG vs. Δ CG
CMJ max. Sprunghöhe (cm)	23,0 (20,0; 33,0)	22,6 (15,4; 29,0)	26,8 (18,1; 31,3)	23,3 (17,7; 30,4)	-1,7 (p = 0,02)	-1,8 (p = 0,02)	-0,1 (p = 0,95)
CMJ max. Kraft (N)	1539,0 (1254,0; 1565,0)	1438,0 (1381,0; 1471,0)	1410,0 (1250,0; 1483,0)	1483,0 (1437,0; 1565,0)	-45,0 (p = 0,13)	28,0 (p = 0,91)	-73,0 (p = 0,25)
CMJ Kraftanstieg (N/s)	6136,0 (4273,0; 6823,0)	5332,0 (5036,0; 6489,0)	5841,0 (5061,0; 6447,0)	7194,0 (6422,0; 7601,0)	-1020,0 (p = 0,16)	-439,0 (p = 0,91)	-636,0 (p = 0,50)
DJ Flugzeit (ms)	376,0 (332,0; 446,0)	387,0 (297,0; 411,0)	398,0 (346,0; 418,0)	397,0 (330; 425,0)	-22,0 (p = 0,50)	3,0 (p = 0,57)	8,0 (p = 0,73)
DJ Bodenzeit (ms)	185,0 (182,0; 192,0)	186,0 (180,0; 209,0)	187,0 (177,0; 215,0)	177,0 (173,0; 193,0)	12,0 (p = 0,20)	13,0 (p = 0,43)	1,0 (p = 0,82)
DJ Reaktivindex	2,0 (1,8; 1,4)	2,1 (1,5; 2,3)	2,0 (1,8; 2,5)	2,3 (1,7; 2,4)	-0,2 (p = 0,30)	0,0 (p = 0,57)	0,0 (p = 0,73)

6. Diskussion

6.1. Diskussion der Ergebnisse

In der OperaTUM-Studie wurden verschiedene Parameter mit dem Ziel untersucht, OR frühzeitig zu erkennen, um dessen negativen Konsequenzen abzuwenden. Während die Herzfrequenzvariabilität (HRV) als prädiktiver Marker nicht überzeugen konnten, zeigte die Echokardiographie der RVEF einen interessanten, wenn auch nicht statistisch signifikanten Trend: Eine Verschlechterung durch FOR wurde beobachtet, gefolgt von einer Erholungsphase. Ebenfalls erwähnenswert waren die Veränderungen des EBF, insbesondere bei den Parametern Allgemeine Beanspruchung, Verletzungsanfälligkeit und Somatische Erholung. Die Unterschiede in der vertikalen Sprungkraft waren signifikant, jedoch waren die absoluten Differenzen zwischen den Interventionen nur gering, sodass die klinische Relevanz unklar ist.

In Anbetracht der bestehenden Forschungsliteratur erscheint es unwahrscheinlich, dass ein einzelner Marker ausreicht, um OR zuverlässig vorherzusagen (Meeusen et al., 2013). Diese Pilotstudie bietet jedoch wertvolle Einblicke in potenzielle Indikatoren, die in zukünftigen Untersuchungen näher betrachtet werden sollten. Da individuelle Unterschiede (unterschiedliches Stressempfinden, alltägliche Belastungen etc.) ebenfalls berücksichtigt werden müssen (A. Urhausen, Gabriel, & Kindermann, 1995), wurde für die Studie ein Cross-Over-Design gewählt; hier spielen interindividuelle Unterschiede eine geringere Rolle (Schulgen/Kristiansen & Schumacher, 2002).

Die einzelnen Ergebnisse und Implikationen der OperaTUM-Studie werden in den folgenden Absätzen diskutiert.

6.1.1. Laufleistung im 5 km-Lauf

Nach Meeusen et al. ist OR gekennzeichnet durch eine kurzfristige Verschlechterung der sportartspezifischen Leistung (Meeusen et al., 2013). Daher sollte anhand der Laufleistung im 5km-Lauf kontrolliert werden, ob die Beanspruchung reichte, ein OR zu induzieren. Zu erwarten war eine stärkere Reduktion der Laufleistung nach dreitägigem FOR im Vergleich zu den anderen Interventionen und der Baseline. Es zeigten sich keine signifikanten Veränderungen; jedoch deutete der Trend eine Verschlechterung der Laufzeit nach dreitägigem FOR an.

Auch Coutts et al. untersuchten mithilfe eines wöchentlichen 3km-Laufs die Auswirkungen von Overload-Training auf Triathleten. Hier zeigte sich eine signifikante Verschlechterung durch die Belastung (Coutts et al., 2007). Die Anzahl der Teilnehmer war größer (17 vs. 9). Zusätzlich ist der unterschiedliche Studienablauf zu beachten: Die Probanden wurden in 2 Gruppen

(Overload Training vs. Normales Training) randomisiert. Die Overload-Phase erstreckte sich über vier Wochen mit anschließender zweiwöchiger Tapering-Phase. Die OperaTUM-Studie fand im Cross-Over-Design statt, zudem war die Overload-Phase kürzer (drei Tage). Möglicherweise reichte diese kurze Zeit nicht aus, einen vergleichbaren OR-Zustand zu induzieren. Ein größeres Probandenkollektiv hätte deutlichere Ergebnisse erbracht.

6.1.2. Echokardiographie

Die RVEF war nach der FOR Intervention am stärksten, jedoch nicht signifikant, erniedrigt. Die diastolische und systolische Funktion des linken Ventrikels zeigte keine Veränderung.

Bisherige Studien untersuchten v.a. die Auswirkungen einmaliger Belastung auf die kardiale Funktion: Die Tricuspid annular plane systolic excursion (TAPSE) reduzierte sich in Folge eines Ultramarathons (Christou et al., 2020). Außerdem scheinen sich linksventrikuläre Parameter durch hohe körperliche Anstrengung zu verändern. Die systolische und diastolische Funktion verschlechtert sich in Folge eines Marathons (Jouffroy et al., 2015). Auch die „BeMagic“-Studie zeigte eine Verschlechterung der diastolischen Funktion nach einem Marathon. Zum Teil traten die Veränderungen direkt in Anschluss, zum Teil erst zeitversetzt auf (Roeh et al., 2019). Ergebnis einer anderen Studie war ein erhöhtes enddiastolisches Volumen nach einem Marathon (Sengupta et al., 2018). In der OperaTUM-Studie konnten diese linksventrikulären Auswirkungen nicht reproduziert werden. Ein Vergleich zu diesen Studien ist allerdings nur eingeschränkt möglich, da dort zum einen die Belastung nicht wiederholt stattfand (Marathon vs. dreitägige Intervention), zum anderen die Nachbeobachtungszeit kürzer ausfiel.

Unsere Ergebnisse weisen auf eine Belastung des rechten Herzens durch hohe körperliche Anstrengung hin, welche nach einigen Tagen reversibel ist. Der linke Ventrikel scheint nicht belastet zu sein. Unterstützt wird diese Vermutung durch Studien, die sich vermehrt mit den rechtsventrikulären Folgen von (Über-) Belastung befassen. So wurde gezeigt, dass die rechtsventrikuläre Funktion nach hoher körperlicher Anstrengung reduziert ist und sich innerhalb einer Woche erholt (Elliott & La Gerche, 2015; A. La Gerche, Connelly, Mooney, MacIsaac, & Prior, 2008). Die linksventrikuläre Funktion scheint sich einer Metaanalyse zufolge durch körperliche Belastung nicht zu ändern (Elliott & La Gerche, 2015).

Eine Ursache für die rechtsventrikuläre Funktionsverschlechterung könnte Christou et al. zufolge Volumenmangel während der Belastung sein (Christou et al., 2020). Die Interventionen fanden in unserer Studie jedoch über mehrere Tage verteilt statt, vermutlich spielt also ein anderer, noch unbekannter Mechanismus eine Rolle. Da der rechte Ventrikel „die Achillessehne des trainierenden Herzens“ (Gerche et al., 2014) zu sein scheint, sollte dieser in zukünftigen Studien näher untersucht werden.

Vermutlich ist die rechtsventrikuläre Dysfunktion nach körperlicher Anstrengung nur vorübergehend und völlig reversibel (Elliott & La Gerche, 2015).

Insgesamt sollte die Rechtsherzfunktion als Marker für OR in Studien mit größerer Stichprobenzahl untersucht werden.

6.1.3. Fragebogen

Einige Subtests, die auf sportbezogene Überlastung hindeuten, zeigten sich v.a. nach dreitägigem FOR verändert. Besonders folgende Subtests zeigten Unterschiede:

- Allgemeine Beanspruchung
- Verletzungsanfälligkeit
- Somatische Erholung

Birrer zufolge sind u.a. diese Subtests bei Sportlern mit OTS verändert (Birrer, 2004). Allerdings zeigten sich nicht alle Werte, die im OTS verändert sind, auch in unserer Studie modifiziert (bspw. „Selbstregulation“). Dies ist nachvollziehbar, da Birrer Athleten mit OTS und nicht OR untersuchte. Dennoch bestärken diese Ergebnisse die Vermutung, dass sich körperliche Überlastung im EBF widerspiegelt.

Brink et al. induzierten OR bei Fußballern und ließen den EBF ausfüllen. Hierbei zeigten sich u.a. Veränderungen der Subtests „Somatische Erholung“ und „In-Form-Sein“ (Brink, Visscher, Coutts, & Lemmink, 2012). Diese Ergebnisse stimmen auch mit unseren Beobachtungen überein; der Subtest „Verletzungsanfälligkeit“ war jedoch bei Brink et al. nicht wesentlich verändert. Diese Diskrepanz könnte durch anderes Probandenkollektiv (junge Elite-Fußballer) und den längeren Beobachtungszeitraum (eine ganze Saison) zu erklären sein. Die Autoren halten den EBF für eine Möglichkeit, OR in frühen Stadien zu erkennen und verhindern, was sich auch durch unsere Studie vermuten lässt.

Wie erwartet, zeigten sich die stärksten Veränderungen dieser Subtests nach dreitägigem FOR im Vergleich zur dreitägigen Ruhe-Intervention (CG); weniger ausgeprägt waren diese Unterschiede verglichen mit moderatem Training (MG). Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei Nicolas et al. Die Autoren untersuchten Unterschiede in Subtests der Kurzversion des EBF zwischen moderatem Training, Overload-Training und einer Tapering-Phase. Ihr Fazit ist, dass der EBF (bzw. seine Kurzversion) stark mit dem Trainingsumfang korreliert (Nicolas, Vacher, Martinent, & Mourot, 2019).

Andere Subtests, wie „Energielosigkeit“, „Schlaf“ oder „Emotionale Beanspruchung“ waren nicht signifikant verändert, was sich nur teilweise mit den Beobachtungen von Nicolas et. al deckt. Allerdings war hier die Overload-Periode länger (drei Wochen mit 15-tägiger Tapering-

Phase) und das Probandenkollektiv bestand aus Leistungs-Schwimmern (Nicolas et al., 2019), was den Vergleich erschwert.

Zusammengefasst scheinen manche Subtests des EBF mit dem Trainingsumfang assoziiert zu sein. Das untermauert die Bedeutung dieser Methode in der Trainingsoptimierung.

6.1.4. HRV

Zu erwarten war eine Verschlechterung der RMSSD nach dreitägigem FOR, da erhöhte Belastung zu einer Inhibition des Parasympathikus und Aktivierung des Sympathikus führt (Baumert et al., 2006). So konnten Coates et al. zeigen, dass Overload-Training zu erhöhter Sympathikusaktivität führt, was möglicherweise den Leistungseinbruch durch OR erklären kann (A. M. Coates et al., 2018). Dies konnte nicht reproduziert werden. Grund kann eine höhere Fehleranfälligkeit, bedingt durch die geringe Probandenzahl und kurze Messdauer, sein. Womöglich stellte die Atmosphäre in der Sporthalle und die Anreise einen zusätzlichen Störfaktor dar.

Andere Studien zeigten einen erhöhten parasympathischen Einfluss auf die Herzfrequenz durch Overload-Training. Dieser Einfluss steigt progressiv während der Overload-Phase und verringert sich während des Taperings. (Y. Le Meur, Pichon, et al., 2013). Das konnte in unserer Studie nicht bestätigt werden; möglicherweise war die Overload-Phase zu kurz (drei Tage vs. drei Wochen bei Le Meur et. al).

In einer Metaanalyse wurde festgestellt, dass die HRV direkt nach einer Belastung steigt- sowohl als Reaktion auf OR als auch auf „physiologisches“ Training. Die Ruhe-HRV zeigt sich hingegen durch OR nicht verändert, was aber an falscher Methodenwahl liegen kann (Bellenger et al., 2016). In zukünftigen Studien ist daher auf optimale Bedingungen für die HRV-Messung zu achten.

Die HRV von Spitzensportlern unterscheidet sich zudem von Nicht-Trainierten (Kiss et al., 2016). Die Frage ist daher, ob sich die Ergebnisse von Hobbysportlern komplett auf Leistungssportler übertragen lassen und umgekehrt.

Zusammengefasst ist die Studienlage bezüglich HRV und OR/OTS widersprüchlich. Außerdem existiert kein standardisiertes Protokoll für die Messung und Auswertung der Daten (Meeusen et al., 2013). Das erschwert den Vergleich zu anderen Studien.

6.1.5. Vertikale Sprungkraft

Für den CMJ zeigten sich signifikante Unterschiede in der maximalen Sprunghöhe zwischen den Interventionen. Diese war nach FOR, verglichen mit MG und CG erniedrigt. Jedoch war die absolute Differenz nur gering. Beachtet man einige Referenzwerte zur vertikalen Sprungkraft, welche nach Geschlecht und Sportart aufgeteilt sind, so zeigt sich eine deutliche

Variabilität (Maier et al., 2016). Die Teilnehmer der Operatum-Studie waren Hobbysportler zwischen 27 und 51 Jahren mit unterschiedlicher Erfahrung in Sprungübungen. Vor diesem Hintergrund erscheint die praktische Bedeutung der signifikanten, aber geringfügigen Differenzen fraglich. Andere signifikante Unterschiede konnten nicht festgestellt werden.

Unsere Hypothese war, dass sich die Sprungkraft infolge eines Overload-Trainings verschlechtert. Allerdings ist der Zusammenhang zwischen OR/OTS und der Sprungkraft nicht geklärt und die Studienlage widersprüchlich; einige Untersuchungen zeigten eine Verschlechterung, andere keinen Unterschied infolge von OR (Grandou, Wallace, Impellizzeri, Allen, & Coutts, 2020).

Möglicherweise ist es sinnvoll, die Athleten über einen längeren Zeitraum zu monitoren. Dies wird bei Volleyballern empfohlen (Ziv & Lidor, 2010). Unklar ist, ob sich die Erfahrungen auch auf Ausdauerathleten übertragen lassen. Die Probanden unserer Studie hatten, im Gegensatz zur Volleyballspielern, keine Erfahrungen mit vertikalen Sprungtests. Da neben der eigentlichen Beinkraft auch die Technik und Erfahrung eine große Rolle spielen (Claudino et al., 2016), fällt die Interpretation der Ergebnisse daher schwer.

Ferner ist nicht geklärt, welcher Parameter der vertikalen Sprungkraft die neuromuskuläre Fatigue am besten widerspiegelt, zudem sollten Tests möglichst sportartspezifisch sein (Scanlan & Dalbo, 2019). Für Ausdauerläufer ist daher die vertikale Sprungkraft vermutlich nicht der optimale Parameter, OR zu erkennen. Die gezeigten Unterschiede in der maximalen Sprunghöhe sind daher vorsichtig zu interpretieren; wenngleich sie in Zusammenschau mit anderen Parametern einen Hinweis auf drohende Überbelastung geben könnten. Hierfür sind jedoch Studien an größeren Probandenkollektiven nötig.

6.2. Diskussion der Methoden

6.2.1. Probandenkollektiv

Das Probandenkollektiv bestand aus 6 männlichen und 3 weiblichen Hobbyläufern im Alter von 27 bis 54 Jahren. Es wurden nur Ausdauerathleten eingeschlossen, da so die Messergebnisse besser verglichen und interpretiert werden können. Die Probanden hatten keine chronischen Erkrankungen, nahmen keine Medikamente und waren sportlich leistungsfähig. Damit konnten viele Confounder ausgeschlossen werden.

Im Vergleich zu anderen Studien zu Übertraining nahmen weniger Probanden teil. Meistens lag die Teilnehmerzahl über 30 (Aubry et al., 2015; Aubry, Hausswirth, Louis, Coutts, & Y, 2014; Yann Le Meur et al., 2014). Diese Studien untersuchten zudem Leistungssportler, etwa Triathleten, selten Freizeitsportler wie bei Bourdillon et al. (Bourdillon et al., 2018). Die Untersuchung von Hobbysportlern gegenüber Leistungssportlern hat einige Nachteile (z.B. unkontrollierter Trainingsalltag, heterogenes Leistungsniveau, etc.). Allerdings wollte die

OperaTUM-Studie nicht nur den Trainingsalltag von Spitzensportlern optimieren, sondern hat als Zielgruppe auch Freizeitsportler. Diese waren, obwohl zahlenmäßig den Leistungssportlern überlegen, in bisherigen Untersuchungen vergleichsweise unterrepräsentiert.

6.2.2. Studienablauf

Die Gesamtdauer der Studie betrug 9 Wochen. An 3 Wochenenden fanden die Interventionen, an jedem der neun Montage ein 5 km-Lauf statt. Die „Overload-Periode“, also der Zeitraum vermehrter Belastung, betrug in der OperaTUM-Studie 3 Tage. Zusätzlich fand ein Interventionswochenende unter moderater Belastung statt und eines ohne Belastung. Der Aufbau anderer Studien unterschied sich: Die „Overload Periode“ erstreckte sich über mehrere Wochen mit 30-45% erhöhtem Trainingsumfang. Dem schloss sich eine 2- 4-wöchige Tapering-Phase an (Aubry et al., 2014; Bourdillon et al., 2018; Yann Le Meur et al., 2014).

Die OperaTUM Studie wurde im Cross-Over-Design durchgeführt. Vorteil ist eine kleinere benötigte Stichprobengröße. Zu beachten ist allerdings der Carry-Over-Effekt; vorangegangene Interventionen könnten das Ergebnis der folgenden verfälschen (Wellek & Blettner, 2012). Daher wurde auf ausreichend Pause zwischen den Interventionen geachtet.

Die Probandenzahl fiel gering aus, was wahrscheinlich auf folgende Faktoren zurückzuführen ist:

- der Zeitaufwand war hoch- ein Problem v.a. für Berufstätige
- das Studienprotokoll verlangte Veränderungen im individuellen Trainingsrhythmus (kein eigenständiges Training) und Tagesrhythmus (frühes Aufstehen, Protokollieren der Nahrungsaufnahme, kein Frühstück)
- die Interventionen stellten eine hohe physische Belastung dar

Insgesamt stellt sich die Frage, ob die Studiendauer verkürzt werden kann, um die Dropout-Rate zu reduzieren und möglicherweise mehr Probanden zu rekrutieren.

6.2.3. 5 km-Lauf

Die Literatur fordert standardisierte Leistungstests zur Abschätzung der Auswirkungen von (Über-)Belastung (Halsen & Jeukendrup, 2004). Zur Diagnose von OTS werden diese aber teilweise kritisiert: Oft sind keine Baseline-Daten vorhanden, die Testbedingungen variierten und seien zudem nicht sportartspezifisch (Meeusen et al., 2013). Daher wurde in der OperaTUM-Studie der 5km-Lauf regelmäßig auf einer überdachten Tartanbahn und zur gleichen Tageszeit (frühmorgens vor der ersten Mahlzeit) durchgeführt. Die Laufzeit diente als Anhaltspunkt für die Auswirkungen der Belastung. Mit einer ähnlichen Methode (wöchentlicher 3-km-Lauf) untersuchten Coutts et al. die Auswirkungen von Overload-Training bei Triathleten (Coutts et al., 2007). Vermutlich war der 5km-Lauf das geeignetste Mittel, die Auswirkungen der Interventionen zu überprüfen. Nachteil eines solchen Leistungstests ist aber die hohe

Fehleranfälligkeit: Obwohl intuitiv erscheint, dass ein Proband nach moderatem Training leistungsfähiger ist als nach hochintensivem Training, können Faktoren wie akute Schmerzen am Bewegungsapparat zu einem Leistungsabfall führen. Daher ist bei zukünftigen Studien auf eine ausreichende Stichprobengröße zu achten.

6.2.4. Echokardiographie

Die Echokardiographie erfordert ein hohes Maß an ärztlicher Erfahrung; die nötigen Geräte sind teuer. Daher sind Einsatzbereiche im Trainingsalltag stark reduziert.

Der Untersucher dieser Studie ist Facharzt für Kardiologie mit entsprechender Expertise. Da manche verwendeten Parameter (v.a. 3D-Messungen) nicht zur echokardiographischen Standarduntersuchung gehören, ist die Anwendung im Praxisalltag schwierig.

Die dreidimensional gemessene RVEF wird, da verlässlich und gut reproduzierbar, zur Funktionseinschätzung des rechten Ventrikels empfohlen und ist anderen Parametern überlegen (Dutta & Aronow, 2017). Allerdings erfordert diese Methode Erfahrung und ist zeitaufwändig, was den Einsatz in der Praxis erschwert (Dorota Smolarek, 2017).

6.2.5. Erholungs-Belastungs-Fragebogen (EBF)

Die psychischen Auswirkungen von OR/OTS können gravierend sein (Bellinger, 2020) und die Frage nach der Befindlichkeit sollte Teil jeder Trainingsplanung sein (Kellmann, 2010). Fragebögen können für die Diagnosestellung OR/OTS hilfreich sein (Meeusen et al., 2013). Der Erholungs-Belastungs-Fragebogen (EBF) gibt einen Überblick über die Befindlichkeit der letzten drei Tage (Kallus & Kellmann, 2016) und kann v.a. bei Sportlern eingesetzt werden (Kellmann & Kallus, 2000). Durch den speziellen Aufbau des EBF ist eine genauere Unterscheidung zwischen sportspezifischen und nicht sportspezifischen Belastungen möglich. Das erleichtert die Ursachenforschung eines Leistungseinbruchs (Birrer, 2004). Daher kam in der OperaTUM-Studie regelmäßig der EBF zum Einsatz.

Der Nachteil aller Fragebögen ist, dass sie auf die ehrliche Bearbeitung der Teilnehmer angewiesen sind (Meyer, Kellmann, Ferrauti, Pfeiffer, & Faude, 2013); zudem ist es unwahrscheinlich, dass sich die Parameter ausschließlich durch das Training verändern. Emotionen (z.B. Anspannung vor einem Wettkampf) spielen hier eine wichtige Rolle (Raglin, Morgan, & O'Connor, 1991). Insgesamt werden Fragebögen zum Frühscreening auf OR/OTS dennoch befürwortet (Cardoos, 2015).

6.2.6. Herzfrequenzvariabilität (HRV)

Die Messung der HRV erfolgte im Liegen und Sitzen. Die Probanden durften nicht frühstücken, was der Empfehlung von Palatini et al. sowie der Leitlinie der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF) folgt (Palatini et al., 2006; Sammito et al., 2014). Trotzdem ist fraglich, ob die Bedingungen optimal für die HRV-Messung waren: leitliniengerecht müsste sie direkt nach dem Aufstehen gemessen werden (Sammito et al., 2014), die Probanden hatten aber u.U. bereits eine lange Anfahrt zur Sporthalle. Obwohl während der Messungen um Ruhe gebeten wurde, konnten nicht alle Störquellen eliminiert werden. In zukünftigen Studien könnten die Probanden die Messungen daher eigenständig zuhause durchführen. So kann auch die Messdauer verlängert werden. Aus Zeitgründen konnte nicht jeweils 5 Minuten im Liegen und Sitzen gemessen werden, was aber empfohlen wird (Sammito et al., 2014). Unsere Messungen dauerten jeweils 3 Minuten, daher sind Verzerrungen der Ergebnisse nicht auszuschließen. Eine neuere Studie zeigt, dass die Messung der HRV, v.a. der RMSSD, durch einen neuen Algorithmus verkürzt werden kann (Saboul & Hautier, 2019). Für zukünftige Untersuchungen wäre das ein Vorteil. In einer Metaanalyse stellten Bellenger et al. fest, dass die sog. Resting-HRV, also die in Ruhe gemessene HRV, durch OR nicht beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu verändert sich die HRV, welche nach einer Belastung gemessen wird durch OR (Bellenger et al., 2016).

Die HRV ist ein sensibler Parameter, der von zahl reichen Faktoren wie Alter, Geschlecht, Erkrankungen, Nachtarbeit etc. beeinflusst wird (Sammito & Böckelmann, 2016). Ein Proband war Polizist und musste z.T. nachts vor Interventionstagen arbeiten. Andere Probanden waren zwischenzeitlich erkältet oder leicht verletzt (Knieprobleme etc.). Das erschwert die Interpretation erheblich.

Betont wird auch die Notwendigkeit mehrerer Messungen, da sich die HRV-Veränderungen erst durch Mittelung über eine ganze Woche detektieren ließen (Y. Le Meur, Pichon, et al., 2013; Plews et al., 2014). Empfohlen wird außerdem, die HRV im Orthostase-Test zu messen, da sich die autonome Aktivität in unterschiedlichen Körperhaltungen unterscheidet (Schneider et al., 2019). Diese Punkte wurden in der OperaTUM-Studie befolgt.

Die Baroreflexsensitivität scheint nach Bourdillon et al. für das Trainingsmonitoring geeigneter zu sein als die HRV (Bourdillon et al., 2018). In zukünftigen Untersuchungen sollten diese Methoden näher verglichen werden, da die Studienlage bisher rar ist.

Insgesamt sind die Parameter der HRV nicht ausreichend verstanden und ihre Aussagekraft nicht geklärt. Das bedingt eine uneinheitliche Methodik in der Literatur und führt zu widersprüchlichen Ergebnissen, weshalb standardisierte Protokolle gefordert werden (Heathers, 2014).

6.2.7. Vertikale Sprungkraft

Im OR-Zustand verringert sich die Muskelkraft und es kommt zur muskulären Ermüdung (Coutts et al., 2007). Der CMJ gilt als einer der validesten und reliabelsten Marker für die Explosivkraft der Beinmuskulatur (Markovic, Dizdar, Jukic, & Cardinale, 2004). Eingesetzt wird er daher etwa bei Volleyballern, Basketballern und 800 m-Läufern, um den Trainingszustand zu monitoren und OR zu erkennen (Bachero-Mena et al., 2017; Scanlan & Dalbo, 2019; Ziv & Lidor, 2010). Die technische Ausstattung für die Durchführung des CMJ ist zwar recht simpel, jedoch wird empfohlen, dass die Probanden mit der Methodik des Sprungtests vertraut sind (Claudino et al., 2016). Allerdings sind nicht in allen Sportarten Sprungtests verbreitet. Neben der unklaren Evidenz ist dies ein limitierender Faktor für den Einsatz zur Trainingssteuerung.

7. Limitationen

Eine wesentliche Limitation der Studie war die geringe Probandenanzahl. Daher ist ein abschließendes Fazit nicht möglich, obwohl bei einigen Parametern Trends erkannt wurden. Diese sollten in Studien mit größerem Kollektiv genauer untersucht werden.

Die Probanden wurden angehalten, nicht eigenständig zu trainieren, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen. Die Einhaltung dieses Punktes des Studienprotokolls konnte aber letztlich nicht überprüft werden.

Es gibt einige Punkte, die den Vergleich zu anderen Studien und die Einordnung der Ergebnisse erschweren: Zunächst ist Terminologie der OR/OTS-Thematik nicht einheitlich und es fehlt an standardisierter Diagnostik (Meeusen et al., 2013); daher müssen vorhandene, aber in erster Linie auch die eigenen Ergebnisse, kritisch betrachtet und zurückhaltend interpretiert werden. Dazu gibt es starke individuelle (Über-) Belastungsgrenzen (Hooper & Mackinnon, 1995), sodass Sportler durch gleichen Trainingsumfang nicht zwingend einen ähnlichen Belastungszustand erreichen (O'Toole, 1998).

Die Messung der HRV war zudem nicht leitlinienkonform. Außerdem ist die Beziehung zwischen OR und der HRV noch uneindeutig und erfordert eine Standardisierung (Meeusen et al., 2013). Die Probanden hatten keine Erfahrung mit Sprungtests, was aber empfohlen wird (Claudino et al., 2016). Eine Verzerrung der Ergebnisse war daher nicht auszuschließen.

Es ist unklar, wie weit sich die Ergebnisse der OperaTUM-Studie auf andere Sportarten (z.B. kraftorientierte Sportarten) übertragen lassen. Dazu sind weitere Untersuchungen nötig. Wegen der Einschlusskriterien wurden Jugendliche nicht berücksichtigt. Gerade junge Leistungssportler stellen aber eine Risikogruppe für OR/OTS dar (Brenner, 2007), daher sollte diese Gruppe in Zukunft genauer untersucht werden.

Trotz der Limitationen können die Erfahrungen dieser Pilotstudie wichtige Anhaltspunkte für die Planung künftiger Untersuchungen geben. Vor allem die Vermutung, dass OR zu einer vorübergehenden Veränderung der rechtsventrikulären Funktion führt kann Anlass für weitere Studien sein.

8. Zusammenfassung und Ausblick

8.1. Zusammenfassung

Sport ist essenzieller Bestandteil einer gesunden Lebensweise. Für Sportler sind hohe Trainingsumfänge und -intensitäten unabdingbar, da sie nach ausreichender Regeneration eine Leistungssteigerung ermöglichen („Superkompensation“). Eine gestörte Balance zwischen Belastung und Erholung kann allerdings zum Overreaching (OR) und im Extremfall zum Overtraining Syndrome (OTS) führen. Während sog. Functional Overreaching (FOR) noch die Chance der Superkompensation birgt - sofern sich ausreichende Regeneration anschließt - sind Non-Functional Overreaching (NFOR) und das OTS durch einen Leistungseinbruch über Wochen bis Monate gekennzeichnet. Zusätzlich drohen teils gravierende physische und psychische Funktionsstörungen. Die Karriere, aber in erster Linie die Gesundheit eines Sportlers, sind durch die Folgen von Überbelastung gefährdet.

Die neunwöchige OperaTUM-Pilotstudie hatte das Ziel, Frühmarker für FOR zu etablieren. So sollen negative Konsequenzen abgewendet und die Trainingsgestaltung ökonomisiert werden.

Untersucht wurden hierzu u.a. die Herzfrequenzvariabilität (HRV) als Zeichen der vegetativen Balance und die vertikale Sprungkraft als Zeichen der neuromuskulären Leistungsfähigkeit mit der Hypothese, dass diese sich in Folge von artifiziell induziertem FOR verschlechtern. Zusätzlich wurden die Auswirkungen von FOR auf rechtsventrikuläre Parameter in der Echokardiographie und auf Dimensionen des Erholungs-Beanspruchungs-Fragebogens (EBF Sport) analysiert.

FOR sollte mittels einer dreitägigen Intervention erreicht werden: 9 Probanden liefen an jedem Tag 2,5h bei 70% ihrer $VO_2\text{max}$ (Functional Overreaching; FOR). Als Kontrollinterventionen dienten folgende je dreitägige Maßnahmen: 1h Lauf bei 60% der $VO_2\text{max}$ (Moderate Group; MG) und 2,5h Sitzen (Control Group; CG). Im Cross-Over-Design durchlief jeder Teilnehmer diese drei Interventionen in unterschiedlicher Reihenfolge.

Als Anhaltspunkt für den Belastungszustand der Probanden diene ein wöchentlicher Fünf-Kilometer-Lauf. Durch FOR verschlechterte sich die Laufleistung, allerdings nicht signifikant.

Während die Ergebnisse der HRV keine wesentlichen Veränderungen zwischen FOR und den Kontrollen zeigten, deuteten sich Auswirkungen auf rechtsventrikuläre Parameter an, welche aber nicht signifikant waren: die rechtsventrikuläre Ejektionsfraktion (RVEF) fiel vergleichsweise stärker nach dreitägigem FOR als nach den Kontrollinterventionen. Diese Parameter erholten sich in den folgenden Tagen. Dreitägiges FOR beeinflusste manche Dimensionen des EBF signifikant, ebenso die maximale Sprunghöhe des CMJ. Die absoluten

Unterschiede der vertikalen Sprungkraft waren jedoch gering, sodass die praktische Relevanz fraglich erscheint.

Zusammenfassend konnte kein eindeutiger Marker für OR etabliert werden, der ein Überlastungszustand frühzeitig valide detektieren kann. Die rechtsventrikuläre Funktion stand bisher nicht im Fokus der Forschung - hier sind weitere Untersuchungen an einem größeren Probandenkollektiv nötig. Der EBF stellt ein gutes Tool zur Erfassung des Belastungsempfindens dar. Er sollte im Trainingsalltag einen festen Platz haben, um OR frühzeitig zu erkennen und OTS zu verhindern. Die Methodik der HRV und vertikalen Sprungkraft sollten standardisiert an einem größeren Kollektiv untersucht werden.

8.2. Ausblick

Die unklare Studienlage und heterogene Methodenwahl erschweren die Interpretation der Beobachtungen, andererseits zeigen sie auch das Interesse an der Thematik und verdeutlichen den Bedarf nach weiterer Forschung.

Diese Arbeit sollte auch die schmale Gratwanderung der optimalen Trainingsplanung verdeutlichen: Einerseits ist ein Athlet nur durch hartes Training konkurrenzfähig, andererseits kann er durch Überlastung seine Gesundheit schädigen und letztlich seine Karriere gefährden. Glücklicherweise fand in den letzten Jahren ein Umdenken seitens Athleten und Trainern statt; das Interesse an gesunder und nachhaltiger Trainingsgestaltung wächst.

Der technische Fortschritt wird die Messung kardiovaskulärer Parameter erleichtern. Manche Smartwatches erfassen (mehr oder weniger valide) bereits die HRV und geben konkretes Feedback an den Benutzer. Die Echokardiographie des rechten Herzens findet zunehmend außerhalb des universitären Settings Anwendung. Technische Neuerungen helfen die komplexe Anatomie und Physiologie des Herzens darzustellen, gleichzeitig werden die nötigen Geräte günstiger. Das ermöglicht größer angelegte Untersuchungen zu den Auswirkungen von Überbelastung auf die rechtsventrikuläre Funktion.

Diese Entwicklungen ermöglichen hoffentlich auch „Nicht-Leistungssportlern“ ein gesundes und nachhaltiges Training. Es besteht daher noch weiterer Forschungsbedarf, um die so erfassten Parameter korrekt interpretieren und konkrete Empfehlungen geben zu können.

9. Abstract

Aim: The OperaTUM study aimed to identify diagnostic markers for Overreaching (OR).

Methods: In this pilot study, we investigated 9 athletes (mean age 37 ± 12 years, 6 male) over a period of 9 weeks in a 3-group cross over study design. Athletes were randomized referring to the following conditions: (1) functional overreaching (FOR) (running 2.5h/day at 70% VO_{2max} on 3 consecutive days), (2) moderate (MG) (running 1h/day at 60% VO_{2max} on 3 consecutive days) or (3) control group (CG) (sitting 2.5h/day on 3 consecutive days). In-between each intervention block, athletes were encouraged not to train for the next 18 days.

Parameters studied: Echocardiographic parameters were right ventricular ejection fraction (RVEF via 3D measurement), left ventricular ejection fraction (LVEF) and for diastolic evaluation E/A and E/e'_{mean} . Furthermore, jump performance via Counter Movement Jump (CMJ) and Drop Jump (DJ), heart rate variability (RMSSD and Mean Heart Rate), and emotional well-being using the EBF questionnaire were assessed.

Statistical Analysis: Data were analyzed using R and Python. Normality was checked using the Shapiro-Wilk test. Differences between "Pre" (or Baseline) and "Post" measurements for each intervention were calculated as deltas (Δ). These deltas were then statistically compared between the intervention groups (ΔFOR , ΔMG , ΔCG) using t-tests or Wilcoxon Rank Tests, depending on data distribution. A significance level of $\alpha = 0.05$ was set.

Results: No significant changes were observed in echocardiographic parameters or heart rate variability. However, a significant difference was found in the EBF parameters "Injury Susceptibility", "Somatic Recovery" and "General Stress" when comparing ΔFOR with ΔMG ($p = 0.008$ and $p = 0.046$, respectively). Additionally, the maximum jump height achieved in CMJ for ΔFOR was significantly lower compared to both ΔMG and ΔCG .

Conclusions: The study failed to identify a singular reliable marker for diagnosing OR. However, significant findings in the EBF parameters between ΔFOR and ΔMG suggest the potential of emotional well-being as an indicative factor for impending overtraining. Although the vertical jump height was statistically significant, the absolute differences were minimal, raising questions about its practical relevance. Eventually, we could detect a trend towards a decrease of the RV function depending on the intensity of the intervention. Since our population size was small, further studies should confirm our results in a larger population.

10. Anhang

Tabelle 9: HRV im Studienverlauf

FOR = functional overreaching, MG = moderate group, CG = control group, Pre = unmittelbar vor dem Start des Interventionswochenendes, Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende, Δ = Differenz zwischen Post und Pre, 95% KI= 95%-Konfidenzintervall; (Q1; Q3) = Interquartilsabstand (25. und 75. Perzentile), bpm = Beats per minute; RMSSD = Root Mean Square of Successive Difference

	Mittlere Herzfrequenz (bpm) im Liegen	RMSSD (ms) im Liegen	Mittlere Herzfrequenz (bpm) im Sitzen	RMSSD (ms) im Sitzen
Baseline	65,2 ± 25,6	69,0 ± 47,1	60,5 ± 9,7	63,5 ± 36,9
Pre	54,5 ± 6,5	67,9 ± 40,2	60,7 ± 4,5	53,7 ± 33,8
Tag 2	63,9 ± 14,6	54,8 ± 38,2	64,9 ± 14,0	44,8 ± 27,1
Tag 3	61,4 ± 13,9	49,6 ± 31,2	63,4 ± 11,7	40,8 ± 20,2
Post	70,3 ± 17,1	40,1 ± 31,6	73,4 ± 15,9	31,2 ± 18,4
FOR Post 2	71,8 ± 18,8	91,4 ± 72,3	70,0 ± 16,1	159,4 ± 138,4
Post 3	64,9 ± 15,1	67,5 ± 46,5	66,6 ± 13,9	94,9 ± 107,9
Post 4	62,3 ± 12,0	64,1 ± 41,0	64,6 ± 9,0	105,2 ± 152,5
Post 7	69,7 ± 18,5	55,8 ± 55,6	69,0 ± 14,2	38,7 ± 38,6
Post 14	67,2 ± 18,5	42,9 ± 37,8	70,3 ± 16,6	36,1 ± 23,8

Fortsetzung Tabelle 10: HRV im Studienverlauf

FOR = functional overreaching, MG = moderate group, CG = control group, Pre = unmittelbar vor dem Start des Interventionswochenendes, Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende, Δ = Differenz zwischen Post und Pre, 95% KI= 95%-Konfidenzintervall; (Q1; Q3) = Interquartilsabstand (25. und 75. Perzentile), bpm = Beats per minute; RMSSD = Root Mean Square of Successive Difference

		Mittlere Herzfrequenz (bpm) im Liegen	RMSSD (ms) im Liegen	Mittlere Herzfrequenz (bpm) im Sitzen	RMSSD (ms) im Sitzen
MG	Pre	60,1 ± 7,8	94,7 ± 14,5	67,9 ± 5,6	47,3 ± 7,2
	Tag 2	58,8 ± 8,8	51,3 ± 26,0	61,2 ± 8,2	49,4 ± 19,2
	Tag 3	58,1 ± 10,9	69,6 ± 70,2	62,2 ± 9,4	49,2 ± 21,8
	Post	70,9 ± 14,4	36,6 ± 19,4	73,0 ± 11,9	31,0 ± 14,8
	Post 2	56,5 ± 10,6	62,0 ± 46,6	57,5 ± 8,1	57,5 ± 5,5
	Post 3	57,8 ± 10,8	55,8 ± 40,1	61,5 ± 6,3	50,3 ± 27,5
	Post 4	58,0 ± 8,1	55,8 ± 47,3	60,3 ± 6,7	31,4 ± 13,2
	Post 7	64,9 ± 10,8	53,0 ± 51,1	67,9 ± 10,1	36,5 ± 28,5
	Post 14	67,7 ± 13,4	46,2 ± 24,9	70,7 ± 10,4	32,3 ± 14,7
CG	Pre	59,8 ± 8,6	55,1 ± 38,5	60,6 ± 11,7	52,1 ± 40,3
	Tag 2	56,3 ± 9,0	50,3 ± 19,1	58,5 ± 9,8	45,6 ± 19,0
	Tag 3	52,0 ± 6,5	65,4 ± 34,9	55,8 ± 7,1	59,0 ± 30,2
	Post	77,9 ± 15,7	24,7 ± 11,2	76,8 ± 18,9	39,5 ± 33,6
	Post 2	28,2 ± 9,7	37,0 ± 21,7	55,5 ± 6,2	41,4 ± 21,0
	Post 3	59,8 ± 8,3	66,3 ± 70,4	59,8 ± 6,5	40,7 ± 20,1
	Post 4	59,8 ± 12,9	59,7 ± 50,8	63,1 ± 6,9	42,6 ± 18,7
	Post 7	74,1 ± 15,2	31,7 ± 26,7	73,0 ± 13,1	27,4 ± 14,5
	Post 14	76,2 ± 15,9	33,5 ± 26,3	79,7 ± 12,4	26,5 ± 12,2

Tabelle 11: Vertikale Sprungkraft im Studienverlauf

FOR = functional overreaching, MG = moderate group, CG = control group, Baseline = 1 Woche vor Studienbeginn, Post = 1 Tag nach dem Interventionswochenende, V2 = 1 Woche nach dem Interventionswochenende; V3 = 2 Wochen nach dem Interventionswochenende; Q1; Q3 = 25./75. Perzentile; CMJ = Counter Movement Jump; DJ = Drop Jump; ms = Milisekunde; Ns = Newton-Sekunde; N/s = Newton pro Sekunde

		CMJ max. Sprunghöhe (cm) (Q1; Q3)	CMJ max. Kraft (N) (Q1; Q3)	CMJ Kraftanstieg (N/s) (Q1; Q3)	DJ Flugzeit (ms) (Q1; Q3)	DJ Bodenzeit (ms) (Q1; Q3)	DJ Reaktivindex (Q1; Q3)
Baseline		23,0 (20,0; 33,0)	1539,0 (1254,0; 1565,0)	6136,0 (4273,0; 6823,0)	376,0 (332,0; 446,0)	185,0 (182,0; 192,0)	2,0 (1,8; 2,4)
	Post	22,6 (15,4; 29,0)	1438,0 (1381,0; 1471,0)	5332,0 (5036,0; 6489,0)	387,0 (297,0; 411,0)	186,0 (180,0; 209,0)	2,1 (1,5; 2,2)
FOR	V2	24,0 (19,2; 31,3)	1452,0 (1296,8 ;1556,8)	6626,5 (4425,0; 7159,0)	399,5 (355,0; 420,5)	181,0 (170,5; 187,3)	2,2 (1,9; 2,4)
	V3	23,2 (16,7; 31,4)	1322,5 (1179,0;1521,5)	5084,5 (4645,3; 5374,0)	394,0 (334,3; 429,0)	185,0 (171,8; 204,3)	2,1 (1,7; 2,5)
	Post	26,8 (18,1; 31,3)	1410,0 (1250,0; 1483,0)	5841,0 (5061,0; 6447,0)	398,0 (346,0; 418,0)	187,0 (177,0; 215,0)	2,0 (1,8; 2,6)
MG	V2	25,0 (18,98; 31,72)	1384,0 (1309,5;1485,3)	5454,0 (4915,0; 8296,5)	391,0 (338,8; 406,8)	189,0 (163,0; 209,3)	2,2 (1,8; 2,4)
	V3	22,6 (17,9; 31,7)	1410,0 (1347,0; 1503,0)	6320,0 (5883,0; 9176,0)	382,0 (351,0; 429,0)	191,0 (163,0; 197,0)	2,2 (1,8; 2,3)
	Post	23,3 (17,7; 30,4)	1483,0 (1437,0; 1565,0)	7194,0 (6422,0; 7601,0)	397,0 (330,0; 425,0)	177,0 (173,0; 193,0)	2,3 (1,7; 2,4)
CG	V2	20,9 (18,7; 29,4)	1502,0 (1368,0; 1508,5)	6172,0 (5108,5; 6937,5)	405,0 (360,5; 437,0)	187,0 (179,5; 195,5)	2,1 (1,9; 2,4)
	V3	21,9 (18,6; 29,2)	1449,0 (1325,0; 1481,5)	5761,0 (5424,0; 6332,0)	401,0 (375,5; 438,0)	186,0 (167,5; 192,0)	2,3 (1,9; 2,6)

11. Literaturverzeichnis

- acentas GmbH. (2010). acentas Herzfrequenz Monitoring (Version 1.11.07). Hörgertshausen, Deutschland: Hans-Günter Betz. Retrieved from <http://team-training.acentas.com/>
- Appleton, C. P., Firstenberg, M. S., Garcia, M. J., & Thomas, J. D. (2000). THE ECHO-DOPPLER EVALUATION OF LEFT VENTRICULAR DIASTOLIC FUNCTION: A Current Perspective. *Cardiology Clinics*, 18(3), 513-546. doi:[https://doi.org/10.1016/S0733-8651\(05\)70159-4](https://doi.org/10.1016/S0733-8651(05)70159-4)
- Aubry, A., Hausswirth, C., Louis, J., Coutts, A. J., Buchheit, M., & Le Meur, Y. (2015). The Development of Functional Overreaching Is Associated with a Faster Heart Rate Recovery in Endurance Athletes. *PLoS One*, 10(10), e0139754. doi:10.1371/journal.pone.0139754
- Aubry, A., Hausswirth, C., Louis, J., Coutts, A. J., & Y, L. E. M. (2014). Functional overreaching: the key to peak performance during the taper? *Med Sci Sports Exerc*, 46(9), 1769-1777. doi:10.1249/mss.0000000000000301
- Bachero-Mena, B., Pareja-Blanco, F., & González-Badillo, J. J. (2017). Enhanced Strength and Sprint Levels, and Changes in Blood Parameters during a Complete Athletics Season in 800 m High-Level Athletes. *Front Physiol*, 8, 637. doi:10.3389/fphys.2017.00637
- Balk, Y. A., & Englert, C. (2020). Recovery self-regulation in sport: Theory, research, and practice. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 15(2), 273-281. doi:10.1177/1747954119897528
- Barbier, J., Ville, N., Kervio, G., Walther, G., & Carré, F. (2006). Sports-specific features of athlete's heart and their relation to echocardiographic parameters. *Herz*, 31(6), 531-543. doi:10.1007/s00059-006-2862-2
- Baumert, M., Brechtel, L., Lock, J., Hermsdorf, M., Wolff, R., Baier, V., & Voss, A. (2006). Heart rate variability, blood pressure variability, and baroreflex sensitivity in overtrained athletes. *Clin J Sport Med*, 16(5), 412-417. doi:10.1097/01.jsm.0000244610.34594.07
- Bellenger, C. R., Fuller, J. T., Thomson, R. L., Davison, K., Robertson, E. Y., & Buckley, J. D. (2016). Monitoring Athletic Training Status Through Autonomic Heart Rate Regulation: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med*, 46(10), 1461-1486. doi:10.1007/s40279-016-0484-2
- Bellinger, P. (2020). Functional Overreaching in Endurance Athletes: A Necessity or Cause for Concern? *Sports Medicine*. doi:10.1007/s40279-020-01269-w
- Bellinger, P., Sabapathy, S., Craven, J., Arnold, B., & Minahan, C. (2020). Overreaching Attenuates Training-induced Improvements in Muscle Oxidative Capacity. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 52(1), 77-85.
- Bernecker, C., Scherr, J., Schinner, S., Braun, S., Scherbaum, W. A., & Halle, M. (2013). Evidence for an exercise induced increase of TNF- α and IL-6 in marathon runners. *Scand J Med Sci Sports*, 23(2), 207-214. doi:10.1111/j.1600-0838.2011.01372.x
- Billman, G. E. (2011). Heart Rate Variability – A Historical Perspective. *Front Physiol*, 2. doi:10.3389/fphys.2011.00086
- Birrer, D. (2004). Use of psychometric instruments in the diagnosis of overtraining. 52, 57-61.
- Blain, B., Schmit, C., Aubry, A., Hausswirth, C., Le Meur, Y., & Pessiglione, M. (2019). Neuro-computational Impact of Physical Training Overload on Economic Decision-Making. *Current Biology*, 29(19), 3289-3297.e3284. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.08.054>

- Bosquet, L., Merkari, S., Arvisais, D., & Aubert, A. E. (2008). Is heart rate a convenient tool to monitor over-reaching? A systematic review of the literature. *Br J Sports Med*, 42(9), 709-714. doi:10.1136/bjsm.2007.042200
- Bourdillon, N., Yazdani, S., Nilchian, M., Mariano, A., Vesin, J. M., & Millet, G. P. (2018). Overload blunts baroreflex only in overreached athletes. *J Sci Med Sport*, 21(9), 941-949. doi:10.1016/j.jsams.2018.01.008
- Brenner, J. S. (2007). Overuse injuries, overtraining, and burnout in child and adolescent athletes. *Pediatrics*, 119(6), 1242-1245. doi:10.1542/peds.2007-0887
- Brink, M. S., Visscher, C., Coutts, A. J., & Lemmink, K. A. (2012). Changes in perceived stress and recovery in overreached young elite soccer players. *Scand J Med Sci Sports*, 22(2), 285-292. doi:10.1111/j.1600-0838.2010.01237.x
- Budgett, R., Hiscock, N., Arida, R. M., & Castell, L. M. (2010). The effects of the 5-HT_{2C} agonist m-chlorophenylpiperazine on elite athletes with unexplained underperformance syndrome (overtraining). *Br J Sports Med*, 44(4), 280-283. doi:10.1136/bjsm.2008.046425
- Buyse, L., Decroix, L., Timmermans, N., Barbe, K., Verrelst, R., & Meeusen, R. (2019). Improving the Diagnosis of Nonfunctional Overreaching and Overtraining Syndrome. *Med Sci Sports Exerc*. doi:10.1249/mss.0000000000002084
- Cadegiani, F. A., & Kater, C. E. (2019). Novel insights of overtraining syndrome discovered from the EROS study. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 5(1), e000542. doi:10.1136/bmjsem-2019-000542
- Cardoos, N. (2015). Overtraining Syndrome. *Current Sports Medicine Reports*, 14(3), 157-158. doi:10.1249/jsr.0000000000000145
- Carrard, J., Rigort, A.-C., Appenzeller-Herzog, C., Colledge, F., Königstein, K., Hinrichs, T., & Schmidt-Trucksäss, A. (2022). Diagnosing overtraining syndrome: a scoping review. *Sports health*, 14(5), 665-673.
- Carter, J., Potter, A., & Brooks, K. (2014). Overtraining syndrome: Causes, consequences, and methods for prevention. *Journal of Sport and Human Performance*, 2.
- Cheng, A. J., Jude, B., & Lanner, J. T. (2020). Intramuscular mechanisms of overtraining. *Redox Biology*, 101480. doi:<https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101480>
- Christou, G. A., Pagourelas, E. D., Anifanti, M. A., Sotiriou, P. G., Koutlianos, N. A., Tsironi, M. P., . . . Deligiannis, A. P. (2020). Exploring the determinants of the cardiac changes after ultra-long duration exercise: The echocardiographic Spartathlon study. *Eur J Prev Cardiol*, 2047487319898782. doi:10.1177/2047487319898782
- Claudino, J. G., Cronin, J. B., Mezencio, B., Pinho, J. P., Pereira, C., Mochizuki, L., . . . Serrao, J. C. (2016). Autoregulating Jump Performance to Induce Functional Overreaching. *J Strength Cond Res*, 30(8), 2242-2249. doi:10.1519/jsc.0000000000001325
- Coates, A., Millar, P., & Burr, J. (2018). Blunted Cardiac Output from Overtraining Is Related to Increased Arterial Stiffness. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 50, 1. doi:10.1249/MSS.0000000000001725
- Coates, A. M., Incognito, A. V., Seed, J. D., Doherty, C. J., Millar, P. J., & Burr, J. F. (2018). Three Weeks of Overload Training Increases Resting Muscle Sympathetic Activity. *Med Sci Sports Exerc*, 50(5), 928-937. doi:10.1249/mss.0000000000001514
- Contemplas GmbH. CONTEMPLAS GmbH. Retrieved from www.contemplas.com
- Cortex Biophysik GmbH. MetaSoft® Studio. Retrieved from <https://cortex-medical.com/DE/MetaSoft-Studio.htm>

- Costill, D. L., Flynn, M. G., Kirwan, J. P., Houmard, J. A., Mitchell, J. B., Thomas, R., & Park, S. H. (1988). Effects of repeated days of intensified training on muscle glycogen and swimming performance. *Med Sci Sports Exerc*, 20(3), 249-254.
- Coutts, A. J., Wallace, L. K., & Slaterry, K. M. (2007). Monitoring changes in performance, physiology, biochemistry, and psychology during overreaching and recovery in triathletes. *Int J Sports Med*, 28(2), 125-134. doi:10.1055/s-2006-924146
- Cygankiewicz, I., & Zareba, W. (2013). Heart rate variability. *Handb Clin Neurol*, 117, 379-393. doi:10.1016/b978-0-444-53491-0.00031-6
- Dong, J. (2016). The role of heart rate variability in sports physiology. *Exp Ther Med*, 11(5), 1531-1536. doi:10.3892/etm.2016.3104
- Dorota Smolarek, A. U. M. G. A. U. W. S. (2017). Echocardiographic evaluation of right ventricular systolic function: The traditional and innovative approach. *Echocardiographic evaluation of right ventricular systolic function: The traditional and innovative approach*, 24(5), 563-572-563-572. doi:10.5603/CJ.a2017.0051
- Dupuy, O., Lussier, M., Fraser, S., Bherer, L., Audiffren, M., & Bosquet, L. (2014). Effect of overreaching on cognitive performance and related cardiac autonomic control. *Scand J Med Sci Sports*, 24(1), 234-242. doi:10.1111/j.1600-0838.2012.01465.x
- Dutta, T., & Aronow, W. S. (2017). Echocardiographic evaluation of the right ventricle: Clinical implications. *Clinical Cardiology*, 40(8), 542-548. doi:10.1002/clc.22694
- Elliott, A. D., & La Gerche, A. (2015). The right ventricle following prolonged endurance exercise: are we overlooking the more important side of the heart? A meta-analysis. *British journal of sports medicine*, 49(11), 724-729. doi:10.1136/bjsports-2014-093895
- Fagundes, L., Noce, F., Albuquerque, M., Andrade, A., & Costa, V. (2021). Can motivation and overtraining predict burnout in professional soccer athletes in different periods of the season? *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 19, 1-16. doi:10.1080/1612197X.2019.1655778
- Flachskampf, F. A., & Buck, T. (2021). Funktion des linken Ventrikels. In F. A. Flachskampf (Ed.), *Praxis der Echokardiografie* (4., überarbeitete und erweiterte Auflage ed.): Georg Thieme Verlag KG.
- Franke, A. (2021). 3D-Echokardiografie. In F. A. Flachskampf (Ed.), *Praxis der Echokardiografie* (4., überarbeitete und erweiterte Auflage ed.): Georg Thieme Verlag KG.
- Freitas, V. H., Nakamura, F. Y., Miloski, B., Samulski, D., & Bara-Filho, M. G. (2014). Sensitivity of physiological and psychological markers to training load intensification in volleyball players. *J Sports Sci Med*, 13(3), 571-579.
- Fry, A. C., & Kraemer, W. J. (1997). Resistance exercise overtraining and overreaching. *Sports Medicine*, 23(2), 106-129.
- Gerche, A. L., Roberts, T., & Claessen, G. (2014). The Response of the Pulmonary Circulation and Right Ventricle to Exercise: Exercise-Induced Right Ventricular Dysfunction and Structural Remodeling in Endurance Athletes (2013 Grover Conference Series). *Pulmonary Circulation*, 4(3), 407-416. doi:10.1086/677355
- González-Boto, R., Salguero, A., Tuero, C., González-Gallego, J., & Márquez, S. (2008). Monitoring the effects of training load changes on stress and recovery in swimmers. *J Physiol Biochem*, 64(1), 19-26. doi:10.1007/bf03168231
- Grandou, C., Wallace, L., Impellizzeri, F. M., Allen, N. G., & Coutts, A. J. (2020). Overtraining in Resistance Exercise: An Exploratory Systematic Review and Methodological Appraisal of the Literature. *Sports Med*, 50(4), 815-828. doi:10.1007/s40279-019-01242-2
- Greenham, G., Buckley, J. D., Garrett, J., Eston, R., & Norton, K. (2018). Biomarkers of Physiological Responses to Periods of Intensified, Non-Resistance-Based Exercise

- Training in Well-Trained Male Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med*, 48(11), 2517-2548. doi:10.1007/s40279-018-0969-2
- Hagstrom, A. D., & Shorter, K. A. (2018). Creatine kinase, neuromuscular fatigue, and the contact codes of football: A systematic review and meta-analysis of pre- and post-match differences. *European Journal of Sport Science*, 18(9), 1234-1244. doi:10.1080/17461391.2018.1480661
- Halle, M., Berg, A., & Keul, J. (2000). Adipositas und Bewegungsmangel als kardiovaskuläre Risikofaktoren. *DEUTSCHE ZEITSCHRIFT FÜR SPORTMEDIZIN*, 51(4), 123-129.
- Halson, S. L., & Jeukendrup, A. E. (2004). Does overtraining exist? An analysis of overreaching and overtraining research. *Sports Med*, 34(14), 967-981. doi:10.2165/00007256-200434140-00003
- Hauswirth, C., Louis, J., Aubry, A., Bonnet, G., Duffield, R., & Y, L. E. M. (2014). Evidence of disturbed sleep and increased illness in overreached endurance athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 46(5), 1036-1045. doi:10.1249/mss.0000000000000177
- Heathers, J. A. (2014). Everything Hertz: methodological issues in short-term frequency-domain HRV. *Front Physiol*, 5, 177. doi:10.3389/fphys.2014.00177
- Hiscock, N., & Pedersen, B. K. (2002). Exercise-induced immunodepression- plasma glutamine is not the link. *J Appl Physiol* (1985), 93(3), 813-822. doi:10.1152/japplphysiol.00048.2002
- Hoogeveen, A. R., & Zonderland, M. L. (1996). Relationships between testosterone, cortisol and performance in professional cyclists. *Int J Sports Med*, 17(6), 423-428. doi:10.1055/s-2007-972872
- Hooper, S. L., & Mackinnon, L. T. (1995). Monitoring overtraining in athletes. Recommendations. *Sports Med*, 20(5), 321-327. doi:10.2165/00007256-199520050-00003
- Hottenrott, K. (2001). *Grundlagen der Herzfrequenzvariabilität und Anwendungsmöglichkeiten im Sport*. Paper presented at the Herzfrequenzvariabilität im Sport, Marburg.
- Hottenrott, K. (2002). Grundlagen zur Herzfrequenzvariabilität und Anwendungsmöglichkeiten im Sport. In.
- Hottenrott, K., Hoos, O., & Esperer, H. D. (2006). [Heart rate variability and physical exercise. Current status]. *Herz*, 31(6), 544-552. doi:10.1007/s00059-006-2855-1
- Huber, G., & Glaser, F. (2013). Guidelines Rechtsherz. *Journal für Kardiologie-Austrian Journal of Cardiology*, 21(1), 38-48.
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90-95. doi:10.1109/MCSE.2007.55
- Jackson, A. S., & Pollock, M. L. (1978). Generalized equations for predicting body density of men. *British Journal of Nutrition*, 40(3), 497-504. doi:10.1079/BJN19780152
- Jouffroy, R., Caille, V., Perrot, S., Vieillard-Baron, A., Dubourg, O., & Mansencal, N. (2015). Changes of Cardiac Function During Ultradistance Trail Running. *Am J Cardiol*, 116(8), 1284-1289. doi:10.1016/j.amjcard.2015.07.045
- Kajaia, T., Maskhulia, L., Chelidze, K., Akhalkatsi, V., & Kakhabrishvili, Z. (2017). THE EFFECTS OF NON-FUNCTIONAL OVERREACHING AND OVERTRAINING ON AUTONOMIC NERVOUS SYSTEM FUNCTION IN HIGHLY TRAINED ATHLETES. *Georgian Med News*(264), 97-103.
- Kallus, W., & Kellmann, M. (2016). *The Recovery-Stress Questionnaires: User Manual*.

- Kellmann, M. (2010). Preventing overtraining in athletes in high-intensity sports and stress/recovery monitoring. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(s2), 95-102. doi:10.1111/j.1600-0838.2010.01192.x
- Kellmann, M., Bertollo, M., Bosquet, L., Brink, M., Coutts, A. J., Duffield, R., . . . Beckmann, J. (2018). Recovery and Performance in Sport: Consensus Statement. *Int J Sports Physiol Perform*, 13(2), 240-245. doi:10.1123/ijsp.2017-0759
- Kellmann, M., & Golenia, M. (2003). Skalen zur Erfassung der aktuellen Befindlichkeit im Sport.
- Kellmann, M., & Kallus, K. W. (2000). *Der Erholungs-Belastungs-Fragebogen für Sportler: Manual;[EBF-Sport]*: Swets Test Services.
- Killer, S. C., Svendsen, I. S., Jeukendrup, A. E., & Gleeson, M. (2017). Evidence of disturbed sleep and mood state in well-trained athletes during short-term intensified training with and without a high carbohydrate nutritional intervention. *J Sports Sci*, 35(14), 1402-1410. doi:10.1080/02640414.2015.1085589
- Kindermann, W., & Scharhag, J. (2014). Die physiologische Herzhypertrophie (Sportherz). *DEUTSCHE ZEITSCHRIFT FÜR SPORTMEDIZIN*, 65(12), 327-332. Retrieved from <https://www.germanjournalsportsmedicine.com/archive/archive-2014/issue-12/die-physiologische-herzhypertrophie-sportherz/>
- Kiss, O., Sydo, N., Vargha, P., Vago, H., Czibalmos, C., Edes, E., . . . Merkely, B. (2016). Detailed heart rate variability analysis in athletes. *Clinical Autonomic Research*, 26(4), 245-252. doi:10.1007/s10286-016-0360-z
- Kreher, J. B., & Schwartz, J. B. (2012). Overtraining syndrome: a practical guide. *Sports health*, 4(2), 128-138. doi:10.1177/1941738111434406
- Kubios. (2020). <https://www.kubios.com/hrv-premium/>.
- La Gerche, A., Claessen, G., Dymarkowski, S., Voigt, J. U., De Buck, F., Vanhees, L., . . . Heidbuchel, H. (2015). Exercise-induced right ventricular dysfunction is associated with ventricular arrhythmias in endurance athletes. *Eur Heart J*, 36(30), 1998-2010. doi:10.1093/eurheartj/ehv202
- La Gerche, A., Connelly, K. A., Mooney, D. J., MacIsaac, A. I., & Prior, D. L. (2008). Biochemical and functional abnormalities of left and right ventricular function after ultra-endurance exercise. *Heart*, 94(7), 860. doi:10.1136/hrt.2006.101063
- La Gerche, A., Heidbüchel, H., Burns, A. T., Mooney, D. J., Taylor, A. J., Pflugger, H. B., . . . Prior, D. L. (2011). Disproportionate Exercise Load and Remodeling of the Athlete's Right Ventricle. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(6), 974-981. doi:10.1249/MSS.0b013e31820607a3
- Lastella, M., Vincent, G. E., Duffield, R., Roach, G. D., Halson, S. L., Heales, L. J., & Sargent, C. (2018). Can Sleep Be Used as an Indicator of Overreaching and Overtraining in Athletes? *Front Physiol*, 9, 436. doi:10.3389/fphys.2018.00436
- Le Meur, Y., Hausswirth, C., Natta, F., Couturier, A., Bignet, F., & Vidal, P. P. (2013). A multidisciplinary approach to overreaching detection in endurance trained athletes. *J Appl Physiol (1985)*, 114(3), 411-420. doi:10.1152/jappphysiol.01254.2012
- Le Meur, Y., Louis, J., Aubry, A., Guéron, J., Pichon, A., Schaal, K., . . . Hausswirth, C. (2014). Maximal exercise limitation in functionally overreached triathletes: role of cardiac adrenergic stimulation. *Journal of Applied Physiology*, 117(3), 214-222.
- Le Meur, Y., Pichon, A., Schaal, K., Schmitt, L., Louis, J., Guéron, J., . . . Hausswirth, C. (2013). Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 45(11), 2061-2071. doi:10.1249/MSS.0b013e3182980125

- Leeder, J., Glaister, M., Pizzoferro, K., Dawson, J., & Pedlar, C. (2012). Sleep duration and quality in elite athletes measured using wristwatch actigraphy. *J Sports Sci*, 30(6), 541-545. doi:10.1080/02640414.2012.660188
- Leischik, R., & Spelsberg, N. (2014). Leistungsdiagnostik und echokardiographische Befunde bei Ironman-Triathleten-Gibt es Hinweise für eine myokardiale Schädigung? *Journal für Kardiologie-Austrian Journal of Cardiology*, 21(5-6), 144-152.
- Leumann, A., Pagenstert, G., Frigg, A., Ebner, L., Hintermann, B., & Valderrabano, V. (2006). Fuß- und Unterschenkel-Stressfrakturen im Sport. *Fuß & Sprunggelenk*, 4(3), 150-157. doi:10.1007/s10302-006-0235-z
- Maier, T., Gross, M., Troesch, S., Steiner, T., Müller, B., Bourban, P., . . . Wehrli, J. (2016). *Manual Leistungsdiagnostik*.
- Markovic, G., Dizdarevic, D., Jukic, I., & Cardinale, M. (2004). Reliability and factorial validity of squat and countermovement jump tests. *J Strength Cond Res*, 18(3), 551-555. doi:10.1519/1533-4287(2004)18<551:Rafvos>2.0.Co;2
- Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., . . . Urhausen, A. (2013). Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Med Sci Sports Exerc*, 45(1), 186-205. doi:10.1249/MSS.0b013e318279a10a
- Meeusen, R., Piacentini, M. F., Busschaert, B., Buyse, L., De Schutter, G., & Stray-Gundersen, J. (2004). Hormonal responses in athletes: the use of a two bout exercise protocol to detect subtle differences in (over)training status. *Eur J Appl Physiol*, 91(2-3), 140-146. doi:10.1007/s00421-003-0940-1
- Meyer, T., Kellmann, M., Ferrauti, A., Pfeiffer, M., & Faude, O. (2013). Die Messung von Erholtheit und Regenerationsbedarf im Fußball. *German Journal of Sports Medicine/Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 64(1).
- Michael Kellmann, S. J., Jürgen Beckmann. (2023). *The Importance of Recovery for Physical and Mental Health Negotiating the Effects of Underrecovery (Advances in Recovery and Stress Research)* (pp. 71-75).
- Micheli, L. (2006). Preventing injuries in sports: What the team physician needs to know. *FIMS Team physician manual*, 555-572.
- Microgate Srl. (2009-2014). <http://www.microgate.it/Home-EN>. Retrieved from <http://www.microgate.it/Home-EN>
- Morgan, W., Brown, D., Raglin, J., O'Connor, P., & Ellickson, K. (1987). Psychological monitoring of overtraining and staleness. *British journal of sports medicine*, 21(3), 107-114.
- Nicolas, M., Vacher, P., Martinet, G., & Mourot, L. (2019). Monitoring stress and recovery states: Structural and external stages of the short version of the RESTQ sport in elite swimmers before championships. *Journal of Sport and Health Science*, 8(1), 77-88. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jshs.2016.03.007>
- Nieman, D. C. (1994). Exercise, infection, and immunity. *Int J Sports Med*, 15 Suppl 3, S131-141. doi:10.1055/s-2007-1021128
- Niess, A., Fehrenbach, E., Northoff, H., & Dickhuth, H. (2002). Freie Radikale und oxidativer Stress bei körperlicher Belastung und Trainingsanpassung-Eine aktuelle Übersicht. *DEUTSCHE ZEITSCHRIFT FÜR SPORTMEDIZIN*, 53(12), 345-353.
- O'Toole, M. L. (1998). Overreaching and overtraining in endurance athletes. *Overtraining in sport*, 3-18.
- Palatini, P., Benetos, A., Grassi, G., Julius, S., Kjeldsen, S. E., Mancia, G., . . . Ruilope, L. M. (2006). Identification and management of the hypertensive patient with elevated

- heart rate: statement of a European Society of Hypertension Consensus Meeting. *Journal of hypertension*, 24(4), 603-610.
- Philips Healthcare. Retrieved from <https://www.philips.com.au/healthcare/product/HC795052/ie33-xmatrix-ultrasound-system>
- Piirainen, J. M., Rautio, T., Tanskanen-Tervo, M. M., Kyröläinen, H., Huovinen, J., & Linnamo, V. (2019). Effects of 10 weeks of military training on neuromuscular function in non-overreached and overreached conscripts. *J Electromyogr Kinesiol*, 47, 43-48. doi:10.1016/j.jelekin.2019.05.008
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Le Meur, Y., Hausswirth, C., Kilding, A. E., & Buchheit, M. (2014). Monitoring training with heart rate-variability: how much compliance is needed for valid assessment? *Int J Sports Physiol Perform*, 9(5), 783-790. doi:10.1123/ijspp.2013-0455
- R Core Team. (2020). R: A Language and Environment for Statistical Computing (Version 3.6.3). Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <https://www.R-project.org/>
- Raglin, J., Morgan, W., & O'Connor, P. (1991). Changes in mood states during training in female and male college swimmers. *International journal of sports medicine*, 12(06), 585-589.
- Roeh, A., Schuster, T., Jung, P., Schneider, J., Halle, M., & Scherr, J. (2019). Two dimensional and real-time three dimensional ultrasound measurements of left ventricular diastolic function after marathon running: results from a substudy of the BeMaGIC trial. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, 35(10), 1861-1869. doi:10.1007/s10554-019-01634-5
- Saboul, D., & Hautier, C. (2019). A New Algorithm to Reduce and Individualize HRV Recording Time. *J Med Syst*, 43(3), 45. doi:10.1007/s10916-019-1167-y
- Sammito, S., & Böckelmann, I. (2016). *Factors influencing heart rate variability*. Paper presented at the International Cardiovascular Forum Journal.
- Sammito, S., Thielmann, B., Seibt, R., Klusmann, A., Weippert, M., & Böckelmann, I. (2014). *AWMF Leitlinie: Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft*.
- Scanlan, A. T., & Dalbo, V. J. (2019). Improving Practice and Performance in Basketball. In: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Schneider, C., Wiewelhove, T., Raeder, C., Flatt, A. A., Hoos, O., Hottenrott, L., . . . Ferrauti, A. (2019). Heart Rate Variability Monitoring During Strength and High-Intensity Interval Training Overload Microcycles. *Front Physiol*, 10(582). doi:10.3389/fphys.2019.00582
- Schulgen/Kristiansen, G., & Schumacher, M. (2002). Cross-Over Studien. In *Methodik klinischer Studien: Methodische Grundlagen der Planung, Durchführung und Auswertung* (pp. 305-317). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schwellnus, M., Soligard, T., Alonso, J.-M., Bahr, R., Clarsen, B., Dijkstra, H. P., . . . Hutchinson, M. R. (2016). How much is too much?(Part 2) International Olympic Committee consensus statement on load in sport and risk of illness. *Br J Sports Med*, 50(17), 1043-1052.
- Sengupta, S. P., Mahure, C., Mungulmare, K., Grewal, H. K., & Bansal, M. (2018). Myocardial fatigue in recreational marathon runners: A speckle-tracking echocardiography study. *Indian heart journal*, 70 Suppl 3(Suppl 3), S229-S234. doi:10.1016/j.ihj.2018.08.005

- Simpson, R. J., Campbell, J. P., Gleeson, M., Kruger, K., Nieman, D. C., Pyne, D. B., . . . Walsh, N. P. (2020). Can exercise affect immune function to increase susceptibility to infection? *Exerc Immunol Rev*, 26, 8-22.
- Skovgaard, C., Almquist, N. W., & Bangsbo, J. (2017). Effect of increased and maintained frequency of speed endurance training on performance and muscle adaptations in runners. *Journal of Applied Physiology*, 122(1), 48-59. doi:10.1152/jappphysiol.00537.2016
- Smith, L. L. (2000). Cytokine hypothesis of overtraining: a physiological adaptation to excessive stress? *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(2), 317.
- Snyder, A. (1998). Overtraining and glycogen depletion hypothesis. *Medicine and science in sports and exercise*, 30(7), 1146-1150.
- Svendsen, I. S., Killer, S. C., Carter, J. M., Randell, R. K., Jeukendrup, A. E., & Gleeson, M. (2016). Impact of intensified training and carbohydrate supplementation on immunity and markers of overreaching in highly trained cyclists. *Eur J Appl Physiol*, 116(5), 867-877. doi:10.1007/s00421-016-3340-z
- Tanskanen, M., Atalay, M., & Uusitalo, A. (2010). Altered oxidative stress in overtrained athletes. *Journal of sports sciences*, 28(3), 309-317.
- Ten Haaf, T., Foster, C., Meeusen, R., Roelands, B., Piacentini, M. F., van Staveren, S., . . . de Koning, J. J. (2019). Submaximal heart rate seems inadequate to prescribe and monitor intensified training. *Eur J Sport Sci*, 19(8), 1082-1091. doi:10.1080/17461391.2019.1571112
- Urhausen, A., Gabriel, H., & Kindermann, W. (1995). Blood hormones as markers of training stress and overtraining. *Sports Med*, 20(4), 251-276. doi:10.2165/00007256-199520040-00004
- Urhausen, A., Gabriel, H., Weiler, B., & Kindermann, W. (1998). Ergometric and psychological findings during overtraining: a long-term follow-up study in endurance athletes. *International journal of sports medicine*, 19(02), 114-120.
- Urhausen, A., & Kindermann, W. (2002). Diagnosis of overtraining: what tools do we have? *Sports Med*, 32(2), 95-102. doi:10.2165/00007256-200232020-00002
- Vogel, R. (2001). «Übertraining»: Begriffsklärungen, ätiologische Hypothesen, aktuelle Trends und methodische Limiten. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 49(4), 154–162.
- Wellek, S., & Blettner, M. (2012). On the proper use of the crossover design in clinical trials: part 18 of a series on evaluation of scientific publications. *Deutsches Ärzteblatt International*, 109(15), 276.
- Welsh, R. C., Warburton, D. E. R., Humen, D. P., Taylor, D. A., McGavock, J., & Haykowsky, M. J. (2005). Prolonged strenuous exercise alters the cardiovascular response to dobutamine stimulation in male athletes. *J Physiol*, 569(Pt 1), 325-330. doi:10.1113/jphysiol.2005.096412
- Yang, J., Xu, L., Yin, X., Zheng, Y. L., Zhang, H. P., Xu, S. J., . . . Ma, J. Z. (2022). Excessive Treadmill Training Produces different Cardiac-related MicroRNA Profiles in the Left and Right Ventricles in Mice. *Int J Sports Med*, 43(3), 219-229. doi:10.1055/a-1539-6702
- Ziv, G., & Lidor, R. (2010). Vertical jump in female and male volleyball players: a review of observational and experimental studies. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(4), 556-567. doi:10.1111/j.1600-0838.2009.01083.x

Danksagung

Im Folgenden möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Dissertation und des gesamten Studiums unterstützt haben.

Vor allem möchte ich meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. med. Johannes Scherr für die Betreuung und die Überlassung des Dissertationsthemas danken. Mein besonderer Dank gilt auch Julia Schönfeld für den regelmäßigen Austausch und die konstruktive Zusammenarbeit. Außerdem möchte ich Herrn PD Dr. rer. nat. Bernhard Haller für die statistische Beratung danken.

Besonderer Dank gilt den Teilnehmern der OperaTUM Studie.

Zuletzt bedanke ich mich von ganzem Herzen bei meinen Eltern, Geschwistern und vor allem meinem Mann Christian für ihren stetigen Zuspruch und die Unterstützung.