



Bundesinstitut  
für Sportwissenschaft

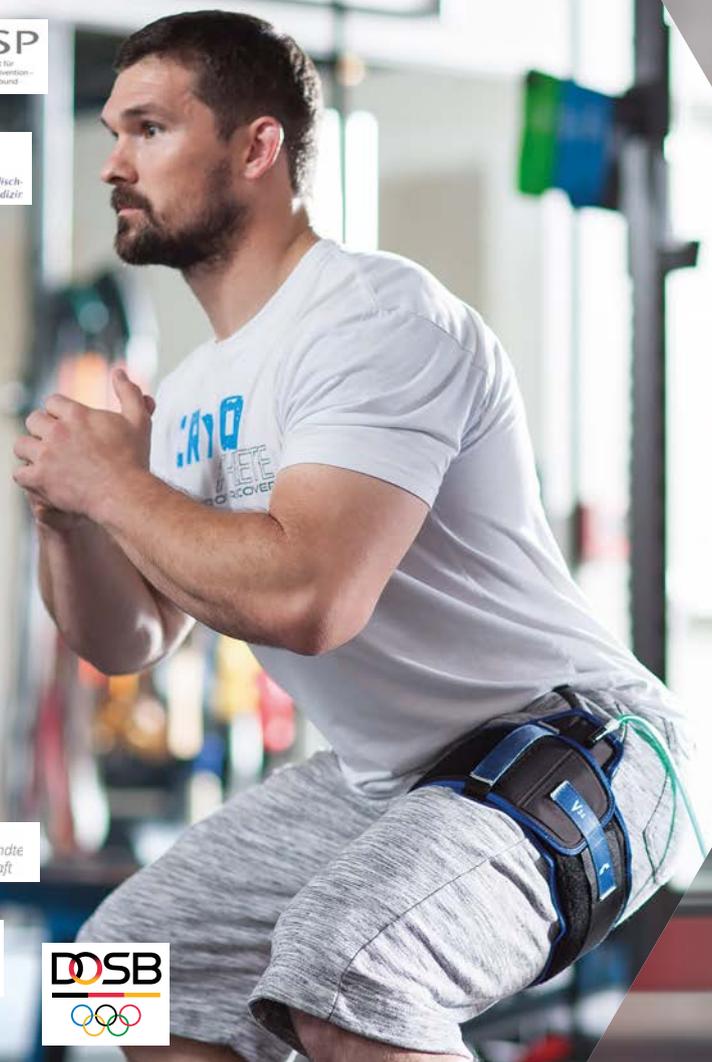


Wir helfen  
dem Sport

Franz · Bielitzki · Behrendt · Centner · Behrens · Held · Donath · Augste · Sandau · Granacher · Hoppe · Wegener · Stadtfeld · Beitzel · Wahl · Fett · Horn · Behringer

# Positionspapier zum Blood-Flow-Restriction Training

Mechanismen, Effekte und Sicherheit des Blutflussrestriktionstrainings mit besonderem Fokus auf die Anwendung im Leistungssport



---

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [https://www.dnb.de/DE/Home/home\\_node.html](https://www.dnb.de/DE/Home/home_node.html) abrufbar.

---

## **Impressum**

### **Herausgeber:**

Bundesinstitut für Sportwissenschaft  
Graurheindorfer Straße 198 · 53117 Bonn  
info@bisp.de  
www.bisp.de

### **Stand:**

Mai 2023

### **Gestaltung:**

A Vitamin Kreativagentur GmbH, Berlin

### **Bildnachweis:**

OwensRecoveryScience

### **Text:**

Franz A.<sup>1</sup>, Bielitzki R.<sup>2</sup>, Behrendt T.<sup>2</sup>, Centner C.<sup>3</sup>, Behrens T.<sup>2</sup>, Held S.<sup>4</sup>, Donath L.<sup>4</sup>, Augste C.<sup>5</sup>, Sandau I.<sup>6</sup>, Granacher U.<sup>3</sup>, Hoppe M.W.<sup>7</sup>, Wegener F.<sup>7</sup>, Stadtfeld T.<sup>8</sup>, Beitzel K.<sup>9</sup>, Wahl P.<sup>4</sup>, Fett D.<sup>10</sup>, Horn A.<sup>10</sup> & Behringer M.<sup>11</sup>

1 Universitätsklinikum Bonn; 2 Otto von Guericke Universität Magdeburg; 3 Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; 4 Deutsche Sporthochschule Köln; 5 Universität Augsburg; 6 Institut für Angewandte Trainingswissenschaft; 7 Universität Leipzig; 8 Sportmedizin Wormeldange; 9 ATOS Orthoparc Klinik Köln; 10 Bundesinstitut für Sportwissenschaft; 11 Goethe-Universität Frankfurt

ISBN 978-3-96523-091-0

Franz · Bielitzki · Behrendt · Centner · Behrens · Held · Donath · Augste · Sandau · Granacher · Hoppe · Wegener · Stadtfeld · Beitzel · Wahl · Fett · Horn · Behringer

# Positionspapier zum Blood-Flow-Restriction Training

Mechanismen, Effekte und Sicherheit des Blutflussrestriktionstrainings mit besonderem Fokus auf die Anwendung im Leistungssport

Gemeinsame Position von  
(in alphabetischer Reihenfolge):

Bundesinstitut für Sportwissenschaft (BISp)  
D-A-CH Vereinigung für Schulter- und Ellenbogenchirurgie (DVSE)  
Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (DGOU)  
Deutsche Gesellschaft für Sportmedizin und Prävention (DGSP)  
Deutsche Vereinigung für Sportwissenschaft (dvs)  
Deutscher Olympischer Sportbund (DOSB)  
Deutscher Verband für Physiotherapie (ZVK)  
Gesellschaft für Arthroskopie und Gelenkchirurgie (AGA)  
Gesellschaft für Orthopädisch-Traumatologische Sportmedizin (GOTS)  
Gesellschaft für Pädiatrische Sportmedizin (GPS)  
Institut für Angewandte Trainingswissenschaft

# Das Papier wurde mitgezeichnet von:





# Zusammenfassung



Für eine optimale Steuerung von Trainingsumfängen und -intensitäten im Leistungssport oder in der Rehabilitation nach Verletzungen und Erkrankungen werden zunehmend neuartige Trainingsmethoden integriert. Das Blutflussrestriktionstraining (engl. Blood-Flow-Restriction Training, BFR) beschreibt eine dieser neuen Trainingsmethoden, bei der es zu einer Anwendung von speziellen Blutdruckmanschetten während der Belastung an den Extremitäten kommt. Seit einigen Jahren mehren sich die Erkenntnisse über diese Trainingsmethode, die aufzeigen, dass auch niedrigintensive Belastungen in Kombination mit einer BFR-Belastung dazu in der Lage sind, u. a. hypertrophe Effekte und Kraftsteigerungen der Skelettmuskulatur zu erzielen. Die Datenlage zur Effektivität des BFR-Trainings im Leistungssport, dessen Sicherheit, mögliches Nebenwirkungsprofil und Anwendungsmöglichkeiten, ist jedoch trotz einer zunehmenden Anzahl an Publikationen noch unzureichend, um konkrete Empfehlungen abzuleiten. Aus diesem Grund zielt das vorliegende Positionspapier darauf ab, eine umfassende Beschreibung der BFR-Trainingsmethode, deren bisher dargestellten Wirkmechanismen und möglichen unerwünschten Wirkungen zu geben. Weiterhin befasst sich die vorliegende Arbeit mit einer wissenschaftlich-basierten Bewertung der Effekte des BFR-Trainings auf den Organismus, der Sicherheit der Trainingsform und der bestehenden Applikationsformen.

Mit Blick auf die wissenschaftlichen Adressaten des BISp sind die aktuell erkennbaren Forschungsdesiderate zum BFR-Training im Anwendungsfeld Leistungs- und Nachwuchssport zusammengefasst. Abschließende Hinweise und Empfehlungen zum wissenschaftlichen Arbeiten mit dem BFR-Training sollen zudem helfen, die Qualität, Aussagekraft und Vergleichbarkeit von zukünftigen Forschungsarbeiten zu steigern.

## Schlagworte

Blood-Flow-Restriction Training, Okklusionstraining, venöse Okklusion, Leistungssport, Nachwuchsleistungssport, mechanischer Stress, metabolischer Stress, Trainierbarkeit, Krafttraining, Forschungsdesiderate, Sicherheit und Kontraindikatoren, Anamnese, Forschungsmethodische Empfehlungen

# Abkürzungen



AE	Aerobic Exercise	LL-RT	Low Load Resistance Training (ohne BFR)
BFR	Blood-Flow-Restriction	LL-BFR-RT	Low Load BFR Resistance Training
CI	Konfidenzintervall	LOP	Limb Occlusion Pressure
eFD	effektiver Filtrationsdruck	LP	Level of Performance
EPR	Exercise Pressure Reflex	MVC	Maximal Voluntary Contraction
ESdiff	Effektstärke Differenz	n.a.	not assessed
hFD	hydrostatischer Filtrationsdruck	NCAA	National Collegiate Athletic Association
HIIT	High-Intensity-Intervalltraining	NW	Nebenwirkung
HL	High Load	pBFR	Practical Blood-Flow-Restriction
HLLV	hohe Last und niedriger Umfang	PFK	Phosphofruktokinase
HLHV	hohe Last und hoher Umfang	RT	Resistance Training
HL-RT	High Load Resistance Training (ohne BFR)	UE	unerwartete Ereignisse
HL-BFR-RT	High Load BFR Resistance Training	ÜIH	Übungsinduzierte Hypoalgesie
IPC	Ischemic Preconditioning	VKB-P	Vordere Kreuzband-Plastik
kFD	kolloidaler Filtrationsdruck	VO <sub>2</sub> max	Maximale Sauerstoffaufnahme
KI	Kontraindikation	1RM	One-Repetition-Maximum
LE	Level of Evidence	3RM	Three-Repetition-Maximum
LL	Low Load		

# Inhaltsverzeichnis



<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Akute physiologische Reaktionen und langfristige Anpassungen</b> .....	<b>16</b>
2.1	Skelettmuskulatur .....	17
2.2	Skelettmuskelmasse .....	17
2.3	Kraft .....	18
2.4	Ermüdungsresistenz .....	19
2.5	Neuromuskuläre Ansteuerung .....	20
2.6	Sehnen und Knochen .....	21
2.7	Kardiovaskuläres System .....	22
2.8	Venöses Gefäßsystem / venöser Blutdruck .....	22
2.9	Filtrationsdruck und Muskelschwellung .....	23
2.10	Neuronales System .....	24
2.11	Kognitive Funktionen .....	25
<b>3</b>	<b>Zielgruppen</b> .....	<b>28</b>
3.1	Leistungssport .....	29
3.2	Nachwuchsleistungssport .....	30
3.3	Rehabilitation .....	32
<b>4</b>	<b>BFR-Varianten und Applikationen</b> .....	<b>34</b>
4.1	Bestimmung des Restriktionsdrucks .....	35
4.2	Individualisierung des arteriellen Okklusionsdrucks .....	35
4.3	Manschettendruck beim Blood-Flow-Restriction Training .....	36
4.4	Manschettenbreite .....	36
4.5	Kontinuierliches vs. intermittierendes Blood-Flow-Restriction Training .....	37
4.6	Mechanische Last beim Blood-Flow-Restriction Training .....	38
4.7	Practical Blood-Flow-Restriction .....	39
4.8	Blood-Flow-Restriction vs. Ischemic Preconditioning .....	41
4.9	Blood-Flow-Restriction vs. Flossing .....	41
<b>5</b>	<b>Risiken und Kontraindikationen des Blood-Flow-Restriction Training</b> .....	<b>44</b>
5.1	Allgemeine unerwünschte Nebenwirkungen .....	45
5.2	Venöse Thromboseentwicklung .....	45
5.3	Venöse Insuffizienz .....	46
5.4	Kardiovaskuläre Vorerkrankungen .....	47
5.5	Muskelerkrankungen und muskuläre Schädigung .....	47
5.6	Erkrankungen des Blutes, innerer Organe und des Stoffwechsels sowie Tumorerkrankungen .....	48
<b>6</b>	<b>Allgemeine und sicherheitsbezogene Hinweise zum BFR-Training</b> .....	<b>50</b>
6.1	Manschetten .....	51
6.2	Protokolle .....	51
<b>7</b>	<b>Ableitungen für den Einsatz von BFR-Training im Leistungssport</b> .....	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>Forschungsdesiderate</b> .....	<b>58</b>

<b>9</b>	<b>Planung und Dokumentation wissenschaftlicher Studien</b> .....	<b>62</b>
<b>10</b>	<b>Orientierungshilfe für das wissenschaftliche Arbeiten mit BFR-Training</b> .....	<b>64</b>
10.1	Begründung der Fragestellung und des Designs eines wissenschaftlichen Projekts .....	65
10.2	Abklärung von Kontraindikationen und Management der individuellen Compliance .....	65
10.3	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse mit bestehender Literatur .....	67
<b>11</b>	<b>Danksagung</b> .....	<b>70</b>
<b>12</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>72</b>
<b>13</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>90</b>



# 1 Einleitung



Das Blutflussrestriktionstraining (engl.: Blood-Flow-Restriction (BFR) Training) bezeichnet eine Trainingsmethode, bei der mit Hilfe von aufblasbaren Manschetten oder elastischen/ rigiden Bändern, die möglichst proximal an den Extremitäten angebracht werden, der arterielle Zufluss zur distal gelegenen Muskulatur reduziert und der venöse Rückstrom während einer Belastung unterbunden werden. Infolgedessen kommt es zu einer lokalen Hypoxie, einer Akkumulation von Metaboliten (z. B. Laktat, anorganischem Phosphat,  $H^+$ -Ionen) und einer Minderung energiereicher Substrate. Unter diesen Bedingungen scheinen bereits deutlich niedrigere Lasten als bei einem traditionellen Krafttraining auszureichen, um vergleichbare Muskelzuwächse zu erzielen und die Muskelkraft zu erhöhen. Vor diesem Hintergrund ist das BFR-Training weit mehr als nur ein weiterer Fitnesstrend. Zum einen zwingen diese Erkenntnisse, einige Grundlagen der Muskelphysiologie neu zu überdenken, zum anderen eröffnen sie neue Möglichkeiten in der Trainingsgestaltung im Leistungs-, Fitness- und Gesundheitssport.

Entsprechend erfährt die Anwendung des BFR-Trainings aktuell ein gesteigertes Interesse im Sport allgemein sowie speziell auch im Leistungssport, vom Spitzen- bis hin zum Nachwuchsleistungssport. Diese Entwicklung ist begleitet von einer Zunahme an wissenschaftlichen Aktivitäten im Bereich der leistungsportorientierten Anwendungsforschung, wie sie in Deutschland vom Bundesinstitut für Sportwissenschaft (BISp) gefördert und mit Wissenstransfermaßnahmen in Richtung Sportpraxis und Wissenschaft begleitet wird. Neben wissenschaftlicher Evidenz zur Wirksamkeit finden sich weiterhin Hinweise auf medizinische Implikationen, einschließlich Kontraindikatoren, in den verschiedenen internationalen Forschungsarbeiten zum BFR-Training. Eine sichere Anwendung des BFR-Trainings ist somit unbedingt anzustreben. Demzufolge sind Anwendungsempfehlungen (des BISp) für das BFR-Training im Leistungssport nur evidenzbasiert und auf

Grundlage eines Verständnisses über Wirkmechanismen und potenzielle Risiken zu formulieren. Hierzu wurde in gemeinsamer Initiative des BISp und dessen Projektnehmer das vorliegende Positionspapier in Zusammenarbeit mit ausgewiesenen wissenschaftlichen Expertinnen und Experten aus den Bereichen Sportwissenschaft und Medizin entwickelt. Es fasst den aktuellen Wissensstand sowie aktuelle Forschungsdesiderate mit spezifischem Bezug zum Leistungssport zusammen und gibt wissenschaftlich-methodische Empfehlungen für die Anwendungsforschung sowie Hinweise für die Trainingspraxis. Damit soll es Orientierungshilfe für potenzielle Antragstellerinnen und Antragsteller des BISp sein, Akteure der Sportpraxis zur informierten und reflektierten Anwendung des BFR-Trainings befähigen und insgesamt den allgemeinen und wissenschaftlichen Diskurs zum Thema fördern. Damit tragen das BISp und die Autorinnen und Autoren des Positionspapiers zu einer humanen, gesundheitlich unbedenklichen und zugleich effizienten Unterstützung des Leistungssports im Nachwuchs- und Spitzenbereich bei.

Das vorliegende Positionspapier berücksichtigt nicht die Besonderheiten des Behindertensports, da es den Rahmen dieses wissenschaftlichen Projektes übersteigen würde. Für den Behindertensport ist zukünftig eine gesonderte Betrachtung erforderlich.

Um einen möglichst hohen Anwendungsbezug für den Leistungssport herstellen zu können, wurde dieses Positionspapier nicht als klassische systematische Literaturlanalyse angelegt, sondern eine spezielle Klassifizierung der zitierten Studien nach Level-of-Evidenz (LE) sowie Level-of-Performance (LP) durchgeführt. Die LE-Klassifizierung kategorisiert wissenschaftliche Arbeiten in sogenannte Evidenzstufen, welche auf der Grundlage der methodischen Qualität ihres Designs, ihrer Gültigkeit und ihrer Anwendbarkeit auf die praktische Arbeit mit Probanden/ Patienten definiert werden. Diese Evidenzstufen geben den „Grad/Stärke der Empfehlung“ des in

der Arbeit beschriebenen Sachverhaltes wider [162]. Im Zuge der LE-Klassifizierung wurde für einen evidenz-basierten Sachverhalt immer die höchstbewertete wissenschaftliche Publikation anhand der in Tabelle 1 dargestellten Evidenzgrade berücksichtigt.

**Tab. 1: Übersichtstabelle der LE-Klassifikation nach Shekelle et al. [162]**

LE	Description
1A	Evidence from meta-analysis of randomized controlled trials
1B	Evidence from at least one randomized controlled trial
2A	Evidence from at least one controlled study without randomization
2B	Evidence from at least one other type of quasi-experimental study
3	Evidence from non-experimental descriptive studies, such as comparative studies, correlation studies, and case-control studies
4	Evidence from expert committee reports or opinions or clinical experience of respected authorities, or both

Die Anwendung des BFR-Trainings sowie die Untersuchung von dessen Auswirkungen im Leistungssport kennzeichnen ein spezielles Themenfeld in der sportwissenschaftlichen Forschung, die von Untersuchungen mit anderen Probandenkollektiven abgegrenzt werden müssen. Aus diesem Grund wurde sich bei der Erstellung dieses Positionspapiers an den Kriterien der LP-Klassifikation für unterschiedliche sportliche Niveaustufen nach McKay et al. [111] orientiert. Im Zuge dieser Einteilung werden die Probandinnen und Probanden der jeweiligen Studie in eine von sechs Kategorien eingeteilt (siehe Tabelle 2).

Anhand dieser Klassifizierung lässt sich die Wertigkeit und Übertragbarkeit des publizierten Sachverhaltes für den Leistungssport anhand der Leistungsmerkmale des Probandenkollektivs der jeweiligen Studie ableiten. Deshalb wurde, wenn vorhanden, in jedem der folgenden Kapitel eine gesonderte Beschreibung der bisher publizierten Ergebnisse aus einem Leistungssportkollektiv eingefügt. Für diese gesonderten Abschnitte wurden vorrangig Studienergebnisse verwendet, die ein Probandenkollektiv mindestens nach LP-Kategorie  $\geq 3$  untersucht haben.

**Tab. 2: Übersichtstabelle der LP-Klassifikation nach McKay et al. [111]**

<b>LE</b>	<b>Description</b>
5	World Class Athletes
4	Elite/International Level Athletes
3	Highly Trained/National Level Athletes
2	Trained/Developmental Subjects
1	Recreational Active Subjects
0	Sedentary Subjects

## 2 Akute physiologische Reaktionen und langfristige Anpassungen



## 2.1 Skelettmuskulatur

Die Skelettmuskulatur ist durch eine ausgeprägte Plastizität gekennzeichnet. Je nach Nutzung kommt es zu unterschiedlichen funktionellen und strukturellen Gewebeanpassungen, was man sich im Training zu Nutze macht. Die Spezifik des Trainingsreizes (u. a. Art und Frequenz) ist dabei entscheidend für die Art der Anpassung. Hohe mechanische Belastungen führen in der Regel zu einer Adaptation der neuromuskulären Ansteuerung und der Muskelmasse. Strukturelle Veränderungen beinhalten aber auch eine Anpassung der Muskelarchitektur sowie der kraftübertragenden Strukturen, wie den bindegewebigen Faszien und Sehnen. Metabolische Belastungen, wie sie typischerweise im Ausdauertraining auftreten, führen hingegen eher zu solchen Veränderungen, welche die aerobe Energiebereitstellung fördern. Dazu gehören unter anderem die Zunahme der Zahl und Größe von Mitochondrien, ihr Enzymbesatz, die Blutversorgung der Muskulatur durch die Neubildung von Gefäßen und die Umwandlung von Typ-II zu Typ-I Muskelfasern. Der Übergang zwischen mechanischen und metabolischen Trainingsreizen ist jedoch fließend und gerade beim BFR-Training, wird eine niedrigintensive mechanische Belastung, durch die Minderung der arteriellen Sauerstoffversorgung sowie eine Blockierung des venösen Blutrückstroms, mit einer metabolischen Stresssituation kombiniert. Welche akuten und chronischen Anpassungen dies in der Skelettmuskulatur zur Folge hat, wird in den folgenden Kapiteln zusammengefasst.

## 2.2 Skelettmuskelmasse

Das Wachstum eines Gewebes durch Größenzunahme seiner Zellen wird als Hypertrophie bezeichnet. Bei der Skelettmuskulatur zählt diese Form des Wachstums zu den zentralen strukturellen Anpassungen an ein Krafttraining. In den letzten zwei Jahrzehnten konnten, mit Hilfe molekularer Untersuchungsmethoden, immer

mehr der zugrundeliegenden Signalkaskaden identifiziert werden [59]. Weniger Informationen existieren bislang über die Stimuli und die dazugehörigen Rezeptoren, welche im Zusammenspiel die anabolen Signalkaskaden auslösen [185]. Es wird jedoch vermutet, dass die mechanische Spannung (durch Kontraktion oder Dehnung der Muskulatur), die belastungsinduzierte Faserschädigung, der metabolische Stress sowie die daraus resultierende Schwellung der Muskelzellen von entsprechenden Rezeptorsystemen wahrgenommen werden und eine erhöhte Proteinsynthese verursachen [155]. Während für solche Anpassungen laut den Guidelines der führenden sportwissenschaftlichen Gesellschaften Belastungen mit hohen mechanischen Intensitäten von > 65 % des Einwiederholungsmaximums (one-repetition-maximum, 1RM, [6]) benötigt werden, zeigen Krafttrainingsbelastungen mit BFR bei bereits 20-30 % des 1RM ähnliche langfristige Anpassungen. Da beim BFR-Training in der Regel keine belastungsinduzierten Schädigungen auftreten, ist es aktuell noch fraglich welche physiologischen Mechanismen als die Ursachen dieser Anpassungen anzusehen sind.

Es wird vermutet, dass der erhöhte metabolische Stresszustand in Kombination mit einer vergleichsweise geringen mechanischen Belastung synergistische Wirkungen erzielt und daher bei einem Training mit BFR eine zentrale Rolle als anaboles Signal einnimmt [51, 132]. Dieser Stress könnte über Schmerzafferenzen (neuronalen Fasern vom Typ-III und Typ-IV) langsame motorische Einheiten hemmen und damit zu einer vorzeitigen Rekrutierung schneller Muskelfasern führen, eine Ausschüttung anaboler Hormone (wie Testosteron und Wachstumshormon) bedingen und eine Schwellung der Muskelzellen durch Akkumulation osmotisch wirksamer Metaboliten führen [73, 79]. Die ausgeprägte BFR-induzierte Schwellung konnte in einer aktuellen Studie mit Hilfe von speziellen MRT-Sequenzen nachgewiesen werden [63].

Daten aus einer Meta-Analyse von Lixandrão et al. [95] bestätigen, dass bei einem leichten Krafttraining mit BFR (low-load BFR resistance training, LL-BFR-RT) deutlich geringere Widerstände benötigt werden (20-30 % des 1RM), um vergleichbare Muskelzuwächse respektive eines traditionellen Krafttrainings mit hohen Widerständen (high-load resistance training, HL-RT) zu induzieren (ESdiff:  $0,10 \pm 0,10$ ; 95 % CI:  $-0,10 - 0,30$ ). Eine weitere Meta-Analyse von Loenneke et al. [102] zeigt zudem, dass ein Krafttraining mit geringen Widerständen (LL-RT, 15 % bis 30 % des 1RM bzw. der maximal willkürlichen Muskelkontraktion (maximal voluntary contraction, MVC)), welches ohne BFR und nicht bis zur muskulären Ermüdung durchgeführt wird, keinen adäquaten Reiz zur Erhöhung der Muskelmasse darstellt (ES:  $0,02$ ; 95 % CI:  $-0,02 - 0,06$ ;  $p > ,05$ ). Erst die Kombination aus LL-RT und BFR induziert nachweisbare Muskelzuwächse (ES:  $0,39$ ; 95 % CI:  $0,35 - 0,43$ ).

Die positiven Effekte von LL-BFR-RT lassen sich teilweise im Leistungssport nachweisen. So konnten Bjørnsen et al. [18] zeigen, dass 6,5 Wochen LL-BFR-RT (30 % 1RM) bei 19 Powerliftern (LP 3) zu einem 12 %igen Anstieg der Muskelfaserquerschnittsfläche der Typ-I Fasern führte, während das HL-RT (60-85 % 1RM) keine Zuwächse induzierte. Vergleichbare Effekte konnten auch bei Division IA Collegiate Footballspielern gefunden werden [197] (LP 4), während andere Studien diese Zuwächse im Leistungssport [104, 160] (LP 3) nicht finden konnten.

## 2.3 Kraft

Die konditionelle Fähigkeit „Kraft“ liefert in vielen Sportarten einen entscheidenden Beitrag zur sportlichen Leistungsfähigkeit. Daher ist es nicht verwunderlich, dass Krafttraining heute als ein fester Bestandteil in den allermeisten Trainingsprogrammen des Leistungssports zu finden ist. Krafttraining wurde dabei traditionell als die regelmäßige Überwindung solcher exter-

nen Lasten verstanden, die einen ausreichend hohen mechanischen Stress auf die Muskelzellen ausüben, um anabole Signalkaskaden zu induzieren.

In den letzten Jahren ist jedoch eine stetige Zunahme an Publikationen zu verzeichnen, welche die Bedeutung bzw. die Höhe des mechanischen Stresses für die Auslösung der genannten muskulären Adaptationen in Frage stellen. So konnte in zahlreichen Studien gezeigt werden, dass auch ein Krafttraining mit niedrigen externen Widerständen ( $<50$  % 1RM, low-load, LL-RT) die Muskelkraft erhöhen kann, wenn zeitgleich der arterielle Blutfluss zur arbeitenden Muskulatur gedrosselt und der venöse Rückfluss unterbunden oder die Übung bis zur absoluten Muskelererschöpfung durchgeführt wird. Lixandrão und Kollegen [95] kamen 2018 in ihrer systematischen Übersichtsarbeit und Meta-Analyse zu dem Ergebnis, dass ein LL-BFR-RT im Vergleich zu einem traditionellen HL-RT, geringere Kraftzuwächse induziert, operationalisiert über das 1RM für Tests der oberen und unteren Extremität (ESdiff:  $0,63 \pm 0,09$ ; 95 % CI:  $0,43 - 0,80$ ). Diese Arbeit umfasste insgesamt 12 Studien (mit insgesamt 460 Probandinnen und Probanden), welche die Muskelkraftzuwächse zwischen LL-BFR-RT und HL-RT verglichen hatten. In der zwei Jahre später veröffentlichten Übersichtsarbeit und Meta-Analyse von Grønfeldt et al. [60], welche 16 Studien inkludierten, fanden die Autoren hingegen keinen signifikanten Unterschied mehr zwischen LL-BFR und HL-RT im Hinblick auf die trainingsinduzierten Kraftzuwächse (SMD:  $-0,17$ ; 95 % CI:  $-0,40 - 0,05$ ).

Hinsichtlich der Effekte eines LL-BFR-RT im Leistungssport, sind die Ergebnisse nicht einheitlich. Manche Studien fanden positive Effekte eines LL-BFR-RT in Ergänzung zum regulären Krafttraining [104, 197] (LP 3, 4) oder eines HL-BFR-RT [31] (LP 3) auf die Kraftentwicklung der Sportlerinnen und Sportler, während andere Studien diese Vorteile nicht bestätigen konnten [18, 160] (LP 3). Auch Held und Kollegen [65],

welche BFR während niedrig-intensivem Rudern einsetzten, konnten keinen Effekt auf das 1RM der Kniebeuge nachweisen (LP 3).

## 2.4 Ermüdungsresistenz

Wiederholte Kontraktionen der Muskulatur führen, in Abhängigkeit der Intensität, zu einem unterschiedlich schnellen Nachlassen der mechanischen Leistungsfähigkeit, was als muskuläre Ermüdung bezeichnet wird. Die zugrundeliegenden peripheren und zentralen Mechanismen sind komplex und noch nicht komplett verstanden. Entgegen früheren Annahmen wird jedoch davon ausgegangen, dass zentrale Mechanismen (wie eine Abnahme der motorischen Aktivierung oder eine verminderte Erregbarkeit der Alpha-Motoneurone) in der Regel am Rückgang der Kraftfähigkeit beteiligt sind und der Einfluss von Laktat und  $H^+$ -Ionen von geringerer Bedeutung sind, als lange Zeit angenommen [3, 190]. Auch eine Verarmung an verfügbarer Energie erscheint unwahrscheinlich, da die ATP-Konzentration selbst unter intensiver Belastung nicht unter 20 % des Ruhewertes abfällt [83]. Aktuell geht man davon aus, dass die intrazelluläre Akkumulation von anorganischem Phosphat eine zentrale Rolle im Ermüdungsprozess einnimmt [190]. Eine zeitgleich einsetzende metabolische Azidose mit assoziierter allosterischer Downregulation von Schlüsselenzymen des (anaeroben) Stoffwechsels (z. B. Phosphofruktokinase, PFK) verstärken möglicherweise diesen Effekt [122]. Hinzukommen mögliche Einflüsse durch reaktive Sauerstoffspezies und Verschiebungen der intra- und extrazellulären Ionenkonzentrationen und eine damit einhergehende Veränderung der muskulären Erregbarkeit [3]. So führt beispielweise eine extrazelluläre Kalium- und intrazelluläre Natriumakkumulation zu einer Störung der Erregungsleitung, welche zur muskulären Ermüdung beitragen kann.

In einer aktuellen Untersuchung von Pignanelli et al. [138], in welcher die Probanden über sechs

Wochen mit einem Bein ein LL-BFR-RT und mit dem anderen ein LL-RT der Kniestrecker durchführten, zeigte das mit BFR trainierte Bein eine stärkere Verbesserung der Ermüdungsresistenz, als das mit LL-RT trainierte Bein, obwohl beide Protokolle bis zum Muskelversagen durchgeführt wurden. Der Ermüdungstest bestand aus 30 maximalen isokinetischen Kontraktionen der Kniestrecker bei  $180^\circ \cdot s^{-1}$ . Während beide Beine über die ersten 10 Kontraktionen des Tests eine vergleichbare Verbesserung nach dem Training aufwiesen, zeigte im mittleren Teil des Tests (11.-20. Wiederholung) nur das LL-BFR-RT trainierte Bein einen Leistungsanstieg von etwa 18 % im Vergleich zu den Ausgangswerten, die im Ermüdungstest vor dem Training gemessen wurden. Dieser Unterschied ließ sich nicht durch seitendifferente Veränderungen der Muskelkraft, der Muskelmasse, der mitochondrialen respiratorischen Kapazität oder der kapillaren Gefäßversorgung erklären. Die Autoren vermuten, dass sich die anaerobe Energiebereitstellung durch das BFR-Training verbessert hat, wodurch ermüdungsbedingte Veränderungen der intra- und extrazellulären Ionenkonzentrationen gemindert und damit die Erregbarkeit aufrecht gehalten werden konnte.

Gestützt wird diese These, so die Autoren weiter, durch eine Studie von Christiansen et al. [29], welche nach einem sechswöchigen Fahrradintervalltraining in Kombination mit BFR nicht nur eine höhere Leistungsfähigkeit, sondern auch eine geringere extrazelluläre Kaliumakkumulation fanden. Dies war zum Teil auf eine Zunahme der  $Na^+K^+$ -ATPase-Isoformen zurückzuführen. Auch Corvino et al. [130] kommen zu dem Ergebnis, dass die Ermüdungsresistenz durch ein BFR-Training verbessert werden kann. Nach einem vierwöchigen, niedrig-intensiven Intervalltraining auf einem Fahrradergometer, verbesserte sich die Zeit bis zur Erschöpfung ( $T_{lim}$ ) in der BFR-Gruppe (Pre:  $227 \pm 44$  s vs. Post:  $338 \pm 76$  s), nicht aber in der Kontrollgruppe (Pre:  $236 \pm 24$  s vs. Post:  $212 \pm 26$  s).

Bislang liegen keine Daten zur BFR-induzierten Verbesserung der Ermüdungsresistenz von Leistungssportlerinnen und Leistungssportlern vor. Da jedoch ein Zusammenhang zwischen muskulärer Ermüdung und dem Verletzungsrisiko der Skelettmuskulatur für bestimmte Pathologien vermutet wird [107], ist die Prüfung etwaiger Effekte des BFR-Trainings auf die Ermüdungsresistenz, von großem sportmedizinischem und sportpraktischem Interesse.

## 2.5 Neuromuskuläre Ansteuerung

Im Hinblick auf muskuläre Anpassungen nach Krafttraining, können Verbesserungen der Muskelkraft nicht nur durch die Qualität und Quantität der involvierten Muskeln erklärt werden, sondern auch durch Anpassungen auf Ebene der neuronalen Ansteuerung [150]. Wie in vorherigen Kapiteln dargestellt, scheint es bei einem LL-BFR-RT zu inhomogenen Adaptationen der Muskelhypertrophie und der Muskelkraft im Vergleich zum konventionellen hoch-intensiven Krafttraining (> 70 % 1RM) zu kommen. Während sich die Muskelhypertrophie durch LL-BFR-RT ähnlich den Effekten des HL-RT verhält, zeigen sich in puncto Kraftzuwächse größere Effekte beim HL-RT. Aus diesem Grund richtete sich der Fokus einer Vielzahl mechanistischer Studien auf die Veränderungen der neuromuskulären Ansteuerung bei dieser Trainingsmethode. Bei dieser Betrachtung sind sowohl kurzfristige Veränderungen als auch langfristige Adaptationen der neuromuskulären Ansteuerung von Interesse. In einer systematischen Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse konnten Cerqueira und Kollegen [27] bestätigen, dass die muskuläre Erregbarkeit nach einem einmaligen LL-BFR-RT gesteigert werden kann, wenn nicht bis zur muskulären Ermüdung trainiert wird. Die Tatsache, dass diese Potenzierung der muskulären Ansteuerung bei einem Training bis zur Ausbelastung nicht weiter beobachtbar ist, legt nahe, dass dem Ermüdungszustand generell

eine einflussnehmende Bedeutung zukommt. Im Rahmen dieser quantitativen Zusammenfassung von Primärstudien konnte ebenfalls gezeigt werden, dass die Höhe der neuromuskulären Erregbarkeit von dem mechanischen Stress während des Trainings abhängig ist. So führte, unabhängig von der Ermüdung, ein HL-RT zu einer größerer myoelektrischen Aktivierung im Vergleich zu einem LL-BFR-RT.

In Experimenten mit langfristiger und repetitiver Ausübung eines LL-BFR-RT konnten Meta-Analysen von Centner et al. [25] und Cerqueira et al. [27] eine größere myoelektrische Aktivierung feststellen, wenn zu LL-RT eine Blutflussrestriktion hinzugefügt wird. Hierbei wurden Studien ab einer Trainingsdauer von vier Wochen eingeschlossen. Längsschnittliche Vergleiche von LL-BFR-RT zu HL-RT sind jedoch teilweise widersprüchlich. Es liegen Studien vor, welche keine Unterschiede beobachten konnten [16, 144] und Untersuchungen, welche eine höhere muskuläre Erregbarkeit nach einem HL-RT nachwiesen.

Die aktuelle Evidenzlage zur Verbesserung der neuromuskulären Ansteuerung im Leistungssport durch BFR-Training ist derzeit noch unzureichend, um eine konkrete Handlungsempfehlung auszusprechen, da die überwiegende Anzahl an Studien mit freizeitaktiven Probandinnen und Probanden durchgeführt wurde. Eine Studie von Manimmanakorn et al. [108] bei weiblichen Netball-Spielerinnen (LP 2) legt jedoch nahe, dass vergleichbare Effekte zu erwarten sind. In der Studie wurde ein fünfwöchiges Training der unteren Extremität durchgeführt und jeweils vor und nach der Intervention die myoelektrische Aktivität quantifiziert. Die Ergebnisse zeigen, dass die muskuläre Erregbarkeit durch LL-BFR-RT im Vergleich zu einem LL-RT gesteigert werden kann.

## 2.6 Sehnen und Knochen

Die menschlichen Sehnen haben als Verbindungsstück zwischen Muskel und Knochen diverse Funktionen und sind essenziell für die Durchführung effizienter Bewegungen [191]. Aufgrund ihrer viskoelastischen Eigenschaften leisten die Sehnen einen Beitrag an der Speicherung und Rückgewinnung von Energie und schaffen günstige Bedingungen im Sinne eines verbesserten Kraft-Längen-Geschwindigkeit-Verhältnisses beteiligter Muskelfasern [84]. Tendinöse Strukturen können sich dabei durch ihre Mechanosensitivität an mechanische Belastungen und Dehnungen anpassen. Hierdurch kann sowohl deren Stiffness als auch Zunahme des Querschnitts begünstigt werden [191]. Bisherige Untersuchungen deuten darauf hin, dass primär mechanische Belastungen ab einer Intensität von  $> 70\%$  1RM zu positiven Anpassungen in der Sehnensteifigkeit führen [19]. Kürzlich erschienene Studien deuten jedoch darauf hin, dass auch LL-BFR-RT zu vergleichbaren Anpassungen führen kann [24, 26]. Innerhalb eines randomisiert-kontrollierten Designs konnten sowohl an der Achillessehne [26] als auch an der Patellasehne [24] Anpassungen der Sehnenstiffness und des -querschnitts beobachtet werden. Diese Ergebnisse unterscheiden sich jedoch von einer früheren Studie von Kubo und Kollegen [93], welche keine signifikanten Auswirkungen des BFR-Trainings zeigen konnten. Ob diese Diskrepanz auf methodische (z. B. Magnetresonanztomographische vs. Ultraschall Untersuchungen) oder design-spezifische Gründe (z. B. Trainingsdauer) zurückzuführen ist, bleibt jedoch unklar, da die zugrundeliegenden Mechanismen dieser Adaptationen bisher nur unzureichend bekannt sind.

Im Bereich des Leistungssports sind die Effekte des BFR-Trainings auf Sehneneigenschaften nicht untersucht und bisherige Effekte beschränken sich primär auf Anpassungen bei jungen, gesunden männlichen Probanden. Neben dem Einfluss auf muskuläre und tendinöse

Strukturen, konnten bisherige Studien auch erste Hinweise zu positiven Effekten des BFR-Trainings auf den Knochenmetabolismus liefern.

Akute Auswirkungen auf den Knochenstoffwechsel untersuchten Bemben et al. [15] im Vergleich eines LL-BFR-RT und LL-RT auf Knochenbiomarker im Serum von jungen Männern im Alter von 18-30 Jahren. Die Ergebnisse zeigten, dass ein LL-RT im Vergleich zu einem LL-BFR-RT zu einer signifikanten Reduktion von Knochenresorptionsmarkern (Cross-linked N-TelPeptide von Typ-I Kollagen) im Serum führte. Diese Effekte konnten ebenfalls innerhalb einer Längsschnittstudie bestätigt werden. Hierbei untersuchten Beekley und Kollegen [10] die Auswirkungen eines dreiwöchigen Gehtrainings mit BFR auf die Osteoblastenaktivität mittels der Messung knochenspezifischer alkalischer Phosphatase. Die Autoren konnten zeigen, dass die Osteoblastenaktivität nach der BFR-Intervention signifikant zunahm im Vergleich zur Intervention ohne BFR. Diese Befunde legen nahe, dass spezifische BFR-induzierte Reize, z. B. der lokale hypoxische Reiz, auch zur Erhöhung des Knochen-Turn-Overs führen kann und damit positive Effekte auf das Knochenmaterial haben könnte. Die zugrundeliegenden molekularen Mechanismen für diese Adaptationen sind noch weitgehend unklar. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Hypoxie über eine Aktivierung von Hypoxie-induzierbaren Transkriptionsfaktoren die Osteogenese fördert [7].

Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass nicht alle Studien positive Effekte darlegen konnten. So berichten Kim et al. [88], dass LL-BFR-RT bei 18-35 Jahre alten Männern weniger effektiv war, um den Knochenaufbau zu steigern als klassisches HL-RT. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass bislang wenige Studien zum Effekt von LL-BFR-RT auf das Knochengewebe vorliegen.

Daten zum Effekt von BFR-Training auf das Knochengewebe von Athletinnen und Athleten liegen bislang nicht vor.

## 2.7 Kardiovaskuläres System

Körperliche Belastung wird in der Regel von einem akuten Anstieg des arteriellen Blutdrucks begleitet. Grund dafür sind eine Sympathikusvermittelte Erhöhung des Herzzeitvolumens und ein Anstieg des peripheren Widerstandes. Neben dem Feed-Forward-Mechanismus höherer Gehirnzentren, ist der Sympathikotonus durch den sogenannten Exercise Pressor Reflex (EPR, Feed-back-Mechanismus) zu erklären. Nach aktuellen Vorstellungen [61], besteht dieser EPR aus einem mechanischen Anteil (Mechanoreflex, vornehmlich über Typ-III Afferenzen vermittelt) und einem metabolischen Anteil (Metaboreflex, vornehmlich über Typ-IV Afferenzen vermittelt). Da die Akkumulation von Metaboliten beim BFR-Training besonders stark ausfällt, ist eine sympathische Vasokonstriktion und ein ausgeprägter Anstieg des Blutdrucks naheliegend.

Eine Meta-Analyse von Domingos und Polito [39] konnte jedoch keine Unterschiede in den systolischen und diastolischen Blutdruckanstiegen (overall effect) zwischen einem HL-RT und einem LL-BFR-RT finden. Auch die Anstiege während einem LL-RT (<60 % 1RM) waren mit den Werten des LL-BFR-RT vergleichbar. Die systolischen und diastolischen Blutdruckwerte lagen 30-60 min nach dem LL-BFR-RT sogar niedriger als nach dem traditionellen Krafttraining ohne BFR, was für einen akuten hypotensiven Effekt des BFR-Trainings spricht.

Neben den beschriebenen akuten Veränderungen stellt sich jedoch die Frage, ob das BFR-Training auch langfristige Anpassungen des Blutdrucks induziert. Eine aktuelle Meta-Analyse von Wong et al. [193] kam zu dem Ergebnis, dass ein BFR-Training (2-12 Wochen) im Vergleich zu einer gleichen Belastung ohne BFR zu einem signifikanten Anstieg des systolischen (MD: 4,2; CI: 0,3 - 8,0;  $p=0,031$ ) nicht aber des diastolischen Ruheblutdrucks (MD: 1,2; CI: -1 - 3,5 mmHg;  $p=0,274$ ) bei normotensiven Personen führt.

Aufgrund fehlender Ruheherzfrequenz-Unterschiede zwischen BFR- und nicht BFR-Trainingsgruppen, vermuten die Autoren einen Anstieg des peripheren Gefäßwiderstands als Ursache für den Anstieg des systolischen Blutdrucks, merken jedoch an, dass mit nur vier inkludierten Studien, die Evidenz für diese Veränderung gering ist. Es ist jedoch anzumerken, dass BFR-Training zwar die Expression von mRNA angiogener Faktoren (z. B. VEGF, VEGFR-2, HIF-1 $\alpha$  und eNOS) steigert, diese jedoch möglicherweise nicht die Proteinexpression und damit die Verbesserung der Endothelfunktion fördert [37, 181]. Vielmehr könnte der BFR-induzierte retrograde Scherstress an den Gefäßwänden atherogene Veränderungen hervorrufen [37]. Ob diese aber die oben genannten chronischen Blutdruckanstiege bedingen, bleibt spekulativ.

Studien mit Leistungssportlerinnen und Leistungssportlern bezüglich der Effekte von BFR-Training auf das arterielle Gefäßsystem wurden bislang nicht publiziert.

## 2.8 Venöses Gefäßsystem / venöser Blutdruck

Im Vergleich zum arteriellen System finden sich in der Literatur weniger Informationen zu den Auswirkungen des BFR-Trainings auf das venöse System, was sich sicher auch durch vergleichsweise aufwendigere Messmethoden der venösen Drücke erklären lässt. In einer kürzlich publizierten Studie, bei welcher invasive Druckmessungen zum Einsatz kamen, konnte jedoch gezeigt werden, dass ein LL-BFR-RT zu einem um 30-40 mmHg höheren Anstieg des venösen Blutdrucks führte als ein LL-RT. Die Konsequenzen dieser venösen Hypertonie für das an niedrige Drücke gewöhnte venöse Gefäßsystem sind bislang unklar. Denkbar sind jedoch unter anderem druckinduzierte Schäden an den Venenklappen [40]. Andererseits weisen vereinzelte Daten daraufhin, dass ein BFR-Training die venöse Compliance im Unterarm leicht steigern

konnte [116], während sie in der Wadenmuskulatur unverändert blieb [41, 116]. Weitere Untersuchungen zu den Effekten auf das venöse Gefäßsystem sind daher dringend erforderlich.

Folglich ist die Erkenntnislage zu den Effekten eines BFR-Trainings auf das venöse Gefäßsystem und den venösen Blutdruck von Leistungssportlerinnen und Leistungssportlern ebenfalls als defizitär zu bezeichnen.

## 2.9 Filtrationsdruck und Muskelschwellung

Seit Häussinger und Kollegen [64] beschreiben konnten, dass der insulin-induzierte Wasserstrom in Leberzellen zu anabolen Signalen durch Zellschwellung führt, wird diese Theorie auch auf Muskelzellen als Möglichkeit zur Induktion von Muskelwachstum angewandt [98]. Überträgt man diesen Mechanismus auf die Skelettmuskulatur, spielt der effektive Filtrationsdruck (eFD) des Gefäßsystems eine wesentliche Rolle. Grundsätzlich ist der eFD abhängig von den hydrostatischen- (hFD) und kolloidalen Filtrationsdrücken (kFD) des Gefäßes und des umliegenden Gewebes und steht für den Wasseraustausch entlang der Kapillaren.

Durch die Blockierung des venösen Abflusses einer Extremität steigt der hFD an und bewirkt

eine verstärkte Filtration von Wasser in das umgebende Gewebe der Kapillaren, was zu einer erhöhten Wasseraufnahme durch die Gewebezellen und folglich zu einer Zellschwellung führt. Während des BFR-Trainings wird jedoch nicht nur der venöse Abfluss blockiert; die sportliche Betätigung der abgebundenen Extremität führt zu physiologischen Reaktionen, die einen Anstieg des eFD unterstützen.

Zunächst führt die funktionelle Hyperämie zu einer erhöhten Durchblutung der arbeitenden Muskulatur. Diese Mehrdurchblutung zur Sättigung des steigenden Sauerstoffbedarfs führt folglich ebenfalls zu einem weiteren Anstieg des hFD. Darüber hinaus sorgt die Anhäufung von Metaboliten (u. a. Laktat) in der Muskulatur für einen deutlichen Anstieg des kFD des umliegenden Gewebes der Kapillaren, wodurch mehr Wasser im Muskelgewebe zurückgehalten wird. Während invasive Messungen des venösen Drucks diese physiologischen Anpassungen bestätigen [50], deuten Berichte über eine BFR-induzierte Steigerung der Membranpermeabilität [188] und der Verringerung des Plasmavolumens [153] indirekt auf die Möglichkeit der BFR-induzierten Muskelschwellung hin [53].

Inwiefern BFR-Training auf den effektiven Filtrationsdruck sowie die Muskelschwellung von Athletinnen und Athleten wirkt, ist bisher nicht erforscht.



Abb. 1: Darstellung der invasiven Messung der arteriellen (A. radialis) und venösen (Rete venosum dorsale manus) Drücke sowie Blutgase mittels intravasalen Kathetersystemen [51] (Bildquelle Franz)

## 2.10 Neuronales System

Übungsinduzierte Hypoalgesie (ÜIH; engl.: exercise-induced hypoalgesia) beschreibt eine Form der endogenen Schmerzmodulation. Im Allgemeinen wird das Phänomen der ÜIH als eine reduzierte Sensitivität gegenüber noxischen Reizen (Schmerzempfindlichkeit) während oder infolge einer akuten Kraft- oder Ausdauerbelastung definiert. Zusätzlich zu den akuten, temporären Effekten der ÜIH kann ein langfristiges Training zur nachhaltigen Schmerzreduktion führen, wie es bspw. bei Patienten mit chronischen Schmerzen beobachtet wurde. Die analgetischen Effekte können sowohl lokal, d. h. in der aktiven Körperregion, als auch systemisch, in einer der aktiven Körperregion entfernten Struktur, hervorgerufen werden. Demnach sind sowohl lokal verortete Mechanismen als auch spinale/supraspinale nozizeptive Bahnen an den schmerzmodulierenden Effekten der ÜIH beteiligt. Allerdings ist das Ausmaß dieser hypoalgetischen Effekte u. a. von der Intensität der Übung bzw. des Trainings abhängig. Übungseinheiten mit höheren mechanischen Lasten, einer größeren kardiovaskulären Beanspruchung oder einer längeren Belastungsdauer zeigten eine gesteigerte ÜIH im Vergleich zu niedrig-intensiveren Belastungseinheiten. Allerdings sind derartig hoch-intensive Belastungen bzw. Trainingseinheiten aufgrund der hohen mechanischen Beanspruchung des passiven und aktiven Bewegungsapparates nicht uneingeschränkt für jede Person zu empfehlen, wie z. B. für verletzte oder kürzlich operierte Patientinnen und Patienten bzw. Sportlerinnen und Sportler.

In diesem Fall bietet das BFR-Training eine effektive Alternative. Die Wirkung eines BFR-Trainings wurde hinsichtlich einer akut hervorgerufenen ÜIH bisher in fünf Studien untersucht [68, 70, 90, 91, 168]. Studien mit chronischen Schmerzpatienten (patellofemorale Knieschmerz) berichten von einer akuten Schmerzreduktion infolge eines LL-BFR-RT (Knieextension/-flexion; Last:  $\leq 5$  kg) [90, 91], wohingegen unmit-

telbar nach einem vergleichbaren LL-RT ohne BFR-Applikation keine hypoalgetischen Effekte nachgewiesen werden konnten [90]. Allerdings fanden sich keine statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen den Gruppen, sodass der zusätzliche hypoalgetische Effekt der Blutflussrestriktion nicht eindeutig aufgedeckt werden konnte [90]. In einer weiteren Studie zeigten Hughes et al., dass die übungsinduzierten hypoalgetischen Effekte fünf Minuten nach Beendigung eines LL-BFR-RT (Knieextension/-flexion; 30 % 1RM) höher waren verglichen mit einem LL-RT (30 % 1RM) und einem HL-RT (70 % 1RM) ohne BFR [70]. Dies trifft allerdings nur dann zu, wenn ein hoher Manschettendruck verwendet wurde (80 % vs. 40 % des arteriellen Okklusionsdrucks (LOP)). Bezogen auf die Schmerzwahrnehmung der Probanden konnte die ÜIH noch 24h nach dem LL-BFR-RT, nicht aber nach dem LL-RT und HL-RT, nachgewiesen werden. Zusätzlich zu den akuten hypoalgetischen Effekten einer Kraftbelastung konnte in einer Studie mit jungen gesunden Probanden gezeigt werden, dass BFR in Kombination mit einer niedrig-intensiven Ausdauerübung (20 min Radfahren bei 40 % der maximalen Sauerstoffaufnahme-fähigkeit ( $VO_{2max}$ )) einen positiven Effekt auf die lokal und systemisch erzeugte ÜIH hat [68]. In diesem Fall waren die lokalen und systemischen hypoalgetischen Effekte, die fünf Minuten nach der Belastung festgestellt werden konnten, bei einer niedrig-intensiven Ausdauerübung mit BFR höher als bei einer niedrig-intensiven Ausdauerbelastung ohne BFR (40 %  $VO_{2max}$ ) und vergleichbar zu einer hoch-intensiven Ausdauerbelastung (70 %  $VO_{2max}$ ). Diese Ergebnisse legen nahe, dass die zusätzliche Applikation von BFR zu einem Kraft- oder Ausdauertraining mit niedriger Intensität (operationalisiert anhand des 1RM bzw. der  $VO_{2max}$ ) eine ähnliche hypoalgetische Reaktion hervorrufen kann wie hoch-intensive Belastungen, die zudem meist ausgeprägter sind als bei vergleichbar niedrig-intensiven Belastungen ohne BFR.

Neben der akuten, temporären ÜIH berichten mehrere Studien von positiven Langzeiteffekten eines LL-BFR-RT auf die Schmerzwahrnehmung bei jungen Probanden [57, 71, 72]. Bei jungen Probanden mit patellofemorale Schmerzen [57] und jungen Patienten zwei Wochen nach Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes [71, 72] war das Ausmaß an Schmerzreduktion infolge eines achtwöchigen LL-BFR-RT (30 % 1RM) höher im Vergleich zu einem HL-RT (70 % 1RM). Bei Personen mit Schmerzen während der Knieextensionsbelastung erwies sich das LL-BFR-RT im Vergleich zu einem HL-RT zudem als die effektivere Methode, um die Quadrizepsmuskulatur schmerzfreier zu kräftigen [57]. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass ein LL-BFR-RT insbesondere bei Personen, die aufgrund von Schmerzen, Operationen, Verletzungen o. a. Gründen keine hohen Lasten bzw. mechanische Belastungen kompensieren können, eine vielversprechende Trainingsmethode sein kann, um Schmerzen zu reduzieren und die Kraftfähigkeit frühzeitig bei gleichzeitiger Schonung der geschädigten Strukturen wieder herzustellen.

Studien aus dem Leistungssport, für den diese schmerzlindernden Effekte durchaus interessant sein könnten, liegen bislang nicht vor.

## 2.11 Kognitive Funktionen

Zahlreiche Studien weisen darauf hin, dass körperliches Training (z. B. Ausdauer- oder Krafttraining) einen positiven Effekt auf die kognitive Leistungsfähigkeit hat [67, 167, 172]. Ferner zeigen sich die neurokognitiven Effekte eines körperlichen Trainings sowohl in einer akuten- [28] als auch chronischen [172] Verbesserung unterschiedlicher kognitiver Fähigkeiten, wie bspw. der exekutiven Funktionen, der Gedächtnisleistung und der Aufmerksamkeit. Obwohl die genannten Effekte insbesondere bei älteren Personen und Personen mit kognitiven Einschränkungen beobachtet wurden, gibt es Hinweise darauf, dass derartige Verbesserungen

ebenfalls bei jungen gesunden Personen erzielt werden können [66, 172]. Es ist bekannt, dass der Zusammenhang zwischen einem körperlichen Training und der akuten sowie chronischen Verbesserung der kognitiven Leistungsfähigkeit durch verschiedene Faktoren beeinflusst wird. Neben individuellen Eigenschaften der jeweiligen Person (z. B. Alter und Trainingsstatus) modulieren ebenfalls die Art sowie die Dosis (z. B. Intensität, Dauer, Frequenz) des körperlichen Trainings das Ausmaß neurokognitiver Umstellungs- und Anpassungsprozesse [141]. Die bisherige Evidenzlage lässt allerdings keine genauen Rückschlüsse auf die effektivste Trainingsmethode zur Steigerung der kognitiven Leistungsfähigkeit bei jungen gesunden Personen zu.

Die Wirkung der zusätzlichen Applikation einer Blutflussrestriktion wurde in diesem Kontext in bisher zwei Studien untersucht [151, 174]. Sarde-li et al. [151] verglichen die akuten Auswirkungen von drei unterschiedlichen Krafttrainingseinheiten: i) HL-RT (80 % 1RM, 4 Sätze bis zum Muskelversagen), ii), LL-RT (30 % 1RM, 4 Sätze bis zum Muskelversagen), ii) und LL-BFR-RT (30 % 1RM, 4 Sätze á 30-15-15-15 Wiederholungen pro Satz) sowie einer passiven Kontrollbedingung auf die exekutive Funktion von gesunden untrainierten älteren Personen mit Hilfe des Stroop-Tests (Inhibitionsfähigkeit) miteinander. Die Ergebnisse dieser Studie liefern allerdings keine belastbaren Hinweise darauf, dass die zusätzliche Applikation einer Blutflussrestriktion die akuten neurokognitiven Effekte eines LL-RT positiv beeinflusst. Sie bietet allerdings auch keinen Grund dafür, diese Hypothese zu verwerfen. In einer weiteren Studie wurde der akute Einfluss eines Gehtrainings (5 Sätze á 2 min Gehen [5 km/h], Intersatzpause: 1 min) mit BFR auf die exekutive Funktion (Stroop-Test) von jungen gesunden Personen untersucht [174]. In dieser Studie zeigte sich, dass, im Gegensatz zu einem Gehtraining ohne BFR und der alleinigen Anwendung von BFR in Ruhe, ein Gehtraining mit BFR eine akute Verbesserung der exekutiven Funktion bewirkt (operationa-

lisiert anhand der verkürzten Reaktionszeit im Stroop-Test). Des Weiteren geben die Ergebnisse Anlass zur Annahme, dass die positive neurokognitive Wirkung der zusätzlichen Applikation von BFR durch den akuten Anstieg der Blutlaktatkonzentration moduliert wurde. In diesem Kontext konnte bereits in vorhergehenden Studien gezeigt werden, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen der aktivitätsbezogenen Steigerung der Blutlaktatkonzentration und der Verbesserung der kognitiven Leistungsfähigkeit gibt. Obwohl die zugrundeliegenden Mechanismen, die den Zusammenhang von körperlichem Training und der kognitiven Leistungsfähigkeit beschreiben, noch nicht geklärt sind, wird angenommen, dass verschiedene Prozesse auf zellulär-molekularer, struktureller und funktioneller Ebene für die neurokognitiven Effekte verantwortlich sind [181, 196].

Sport- und Bewegungswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler nutzen diese Erkenntnisse, um den Zusammenhang zwischen der kognitiven Leistungsfähigkeit und der sportlichen Leistung zu untersuchen. Mehrere Querschnittstudien berichten von einem positiven Zusammenhang zwischen der Ausprägung unterschiedlicher kognitiver Fähigkeiten (exekutive Funktion, Aufmerksamkeitsfähigkeit sowie kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit) und der sportlichen Leistung bzw. dem sportlichen Erfolg [182, 184, 186]. Da Querschnitts- und Akutstudien keine Kausalität bzw. langfristige Effekte abbilden können, besteht zum gegenwärtigen Zeitpunkt kein Konsens darüber, inwiefern ein gezieltes Training mit BFR die sportartspezifische Leistung über induzierte neurokognitiven Adaptationsprozesse beeinflusst.

Zusammenfassend belegen die wissenschaftlichen Daten einen weitreichenden Einfluss des BFR-Trainings auf die humane Physiologie. Da die meisten hier zitierten wissenschaftliche Ergebnisse anhand von Studien mit jungen, gesunden Probanden ohne Leistungssport Hintergrund generiert wurden, stellt sich die Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf verschiedene Zielpopulationen im Leistungssport.



# 3 Zielgruppen



### 3.1 Leistungssport

Die Entscheidung komplementäre Trainingsapplikationen wie BFR im Leistungssport zu integrieren, ist mit drei wesentlichen methodischen Besonderheiten bei diesen Populationen verbunden: 1.) liegen im Leistungssport deutlich kleinere homogene Gruppen und damit Fallzahlen vor, 2.) sind die erwartbaren trainingsinduzierten Veränderungen bei Leistungs- (z. B. Wettkampf- oder Time-Trial-Performance) und Surrogatparametern (z. B.  $VO_2max$ ) als deutlich geringer zu erwarten als bei untrainierten Studienprobanden und 3.) sind die erforderlichen kontrollierten Bedingungen in wissenschaftlichen Untersuchungen oft nicht mit den (sport-)praktischen Anforderungen des Trainingsalltags kompatibel. Diese drei Faktoren erschweren einerseits die Durchführung belastbarer gut-konzipierter Studien und damit auch die Möglichkeit evidenzbasierte Empfehlungen für eine hinreichend effektive und sichere Trainerentscheidung geben zu können. Obwohl die Befundlage zur BFR-Applikation zur Steigerung

von u. a. Muskelkraft und -masse als vielversprechend zu beurteilen ist, liegen keine bzw. kaum Studien auf Weltklasse- (LP5, n=0), internationalem- (LP4, n=2) oder nationalem- (LP 3, n=5) Niveau vor (siehe Tabelle 3).

Eine Meta-Analyse zur Wirkung eines BFR-Trainings auf die Ausdauerfähigkeit legt nahe, dass insbesondere in Surrogatparametern der Leistungsfähigkeit (z. B.  $VO_2max$ ) Veränderungen zu erwarten sind. Allerdings sind die eingeschlossenen Populationen lediglich aktive bzw. ambitionierte Sportler (LE 1A; LP 3) [48]. Einzelne randomisiert kontrollierte Studien zeigten, dass die Kombination von BFR mit niedrig bis moderat intensiven Rudern (LE 1B; LP 3) [65], Gehen (LE 1B; LP 2-3) [132] oder Radfahren (LE 1B; LP 1) [1] Verbesserungen der  $VO_2max$  induzieren konnte. Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen, konnte die Kombination von BFR mit hoch-intensivem aeroben Radfahren (HIIT; High-Intensives-Intervalltraining) (LE 1B; LP 1; [86]; LE 1B; LP 1) [130] oder Laufen (LE 1B; LP 2) [133] lediglich vergleichbare Verbesserungen der  $VO_2max$  in-

**Tab. 3: Übersicht der Anzahl der wissenschaftlichen Studien mit Anwendung von Blood-Flow-Restriction im Leistungssport mit Level of Performance (LP) und Level of Evidence (LE) Einteilung**

LP/LE	1A	1B	2A	2B	3	4		
5	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	2	0	0	0	0	2	2
3	0	4	1	0	0	0	5	5
2	0	14	1	0	1	0	16	
1	0	17	8	1	2	0	28	
0	1	1	2	0	0	0	4	
n.d.	0	11	5	2	5	1	24	
mix	9	13	0	0	1	0	23	
	10	62	17	3	9	1	102	
	0	6	1	0				7

duzieren, wie ein Training mit ähnlichen Belastungsnormativen. Ähnliche Befunde bei jungen männlichen Fußballern zeigten, dass hochintensives Intervalltraining mit BFR lediglich vergleichbare Effekte auf die  $VO_2\text{max}$  hervorrief, wie das Training unter der Kontrollbedingung (LE 1B, LP 3) [4].

In systematischen Übersichtsarbeiten zu Kraftparametern (z. B. 1RM) bei Spitzensportlern (gut trainiert, LP >2) sind die Effekte gegenüber den Kontrollbedingungen nennenswert geringer (LE 1A; LP >2) [159]. Bezogen auf gut trainierte Sportler kommen aktuelle Übersichtsarbeiten zu dem Schluss, dass ein LL-BFR-Training die Muskelquerschnittsfläche vergrößern und die Muskelkraft und Ausdauerleistungsfähigkeit bei gut trainierten Sporttreibenden verbessern kann, die normalerweise nicht von der Verwendung leichter Lasten profitieren würden (LE 1A) [159][195]. Betrachtet man Einzelstudien mit Sporttreibenden in hohen Leistungsbereichen führte LL-BFR auch zu positiven Effekten. So nahmen bei hoch trainierten Rugbyspielern (LP 4) der Muskelquerschnitt, die -kraft und lokale (Muskel-) Ausdauer zu [177]. Ähnliche Effekte konnten bei Footballspielern (LP 3) auf die maximale Kraftleistung (1RM) im Bankdrücken und Kniebeugen sowie auf die Muskelumfänge des Oberkörpers beobachtet werden. Eine weitere Studie zeigte, dass ein LL-BFR-RT die Muskelkraft (3s-MVC und 30s-MVC) und Muskelausdauer (Maximale Wiederholungszahl bei 20 % MVC) von gut trainierten Netzbballspielerinnen (LP 2) steigern kann [108].

In einer Studie mit Powerliftern (LP 3) wurden die Effekte eines LL-BFR-RT und eines HL-RT auf die maximale Kraftleistungsfähigkeit (1RM) im Kniebeugen (vordere Kniebeuge) miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigten, dass ein HL-RT größere Kraftzuwächse generieren konnte als ein LL-BFR-RT [18]. Eine Übersicht über die Studien mit Leistungssportlerinnen und Leistungssportlern sowie deren Methodik und Ergebnisse sind in der Anhangstabelle 1 dargestellt.

Insgesamt entsprechen die in den Studien überwiegend angewandten Interventionszeiträume in etwa einem Mesozyklus (max. 8 Wochen). Die Varianz der Anpassungseffekte ist hoch und heterogen. Des Weiteren liegen für diese spezielle Population bisher nur wenige qualitativ hochwertige Studien vor. Um die Evidenz für die praktische Umsetzung eines BFR-Trainings im Leistungssport zu erweitern, sollten sich zukünftige Studien an eher individualisierten Interventionsmaßnahmen mit a) mehreren Messzeitpunkten und b) über mehrere über das Jahr verteilte Periodenblöcke orientieren [165].

## 3.2 Nachwuchsleistungssport

Lange Zeit galt das Krafttraining mit Kindern und Jugendlichen sowie das Krafttraining im Nachwuchsleistungssport als uneffektiv und potenziell gesundheitsschädlich für den unausgereiften Organismus [42]. Heute ist es unbestritten, dass Krafttraining mit Heranwachsenden sowohl einen leistungs- als auch gesundheitsfördernden Effekt besitzt. Nicht zuletzt konnte auch das seit 2014 vom BISP geförderte WVL-Projekt „Krafttraining im Nachwuchsleistungssport“ (KINGS-Studie) einen Beitrag zu diesem Erkenntnisgewinn leisten. Bedingt durch das mittlerweile hohe Evidenzniveau wurde Krafttraining zu einem wichtigen Bestandteil der WHO-Bewegungsempfehlungen für Kinder und Jugendliche, die neben mindestens 60 Minuten tägliche körperliche Aktivität bei moderaten bis hohen Intensitäten, ein Krafttraining an mindestens drei Tagen in der Woche vorsieht.

Hierbei stellt sich insbesondere die Frage nach der geeigneten Krafttrainingsmethode, die einerseits einen hohen Wirkungsgrad erzielt und andererseits unbedenklich für den kindlichen Organismus ist. Lesinski und Kollegen konnten in ihrer Meta-Analyse zeigen, dass das Freihanteltraining bei adoleszenten Nachwuchsathleten besonders effektiv ist, um die Maximalkraft zu verbessern. Darüber hinaus berichten diese

Autoren, dass das sog. Komplextraining, welches moderate bis hochintensive maschinenbasierte Kraft- oder Freihantelübungen mit bewegungstechnisch verwandten plyometrischen Übungen (Sprungkraftübungen) innerhalb einer Trainingseinheit kombiniert, besonders effektiv ist, um die sportartspezifische Leistung von adolescenten Nachwuchssportlern zu verbessern.

Bezüglich der Implementation von BFR-Training in dieser Population deuten Peitz und Kollegen [136] in ihrem systematischen Literaturüberblick an, dass ein Training unter BFR eine vielversprechende alternative Krafttrainingsmethode für Kinder und Jugendliche darstellen könnte. Durch diese Methode erfährt die Muskulatur eine hohe Reizsetzung (z. B. erhöhte Typ-II-Faserrekrutierung und Ausschüttung anaboler Hormone) bei vergleichsweise geringer mechanischer Belastung (20-30 % 1RM). Mögliche Nebenwirkungen sind bei Kindern und Jugendlichen bislang nicht bekannt. In einer umfangreichen Befragung von 12.624 BFR-Trainierenden in Japan wurden ebenfalls Kinder zu den häufigsten Nebenwirkungen der Technik befragt (17,8 % der Befragten unter 19 Jahre). Unter Berücksichtigung von ca. 32.000 BFR-Trainingseinheiten wurden dabei kurzfristig auftretende Hämatome (13,1 %) und Taubheitsgefühl (1,3 %) als häufigste Nebenwirkungen benannt [119].

In einer der wenigen vorhandenen Studien zu den Wirkungen von BFR-Training mit Heranwachsenden verglichen Luebbers et al. [105] die Adaptationen eines sechswöchigen LL-BFR-RT (30 % 1RM) mit einem LL-RT ohne Blutflussrestriktion, sowie einem HL-RT (65 % 1RM) bei High-School Schülerinnen und Schülern im Alter von 15 bis 17 Jahren. Die Autoren beobachteten eine Verbesserung der Beinkraft (1RM Kniebeuge) nach LL-BFR-RT, wohingegen das LL-RT ohne Blutflussrestriktion sowie das HL-RT zu keinen Verbesserungen führten. Bezogen auf morphologische Adaptationen konnte in allen drei Gruppen ein Zuwachs des Arm- und

Beinumfanges beobachtet werden, ohne einen relevanten Gruppenunterschied. Mögliche Nebenwirkungen von BFR-Training wurden in dieser Studie nicht berichtet. Der Einfluss des Trainings auf den Muskelquerschnitt und/oder physiologische Parameter (z. B. Testosteron) wurde in dieser Untersuchung nicht analysiert. Entsprechend sind in diesem Feld weitere Forschungsarbeiten notwendig, um die physiologischen Anpassungsprozesse infolge von BFR-Training, v. a. bei präpuberalen Kindern, aber auch bei puberalen und postpuberalen Jugendlichen zu untersuchen. Die Frage, ob Krafttraining mit präpuberalen Kindern Muskelhypertrophie induzieren kann oder ob die berichteten Kraftgewinne ausschließlich auf neuronale Anpassungsprozesse zurückzuführen sind, ist nach wie vor ungeklärt. Vor dem Hintergrund, dass ein BFR-Training bei Erwachsenen bereits mit vergleichsweise niedrigen mechanischen Intensitäten und Wiederholungszahlen zu einer Muskelhypertrophie führt, könnte ein LL-BFR-RT auch im Bereich des Nachwuchsleistungssport einen nützlichen Beitrag leisten. Ob dieser Ansatz bei Kindern jedoch ethisch vertretbar ist, muss geprüft werden.

Aufgrund der geringen Zusatzbelastungen könnte ein BFR-Training nicht nur bei gesunden, sondern auch bei minderbelastbaren Nachwuchssportlern und Nachwuchssportlerinnen zum Beispiel während der Rehabilitation von Sportverletzungen und im Rahmen von Return-to-Sport-Konzepten Einsatz finden. Eine der wenigen vorhandenen Arbeiten stammt von Mun und Kollegen [117], die den Einfluss eines fünf-wöchigen BFR-Trainings im Vergleich zu einem Krafttraining ohne Blutflussrestriktion bei Kindern mit spastischer Zerebralparese (grobmotorische Fähigkeiten: Level I-II) im Alter von 5 bis 10 Jahren auf die Muskeldicke des M. rectus femoris, des M. gluteus medius und des M. gastrocnemius mittels Ultraschall untersuchten. Im Ergebnis zeigten sich größere Zuwächse in der Muskeldicke des M. rectus femoris und des M. gastrocnemius in der BFR-Gruppe im Vergleich

zur Krafttrainingsgruppe ohne Blutflussrestriktion. Mögliche Nebenwirkungen von BFR-Training wurden in dieser Studie nicht berichtet. Dementsprechend zeigt sich auch in diesem Setting die Literaturlage limitiert, sodass weitere Forschungsarbeiten notwendig sind, die den möglichen Einsatz von BFR-Training in der pädiatrischen Rehabilitation oder mit pädiatrischen Patienten untersuchen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass noch große Forschungsdefizite zu den Wirkungen und physiologischen Anpassungsprozessen an ein BFR-Training mit Heranwachsenden bestehen. Weder für den Bereich der Leistungsentwicklung (Nachwuchsleistungssport) noch für die klinische Rehabilitation ist die Evidenz ausreichend, um gesicherte Empfehlungen für den Einsatz von BFR-Training mit Kindern und Jugendlichen oder im Nachwuchsleistungssport zu geben. Ebenfalls müssen zunächst Erkenntnisse zu möglichen Nebenwirkungen gewonnen werden, bevor BFR-Training für Kinder und Jugendliche empfohlen werden kann.

### 3.3 Rehabilitation

Eine Abnahme der Muskelmasse sowie ein Rückgang der Muskelfunktion stellen bei Athletinnen und Athleten eine häufig zu beobachtende immobilisations-induzierte Folge diverser Verletzungen am muskuloskelettalen System dar. Nicht selten gehen sport-traumatologische Verletzungen mit einer mehrwöchigen Entlastung oder Teilbelastung einher, welche eine Rehabilitation mit hohen Gewichten und somit einen Erhalt der Muskelmasse und -funktion erschweren. Insbesondere in dieser Übergangphase sind jedoch adäquate Reize notwendig, um einen erfolgreichen Wiedereinstieg in den Sport zu gewährleisten. Aus diesem Grund war die Wirksamkeit eines LL-RT mit BFR in dieser Population bisher bereits Gegenstand einer Reihe wissenschaftlicher Studien.

Die wohl am häufigsten untersuchten Patientengruppen, welche im Rahmen der Effektivität von LL-BFR-RT untersucht wurden, sind Patientinnen und Patienten mit einer Ruptur und folgenden operativen Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes (vordere Kreuzbandplastik, VKB-P) sowie Patientinnen und Patienten mit Kniegelenksarthrose. In einer randomisiert-kontrollierten Studie verglichen Ohta und Kollegen [128] die Effekte eines LL-RT mit und ohne BFR auf die Muskelmasse und Muskelfunktion bei Patientinnen und Patienten nach VKB-P. Durch die Studie konnte nachgewiesen werden, dass durch ein 16-wöchiges Training die Steigerungen der Muskelmasse und Muskelkraft der Knieextensoren signifikant größer war, wenn mit BFR trainiert wurde. Diese positiven Effekte des BFR-Trainings im Zuge der Rehabilitation konnten in einer kürzlich erschienenen Untersuchung von Hughes und Kollegen [72] bei selbiger Patientengruppe bestätigt werden. Die Autoren untersuchten die Effektivität eines achtwöchigen LL-BFR-RT oder HL-RT auf muskuläre Adaptationen sowie die Ergussformation und Kniegelenkschmerzen bei Patientinnen und Patienten nach VKB-P. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass ein LL-BFR-RT die Muskelmasse und -kraft in ähnlichem Maße verbesserte, wie ein HL-RT, während die Kniegelenkschmerzen und der Erguss sogar stärker durch das LL-BFR-RT reduziert werden konnten. Dies führte insgesamt zu einer größeren Verbesserung der Rehabilitation funktioneller Fähigkeiten und postoperativer Schmerzen [72]. Neben Untersuchungen zur Effektivität des BFR-Trainings bei Patientinnen und Patienten nach VKB-P, wurde dessen Wirksamkeit zudem gut bei Patientinnen und Patienten mit Kniegelenksarthrose untersucht. Die aktuelle Studienlage deutet darauf hin, dass durch diese Trainingsmethode vergleichbare Effekte auf die Muskelfunktion und -struktur erzielt werden können wie nach HL-RT [45]. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund interessant, dass nur ein geringer Teil der Last bewegt werden muss und dadurch eine geringere mechanische Beanspruchung auf das



Abb. 2: Beispiel eines Trainings mit BFR in der Prä- oder Rehabilitation in einer geriatrischen Patientenpopulation (Bildquelle Franz)

Gelenk und möglicherweise auf die geschädigten Strukturen wirkt. Vor dem Hintergrund der Pathophysiologie der Kniegelenksarthrose ist dies von besonderer Bedeutung.

Obwohl der überwiegende Anteil der derzeit vorliegenden Studien die positiven Effekte bei Verletzungen bzw. Pathologien des Kniegelenks untersuchten, belegen neueste Untersuchungen ebenfalls bei Patienten nach operativer Achillessehnennaht Verbesserungen auf die Kraft der Wadenmuskulatur nach BFR-Training [199]. Die wissenschaftliche Evidenz hinsichtlich der Wirksamkeit von BFR-Training bei Tendinopathien und Sehnenrupturen, insbesondere für die obere Extremität, ist jedoch noch nicht ausreichend gesichert.

# 4 BFR-Varianten und Applikationen



## 4.1 Bestimmung des Restriktionsdrucks

Eine wissenschaftlich häufig thematisierte Frage des BFR-Trainings ist die Frage nach dem optimalen Manschettendruck, um eine größtmögliche Effektivität und Sicherheit zu gewährleisten. Je nachdem welche Systeme für das BFR-Training genutzt werden (z. B. manuelle oder automatische Systeme, pneumatisch oder nicht-pneumatische Blutdruckmanschetten) kommt es zu unterschiedlichen Veränderungen des Drucks während des Trainings. Um eine individuelle Druckanwendung zu ermöglichen und zeitgleich die Weichteile vor zu großem Druck und folgenden Schäden zu schützen, wird empfohlen, den Manschettendruck in Abhängigkeit des individuellen arteriellen Okklusionsdrucks (LOP, engl. limb occlusion pressure) zu bestimmen. Die Messung des LOP findet vor dem Training statt, bei der die proximal um die Extremität angelegte Manschette schrittweise soweit aufgepumpt wird, bis der arterielle Blutstrom (messbar via peripherer Palpation, Duplexsonographie) zum Erliegen kommt [135]. Der dafür notwendige Druck wird als LOP bezeichnet und ist für jeden Athleten bzw. jede Athletin individuell. Folgend kann für das Training eine individuelle Druckanwendung anhand des LOP angewendet werden.

## 4.2 Individualisierung des arteriellen Okklusionsdrucks

Die Individualisierung des Manschettendrucks anhand des LOP zeigt sich gegenüber der Anwendung eines vorher festgelegten nicht-individualisierten Applikationsdruckes überlegen hinsichtlich der muskulären Aktivierung während einer Belastung [77]. In der Bemessung des LOP und der daraus folgenden Ableitung eines Manschettendrucks für das Training gibt es athleten- und anwenderspezifische Einfluss-

faktoren: Athletenspezifische Einflussfaktoren auf den LOP sind der individuelle systolische Blutdruck, der Umfang sowie die Dichte der Extremität und das Geschlecht des Athleten [97]. Anwenderspezifische Einflussfaktoren auf den LOP liegen vor allem in der Platzierung der Manschette an der Extremität sowie der Breite der Manschette. Je breiter die Manschette ist, desto weniger Druck pro Quadratzentimeter Manschette ist nötig, um einen arteriellen Verschlussdruck herbeizuführen [110]. Während eine individualisierte und routinierte Messung des LOP vor dem Trainingsstart die Möglichkeit einer zu hohen Druckanwendung mit assoziierter Gefahr der Weichteilschäden reduziert, sorgt ein individueller Trainingsdruck für optimale Rahmenbedingungen mit Gewährleistung einer suffizienten BFR-Belastung.

Während pneumatisch gesteuerte, auf duplexsonographischer Messmethodik aufbauende Systeme in der Lage sind, den LOP valide darzustellen, sind diese Systeme meist mit einem hohen Kostenfaktor verbunden und setzen eine bestimmte Expertise und Routine des Anwenders voraus. Hingegen zeigen diverse wissenschaftliche Arbeiten praktische Verfahren, um eine Individualisierung des BFR-Trainingsdrucks zu gewährleisten. Während Amano und Kollegen den Manschettendruck während des Trainings anhand einer kapillären Rückfüllzeit von drei Sekunden bemessen [5], kann für das Training der unteren Extremitäten auch der individuelle Oberschenkelumfang bei einer fixen Manschettenbreite (5 cm) zur Annäherung an den LOP angewendet werden [99]. Eine weitere Annäherungsberechnung wurde 2015 durch Lonneke und Kollegen [97] publiziert, welche den systolischen- (SBP) und diastolischen Blutdruck (DBP) sowie den Arm- bzw. Beinumfang mit einbeziehen:

Oberkörper:

$$\text{LOP (mmHg)} = 0,514 (\text{SBP}) + 0,339 (\text{DBP}) + 1,461 (\text{Armumfang}) + 17,236$$

Unterkörper:

$$\text{LOP (mmHg)} = 5,893 (\text{Oberschenkelumfang}) + 0,734 (\text{DBP}) + 0,912 (\text{SBP}) - 220,046.$$

Diese Methoden sind allerdings ausschließlich dazu geeignet, den theoretischen, nicht den realen, LOP zu bestimmen, welcher ausschließlich in einem arteriellen Gefäß mittels Druckmesssonden valide dargestellt werden kann.

### 4.3 Manschettendruck beim Blood-Flow-Restriction Training

Um eine optimale Effektinduktion durch ein BFR-Training zu erzielen, ist neben der dabei anzuwendenden Trainingsbelastung auch der Manschettendruck während des Trainings von entscheidender Bedeutung. Im Rahmen der akuten Trainingseffekte weisen Studienergebnis-

se daraufhin, dass höhere Manschettendrücke (80 % vs. 40 % LOP) beim LL-BFR-RT zu einer schnelleren Ermüdung [37], höheren Blutlaktatkonzentration [77] und neuromuskulären Aktivierung führen [43]. Diese Ergebnisse lassen sich auch bei chronischer LL-BFR-Anwendung anhand größerer Muskelmassenzunahme [96] und Gefäßneubildungen bei höheren gegenüber geringeren Manschettendrücken nachweisen [116].

### 4.4 Manschettenbreite

Die Höhe des LOP wird zu einem großen Maße durch die Breite der Manschette beeinflusst, welche zur Bestimmung der Zielgröße verwendet wird. Hierbei erfordern breite Manschetten generell niedrigere Drücke, was im Wesentlichen auf eine größere Druckfläche zurückzuführen ist [34]. Die Relevanz dieses Themas wird vor dem Hintergrund deutlich, dass in diversen Settings der BFR-Anwendung unterschiedliche



Abb. 3: Beispiel eines automatisierten, druckregulierenden BFR-Systems (PBFR-System, Delfi Medical Inc., Vancouver, Canada) (Bildquelle Franz)

Manschettenbreiten zur Anwendung kommen und diese wiederum bei gleichem absolutem Druck deutlich abweichende Blutflussrestriktionslevels induzieren [149]. Dies hebt die Notwendigkeit zur Verwendung relativer Druckgrößen (%LOP) hervor. Die aktuelle Studienlage deutet darauf hin, dass breite und dünne Manschetten, trotz abweichenden absoluten Druckes, nach Relativierung auf den LOP zu ähnlichen Reduzierungen des Blutflusses führen [115]. Es zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede in der Probanden-Compliance hinsichtlich der Manschettenbreite. Breite Manschetten am Oberarm können zu höherem Diskomfort führen, da während der Kontraktion der Muskelbauch des M. biceps brachii unter die Manschette "rutschen" kann [169]. Durch die Volumenzunahme des Muskels unter der Manschette wird der mechanische Druck auf den Muskel und damit auch der initial applizierte %LOP erhöht. Dies macht die Notwendigkeit von druckregulierenden Geräten (u. a. PBFR-System, Delfi Medical Inc.) deutlich (beim Oberschenkel aufgrund der Form weniger relevant).

In der Literatur zeigt sich, dass unterschiedliche Manschettentypen (z. B. elastisch und rigide, pneumatisch und nicht-pneumatisch) und Systeme (z. B. automatisiert und manuell) für das BFR-Training verwendet werden [22, 100, 134]. Eine Studie von Loenneke et al. zeigte jedoch, dass die unterschiedlichen Materialien bei gleicher Manschettenbreite (5 cm) keinen Einfluss auf den LOP in Ruhe zu haben scheinen [100]. Weiterhin wurde in einer anderen Untersuchung von Loenneke et al. kein Unterschied bezüglich der muskulären Ermüdung (maximale Wiederholungszahl bis zum Muskelversagen) zwischen 5 cm breiten rigiden Nylon- und 5 cm elastischen Manschetten festgestellt [101]. Ähnliche Ergebnisse konnten in einer Studie von Buckner et al. gezeigt werden [22]. Allerdings stellten die Autoren fest, dass der LOP in Ruhe bei der elastischen Manschette größer war als bei der Nylonmanschette und aus diesem Grund auch einen höheren Diskomfort erzeugte. Dabei

muss darauf hingewiesen werden, dass die von Buckner et al. verwendete elastische Manschette 2 cm schmaler war als die Nylonmanschette und die Abweichungen im LOP und Diskomfort mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Produkt der verschiedenen Manschettenbreiten sind. Umso interessanter ist, dass die Unterschiede bezüglich Manschettenbreite- und -material bei identisch appliziertem %LOP während der Belastung weitestgehend eliminiert werden [22].

## 4.5 Kontinuierliches vs. intermittierendes Blood-Flow-Restriction Training

Die Anwendung von BFR innerhalb des Trainings kann sowohl kontinuierlich [192] als auch intermittierend [164] erfolgen. Bei der kontinuierlichen Methode wird der BFR-Druck sowohl während der Serienbelastung als auch der Serienpausen aufrechterhalten, während der Manschettendruck in der intermittierenden Methode entweder während der Serienpausen oder Serienbelastung abgelassen wird. Eine Studie von Yasuda et al. [198] zeigte im Vergleich der kontinuierlichen gegenüber der intermittierenden BFR-Methode (Reperfusion in den Serienpausen) eine vergleichbare Muskelaktivität des M. biceps brachii bei einer unilateralen Bizeps-Curl-Übung (4 Sätze [30-15-15-15] bei 20 % 1RM), wenn hohe BFR-Drücke appliziert werden (160 mmHg). Mit dem identischen Übungsprotokoll untersuchten Brandner et al. [20] den Einfluss der kontinuierlichen BFR-Methode mit geringem Druck (80 % LOP) und der intermittierenden BFR-Methode mit hohem Druck (130 % LOP) auf die Hämodynamik während der Übung. Während sich z. B. die Herzfrequenz und der Blutdruck in der intermittierenden Methode signifikant gegenüber der Kontrollbedingung (20 % 1RM ohne BFR) erhöhte, wies die kontinuierliche Methode eine reduzierte Hämodynamik im Vergleich zu der intermittierenden Methode auf. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass es

in der intermittierenden Methode, während der Pausen zur gesteigerten Reperfusion und damit zum verbesserten Abtransport angesammelter Metaboliten kommt. Dies wird in der kontinuierlichen BFR-Methode, auch bei niedrigerem Druck unterbunden, sodass sich das Cell Swelling und der metabolische Stress im Vergleich zu der intermittierenden Methode möglicherweise erhöhen [124] und damit das Auslösen von Adaptationsprozessen potenziell begünstigen [135]. Bezogen auf Marker für Skelettmuskel-schädigungen und oxidativen Stress konnten Neta et al. [123] keine Unterschiede zwischen einem kontinuierlichem und einem intermittierendem BFR-Training finden. Vergleichbare Ergebnisse bezüglich akuter physiologischer Reaktionen auf kontinuierliche vs. intermittierende BFR-Training konnten von Freitas et al. [52] nach vier Sätzen (30-15-15-15) bilateraler Beinpresse und Knieextension bei 20 % 1RM beschrieben werden. In diesem Zusammenhang konnte in einer fünfwöchigen Interventionsstudie von Fitschen et al. [46] nachgewiesen werden, dass beide Methoden gleichartige Zuwächse in Muskelkraft und -masse generierten. Ähnliche Befunde konnten von Neto et al. [147] nach einem sechswöchigen Krafttraining (zweimal pro Woche) bei männlichen Ausdauerathleten beobachtet werden.

Dabei ist hervorzuheben, dass die intermittierende BFR-Methode eine signifikant niedrigere Schmerz-sensation [38, 46] und Anstrengungswahrnehmung [33, 38] innerhalb der Trainingseinheiten induzierte und dadurch für Personen praktikabler ist, die weniger tolerant gegenüber Schmerz und Diskomfort sind [38, 158]. Der Befund geringerer perzeptueller Reaktionen bei der Anwendung der intermittierenden BFR-Methode wird dabei von anderen Studienergebnissen unterstützt [124]. Im Gegensatz dazu fanden Freitas et al. [51] keine Unterschiede bezüglich Anstrengungs- und Diskomfortempfinden zwischen kontinuierlicher und intermittierender BFR-Applikation. In einer anderen Studie von Brandner et al. [21] wurden nach unilateralen

Bizeps-Curls (vier Sätze [30-15-15-15] mit 20 % 1RM) sogar ein geringeres Anstrengungsempfinden in Verbindung mit der kontinuierlichen BFR-Methode im Vergleich zur intermittierenden Applikation beobachtet. Dabei sei jedoch darauf hingewiesen, dass der applizierte BFR-Druck bei der kontinuierlichen Methode deutlich geringer als der Druck in der intermittierenden Bedingung war (80 % LOP vs. 130 % LOP). In einer aktuellen Metaanalyse kamen Sinclair et al. [164] zu dem Ergebnis, dass die intermittierende Methode die Toleranz (gemessen anhand des subjektiv wahrgenommenen Muskelschmerzes und Missempfindens) während eines BFR-Trainings nicht erhöht. Dennoch zeigt sich in den eingeschlossenen Studien, dass die wahrgenommene Anstrengung bei der intermittierenden Methode geringer ausfällt [164].

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass zwischen kontinuierlicher und intermittierender BFR-Methode keine Unterschiede hinsichtlich chronischer Adaptationen bestehen, wobei das Schmerz- und Anstrengungsempfinden in der intermittierenden Anwendung tendenziell geringer sind und daher möglicherweise besser tolerierbar für empfindliche Populationen [38, 158]. Dennoch ist angesichts einiger Studienergebnisse bezüglich hämodynamischer Reaktionen [124] fraglich, ob das Ablassen des Drucks innerhalb der Pausen bei der intermittierenden Methode die Gefahr birgt, dass der metabolische Stress und damit der Mechanismus, durch den BFR potenziell Muskelhypertrophie induziert, im Vergleich zur kontinuierlichen Anwendung abgeschwächt wird [135, 164].

## 4.6 Mechanische Last beim Blood-Flow-Restriction Training

Während der Vorteil des BFR-Trainings wohl darin liegt, dass Trainingseffekte mit vergleichsweise niedrigen mechanischen Belastungen bzw.

Umfängen induziert werden können, besteht die Frage nach einer möglichen Effektmaximierung durch gleichzeitige Anwendung höherer Gewichte. In einer Studie von Lixandrao et al. [96] wurden die Anpassungen an ein BFR-Training unter verschiedenen mechanischen Lasten (20 % oder 40 % des 1RM) und Manschettendrücken während des Trainings (40 % oder 80 % des LOP) miteinander verglichen. Die Autoren schlussfolgerten, dass die Anwendung höherer Manschettendrücke bei einem Krafttraining mit geringen Lasten (hier 20 % 1RM + 80 % LOP) bezüglich einer Steigerung der Muskelmasse und Muskelkraft profitabler zu sein scheint als geringere Manschettendrücke (d. h. 40 % LOP). Wenn die Last allerdings gesteigert wird (z. B. 40 % des 1RM), zeigen die Ergebnisse keinen Vorteil höherer Manschettendrücke

Während höhere mechanische Lasten oder explizite Kontraktionsformen (z. B. exzentrische Belastungen) zu vermehrtem Muskelschaden führen können, weist die Verbindung solcher Belastungen mit BFR protektive Auswirkungen auf. Dabei rücken vor allem exzentrische Belastungen in den Fokus, die zwar hohe Anpassungen in Muskelkraft und -masse ermöglichen [157], allerdings ebenfalls mit größerem Muskelschaden und längerer Rehabilitationszeit verbunden sind [126]. Die Verbindung exzentrischer Belastung mit BFR konnte den Muskelschaden signifikant reduzieren [36] bei vergleichbaren Anpassungen während und nach der Belastung des kardiovaskulären Systems [36].

## 4.7 Practical Blood-Flow-Restriction

Practical BFR (pBFR) bezeichnet eine einfach zu praktizierende und kostengünstige Methode zur Anwendung von BFR in größeren Personengruppen [17]. Dabei werden nicht-pneumatische Manschetten wie z. B. elastische Kniebandagen [18] oder rigide Bänder [129] verwendet, sodass auf sperrige, umständliche und kostspielige

pneumatische Blutsperngeräte verzichtet werden kann. So könnte beispielsweise ein größerer Kader einer American-Football-Mannschaft gleichzeitig mit BFR trainieren [104]. Die Breite der bisher in Studien verwendeten, elastischen Bandagen variiert dabei zwischen 5 – 13 cm [11, 197], wobei die am häufigsten verwendete Manschettenbreite bei 7 – 8 cm lag [133, 192] und damit mit den meisten kommerziellen elastischen Kniebandagen übereinstimmt. Die große Herausforderung des pBFR ist jedoch die Applikation eines möglichst optimalen individualisierten BFR-Drucks, da die Quantifizierung des LOP mittels nicht-pneumatischer Bandagen und Manschetten nicht in der herkömmlichen Form realisierbar ist [109]. Um dennoch einen suffizienten Druck applizieren zu können, existieren bis heute mehrere Methoden, die bereits in Studien angewendet und evaluiert wurden [17].

Die erste Technik basiert auf der Wahrnehmung des durch die Bandage induzierten Drucks. In diesem Zusammenhang beschrieben Wilson et al. [192] eine Skala von 0 bis 10 zur Erfassung des empfundenen Drucks (engl.: perceived pressure/tightness scale), wobei der Wert 0 überhaupt keinen Druck und der Wert 10 hoher Druck verbunden mit Schmerz entsprach. Ziel dabei ist ein moderater Druck ohne Schmerzempfinden (7/10). Beispielsweise konnte mittels dieser Technik in einer Interventionsstudie von Lowery et al. [103] nach vier und acht Wochen LL-pBFR-RT (30 % 1RM) ähnliche Zuwächse in der Muskeldicke wie beim HL-RT (60 % 1RM) generiert werden. Der Vorteil dieser Technik zeigt sich in der simplen und individualisierten Erstanwendung [12, 192] und in der Unabhängigkeit in Bezug auf die Materialeigenschaften [17]. Nachteile zeigen sich jedoch in der geringen Reproduzierbarkeit in nachfolgenden Trainingseinheiten [13, 14]. Weiterhin besteht die Möglichkeit einer konditionierten Schmerzmodulation, welche das wahrgenommene Druckempfinden sowohl innerhalb als auch zwischen den Trainingseinheiten beeinflussen könnte, sodass potenziell ein insuffizienter Druck appliziert wird [69, 70].

Als zweite pBFR-Technik stellte sich aus einer Vielzahl von Studien die erstmalig von Yamana-ka et al. [197] angewendete Überlappungstechnik heraus. Dabei wird die nicht-pneumatische Manschette zunächst locker um die Extremität gelegt und anschließend zu einer vorgegebenen Überlappung zugezogen, um so die Restriktion des Blutflusses zu erzeugen [197]. Beim Zuziehen, also „Überlappen“, wurden in Studien sowohl fixe Werte [104, 197] als auch Werte in Relation zum Extremitätenumfang [1, 179] verwendet. Auch mittels dieser Technik konnten bereits akut [179] als auch chronisch [197] positive Trainingseffekte induziert werden. Vorteile dieser Technik sind die einfache Anwendung und gute Reproduzierbarkeit [104, 179]. Eine Individualisierung ist jedoch lediglich in der Variante, die den Extremitätenumfang einbezieht, möglich. So können feste Werte zu unterschiedlichen Restriktionsgraden zwischen den Anwendern führen, da der Umfang der Extremität den LOP beeinflusst [97]. Darüber hinaus kann diese Technik aufgrund von Differenzen bezüglich Breite und Material nicht auf andere Manschetten übertragen werden, sondern lediglich für bereits evaluierte Modelle verwendet werden. Weiterhin verlangt die Überlappungstechnik konstant bleibende Materialeigenschaften über einen längeren Trainings- bzw. Interventionszeitraum [2], da Veränderungen der Materialeigenschaften, z. B. durch „Ausleiern“ aufgrund repetitiver Dehnung bei elastischen Kniebandagen, potenziell unzureichende Restriktionsdrücke erzeugen.

Die dritte und jüngste pBFR-Technik könnte dem Problem der Veränderung von Materialeigenschaften von elastischen Bandagen entgegenwirken, da hier die Bandage vor der Erstapplikation bereits auf ihre maximale Elastizität (100 %) gedehnt wird. In diesem maximal gedehnten Zustand wird die Bandage um die Extremität gewickelt und alle 90° markiert (d. h. vier Markierungen pro gewickelte Runde). Anschließend wird die Bandage entfernt und mithilfe der zuvor erstellten Markierungen auf 75 %

der maximalen Elastizität reappliziert (d. h. die Wickelung, die zuvor für eine volle Umrundung des Oberschenkels ausgereicht hat (=100 %) wurde jetzt bis zu einem 3/4 des Oberschenkelumfangs gezogen (=75 %), dies entspricht 90° weniger als bei der maximalen Dehnung) [11]. Studien bestätigten die Effektivität dieser pBFR-Technik bei männlichen Sportstudierenden [11] sowie männlichen und weiblichen Leistungsrudern [65]. Obwohl sich diese Technik in Bezug auf die Blutflussrestriktion als valide zeigte [11] und Veränderungen von Materialeigenschaften bei elastischen Bandagen minimiert werden können, ist die Erstanwendung aufwendiger als die beiden zuvor genannten Techniken. Darüber hinaus ist die Studienlage hinsichtlich dieser Technik bisher sehr gering.

Um von den jeweiligen Vorteilen zu profitieren und potenzielle Nachteile zu reduzieren, kann eine Kombination aus verschiedenen Techniken ein probates Mittel sein. Als Empfehlung für die Praxis wird für die inertielle Applikation von pBFR zu der Technik basierend auf dem Druckempfinden mittels perceived pressure/tightness scale (7/10) mit anschließenden Markierungen und Verwendung der Überlappungstechnik für nachfolgende Trainingseinheiten geraten [17]. Dies setzt die Konstanz der mechanischen Eigenschaften der Bandagen über einen längeren Trainingszeitraum voraus [2]. Ähnliche Vorgehensweisen wurden bereits in Studien von Luebbers et al. [104] und Oliveira et al. [129] durchgeführt. So überprüften Luebbers et al. [104] die festgelegte Überlappung von 7,6 cm (7,6 cm Manschettenbreite) mithilfe der PPS und beobachteten, dass die stichprobenartig ausgewählten Probanden das Druckempfinden wie gewünscht mit 7 von 10 angegeben haben. Umgekehrt überprüften Oliveira et al. [129] den über das Druckempfinden bestimmten Manschettedruck von inertial applizierten 150 mmHg mithilfe der relativen Überlappungstechnik, um bessere Reproduzierbarkeit für die anschließende Intervention zu gewährleisten. Dabei zeigte sich im Durchschnitt eine Überlappung von ca.

5 % des Oberarmumfangs bei Nutzung einer rigiden Manschette.

Eine weitere Möglichkeit für die Anwendung von pBFR, die bisher jedoch theoretischer Natur ist, beschreibt die Palpation der A. radialis für die Anwendung am Ober-/Unterarm und die Palpation der A. tibialis posterior für die Anwendung am Ober-/Unterschenkel während der Applikation einer nichtpneumatischen Manschette oder Bandage. Sobald nach dem Anlegen und progredienten Aufpumpen der Manschette kein Puls mehr detektiert werden kann, ist der Druck annähernd mit dem LOP vereinbar. Während des Trainings kann nun anhand des manuell gemessenen LOP ein Manschettendruck für das Training abgeleitet werden, bei dem ein kontinuierlicher arteriellen Einstrom weiterhin gewährleistet wird [109].

## 4.8 Blood-Flow-Restriction vs. Ischemic Preconditioning

Die Anwendung venöser oder venös-arterieller Okklusionen findet zunehmend Anwendung im Training und der Rehabilitation. Dabei sind diverse Anwendungstechniken zu unterscheiden, die sich ebenfalls in der Höhe des angewendeten Drucks oder des Umfangs der Okklusion unterscheiden. Beim BFR-Training ist es das Ziel, durch eine proximal an der Extremität umgelegte Manschette eine überwiegend venöse Okklusion mit arterieller Hypoxämie des Gewebes zu erreichen, um dadurch den metabolischen Reiz während der Belastung zu erhöhen. Im Gegensatz dazu wird beim Ischemic Preconditioning (IPC) eine venös/arterielle Okklusion mittels maximalen oder supramaximalen Manschettendruck (gemäß des individuellen LOP) herbeigeführt, um die dadurch adressierte Muskulatur auf ein folgend einsetzendes Event (u. a. Operation, Sport) vorzubereiten. Ursprünglich aus der Kardiochirurgie stammend versuchte man

über temporäre Ischämiephasen den Herzmuskel für bevorstehende Operationen zu konditionieren und den Gewebeschaden zu reduzieren [58]. Während die BFR-Methode simultan zu einer körperlichen Belastung angewendet wird, ist die IPC eine Methode, die vor der Belastung durchgeführt wird. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine dreimalige, fünfminütige IPC mit jeweils einer fünfminütigen Reperfusionphase zwischen den Intervallen zu einem signifikanten Schutz gegenüber exzentrisch induziertem Muskelschaden an der oberen Extremität führt [49].

## 4.9 Blood-Flow-Restriction vs. Flossing

Flossing ist in den letzten Jahren zu einer populären Behandlungsmethode geworden, die u. a. zur Verbesserung der Range-of-Motion eines Gelenkes, zur Reduktion von Schmerzen oder zur Verletzungsprävention und zur Unterstützung des Behandlungspfad beim Return-to-Sport eingesetzt wird. Beim Flossing wird ein Gelenk oder ein Muskel mit einem Band, das meist aus Naturkautschuk besteht, umwickelt. Während der Okklusion einer unterschiedlich großen Fläche wird der Muskel angesteuert oder das Gelenk bewegt. Die Anwendungszeiten des Flossing sind unterschiedlich, aber meist geringer als fünf Minuten. Diese Technik erlangte initiale Popularität durch ein Buch von Starrett und Cordoza [171], die hypothetisierten, dass Faszienrisierungen und temporärer Blutstau im Muskel Mechanismen zur Schmerzreduktion und Muskelansteuerung sind. Weiterhin soll durch den extern angewendeten Druck auf ein Gelenk oder einen Muskel die Interaktion der Muskelfaszien zum neuromuskuloskelettalen System angesprochen werden und ermöglichen, dass sich Fasziensstrukturen dehnen und freier bewegen können [80]. Eine Meta-Analyse untersuchte diesbezüglich den Einfluss des Flossings auf die Dorsalextension des Sprunggelenks und konnte im Vergleich zu einer Kontrollgruppe

keinen unterstützenden Einfluss des Flossings feststellen [87].

Im Zuge der Anwendung des Flossing gibt es wenig wissenschaftlich stützbarer Kontrollparameter. In einer Studie von Kaneda et al. [82] wurde das Flossing-Band zur Anwendung am Oberschenkel auf das 1,5-fache seiner natürlichen Länge gedehnt von distal nach proximal mit einer 50 %igen Überlappung des vorherigen Bandanteils befestigt. Während das Flossing somit im Gegensatz zum BFR über eine größere Fläche gebunden wird, ist die Druckanwendung nur bedingt quantifizierbar. Auch wenn sich die zu Grunde liegenden Mechanismen zwischen dem Flossing und dem BFR-Training vermutlich ähneln, liegt das Ziel des BFR-Trainings mit der zeitlich längeren venösen Okklusion der Extremität mehr in der Auslösung von trainingsspezifischen Adaptationen (u. a. Muskelhypertrophie, Muskelkraftzuwachs). Wie bereits in den vorgestellten Kapiteln beschrieben, nimmt der notwendige Okklusionsdruck mit der Zunahme der Okklusionsfläche ab. Aus diesem Grund könnte es beim Flossing neben einer venösen zu einer ebenfalls vollständigen arteriellen Okklusion kommen und somit ebenfalls die Mechanismen des IPC imitieren.



# 5 Risiken und Kontraindikationen des Blood-Flow-Restriction Training



Die Identifikation möglicher Kontraindikationen (KI) basiert auf den Untersuchungen von Nebenwirkungen (NW) und unerwarteten Ereignissen (UE) während und nach der Anwendung eines BFR-Trainings. Dies ist von elementarer Bedeutung, um die Sicherheit der Anwendung zu gewährleisten und über mögliche Risiken dieser Trainingsmethode zu informieren.

## 5.1 Allgemeine unerwünschte Nebenwirkungen

Hinsichtlich der NW von BFR-Training existieren mehrere auf Fragebögen basierende Querschnittsuntersuchungen [119, 134, 142]. Zu den häufig genannten NW gehören Kribbeln (71,2 %), ein verzögert einsetzender Muskelschmerz (Muskelkater) (39,2 - 55,8 %), Taubheitsgefühle (18,5 %), Ohnmacht und Schwindel (3,8 - 14,6 %) sowie Blutergüsse beziehungsweise subkutane Blutungen (4,8 - 13,1 %). In seltenen Fällen kam es zu schwerwiegenden UE wie Rhabdomyolyse (0,008 - 1,9 %), zerebraler Anämie (0,277 %), Kältegefühl (0,123 %), venöse Thrombenbildung (0,055 %) und Lungenembolie (0,008 %). Fallberichte für seltene UE existieren für eine tiefe Venenthrombose [127] und dem Sehverlust durch Verschluss der zentralen Netzhautvene [131] nach der Durchführung von BFR-RT. Hinsichtlich der Durchführung von BFR-Training existieren ebenfalls Fallberichte über Rhabdomyolysen [78, 92].

Aufgrund der aktuellen Datenlage können mögliche Langzeitnebenwirkungen sowie zeitlich verzögert auftretende Nebenwirkungen grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden. Entsprechend benötigte und langfristig angelegte Beobachtungsstudien liegen derzeit nicht vor.

## 5.2 Venöse Thromboseentwicklung

Die Blutgerinnung charakterisiert eine Homöostase zwischen koagulatorischen und fibrinolytischen Prozessen, die durch Blutsperrern und Training unterschiedlich beeinflusst werden. Während koagulatorische Prozesse die Blutgerinnung und damit die Entstehung von Blutgerinnseln (Thromben) fördern, sind fibrinolytische Prozesse an der Spaltung von Thromben beteiligt. Daten aus dem Bereich der chirurgischen Medizin zeigen ein erhöhtes koagulatorisches Potential mit assoziiertem erhöhten Thromboserisiko durch die Anwendung einer Blutsperrern-induzierter Blutleere in den Operationsgebieten [114]. Im Gegensatz dazu folgt einem Krafttraining eine Steigerung der koagulatorischen sowie fibrinolytischen Prozesse [120]. Wenn man nun diese beiden Belastungen der venösen Okklusion mit einem Krafttraining verbindet, entsteht eine neue Herausforderung für das Gleichgewicht der Gerinnung.

Obwohl einzelne Fallbeispiele in der Literatur von tiefen Beinvenenthrombosen nach BFR-RT berichten [113], kommen systemische Übersichtsarbeiten zu dem Schluss, dass ein BFR-RT keinen negativen Einfluss auf die Gerinnungskaskade aufweist [106, 121]. Dabei weisen sowohl Akutstudien keine Veränderungen der D-Dimer-Konzentration nach LL-BFR-RT [54], als auch Studien mit chronischer BFR-Anwendung keine statistisch nachweisbaren Unterschiede zwischen HL-RT und LL-BFR-RT in den Parametern Fibrinogen oder Prothrombinzeit auf [30]. Die aktuellen Studienergebnisse deuten eher auf eine Steigerung der Fibrinolyseaktivität hin, z. B. durch erhöhte Konzentration von tissue-Plasminogen-Activator nach LL-BFR-RT [120]. Ähnliche Ergebnisse zeigen Studien mit Patienten während der Rehabilitation nach orthopädischen Eingriffen (z. B. VKB-P), die trotz eines erhöhten postoperativen Thromboserisikos keinen zusätzlichen Schaden durch ein LL-BFR-RT nehmen [74].

## 5.3 Venöse Insuffizienz

Das Niederdrucksystem der Venen beschreibt die Kapazitätsgefäße des menschlichen Körpers. Dabei wird ein tiefes (Drainage der Muskulatur, 90 % des venösen Rücktransportes) sowie ein oberflächliches (Drainage der Cutis und Subcutis, 10 % des venösen Rücktransportes) Venensystem unterschieden. Während auf Höhe des Herzens ein venöser Druck von 0-5 mmHg besteht, verursacht die Schwerkraft in stehender Position eine hydrostatische venöse Hypertonie von etwa 35 mmHg an der Hand und 90 mmHg über dem Knöchel [8, 178]. Unter Berücksichtigung des Anstiegs der venösen Hypertonie durch BFR-Training um 60 mmHg auf insgesamt 95 mmHg an der Hand, belegen diese Daten eine enorme kapazitätsbelastung des Venensystems [50]. Überträgt man diesen gemessenen Effekt auf eine BFR-Belastung der unteren Extremitäten, so ist nicht nur der zu erwartende Anstieg der venösen Hypertonie auf bis zu 180 mmHg von klinischem Interesse, sondern auch der zusätzliche venöse Reflux und dessen Auswirkung bei venösen Pathologien.

Unter physiologischen Bedingungen wird bei körperlicher Belastung (z. B. Radfahren, Gehen) der unteren Extremitäten der Druck in den tiefen Venen durch die Muskelpumpe reduziert. Dabei wird das Blut in vertikaler (in Richtung des Herzens) und horizontaler (in Richtung der oberflächlichen Venen, z. B. V. saphena magna) Richtung gedrückt [140, 173]. Nach dem Training dreht sich der horizontale Fluss teilweise, um den Druck im Bereich der Saphena magna wieder zu senken und erhöht den Druck der tiefen Venen leicht [152]. Ein übermäßiger venöser Reflux wird dabei in gesunden Venen durch Venenklappen verhindert. Da diese hydrostatische Homöostase durch das BFR-Training beeinträchtigt wird, können pathologische Venenverhältnisse durch dieses Training begünstigt oder bestehende negativ gefördert werden.

Die venöse Insuffizienz ist durch eine gestörte Funktion der Venenklappen und die damit verbundene Entwicklung von Varizen gekennzeichnet. Bei körperlicher Belastung sind die betroffenen Venenklappen nicht in der Lage, den venösen Rückfluss nach einer Muskelbelastung zu verhindern, was zu einer sog. ambulanten venösen Hypertonie führt [146]. Der Schweregrad der ambulanten venösen Hypertonie basiert dabei hauptsächlich auf zwei Komponenten: 1) der Leistung der Muskelpumpe und 2) der in das venöse System fließenden Blutmenge [145]. Da während des BFR-Trainings eine reduzierte, aber beständige arterielle Versorgung mit einer venösen Okklusion kombiniert wird [50] könnte die Volumenbelastung diese Trainingsmethode zu einer ambulanten venösen Hypertonie führen oder diese begünstigen.

Bisher gibt es wenige Studien über die Auswirkungen des BFR-Trainings auf das venöse System. Während Fahs und Kollegen [41] keine Veränderungen der venösen Compliance (Elastizität) durch ein sechswöchiges BFR-Training am Beinstrecker berichteten, konnten Iida et al. [76] nach einer ähnlichen Dauer beim BFR-Gehtraining einen Anstieg der venösen Compliance und des maximalen venösen Abflusses feststellen. Bei venöser Insuffizienz ist der maximale venöse Abfluss bereits erhöht [75, 183], während Daten zur Compliance keine klare Aussage zulassen. Während mehrere Studien über eine erhöhte venöse Compliance bei Patienten mit Veneninsuffizienz berichten [62, 175], zeigen Norgren et al. [125] eine Verringerung der venösen Compliance, die auf fibrotischen Ereignissen in insuffizienten Venen beruhen. Da sich diese Studien deutlich in der Körperposition der Patienten bei der Untersuchung unterscheiden und Daten zur Adaptation des Venensystems an verschiedene Trainingsreize fehlen, bleibt es aktuell fraglich, inwieweit das BFR-Training einen unterstützenden oder nachteiligen Effekt auf das gesunde und insuffiziente Venensystem hat.

## 5.4 Kardiovaskuläre Vorerkrankungen

LL-BFR-RT sorgt durch den zusätzlichen metabolischen Reiz für eine gesteigerte Sympathikusaktivität und hat Auswirkungen auf autonome kardiovaskuläre Steuerungsmechanismen [170]. So zeigen sich signifikant höhere systolische-, diastolische-, mittleren arterielle Blutdruckwerte und Herzfrequenzen beim LL-BFR-RT im Vergleich zu LL-RT [161].

Diesbezüglich zeigt eine aktuelle Übersichtsarbeit [35], dass BFR-RT anomale kardiovaskuläre Reaktionen hervorrufen kann und diese bei risikobehafteten Populationsgruppen, zum Beispiel bei Personen mit kardiovaskulären Erkrankungen, deutlicher ausgeprägter sein können. Aus diesem Grund stellt sich zurecht die Frage, ob das LL-BFR-RT einen negativen Einfluss auf einen Krankheitsverlauf bei kardiovaskulär vorerkrankten Personen hat. Die bisherige Anzahl an wissenschaftlichen Arbeiten zu diesem Thema ist gering, sowie auch die in den Arbeiten untersuchte Anzahl an Probandinnen und Probanden. Nakajima und Kollegen [118] konnten durch ein LL-BFR-RT bei Patienten mit stabiler koronarer Herzerkrankung eine signifikante Zunahme an Muskelquerschnitt sowie maximaler Sauerstoffaufnahme beschreiben. Die akute Belastungsreaktion zeigt auch in diesem Patientenkollektiv eine höhere muskuläre Belastung mit höheren trainingsassoziierten Schmerzen beim LL-BFR-RT gegenüber einem LL-RT, wird allerdings im Kontext der Hämodynamik als sichere Trainingsmethodik beschrieben [81]. Nichtsdestotrotz, um fundierte Aussagen über die Sicherheit der Anwendung von BFR-RT in risikoassoziierten Populationsgruppen tätigen zu können, sollten zukünftige Untersuchungen darauf abzielen, NW und UE als primäre Outcome-Parameter langfristig zu erfassen, um darauf basierend Rückschlüsse auf mögliche KI ziehen zu können.

Im Zuge der praktischen Anwendung mit kardiovaskulär vorerkrankten Populationen sollte dennoch ein LL-BFR-RT mit reduzierten Trainingsdrücken beginnen um die Reaktionen des Organismus auf den Stress zu evaluieren. Eine Überprüfung der Vitalparameter und Vigilanz der Trainierenden während der Belastung ist ebenfalls zu empfehlen. Weiterhin sollte bei einer BFR-Belastung von beiden Extremitäten zur selben Zeit darauf geachtet werden, dass die Eröffnung der Manschetten nicht gleichzeitig stattfindet. Neben der in der Extremität verursachten Hyperkaliämie, kann auch das aus der abgebundenen Extremität zum Herzen zurückströmende Blutvolumen zu einer akuten Steigerung der Vorlast führen, was bei Herzinsuffizienzen zur kardialen Dekompensation führen kann.

Während kardiovaskuläre Vorerkrankungen eine relative Kontraindikation für LL-BFR-RT darstellen und eine Überwachung der Patientin bzw. des Patienten während und nach der Belastung implizieren, sind vaskulär operierte Gefäße als Kontraindikation für LL-BFR-RT anzusehen. Intraluminale Stents, Prothesen oder Bypässe sollten vom BFR-Training aus mechanischen Gründen ausgenommen werden.

## 5.5 Muskelerkrankungen und muskuläre Schädigung

Systematische Übersichtsarbeiten zeigen, dass BFR-Training bei Patienten mit muskuloskelettalen Erkrankungen der unteren Extremität nicht häufiger zu UE führt, als bei herkömmlichem Krafttraining [113, 187]. Jedoch ist anzumerken, dass die physiologischen Reiz-Antwort-Reaktionen des Organismus bei LL-BFR-RT in Form der Ausschüttung von Laktat, Cortisol, Wachstumshormonen, Noradrenalin und Plasmaproteinen signifikant höher ausfallen als bei LL-RT [55, 176, 188], was bei gleicher Trainingsintensität auf eine stärkere trainingsinduzierte Schädigung der Muskulatur hinweist.

Dies sollte vor allem in Populationsgruppen mit keiner oder geringer Erfahrung hinsichtlich der Anwendung von Widerstandstraining berücksichtigt werden. Somit sollte die Einführung des BFR-RT als neue Trainingsmethode stets unter professioneller Aufsicht und nach gegebenen Sicherheitsanweisungen [135] stattfinden. Zusätzlich sollte ein individuelles Erfassen von akuten sowie chronischen kardiovaskulären und muskulären akuten Reaktionen stattfinden, um mögliche unerwünschte Effekte frühzeitig zu erkennen und diesen präventiv entgegenzuwirken.

In der Literatur beschreiben mehrere Einzelstudien verstärkte Muskelschädigung bis hin zur Rhabdomyolyse nach Belastung mittels BFR [189]. Eine Rhabdomyolyse definiert eine Muskelschädigung mit einer folgenden systemischen Konzentration des Enzyms Creatine Kinase (CK) von  $>5.000$  IU/L. Da muskuläre Enzyme wie CK oder Myoglobin über die Niere ausgeschieden werden, ist ein vermehrter Anfall dieser Proteine in der Lage die Nierenfunktion aktiv zu reduzieren und kann bis zum akuten Nierenversagen führen.

Im Vergleich zwischen LL-BFR-RT und LL-RT zeigt das BFR-Training eine höhere intrazelluläre Konzentration des Plasmaproteins Tetranectin auf, was auf eine stärkere Schädigung durch BFR hinweist [188]. Der muskelschädigende Einfluss des BFR-Trainings ist besonders hervorzuheben bei Trainingsbelastungen, die bis zum willkürlichem Muskelversagen durchgeführt werden [143] und sind dann vergleichbar mit den Auswirkungen von exzentrischem Maximalkrafttraining [163].

## 5.6 Erkrankungen des Blutes, innerer Organe und des Stoffwechsels sowie Tumorerkrankungen

Da das BFR-Training einen Zustand der Hypoxämie und Hyperkapnie in der abgebundenen Extremität verursacht, sind Erkrankungen, die durch hypoxische Zustände begünstigt werden als KI anzusehen. Die Sichelzellanämie ist eine Erkrankung der hämolytischen Anämien, bei der durch eine Punktmutation ein irreguläres Hämoglobin-Protein gebildet wird. In Zuständen der Hypoxie führt diese Veränderung zu einer Verformung der Erythrozyten, welche die Organdurchblutung beeinträchtigen können. Die durch BFR-verursachte Sauerstoffreduktion in der trainierenden Extremität wäre demzufolge in der Lage eine Sichelzellkrise zu begünstigen und ist somit als KI anzusehen [50].

Einflüsse des BFR-Trainings auf chronische Erkrankungen der inneren Organe wurden bisweilen nur selten in wissenschaftlichen Arbeiten untersucht. Eine Studie von Correa et al. [32] zeigte auf, dass ein BFR-RT den Progress eines chronischen Nierenversagens (CKD Stadium 2) über einen Trainingszeitraum von sechs Monaten reduzieren kann. Weitere Arbeiten mit Patientenkollektiven mit metabolischem Syndrom [154] oder Unterleibkrebspatienten [194] dokumentierte keine UE oder NW. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass in diesen Studien mögliche KI und NW nicht als primäre Parameter untersucht wurden und langfristige Effekte unberücksichtigt blieben. Inwieweit BFR-Training also in der Lage ist, Erkrankungen des Blutes, des Stoffwechsels, der inneren Organe oder Tumorerkrankungen positiv oder negativ zu beeinflussen ist Forschungsgegenstand zukünftiger Arbeiten.



## 6 Allgemeine und sicherheitsbezogene Hinweise zum BFR-Training



## 6.1 Manschetten

In der Wahl der Manschetten für das BFR-Training gibt es eine Vielzahl an erwerblichen Möglichkeiten in den unterschiedlichsten Preiskategorien. Während das Material vermutlich keinen Einfluss auf die Effekte des BFR-Trainings aufweist [135], sind autoregulierende, pneumatische Manschetten anderen nicht-pneumatischen Manschettensystemen überlegen. Pneumatisch-regulierte Systeme ermöglichen einen konsistenteren Verschlussdruck während des Trainings und eine höhere Reproduzierbarkeit des applizierten Drucks. Nicht-pneumatische Manschetten bergen das Risiko eines zu hohen oder zu niedrigen Drucks, was den Trainingseffekt negativ beeinflussen und zugleich einen gesundheitlichen Risikofaktor darstellen kann (z. B. durch Druckschädigung des Weichteilgewebes). Die Breite der Manschette sollte zwischen 5-15cm betragen. Dabei ist hervorzuheben, dass breitere Manschetten den erforderlichen Manschetten- druck pro Quadratzentimeter reduzieren. Die Breite der Manschette darf aber die Bewegung der Trainingsübung nicht negativ beeinflussen [135]. Die Manschetten sind weiterhin proximal an der zu trainierenden Extremität anzubringen [56] und der Manschettendruck sollte zwischen 40-80 % des LOP liegen. Mögliche Applikationsformen unterscheiden sich in kontinuierliche oder intermittierende Anwendung der BFR-Belastung [158], wobei Okklusionsdauern von 10-20 Minuten am Stück nicht überschritten werden sollten [135].

## 6.2 Protokolle

Für die Belastung eines LL-BFR-RT lassen sich folgende Determinanten anhand der Literatur darstellen:

- › Mechanischer Widerstand
  - 20-50 % des 1RM [23, 94]
- › Wiederholungen
  - 4 Sätze mit 30-15-15-15 oder mehrere Sätze bis zur Ermüdung [135]
  - Von Protokollen bis zum Muskelversagen sollte vor allem zu Beginn abgeraten werden, da diese zur Schädigung der Muskulatur führen können. Weiterhin sollte dabei berücksichtigt werden, dass die Verwendung eines Protokolls bis zum Versagen die strukturellen und funktionellen Anpassungen nicht zu maximieren scheint dabei allerdings die Schmerzen erhöht [143].
- › Pausen zwischen den Sätzen
  - 30-60 Sekunden; aktive sind passiven Pausen vorzuziehen [44]
- › Anzahl der Trainingseinheiten
  - 2-3x pro Woche
- › Dauer einer Trainingsperiode
  - Chronisch (>3w, 2-3x/w) oder akut als „Schockzyklus“ (<3w, 1-2x/d) [148]
- › Fraktionelle und temporale Verteilung der Kontraktionsarten pro Wiederholung und Dauer [s] einer Wiederholung
  - 1-2 s für Konzentrik und Exzentrik - wurde von der Mehrzahl der bislang durchgeführten Studien genutzt [135]
- › Spannungsdauer (time under tension)
  - Bislang keine Daten verfügbar
  - Ableitung anhand der vorgeschlagenen Wiederholungsanzahlen:  
15-30 Wdh. pro Satz + 1-2 s für Konz/Exz Phase = 30-120 s pro Satz

### › Bewegungsumfang

- Teilbewegungen (einfach) wie auch voller Bewegungsumfang möglich (schwer) [148]

### › Erholungszeit zwischen Trainingseinheiten

- LL-BFR-RT zeigt eine starke (aber kurz anhaltende) Wirkung auf die neuromuskuläre Funktion (schnelle Ermüdung, schnelle Erholung) [73]. Durch die niedrigen mechanischen Widerstände ist die erforderliche Erholungszeit eher niedrig als beim HL-RT.

Obwohl gezeigt werden konnte, dass die zusätzliche Applikation von BFR die Effekte eines Ausdauertrainings positiv beeinflussen kann (z. B. Steigerung der  $VO_{2max}$  und Pufferkapazität, Ökonomisierung der Bewegung), gibt es derzeit keine spezifischen Empfehlungen zur Anwendung dieser Trainingsmethode, um gezielt leistungsrelevante Determinanten bei Ausdauerathleten zu verbessern. Aus aktueller Sicht können folgende Richtlinien zur Gestaltung eines Ausdauertrainings mit BFR zusammengefasst werden [135, 166]:

### › Intensität

- Niedrig-intensiv (z. B. Gehen) bis hoch-intensiv (Sprint-Intervall-Training)
- Steuerung über "highest sustainable intensity" Ansatz möglich, d. h., Belastung (Wattzahl, Kadenz, Geschwindigkeit) wird durch Athleten selbst bestimmt ("self-paced"), sodass ein größtmöglicher Trainingsreiz (Dauer x verrichtete Arbeit) absolviert werden kann

### › Dauer der Restriktion

- 5-20 min pro Trainingseinheit (ungeeignet für langandauernde Trainingseinheiten)

### › Höhe des Manschettendrucks

- 40-80 % des LOP (Manschettendruck sollte individuell gewählt werden, sodass der vorgesehene Umfang der Trainingseinheit absolviert werden kann)

### › Anzahl der Trainingseinheiten (Dauer der Trainingsperiode)

- 2-3x pro Woche (>3 Wochen) oder 1-2x pro Tag (1-3 Wochen)

### › Progression des Trainingsreizes

- Progression über Erhöhung des Manschettendrucks oder der Trainingsintensität (z. B. von 40 % auf 60 % LOP oder 60 % auf 85 %  $VO_{2max}$  nach 4 Wochen)
- Gleichzeitige Steigerung von Manschettendruck und Trainingsintensität kann dazu führen, dass der Trainingsumfang reduziert wird

### › Art des Trainings

- Gehen bzw. Laufen oder Radfahren



# 7 Ableitungen für den Einsatz von BFR-Training im Leistungssport



Körperliches Training dient im leistungssportlichen Kontext primär zur Erhöhung der körperlichen Leistungsfähigkeit mit dem Ziel einer gesteigerten Wettkampfleistung sowie zur Sicherung der Belastbarkeit zur Abwendung negativer gesundheitlicher Effekte durch das leistungssportliche Training. Wissenschaftliche Erkenntnisse zur wirkungsvollen Gestaltung des BFR-Trainings basieren in vielen Fällen auf Untersuchungen mit Studienteilnehmerinnen und Studienteilnehmern ohne leistungssportlichen Hintergrund. Dieser Umstand erschwert die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Leistungssport, da hochtrainierte Athletinnen und Athleten aufgrund ihrer langjährigen Trainingshistorie und (Epi-) Genetik gegenüber wenig trainierten Personen anders auf Trainingsreize reagieren [9]. Von den 200 zitierten BFR-Artikeln dieses Positionspapiers basieren die Ergebnisse zum BFR-Training nur in 7 Originalarbeiten (LE 1B-2A) auf Probandinnen und Probanden mit einem LP 3 oder LP 4 ( $\approx 3,5\%$ ). Studien zum BFR-Training mit Weltklasseathletinnen und -athleten (LP 5) existieren bislang nicht. Diese Ergebnisse verdeutlichen die geringe Datenlage zur Wirkung und Anwendung von BFR-Training im Leistungssport. Das vorliegende Kapitel ist daher nicht als Handlungsempfehlung zu verstehen, sondern soll einen Überblick über bislang eingesetzte Methoden und Effekte des BFR-Trainings im leistungssportlichen Kontext darstellen.

Zur Implementierung der BFR-Belastung in den regulären Trainingsbetrieb des Leistungssports scheinen alle verfügbaren Systeme geeignet, wobei das pBFR sich vermutlich am leichtesten integrieren lässt und mit geringeren Kosten verbunden ist als pneumatisch-gesteuerte Systeme. Unter Bezugnahme auf die Ergebnisse mit hochtrainierten Sportlerinnen und Sportlern (LP 3, LP 4) scheint die Anwendung der BFR in Verbindung mit einem niedrigintensiven Krafttraining zur Steigerung der Muskelmasse beizutragen [159, 177]. Weiterhin weisen vereinzelte Daten darauf hin, dass das LL-BFR-RT zu einer vergrößerten Querschnittsfläche der Typ I Fa-

sern führt [18]. Diese Anpassungen entsprechen typischen Veränderungen, wie sie als Ergebnis eines Kraftausdauertrainings beschrieben werden [156]. Diese muskelstrukturelle Anpassung bedeutet jedoch einen theoretisch potenziell negativen Effekt auf sportliche Leistungen, bei denen eine Kraftentwicklung bei schnellen und sehr schnellen Bewegungen gefordert ist [112], weshalb die Einordnung des BFR-Krafttrainings in den Gesamttrainingsprozess beachtet werden muss. Weiterhin ist wahrscheinlich, dass ein LL-BFR-RT insbesondere im Vergleich zu identischen Bedingungen ohne BFR-Applikation – in Kombination mit den entsprechenden Trainingsmethoden (Kraft-/Ausdauertraining) die Muskelkraft sowie die lokale (Muskel) und globale (Herz-Kreislauf-System) Ausdauer erhöht [65, 195]. Unter Berücksichtigung der positiven Effekte eines LL-BFR-RT auf die Muskelmasse und -kraft, ist die Anwendung für den rehabilitativen Anwendungsbereich im Leistungssport von potenzieller Relevanz, um dem verletzungsbedingten (lokalen) Rückstand von Muskelmasse und -kraft auch bei geringen Belastungsintensitäten effizient auszugleichen und so den Return-to-Sport zu optimieren. Inwieweit sich die lokale (Kraft, Ausdauer) und globale (Ausdauer) Anpassung positiv auf die sportliche Leistungsfähigkeit hochtrainierter Athletinnen und Athleten in komplexen (Wettkampf-)Bewegungen auswirken, ist jedoch nicht hinreichend geklärt, da unterschiedliche Ergebnisse in der Literatur berichtet werden [137].

Im Anwendungsbereich Leistungssport zeigen sich sehr heterogene und individuelle Anpassungen an ein BFR-Training. Es zeichnet sich die Tendenz ab, dass die gesteigerte Muskelkraft durch ein LL-BFR-RT vorrangig bei eingelenkigen bzw. wenig koordinativ anspruchsvollen Tests (z. B. Bankdrücken) nachweisbar ist [177]. Für komplexe mehrgelenkige Übungen, wie beispielsweise bei der Kniebeuge, scheint die Wirkung des LL-BFR-Trainings während der Zielbewegung, insbesondere bei bereits gut ausgeprägtem Leistungsniveau, auf

das 1RM begrenzt [18]. Dies ist dadurch zu begründen, dass die bei einem LL-BFR-RT genutzten submaximalen Lasten potenziell keine neuromuskulären Anpassungen fördern, die bei einem Training mit hohen Lasten gegeben sind (bspw. Regulierung des Gleichgewichts). Zudem erscheint aus biomechanischer Sicht unklar, ob die Anwendung des BFR-Trainings ohne die vorherige Analyse der praktischen Relevanz eines gesteigerten muskulären Antriebs in der komplexen Zielbewegung zielführend ist. Demzufolge sollte die Applikation des BFR-Trainings im Leistungssport auf der Basis biomechanischer Analysen leistungslimitierender Muskelgruppen beruhen und die Aufgabe und Bedeutung der zu trainierenden Muskelgruppe in der Gesamtbewegung im Vorfeld bewertet werden. Diese Herangehensweise wird ebenfalls von Flanagan, Kulik and Salem [47] beschrieben. Vor dem Hintergrund zeigen die Autoren bei der tiefen Nackenkniebeuge, dass bei einem 3RM-Test die Antriebsleistung (Gelenkmomente und deren Derivate) des Knie- oder Hüftgelenks den individuell „limitierenden Gelenkantrieb“ darstellen kann, der die sportliche Leistung begrenzt. Dieses Prinzip ist auch auf andere sportliche Bewegungen übertragbar [200]. Vergleichbar verhält es sich mit lokalen Anpassungen der Muskelausdauer. Insbesondere im Leistungssport (LP  $\geq 3$ ) ist ein individualisiertes und zielgerichtetes Training von zentraler Bedeutung, um Trainingsanpassungen in die gewünschte Richtung zu erzielen. Inwieweit Eigenschaften von Knochen, Sehnen und Bänder mittels LL-BFR-RT bei hochtrainierten Sportlerinnen und Sportlern verändert werden können, ist unklar. Aktuell wurde dieser Forschungsgegenstand noch nicht mit hochtrainierten Athleten und/oder Athletinnen bearbeitet.

Für den Leistungssport ist die Tatsache von Relevanz, dass eine niederintensive Trainingsbelastung in Kombination mit einem BFR-Training zu vergleichbaren Ergebnissen bei Muskelhypertrophie und Ausdauer führt, wie eine hochintensive Trainingsbelastung ohne BFR-Trai-

ning. Dieser Umstand ermöglicht es theoretisch, die Gesamtbelastung im Training zu Gunsten einer verbesserten Regeneration zu reduzieren.

Aktuelle Studien zur Implementierung des LL-BFR-RT in Vorbereitung auf Hauptwettkämpfe in verschiedenen Sportarten existieren nicht (Dauer und Häufigkeit der Anwendung, Einordnung in Makro-, Meso- und Mikrozyklusplanung, IPC oder BFR). Generell scheint sich eine Anwendung des BFR-Trainings in Trainingsphasen, in denen Muskelmasse aufgebaut (Hypertrophiephase im Krafttraining) oder die aerobe Leistungsfähigkeit ( $VO_2\text{max}$ ) auf globaler oder lokaler Ebene trainiert werden soll (Wettkampfphase im Ausdauertraining), empfehlenswert. Dabei sollte das BFR-Training ergänzend in ausgewählten Trainingseinheiten zum regulären Training angewandt werden. Insbesondere für Sportarten, bei denen die sportliche Leistung durch schnelle bis sehr schnelle Bewegungen charakterisiert wird (bspw. 100 m Sprint), muss unter Umständen nach der Applikation von BFR-Training eine längere Taper-Phase in Betracht gezogen werden, um die Verschiebung des Muskelfasertyps von Typ I zu Typ II sicherzustellen [139]. Zudem sollte es Ziel zukünftiger Forschungen sein herauszustellen, ob und wie sich die Wirkung des BFR-Trainings auch bei längeren Anwendungsperioden (>8 Wochen) verändert, da für diese Anwendungsdauern bislang keine Daten vorliegen [137]. Ebenfalls sollten zukünftige Forschungsarbeiten untersuchen, ob mögliche negative Wechselwirkungen des BFR-Trainings mit anderen Trainingsinhalten bestehen, wenn diese parallel trainiert werden (bspw. Einfluss auf sportliche Technik, Schnelligkeit oder Regenerationsvermögen).



# 8 Forschungsdesiderate



Trotz der in den letzten Jahren steigenden Publikationszahlen zum BFR-Training sind teils grundlegende Fragen über die Wirkweise und Risiken, die Anwendung sowie der Implementation dieser Trainingsmethode in den regulären Trainingsbetrieb – insbesondere im Leistungssport – unbeantwortet.

Im Zuge der Wirkungsweise des LL-BFR-RT sind die Auswirkungen der durch die Manschette hervorgerufenen Effekte auf die verschiedenen Organsysteme im akuten und chronischen Setting noch unzureichend untersucht. Diesbezüglich sollten zukünftige Untersuchungen darauf abzielen, NW und UE als primäre Outcome-Parameter langfristig zu erfassen, um darauf basierend Rückschlüsse auf mögliche KI des BFR-Trainings ziehen zu können. Beispielsweise sind die akuten und langfristigen Einflüsse des BFR-Trainings und der induzierten venösen Hypertonie auf die Funktionsweise der venösen Kapazitätsgefäße noch weitgehend unerforscht. Akute Verschlechterung der venösen Funktion (Bspw. durch Klappenschädigungen) könnten den akuten vertikalen und horizontalen Transport des venösen Blutes negativ beeinflussen und bei chronischer Anwendung eine venöse Insuffizienz bedingen. Weiterhin sollten zukünftige Studien in diesem Arbeitsgebiet auch die Körperposition der Probandin bzw. des Probanden während der Belastung, den Einfluss von Lagerungswechseln sowie des applizierten BFR-Manschettendrucks auf das venöse System untersuchen.

Ähnliche Fragen lassen sich bezüglich der langfristigen kardiovaskulären Anpassungen an chronische BFR-Belastungen stellen [195]. Zukünftige Studien sollten die Wirkweisen und Auswirkungen der BFR-Belastung während einer einmaligen- und dauerhaften Anwendung (> 8 Wochen Trainingsdauer) auf die verschiedenen Organsysteme in den Fokus rücken, um eine valide Aussage über die Sicherheit und Tragweite der induzierbaren Effekte der Trainingsmethode zu ermöglichen. Hierbei stellen

sich für den Bereich der Rehabilitation auch immer mehr Fragen heraus, inwieweit das BFR-Training die Regeneration verletzter Strukturen möglicherweise positiv oder negativ beeinflussen könnte. Weiterhin sind Studien über den Einfluss der Trainingstechnik auf das Knochen- und Hormonsystem ebenfalls in zukünftigen Arbeiten zu fokussieren.

Da sich der Großteil der Daten dieser Arbeit über mögliche Nebenwirkungen und Kontraindikationen des BFR-Trainings aus Studien in männlichen Probandenkollektiven ableitet, sollten in Zukunft ein Fokus auf die Durchführung wissenschaftlicher Arbeiten mit weiblichen Probandenkollektiven sowie Probandinnen und Probanden mit Leistungssportintergrund gelegt werden. Dies schließt insbesondere auch den Nachwuchsleistungssport ein.

Weiterhin ist offen, welcher Okklusionsdruck während eines LL-BFR-RT die optimale Auswirkung auf den Organismus bei verschiedenen Trainingszielen (u. a. Muskelhypertrophie, Muskelausdauer) aufweist [197]. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage nach der Implementierung der BFR-Methodik in den athletenspezifischen Trainingsablauf oder in der Rehabilitation [197]. In welcher Weise kann ein BFR-Training die Zielsetzung eines Trainingsziels im Leistungssport unterstützen (z. B. Dauer und Häufigkeit der Anwendung, Einordnung in Makro-, Meso- und Mikrozyklusplanung, IPC oder BFR, Gestaltung von Taperphasen) oder in welchen Phasen der Trainingsgestaltung ist er potenziell hinderlich? Diesbezüglich fehlen wissenschaftliche Erkenntnisse zu möglichen Wechselwirkungen des BFR-Trainings mit anderen Trainingsinhalten, wenn diese parallel trainiert werden (bspw. Einfluss auf sportliche Technik, Schnelligkeit oder Regenerationsvermögen). Jene Fragen könnten durch repetitive Messungen oder Anwendungen von BFR-Interventionen in spezifischen Periodisierungsblöcken untersucht werden.

Weiterhin sollte die Wertigkeit des BFR-Trainings für den Leistungssport in Zukunft durch Darstellung der akuten und langfristigen physiologischen Anpassungsprozesse der Muskelkraft und -physiologie in Korrelation zu sportartspezifischen Leistungsparametern untersucht werden. Die initialen Hypothesen zukünftiger Fragestellungen sollten dabei die bisher beschriebenen Mechanismen der BFR-Belastung beachten. So ermöglicht es das BFR-Training, die Umgebung der arbeitenden Muskulatur in ein anaerobes Milieu zu verändern, um dadurch mögliche Reize zu setzen oder zu verstärken. Die dabei am häufigsten und validesten beschriebenen Effekte auf Muskelkraft, Muskelmasse und neuromuskuläre Ansteuerung sollten in der Fragestellung der erwarteten Effekte berücksichtigt werden. Neben der Korrelation zu sportartspezifischen Leistungsparametern ist das Ausmaß an Anpassungen weiterer Gewebestrukturen (u. a. Knochen-, Sehngewebe und Bandstrukturen) an die BFR-Methodik im regelmäßigen Trainingsbetrieb oder während rehabilitativer Ansätze von besonderem Interesse.

Da sich die aktuelle Studienlage weiterhin sehr defizitär bezüglich der möglichen Risiken des BFR-Trainings im Nachwuchsleistungssport, in minderbelastbaren pädiatrischen Populationen oder Behindertensport zeigt, kann für diese Populationen nur ein Transfer oben genannten Erkenntnisse getätigt werden. Eine spezielle Risikobeschreibung für diese Populationen ist auf Basis fehlender wissenschaftlicher Daten aktuell nicht möglich.

Auf Basis dieser Forschungsdesiderate lassen sich für zukünftige Forschungsarbeiten wünschenswerte Richtlinien, Empfehlungen und Ziele ableiten. Hinsichtlich der Applikation des BFR-Stimulus beschreibt das vorliegende Positionspapier eine Reihe an praktischen Techniken und Hilfsmitteln zur Trainingsbelastung von einzelnen Athleten und Gruppen. Für eine dem wissenschaftlichen Standard entsprechende BFR-Belastung sollte ein individueller Okklusionsdruck verwendet werden, der die Messung eines initialen LOP vor jeder Belastung bedingt. Weiterhin sollte die Manschette an der proximalen Extremität angewendet werden, um einen wissenschaftlich validen Stimulus zu induzieren. Zukünftige wissenschaftliche Arbeiten sollten die genannten Anwendungsempfehlungen in ihren Studiendesigns würdigen, sowie in der Durchführung der BFR-Anwendungen die in diesem Papier beschriebenen Risikofaktoren, und Kontraindikatoren und UE in einer initialen Anamnese bzw. im Rahmen der weiteren Betreuung der Athleten beachten. Weiterhin ist für eine valide Effektdarstellung die Untersuchung einer Kontrollgruppe mit Sham-Belastung ratsam, sofern möglich (siehe auch Kapitel „Planung und Dokumentation wissenschaftlicher Studien“).



# 9 Planung und Dokumentation wissenschaftlicher Studien



Für die Optimierung zukünftiger wissenschaftlicher Arbeiten über die Effekte des BFR-Trainings auf den Organismus und/oder leistungssportliche Determinanten ist anzuraten, die Belastungsnormative strukturiert zu definieren. Toigo und Boutellier [180] haben eine solche Belastungscharakterisierung bereits für das klassische Krafttraining definiert. Dabei wird die Belastung in 13 „mechano-biologische Deskriptoren“ unterteilt (z. B. angewendete Last, Anzahl der Wiederholungen, Pausen zwischen den Sätzen, etc.), die eine spätere Vergleichbarkeit wissenschaftlicher Arbeiten untereinander verbessert und den applizierten Reiz der Belastung detailliert charakterisiert. In Anlehnung an diese Stimulusbeschreibung stellt das BFR-Training nun weitere Stellschrauben für die Belastung dar, welche zu den 13 publizierten Deskriptoren hinzugefügt werden sollten (s. u.).

Durch Anwendung dieser detaillierten Charakterisierung des Stimulus erhöht sich die Aussagekraft zukünftiger Studien deutlich, da erst durch eine solche Charakterisierung die Vergleichbarkeit mit anderen Studien ermöglicht und eine adäquate Interpretation von Adaptationseffekten ermöglicht wird.

Weiterhin sollten zukünftige Studien eine detaillierte Anamnese der eingeschlossenen Probanden vornehmen, um mögliche BFR-spezifische Kontraindikationen ausschließen zu können. Da das BFR-Training eine Belastung darstellt, welche der Körper normalerweise nur unter pathologischen Bedingungen erfährt, ist die detaillierte Aufklärung der Probandinnen und Probanden / Athletinnen und Athleten sowie die Eruierung möglicher unerwünschter Ereignisse oder Kontraindikation aus medizinischer Sicht unerlässlich. Dabei stellen operative Interventionen an den Gefäßen (u. a. Gefäßstents, -bypässe), die von dem direkten Manschettendruck betroffen sind, sowie Hypoxie-induzierte Veränderungen des Blutes auf Basis angeborener Erkrankungen (u. a. Sichelzellanämie) klare Kontraindikationen dar. Weiterhin sollte die Anamnese kardiovaskuläre- und andere internistische Vorerkrankungen umfassen, um die Reaktion des BFR-Trainings auf den individuellen Probanden einschätzen zu können.

# 10 Orientierungshilfe für das wissenschaftliche Arbeiten mit BFR-Training



Nachfolgend sind die vorgenannten sowie weiterführende Hinweise, Empfehlungen und Anregungen für die Konzeption, Durchführung und Darstellung sowie Diskussion neuer wissenschaftlicher Studien innerhalb des Forschungsfeldes BFR-Training im Leistungs- und Nachwuchssport zusammengestellt. Ziel ist es, die Sicherheit von BFR-Studien zu festigen, aber auch die Nachvollziehbarkeit und Transparenz von Einzelarbeiten zu verbessern und somit deren Qualität und Vergleichbarkeit zu stärken. Dies soll zur Entwicklung eines möglichst systematischen Gesamtbildes wissenschaftlicher Erkenntnisse zum BFR-Training im Leistungs- und Nachwuchssport beitragen, welches eine elementare Grundlage auch für abgesichertes Praxishandeln darstellt.

## 10.1 Begründung der Fragestellung und des Designs eines wissenschaftlichen Projekts

Zukünftige Arbeiten sollten ihre Hypothesen theoriegeleitet entwerfen und basierend auf physiologischen Mechanismen begründen. Hierbei sollte dargelegt werden, welche quantitativ oder qualitativ nachzuweisenden Effekte zu erwarten sind. Bei der Hypothesenerstellung ist es wichtig, eine ausreichende Abgrenzung zu bisher durchgeführten Studien darzustellen. Zudem muss die Neuartigkeit des Erkenntnisgewinns überzeugend aufgezeigt werden. Dies sollte mit Bezug zu konkreten (nachwuchs)leistungssportrelevanten Untersuchungsfeldern ausgeführt werden, wie z. B.:

- › Wirkmechanismen und Effekte von BFR-Training
- › Spezifische oder allgemeine Aspekte der sportlichen Zielleistung und der Leistungsvoraussetzungen

- › Sportliche und allgemein psychophysische Belastbarkeit
- › Regeneration und Regenerationsmanagement (z. B. auch nach Verletzungen)
- › Trainingseffizienz und -ökonomie
- › Geschlechts- und zielgruppenspezifische Aspekte
- › Sicherheit der Methode und Technik

Weiterführend sollte das Untersuchungsdesign, einschließlich der zu verwendenden Messmethodik, im Hinblick auf das intendierte Untersuchungsziel und die Vergleichbarkeit zur Literatur entwickelt werden.

## 10.2 Abklärung von Kontraindikationen und Management der individuellen Compliance

Eine sichere und gesundheitlich unbedenkliche Anwendung der BFR-Methode muss gewährleistet sein. Eine initiale Anamnese und Diagnostik sind daher unerlässlich, um mögliche Risiken aufgrund potenzieller Kontraindikationen zu minimieren.

Über den gesamten Interventionszeitraum sollte zudem während und zwischen wiederholten Belastungseinheiten ein begleitendes Monitoring durchgeführt werden. Das Ziel des Monitorings ist einerseits, unerwünschte Effekte auszuschließen, sowie andererseits die langfristige Compliance der Athletinnen und Athleten zu beobachten und möglichst positiv zu beeinflussen. Selbstverständlich können die Monitoringparameter selbst auch im Studiendesign als Zielgrößen der Untersuchung definiert sein.

## Initiale Anamnese vor Interventionsbeginn

- › Medizinische Befundhistorie
- › Allergien/Unverträglichkeiten
- › Medikamenten-/Supplementationsanamnese
- › Anamnestischer Ausschluss einer vorliegenden aktuellen Belastungseinschränkung (u. a. grippaler Infekt, Pneumonie, Harnwegsinfekt)
- › Abfragung BFR-spezifischer Kontraindikationen
  - Gefäßchirurgische Eingriffe (u. a. Stent, Bypass)
  - Sichelzellanämie
  - Azidose
  - Extremitäteninfektion/ offene Frakturen
  - Extremitäten mit Dialysezugang
  - Maligne Hypertonie
  - Hauttransplantate
  - Tumor (distal der Cuff)

## Initiale Diagnostik vor Interventionsbeginn

- › Vollständige körperliche Untersuchung (u. a. allgemeine Sporttauglichkeit)
  - Kopf/Hals/Sinnesorgan
  - Herz/Kreislauf/Gefäße
  - Lunge/Lymphknoten
  - Abdomen/Niere
  - Wirbelsäule
  - Gelenke
  - Muskulatur/Sehnen
  - Nervensystem
  - Vollständige Entkleidung und Untersuchung der zu trainierenden Extremitäten

- › Ruhe-Herzfrequenz
- › Blutdruck-Messung aller zu belastenden Extremitäten (u. a. Ausschluss einer klinisch/manifesten und/oder malignen Hypertonie: sys > 160 mmHg, dias > 130 mmHg, Gefäß-Dissektion)
- › Basislabordiagnostik
  - Elektrolyte (Na, Ka, Ca)
  - Nierenwerte (z. B. Kreatinin, GFR, Harnstoff)
  - Entzündungswerte (z. B. CRP)
  - kleines Blutbild
  - Basisgerinnung (u. a. Quick, INR, aPTT)

## Untersuchungsbegleitendes Monitoring

- › subjektives Schmerzempfinden (z. B. Visual Analogskala [89])
- › subjektives Erholungs- und Beanspruchungsempfinden (z. B. AEB/KEB nach Kellmann et al. [85])
- › unerwünschte Nebenwirkungen und/oder Auffälligkeiten während Beanspruchung bzw. im Interventionsverlauf
- › Hypertrophie-Effekte des BFR-Trainings: Wiederholte Messung der Muskelmasse belasteter und nicht-belasteter Muskelgruppen
- › Muskelkraftzuwächse des BFR-Trainings: Wiederholte Messung der Muskelkraft belasteter Muskelgruppen
- › Ökonomie und Praktikabilität einer Integration der BFR-Trainingstechnik in den Trainings-/ Studienablauf

## 10.3 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse mit bestehender Literatur

In der Diskussion der eigenen Untersuchungsergebnisse sollte die Neuartigkeit der Erkenntnisse im Vergleich zur Literatur dargestellt und weiterführende wissenschaftliche Herausforderungen sowie mögliche Anwendungsoptionen für die Praxis aufgezeigt werden. Essenziell ist hierbei die Vergleichbarkeit zu bereits zuvor in der Literatur dokumentierten Befunden.

Zur besseren Vergleichbarkeit und Diskussion eigener Ergebnisse mit der Literatur sollten im Studiendesign möglichst etablierte Belastungsprotokolle verwendet und in der Literatur adressierte Untersuchungsparameter (z. B. Muskelkraft, Muskelmasse) nach dem Goldstandard der Messmethode miteingeschlossen werden. Diese können als Außenkriterien die Einordnung der eigenen Untersuchungsbefunde, die in Zusammenhang mit dem Untersuchungsziel ermittelt wurden, erleichtern. Es ist zudem essenziell, sämtliche Interventionsparameter detailliert zu beschreiben. Im Hinblick auf die Dokumentation der Belastungsstimuli (siehe Tabelle 4) empfiehlt sich die Orientierung an der Systematik von Toigo et al. [180].

**Tab. 4: Dokumentation der Belastungsstimuli**

Anzahl	Deskriptor	Anwendung/Beispiel
X <sub>1</sub>	Mechanische Last	75 % des 1RM
X <sub>2</sub>	Wiederholungsanzahl	6, 8, 12 Wiederholungen
X <sub>3</sub>	Satzanzahl	1, 3, 6 Sätze
X <sub>4</sub>	Satzpausen (in s oder min)	60 s, 2 min
X <sub>5</sub>	Anzahl an Trainingseinheiten (/d oder /w)	2x/W
X <sub>6</sub>	Dauer der wiss. Studienintervention (in d oder w)	10 Wochen
X <sub>7</sub>	fraktionelle und zeitliche Verteilung der Kontraktion und Modalität pro Wiederholung und Dauer [s] einer Wiederholung	2 s konzentrisch – 0 s isometrisch – 2 s exzentrisch
X <sub>8</sub>	Pausen zwischen den Wiederholungen	keine
X <sub>9</sub>	Time-under-Tension (in s oder min)	24 + 5 s
X <sub>10</sub>	Belastung bis zur willkürlichen Muskelermüdung	Ja oder Nein
X <sub>11</sub>	Range of Motion	Angabe in % oder °
X <sub>12</sub>	Belastungspause zwischen zwei Interventionen (in h oder d)	24h
X <sub>13</sub>	Detaillierte Beschreibung des Belastungsstimulus	u. a. Positionierung der Gelenke, Belastungsgeschwindigkeit, Kontrolle der Bewegung

Für die detaillierte Beschreibung des BFR-Stimulus sind weiterhin folgende Deskriptoren maßgeblich (siehe Tabelle 5):

**Tab. 5: Beschreibung des BFR-Stimulus**

<b>Anzahl</b>	<b>Deskriptor</b>	<b>Anwendung/Beispiel</b>
$Y_1$	Limb-Occlusion-Pressure (LOP)	Individuelle Messung mittels Doppler-Sonographie oder pneumatisch gesteuerter Manschettensysteme
$Y_2$	Manschettendruck während der Belastung	Individualisiert anhand des LOP, z. B. 50 % des LOP
$Y_3$	Manschettenposition	Proximal der trainierenden Extremität
$Y_4$	Manschettenbreite	Breite vs. schmale Manschette
$Y_5$	Anwendungsdauer	Kontinuierlich vs. intermittieren



# 11 Danksagung



Wir bedanken uns bei den weiteren Mitgliedern der BFR-Expertengruppe, die mit zahlreichen Diskussionsbeiträgen und Beratungsleistungen den umfangreichen Strukturierungs- und Entwicklungsprozess, aus dem dieses Positionspapier zum BFR-Training im Leistungssport heraus entstanden ist, konstruktiv bereichert haben:

<b>Name, Vorname</b>	<b>Universität / Standesorganisation</b>
Aykan, Jessica	Deutscher Verband für Physiotherapie (ZVK)
Braumann, Prof. Dr. med. Michael	Universität Hamburg / Wissenschaftlicher Beirat BISp
Franz, Jennifer	Deutsche Vereinigung für Sportwissenschaft (dvs)
Hagemann, M.Sc. Axel	Deutscher Verband für Physiotherapie (ZVK)
Kriemler, Prof. Dr. med. Susi	Universität Zürich / Gesellschaft für Pädiatrische Sportmedizin (GPS)
Mayer, Prof. Dr. med. Frank	Universität Potsdam / Deutsche Gesellschaft für Sportmedizin und Prävention (DGSP)
Roecker, Prof. Dr. med. Kai	HS Furtwangen / Deutsche Gesellschaft für Sportmedizin und Prävention (DGSP)
Schega, Prof. Dr. Lutz	OVGU Magdeburg
Schwirtz, Prof. Dr. Ansgar	TU München / Deutsche Vereinigung für Sportwissenschaft (dvs)
Seidel, Prof. Dr. Ilka	Karlsruher Institut für Technologie / Deutscher Olympischer Sportbund (DOSB)
Sperlich, Prof. Dr. Billy	JMU Würzburg / Deutsche Vereinigung für Sportwissenschaft (dvs)

# 12 Literatur



- [1] Abe, T., Fujita, S., Nakajima, T., Sakamaki, M., Ozaki, H., Ogasawara, R., Sugaya, M., Kudo, M., Kurano, M., Yasuda, T., Sato, Y., Ohshima, H., Mukai, C., and Ishii, N. 2010. Effects of Low-Intensity Cycle Training with Restricted Leg Blood Flow on Thigh Muscle Volume and  $\text{VO}_2\text{max}$  in Young Men. *Journal of sports science & medicine* 9, 3, 452–458.
- [2] Abe, T., Mouser, J. G., Dankel, S. J., Bell, Z. W., Buckner, S. L., Mattocks, K. T., Jessee, M. B., and Loenneke, J. P. 2019. A method to standardize the blood flow restriction pressure by an elastic cuff. *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 29, 3, 329–335.
- [3] Allen, D. G., Lamb, G. D., and Westerblad, H. 2008. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiological reviews* 88, 1, 287–332.
- [4] Amani, A. R., Sadeghi, H., and Afshar-nezhad, T. 2018. Interval Training with Blood Flow Restriction on Aerobic Performance among Young Soccer Players at Transition Phase. *Monten. J. Sports Sci. Med.* 7, 2.
- [5] Amano, S., Ludin, A. F. M., Clift, R., Nakazawa, M., Law, T. D., Rush, L. J., Manini, T. M., Thomas, J. S., Russ, D. W., and Clark, B. C. 2016. Effectiveness of blood flow restricted exercise compared with standard exercise in patients with recurrent low back pain: study protocol for a randomized controlled trial. *Trials* 17, 81.
- [6] 2009. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Medicine and science in sports and exercise* 41, 3, 687–708.
- [7] Araldi, E. and Schipani, E. 2010. Hypoxia, HIFs and bone development. *Bone* 47, 2, 190–196.
- [8] Arnoldi, C. C. 1965. Venous pressure in the leg of healthy human subjects at rest and during muscular exercise in the nearly erect position. *Acta chirurgica Scandinavica* 130, 6, 570–583.
- [9] Barnett, A., Cerin, E., Reaburn, P., and Hooper, S. 2010. The effects of training on performance and performance-related states in individual elite athletes: a dynamic approach. *Journal of sports sciences* 28, 10, 1117–1126.
- [10] Beekley, M. D., Sato, Y., and Abe, T. 2005. KAATSU-walk training increases serum bone-specific alkaline phosphatase in young men. *Int. J. KAATSU Training Res.* 1, 2, 77–81.
- [11] Behringer, M., Behlau, D., Montag, J. C. K., McCourt, M. L., and Mester, J. 2017. Low-Intensity Sprint Training With Blood Flow Restriction Improves 100-m Dash. *Journal of strength and conditioning research* 31, 9, 2462–2472.
- [12] Bell, Z. W., Dankel, S. J., Mattocks, K. T., Buckner, S. L., Jessee, M. B., Mouser, J. G., Abe, T., and Loenneke, J. P. 2018. An investigation into setting the blood flow restriction pressure based on perception of tightness. *Physiological measurement* 39, 10, 105006.
- [13] Bell, Z. W., Dankel, S. J., Spitz, R. W., Chatakondi, R. N., Abe, T., and Loenneke, J. P. 2020. The Perceived Tightness Scale Does Not Provide Reliable Estimates of Blood Flow Restriction Pressure. *Journal of sport rehabilitation* 29, 4, 516–518.

- [14] Bell, Z. W., Spitz, R. W., Wong, V., Yamada, Y., Chatakondi, R. N., Abe, T., Dankel, S. J., and Loenneke, J. P. 2020. Conditioning participants to a relative pressure: implications for practical blood flow restriction. *Physiological measurement* 41, 8, 08NT01.
- [15] Bemben, D. A., Palmer, I. J., Abe, T., Sato, Y., and Bemben, M. G. 2007. Effects of a single bout of low intensity KAATSU resistance training on markers of bone turnover in young men. *Int. J. KAATSU Training Res.* 3, 2, 21–26.
- [16] Biazon, T. M. P. C., Ugrinowitsch, C., Soligon, S. D., Oliveira, R. M., Bergamasco, J. G., Borghi-Silva, A., and Libardi, C. A. 2019. The Association Between Muscle Deoxygenation and Muscle Hypertrophy to Blood Flow Restricted Training Performed at High and Low Loads. *Frontiers in Physiology* 10, 446.
- [17] Bielitzki, R., Behrendt, T., Behrens, M., and Schega, L. 2021. Current Techniques Used for Practical Blood Flow Restriction Training: A Systematic Review. *Journal of strength and conditioning research* 35, 10, 2936–2951.
- [18] Bjørnsen, T., Wernbom, M., Kirketeig, A., Paulsen, G., Samnøy, L., Bækken, L., Cameron-Smith, D., Berntsen, S., and Raastad, T. 2019. Type 1 Muscle Fiber Hypertrophy after Blood Flow-restricted Training in Powerlifters. *Medicine and science in sports and exercise* 51, 2, 288–298.
- [19] Bohm, S., Mersmann, F., and Arampatzis, A. 2015. Human tendon adaptation in response to mechanical loading: a systematic review and meta-analysis of exercise intervention studies on healthy adults. *Sports medicine - open* 1, 1, 7.
- [20] Brandner, C. R., Kidgell, D. J., and Warmington, S. A. 2015. Unilateral bicep curl hemodynamics: Low-pressure continuous vs high-pressure intermittent blood flow restriction. *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 25, 6, 770–777.
- [21] Brandner, C. R. and Warmington, S. A. 2017. Delayed Onset Muscle Soreness and Perceived Exertion After Blood Flow Restriction Exercise. *Journal of strength and conditioning research* 31, 11, 3101–3108.
- [22] Buckner, S. L., Dankel, S. J., Counts, B. R., Jessee, M. B., Mouser, J. G., Mattocks, K. T., Laurentino, G. C., Abe, T., and Loenneke, J. P. 2017. Influence of cuff material on blood flow restriction stimulus in the upper body. *The journal of physiological sciences : JPS* 67, 1, 207–215.
- [23] Buckner, S. L., Jessee, M. B., Dankel, S. J., Mattocks, K. T., Mouser, J. G., Bell, Z. W., Abe, T., Bentley, J. P., and Loenneke, J. P. 2020. Blood flow restriction does not augment low force contractions taken to or near task failure. *European journal of sport science* 20, 5, 650–659.
- [24] Centner, C., Jerger, S., Lauber, B., Seynnes, O., Friedrich, T., Lolli, D., Gollhofer, A., and König, D. 2022. Low-Load Blood Flow Restriction and High-Load Resistance Training Induce Comparable Changes in Patellar Tendon Properties. *Medicine and science in sports and exercise* 54, 4, 582–589.
- [25] Centner, C. and Lauber, B. 2020. A Systematic Review and Meta-Analysis on Neural Adaptations Following Blood Flow Restriction Training: What We Know and What We Don't Know. *Frontiers in Physiology* 11.

- [26] Centner, C., Lauber, B., SEYNNES, O. R., Jerger, S., Sohnius, T., Gollhofer, A., and König, D. 2019. Low-load blood flow restriction training induces similar morphological and mechanical Achilles tendon adaptations compared with high-load resistance training. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985) 127, 6, 1660–1667.
- [27] Cerqueira, M. S., Maciel, D. G., Barboza, J. A. M., Centner, C., Lira, M., Pereira, R., and Brito Vieira, W. H. de. 2021. Effects of low-load blood flow restriction exercise to failure and non-failure on myoelectric activity: a meta-analysis. *Journal of athletic training*.
- [28] Chang, Y. K., Labban, J. D., Gapin, J. I., and Etnier, J. L. 2012. The effects of acute exercise on cognitive performance: a meta-analysis. *Brain research* 1453, 87–101.
- [29] Christiansen, D., Eibye, K. H., Rasmussen, V., Voldbye, H. M., Thomassen, M., Nyberg, M., Gunnarsson, T. G. P., Skovgaard, C., Lindskrog, M. S., Bishop, D. J., Hostrup, M., and Bangsbo, J. 2019. Cycling with blood flow restriction improves performance and muscle K<sup>+</sup> regulation and alters the effect of anti-oxidant infusion in humans. *The Journal of physiology* 597, 9, 2421–2444.
- [30] Clark, B. C., Manini, T. M., Hoffman, R. L., Williams, P. S., Guiler, M. K., Knutson, M. J., McGlynn, M. L., and Kushnick, M. R. 2011. Relative safety of 4 weeks of blood flow-restricted resistance exercise in young, healthy adults. *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 21, 5, 653–662.
- [31] Cook, C. J., Kilduff, L. P., and Beaven, C. M. 2014. Improving strength and power in trained athletes with 3 weeks of occlusion training. *International journal of sports physiology and performance* 9, 1, 166–172.
- [32] Corrêa, H. L., Neves, R. V. P., Deus, L. A., Souza, M. K., Haro, A. S., Costa, F., Silva, V. L., Santos, C. A. R., Moraes, M. R., Simões, H. G., Navalta, J. W., Prestes, J., and Rosa, T. S. 2021. Blood Flow Restriction Training Blunts Chronic Kidney Disease Progression in Humans. *Medicine and science in sports and exercise* 53, 2, 249–257.
- [33] Corvino, R. B., Rossiter, H. B., Loch, T., Martins, J. C., and Caputo, F. 2017. Physiological responses to interval endurance exercise at different levels of blood flow restriction. *European journal of applied physiology* 117, 1, 39–52.
- [34] Crenshaw, A. G., Hargens, A. R., Gershuni, D. H., and Rydevik, B. 1988. Wide tourniquet cuffs more effective at lower inflation pressures. *Acta orthopaedica Scandinavica* 59, 4, 447–451.
- [35] Cristina-Oliveira, M., Meireles, K., Spranger, M. D., O’Leary, D. S., Roschel, H., and Peçanha, T. 2020. Clinical safety of blood flow-restricted training? A comprehensive review of altered muscle metaboreflex in cardiovascular disease during ischemic exercise. *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology* 318, 1, H90–H109.
- [36] Curty, V. M., Melo, A. B., Caldas, L. C., Guimarães-Ferreira, L., Sousa, N. F. de, Vassallo, P. F., Vasquez, E. C., and Barauna, V. G. 2018. Blood flow restriction attenuates eccentric exercise-induced muscle damage without perceptual and cardiovascular overload. *Clinical physiology and functional imaging* 38, 3, 468–476.

- [37] Dankel, S. J., Jessee, M. B., Buckner, S. L., Mouser, J. G., Mattocks, K. T., and Loenneke, J. P. 2017. Are higher blood flow restriction pressures more beneficial when lower loads are used? *Physiology international* 104, 3, 247–257.
- [38] Davids, C. J., Raastad, T., James, L. P., Gajanand, T., Smith, E., Connick, M., McGorm, H., Keating, S., Coombes, J. S., Peake, J. M., and Roberts, L. A. 2021. Similar Morphological and Functional Training Adaptations Occur Between Continuous and Intermittent Blood Flow Restriction. *Journal of strength and conditioning research* 35, 7, 1784–1793.
- [39] Domingos, E. and Polito, M. D. 2018. Blood pressure response between resistance exercise with and without blood flow restriction: A systematic review and meta-analysis. *Life sciences* 209, 122–131.
- [40] Eberhardt, R. T. and Raffetto, J. D. 2005. Chronic venous insufficiency. *Circulation* 111, 18, 2398–2409.
- [41] Fahs, C. A., Rossow, L. M., Thiebaud, R. S., Loenneke, J. P., Kim, D., Abe, T., Beck, T. W., Feeback, D. L., Bembem, D. A., and Bembem, M. G. 2014. Vascular adaptations to low-load resistance training with and without blood flow restriction. *European journal of applied physiology* 114, 4, 715–724.
- [42] Faigenbaum, A. D. and McFarland, J. E. 2016. RESISTANCE TRAINING FOR KIDS. *ACSM'S Health & Fitness Journal* 20, 5, 16–22.
- [43] Fatela, P., Reis, J. F., Mendonca, G. V., Avela, J., and Mil-Homens, P. 2016. Acute effects of exercise under different levels of blood-flow restriction on muscle activation and fatigue. *European journal of applied physiology* 116, 5, 985–995.
- [44] Fekri-Kurabbaslou, V., Shams, S., and Amani-Shalamzari, S. 2022. Effect of different recovery modes during resistance training with blood flow restriction on hormonal levels and performance in young men: a randomized controlled trial. *BMC sports science, medicine & rehabilitation* 14, 1, 47.
- [45] Ferraz, R. B., Gualano, B., Rodrigues, R., Kurimori, C. O., Fuller, R., Lima, F. R., Sá-Pinto, A. L. de, and Roschel, H. 2018. Benefits of Resistance Training with Blood Flow Restriction in Knee Osteoarthritis. *Medicine and science in sports and exercise* 50, 5, 897–905.
- [46] Fitschen, P. J., Kistler, B. M., Jeong, J. H., Chung, H. R., Wu, P. T., Walsh, M. J., and Wilund, K. R. 2014. Perceptual effects and efficacy of intermittent or continuous blood flow restriction resistance training. *Clinical physiology and functional imaging* 34, 5, 356–363.
- [47] Flanagan, S. P., Kulik, J. B., and Salem, G. J. 2015. The Limiting Joint During a Failed Squat: A Biomechanics Case Series. *Journal of strength and conditioning research* 29, 11.
- [48] Formiga, M. F., Fay, R., Hutchinson, S., Locandro, N., Ceballos, A., Lesh, A., Buscheck, J., Meanor, J., Owens, J. G., and Cahalin, L. P. 2020. EFFECT OF AEROBIC EXERCISE TRAINING WITH AND WITHOUT BLOOD FLOW RESTRICTION ON AEROBIC CAPACITY IN HEALTHY YOUNG ADULTS: A SYSTEMATIC REVIEW WITH META-ANALYSIS. *International journal of sports physical therapy* 15, 2, 175–187.

- [49] Franz, A., Behringer, M., Harmsen, J.-F., Mayer, C., Krauspe, R., Zilkens, C., and Schumann, M. 2018. Ischemic Preconditioning Blunts Muscle Damage Responses Induced by Eccentric Exercise. *Medicine and science in sports and exercise* 50, 1, 109–115.
- [50] Franz, A., Berndt, F., Raabe, J., Harmsen, J.-F., Zilkens, C., and Behringer, M. 2020. Invasive Assessment of Hemodynamic, Metabolic and Ionic Consequences During Blood Flow Restriction Training. *Frontiers in Physiology* 11, 617668.
- [51] Freitas, E. D. S., Miller, R. M., Heishman, A. D., Aniceto, R. R., Silva, J. G. C., and Bemben, M. G. 2019. Perceptual responses to continuous versus intermittent blood flow restriction exercise: A randomized controlled trial. *Physiology & behavior* 212, 112717.
- [52] Freitas, E. D. S., Miller, R. M., Heishman, A. D., Ferreira-Júnior, J. B., Araújo, J. P., and Bemben, M. G. 2020. Acute Physiological Responses to Resistance Exercise With Continuous Versus Intermittent Blood Flow Restriction: A Randomized Controlled Trial. *Frontiers in Physiology* 11, 132.
- [53] Freitas, E. D. S., Poole, C., Miller, R. M., Heishman, A. D., Kaur, J., Bemben, D. A., and Bemben, M. 2017. Time Course Change in Muscle Swelling: High-Intensity vs. Blood Flow Restriction Exercise. *International journal of sports medicine* 38, 13, 1009–1016.
- [54] Fry, C. S., Glynn, E. L., Drummond, M. J., Timmerman, K. L., Fujita, S., Abe, T., Dhanani, S., Volpi, E., and Rasmussen, B. B. 2010. Blood flow restriction exercise stimulates mTORC1 signaling and muscle protein synthesis in older men. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985) 108, 5, 1199–1209.
- [55] Fujita, S., Abe, T., Drummond, M. J., Cadenas, J. G., Dreyer, H. C., Sato, Y., Volpi, E., and Rasmussen, B. B. 2007. Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985) 103, 3, 903–910.
- [56] Gavanda, S., Isenmann, E., Schlöder, Y., Roth, R., Freiwald, J., Schiffer, T., Geisler, S., and Behringer, M. 2020. Low-intensity blood flow restriction calf muscle training leads to similar functional and structural adaptations than conventional low-load strength training: A randomized controlled trial. *PloS one* 15, 6, e0235377.
- [57] Giles, L., Webster, K. E., McClelland, J., and Cook, J. L. 2017. Quadriceps strengthening with and without blood flow restriction in the treatment of patellofemoral pain: a double-blind randomised trial. *British journal of sports medicine* 51, 23, 1688–1694.
- [58] Gill, R., Kuriakose, R., Gertz, Z. M., Salloum, F. N., Xi, L., and Kukreja, R. C. 2015. Remote ischemic preconditioning for myocardial protection: update on mechanisms and clinical relevance. *Molecular and cellular biochemistry* 402, 1-2, 41–49.
- [59] Gonzalez, A. M., Hoffman, J. R., Stout, J. R., Fukuda, D. H., and Willoughby, D. S. 2016. Intramuscular Anabolic Signaling and Endocrine Response Following Resistance Exercise: Implications for Muscle Hypertrophy. *Sports medicine* (Auckland, N.Z.) 46, 5, 671–685.
- [60] Grønfeldt, B. M., Lindberg Nielsen, J., Mieritz, R. M., Lund, H., and Aagaard, P. 2020. Effect of blood-flow restricted vs heavy-load strength training on muscle strength: Systematic review and meta-analysis. *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 30, 5, 837–848.

- [61] Grotle, A.-K., Macefield, V. G., Farquhar, W. B., O'Leary, D. S., and Stone, A. J. 2020. Recent advances in exercise pressor reflex function in health and disease. *Autonomic neuroscience : basic & clinical* 228, 102698.
- [62] Gundersen, J., Haeger, K., and Lindell, S. E. 1971. Plethysmographic studies of venous distensibility and emptying rate in normal legs and legs with chronic venous insufficiency. *Zentralblatt für Phlebologie* 10, 3, 170–177.
- [63] Haddock, B., Hansen, S. K., Lindberg, U., Nielsen, J. L., Frandsen, U., Aagaard, P., Larsson, H. B. W., and Suetta, C. 2021. Exercise-induced fluid shifts are distinct to exercise mode and intensity: a comparison of blood flow-restricted and free-flow resistance exercise. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)* 130, 6, 1822–1835.
- [64] Häussinger, D. 1996. The role of cellular hydration in the regulation of cell function. *The Biochemical journal* 313 (Pt 3), 697–710.
- [65] Held, S., Behringer, M., and Donath, L. 2020. Low intensity rowing with blood flow restriction over 5 weeks increases  $VO_2$ max in elite rowers: A randomized controlled trial. *Journal of science and medicine in sport* 23, 3, 304–308.
- [66] Herold, F., Behrendt, T., Meißner, C., Müller, N. G., and Schega, L. 2022. The Influence of Acute Sprint Interval Training on Cognitive Performance of Healthy Younger Adults. *International journal of environmental research and public health* 19, 1.
- [67] Herold, F., Törpel, A., Schega, L., and Müller, N. G. 2019. Functional and/or structural brain changes in response to resistance exercises and resistance training lead to cognitive improvements - a systematic review. *European review of aging and physical activity : official journal of the European Group for Research into Elderly and Physical Activity* 16, 10.
- [68] Hughes, L., Grant, I., and Patterson, S. D. 2021. Aerobic exercise with blood flow restriction causes local and systemic hypoalgesia and increases circulating opioid and endocannabinoid levels. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)* 131, 5, 1460–1468.
- [69] Hughes, L. and Patterson, S. D. 2019. Low intensity blood flow restriction exercise: Rationale for a hypoalgesia effect. *Medical hypotheses* 132, 109370.
- [70] Hughes, L. and Patterson, S. D. 2020. The effect of blood flow restriction exercise on exercise-induced hypoalgesia and endogenous opioid and endocannabinoid mechanisms of pain modulation. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)* 128, 4, 914–924.
- [71] Hughes, L., Patterson, S. D., Haddad, F., Rosenblatt, B., Gissane, C., McCarthy, D., Clarke, T., Ferris, G., Dawes, J., and Paton, B. 2019. Examination of the comfort and pain experienced with blood flow restriction training during post-surgery rehabilitation of anterior cruciate ligament reconstruction patients: A UK National Health Service trial. *Physical therapy in sport : official journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine* 39, 90–98.

- [72] Hughes, L., Rosenblatt, B., Haddad, F., Gissane, C., McCarthy, D., Clarke, T., Ferris, G., Dawes, J., Paton, B., and Patterson, S. D. 2019. Comparing the Effectiveness of Blood Flow Restriction and Traditional Heavy Load Resistance Training in the Post-Surgery Rehabilitation of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Patients: A UK National Health Service Randomised Controlled Trial. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)* 49, 11, 1787–1805.
- [73] Husmann, F., Mittlmeier, T., Bruhn, S., Zschorlich, V., and Behrens, M. 2018. Impact of Blood Flow Restriction Exercise on Muscle Fatigue Development and Recovery. *Medicine and science in sports and exercise* 50, 3, 436–446.
- [74] Hylden, C., Burns, T., Stinner, D., and Owens, J. 2015. Blood flow restriction rehabilitation for extremity weakness: a case series. *Journal of special operations medicine : a peer reviewed journal for SOF medical professionals* 15, 1, 50–56.
- [75] Iannuzzi, A., Panico, S., Ciardullo, A. V., Bellati, C., Cioffi, V., Iannuzzo, G., Celentano, E., Berrino, F., and Rubba, P. 2002. Varicose veins of the lower limbs and venous capacitance in postmenopausal women: relationship with obesity. *Journal of vascular surgery* 36, 5, 965–968.
- [76] Iida, H., Nakajima, T., Kurano, M., Yasuda, T., Sakamaki, M., Sato, Y., Yamasoba, T., and Abe, T. 2011. Effects of walking with blood flow restriction on limb venous compliance in elderly subjects. *Clinical physiology and functional imaging* 31, 6, 472–476.
- [77] Ilett, M. J., Rantalainen, T., Keske, M. A., May, A. K., and Warmington, S. A. 2019. The Effects of Restriction Pressures on the Acute Responses to Blood Flow Restriction Exercise. *Frontiers in Physiology* 10, 1018.
- [78] Iversen, E. and Røstad, V. 2010. Low-load ischemic exercise-induced rhabdomyolysis. *Clinical journal of sport medicine : official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine* 20, 3, 218–219.
- [79] Jessee, M. B., Mattocks, K. T., Buckner, S. L., Dankel, S. J., Mouser, J. G., Abe, T., and Loenneke, J. P. 2018. Mechanisms of Blood Flow Restriction: The New Testament. *Techniques in Orthopaedics* 33, 2, 72–79.
- [80] Kalc, M., Mikl, S., Žokš, F., Vogrin, M., and Stöggel, T. 2021. Effects of Different Tissue Flossing Applications on Range of Motion, Maximum Voluntary Contraction, and H-Reflex in Young Martial Arts Fighters. *Frontiers in Physiology* 12, 752641.
- [81] Kambič, T., Novaković, M., Tomažin, K., Strojnik, V., Božič-Mijovski, M., and Jug, B. 2021. Hemodynamic and Hemostatic Response to Blood Flow Restriction Resistance Exercise in Coronary Artery Disease: A Pilot Randomized Controlled Trial. *The Journal of cardiovascular nursing* 36, 5, 507–516.
- [82] Kaneda, H., Takahira, N., Tsuda, K., Tozaki, K., Kudo, S., Takahashi, Y., Sasaki, S., and Kenmoku, T. 2020. Effects of Tissue Flossing and Dynamic Stretching on Hamstring Muscles Function. *Journal of sports science & medicine* 19, 4, 681–689.
- [83] Karatzaferi, C., Haan, A. de, Ferguson, R. A., van Mechelen, W., and Sargeant, A. J. 2001. Phosphocreatine and ATP content in human single muscle fibres before and after maximum dynamic exercise. *Pflugers Archiv : European journal of physiology* 442, 3, 467–474.

- [84] Kawakami, Y., Muraoka, T., Ito, S., Kanehisa, H., and Fukunaga, T. 2002. In vivo muscle fibre behaviour during counter-movement exercise in humans reveals a significant role for tendon elasticity. *The Journal of physiology* 540, Pt 2, 635–646.
- [85] Kellmann, M. 2021. Das Akutmaß und die Kurzsкала zur Erfassung von Erholung und Beanspruchung für Erwachsene und Kinder/Jugendliche. *Schriftenreihe des Bundesinstituts für Sportwissenschaft v.2020*. Sportverlag Strauß, Hellenthal.
- [86] Keramidis, M. E., Kounalakis, S. N., and Geladas, N. D. 2012. The effect of interval training combined with thigh cuffs pressure on maximal and submaximal exercise performance. *Clinical physiology and functional imaging* 32, 3, 205–213.
- [87] Kielur, D. S. and Powden, C. J. 2020. Changes of Ankle Dorsiflexion Using Compression Tissue Flossing: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of sport rehabilitation* 30, 2, 306–314.
- [88] Kim, S., Sherk, V.D., Bemben, M.G., & Bemben, D.A. 2012. Effects of short term low intensity resistance training with blood flow restriction on bone markers and muscle cross-sectional area in young men.
- [89] Kolind, M. I., Gam, S., Phillip, J. G., Pareja-Blanco, F., Olsen, H. B., Gao, Y., Søgaard, K., and Nielsen, J. L. 2022. Effects of low load exercise with and without blood-flow restriction on microvascular oxygenation, muscle excitability and perceived pain. *European journal of sport science*, 1–10.
- [90] Korakakis, V., Whiteley, R., and Epameinontidis, K. 2018. Blood Flow Restriction induces hypoalgesia in recreationally active adult male anterior knee pain patients allowing therapeutic exercise loading. *Physical therapy in sport : official journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine* 32, 235–243.
- [91] Korakakis, V., Whiteley, R., and Giakas, G. 2018. Low load resistance training with blood flow restriction decreases anterior knee pain more than resistance training alone. A pilot randomised controlled trial. *Physical therapy in sport : official journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine* 34, 121–128.
- [92] Krieger, J., Sims, D., and Wolterstorff, C. 2018. A Case of Rhabdomyolysis Caused by Blood Flow-Restricted Resistance Training. *Journal of special operations medicine : a peer reviewed journal for SOF medical professionals* 18, 2, 16–17.
- [93] Kubo, K., Komuro, T., Ishiguro, N., Tsunoda, N., Sato, Y., Ishii, N., Kanehisa, H., and Fukunaga, T. 2006. Effects of low-load resistance training with vascular occlusion on the mechanical properties of muscle and tendon. *Journal of applied biomechanics* 22, 2, 112–119.
- [94] Laurentino, G., Ugrinowitsch, C., Aihara, A. Y., Fernandes, A. R., Parcell, A. C., Ricard, M., and Tricoli, V. 2008. Effects of strength training and vascular occlusion. *International journal of sports medicine* 29, 8, 664–667.

- [95] Lixandrão, M. E., Ugrinowitsch, C., Berton, R., Vechin, F. C., Conceição, M. S., Damas, F., Libardi, C. A., and Roschel, H. 2018. Magnitude of Muscle Strength and Mass Adaptations Between High-Load Resistance Training Versus Low-Load Resistance Training Associated with Blood-Flow Restriction: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)* 48, 2, 361–378.
- [96] Lixandrão, M. E., Ugrinowitsch, C., Laurentino, G., Libardi, C. A., Aihara, A. Y., Cardoso, F. N., Tricoli, V., and Roschel, H. 2015. Effects of exercise intensity and occlusion pressure after 12 weeks of resistance training with blood-flow restriction. *European journal of applied physiology* 115, 12, 2471–2480.
- [97] Loenneke, J. P., Allen, K. M., Mouser, J. G., Thiebaud, R. S., Kim, D., Abe, T., and Bemben, M. G. 2015. Blood flow restriction in the upper and lower limbs is predicted by limb circumference and systolic blood pressure. *European journal of applied physiology* 115, 2, 397–405.
- [98] Loenneke, J. P., Fahs, C. A., Rossow, L. M., Abe, T., and Bemben, M. G. 2012. The anabolic benefits of venous blood flow restriction training may be induced by muscle cell swelling. *Medical hypotheses* 78, 1, 151–154.
- [99] Loenneke, J. P., Fahs, C. A., Rossow, L. M., Sherk, V. D., Thiebaud, R. S., Abe, T., Bemben, D. A., and Bemben, M. G. 2012. Effects of cuff width on arterial occlusion: implications for blood flow restricted exercise. *European journal of applied physiology* 112, 8, 2903–2912.
- [100] Loenneke, J. P., Thiebaud, R. S., Fahs, C. A., Rossow, L. M., Abe, T., and Bemben, M. G. 2013. Effect of cuff type on arterial occlusion. *Clinical physiology and functional imaging* 33, 4, 325–327.
- [101] Loenneke, J. P., Thiebaud, R. S., Fahs, C. A., Rossow, L. M., Abe, T., and Bemben, M. G. 2014. Blood flow restriction: effects of cuff type on fatigue and perceptual responses to resistance exercise. *Acta physiologica Hungarica* 101, 2, 158–166.
- [102] Loenneke, J. P., Wilson, J. M., Marín, P. J., Zourdos, M. C., and Bemben, M. G. 2012. Low intensity blood flow restriction training: a meta-analysis. *European journal of applied physiology* 112, 5, 1849–1859.
- [103] Lowery, R. P., Joy, J. M., Loenneke, J. P., Souza, E. O. de, Machado, M., Dudeck, J. E., and Wilson, J. M. 2014. Practical blood flow restriction training increases muscle hypertrophy during a periodized resistance training programme. *Clinical physiology and functional imaging* 34, 4, 317–321.
- [104] Luebbbers, P. E., Fry, A. C., Kriley, L. M., and Butler, M. S. 2014. The effects of a 7-week practical blood flow restriction program on well-trained collegiate athletes. *Journal of strength and conditioning research* 28, 8, 2270–2280.
- [105] Luebbbers, P. E., Witte, E. V., Oshel, J. Q., and Butler, M. S. 2019. Effects of Practical Blood Flow Restriction Training on Adolescent Lower-Body Strength. *Journal of strength and conditioning research* 33, 10, 2674–2683.

- [106] Madarame, H., Kurano, M., Takano, H., Iida, H., Sato, Y., Ohshima, H., Abe, T., Ishii, N., Morita, T., and Nakajima, T. 2010. Effects of low-intensity resistance exercise with blood flow restriction on coagulation system in healthy subjects. *Clinical physiology and functional imaging* 30, 3, 210–213.
- [107] Mair, S. D., Seaber, A. V., Glisson, R. R., and Garrett, W. E. 1996. The role of fatigue in susceptibility to acute muscle strain injury. *The American journal of sports medicine* 24, 2, 137–143.
- [108] Manimmanakorn, A., Hamlin, M. J., Ross, J. J., Taylor, R., and Manimmanakorn, N. 2013. Effects of low-load resistance training combined with blood flow restriction or hypoxia on muscle function and performance in netball athletes. *Journal of science and medicine in sport* 16, 4, 337–342.
- [109] Mattocks, K. T., Jessee, M. B., Mouser, J. G., Dankel, S. J., Buckner, S. L., Bell, Z. W., Owens, J. G., Abe, T., and Loenneke, J. P. 2018. The Application of Blood Flow Restriction: Lessons From the Laboratory. *Current sports medicine reports* 17, 4, 129–134.
- [110] McEwen, J. A., Owens, J. G., and Jeyasurya, J. 2019. Why is it Crucial to Use Personalized Occlusion Pressures in Blood Flow Restriction (BFR) Rehabilitation? *J. Med. Biol. Eng.* 39, 2, 173–177.
- [111] McKay, A. K. A., Stellingwerff, T., Smith, E. S., Martin, D. T., Mujika, I., Goosey-Tolfrey, V. L., Sheppard, J., and Burke, L. M. 2022. Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework. *International journal of sports physiology and performance* 17, 2, 317–331.
- [112] Methenitis, S., Mpampoulis, T., Spiliopoulou, P., Papadimas, G., Papadopoulou, C., Chalari, E., Evangelidou, E., Stasinaki, A.-N., Nomikos, T., and Terzis, G. 2020. Muscle fiber composition, jumping performance, and rate of force development adaptations induced by different power training volumes in females. *Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme* 45, 9, 996–1006.
- [113] Minniti, M. C., Statkevich, A. P., Kelly, R. L., Rigsby, V. P., Exline, M. M., Rhon, D. I., and Clewley, D. 2020. The Safety of Blood Flow Restriction Training as a Therapeutic Intervention for Patients With Musculoskeletal Disorders: A Systematic Review. *The American journal of sports medicine* 48, 7, 1773–1785.
- [114] Mori, N., Kimura, S., Onodera, T., Iwasaki, N., Nakagawa, I., and Masuda, T. 2016. Use of a pneumatic tourniquet in total knee arthroplasty increases the risk of distal deep vein thrombosis: A prospective, randomized study. *The Knee* 23, 5, 887–889.
- [115] Mouser, J. G., Dankel, S. J., Jessee, M. B., Mattocks, K. T., Buckner, S. L., Counts, B. R., and Loenneke, J. P. 2017. A tale of three cuffs: the hemodynamics of blood flow restriction. *European journal of applied physiology* 117, 7, 1493–1499.
- [116] Mouser, J. G., Mattocks, K. T., Buckner, S. L., Dankel, S. J., Jessee, M. B., Bell, Z. W., Abe, T., Bentley, J. P., and Loenneke, J. P. 2019. High-pressure blood flow restriction with very low load resistance training results in peripheral vascular adaptations similar to heavy resistance training. *Physiological measurement* 40, 3, 35003.

- [117] Mun Dal-Ju and Park Jae-Cheol. 2021. Effect of Strength Training Combined with Blood Flow Restriction Exercise on Leg Muscle Thickness in Children with Cerebral Palsy. *PNF and Movement* 19, 3, 441–449.
- [118] Nakajima, T., Kurano, M., Iida, H., Takano, H., Madarame, H., Yasuda, T., Sato, Y., and Morita, T. 2010. Effects of Low-Intensity KAATSU Resistance Training on Skeletal Muscle Size and Muscle Strength/Endurance Capacity in Patients with Ischemic Heart Diseases. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 42, 5, 743.
- [119] Nakajima, T., Kurano, M., Iida, H., Takano, H., Oonuma, H., Morita, T., Meguro, K., Sato, Y., Nagata, T., and Group, K. T. 2006. Use and safety of KAATSU training: Results of a national survey. *Int. J. KAATSU Training Res.* 2, 1, 5–13.
- [120] Nakajima, T., Takano, H., Kurano, M., Iida, H., Kubota, N., Yasuda, T., Kato, M., Meguro, K., Sato, Y., Yamazaki, Y., Kawashima, S., Ohshima, H., Tachibana, S., Nagata, T., Abe, T., Ishii, N., and Morita, T. 2007. Effects of KAATSU training on haemostasis in healthy subjects. *Int. J. KAATSU Training Res.* 3, 1, 11–20.
- [121] Nascimento, D. d. C., Petriz, B., Oliveira, S. d. C., Vieira, D. C. L., Funghetto, S. S., Silva, A. O., and Prestes, J. 2019. Effects of blood flow restriction exercise on hemostasis: a systematic review of randomized and non-randomized trials. *International journal of general medicine* 12, 91–100.
- [122] Nelson, C. R., Debold, E. P., and Fitts, R. H. 2014. Phosphate and acidosis act synergistically to depress peak power in rat muscle fibers. *American journal of physiology. Cell physiology* 307, 10, C939–50.
- [123] Neto, G. R., Novaes, J. S., Salerno, V. P., Gonçalves, M. M., Batista, G. R., and Cirilo-Sousa, M. S. 2018. Does a resistance exercise session with continuous or intermittent blood flow restriction promote muscle damage and increase oxidative stress? *Journal of sports sciences* 36, 1, 104–110.
- [124] Neto, G. R., Novaes, J. S., Salerno, V. P., Gonçalves, M. M., Piazero, B. K. L., Rodrigues-Rodrigues, T., and Cirilo-Sousa, M. S. 2017. Acute Effects of Resistance Exercise With Continuous and Intermittent Blood Flow Restriction on Hemodynamic Measurements and Perceived Exertion. *Perceptual and motor skills* 124, 1, 277–292.
- [125] Norgren, L. and Thulesius, O. 1975. Pressure-volume characteristics of foot veins in normal cases and patients with venous insufficiency. *Blood vessels* 12, 1, 1–12.
- [126] Nosaka, K. and Newton, M. 2002. Concentric or eccentric training effect on eccentric exercise-induced muscle damage. *Medicine and science in sports and exercise* 34, 1, 63–69.
- [127] Noto, T., Hashimoto, G., Takagi, T., Awaya, T., Araki, T., Shiba, M., Iijima, R., Hara, H., Moroi, M., Nakamura, M., and Sugi, K. 2017. Paget-Schroetter Syndrome Resulting from Thoracic Outlet Syndrome and KAATSU Training. *Internal medicine (Tokyo, Japan)* 56, 19, 2595–2601.
- [128] Ohta, H., Kurosawa, H., Ikeda, H., Iwase, Y., Satou, N., and Nakamura, S. 2003. Low-load resistance muscular training with moderate restriction of blood flow after anterior cruciate ligament reconstruction. *Acta orthopaedica Scandinavica* 74, 1, 62–68.

- [129] Oliveira, J., Campos, Y., Leitão, L., Arriel, R., Novaes, J., and Vianna, J. 2020. Does Acute Blood Flow Restriction with Pneumatic and Non-Pneumatic Non-Elastic Cuffs Promote Similar Responses in Blood Lactate, Growth Hormone, and Peptide Hormone? *Journal of human kinetics* 74, 85–97.
- [130] Oliveira, M. F. M. de, Caputo, F., Corvino, R. B., and Denadai, B. S. 2016. Short-term low-intensity blood flow restricted interval training improves both aerobic fitness and muscle strength. *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 26, 9, 1017–1025.
- [131] Ozawa, Y., Koto, T., Shinoda, H., and Tsubota, K. 2015. Vision Loss by Central Retinal Vein Occlusion After Kaatsu Training: A Case Report. *Medicine* 94, 36, e1515.
- [132] Park, S., Kim, J. K., Choi, H. M., Kim, H. G., Beekley, M. D., and Nho, H. 2010. Increase in maximal oxygen uptake following 2-week walk training with blood flow occlusion in athletes. *European journal of applied physiology* 109, 4, 591–600.
- [133] Paton, C. D., Addis, S. M., and Taylor, L.-A. 2017. The effects of muscle blood flow restriction during running training on measures of aerobic capacity and run time to exhaustion. *European journal of applied physiology* 117, 12, 2579–2585.
- [134] Patterson, S. D. and Brandner, C. R. 2018. The role of blood flow restriction training for applied practitioners: A questionnaire-based survey. *Journal of sports sciences* 36, 2, 123–130.
- [135] Patterson, S. D., Hughes, L., Warmington, S., Burr, J., Scott, B. R., Owens, J., Abe, T., Nielsen, J. L., Libardi, C. A., Laurentino, G., Neto, G. R., Brandner, C., Martin-Hernandez, J., and Loenneke, J. 2019. Blood Flow Restriction Exercise: Considerations of Methodology, Application, and Safety. *Frontiers in Physiology* 10, 533.
- [136] Peitz, M., Behringer, M., and Granacher, U. 2018. A systematic review on the effects of resistance and plyometric training on physical fitness in youth- What do comparative studies tell us? *PloS one* 13, 10, e0205525.
- [137] Pignanelli, C., Christiansen, D., and Burr, J. F. 2021. Blood flow restriction training and the high-performance athlete: science to application. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985) 130, 4, 1163–1170.
- [138] Pignanelli, C., Petrick, H. L., Keyvani, F., Heigenhauser, G. J. F., Quadrilatero, J., Holloway, G. P., and Burr, J. F. 2019. Low-load resistance training to task failure with and without blood flow restriction: muscular functional and structural adaptations. *American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 318, 2, R284-95.
- [139] Plotkin, D. L., Roberts, M. D., Haun, C. T., and Schoenfeld, B. J. 2021. Muscle Fiber Type Transitions with Exercise Training: Shifting Perspectives. *Sports* (Basel, Switzerland) 9, 9.
- [140] POLLACK, A. A. and TAYLOR, B. E. 1949. The effect of exercise and body position on the venous pressure at the ankle in patients having venous valvular defects. *The Journal of clinical investigation* 28, 3, 559–563.

- [141] Pontifex, M. B., McGowan, A. L., Chandler, M. C., Gwizdala, K. L., Parks, A. C., Fenn, K., and Kamijo, K. 2019. A primer on investigating the after effects of acute bouts of physical activity on cognition. *Psychology of Sport and Exercise* 40, 16, 1–22.
- [142] Queiros, V. S. de, Dantas, M., Neto, G. R., da Silva, L. F., Assis, M. G., Almeida-Neto, P. F., Dantas, P. M. S., and Cabral, B. G. d. A. T. 2021. Application and side effects of blood flow restriction technique: A cross-sectional questionnaire survey of professionals. *Medicine* 100, 18, e25794.
- [143] Queiros, V. S. de, Dos Santos, Í. K., Almeida-Neto, P. F., Dantas, M., França, I. M. de, Vieira, W. H. d. B., Neto, G. R., Dantas, P. M. S., and Cabral, B. G. d. A. T. 2021. Effect of resistance training with blood flow restriction on muscle damage markers in adults: A systematic review. *PloS one* 16, 6, e0253521.
- [144] Ramis, T. R., Muller, C. H. d. L., Boeno, F. P., Teixeira, B. C., Rech, A., Pompermayer, M. G., Medeiros, N. d. S., Oliveira, Á. R. de, Pinto, R. S., and Ribeiro, J. L. 2020. Effects of Traditional and Vascular Restricted Strength Training Program With Equalized Volume on Isometric and Dynamic Strength, Muscle Thickness, Electromyographic Activity, and Endothelial Function Adaptations in Young Adults. *Journal of strength and conditioning research* 34, 3, 689–698.
- [145] Recek, C. 2013. Calf pump activity influencing venous hemodynamics in the lower extremity. *The International journal of angiology : official publication of the International College of Angiology, Inc* 22, 1, 23–30.
- [146] Recek, C. and Pojer, H. 2000. Ambulatory pressure gradient in the veins of the lower extremity. *VASA. Zeitschrift fur Gefasskrankheiten* 29, 3, 187–190.
- [147] Rodrigues Neto, G., Silva, J. C. G. d., Freitas, L., Silva, H. G. d., Caldas, D., Novaes, J. D. S., and Cirilo-Sousa, M. S. 2019. Effects of strength training with continuous or intermittent blood flow restriction on the hypertrophy, muscular strength and endurance of men. *Acta Sci. Health Sci.* 41, 1, 42273.
- [148] Rolnick, N. and Schoenfeld, B. J. 2020. Blood Flow Restriction Training and the Physique Athlete: A Practical Research-Based Guide to Maximizing Muscle Size. *Strength & Conditioning Journal* 42, 5, 22–36.
- [149] Rossow, L. M., Fahs, C. A., Loenneke, J. P., Thiebaud, R. S., Sherk, V. D., Abe, T., and Bemben, M. G. 2012. Cardiovascular and perceptual responses to blood-flow-restricted resistance exercise with differing restrictive cuffs. *Clinical physiology and functional imaging* 32, 5, 331–337.
- [150] Sale, D. G. 1988. Neural adaptation to resistance training. *Medicine and science in sports and exercise* 20, 5 Suppl, S135-45.
- [151] Sardeli, A. V., Ferreira, M. L. V., Santos, L. d. C., Rodrigues, M. d. S., Damasceno, A., Cavaglieri, C. R., and Chacon-Mikahil, M. P. T. 2018. LOW-LOAD RESISTANCE EXERCISE IMPROVES COGNITIVE FUNCTION IN OLDER ADULTS. *Rev Bras Med Esporte* 24, 2, 125–129.
- [152] Sarin, S., Scurr, J. H., and Smith, P. D. 1992. Medial calf perforators in venous disease: the significance of outward flow. *Journal of vascular surgery* 16, 1, 40–46.

- [153] Sato, Y., Yoshitomi, A., and Abe, T. 2005. Acute growth hormone response to low-intensity KAATSU resistance exercise: Comparison between arm and leg. *Int. J. KAATSU Training Res.* 1, 2, 45–50.
- [154] Satoh, I. 2011. Kaatsu Training: Application to Metabolic Syndrome. *Int. J. KAATSU Training Res.* 7, 1, 7–12.
- [155] Schoenfeld, B. J. 2010. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *Journal of strength and conditioning research* 24, 10, 2857–2872.
- [156] Schoenfeld, B. J., Grgic, J., van Every, D. W., and Plotkin, D. L. 2021. Loading Recommendations for Muscle Strength, Hypertrophy, and Local Endurance: A Re-Examination of the Repetition Continuum. *Sports (Basel, Switzerland)* 9, 2.
- [157] Schoenfeld, B. J., Ogborn, D. I., Vigotsky, A. D., Franchi, M. V., and Krieger, J. W. 2017. Hypertrophic Effects of Concentric vs. Eccentric Muscle Actions: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of strength and conditioning research* 31, 9, 2599–2608.
- [158] Schwiete, C., Franz, A., Roth, C., and Behringer, M. 2021. Effects of Resting vs. Continuous Blood-Flow Restriction-Training on Strength, Fatigue Resistance, Muscle Thickness, and Perceived Discomfort. *Frontiers in Physiology* 12, 663665.
- [159] Scott, B. R., Loenneke, J. P., Slattery, K. M., and Dascombe, B. J. 2016. Blood flow restricted exercise for athletes: A review of available evidence. *Journal of science and medicine in sport* 19, 5, 360–367.
- [160] Scott, B. R., Peiffer, J. J., and Goods, P. S. R. 2017. The Effects of Supplementary Low-Load Blood Flow Restriction Training on Morphological and Performance-Based Adaptations in Team Sport Athletes. *Journal of strength and conditioning research* 31, 8, 2147–2154.
- [161] Scott, B. R., Peiffer, J. J., Thomas, H. J., Marston, K. J., and Hill, K. D. 2018. Hemodynamic Responses to Low-Load Blood Flow Restriction and Unrestricted High-Load Resistance Exercise in Older Women. *Frontiers in Physiology* 9, 1324.
- [162] Shekelle, P. G., Woolf, S. H., Eccles, M., and Grimshaw, J. 1999. Developing clinical guidelines. *Western Journal of Medicine* 170, 6, 348–351.
- [163] Sieljacks, P., Matzon, A., Wernbom, M., Ringgaard, S., Vissing, K., and Overgaard, K. 2016. Muscle damage and repeated bout effect following blood flow restricted exercise. *European journal of applied physiology* 116, 3, 513–525.
- [164] Sinclair, P., Kadhum, M., and Paton, B. 2022. Tolerance to Intermittent vs. Continuous Blood Flow Restriction Training: A meta-Analysis. *International journal of sports medicine* 43, 1, 3–10.
- [165] Skorski, S. and Hecksteden, A. 2021. Coping With the „Small Sample-Small Relevant Effects“ Dilemma in Elite Sport Research. *International journal of sports physiology and performance* 16, 11, 1559–1560.
- [166] Smith, N. D. W., Scott, B. R., Girard, O., and Peiffer, J. J. 2021. Aerobic Training With Blood Flow Restriction for Endurance Athletes: Potential Benefits and Considerations of Implementation. *Journal of strength and conditioning research*.

- [167] Smith, P. J., Blumenthal, J. A., Hoffman, B. M., Cooper, H., Strauman, T. A., Welsh-Bohmer, K., Browndyke, J. N., and Sherwood, A. 2010. Aerobic exercise and neurocognitive performance: a meta-analytic review of randomized controlled trials. *Psychosomatic medicine* 72, 3, 239–252.
- [168] Song, J. S., Yamada, Y., Wong, V., Bell, Z. W., Spitz, R. W., Abe, T., and Loenneke, J. P. 2022. Hypoalgesia following isometric handgrip exercise with and without blood flow restriction is not mediated by discomfort nor changes in systolic blood pressure. *Journal of sports sciences* 40, 5, 518–526.
- [169] Spitz, R. W., Chatakondi, R. N., Bell, Z. W., Wong, V., Viana, R. B., Dankel, S. J., Abe, T., Yamada, Y., and Loenneke, J. P. 2021. Blood Flow Restriction Exercise: Effects of Sex, Cuff Width, and Cuff Pressure on Perceived Lower Body Discomfort. *Perceptual and motor skills* 128, 1, 353–374.
- [170] Spranger, M. D., Krishnan, A. C., Levy, P. D., O’Leary, D. S., and Smith, S. A. 2015. Blood flow restriction training and the exercise pressor reflex: a call for concern. *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology* 309, 9, H1440–52.
- [171] Starrett, K. 2015. *Becoming a Supple Leopard*, 2nd Edition. Victory Belt Publishing, New York.
- [172] Stern, Y., MacKay-Brandt, A., Lee, S., McKinley, P., McIntyre, K., Razlighi, Q., Agarnov, E., Bartels, M., and Sloan, R. P. 2019. Effect of aerobic exercise on cognition in younger adults: A randomized clinical trial. *Neurology* 92, 9, e905–e916.
- [173] Stick, C., Hiedl, U., and Witzleb, E. 1993. Venous pressure in the saphenous vein near the ankle during changes in posture and exercise at different ambient temperatures. *European journal of applied physiology and occupational physiology* 66, 5, 434–438.
- [174] Sugimoto, T., Suga, T., Tomoo, K., Dora, K., Mok, E., Tsukamoto, H., Takada, S., Hashimoto, T., and Isaka, T. 2021. Blood Flow Restriction Improves Executive Function after Walking. *Medicine and science in sports and exercise* 53, 1, 131–138.
- [175] Sutor, B., Hesel, J. L., and Rooke, T. W. 1993. Compliance changes in venous insufficiency. *Angiology* 44, 10, 777–783.
- [176] Takarada, Y., Nakamura, Y., Aruga, S., Onda, T., Miyazaki, S., and Ishii, N. 2000. Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985) 88, 1, 61–65.
- [177] Takarada, Y., Sato, Y., and Ishii, N. 2002. Effects of resistance exercise combined with vascular occlusion on muscle function in athletes. *European journal of applied physiology* 86, 4, 308–314.
- [178] Tansey, E. A., Montgomery, L. E. A., Quinn, J. G., Roe, S. M., and Johnson, C. D. 2019. Understanding basic vein physiology and venous blood pressure through simple physical assessments. *Advances in physiology education* 43, 3, 423–429.
- [179] Thiebaud, R. S., Abe, T., Loenneke, J. P., Garcia, T., Shirazi, Y., and McArthur, R. 2020. Acute Muscular Responses to Practical Low-Load Blood Flow Restriction Exercise Versus Traditional Low-Load Blood Flow Restriction and High-/Low-Load Exercise. *Journal of sport rehabilitation* 29, 7, 984–992.

- [180] Toigo, M. and Boutellier, U. 2006. New fundamental resistance exercise determinants of molecular and cellular muscle adaptations. *European journal of applied physiology* 97, 6, 643–663.
- [181] Törpel, A., Herold, F., Hamacher, D., Müller, N. G., and Schega, L. 2018. Strengthening the Brain-Is Resistance Training with Blood Flow Restriction an Effective Strategy for Cognitive Improvement? *Journal of clinical medicine* 7, 10.
- [182] Vestberg, T., Reinebo, G., Maurex, L., Ingvar, M., and Petrovic, P. 2017. Core executive functions are associated with success in young elite soccer players. *PloS one* 12, 2, e0170845.
- [183] Volkmann, E., Falk, A., Holm, J., Philipson, B., Risberg, B., and Volkmann, R. 2008. Effect of varicose vein surgery on venous reflux scoring and plethysmographic assessment of venous function. *European journal of vascular and endovascular surgery : the official journal of the European Society for Vascular Surgery* 36, 6, 731–737.
- [184] Voss, M. W., Kramer, A. F., Basak, C., Prakash, R. S., and Roberts, B. 2010. Are expert athletes ‘expert’ in the cognitive laboratory? A meta-analytic review of cognition and sport expertise. *Appl. Cognit. Psychol.* 24, 6, 812–826.
- [185] Wackerhage, H., Schoenfeld, B. J., Hamilton, D. L., Lehti, M., and Hulmi, J. J. 2019. Stimuli and sensors that initiate skeletal muscle hypertrophy following resistance exercise. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)* 126, 1, 30–43.
- [186] Wagner, H., Finkenzeller, T., Würth, S., and Duvillard, S. P. von. 2014. Individual and team performance in team-handball: a review. *Journal of sports science & medicine* 13, 4, 808–816.
- [187] Wang, H.-N., Chen, Y., Cheng, L., Cai, Y.-H., Li, W., and Ni, G.-X. 2022. Efficacy and Safety of Blood Flow Restriction Training in Patients With Knee Osteoarthritis: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Arthritis care & research* 74, 1, 89–98.
- [188] Wernbom, M., Paulsen, G., Nilsen, T. S., Hisdal, J., and Raastad, T. 2012. Contractile function and sarcolemmal permeability after acute low-load resistance exercise with blood flow restriction. *European journal of applied physiology* 112, 6, 2051–2063.
- [189] Wernbom, M., Schoenfeld, B. J., Paulsen, G., Bjørnsen, T., Cumming, K. T., Aagaard, P., Clark, B. C., and Raastad, T. 2020. Commentary: Can Blood Flow Restricted Exercise Cause Muscle Damage? Commentary on Blood Flow Restriction Exercise: Considerations of Methodology, Application, and Safety. *Frontiers in Physiology* 11, 243.
- [190] Westerblad, H., Allen, D. G., and Lännergren, J. 2002. Muscle fatigue: lactic acid or inorganic phosphate the major cause? *News in physiological sciences : an international journal of physiology produced jointly by the International Union of Physiological Sciences and the American Physiological Society* 17, 17–21.
- [191] WIESINGER, H.-P., KÖSTERS, A., MÜLLER, E., and SEYNNES, O. R. 2015. Effects of Increased Loading on In Vivo Tendon Properties: A Systematic Review. *Medicine and science in sports and exercise* 47, 9, 1885–1895.
- [192] Wilson, J. M., Lowery, R. P., Joy, J. M., Loenneke, J. P., and Naimo, M. A. 2013. Practical blood flow restriction training increases acute determinants of hypertrophy without increasing indices of muscle damage. *Journal of strength and conditioning research* 27, 11, 3068–3075.

- [193] Wong, V., Song, J. S., Bell, Z. W., Yamada, Y., Spitz, R. W., Abe, T., and Loenneke, J. P. 2021. Blood flow restriction training on resting blood pressure and heart rate: a meta-analysis of the available literature. *Journal of human hypertension*.
- [194] Wooten, S. V., Fleming, R. Y. D., Wolf, J. S., Stray-Gundersen, S., Bartholomew, J. B., Mendoza, D., Stanforth, P. R., Stanforth, D., Hernandez, L. M., and Tanaka, H. 2021. Prehabilitation program composed of blood flow restriction training and sports nutrition improves physical functions in abdominal cancer patients awaiting surgery. *European journal of surgical oncology : the journal of the European Society of Surgical Oncology and the British Association of Surgical Oncology* 47, 11, 2952–2958.
- [195] Wortman, R. J., Brown, S. M., Savage-Elliott, I., Finley, Z. J., and Mulcahey, M. K. 2021. Blood Flow Restriction Training for Athletes: A Systematic Review. *The American journal of sports medicine* 49, 7, 1938–1944.
- [196] Yamada, Y., Frith, E. M., Wong, V., Spitz, R. W., Bell, Z. W., Chatakondi, R. N., Abe, T., and Loenneke, J. P. 2021. Acute exercise and cognition: A review with testable questions for future research into cognitive enhancement with blood flow restriction. *Medical hypotheses* 151, 110586.
- [197] Yamanaka, T., Farley, R. S., and Caputo, J. L. 2012. Occlusion training increases muscular strength in division IA football players. *Journal of strength and conditioning research* 26, 9, 2523–2529.
- [198] Yasuda, T., Loenneke, J. P., Ogasawara, R., and Abe, T. 2013. Influence of continuous or intermittent blood flow restriction on muscle activation during low-intensity multiple sets of resistance exercise. *Acta physiologica Hungarica* 100, 4, 419–426.
- [199] Yow, B. G., Tennent, D. J., Dowd, T. C., Loenneke, J. P., and Owens, J. G. 2018. Blood Flow Restriction Training After Achilles Tendon Rupture. *The Journal of foot and ankle surgery : official publication of the American College of Foot and Ankle Surgeons* 57, 3, 635–638.
- [200] Zatsiorsky, V. M. 2003. Biomechanics of Strength and Strength Training. In *Strength and power in sport*, P. V. Komi, Ed. *The Encyclopaedia of sports medicine v. 3*. Blackwell Science, Osney Mead, Oxford, Malden, MA, 439–487. DOI=10.1002/9780470757215.ch23.

# 13 Anhang



### Anhangstab. 1: Zusammenfassung der Studien im Bereich des Leistungssports mit Athletinnen und Athleten ab einem Performance-Level von 3

Erstautor (Jahr)	Stichprobe	Studiendesign	Übungsprotokoll	Anwendung von BFR	Ergebnisse
<b>Takarada et al., 2002</b>	<p>(1) Athleten (LP)            (2) Stichprobengröße (Geschlecht)            (3) Alter / Größe / Gewicht (in M <math>\pm</math> SD)</p>	<p>(1) Design            (2) Gruppen / Bedingungen            (3) Intervention            (4) Parameter</p>	<p>(1) Dauer (Frequenz)            (2) Übung            (3) Last / Intensität            (4) Sätze (Wiederholungen)            (5) Satzpause            (6) Bewegungstempo            (7) BFR-Intervall</p>	<p>(1) Extremität            (2) Manschettentyp (Breite)            (3) Details der Applikation</p>	<p>Isokinetisches Drehmoment + dynamische Ausdauer der Knieextension bei LL + BFR stärker erhöht als bei LL</p> <p>Muskelfaserfläche des Knieextensor signifikant gestiegen</p> <p>Keine Unterschiede im isokinetischen Drehmoment + dynamischer Ausdauer der Knieextension sowie der Muskelfaserfläche des Knieextensors zwischen LL und passiv</p>
<b>Takarada et al., 2002</b>	<p>(1) Männliche Elite Rugby Spieler            (2) N = 17 (n. a.)            LL + BFR: N = 6            LL: N = 6            passiv: N = 5            (3) BFR: 25,3 <math>\pm</math> 0,8 Jahre / 179,3 <math>\pm</math> 1,8 cm / 88,9 <math>\pm</math> 4,1 kg            LL: 26,5 <math>\pm</math> 0,7 Jahre / 181,0 <math>\pm</math> 3,8 cm / 92,4 <math>\pm</math> 6,8 kg            Untrainiert: 25,4 <math>\pm</math> 0,8 Jahre / 181,1 <math>\pm</math> 1,9 cm / 89,7 <math>\pm</math> 2,9 kg</p>	<p>(1) Parallel            (2) LL + BFR, LL, passiv            (3) Krafttraining            (4) Isokinetisches Drehmoment dynamische Ausdauer (mechanische Arbeit und maximale Kraft nach 50 Kontraktionen) der Knieextension, Muskelfaserfläche des Knieextensor</p>	<p>(1) 8 Wochen (2x pro Woche)            (2) Knieextension            (3) ~ 50 % 1RM            (4) LL + BFR: 4 (bis Versagen) LL: 4 (N = BFR)            (5) 30 s            (6) 2 s konzentrisch, 2 s exzentrisch            (7) kontinuierlich</p>	<p>(1) Oberschenkel            (2) Elastische Bandage (3,3 cm) mit integriertem pneumatischem Schlauch (2,5 cm)            (3) 196,0 <math>\pm</math> 5,7 mmHg</p>	<p>Isokinetisches Drehmoment + dynamische Ausdauer der Knieextension bei LL + BFR stärker erhöht als bei LL</p> <p>Muskelfaserfläche des Knieextensor signifikant gestiegen</p> <p>Keine Unterschiede im isokinetischen Drehmoment + dynamischer Ausdauer der Knieextension sowie der Muskelfaserfläche des Knieextensors zwischen LL und passiv</p>
<b>Yamanaka et al., 2012</b>	<p>(1) NCAA Division IA Football Spieler            (2) N = 32 (n. a.)            (3) 19,2 <math>\pm</math> 1,8 Jahre            LL + BFR: 181,8 <math>\pm</math> 1,2 cm / 91,3 <math>\pm</math> 2,4 kg            Kontrollgruppe: 181,1 <math>\pm</math> 1,9 cm / 89,7 <math>\pm</math> 2,9 kg</p>	<p>(1) Parallel            (2) LL + BFR, LL            (3) Krafttraining            (4) 1RM Bankdrücken, 1RM Kniebeuge, Brust-, Oberarm-, Unterarm- &amp; Oberschenkelumfang</p>	<p>(1) 4 Wochen (3x pro Woche)            (2) Bankdrücken, Kniebeuge            (3) 20 % 1RM            (4) 4 (30, 20, 20, 20)            (5) 45 s            (6) 0,75 s konzentrisch, 1,5 s exzentrisch            (7) kontinuierlich</p>	<p>(1) Oberarm und Oberschenkel            (2) Elastische Bandagen (5,0 cm)            (3) Reduktion der locker umgelegten Bandage um 5 cm</p>	<p>Anstieg 1RM Bankdrücken und Kniebeuge in LL + BFR höher als in LL</p> <p>Die Veränderungen des oberen und unteren Brustumfangs und des linken Oberarmumfangs waren in LL + BFR im Vergleich zu LL signifikant größer</p> <p>Die Veränderungen des rechten Oberarmumfangs, des Unterarmumfangs und des Oberschenkelumfangs waren bei LL + BFR nicht signifikant größer</p>

Erstautor (Jahr)	Stichprobe	Studiendesign	Übungsprotokoll	Anwendung von BFR	Ergebnisse
	(1) Athleten (LP) (2) Stichprobengröße (Geschlecht) (3) Alter / Größe / Gewicht (in M $\pm$ SD)	(1) Design (2) Gruppen / Bedingungen (3) Intervention (4) Parameter	(1) Dauer (Frequenz) (2) Übung (3) Last / Intensität (4) Sätze (Wiederholungen) (5) Satzpause (6) Bewegungstempo (7) BFR-Intervall	(1) Extremität (2) Manschettentyp (Breite) (3) Details der Applikation	
<b>Luebbbers et al., 2014</b>	(1) NCAA Division II Football Spieler (2) N = 62 (n. a.) (3) 20,3 $\pm$ 1,1 Jahre / n. a. / 99,1 $\pm$ 19,7 kg	(1) Parallel (2) HLHV + BFR, HLLHV, HL, HLLV + BFR (3) Krafttraining (4) 1RM Bankdrücken, 1RM Kniebeuge, Brust-Oberarm- und Oberschenkelumfang	(1) 7 Wochen (4x pro Woche) (2) Bankdrücken, Kniebeuge (zusätzlich zu HLHV + BFR, HLLHV und HLLV + BFR) (3) 20 % 1RM (4) 4 (30, 20, 20, 20) (5) 45 s (6) 1,5 s konzentrisch, 1,5 s exzentrisch (7) kontinuierlich	(1) Oberarm und Oberschenkel (2) Elastische Bandagen (7,6 cm) (3) Reduktion der locker umgelegten Bandage um 7,6 cm	1RM Kniebeuge war höher in HLHV + BFR im Vergleich zu allen anderen Gruppen
<b>Scott et al., 2017</b>	(1) Semi-professionelle männliche australische Fußballspieler (2) N = 21 (3) 19,8 $\pm$ 1,5 Jahre / 186,0 $\pm$ 8,0 cm / 80,8 $\pm$ 8,2 kg	(1) Parallel (2) LL + BFR, LL (3) Krafttraining (4) Muskelquerschnitt und Fiederungswinkel (vastus lateralis), 3RM Kniebeuge, Wiederholungen bis zum willkürlichen Muskelversagen bei 40 % 3RM, Sprunghöhe (Counter movement Jump), Sprintzeit (40 m)	(1) 5 Wochen (3x pro Woche) (2) Kniebeuge (3) 20 % (Einheit 1-5), 25 % (Einheit 6-10), 30 % (Einheit 11-14) 1RM (4) 4 (30, 15, 15, 15) (5) 30 s (6) n. a. (7) kontinuierlich	(1) Oberschenkel (2) Elastische Bandage (7,5 cm) (3) Subjektives Druckempfinden (7/10)	Erhöhung 3RM Knie und Wiederholungen bis zum willkürlichen Muskelversagen in beiden Gruppen  Keine Unterschiede zwischen den Gruppen  Keine Veränderungen im Muskelquerschnitt und Fiederungswinkel des vastus lateralis sowie im Counter movement Jump und in der Sprintzeit in beiden Gruppen

Erstautor (Jahr)	Stichprobe	Studiendesign	Übungsprotokoll	Anwendung von BFR	Ergebnisse
	(1) Athleten (L/P) (2) Stichprobengröße (Geschlecht) (3) Alter / Größe / Gewicht (in M $\pm$ SD)	(1) Design (2) Gruppen / Bedingungen (3) Intervention (4) Parameter	(1) Dauer (Frequenz) (2) Übung (3) Last / Intensität (4) Sätze (Wiederholungen) (5) Satzpause (6) Bewegungstempo (7) BFR-Intervall	(1) Extremität (2) Manschetten typ (Breite) (3) Details der Applikation	
<b>Silva et al., 2018</b>	(1) Männliche Basketballspieler Landes-, Regional- und Nationalniveau (2) N = 11 (n. a.) (3) 19,9 $\pm$ 2,8 Jahre / 180,8 $\pm$ 7,8 cm / 71,1 $\pm$ 9,1 kg	(1) Cross-over (2) LL + BFR, HL (3) Krafttraining (4) BRUMS (Brunel mood scale) vor und nach dem Übungsprotokoll	(1) 3 Termine (Familiarisierung + 2 Untersuchungstermine mit je 7 Tage Abstand) (2) Kniebeuge (3) LL + BFR: 30 % 1RM HL: 75 % 1RM (4) LL + BFR: 4 (30, 15, 15, 15) HL: 3 (10) (5) LL + BFR: 30 s HL: 135 s (6) 2 s konzentrisch, 2 s exzentrisch (7) intermittierend	(1) Oberschenkel (2) Pneumatische Manschette (13,0 cm) (3) 80 % des Okklusionsdrucks	Zunahme der Müdigkeitsbewertungen, verbesserte TMD (total mood disorder)-Bewertungen sowie eine Decharakterisierung des iceberg profils von hoher Vitalität und niedriger negativer Stimmung nach LL + BFR, aber nicht nach HL
<b>Bjørnssen et al., 2019</b>	(1) Norwegische Elite-Powerlifter (2) N = 17 (2 w / 15 m) LL + BFR: N = 9 HL: N = 8 (3) LL + BFR: 24,0 $\pm$ 3,0 Jahre / 176,0 $\pm$ 5,0 cm / 89,0 $\pm$ 14,0 kg HL: 26 $\pm$ 8 Jahre / 177,0 $\pm$ 9,0 cm / 102,0 $\pm$ 18,0 kg	(1) Parallel (2) LL + BFR, HL (3) Krafttraining (4) 1RM Frontkniebeuge, maximal willkürliche isometrische Kontraktion der Knieextension, Muskelquerschnitt (rectus femoris, vastus lateralis, vastus medialis, vastus intermedius), Muskelfaserfläche (rectus femoris, vastus lateralis), Myofaserfläche, Anzahl der Myonuklei, Satellitenzellen	(1) 6,5 Wochen (5x pro Woche) 2 Blöcke (Woche 1 und 3) zu je 5 Einheiten (2) Frontkniebeuge (3) LL + BFR: ~24-31 % 1RM HL: ~74-76 % 1RM (4) LL + BFR: 4 (Satz 1 und 4 bis zum willkürlichen Versagen, Satz 2 und 3 12-15) HL: 6-7 (1-6) (5) LL + BFR: 30 s HL: n. a. (6) n. a. (7) kontinuierlich	(1) Oberschenkel (2) Elastische Bandagen (7,6 cm) trainiert, einen Druck von 120 mmHg zu reproduzieren	Die Myofaserfläche des Typs I und die Anzahl der Myonukleien nahmen bei LL + BFR zu.  Die Myofaserfläche vom Typ II blieb in beiden Gruppen unverändert.  Größere Veränderungen der Querschnittsfläche des Vastus lateralis bei LL + BFR  Keine Gruppenunterschiede bei Satellitenzellen, 1RM-Kniebeuge und maximal willkürliche isometrische Kontraktion der Knieextension  Obwohl: signifikante Zunahme der MVIT-Knieextension bei LL + BFR und 1RM bei HL

Erstautor (Jahr)	Stichprobe	Studiendesign	Übungsprotokoll	Anwendung von BFR	Ergebnisse
	(1) Athleten (LP) (2) Stichprobengröße (Geschlecht) (3) Alter / Größe / Gewicht (in M ± SD)	(1) Design (2) Gruppen / Bedingungen (3) Intervention (4) Parameter	(1) Dauer (Frequenz) (2) Übung (3) Last / Intensität (4) Sätze (Wiederholungen) (5) Satzpause (6) Bewegungstempo (7) BFR-Intervall	(1) Extremität (2) Manschettentyp (Breite) (3) Details der Applikation	
<b>Held et al., 2019</b>	(1) Elite-Ruderer (2) N = 31 (8 w / 23 m) LL + BFR: N = 16 (4 w / 12 m) Kontrollgruppe: N = 15 (4 w / 11 m) (3) LL + BFR: 21,9 ± 3,2 Jahre / 180,4 ± 8,7 cm / 73,6 ± 10,9 kg Kontrollgruppe: 21,7 ± 8,1 Jahre / 180,7 ± 8,1 cm / 72,5 ± 12,1 kg	(1) Parallel (2) LL + BFR, Kontrollgruppe (3) Ausdauer- und Krafttraining (4) VO <sub>2</sub> max, Leistung bei VO <sub>2</sub> max, 1RM Kniebeuge	(1) 5 Wochen (~ 10x pro Woche) (2) Rudern, Laufen, Radfahren und Krafttraining (BFR 3x pro Woche, ausschließlich in Kombination mit LL Rudertraining) (3) n. a. (4) n. a. (5) n. a. (6) n. a. (7) kontinuierlich	(1) Oberschenkel (2) Elastische Bandagen (13,0 cm) (3) Mit 75 % der maximal gedehnten Länge umwickeln	Die prozentuale Veränderung der VO <sub>2</sub> max sowie die Leistung bei VO <sub>2</sub> max stieg signifikant in der LL + BFR-Gruppe  Keine signifikanten Veränderungen bei der Kontrollgruppe  Keine signifikante Steigerung der 1RM Kniebeuge in beiden Gruppen

1RM: one repetition maximum; 3RM: three repetition maximum; BFR, blood flow restriction; HL, hohe Last; HLHV, hohe Last und hoher Umfang; HLLV, hohe Last und niedriger Umfang; NCAA, National Collegiate Athletic Association; n.a., not assessed; LL, niedrige Last; VO<sub>2</sub>max: maximal oxygen uptake







Bundesinstitut für Sportwissenschaft  
Graurheindorfer Straße 198 · 53117 Bonn  
[info@bisp.de](mailto:info@bisp.de)  
[www.bisp.de](http://www.bisp.de)

ISBN: 978-3-96523-091-0