

# Sporttherapeutische Behandlungsmethoden nach einer Gehirnerschütterung

## Sports Therapy Treatment Methods after a Concussion

### Autoren

Michael Skibba<sup>1</sup>, Jessica Reinhardt<sup>1</sup>, Ingo Helmich<sup>1, 2</sup>

### Institute

- 1 Arbeitsgruppe Sportmotorik, Institut für Bewegungstherapie und bewegungsorientierte Prävention und Rehabilitation, Abteilung für Neurologie, Psychosomatik und Psychiatrie, Deutsche Sporthochschule Köln
- 2 Abteilung für Neurologie, Psychosomatik und Psychiatrie, Deutsche Sporthochschule Köln

### Stichworte

Review, Gehirnerschütterung, Rehabilitation, Sporttherapie, Intervention.

### Key words

review, concussion, rehabilitation, sports therapy, intervention.

Eingegangen: 20.12.2021

Angenommen durch Review: 22.06.2022

### Bibliografie

Bewegungstherapie und Gesundheitssport 2022; 38: 216–227

DOI 10.1055/a-1909-5900

ISSN 1613-0863

© 2022. Thieme. All rights reserved.

Georg Thieme Verlag, Rüdigerstraße 14, 70469 Stuttgart, Germany

### ZUSAMMENFASSUNG

**Einleitung** Die Gehirnerschütterung (GE) ist eine häufig, insbesondere im Sport, auftretende Verletzung und kann zu langfristigen gesundheitlichen Einschränkungen führen. Studien deuten darauf hin, dass eine aktive statt passive Rehabilitation nach einer GE den Genesungsprozess unterstützen und längerfristige Auswirkungen reduzieren kann. Das Ziel dieser Arbeit ist es daher, mittels eines systematischen Reviews einen Überblick über spezifische sporttherapeutische Behandlungsmethoden und deren Einfluss auf die Genesung nach einer GE zu untersuchen.

**Methoden** systematische Literaturrecherche.

**Ergebnisse** Fünf von sechs randomisiert-kontrollierten Studien (RCT) zeigten, dass ein aerobes Training (AT) sowohl die

Erholungszeit als auch die Gefahr langfristiger Symptome nach einer GE reduzieren kann. Drei RCTs zeigten, dass eine vestibuläre Rehabilitation (VR), die insbesondere Gleichgewichtstraining sowie visuelle und sensomotorische Übungen umfasst, und manuelle therapeutische Maßnahmen (MT) Symptome wie z. B. Schwindel, Nackenschmerzen und Kopfschmerzen reduzieren können. In keiner der neun Studien wurden negative Begleiterscheinungen bewegungstherapeutischer Maßnahmen nach einer GE beobachtet.

**Fazit** Sporttherapeutische Maßnahmen scheinen ein effektives Instrument für die Behandlung nach einer GE zu sein. Eine VR scheint sich positiv auf die Symptome Schwindel, Nackenschmerzen und/oder Kopfschmerzen auszuwirken. Ein AT kann hingegen unabhängig von der Art der Symptomatik eingesetzt werden und die Genesungszeit sowie mögliche langfristige Symptome nach einer GE reduzieren. Daher sind spezifische sporttherapeutische Maßnahmen nicht nur wirksam hinsichtlich der Genesung nach einer GE, sondern sollten bereits nach kurzer Ruhephase initiiert werden.

### SUMMARY

**Introduction** Concussion is a common injury, especially in sports, and can lead to long-term health impairments. Studies suggest that active rather than passive rehabilitation after concussion can support the recovery process and reduce long-term effects. Therefore, the objective of this article is to use a systematic review to provide an overview of specific sports therapy treatment methods and their influence on recovery after concussion.

**Methods** systematic literature research.

**Results** Five of the six randomized controlled trials (RCT) showed that aerobic exercise (AT) can reduce both recovery time and the risk of long-term symptoms after concussion. Three RCTs showed that vestibular rehabilitation (VR), which specifically includes balance, visual and sensorimotor exercises, and manual therapeutic measures (MT) can reduce symptoms such as dizziness, neck pain and headache. In none of the nine studies were negative side effects of exercise therapy measures observed after concussion.

**Conclusion** Sports therapy measures seem to be an effective tool for treatment after concussion. VR appears to have a positive effect on the symptoms of dizziness, neck pain and/or

headaches. An AT, on the other hand, can be used regardless of the type of symptomatology to reduce recovery time and possible long-term symptoms after concussion. Therefore,

specific sports therapy measures are not only effective with regard to recovery after a concussion, but should also be initiated after a short rest period.

#### Was ist zu diesem Thema bereits bekannt?

- Eine Gehirnerschütterung kann zu langfristigen Folgen führen, die sich in einer Vielzahl von Symptomen widerspiegeln.
- Bisher gibt es keine sportwissenschaftliche Übersichtsarbeit, die konkrete Empfehlungen für die Ausgestaltung von sporttherapeutischen Rehabilitationsmaßnahmen in der Praxis darstellt.

#### Welche neuen Erkenntnisse bringt der Artikel?

- Sporttherapeutische Maßnahmen nach einer Gehirnerschütterung führen zu kürzeren Genesungszeiten, niedrigeren Symptomwerten und einer früheren Wiederaufnahme des Sports.
- Ein aerobes Training reduziert sowohl die Erholungszeit als auch die Gefahr langfristiger Symptome nach einer Gehirnerschütterung.
- Eine vestibuläre Rehabilitation, charakterisiert durch Gleichgewichtstraining, visuelle und sensomotorische Übungen, mit zusätzlicher manueller Therapie wirken sich positiv auf Symptome wie Schwindel, Nackenschmerzen und Kopfschmerzen aus.

## Einleitung

Die Gehirnerschütterung (GE) ist eine häufig auftretende Verletzung, die zu vorübergehenden oder langfristigen Funktionseinschränkungen des Gehirns führen kann [1]. Insbesondere Kontakt- und Kampfsportarten wie z. B. American Football, Eishockey, Rugby oder Fußball sowie das Boxen und Mixed Martial Arts scheinen überdurchschnittlich häufig von GE betroffen zu sein [2–4]. Zudem treten GE in Individualsportarten wie z. B. dem Radfahren oder dem Reiten auf [5–7]. Außerhalb des Sports stellen Verkehrsunfälle und Stürze häufige Verletzungsursachen dar [8]. Allein in Deutschland erleiden etwa 270.000 Menschen jedes Jahr eine Schädelhirnverletzung [9]. Beim größten Anteil dieser Verletzungen handelt es sich um die leichte Form des Schädelhirntraumas [9]. Es gibt Hinweise darauf, dass ehemalige Sportler in Kontakt-, Kollisions- und Kampfsportarten im späteren Leben an Depressionen [10] und kognitiven Defiziten [11] aufgrund wiederholter GE leiden. Um Betroffene nach einer GE sicher zum Alltag (Return to Activity (RTA)) oder zum Sport (Return to Play (RTP)) zurückzubringen sowie die Gesundheit von Betroffenen langfristig zu schützen, stellt sich die Frage der optimalen Behandlung nach einem Verletzungsereignis. Daher ist das Ziel der vorliegenden Untersuchung wirksame Behandlungsstrategien nach einer GE herauszuarbeiten.

Bei einer GE handelt es sich laut Definition [12] um eine traumatische Hirnverletzung, verursacht durch biomechanische Kräfte. Zu den gemeinsamen Merkmalen, die bei der klinischen Definition herangezogen werden können, gehören die folgenden: (I) Eine GE kann entweder durch einen direkten Schlag auf den Kopf, das Gesicht, den Hals oder eine andere Körperstelle mit einer auf den Kopf übertragenen stoßartigen Kraft verursacht werden; (II) eine GE führt i.d.R. zu einer schnell einsetzenden, kurzzeitigen Beeinträchtigung der neurologischen Funktionen, die sich spontan zurückbildet; (III) eine GE kann zu neuropathologischen Veränderungen führen, aber die akuten klinischen Anzeichen und Symptome spiegeln größtenteils eine funktionelle Störung und keine strukturelle Verletzung wider; (IV) eine GE führt zu einer Reihe von klinischen Anzeichen und Symptomen, die mit oder ohne Bewusstseinsverlust einhergehen können. Die klinischen und kognitiven Symptome klingen in der Regel nach und nach ab. In einigen Fällen können die Symptome jedoch länger andauern [12]. Tatsächlich sind 10–33 % von anhaltenden Beeinträchtigungen betroffen [13–16], die je nach Definition als postkommotionelles Syndrom (PCS) zusammengefasst werden [17].

Die während des Verletzungsereignisses wirkenden mechanischen Kräfte verursachen auf der Mikroebene des Gehirns Schädigungen der Zellmembrane, die kurzfristig eine Energiekrise durch unkontrolliertes Freisetzen von Ionen und Neurotransmittern auslösen [18]. Auf makrophysiologischer Ebene ist vor allem eine beeinträchtigte Durchblutung des Gehirns in den Tagen nach der Kopfverletzung ein pathologisches Merkmal nach einer GE [19]. Die daraus resultierenden Leistungseinschränkungen des Gehirns können sich in vielfältiger Weise bemerkbar machen wie z. B. durch Kopf- oder Nackenschmerzen, Schwindel, Erbrechen, Konzentrationsstörungen oder Beeinträchtigungen des Schlafs [1]. Es wird davon ausgegangen, dass die Symptome auf Störungen bestimmter Teilsysteme zurückgeführt werden können [20]. Ellis et al. [21] beschreiben – basierend auf der zugrundeliegenden Pathophysiologie – Störungen in drei Systemen, die sie als „spezifische neurologische Teilsysteme“ [21] bezeichnen. Dazu zählen das physiologische System, das den allgemeinen Hirnstoffwechsel und das autonome Nervensystem umfasst, das vestibulär-okulare System, das für ein funktionierendes Gleichgewicht und die Aufnahme und Verarbeitung visueller Informationen verantwortlich ist, sowie das zervikale System, das die Beweglichkeit und die Funktion der Halswirbelsäule (HWS) einschließt [21]. Um Störungen dieser Teilsysteme entgegenzuwirken, scheinen sporttherapeutische Behandlungsmethoden effektiv zu sein [15]. Das aerobe Training (AT) erhöht den Hirnstoffwechsel und verbessert damit die Sauerstoffversorgung des Gehirns [22]. Dies kann sich positiv auf die Genesungszeit auswirken [22]. Bei der vestibulären Rehabilitation (VR) werden sogenannte Adaptions- und Habituationsübungen eingesetzt, die fehlerhafte visuelle und vestibuläre Signale an das zentrale Nervensystem provozieren, um durch die wiederholende sensorische Stimulation positive Anpassungen der Informationsweiterleitung

zu erzeugen [23]. Außerdem wird ein Gleichgewichtstraining durchgeführt, bei dem visuelle und sensomotorische Informationen manipuliert werden, um kompensatorische Mechanismen, die versuchen, vestibuläre Störungen auszugleichen, zu minimieren und die posturale Kontrolle verbessern [24]. Darüber hinaus scheint eine zusätzliche manuelle Therapie (MT) der HWS sowie propriozeptive Übungen, die eine Verbesserung der motorischen Kontrolle im Nackenbereich bewirken sollen, wirksam auf spezifische Symptome wie z. B. Nacken- oder Kopfschmerzen zu sein [25, 26].

Grundsätzlich besteht in der Forschung ein Konsens, dass die Phase nach dem Verletzungsereignis, mit Ausnahme des Zeitraums der ersten 24–48 Stunden, nicht durch eine strikte Ruhe gekennzeichnet sein sollte, sondern konkrete Behandlungsmaßnahmen erforderlich zu sein scheinen, um die Symptome zu verringern und die Genesungszeit zu verkürzen [27, 28]. Tatsächlich führt eine strikte Aktivitätsreduktion zu länger andauernden Symptomen nach einer GE [29]. Es wurde jedoch bisher nicht geklärt, wie sporttherapeutische Maßnahmen gestaltet werden müssen, um die Ziele einer sicheren und gesunden RTA oder die RTP möglichst effizient zu erreichen. Insbesondere die Frage, welche sporttherapeutischen Maßnahmen welchen Effekt auf Symptomatik und Genesungszeiten haben, ist von großer Bedeutung für Betroffene. Daher ist das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit, mittels einer systematischen Literaturrecherche einen Überblick über den aktuellen Wissensstand zu sport- bzw. bewegungstherapeutischen Behandlungsmethoden nach einer GE und deren Einfluss auf Symptomreduktion und Genesungszeit zu erarbeiten.

## Methoden

Es wurde eine systematische Literaturrecherche gemäß dem Leitfaden „Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA)“ [30] durchgeführt.

### Suchstrategie und Einschlusskriterien

Für die Entwicklung einer systematischen Suchstrategie wurde auf das PICOS-Schema zurückgegriffen [31]. Das PICOS-Schema unterstützt die Konzeption einer systematischen Literaturrecherche. Dabei wird die erarbeitete Fragestellung in fünf Komponenten unterteilt und darauf aufbauend Ein- und Ausschlusskriterien formuliert [25]. Für das vorliegende Review wurden die fünf Kriterien des PICOS-Schemas wie folgt definiert. (P) *Patient, Population*: Betroffene, die bei Studiendurchführung mindestens 10 Jahre alt waren und eine akute GE hatten oder aufgrund einer GE in der Vergangenheit an anhaltenden Symptomen litten; (I) *Intervention*: Sport-/bewegungstherapeutische Rehabilitationsansätze; (C) *Comparison* (Vergleich, Kontrolle): Kontrollgruppen, die allgemeine Standard-Rehabilitationsprotokolle, aktive aber nicht symptomorientierte Ansätze oder Programme, die vorwiegend auf körperlicher und kognitiver Schonung beruhen, durchführten; (O) *Outcome* (Behandlungserfolg, Nebeneffekte): Reduzierung der häufigsten Symptome einer GE oder des PCS und/oder die Zeit bis zur vollständigen Genesung. Messgrößen wie beispielsweise die Lebensqualität oder Zufriedenheit wurden ebenfalls berücksichtigt. Alle Ergebnisse mussten mit validen Messinstrumenten und/oder objektiv nachvollziehbar erhoben worden sein; (S) *Study Design* (Studiendesign):

Es wurden nur RCTs in das systematische Review einbezogen. Darüber hinaus wurden nur Artikel in englischer oder deutscher Sprache eingeschlossen, bei denen der Volltext zur Verfügung stand und die ab dem Jahr 2010 oder später publiziert wurden.

### Informationsquellen und Such-Term

Für die Literaturrecherche wurden die Datenbanken PubMed, SPORT Discus sowie SURF des Bundesinstituts für Sportwissenschaft im Zeitraum vom 01. März 2021 bis zum 30. November 2021 durchsucht. Der exakte Suchterm für die gewählten Datenbanken lautete: „Concussion OR mild traumatic brain injury OR postconcussion syndrome OR postconcussion symptoms AND rehabilitation AND symptoms AND randomized controlled trial“. Da die Veröffentlichungen nahezu vollständig in englischer Sprache sind, wurde die Suche mit englischen Begriffen durchgeführt. Um die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse zu berücksichtigen, wurde ein Filter bezüglich des festgelegten Veröffentlichungszeitraums gesetzt. Neben der systematischen Suche fand eine manuelle Suche in Literaturverzeichnissen von Artikeln und Reviews statt, die den Einschlusskriterien entsprachen, aber aufgrund des Studiendesigns für die Übersichtsarbeit ausgeschlossen wurden. Zudem wurden neue Artikel, die erst kürzlich veröffentlicht wurden oder nur als elektronische Version zur Verfügung standen, in das Review aufgenommen. Nach der Entfernung von Duplikaten wurden die Veröffentlichungen anhand der Überschriften und der Abstracts und abschließend mit den weiteren Informationen im Volltext mit den Ein- und Ausschlusskriterien abgeglichen. Entscheidend für die abschließende Auswahl waren die Relevanz in Bezug auf die Fragestellung und die definierten Qualitätskriterien hinsichtlich des Studiendesigns.

### Qualitätsbeurteilung und Datenextraktion

Das Risiko für Bias der eingeschlossenen RCTs wurde mithilfe der Skala der Physiotherapy Evidence Database (PEDro) bewertet [32]. Es wurde von einer guten methodischen Qualität ausgegangen, wenn die abschließende Gesamtpunktzahl der Bewertung  $\geq 7$  war [33]. Die Kernelemente der Studien, zu denen Daten aus den eingeschlossenen Studien selektiert wurden, können ► **Tab. 1** entnommen werden. Auf eine Auswertung der in den Studien erhobenen Daten durch ein Statistikprogramm wurde verzichtet. Die Analyse sowie die Beurteilung der eingeschlossenen Veröffentlichungen erfolgten rein deskriptiv.

## Ergebnisse

Eine quantitative Übersicht des Suchprozesses bietet das PRISMA Flow-Diagramm, das in ► **Abb. 1** dargestellt ist. Nach dem Entfernen von Duplikaten wurden 159 Studien identifiziert, von denen letztendlich neun Studien anhand der beschriebenen Kriterien in das Review aufgenommen wurden.

### Studienmerkmale

Alle neun eingeschlossenen Veröffentlichungen sind RCTs, die den Einfluss von bewegungstherapeutischen Rehabilitationsinterventionen auf die Symptomverbesserung oder die Genesungszeit nach einer akuten GE [34–37] oder bei anhaltenden Beeinträchtigungen nach einer GE [38–42] untersuchten. Bei drei inkludierten Arbei-

► **Tab. 1** Übersicht der Studien (n=9).

Studie	Teilnehmende	Intervention (Beginn, Inhalte, Dauer)	Abhängige Variable(n)	Ergebnisse
Leddy et al. (2019) [34]	n = 103 (55 m & 48 w) Alter (Mittelwert ± Standardabweichung in Jahren): IG: 15,30 ± 1,60; KG: 15,40 ± 1,70 Einschlusskriterium: Diagnostizierte sportbedingte GE innerhalb von zehn Tagen vor dem Interventionsbeginn	Beginn (Mittelwert ± Standardabweichung): IG: 4,90 ± 2,20; KG: 4,80 ± 2,40 Tage nach der Verletzung IG (n = 52): AT Fahrradergometer oder Laufband Täglich 20 Min Bei einer Intensität von 80% der HF, bei der im BCTT eine Verschlimmerung der Symptome auftrat Wöchentliche Wiederholung des BCTT, um die HF ggf. progressiv anzupassen KG (n = 51): Ganzkörper-Stretching-Programm Täglich 20 Min Dauer: 30 Tage oder bei vorzeitiger Freigabe zur RTP	Anzahl der Tage zwischen dem Verletzungsereignis und der Freigabe zur RTP	Signifikant schnellere Rückkehr zum Sport bei der IG (Median (IQ) = 13 Tage (10-18,5)) im Vergleich zur KG (Median (IQ) = 17 Tage (13-23))
Leddy et al. (2021) [35]	n = 118 (74 m & 44 w) Alter: IG: 15,50 ± 1,40; KG: 15,90 ± 1,40 Einschlusskriterium: Diagnostizierte sportbedingte GE innerhalb von zehn Tagen vor dem Interventionsbeginn	Beginn: IG: 5,80 ± 2,30; KG: 6,30 ± 2,40 Tage nach der Verletzung IG (n = 61): AT Walken, Joggen oder Fahrradergometer Täglich mind. 20 Min. Bei einer Intensität von 90% der HF, bei der im BCTT eine Verschlimmerung der Symptome auftrat Wöchentliche Wiederholung des BCTT, um die HF ggf. progressiv anzupassen KG (n = 57): Ganzkörper-Stretching-Programm Täglich 20 Min. Progressive Übungen, die jedoch nicht signifikant die HF erhöhen Dauer: 4 Wochen oder bei vorzeitiger Freigabe zur RTP	Anzahl der Tage zwischen dem Verletzungsereignis und der Freigabe zur RTP Wahrscheinlichkeit, nach den 4 Wochen anhaltenden Symptomen zu leiden	Signifikant schnellere Rückkehr zum Sport bei der IG (Median (IQ) = 14 Tage (10-25)) im Vergleich zur KG (Median (IQ) = 19 Tage (13-31)) Die Wahrscheinlichkeit, nach den 4 Wochen anhaltenden Symptomen zu leiden, war in der IG im Vergleich zur KG um 48% reduziert
Micay et al. (2018) [36]	n = 15 (15 m) Alter: IG: 15,80 ± 1,20; KG: 15,60 ± 1,00 Einschlusskriterium: Diagnostizierte sportbedingte GE bei der 5 Tage nach der Verletzung noch Symptome vorhanden waren	Beginn: 6 Tage nach der Verletzung IG (n = 8): AT Fahrradergometer 8 Trainingseinheiten, immer zwei Tage hintereinander gefolgt von einem Ruhetag 1. Einheit 10 Min bei 50% der HFMax 2. Einheit 20 Min bei 50% der HFMax Im Anschluss Erhöhung der HF um 5% je Einheit auf bis zu 70% der HFMax Zusätzlich Durchführung des RTP-Protokolls gemäß Leitlinien [12] KG (n = 7): RTP-Protokoll gemäß Leitlinien [12] Dauer: 11 Tage	Anzahl der Tage zwischen dem Verletzungsereignis und der Freigabe zur RTP	Kein signifikanter Unterschied bei der Anzahl der Tage (Mittelwert ± SD) bis zur Rückkehr zum Sport zwischen der IG (36,10 ± 18,50) und der KG (29,60 ± 15,80)

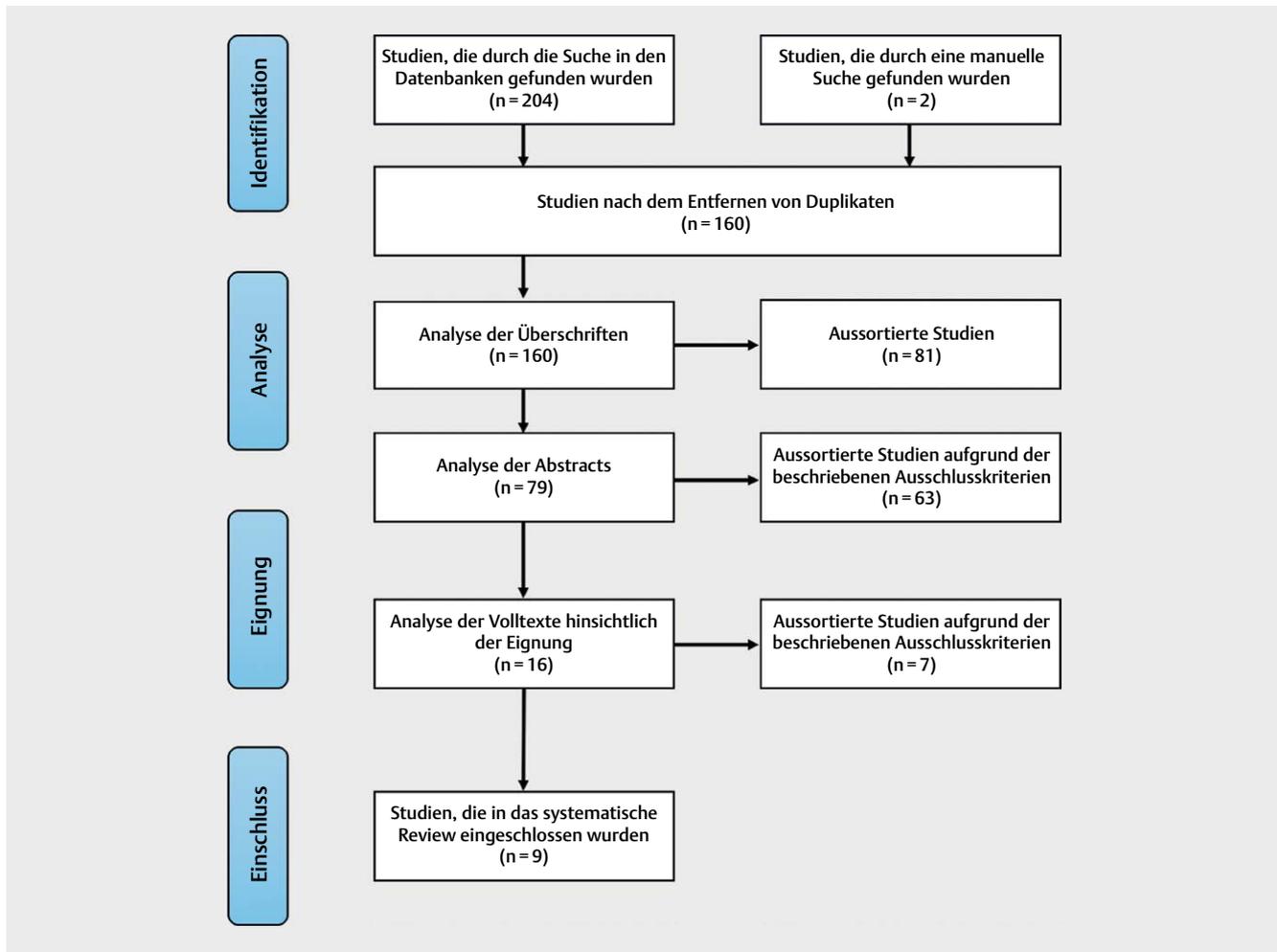
► Tab. 1 Übersicht der Studien (n=9).

Studie	Teilnehmende	Intervention (Beginn, Inhalte, Dauer)	Abhängige Variable(n)	Ergebnisse
Reneker et al. (2017) [37]	n = 41 (25 m & 16 w) Alter: IG: 16,50 ± 2,90; KG: 15,90 ± 2,90 Einschlusskriterium: Diagnostizierte sportbedingte GE innerhalb von 14 Tagen vor dem Interventionsbeginn und Vorliegen von Schwindelsymptomen	Beginn: IG: 12,50 ± 1,60; KG: 11,80 ± 1,60 Tage nach der Verletzung IG (n = 22): VR 8 progressive Einheiten 2x/Woche je 30-60 Min Symptomspezifische multimodale Therapiemaßnahmen Alle Übungen waren herausfordernd und kurz unterhalb der symptom erhöhenden Belastungsschwelle KG (n = 19): Nicht symptomspezifische Scheinbehandlung 8 Einheiten 2x/Woche je 30-60 Min Allgemeine Bewegungs- und Mobilisationsübungen ohne Progressionen Dauer: 4 Wochen oder bei vorzeitiger Freigabe zur RTP	Anzahl der Tage zwischen dem Interventionsbeginn und der Freigabe zur RTP	Signifikant schnellere Rückkehr zum Sport bei der IG (Median = 15 Tage) im Vergleich zur KG (Median = 26 Tage) Entspricht einer Hazard-Ratio, dass die IG im Vergleich zur KG schneller zum Sport zurückkehrt von 2,91 (95% CI: 1,01, 8,43)
Bailey et al. (2019) [38]	n = 16 (9 m & 7 w) Alter: 15,75 ± 1,39 Einschlusskriterium: Anhaltende Symptome (≥ 4 Wochen) nach einer GE	Beginn: 56,00 ± 29,33 Tage nach der Verletzung IG (n = 7): AT Fahrradergometer Täglich 20 Min Bei einer Intensität von 80% der HF, bei der im BCTT eine Verschlimmerung der Symptome auftrat KG (n = 8): Ganzkörper-Stretching-Programm und Spazieren gehen In den ersten 3 Wochen täglich 5 Dehnübungen In den zweiten 3 Wochen täglich 20 Min Spaziergehen Dauer: 6 Wochen	Stärke der Symptome (PCS-R)	Ohne den Einfluss von Depressionen zeigte die Intervention eine signifikant stärkere Symptomverbesserung (Mittelwert PCS-R Veränderung in % (SD)) in der IG (-63.3 (17,4)) als in der KG (-56.8 (27,8))
Chan et al. (2018) [39]	n = 19 (5 m & 14 w) Alter: 15,50 ± 1,47 Einschlusskriterium: Mindestens 2 anhaltende Symptome (≥ 4 Wochen) nach einer sportbedingten GE	Beginn: 132,00 ± 52,00 nach der Verletzung IG (n = 10): AT (multimodal) Zunächst Anleitung durch Therapierende Im Anschluss tägliche Durchführung zu Hause Programm besteht aus: 15 Min aerobes Training Auf dem Laufband oder dem Fahrradergometer Bei 50-60% der HFMax 10 Min sportartspezifisches Koordinationstraining 5 Min Visualisierung sportartspezifischer Bewegungen und Situationen Zusätzlich Ergotherapeutische Schulung, schulische Beratung und ärztliche Standardbehandlung KG (n = 9): Standard-Behandlung Ergotherapeutische Schulung, schulische Beratung und ärztliche Standardbehandlung Dauer: 6 Wochen	Stärke der Symptome (PCSS)	Die Reduzierung der Symptome (Mittelwert PCSS (SD)) war signifikant größer in der IG (-24.7 (19,1)) als in der KG (-15.8 (12,5)). Die Cohen's d Effektgröße betrug 0.55

► **Tab. 1** Übersicht der Studien (n=9).

Studie	Teilnehmende	Intervention (Beginn, Inhalte, Dauer)	Abhängige Variable(n)	Ergebnisse
Kleffellgard et al. (2019) [40]	n = 65 (19 m & 46 w) Alter: IG: 37,60 ± 12,30; KG: 41,20 ± 13,60 Einschlusskriterium: Anhaltende milde, moderate oder starke Schwindelsymptome nach einer Gehirnerschütterung	Beginn: 3,50 ± 2,10 Monate nach der Verletzung IG (n = 33): VR 16 Gruppeneinheiten 2x/Woche Symptomspezifische und individuelle Übungen Heimprogramm, das aus 2–5 Übungen und allgemeiner Aktivität (Spazieren gehen, Fahrrad fahren oder Langlauf) bestand Individuelle Psychoedukation [43] KG (n = 32): Individuelle Psychoedukation [43] Dauer: 8 Wochen	Stärke der Schwindel-symptome (Dizziness Handicap Inventory, High-Level Mobility Assessment Tool für SHT)	2,7 Monate ± 0,8 nach Beginn der Intervention hatte die IG signifikant bessere Werte beim Dizziness Handicap Inventory (Mittelwertdifferenz = -8,7, (-16,6 bis -0,9) (CI 95 %, p-Wert 0,03) und beim High-Level Mobility Assessment Tool für SHT (Mittelwertdifferenz = 3,7, (1,4 bis 6,0) (CI 95 %, p-Wert 0,002).
Kurowski et al. (2017) [41]	n = 30 (13 m & 17 w) Alter: IG: 15,22 ± 1,37; KG: 15,50 ± 1,80 Einschlusskriterium: Diagnostiziertes PCS nach den ICD-10 Kriterien 4 bis 16 Wochen nach dem Verletzungseignis	Beginn: IG: 52,30 ± 19,93; KG: 55,95 ± 22,16 Tage nach der Verletzung IG (n = 15): AT Fahrradergometer 5–6x/Woche Durchführung eines Stufentrainings Über eine Dauer von 80 % der der maximalen Belastungszeit, bei der eine Verschlimmerung der Symptome auftrat Wöchentliche Wiederholung des Stufentests, um die Belastungszeit ggf. progressiv anzupassen KG (n = 15): Ganzkörper-Stretching-Programm 5–6x/Woche Alle zwei Wochen wechselten die Übungen Dauer: 6 Wochen oder bei Erreichen des Symptomlevels wie vor der Verletzung. Verlängerungsoption von 2 Wochen bei anhaltenden Symptomen	Stärke der Symptome (PCSI)	Es wurde eine deutlich stärkere Verbesserung der Symptome im Laufe der Zeit mittels Varianzanalyse mit wiederholten Messungen (p-Wert 0,05) bei der IG im Vergleich zur KG festgestellt (F-Wert = 4,11, p-Wert = 0,044). Die Effektgröße für die Entwicklung im Laufe der Zeit ist äquivalent zur Cohen's d Effektgröße in Höhe von ~ 0,81.
Schneider et al. (2014) [42]	n = 31 (18 m & 13 w) Alter (Median (Bereich)): IG: 15 (12-27); KG: 15 (13-30) Einschlusskriterium: Anhaltender Schwindel, Nackenschmerzen und/ oder Kopfschmerzen (≥ 10 Tage) nach einer sportbedingten GE	Beginn (Median (Bereich)): IG: 53 (8-276); KG: 47 (31-142) Tage nach der Verletzung IG (n = 15): VR 8 individuelle Einheiten 1x/Woche Symptomspezifische multimodale Therapiemaßnahmen Allgemeine nicht symptomprovozierende Beweglichkeitsübungen, eine Haltungsschulung sowie RTP-Protokoll gemäß Leitlinien [44] KG (n = 19): Nicht symptomspezifische Standardbehandlung 8 individuelle Einheiten 1x/Woche Allgemeine nicht symptomprovozierende Beweglichkeitsübungen, eine Haltungsschulung sowie RTP-Protokoll gemäß Leitlinien [44] Dauer: 8 Wochen oder bei vorzeitiger Freigabe zur RTP	Anteil der IG und KG, die innerhalb der 8 Wochen eine medizinische Freigabe zur RTP bekamen.	73 % (11/15) der IG wurden innerhalb der Interventionszeit als klinisch gesund bzw. symptomfrei erklärt und bekamen die Freigabe zur RTP. In der KG betrug dieser Wert 7 % (1/14). Die Wahrscheinlichkeit zu genesen, war in der IG 10,27mal höher als in der KG

Abkürzungen: IG (Interventionsgruppe), KG (Kontrollgruppe), HF (Herzfrequenz), HfMax (Maximale Herzfrequenz), BCTT (Buffalo Concussion Treadmill Test), IQ (Interquartilsabstand), CI (Konfidenzintervall), PCSS (Post Concussion Symptom Scale), CI (Konfidenzintervall), SHT (Schädel-Hirn-Trauma), PCSI Post-Concussion Symptom Inventory), BWS (Brustwirbelsäule)



► **Abb. 1** Flussdiagramm.

ten [36–38] handelt es sich um Pilotstudien und bei einer Veröffentlichung [41] um eine explorative Forschungsarbeit.

Insgesamt umfassten die Studien 438 Teilnehmende, von denen 233 männlich und 205 weiblich waren. Bei acht Studien lag das Alter der Probanden zwischen 10 und 30 Jahren [34–39, 41, 42]. Eine Studie untersuchte Teilnehmende mit einem Alter bis zu 60 Jahren [40].

Die vergangene Zeit zwischen dem Verletzungsereignis und dem Start der Intervention variierte im Mittel zwischen 4,9 Tagen [34] und 132 Tagen [39]. Ausgeschlossen wurden in der Regel Probanden, die aufgrund anderer Verletzungen oder Krankheiten in der Aktivität eingeschränkt waren und somit an der Rehabilitation nicht in vollem Umfang teilnehmen hätten können. Sechs der neun Studien [37–40, 42, 45] untersuchten nur Kopfverletzungen, die bei einer sportlichen Aktivität aufgetreten waren.

In sechs Studien [34–36, 38, 39, 41] wurden mit den Interventionsgruppen (IG) ein AT durchgeführt. Drei Veröffentlichungen [37, 40, 42] untersuchten eine VR, die teilweise [37, 42] mit MT der HWS ergänzt wurden.

Die Dauer der Interventionen betrug zwischen 11 Tagen [36] und acht Wochen [40, 42]. Bei fünf Studien [34, 35, 37, 41, 42] endeten die Interventionen für Probanden vorzeitig, sofern sie als

symptomfrei eingestuft wurden beziehungsweise eine medizinische Freigabe zur RTP bekamen.

## Methodenqualität der Studien

Die Bewertung der methodischen Qualität der eingeschlossenen Studien anhand der einzelnen Items der PEDro-Skala ist in ► **Tab. 2** dargestellt. Sechs der neun Studien [35, 37, 39–42] wurden mit einer PEDro-Gesamtpunktzahl von 7 oder höher bewertet. Die Studie von Reneker et al. [40] hatte mit einem Wert von 9 Punkten die höchste Einstufung. Es war die einzige Studie, bei der neben den Untersuchenden auch die Teilnehmenden bezüglich der Intervention verblindet waren. Die Veröffentlichungen von Bailey et al. [38] mit 5 Punkten und die von Leddy et al. [34] und Micay et al. [36] hatten mit 6 Punkten die niedrigsten Werte.

## Effekte des AT

Die Studien von Leddy et al. aus 2019 [34] und aus 2021 [35] zeigten, dass ein progressives AT unterhalb der Belastungsschwelle, bei der eine Zunahme der Gehirnerschütterungsbedingten Symptome stattfindet, die Genesungszeit und damit die Zeit bis zur RTP signifikant verkürzt. Zudem reduzierte das AT die Wahrscheinlichkeit,

► **Tab. 2** Studienqualität (n = 9).

PEDro-Item	Leddy et al., 2019 [34]	Leddy et al., 2021 [35]	Micay et al., 2018 [36]	Reneker et al., 2017 [37]	Bailey et al., 2019 [38]	Chan et al., 2018 [39]	Kleffeld et al., 2019 [40]	Kurowski et al., 2017 [41]	Schneider et al., 2014 [42]
Ein- und Ausschlusskriterien <sup>1</sup>	+	+	-	+	-	+	+	+	+
Randomisierung	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Verborgene Zuordnung	-	+	-	+	+	+	+	+	+
Vergleichbarkeit bei der Anfangstestung	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Verblindung der TN	-	-	-	+	-	-	-	-	-
Verblindung der Therapeuten	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Verblindung der Untersuchenden	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Follow-Up-Untersuchung bei > 85 % der TN	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Intention-to-treat-Analyse	-	+	-	+	-	-	-	+	+
Vergleich zwischen den Gruppen	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Punkt- und Streuungsmaße	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Gesamtpunktzahl	6	8	6	9	5	7	7	8	8

<sup>1</sup>Item wird nicht in die Gesamtpunktzahl einberechnet, + = Item erfüllt, - = Item nicht erfüllt

an längerfristigen Symptomen zu leiden, um 48 % [35]. Bailey et al. [38], Chan et al. [39] und Kurowski et al. [41] stellten in den Gruppen, die ein AT durchführten, einen signifikant stärkeren Rückgang der Symptome fest als in den Kontrollgruppen. Chan et al. [39] ergänzten das AT mit sportartspezifischem Koordinationstraining und Visualisierungsübungen. Bei Micay et al. [36] wurde kein Unterschied bei der Genesungszeit zwischen der Interventions- und der Kontrollgruppe festgestellt. Bei keiner der sechs Studien kam es während des AT zu negativen Begleiterscheinungen.

### Effekte der VR

Eine individuelle vestibuläre Rehabilitation in Kombination mit Behandlungsmaßnahmen der HWS führen zu einer signifikant schnelleren RTP [37, 42]. Außerdem führt eine achtwöchige vestibuläre Rehabilitation im Gruppensetting zu einer signifikant stärkeren Abnahme von Schwindelsymptomen [40]. Bei den Teilnehmenden der vestibulären Rehabilitation kam es zu keinen anhaltenden Nebenwirkungen.

## Diskussion

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Sporttherapeutische Rehabilitationsmaßnahmen wie aerobes Training und eine vestibuläre Rehabilitation verkürzen die Genesungszeit und reduzieren die Symptome stärker als unspezifische Bewegungsprogramme oder standardisierte Rehabilitationsprotokolle.

Das aerobe Training führt zu einer Abnahme der allgemeinen Symptomstärke. Die vestibuläre Rehabilitation wirkt sich positiv auf Schwindelsymptome aus. Mit neun eingeschlossenen RCTs und 438 Teilnehmenden kann den Ergebnissen des systematischen Reviews eine hohe Aussagekraft zugesprochen werden. Sechs Studien [35, 37, 39–42] hatten eine gute bis exzellente und drei Studien [34, 36, 38] eine moderate methodische Qualität.

### Wirkung des aeroben Trainings

Das aerobe Training ist eine sichere und effektive sporttherapeutische Behandlungsmaßnahme, um die Genesungszeit zu beschleunigen, Symptome zu reduzieren und langfristige Folgen einer GE zu verhindern. Dabei zeigten sich die positiven Auswirkungen sowohl bei einer Aufnahme des Trainings in der Frühphase nach der Verletzung [34, 35] als auch bei anhaltenden Beeinträchtigungen nach mehreren Wochen [38, 39, 41]. Für die Gestaltung der Rehabilitationseinheiten zeigten vier effektive Studien [34, 35, 38, 41], dass die Trainingsintensität nah an der Belastungsschwelle, an der sich eine Verschlimmerung der Symptome zeigt, liegen sollte. Für die Bestimmung der Belastungsschwelle wurde auf Stufentests zurückgegriffen, bei denen die maximale Belastungsherzfrequenz [34, 35, 38] oder maximale Belastungszeit [41] bestimmt wurde. Das Training wurde anschließend bei einer Herzfrequenz von 80 % [34, 38] oder 90 % [35] des ermittelten Wertes bzw. über eine Dauer von 80 % der bestimmten maximalen Belastungsdauer [41] durchgeführt. Das zeigt zum einen, dass diese Intensitäten sicher sind und keine negativen Folgen auf die Genesung haben und zum an-

deren notwendig sind, um positive Effekte zu erzielen. So war bei Micay et al. [36] die Trainingsherzfrequenz mit 50 % der maximalen Herzfrequenz ggf. zu gering, um einen Effekt auf den Genesungsprozess der Betroffenen zu haben. Chan et al. [39] waren die einzigen Forschenden, die mit der IG neben einem aeroben Training zusätzlich koordinative und sportartspezifische Übungen durchführten. Da auch diese Kombination effektiv die Stärke der Symptome reduzieren konnte, ist in der praktischen Anwendung eine entsprechende Gestaltung möglicherweise sinnvoll, um die Motivation der Teilnehmenden zu erhöhen und zusätzlich die allgemeine Bewegungskompetenz zu verbessern. Insbesondere jüngere Betroffene könnten davon profitieren. Bezüglich des Gesamttrainingsvolumens bestätigten vier Studien [34, 35, 38, 41] eine kürzlich erschienene Publikation [45], in der eine wöchentliche Trainingszeit von mindestens 100 Minuten eine deutlich stärkere Symptomreduzierung bewirkte als geringere wöchentliche Trainingsumfänge. Darüber hinaus stellte sich in dieser Studie heraus, dass eine Trainingszeit von 160 Minuten pro Woche am besten geeignet sei, die Symptome der Kopfverletzten zu verbessern bzw. aufzulösen [45]. Zusammenfassend wirkt sich das aerobe Training bei einer entsprechenden Gestaltung positiv auf den gesamten Metabolismus des betroffenen Gehirns aus und verbessert damit eine Reihe verschiedener Symptome, die die Kopfverletzung verursachen können [46]. So führt das aerobe Training zu einer erhöhten Sauerstoffzufuhr im Gehirn, einem verstärkten Hirnstoffwechsel, einer verbesserten zerebralen vaskulären Funktion und einer Zunahme der Neuroplastizität [47]. Unter anderem konnte durch Nahinfrarotspektroskopie gemessen werden, dass ein progressives submaximales Training die kortikale Versorgung mit Sauerstoff durch eine verbesserte Durchblutung erhöht [48]. Ein weiterer wichtiger Treiber bei der Rehabilitation des Gehirns nach einer Kopfverletzung scheint der Brain-derived neurotrophic factor (BDNF) zu sein [49]. BDNF ist ein Wachstumsfaktor, der zum einen bestehende Neuronen und Synapsen schützt und zum anderen den Aufbau neuer Nervenzellen im zentralen Nervensystem fördert [50]. Aerobes Training scheint die Ausschüttung von BDNF zu erhöhen und somit eine positive Wirkung auf die Erhaltung und Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit des Gehirns zu haben [51, 52]. Zudem wird von einer Verbesserung der Balance des autonomen Nervensystems ausgegangen [53]. Da sich das aerobe Training überdies positiv auf Symptome wie Kopfschmerzen auswirken kann [54], ist diese Trainingsform als ein geeignetes und sicheres Instrument zur Reduzierung von Symptomen sowie zur Verkürzung der Genesungszeit nach GE zu empfehlen.

### Wirkung der vestibulären Rehabilitation

Die vestibuläre Rehabilitation führt zu einer schnelleren Genesungszeit bei akuten GE und beim PCS und beschleunigt die Reduzierung von Schwindelsymptomen bei anhaltenden Beeinträchtigungen. Für die Durchführung der vestibulären Rehabilitation wurde bei den drei Studien [37, 40, 42] das Symptom des Schwindels vorausgesetzt, das auch in anderen Veröffentlichungen [55, 56] als vorrangige Indikation genannt wird. Bei der Gestaltung der Rehabilitationseinheiten stellten die individuellen vestibulär-okularen Probleme der Betroffenen die Basis für die eingesetzten Übungen dar. Auch dieses Vorgehen wird in der Literatur empfohlen [1]. Reneker et al. [37] und Schneider et al. [42] setzten eine

Kombination aus Übungen ein, die fehlerhafte sensorische Informationen minimieren (Adaptionsübungen), hypersensible Symptomantworten reduzieren (Habituationsübungen) sowie kompensatorische Mechanismen verringern sollten (statisches und dynamisches Gleichgewichtstraining). Zudem ergänzten sie die Therapie mit einer MT der HWS sowie propriozeptiven Übungen in diesem Bereich. Beide zeigten, dass dieser individuelle und zielgerichtete Ansatz die Genesungszeit deutlich verkürzen und somit die RTP erheblich beschleunigen kann. Kleffelgard et al. [40] führten die genannten vestibulären Rehabilitationsübungen ohne eine zusätzliche Behandlung der HWS durch. Zudem fanden die Einheiten im Gruppensetting statt. Sie konnten zeigen, dass dieser Ansatz nach der achtwöchigen Interventionszeit die Schwindelsymptome effektiv reduzieren kann. Trotz der steigenden Anzahl an Untersuchungen, die zeigen, dass die VR eine effektive Rehabilitationsmethode ist, um vestibuläre Störungen effektiv zu therapieren, ist bisher wenig über den Wirkungsprozess auf physiologischer und neurozellulärer Ebene bekannt. An einem Tiermodell konnte kürzlich gezeigt werden, dass die VR zu einer erhöhten Plastizität durch eine verstärkte Microgliogenese in den Nuclei vestibulares, in denen vorrangig die Verarbeitung der sensorischen Informationen des vestibulären Systems stattfinden, führen [57]. Darüber hinaus konnten Helmich et al. [58] bei Betroffenen einer Gehirnerschütterung, die Gleichgewichtsübungen durchführten, eine schlechtere Oxygenierung im frontopolen präfrontalen Cortex feststellen. Eine wiederholte und progressive Durchführung von Gleichgewichtsaufgaben und Übungen, die auf eine Aktivierung des vestibulären Systems abzielen, könnten möglicherweise die metabolische Versorgung der entsprechenden Gehirnareale verbessern.

Folglich stellt auch die vestibuläre Rehabilitation beim Vorliegen der entsprechenden Indikation von Schwindelsymptomen einen wirksamen Rehabilitationsansatz dar, um Betroffene bei der Genesung zu unterstützen.

### Limitationen

Die Teilnehmenden der Interventionen bestanden zum Großteil aus jungen Heranwachsenden. Bei fünf Studien [34, 36, 38, 39] lag die Höchstaltersgrenze für die Teilnahme bei 18 Jahren und bei einer Veröffentlichung [41] bei 17 Jahren. Reneker et al. [37] hatten mit 23 Jahren und Schneider et al. [42] mit 30 Jahren nur moderat höhere Beschränkungen. Lediglich Kleffelgard et al. [40] schlossen Teilnehmende bis zu einem Alter von 60 Jahren in ihre Studie ein. Zudem berücksichtigten sechs Studien [34–37, 39, 42] lediglich Probanden, die durch eine sportliche Aktivität ihre Verletzung erlitten. Diese Umstände machen eine Übertragbarkeit auf die Gesamtpopulation nur sehr bedingt möglich. Gerade die begrenzte Berücksichtigung älterer Menschen ist kritisch zu betrachten. Zwar besteht bei jungen Menschen ein größeres Risiko durch sportliche Aktivitäten, die höchste Inzidenz für Kopfverletzungen weisen jedoch ältere Personen über 75 Jahre auf [59, 60]. Dementsprechend sollte auch für diese Gruppe ein entsprechendes Programm gestaltet werden, das, angepasst an die jeweiligen Gegebenheiten, eine Rehabilitation unterstützt. Zudem muss bei den erhobenen Daten zu der Zeit bis zur medizinischen Genesung sowie zur Verbesserung der Symptome berücksichtigt werden, dass sportlich trainierte Personen womöglich schneller regenerieren als Personen, die keine regelmäßige körperliche Aktivität ausführen [46].

## Fazit und Ausblick

Das aerobe Training ist wirksam, um die Genesung zu beschleunigen und Symptome schneller zu reduzieren. Eine vestibuläre Rehabilitation in Kombination mit zervikalen Behandlungsansätzen scheint sich insbesondere auf Symptome wie z. B. Schwindel positiv auszuwirken. Die Trainingsintensität sollte sowohl beim aeroben Training als auch bei der vestibulären Rehabilitation nah an der Belastungsschwelle, bei der eine Verschlimmerung der Symptome stattfindet, bestimmt werden, um wirksame Reize im Rehabilitationsprozess zu setzen. Außerdem scheinen die Interventionen unabhängig vom zeitlichen Beginn nach der Verletzung zu einer Verbesserung der Symptomatik und/oder einer schnelleren Genesungszeit zu führen. Dies kann sich bei Betroffenen mit langanhaltenden Beeinträchtigungen, die im Laufe der Zeit Zweifel und Ängste entwickelt haben, positiv auswirken [61]. Dementsprechend können die Verletzten unter entsprechender Anleitung aktive und symptom-spezifische Maßnahmen durchführen, um schrittweise zur Lebensqualität zurückzukehren, die vor dem Ereignis bestand. Nichtsdestotrotz zeigen die vorliegenden Studien, dass trainingstherapeutische Interventionen frühestmöglich anzuwenden sind, um verlängerte Regenerationsverläufe bestmöglich zu verhindern.

In der Zukunft muss geprüft werden, inwieweit die Kombination der Rehabilitationsansätze einen Vorteil gegenüber Einzelmaßnahmen bietet. Außerdem ist eine weitere Forschung bezüglich der optimalen Trainingsgestaltung und der Belastungsparameter notwendig. Stichproben künftiger Arbeiten sollten vor allem ältere Menschen einschließen und auf sie abgestimmte Rehabilitationsprogramme untersuchen. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der hohen Inzidenz an SHT in dieser Altersklasse notwendig [59, 60]. Darüber hinaus ist eine tiefergehende Betrachtung weiterer Rehabilitationsansätze von Interesse. Erste vielversprechende Untersuchungen gibt es bei chronischen Symptomen zu dem Einsatz von Meditationen, Yoga und Achtsamkeitsübungen [62]. Zudem zeigten bestimmte Atemmanöver positive Effekte bei einem gestörten Hirnmetabolismus [63, 64]. Zusammenfassend bestehen somit bereits gut untersuchte Maßnahmen, die Bewegungstherapeuten nutzen können, und darüber hinaus das Potenzial, das Spektrum der Ansätze zu erweitern.

## Interessenkonflikt

Die Autoren bestätigen, dass kein Interessenkonflikt vorliegt.

## Korrespondenzadresse



### Jun.-Prof. Dr. Ingo Helmich

Leiter AG Sportmotorik, Institut für Bewegungstherapie und bewegungsorientierter Prävention und Rehabilitation, Deutsche Sporthochschule Köln (DSHS)  
Am Sportpark Müngersdorf 6  
50933 Köln  
Deutschland  
i.helmich@dshs-koeln.de

## Literatur

- [1] Morris L, Gottshall K. Physical therapy management of the patient with vestibular dysfunction of head trauma. In: Susan J Herdman, Richard A Clendaniel, eds. Vestibular Rehabilitation. 4th Edition. Philadelphia: Davis Company; 2014
- [2] Helmich I. Game-specific characteristics of sport-related concussions. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 2018; 58: 172–179. doi:10.23736/S0022-4707.16.06677-9
- [3] Webbe F. The handbook of sport neuropsychology. Springer Publishing Company; 2011
- [4] Gardner RC, Yaffe K. Epidemiology of mild traumatic brain injury and neurodegenerative disease. *Molecular and Cellular Neuroscience* 2015; 66: 75–80
- [5] Helmich I, von Götz D, Emsermann C et al. Not just contact sports: significant numbers of sports-related concussions in cycling. *Journal of sports medicine and physical fitness* 2019; 59: 496–501
- [6] Theadom A, Starkey NJ, Dowell T et al. Sports-related brain injury in the general population: an epidemiological study. *J Sci Med Sport* 2014; 17: 591–596
- [7] Burt CW, Overpeck MD. Emergency visits for sports-related injuries. *Ann Emerg Med* 2001; 37: 301–308
- [8] Pearn ML, Niesman IR, Egawa J et al. Pathophysiology Associated with Traumatic Brain Injury: Current Treatments and Potential Novel Therapeutics. *Cellular and Molecular Neurobiology* 2017; 37: 571–585
- [9] Gänsslen A, Schmehl I et al. Leichtes Schädel-Hirn-Trauma im Sport Handlungsempfehlungen. Sportverlag Strauß 1966
- [10] Guskiewicz KM, Marshall SW, Bailes J et al. Recurrent concussion and risk of depression in retired professional football players. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2007; 39: 903–909. doi:10.1249/mss.0b013e3180383da5
- [11] Guskiewicz KM, Marshall SW, Bailes J et al. Association between Recurrent Concussion and Late-Life Cognitive Impairment in Retired Professional Football Players. *Neurosurgery* 2005; 57: 719–726. doi:10.1227/01.neu.0000175725.75780.dd
- [12] McCrory P, Meeuwisse W, Dvořák J et al. Consensus statement on concussion in sport – the 5th international conference on concussion in sport held in Berlin, October 2016. *British Journal of Sports Medicine* 2017; 51: 838–847. doi:10.1136/bjsports-2017-097699
- [13] Murray DA, Meldrum D, Lennon O. Can vestibular rehabilitation exercises help patients with concussion? A systematic review of efficacy, prescription and progression patterns. *British Journal of Sports Medicine* 2017; 51: 442–451
- [14] Makdissi M, Schneider KJ, Feddermann-Demont N et al. Approach to investigation and treatment of persistent symptoms following sport-related concussion: A systematic review. *British Journal of Sports Medicine* 2017; 51: 958–968
- [15] Quatman-Yates C, Cupp A, Gunsch C et al. Physical Rehabilitation Interventions for Post-mTBI Symptoms Lasting Greater Than 2 Weeks: Systematic Review. 2016;
- [16] McMahon P, Hricik A, Yue JK et al. Symptomatology and functional outcome in mild traumatic brain injury: Results from the prospective TRACK-TBI study. *Journal of Neurotrauma* 2014; 31: 26–33. doi:10.1089/neu.2013.2984
- [17] Leddy JJ, Baker JG, Willer B. Active Rehabilitation of Concussion and Post-concussion Syndrome. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America* 2016; 27: 437–454
- [18] Choe MC. The Pathophysiology of Concussion. *Current Pain and Headache Reports* 2016; 20:
- [19] Harmon KG, Drezner JA, Gammons M et al. American Medical Society for Sports Medicine position statement: concussion in sport. *Br J Sports Med* 2013; 47: 15–26

- [20] Feddermann-Demont N, Palla A, Ettlin T et al. Diagnostik und Therapie bei Gehirnerschütterung im Sport. *Forum Médical Suisse – Swiss Medical Forum* 2020. doi:10.4414/fms.2020.08563
- [21] Ellis MJ, Leddy JJ, Willer B. Physiological, vestibulo-ocular and cervicogenic post-concussion disorders: An evidence-based classification system with directions for treatment. *Brain Injury* 2015; 29: 238–248. doi:10.3109/02699052.2014.965207
- [22] Tan CO, Meehan WP, Iverson GL et al. Cerebrovascular regulation, exercise, and mild traumatic brain injury. *Neurology* 2014; 83: 1665–1672
- [23] Whitney SL, Alghadir AH, Anwer S. Recent Evidence About the Effectiveness of Vestibular Rehabilitation. *Current Treatment Options in Neurology* 2016; 18: 1–15
- [24] Fetter M. Rehabilitation vestibulärer Störungen. In: *NeuroRehabilitation*. Springer; 2010: 383–398
- [25] Scheiber B, Schiefermeier-Mach N, Wiederin C. Wirksamkeit manualtherapeutischer Techniken in Kombination mit vestibulärer Rehabilitation nach sportbedingten Gehirnerschütterungen – Eine systematische Übersichtsarbeit randomisiert kontrollierter Studien. *physioscience* 2020; 16: 167–175. doi:10.1055/a-1098-8140
- [26] Brown L, Camarinos J. The Role of Physical Therapy in Concussion Rehabilitation. *Seminars in Pediatric Neurology* 2019; 30: 68–78. doi:10.1016/j.spen.2019.03.011
- [27] Schneider KJ, Leddy JJ, Guskiewicz KM et al. Rest and treatment/rehabilitation following sport-related concussion: A systematic review. *British Journal of Sports Medicine* 2017; 51: 930–934
- [28] Leddy JJ, Wilber CG, Willer BS. Active recovery from concussion. *Current Opinion in Neurology* 2018; 31: 681–686
- [29] Thomas DG, Apps JN, Hoffmann RG et al. Benefits of strict rest after acute concussion: A randomized controlled trial. *Pediatrics* 2015; 135: 213–223. doi:10.1542/peds.2014-0966
- [30] Liberati A, Altman DG, Tetzlaff J et al. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *J Clin Epidemiol* 2009; 62: e1–e34
- [31] Methley AM, Campbell S, Chew-Graham C et al. PICO, PICOS and SPIDER: a comparison study of specificity and sensitivity in three search tools for qualitative systematic reviews. *BMC Health Serv Res* 2014; 14: 1–10
- [32] Elkins MR, Moseley AM, Sherrington C et al. Growth in the Physiotherapy Evidence Database (PEDro) and use of the PEDro scale. *British Journal of Sports Medicine* 2013; 47: 188–189
- [33] Rzewuska M, Ferreira M, McLachlan AJ et al. The efficacy of conservative treatment of osteoporotic compression fractures on acute pain relief: a systematic review with meta-analysis. *European Spine Journal* 2015; 24: 702–714
- [34] Leddy JJ, Haider MN, Ellis MJ et al. Early Subthreshold Aerobic Exercise for Sport-Related Concussion: A Randomized Clinical Trial. *JAMA Pediatrics* 2019; 173: 319–325. doi:10.1001/jamapediatrics.2018.4397
- [35] Leddy JJ, Master CL, Mannix R et al. Early targeted heart rate aerobic exercise versus placebo stretching for sport-related concussion in adolescents: a randomised controlled trial. *The Lancet Child & Adolescent Health* 2021; 5: 792–799
- [36] Micay R, Richards D, Hutchison MG. Feasibility of a postacute structured aerobic exercise intervention following sport concussion in symptomatic adolescents: a randomised controlled study. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine* 2018; 4: e000404
- [37] Reneker JC, Hassen A, Phillips RS et al. Feasibility of early physical therapy for dizziness after a sports-related concussion: A randomized clinical trial. *Scand J Med Sci Sports* 2017; 27: 2009–2018
- [38] Bailey C, Meyer J, Briskin S et al. Multidisciplinary concussion management: a model for outpatient concussion management in the acute and post-acute settings. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation* 2019; 34: 375–384
- [39] Chan C, Iverson GL, Purtzki J et al. Safety of active rehabilitation for persistent symptoms after pediatric sport-related concussion: a randomized controlled trial. *Arch Phys Med Rehabil* 2018; 99: 242–249
- [40] Kleffelgaard I, Soberg HL, Tamber AL et al. The effects of vestibular rehabilitation on dizziness and balance problems in patients after traumatic brain injury: a randomized controlled trial. *Clinical Rehabilitation* 2019; 33: 74–84. doi:10.1177/0269215518791274
- [41] Kurowski BG, Hugentobler J, Quatman-Yates C et al. Aerobic exercise for adolescents with prolonged symptoms after mild traumatic brain injury: an exploratory randomized clinical trial. *J Head Trauma Rehabil* 2017; 32: 79
- [42] Schneider KJ, Meeuwisse WH, Nettel-Aguirre A et al. Cervicovestibular rehabilitation in sport-related concussion: a randomised controlled trial. *Br J Sports Med* 2014; 48: 1294–1298. doi:10.1136/bjsports-2013-093267
- [43] Vikane E, Hellström T, Røe C et al. Multidisciplinary outpatient treatment in patients with mild traumatic brain injury: a randomised controlled intervention study. *Brain Inj* 2017; 31: 475–484
- [44] McCrory P, Meeuwisse WH, Aubry M et al. Consensus statement on concussion in sport: The 4th international conference on concussion in sport held in Zurich, November 2012. *J Am Coll Surg* 2013; 216:
- [45] Howell DR, Hunt DL, Aaron SE et al. Influence of aerobic exercise volume on postconcussion symptoms. *The American Journal of Sports Medicine* 2021; 49: 1912–1920
- [46] Leddy JJ, Haider MN, Ellis M et al. Exercise is Medicine for Concussion. *Current Sports Medicine Reports* 2018; 17: 262–270. doi:10.1249/JSR.0000000000000505
- [47] Lal A, Kolakowsky-Hayner SA, Ghajar J et al. The Effect of Physical Exercise After a Concussion: A Systematic Review and Meta-analysis. *American Journal of Sports Medicine* 2018; 46: 743–752. doi:10.1177/0363546517706137
- [48] Rooks CR, Thom NJ, McCully KK et al. Effects of incremental exercise on cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy: A systematic review. *Progress in Neurobiology* 2010; 92: 134–150
- [49] Kaplan GB, Vasterling JJ, Vedak PC. Brain-derived neurotrophic factor in traumatic brain injury, post-traumatic stress disorder, and their comorbid conditions: Role in pathogenesis and treatment. *Behavioural Pharmacology* 2010; 21: 427–437
- [50] Binder DK, Scharfman HE. Brain-derived neurotrophic factor. *Growth Factors* 2004; 22: 123
- [51] Griffin ÉW, Mullally S, Foley C et al. Aerobic exercise improves hippocampal function and increases BDNF in the serum of young adult males. *Physiology and Behavior* 2011; 104: 934–941. doi:10.1016/j.physbeh.2011.06.005
- [52] Erickson KI, Voss MW, Prakash RS et al. Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2011; 108: 3017–3022. doi:10.1073/pnas.1015950108
- [53] Harmon KG, Clugston JR, Dec K et al. American Medical Society for Sports Medicine position statement on concussion in sport. *British Journal of Sports Medicine* 2019; 53: 213–225. doi:10.1136/bjsports-2018-100338
- [54] Krøll LS, Hammarlund CS, Linde M et al. The effects of aerobic exercise for persons with migraine and co-existing tension-type headache and neck pain. A randomized, controlled, clinical trial. *Cephalalgia* 2018; 38: 1805–1816
- [55] Alsalaheen BA, Whitney SL, Mucha A et al. Exercise prescription patterns in patients treated with vestibular rehabilitation after concussion. *Physiotherapy Research International* 2013; 18: 100–108

- [56] Burzynski J, Sulway S, Rutka JA. Vestibular rehabilitation: review of indications, treatments, advances, and limitations. *Current Otorhinolaryngology Reports* 2017; 5: 160–166
- [57] Marouane E, el Mahmoudi N, Rastoldo G et al. Sensorimotor rehabilitation promotes vestibular compensation in a rodent model of acute peripheral vestibulopathy by promoting microgliogenesis in the deafferented vestibular nuclei. *Cells* 2021; 10. doi:10.3390/cells10123377
- [58] Helmich I, Coenen J, Henckert S et al. Reduced frontopolar brain activation characterizes concussed athletes with balance deficits. *Neuroimage: clinical* 2020; 25: 102164
- [59] Peeters W, van den Brande R, Polinder S et al. Epidemiology of traumatic brain injury in Europe. *Acta Neurochir (Wien)* 2015; 157: 1683–1696
- [60] Taylor CA, Bell JM, Breiding M] et al. Traumatic brain injury-related emergency department visits, hospitalizations, and deaths – United States, 2007 and 2013. *MMWR Surveillance Summaries* 2017; 66: 1
- [61] Stillman A, Alexander M, Mannix R et al. Concussion: evaluation and management. *Cleve Clin J Med* 2017; 84: 623–630
- [62] Acabchuk RL, Brisson JM, Park CL et al. Therapeutic Effects of Meditation, Yoga, and Mindfulness-Based Interventions for Chronic Symptoms of Mild Traumatic Brain Injury: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Applied Psychology: Health and Well-Being* 2021; 13: 34–62. doi:10.1111/aphw.12244
- [63] Len TK, Neary JP, Asmundson GJG et al. Serial monitoring of CO<sub>2</sub> reactivity following sport concussion using hypocapnia and hypercapnia. *Brain Inj* 2013; 27: 346–353
- [64] Mutch WAC, Ellis MJ, Ryner LN et al. Patient-specific alterations in CO<sub>2</sub> cerebrovascular responsiveness in acute and sub-acute sports-related concussion. *Frontiers in Neurology* 2018; 9: 23