



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

Technische Universität Chemnitz  
Fakultät für Human- und Sozialwissenschaften  
Institut für Angewandte Bewegungswissenschaften

# Masterarbeit

Thema:

## **Untersuchung der Hirnaktivität von gesunden Probanden unter Verwendung von fNIRS bei Gleichgewichtsaufgaben auf Messplattformen: eine systematische Übersicht**

Zur Erlangung des Grades Master of Science

Eingereicht von: Tina Geyer Mat. Nr.: 438829

Geboren am: 31.08.1996 in: Selb

Studiengang: Präventions- und Rehabilitationssport  
Gesundheits- und Fitnesssport

Abgabetermin: 17.12.2021

1. Betreuer: Dr. Andresa Mara de Castro Germano

2. Betreuer: Katharina Antonia Elisabeth Stute

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>IV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Hintergrund und Stand der Forschung.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Gleichgewicht .....</b>	<b>3</b>
2.1.1 Exkurs: COM vs. COG vs. COP .....	5
<b>2.2 funktionelle Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS).....</b>	<b>5</b>
2.2.1 Vergleich mit anderen Methoden .....	6
2.2.2 fNIRS- Signal.....	7
2.2.3 fNIRS - Messprinzip .....	8
<b>2.3 Problemstellung und Ziele .....</b>	<b>9</b>
<b>3 Methodik.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1 PRISMA Statement .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2 Suchstrategie.....</b>	<b>11</b>
<b>3.3 Suchterm.....</b>	<b>11</b>
<b>3.4 Informationsquellen und Suchprozess .....</b>	<b>12</b>
<b>3.5 Ein- und Ausschlusskriterien .....</b>	<b>13</b>
<b>3.6 Auswahl der Studien und Datenextraktion .....</b>	<b>13</b>
<b>3.7 Datengewinnung und Datendetails .....</b>	<b>15</b>
<b>3.8 Risiko der Verzerrungen .....</b>	<b>16</b>
<b>4 Ergebnisse .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1 Auswahl der Studien .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2 Studienmerkmale.....</b>	<b>17</b>
<b>4.3 Ergebnisse der einzelnen Studien.....</b>	<b>26</b>
<b>4.4 Risiko der Verzerrungen .....</b>	<b>35</b>

---

<b>5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>44</b>
<b>5.1</b>	<b>Zusammenfassung der Evidenz .....</b>	<b>44</b>
5.1.1	Überblick der COP-Daten .....	44
5.1.2	Überblick der fNIRS-Daten.....	48
5.1.3	Zusammenhang von COP- und fNIRS-Daten.....	51
<b>5.2</b>	<b>Einschränkungen.....</b>	<b>52</b>
<b>5.3</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>53</b>
<b>5.4</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>55</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>57</b>
	<b>Anhangsverzeichnis.....</b>	<b>61</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: A) Schwerkraftlinie bei ruhigem Stand (Heß, 2019, S.35), B) Unterstützungsfäche (BoS), in welcher sich der Schwerkraftvektor befinden sollte (Ohlendorf et al., 2008, S.414).....	3
Abbildung 2: Verschiebung des COP durch Haltungsschwankungen (Heß, 2019, S.37) .....	4
Abbildung 3: Gehirnaufbau (Bear et al., 2018, S.220/235/236).....	6
Abbildung 4: Hämoglobinveränderungen nach neuronaler Aktivität (Scholkmann et al., 2014, S.17).....	8
Abbildung 5: A) fNIRS (Al-Shargie, 2019, S.3), B) Messprinzip (Naseer & Hong, 2015, S.3).	8
Abbildung 6: PRISMA Flussdiagramm.....	14
Abbildung 7: Risiko der Verzerrungen über alle Studien hinweg.....	43

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Erklärungen COM vs. COG vs. COP.....	5
Tabelle 2: Studienmerkmale.....	18
Tabelle 3: Ergebnisse der einzelnen Studien.....	27
Tabelle 4: Risiko der Verzerrungen in den einzelnen Studien (Cochrane Risk of Bias Tool).36	
Tabelle 5: Begründungen für die Einschätzungen der Risk of Bias.....	37

## Abkürzungsverzeichnis

ADHS	Aufmerksamkeitsdefizit- / Hyperaktivitätsstörung
AG	Gyrus angularis
BoS	Base of Support (engl.: Unterstützungsfläche)
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CFN	Bedingung: Augen geschlossen, Schaumstoffoberfläche, natürlicher Fußabstand (St George et al., 2021)
CFT	Bedingung: Augen geschlossen, Schaumstoffoberfläche, zusammenstehende Füße (St George et al., 2021)
COG	Center of Gravity
COM	Center of Mass
COND	condition, engl.: Bedingung
COP	Center of Pressure
CSN	Bedingung: Augen geschlossen, fester Untergrund, natürlicher Fußabstand (St George et al., 2021)
CST	Bedingung: Augen geschlossen, fester Untergrund, zusammenstehende Füße (St George et al., 2021)
Desoxy-Hb	= HHb, Desoxyhämoglobin, sauerstoffarmes Hämoglobin
DLPFC	dorsolateraler präfrontaler Kortex
DNS	double-number sequenz engl.: Doppelzahl-Sequenz (=kognitiver Test)
EEG	Elektroenzephalografie
engl.	englisch

## Abkürzungsverzeichnis

---

FEF	frontales Augenfeld
(f)MRI	(functional) Magnetic Resonance Imaging engl.: (funktionelle) Magnetresonanztomographie ((f)MRT)
fNIRS	funktionelle Nahinfrarotspektroskopie
f-Op	Operculum frontale
Gesamt-Hb	Gesamthämoglobin
J.	Jahre
LDLPFC	linker dorsolateraler präfrontaler Kortex
I-SMC	lateral Teil des sensomotorischen Kortex
MA	middle age (engl.: mittleres Alter)
MAD	median absolute deviation engl.: mittlere absolute Abweichung
m-SMC	medialer Teil des sensomotorischen Kortex
n.a.	nicht anwendbar
OA	older age (engl.: älteres Alter)
OSN	Bedingung: Augen offen, fester Untergrund, natürlicher Fußabstand (St George et al., 2021)
Oxy-Hb	= O <sub>2</sub> Hb, Oxyhämoglobin, sauerstoffreiches Hämoglobin
PET	Positronen-Emissions-Tomographie = bildgebendes Verfahren der Medizin
PFC	präfrontaler Kortex
PMC	prämotorischer Kortex
PoG	postzentraler Gyrus
p-Op	Operculum parietale

## Abkürzungsverzeichnis

---

PrG	prämotorischer Gyrus
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, engl.: Bevorzugte Report Items für systematische Übersichten und Meta-Analysen
RDLPFC	rechter dorsolateraler präfrontaler Kortex
RMS	root mean square engl.: quadratischer Mittelwert
s	Sekunden
SMA	komplementärer motorischer Bereich
SMG	supramarginaler Gyrus
SPL	superiorer Teil des Parietallappen
SRT	simple reaction time task engl.: einfacher Reaktionszeit-Test (=kognitiver Test)
STG	superior-temporaler Gyrus
VEST	temporal-parietaler Bereich
vs.	versus
ZNS	zentrales Nervensystem
zw.	zwischen

# 1 Einleitung

Die Haltungskontrolle des Menschen ist entscheidend, um das Gleichgewicht in allen täglichen Lebenssituationen aufrechterhalten oder dieses notfalls wiederherstellen zu können (Pollock et al., 2016). Hierzu sind komplexe Prozesse und Informationen aus verschiedenen sensorischen Systemen erforderlich. Dazu zählen insbesondere die visuellen, die vestibulären und die propriozeptiven Feedbacks (Herold et al., 2017).

Mit dem Alter erfolgen jedoch Veränderungen und Verluste, welche diese notwendigen Informationen beeinflussen. Durch den Verlust des Sehvermögens gehen beispielsweise wichtige visuelle Informationen aus der Umwelt verloren (Nikolaus, 2005).

Durch diese visuellen Verluste, aber unter anderem auch durch Defizite der Muskulatur und kognitive Einschränkungen, summieren sich die Risikofaktoren für Stürze. So stürzt jeder dritte ältere Mensch, ab dem Alter von 65 Jahren, mindestens einmal pro Jahr. 15% der Gestürzten fallen sogar mehrmals (Freiberger & Becker, 2006).

Doch wie verläuft die Gleichgewichtskontrolle genau und wie werden die sensorischen Informationen integriert, damit die motorischen Kommandos erfolgen können? Welche Vorgänge werden im menschlichen Körper automatisch vorgenommen, um diese fehlenden Informationen zu kompensieren und auch älteren Menschen ein möglichst stabiles Gleichgewicht in Alltagssituationen zu gewährleisten, sowie Stürze zu vermeiden? Wie verändert sich die Aktivität im Gehirn, wenn die sensorischen Systeme beeinflusst und Informationen verändert oder reduziert werden? Oder sind vermehrte Haltungsschwankungen und deren Ausgleich nicht zu umgehen?

Die meisten der bereits durchgeführten Studien zur Thematik der Haltungskontrolle, analysieren Daten zum COP (Center of Pressure), zur Muskelaktivität, sowie der 3D-Bewegungsanalysen. Bewegungen werden im Gehirn gesteuert, jedoch ist zur Gehirnaktivität während der Haltungskontrolle bisher nur wenig bekannt (Herold et al., 2017).

Um die Gehirnaktivität zu messen, gibt es verschiedene Verfahren. Jedoch sind die meisten davon bei Bewegungen sehr anfällig und messen dadurch fehlerhaft. Mittels dem Verfahren des fNIRS (funktionelle Nahinfrarotspektroskopie) ist die Untersuchung der Hirnaktivität auch während Bewegungen möglich (Scholkmann et al., 2014).

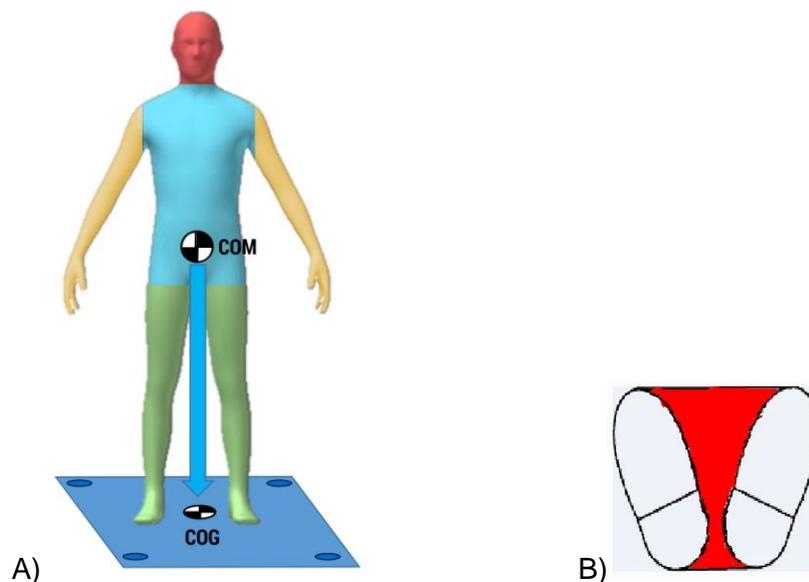
Daher soll mit dieser Arbeit die Hirnaktivität von gesunden Probanden unter Verwendung von fNIRS, sowie das Gleichgewicht hinsichtlich des COPs unter verschiedenen sensorischen Bedingungen untersucht werden.

## 2 Hintergrund und Stand der Forschung

### 2.1 Gleichgewicht

Gleichgewicht wird in der Mechanik definiert als der Zustand eines Objekts, bei welchem alle resultierenden Kräfte oder Momente, die auf das Objekt einwirken, in der Summe null ergeben (Pollock et al., 2016).

Auf den Menschen bezogen bedeutet das, dass die vertikale Projektion des COM (Center of Mass), also der sogenannte COG (Center of Gravity, Abb.1A) in die Unterstützungsfläche (BoS, Abb.1B) fällt (Ohlendorf et al., 2008). Man könnte Gleichgewicht auch bezeichnen als die Fähigkeit, den Körperschwerpunkt (COM) mit minimalen Schwankungen und maximaler Stetigkeit über der Auflagefläche zu halten (Pollock et al., 2016).



**Abbildung 1: A) Schwerkraftlinie bei ruhigem Stand (Heß, 2019, S.35), B) Unterstützungsfläche (BoS), in welcher sich der Schwerkraftvektor befinden sollte (Ohlendorf et al., 2008, S.414)**

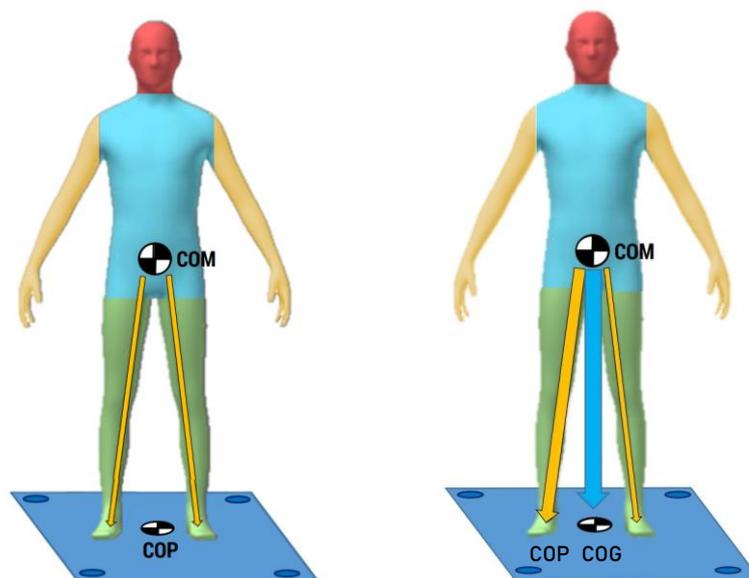
Da der Mensch kein starres Objekt ist, hat er die Möglichkeit sein Gleichgewicht zu kontrollieren. Hierbei spricht man von der sogenannten Haltungskontrolle. Diese bezeichnet den Akt des Beibehaltens oder auch der Wiederherstellung des Gleichgewichtszustandes während der aufrechten Haltung oder bei Aktivitäten (Pollock et al., 2016).

Um das Gleichgewicht aufrechtzhalten oder wiederherstellen zu können, erfordert es komplexe Prozesse. Verschiedenste sensorische Informationen aus mehreren Systemen

---

müssen dazu verarbeitet und integriert werden (Herold et al., 2017). Dabei sind besonders das visuelle, das vestibuläre und das propriozeptive bzw. das somatosensorische System von großer Bedeutung (Karim et al., 2013). Das Feedback der eben genannten Systeme und deren Integration ist notwendig, um Haltungsanpassungen zu realisieren und auf eintretende Haltungsänderungen und -verluste bestmöglich reagieren zu können. Insbesondere die Sensoren des Vestibularorgans und die Propriozeption lösen posturale Reaktionen aus (Illert, 2006). Die afferenten Informationen, welche visuell, vestibulär und propriozeptiv durch die Sensoren der unterschiedlichen Sinnesorgane aufgenommen werden, geben den sensorischen Input an das Gehirn bzw. das ZNS (= zentrales Nervensystem) weiter. Hier findet die Integration statt. Daraufhin wird der motorische Output an die Muskeln und weitere Effektoren weitergegeben, welche eine Reaktion ausführen (Witte, 2018).

Beeinflusst man diese notwendigen Inputs, kann es zu Störungen des Gleichgewichts oder auch der Haltungskontrolle kommen. Dies kann beispielsweise geschehen, indem das visuelle Feedback durch Schließen der Augen oder Dunkelheit gestört oder komplett entfernt wird. Folglich kommt es dadurch zu Haltungsschwankungen, welche sich durch die Analyse des COP (Center of Pressure) verdeutlichen lassen. Denn durch Gewichtsverlagerungen bzw. durch die Änderung der Belastungen, welche durch das Ausgleichen der entstandenen Instabilität entstehen, verschiebt sich der COP entsprechend in die jeweilige Richtung. Dies wird in Abbildung 2 bildlich verdeutlicht (Heß, 2019).



**Abbildung 2: Verschiebung des COP durch Haltungsschwankungen (Heß, 2019, S.37)**

Zu diesen Störungen des Gleichgewichts kommt es nicht nur durch aktives Beeinflussen der verschiedenen sensorischen Systeme, sondern auch durch den natürlichen Prozess der

---

Alterung (Wittenberg et al., 2017). Denn mit dem Älterwerden gehen verschiedene Veränderungen und Verluste einher, welche auch das visuelle, vestibuläre oder auch somatosensorische System betreffen. Im Alter lässt insbesondere das Sehvermögen der Menschen nach. Somit kann es auch hier zu Störungen des jeweiligen Feedbacks kommen. Diese altersbedingten Beeinträchtigungen der Gehirnstrukturen, aber auch -funktionen werden durch eine verstärkte und weiter verbreitete Beteiligung der kortikalen Bereiche kompensiert und somit für die Haltungskontrolle genutzt. Im Alter wird es zudem schwieriger zwei oder mehrere Dinge gleichzeitig zu tun. Doch im Alltag treten solche Dual-Task-Situationen häufiger auf, wenn neben der Haltungsaufgabe gleichzeitig eine weitere Nebenaufgabe ansteht (Nikolaus, 2005; Marusic et al., 2019). Besonders in diesen Situationen sind ältere Menschen einem erhöhten Sturzrisiko ausgesetzt (Nikolaus, 2005).

### 2.1.1 Exkurs: COM vs. COG vs. COP

Zum besseren Verständnis wird in Tabelle 1 nochmals ein Überblick zu den einzelnen Zentren und dessen Definitionen dargestellt (Heß, 2019):

**Tabelle 1: Erklärungen COM vs. COG vs. COP**

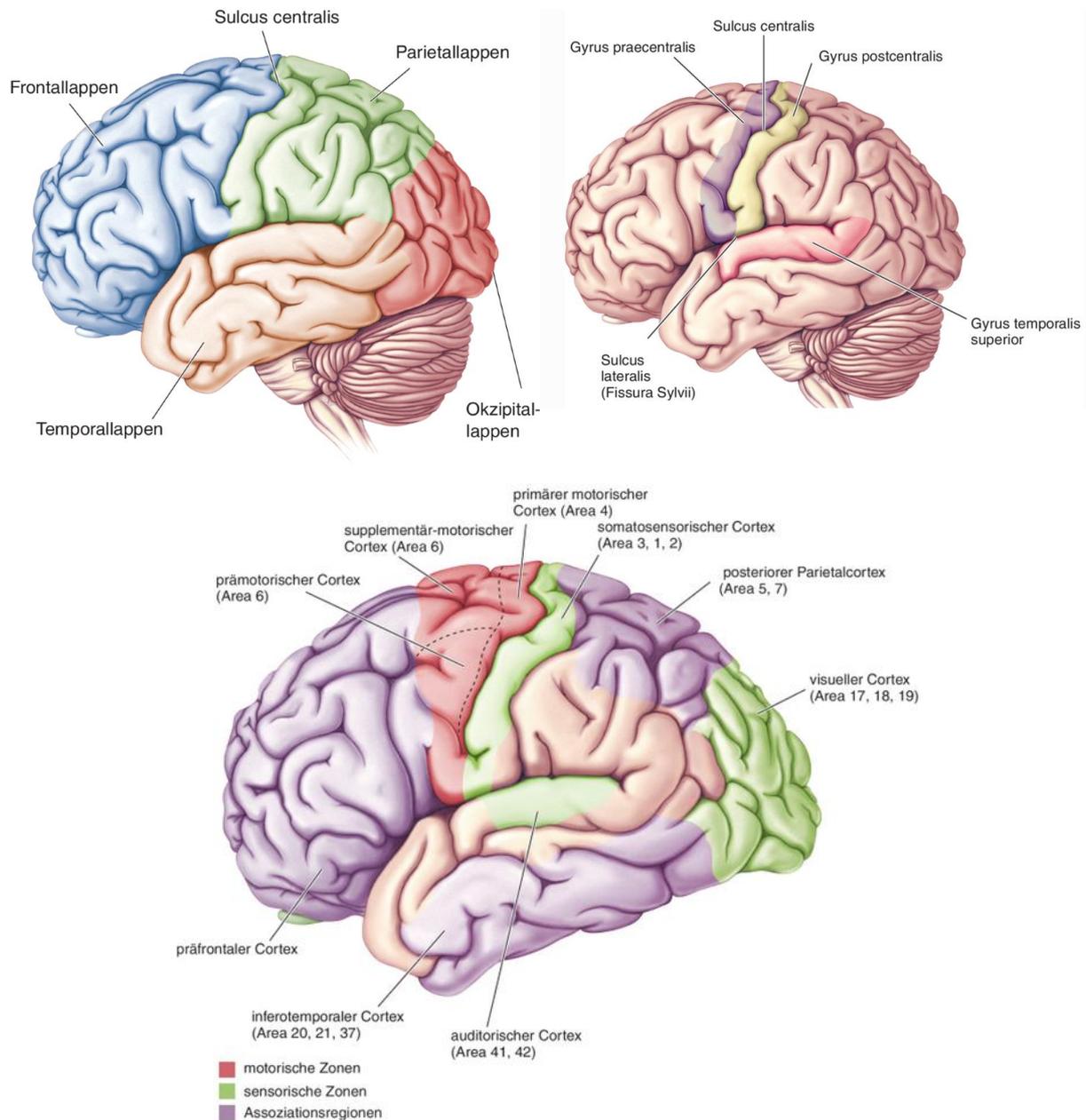
---

<b>COM („Center of Mass“)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Körperschwerpunkt = Punkt, in dem alle Teilkörpermassen vereint sind</li></ul>
<b>COG („Center of Gravity“)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Projektion des COM auf den Boden</li><li>• außerhalb der Unterstützungsfläche = Instabilität</li></ul>
<b>COP („Center of Pressure“)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kraftübertragung durch Kontakt von Füßen und Boden</li><li>• Verschiebung durch Belastungsänderungen bzw. Haltungsschwankungen</li></ul>

---

## 2.2 funktionelle Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS)

Bei der Haltungskontrolle spielen verschiedene Regionen im Gehirn eine wichtige Rolle. Dazu gehören insbesondere folgende Gehirnregionen: präfrontaler Kortex, supplementärer motorischer Bereich, primärmotorischer Kortex und prämotorischer Kortex (Sathe et al., 2021; Feigenspan, 2017). Abbildung 3 stellt den Gehirnaufbau und einen Großteil der in der Übersichtsarbeit fokussierten Regionen dar und dient zum besseren Verständnis.



**Abbildung 3: Gehirnaufbau (Bear et al., 2018, S.220/235/236)**

### 2.2.1 Vergleich mit anderen Methoden

Um die tatsächlich aktivierten Regionen zu lokalisieren und die entsprechende Gehirnaktivität in diesen zu messen, gibt es verschiedene Methoden. Dazu gehören unter anderem die Elektroenzephalografie (EEG), die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT/fMRI, engl. functional magnetic resonance imaging) und die funktionelle Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS, Abb.5A).

Die verschiedenen bildgebenden Methoden unterscheiden sich teilweise hinsichtlich der nötigen Signale, der Anwendung sowie dem Anwendungsbereich. Demnach bringen alle Methoden gewisse Vor- und Nachteile mit sich.

Ein wichtiger Vorteil von fNIRS ist, dass es ein nicht-invasives Verfahren darstellt, welches durch seine Robustheit und drahtlose Nutzung auch bei Bewegungen einsetzbar ist. Des Weiteren hat es eine gute räumliche sowie zeitliche Auflösung und eine leichte Handhabung. Zudem hat diese Methode besonders im Vergleich zu dem fMRI geringe Anschaffungs- und Instandhaltungskosten (Scholkmann et al., 2014; Wolff, 2017).

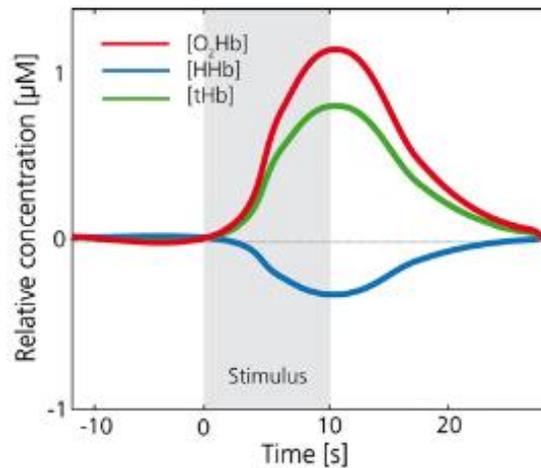
Die Chance, fNIRS auch während der Bewegung einsetzen zu können, ermöglicht die Untersuchung des Gehirns auch während der sportlichen Aktivität. Dies bietet eine vielversprechende Ergänzung zu der bereits bestehenden sport-psychologischen Forschung und zeigt eine weitere Perspektive auf, mit welcher die Prozesse im Gehirn erforscht und verstanden werden können. Zudem können bestehende Spekulationen überprüft und gegebenenfalls berichtigt werden (Wolff, 2017).

### **2.2.2 fNIRS- Signal**

Mittels dem fNIRS-Verfahren werden die Konzentrationsänderungen von sauerstoffhaltigem (Oxy-Hb/O<sub>2</sub>Hb/HbO) und sauerstofffreiem Hämoglobin (Desoxy-Hb/HHb/HbR) im Gehirngewebe nach neuronaler Aktivität gemessen (Izzetoglu et al., 2005; Scholkmann et al., 2014).

Die neuronale Aktivität benötigt Energie, infolgedessen es zum Verbrauch von Sauerstoff kommt. Demnach kommt es zu hämodynamischen Reaktionen in den entsprechenden Hirnregionen. Dabei nimmt das Oxyhämoglobin (Oxy-Hb ↑↑) zu, da sauerstoffreiches Blut nachgeliefert wird. Das Desoxyhämoglobin (Desoxy-Hb ↓) nimmt ab (Abb.4), da das sauerstoffreiche Blut zusätzlich zu sauerstoffarmen Blut umgewandelt wird (Wolff, 2017).

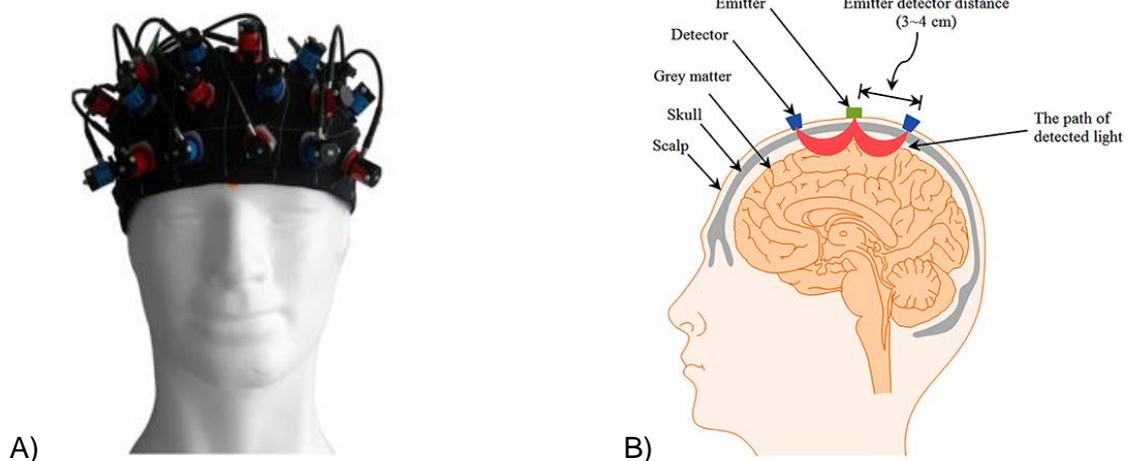
Um die Konzentrationsänderungen festzustellen, wird in den oberflächlichen Hirngebieten der entsprechenden Regionen gemessen (Izzetoglu et al., 2005; Scholkmann et al., 2014).



**Abbildung 4: Hämoglobinveränderungen nach neuronaler Aktivität (Scholkmann et al., 2014, S.17)**

### 2.2.3 fNIRS - Messprinzip

Um die jeweiligen Änderungen der Hämoglobinkonzentration in den entsprechenden Regionen messen zu können, wird Licht im nahen Infrarotbereich (Wellenlänge: 650-1000nm) in den Kopf eingestrahlt. Daraufhin muss es durch mehrere Gewebe diffundieren. Dabei wird Licht absorbiert und das restliche Licht reflektiert. Die Reflexion wird anschließend gemessen (Abb.5B). Die Messung der Konzentrationsänderungen werden durch unterschiedliche Absorptionseigenschaften von Oxy-Hb und Desoxy-Hb ermöglicht. Die hämodynamischen Reaktionen können dabei durch fNIRS an mehreren Stellen des Gehirns gemessen werden (Naseer & Hong, 2015).



**Abbildung 5: A) fNIRS (Al-Shargie, 2019, S.3), B) Messprinzip (Naseer & Hong, 2015, S.3)**

## 2.3 Problemstellung und Ziele

Einige Studien beschäftigten sich bereits mit der Hirnaktivität während verschiedenster Gleichgewichtsaufgaben. Wittenberg et al. (2017) verfasste ein Review mit 83 Artikeln, welche sich alle mit Neuroimaging, also einem bildgebenden Verfahren, während der statischen und dynamischen Kontrolle des menschlichen Gleichgewichts befassten. Diese Kontrolle wurde in den einzelnen Studien durch Störungen oder das Erledigen von Doppelaufgaben beeinflusst. 50 dieser Studien nutzen dabei das EEG zur Messung der Aktivität im Gehirn. In den restlichen Studien wurden die Methoden: fMRI, fNIRS und PET (Positronen-Emissions-Tomographie) verwendet. In das Review wurden auch Arbeiten eingeschlossen, welche die Aktivität beim Gang gemessen haben. Teil des Reviews sind ebenso Texte, in dessen Rahmen Patienten mit beispielsweise Parkinson oder Schlaganfall-Patienten untersucht wurden.

Abgesehen von den Studien, welche Wittenberg et al. eingeschlossen hat, gibt es noch weitere Studien, welche neben den Haltungsschwankungen die Hirnaktivität gemessen haben und dabei das EEG genutzt haben. Hierzu gehört beispielsweise die Studie von Gebel et al. (2020) oder Ghosn et al. (2020). Letzterer untersuchte das Gleichgewicht während des Gangs, welche er durch hervorgerufene Störungen beeinflusste. In vielen Studien, welche durch die unterschiedlichen Datenbanken zu finden sind, wird also auf die Elektroenzephalografie zurückgegriffen.

Nur wenige Studien nutzen das fNIRS. Sucht man nach Studien welche fNIRS und zugleich eine Kraftmessplatte oder eine ähnliche Plattform nutzen, werden die Treffer stark reduziert. Bisher gibt es hierzu nur wenige Studien. Karim et al. (2012) untersuchte das Gleichgewicht und die Aktivitätsänderungen zwar mit fNIRS, nutzte aber anstatt einer Kraftmessplatte, das Wii Balance Board und ein dazu gehöriges Spiel. Auch Seidel-Marzi et al. (2021) verwendete keine Kraftmessplatte, sondern eine Slackline, auf welcher die Gleichgewichtsaufgabe stattfand. Ebenso gibt es einige Studien, wie beispielsweise die von Wang et al. (2016), die mittels fNIRS die Konzentrationsänderungen im Gehirn während Gleichgewichtsaufgaben gemessen haben, aber dabei keine Kraftmessplatte nutzten und den COP somit nicht genauer untersucht haben. Jedoch gibt es seit kurzer Zeit eine Übersichtsarbeit, welche zehn Studien zur kortikalen Aktivierung und auch Lokalisierung während der Durchführung von statischen und dynamischen Gleichgewichtsaufgaben auswertete. Dieses Review von Sathe et al. (2021) schloss dabei nur Studien ein, welche die Methode fNIRS eingesetzt hatten. Jedoch wurden hierbei auch Studien, wie die von Karim et al. (2012), einbezogen, die nicht unbedingt eine Kraftmessplatte zur Untersuchung des Gleichgewichts nutzten.

Ziel dieses Reviews ist es, bereits durchgeführte Studien, welche die Hirnaktivität während einer statischen oder dynamischen Gleichgewichtsaufgabe mittels des fNIRS bei gesunden Probanden untersucht haben, auszuwerten. Es soll geklärt werden, wie sich die Haltungsschwankungen anhand des COP und auch die Hirnaktivität bzw. Lokalisation verändert, wenn Einfluss auf das sensorische System genommen wird. Die Bedingungen können dabei aktiv verändert oder auch durch unterschiedliche Altersgruppen hervorgerufen werden. Der COP sollte dabei bei allen Studien auf einer Kraftmessplatte oder ähnlichen Plattform gemessen werden. Anhand dieser Übersichtsarbeit möchte man also folgende Forschungsfragen klären:

1. *Wird das Gleichgewicht hinsichtlich des COP durch unterschiedliche sensorische Bedingungen bzw. Störungen des visuellen, vestibulären und / oder propriozeptiven Systems bei gesunden Probanden negativ beeinflusst?*

*Hypothese: Der COP wird durch die Störung der sensorischen Systeme negativ beeinflusst und steigt an.*

2. *Geht die Störung des visuellen, vestibulären und / oder propriozeptiven Systems bei gesunden Probanden mit einer erhöhten Hirnaktivität einher?*

*Hypothese: Die Hirnaktivität nimmt durch die Störung der sensorischen Systeme zu.*

3. *Wirken sich die Störungen der jeweiligen sensorischen Systeme unterschiedlich auf das Gleichgewicht aus?*

*Hypothese: Die sensorischen Systeme haben einen unterschiedlich starken Einfluss auf das Gleichgewicht.*

4. *Gehen die COP-Daten und die fNIRS-Daten miteinander einher?*

*Hypothese: Es zeigen sich Korrelationen zwischen den COP- und den fNIRS-Daten.*

## **3 Methodik**

### **3.1 PRISMA Statement**

Diese systematische Übersichtsarbeit orientiert sich an den PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, engl. Bevorzugte Report Items für systematische Übersichten und Meta-Analysen) -Kriterien. Diese entsprechen dem Standard für Publikationen von systematischen Reviews. Die PRISMA-Checkliste kann über den Link im Literaturverzeichnis aufgerufen werden (*Checkliste Zum Bericht Einer Systematischen Übersicht Oder Einer Meta-Analyse*, n.d.).

### **3.2 Suchstrategie**

Für die Literaturrecherche wurden vier, auf die Fragestellung zutreffende, Datenbanken ausgewählt. Des Weiteren wurde anhand der festgelegten Ein- und Ausschlusskriterien (siehe 2.5) ein Suchterm formuliert. Dabei wurden drei wichtige Aspekte berücksichtigt. Die Hirnaktivität sollte mittels fNIRS gemessen werden und das Gleichgewicht durch entsprechende Haltungsaufgaben auf einer Messplattform – im Idealfall einer Kraftmessplatte – untersucht werden. Der dritte Aspekt, welcher berücksichtigt wurde, war die Änderung einer Bedingung und somit eine Störung des sensorischen Systems während der Gleichgewichtsübung. Diese Suchfelder wurden mit „AND/UND“ verbunden, um sicherzustellen, dass alle drei angegebenen Kriterien in den Texten vorkommen. Variationen der jeweiligen Aspekte wurden mit „OR/ODER“ dem jeweiligen Suchfeld beigefügt. Da ausschließlich Studien mit gesunden Probanden in dem Review eingeschlossen werden sollten, wurde der Operator „NOT/NICHT“ dem Suchterm hinzugefügt, um Studien auszuschließen, welche Patienten mit unterschiedlichsten Krankheiten und Verletzungen untersuchten.

### **3.3 Suchterm**

Um die für das Review wesentlichen Studien herausfiltern zu können, wurde in allen auserwählten Datenbanken folgender Suchterm verwendet:

"fNIRS" OR "functional near-infrared spectroscopy" OR "NIRS" OR "near-infrared spectroscopy" OR "brain activity" OR "cortical activity" OR "neural activity" OR "prefrontal cortex"

AND

"balance" OR "postural control" OR "postural" OR "balance control" OR "static balance" OR "dynamic balance" OR "center of pressure" OR "response\*" OR "posturography"

AND

"ag\*ing" OR "cognitiv\*" OR "sensor\*" OR "dual task\*" OR "balance task"

NOT

"patients" OR "parkinson" OR "stroke" OR "dementia" OR "multiple sclerosis".

### **3.4 Informationsquellen und Suchprozess**

Die systematische Literaturrecherche dieses Reviews wurde in vier auserwählten elektronischen Datenbanken durchgeführt. Um alle relevanten Studien zu identifizieren, wurden als Informationsquellen die Datenbanken Cochrane Library, PsycINFO, PubMed und Scopus genutzt.

Um die Suche weiter eingrenzen zu können, wurden in den unterschiedlichen Datenbanken Filter verwendet. Bei PubMed wurde die Einschränkung auf „Titel und Zusammenfassung“ festgelegt und auch bei PsycINFO die Einstellung „Zusammenfassung“ vorgenommen. Bei Cochrane Library wurde die Suche auf „Trials (=Versuche)“ und bei Scopus auf „Titel, Zusammenfassung und Schlüsselwörter“ eingegrenzt. Zudem wurde die Suche bei allen Datenbanken bezüglich der Jahreszahl begrenzt und nur Studien ab dem Jahr 2005 bis zum Jahr 2021 für die weitere Analyse aufgenommen.

Die endgültige Datensuche bzw. die Eingabe der Suchstrategie wurde in allen Datenbanken am 05.07.2021 durchgeführt.

Anschließend wurden die Ergebnisse, welche sich durch den oben genannten Suchterm in den jeweiligen Datenbanken ergaben, in das Literaturverwaltungsprogramm Mendeley geladen, um die Datenanalyse fortzuführen. Man überprüfte auf vorhandene Duplikate und entfernte diese anschließend.

---

### 3.5 Ein- und Ausschlusskriterien

Die Ein- und Ausschlusskriterien des systematischen Reviews orientieren sich ebenso wie der Suchterm an den PICO(S)-Kriterien und wurden vor der Entwicklung der Suchstrategie formuliert und festgelegt. Das PICO(S)-Schema beinhaltet die Merkmale:

**P**opulation – **I**ntervention – **C**ontrol (=Vergleichsgruppe) – **O**utcome – **S**tudiendesign.

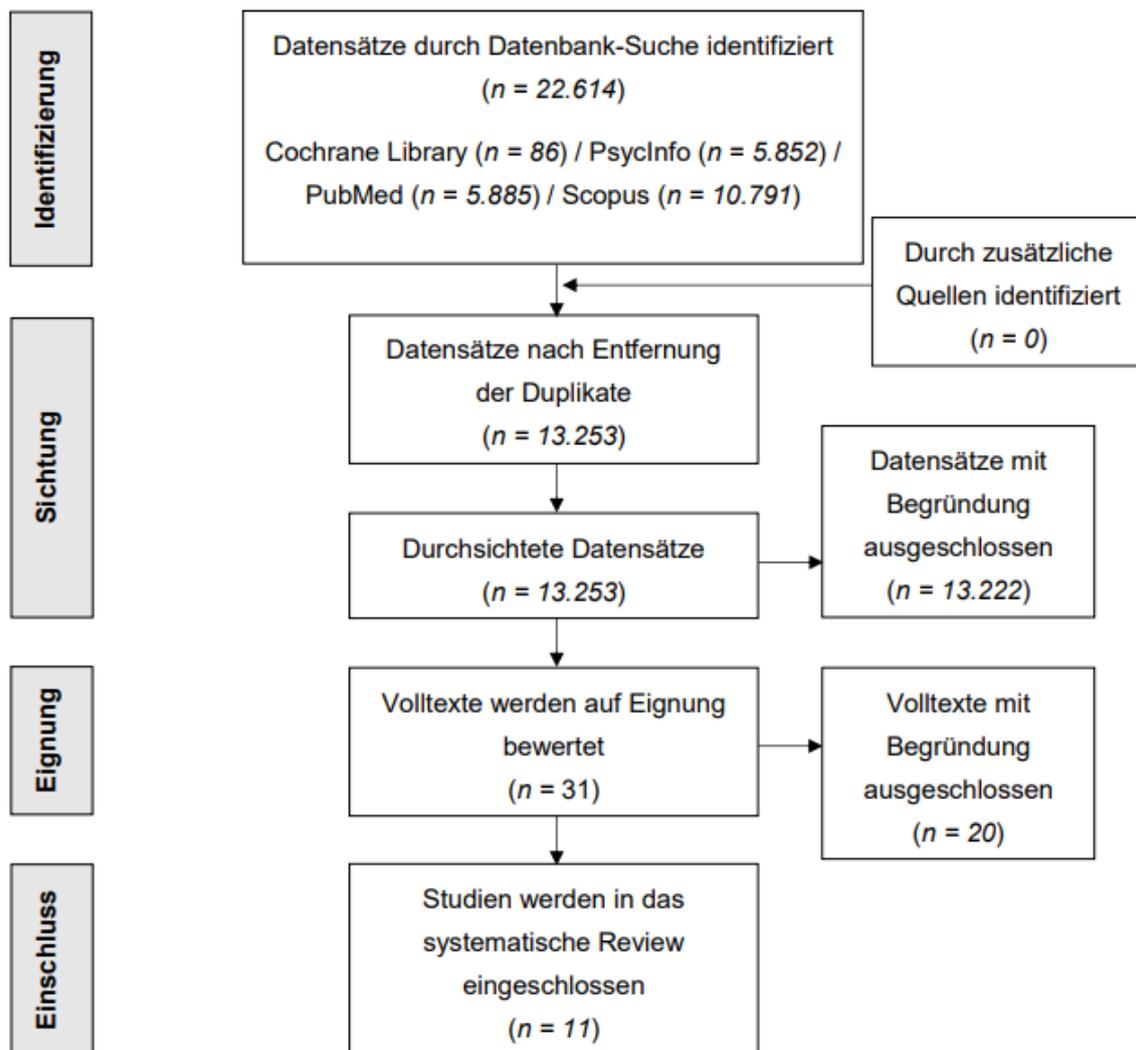
Demnach basieren sie sowohl auf den Gleichgewichtsaufgaben als auch auf der Anwendung des fNIRS zur Messung der Konzentrationsänderungen des Hämoglobins im Gehirngewebe. Somit wurden Studien eingeschlossen, welche (I) gesunde Erwachsene untersucht haben. (II) Es zielte auf Studien ab, bei welcher die Intervention statische oder dynamische Gleichgewichts-/Balanceaufgaben auf Messplattformen waren und bei welchen wiederum Einfluss auf das sensorische System genommen wurde. Dabei wurden folgende sensorische Bedingungen berücksichtigt: visuell, vestibulär und propriozeptiv. Demnach wurden beispielsweise Störungen, wie das Schließen der Augen oder Dual-Task-Aufgaben als Herausforderung angesehen. Auch Alterung wurde als ein möglicher Einfluss eingeschlossen, da diese die sensorischen Systeme ebenso beeinflusst. (III) Vergleichsgruppen waren bei der Bedingung des Alterns jüngere Probanden. (IV) Bei den eingeschlossenen Studien wurde das Gleichgewicht mittels des COP (=Center of Pressure) auf Kraftmessplatten oder anderen Plattformen und die Hirnaktivität mittels fNIRS gemessen und als Ergebnis berichtet. Des Weiteren wurden nur Studien in das Review aufgenommen, (V) welche im Jahr 2005 oder später veröffentlicht wurden.

Ausgeschlossen wurden demnach Studien, bei welchen Patienten mit unterschiedlichsten Krankheiten oder Verletzungen untersucht wurden. Des Weiteren wurden keine Studien einbezogen, welche mittels EEG, MRI oder anderen Messverfahren außer dem fNIRS untersucht haben. Ebenso wurden Studien ausgeschlossen, bei welchen das Gleichgewicht während des Gangs untersucht wurde.

### 3.6 Auswahl der Studien und Datenextraktion

Durch das Screening, also das manuelle Durchsehen der Studien, wurden die Daten evaluiert. Dies geschah vorerst anhand der Titel sowie Zusammenfassungen und später durch die Bewertung der Volltexte. So wurde eine Auswahl an relevanten Studien getroffen. Diese wurden an dieser Stelle extrahiert. Die verschiedenen Phasen der Studienausswahl werden in Abbildung 5 anhand des PRISMA Flussdiagramms dargestellt und im Weiteren genauer erläutert.

---



**Abbildung 6: PRISMA Flussdiagramm**

Wie in dem PRISMA Flussdiagramm dargestellt, wurde die Studieneauswahl anhand von vier aufeinanderfolgenden Phasen durchgeführt.

Begonnen wurde mit der ersten Phase der Identifizierung. Diese erfolgte durch die Datensuche mittels der vier Datenbanken Cochrane Library, PsycInfo, PubMed und Scopus und dem festgelegten Suchterm. Identifiziert wurden dabei 22.614 Datensätze, welche alle im Literaturverwaltungsprogramm Mendeley zusammengetragen wurden.

Nach Entfernung der Duplikate blieben 13.253 Datensätze übrig, welche gesichtet wurden. Dabei wurden die Titel der Texte, die Zusammenfassungen und die angegebenen Schlüsselwörter bewertet und so eine Vorauswahl an Studien festgelegt. Ausgewählt wurden alle Studien, welche als möglicherweise relevant für das Review erschienen sind und im Anschluss genauer auf deren Eignung getestet werden sollten.

Ausgeschlossen wurden an dieser Stelle 13.222 Daten, da sie nicht den Zielen dieser Übersichtarbeit entsprachen. Begründungen waren hier unter anderem: Untersuchungen anhand von Tierexperimenten, Untersuchungen mittels anderer bildgebender Verfahren (EEG oder MRI), Untersuchungen von Patienten mit beispielsweise Depression, ADHS, Alzheimer, Autismus, Schizophrenie, Bipolaren Störungen, Angststörungen, Untersuchungen von Stress, Emotionen, Aufmerksamkeit, Wahrnehmung, Gedächtnis, Risikoverhalten, Gesichtsverarbeitung, Arbeitsgedächtnis, Schmerzwahrnehmung, Belohnungserwartung, Vorhersehbarkeit, Reaktionszeit, Untersuchung von Säuglingen und deren Entwicklung, Untersuchungen von Gleichgewicht während des Gangs, Studien, bei welchen nur das Gleichgewicht oder die Veränderung der Hirnaktivität mittels fNIRS untersucht wurden.

Hiermit war die zweite Phase der Sichtung und Vorauswahl abgeschlossen und es konnte die dritte Phase folgen. Hier wurden die Volltexte der übrigen 31 Datensätze auf Eignung bewertet. Auch hier wurden bei genauerer Überprüfung weitere 19 Studien ausgeschlossen, da die Ein- und Ausschlusskriterien nicht zutrafen. Begründungen waren hier: Studien mit Gleichgewichtsübungen, welche nicht auf einer Kraftmessplatte stattfanden, Studien, bei welchen nur das Gleichgewicht oder die Veränderung der Hirnaktivität mittels fNIRS untersucht wurde, Untersuchung nach Gehirnerschütterung sowie Untersuchungen mittels den bildgebenden Verfahren EEG oder MRI.

Nach dieser Phase wurden die für das Review geeigneten Studien eingeschlossen. Die Anzahl beläuft sich auf elf relevante Studien, dessen Ergebnisse in dem hier dargestellten Review bewertet werden.

### **3.7 Datengewinnung und Datendetails**

Aus den auserwählten Datensätzen wurden die wichtigsten Studienmerkmale entnommen. Dazu gehörten sowohl die Probandenbeschreibungen als auch die Angabe der genauen Gleichgewichtsaufgabe. An dieser Stelle wurde auch beschrieben, in welcher Form Einfluss auf die jeweiligen sensorischen Systeme genommen wurde. Des Weiteren wurde aufgelistet, in welchen Gehirnregionen die Hirnaktivität bzw. die Konzentrationsänderung erwartet und demnach auch gemessen wurde. Aufgezeigt wurden außerdem die Variablen, auf welche der Fokus in den jeweiligen Studien lag.

Daten, welche man fokussierte, waren die Werte des Hämoglobins und dessen Veränderungen. Dabei wurde das Oxyhämoglobin, das Desoxyhämoglobin und in seltenen

Fällen auch das Gesamthämoglobins betrachtet. Denn diese zeigen gegebenenfalls Konzentrationsänderungen und somit eine Änderung der Gehirnaktivität nach neuronaler Aktivität. Diese geben den Hinweis, dass die Beeinflussung oder Störung auf das sensorische System während der Gleichgewichtsaufgaben Auswirkungen auf die Stärke oder die Verbreitung der Hirnaktivität hätte.

Eine weitere wichtige Variable ist der COP. Dieser wurde in den Studien in anterior-posteriorer und/oder medialer-lateraler Richtung gemessen und bewertet. Der COP zeigt, ob es während der Haltungsaufgabe vermehrt zu Belastungsänderungen und somit zu Haltungsschwankungen kommt. Diese würden wiederum darauf hindeuten, dass das Gleichgewicht durch Störung des sensorischen Feedbacks negativ beeinflusst wird.

### **3.8 Risiko der Verzerrungen**

Es kann irreführend sein, auf die Evidenz einzelner Studien zu vertrauen. Das Ziel ist es daher, die Evidenz der auserwählten Artikel nicht selektiv, sondern systematisch zu identifizieren, zu bewerten und anschließend zusammen zu fassen (Schmucker et al., 2017).

Zur Beurteilung des Risikos von Verzerrungen der einzelnen Studien wurde das Cochrane Risk of Bias Tool verwendet. Diese Bewertung erfolgte in sieben evidenz-basierenden Bereichen (The Cochrane Collaboration, 2011):

- Generierung der Randomisierungssequenz (Selektionsbias)
- Geheimhaltung und Vorhersehbarkeit der Gruppenzuteilung (Selektionsbias)
- Verblindung von Teilnehmern und Studienpersonal (Performance-Bias)
- Verblindung bei Endpunkterhebung (Detektionsbias)
- Unvollständige Daten zu Endpunkten (Attrition-Bias)
- Selektives Berichten (Reporting-Bias)
- Andere Ursachen für Bias

Die unterschiedlichen Risiken der Verzerrungen wurden in den einzelnen Bereichen als „geringes Risiko“, „hohes Risiko“ oder „unklares Risiko“ eingeschätzt.

## **4 Ergebnisse**

### **4.1 Auswahl der Studien**

Die Datenbanksuche ergab 22.614 Datensätze (Abbildung 1). Es wurden keine Daten durch zusätzliche Quellen beigefügt. Nach der Entfernung von Duplikaten verblieben 13.253 Daten, welche gesichtet wurden. Die Orientierung erfolgte an den zuvor festgelegten Ein- und Ausschlusskriterien. Infolgedessen standen 31 Volltexte zur Verfügung, welche auf Eignung überprüft und bewertet wurden. Nach Abschluss der Studiauswahl und Bewertung der verfügbaren Volltexte wurden elf Artikel als relevant empfunden und in das systematische Review eingeschlossen. Diese Studien und deren Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten genauer aufgezeigt.

### **4.2 Studienmerkmale**

In der nachfolgenden Tabelle (Tab.2) werden die Merkmale der einzelnen, in die Übersicht aufgenommenen Studien dargestellt. Zum Auffinden der Texte werden zu jedem Artikel die Informationen Autor, Jahr und Titel angegeben.

Bei der Darstellung der Studienmerkmale werden die untersuchten Probandengruppen mit Daten zum Alter und der Geschlechteraufteilung angegeben. Des Weiteren werden die jeweiligen Gleichgewichtsaufgaben der einzelnen Untersuchungen und die gegebenen Bedingungen während diesen beschrieben. Neben den Regionen, welche bei der Durchführung der fNIRS-Messungen von Interesse waren, werden in Tabelle 2 auch die fokussierten Variablen dargestellt. Neben dem COP mittels Messplattform, wurden in den Studien meist das Oxyhämoglobin, das Desoxyhämoglobin und in manchen Fällen auch das Gesamthämoglobin mittels fNIRS genauer betrachtet.

Tabelle 2: Studienmerkmale

Autor, Jahr	Titel	Probanden	Gleichgewichtsaufgabe	Regionen	Fokussierte Variablen
<b>Basso Moro et al., 2014</b>	A semi-immersive virtual reality incremental swing balance task activates prefrontal cortex: A functional near-infrared spectroscopy study	16 gesunde Probanden: 29±4,8 J., 16 Männer, 0 Frauen	Barfußstand auf Kraftmessplatte, virtuelle 3D-Darstellung	PFC (präfrontaler Kortex, Brodmann Areas 10, 11, 46)	Oxy-Hb Desoxy-Hb COP: Medial-lateral Anterior-posterior
<b>Fujita et al., 2016</b>	Role of the Frontal Cortex in Standing Postural Sway Tasks While Dual-Tasking: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Study Examining Working Memory Capacity	29 Probanden: 20-29 J. Davon: 16 Probanden High-Span-Gruppe 13 Probanden Low-Span Gruppe	20s Haltungskontrolle auf Kraftmessplatte: • Single-Tasks: S-S-Aufgabe: Stillstand, O-S-Aufgabe: Einbeinstand • Dual-Tasks: S-D-Aufgabe: Stehen während Doppelaufgabe, O-D-Aufgabe: Einbeinstand während Doppelaufgabe, Stroop-Test	SMA (komplementärer motorischer Bereich) PMC (prämotorischer Kortex) DLPFC (dorsolateraler präfrontaler Kortex)	Oxy-Hb Desoxy-Hb Gesamt-Hb Pendelweglänge Anzahl der korrekten Antworten

<b>Hinderaker et al., 2020</b>	Aging Affects the Ability to Process the Optic Flow Stimulations: A Functional Near-Infrared Spectrometry Study	11 gesunde jüngere Probanden, YA: 22±1 J., 5 Männer, 6 Frauen  10 gesunde ältere Probanden, OA: 71±5 J., 4 Männer, 6 Frauen	Stand auf Plattform mit VR-Headset zur Anzeige von optischen Flussreizen (OF)  → unterschiedliche OF-Geschwindigkeiten	DLPFC, links VEST (temporal-parietaler Bereich)	Oxy-Hb Desoxy-Hb  COP: Anterior-posterior
<b>Karim et al., 2013</b>	Functional brain imaging of multi-sensory vestibular processing during computerized dynamic posturography using near-infrared spectroscopy	15 gesunde Probanden: 28±9 J., 9 Männer, 6 Frauen	Haltungskontrolle auf Posturographie-Plattform, 6 verschiedene Zustände/Bedingungen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• SOT I: fester Boden, Augen offen bei Licht</li> <li>• SOT II: fester Boden, Augen offen bei Dunkelheit</li> <li>• SOT IV: schwingender Boden, Augen offen bei Licht</li> <li>• SOT V: schwingender Boden, Augen offen bei</li> </ul>	Temporal-parietaler Bereich (superior-temporaler Gyrus, STG; supramarginaler Gyrus, SMG)	Oxy-Hb Desoxy-Hb Gesamt-Hb  COP: Anterior-posterior

Dunkelheit					
→ Verlust genauer visueller und propriozeptiver Rückmeldung					
<b>Lin et al., 2017</b>	Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) brain imaging of multi-sensory integration during computerized dynamic posturography in middle-aged and older adults	15 gesunde Probanden mittleren Alters, MA: 46±11 J., 5 Männer, 10 Frauen  15 gesunde ältere Probanden, OA: 73±5 J., 8 Männer, 7 Frauen	4 Stehversuche auf Posturographie-Kraftmessplatte Modifikation der Eingaben: • visuell: Augen offen bei hell (EO) oder dunkel (EOD) • somatosensorisch: feste (fixed) oder schwankende (SR) Plattform	Frontal-lateraler Bereich, bilateral Temporal-parietaler Bereich (STG), bilateral Okzipitaler Bereich, bilateral	Oxy-Hb Desoxy-Hb  COP: Anterior-posterior
<b>Marusic et al., 2019</b>	Aging effects on prefrontal cortex oxygenation in a posture-cognition dual-task: an fNIRS pilot study	10 gesunde jüngere Probanden: 23±3 J.  10 gesunde ältere	Haltungsausgabe (Tandemstand) auf Kraftmessplatte: • Single-Task (ST)  • Dual-Task (DT):	PFC DLPFC, links	Oxy-Hb Desoxy-Hb  COP: Medial-lateral Anterior-posterior

Ergebnisse

		Probanden: 72 ± 3 J.	Haltungsaufgabe + kognitive Aufgabe (serielle Subtraktion)		Anzahl der korrekten Antworten
<b>Rosso et al., 2017</b>	Neuroimaging of an attention demanding dual-task during dynamic postural control	6 jüngere Probanden: 22-30 J., 4 Männer, 2 Frauen  10 ältere Probanden: 66-81 J., 3 Männer, 7 Frauen	Haltungskontrolle auf dynamischer Posturographie-Plattform mit geschlossenen Augen  • Single-Tasks: Haltungskontrolle, Aufmerksamkeitstest (CRT)  • Dual-Task: Haltungskontrolle und CRT gleichzeitig	DLPFC, links Temporaler Kortex, links Motorkortex, links	Oxy-Hb Desoxy-Hb  COP: Anterior-posterior  Reaktionszeit
<b>St George et al., 2021</b>	Functional Near-infrared Spectroscopy Reveals the Compensatory Potential of Pre-frontal Cortical Activity for Standing Balance in Young and Older Adults	24 gesunde jüngere Probanden: 18-28 J.  25 gesunde ältere Probanden: 60-84 J.	5 Single-Task-Gleichgewichtsbedingungen: • OSN: Augen offen, auf festem Untergrund stehend, natürliche Fußbreite • CSN: Augen geschlossen, auf festem Untergrund stehend, natürlicher	PFC	Oxy-Hb Desoxy-Hb  COP: Medial-lateral Anterior-posterior

<p>Fußabstand</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• CST: Augen geschlossen, auf festem Untergrund stehend, Füße zusammenstehend</li> <li>• CFN: Augen geschlossen, auf Schaumstoffoberfläche stehend, natürlicher Fußabstand</li> <li>• CFT: Augen geschlossen, auf Schaumstoffoberfläche stehend, Füße zusammenstehend</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dual-Tasks: die gleichen 5 Gleichgewichtsbedingungen + kognitive Aufgabe (serielle Subtraktion)</li> </ul>					
<b>St-Amant et al., 2020</b>	Unveiling the cerebral and sensory contributions to automatic postural	18 gesunde jüngere Probanden: 21,4±3,96 J.,	Ruhiger Stand auf Kraftmessplatte	PFC	Oxy-Hb Desoxy-Hb
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Single-Tasks:</li> </ul>					

---

Ergebnisse

	control during dual-task standing	6 Männer, 12 Frauen	ruhiger Stand auf Kraftmessplatte (SM), kognitive Aufgabe (SC: SRT, n-back, DNS)		COP: Medial-lateral Anterior-posterior  Anzahl abgelehnter Versuche
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dual-Task (DT): SM und SC (SRT, n-back oder DNS) gleichzeitig</li> </ul>		
<b>Takakura et al., 2015</b>	Cerebral Hemodynamic Responses During Dynamic Posturography: Analysis with a Multichannel Near-Infrared Spectroscopy System	11 gesunde Probanden: 33,4±7,4 J., 11 Männer, 0 Frauen	Haltungskontrolle auf Posturographie-Plattform, 6 Bedingungen, welche das sensorische System (propriozeptiv und/oder visuell) stören: <ul style="list-style-type: none"> <li>• SOT1: Augen offen, fester Plattform, Stabilität erhalten</li> <li>• SOT2: geschlossenen Augen</li> <li>• SOT3: visuelle Umgebung bewegt sich</li> <li>• SOT4: Plattform bewegt sich</li> </ul>	f-OP, rechts (Operculum frontale / Gyrus frontalis inferior) p-OP, rechts (Operculum parietale) FEF, rechts (frontales Augenfeld) SMG, rechts AG, rechts (Gyrus angularis) STG, rechts I-SMC, rechts (lateraler Teil des	Oxy-Hb Desoxy-Hb Gesamt-Hb  COG (Center of Gravity): Anterior-posterior

			<ul style="list-style-type: none"> <li>• SOT5: Plattform bewegt sich, Augen geschlossen</li> <li>• SOT6: visuelle Umgebung und Plattform bewegen sich</li> </ul>	<p>Sensomotorischen Kortex)</p> <p>m-SMC (medialer Teil des Sensomotorischen Kortex)</p> <p>SPL (superiorer Teil des Parietallappen)</p> <p>SMA</p>	
<b>Teo et al., 2018</b>	Sensory manipulation results in increased dorsolateral prefrontal cortex activation during static postural balance in sedentary older adults: An fNIRS study	<p>20 gesunde jüngere Probanden: 18-25 J., 10 Männer, 10 Frauen</p> <p>18 gesunde ältere Probanden: 66-73 J., 10 Männer, 8 Frauen</p>	<p>Haltungskontrolle auf Kraftmessplatte (beweglich), 6 Bedingungen, welche visuelle und/oder propriozeptive Rückmeldung entfernen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• COND1: Augen geöffnet, unbewegte Oberfläche</li> <li>• COND2: Augen geschlossen, unbewegte Oberfläche</li> <li>• COND3: Augen offen,</li> </ul>	<p>DLPFC, bilateral</p>	<p>Oxy-Hb</p> <p>Desoxy-Hb</p> <p>COP</p>

- unbewegte Umgebung,  
bewegte visuelle  
Umgebung
- COND4: Augen offen,  
bewegte Oberfläche, feste  
visuelle Umgebung
  - COND5: Augen  
geschlossen, bewegte  
Oberfläche
  - COND6: Augen offen,  
bewegte Oberfläche,  
bewegte visuelle  
Umgebung

### **4.3 Ergebnisse der einzelnen Studien**

In Tabelle 5 werden die Ergebnisse der elf Studien dargestellt, welche sich während der Studiauswahl und Datenextraktion als relevant bewiesen haben.

Aus jedem der Artikel wurden die wichtigsten Haupteffekte zusammengetragen. Einen Teil der Ergebnisse stellen die COP-Veränderungen dar, welche bei den Studien mittels der Messplattform in anterior-posteriore und/oder medial-laterale Richtung gemessen wurden.

Zudem setzen sich die Studienergebnisse ebenfalls aus den fNIRS-Daten zusammen, welche während den Gleichgewichtsaufgaben erarbeitet wurden. Hierbei wurden die Hirnaktivitäten bzw. die Konzentrationsfähigkeiten in den entsprechenden Hirnregionen gemessen. Die Änderungen, welche innerhalb der Aufgabe durch unterschiedliche Bedingungen hervorgerufen werden konnten, werden in der Tabelle detailliert aufgeführt.

Somit ist im Folgenden ein guter Überblick aller gegebenen Hirnreaktionen und Haltungsschwankungen, welche sich ergaben, gegeben.

**Tabelle 3: Ergebnisse der einzelnen Studien**

Autor	Hauptergebnisse COP	Hauptergebnisse fNIRS
<b>Basso Moro et al., 2014</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Richtungswinkel: <math>30^\circ \pm 5^\circ</math></li> <li>• Anterior-posterior: <math>18,3 \pm 2,6</math> cm</li> <li>• Medial-lateral: <math>10,0 \pm 4,6</math> cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desoxy-Hb ↓, Oxy-Hb ↑</li> <li>• Oxy-Hb-Zunahme dreifach so größer als Desoxy-Hb-Abnahme</li> <li>• Schwierigkeitsstufen 1-3: progressiver Oxy-Hb-Anstieg und weniger konsistente Desoxy-Hb-Abnahme</li> <li>• Schwierigkeitsstufe 4: Oxy-Hb- und Desoxy-Hb-Veränderungen tendieren zum Plateau</li> <li>• Nach Aufgabe: Rückkehr zu Vor-Aufgaben-Niveau</li> <li>• Spitzenwerte der Oxy-Hb-Zunahme und Desoxy-Hb-Abnahme während CSBT niedriger als ISBT</li> </ul>
<b>Fujita et al., 2016</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterschiede zw. den Haltungsbedingungen in beiden Gruppen</li> <li>• Signifikante Unterschiede zw. den Gruppen bei O-D</li> <li>• Keine signifikanten Ergebnisse zw. den Gruppen bei S-S, O-S und S-D</li> </ul>	<p>SMA:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• signifikante Unterschiede zw. beiden Gruppen (O-S, O-D)</li> <li>• signifikante Unterschiede zw. den Haltungsbedingungen in beiden Gruppen (bei High-Span-Gruppe: zw. S-S und O-D)</li> </ul> <p>DLPFC, rechts:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• keine signifikanten Unterschiede zw. den Gruppen</li> <li>• signifikante Unterschiede zw. den Haltungsbedingungen in beiden Gruppen</li> </ul>

		<p>DLPFC, links und PMC, links / rechts:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• keine signifikanten Unterschiede zw. beiden Gruppen und zw. den Handlungsbedingungen in beiden Gruppen</li> </ul>
<p><b>Hinderaker et al., 2020</b></p>	<p>Signifikante Unterschiede zw. den beiden Altersgruppen bei mittlerer OF-Geschwindigkeit</p>	<p>DLPFC und VEST:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ältere Erwachsene erhöhtes Oxy-Hb während der mittleren und schnellen OF-Geschwindigkeiten</li> <li>• Ältere Erwachsene teils erhöhtes und teils verringertes Oxy-Hb im DLPFC während der langsamen OF-Geschwindigkeit</li> <li>• Ältere Erwachsene steigern Aktivität signifikant während Steigerung der Geschwindigkeiten</li> <li>• Keine signifikanten Oxy-Hb-Unterschiede in VEST zw. den beiden Altersgruppen während der langsamen OF-Geschwindigkeit</li> </ul>
<p><b>Karim et al., 2013</b></p>	<p>SOT II zu SOT V: → Verschlechterung der Propriozeption bei verschlechtertem visuellem Feedback</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• größte Zunahme an Schwankungen</li> </ul> <p>SOT I zu SOT IV und SOT IV zu SOT V: → Propriozeption verloren, aber visuelle Informationen gespeichert oder ohne propriozeptive Informationen, Verlust des Sehvermögens</p>	<p>SOT II zu SOT V und SOT IV zu SOT V: → SOT V-Bedingung beeinträchtigt visuelle und propriozeptive Rückmeldung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• größten Änderungen der Gehirnsignale:</li> <li>• Oxy-Hb und Gesamthämoglobin ↑, Desoxy-Hb ↓</li> </ul> <p>SOT I zu SOT IV und SOT I zu SOT II: → nur visueller oder propriozeptiver Input beeinträchtigt</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• schwächere Reaktionen</li> </ul>

- ähnliche Veränderung der Schwankungen SOT I zu SOT II:  
→ Sehverlust während der Anwesenheit propriozeptiver Informationen
- geringste Schwankungsänderungen

**Lin et al.,  
2017**

- keine Gruppeneffekte
- bewegte Plattform im Vergleich zu fester Plattform: COP ↑ (bei Licht + Dunkelheit)
- keine signifikanten Veränderungen bei zw. Bedingungen Licht und Dunkelheit (bei bewegter + fester Plattform)

- Hb-Reaktionen spiegeln Oxy-Hb-Änderungen wieder, aber im geringeren Ausmaß

Versuch 1: somatosensorische Informationen werden abgebaut, während visuelle Informationen beibehalten werden

- MA: signifikante Oxy-Hb ↑ in beiden lateralen Hemisphären und sehr geringe Veränderung im Okzipital-Bereich
- OA: signifikante Oxy-Hb ↑, auch im Okzipital-Bereich, stärker Aktivierung im Vergleich zu MA

Versuch 2: somatosensorische Informationen beeinträchtigt und keine visuellen Informationen vorhanden

- MA und OA ähnliche signifikante Oxy-Hb ↑ in seitlichen Hemisphären (MA: Aktivierung etwas stärker), Okzipital-Bereich signifikante Oxy-Hb ↑ nur bei OA

Versuch 3: somatosensorische Informationen korrekt, visuelle Informationen entfernt

- OA: weit verbreiteter Oxy-Hb ↑ in lateralen Regionen
- MA: nur relativ geringer Oxy-Hb ↑ in lateralen und okzipitalen Regionen

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anstieg bei OA signifikant stärker im rechten frontal-lateralen und rechten temporal-parietalen Bereich im Vergleich zu MA</li> </ul> <p>Versuch 4: visuelle Informationen entfernt, während somatosensorische Informationen abnehmen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• MA: signifikante Oxy-Hb ↑ in linker frontal-lateraler und rechter temporal-parietaler Region, vernachlässigbare ↑ in okzipitaler Region</li> <li>• OA: signifikante Oxy-Hb ↑ in lateralen Regionen und starke ↑ im Okzipital-Bereich</li> <li>• Signifikanter Unterschied zw. Altersgruppen im Okzipital-Bereich und in frontal-lateraler Region</li> </ul>
<b>Marusic et al., 2019</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine signifikanten Effekte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Signifikante Oxy-Hb-Veränderung von Baseline zu Tandemstand-ST und von Baseline zu DT</li> <li>• Keine signifikanten Oxy-Hb-Veränderungen von Baseline zu kognitiver Aufgabe-ST und von Tandemstand-ST zu DT</li> <li>• Keine signifikanten Desoxy-Hb-Veränderungen</li> </ul>
<b>Rosso et al., 2017</b>	<p>Single-Task: Haltungskontrolle:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• MAD für beide Gruppen ähnlich: ältere Probanden: 0,94 cm, jüngere Probanden: 0,95 cm</li> </ul> <p>Dual-Task:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oxy-Hb ↑ und Desoxy-Hb ↓</li> <li>• Reaktionshöhepunkt nach 10-15 s</li> <li>• Reaktion bis etwa 40-60 s nach Beendigung der Aufgabe</li> <li>• älteren Erwachsenen: Aktivierung bei Single-Task Haltungskontrolle weiterverbreitet als bei Single-Task CRT</li> <li>• erhöhte Aktivierung DLPFC, SMG, STG</li> </ul>

---

- keine signifikanten Veränderungen der Körperschwankungen
- ältere Probanden: 1,10 cm
- jüngere Probanden: 1,08 cm
- die der Haltungskontrolle zugeschriebenen Aktivierung bei Dual-Task bei beiden Gruppen geringer als bei Single-Task Haltungskontrolle

**St George et al., 2021**

Single-Task:

- Haltungsschwankungsbereich der älteren Gruppe höher als der der jüngeren Gruppe:
- Bedingungen OSN und CSN nicht signifikant, Bedingungen CST, CFN, CFT signifikant
- Schwankungen nahmen mit Steigerung der Herausforderung der sensomotorischen Bedingungen zu

Dual-Task:

- Ältere Gruppe im Vergleich zur jüngeren Gruppe erhöhte Schwankungen bei den Bedingungen CST und CFN
- Bei den Bedingungen OSN und CSN keine Unterschiede gegenüber Single-Task zw. den beiden Gruppen

Single-Task:

- Oxy-Hb bei der älteren Gruppe höher als in der jüngeren Gruppe, nicht signifikant
- Oxy-Hb nimmt mit anspruchsvoller werdenden Bedingungen zu

Dual-Task:

- Jüngere Gruppe: Erhöhung der sensomotorischen Anforderungen führen zu Hochregulierung der präfrontalen Aktivierung
- Jüngere Gruppe: Keine signifikanten Unterschiede im Aktivierungsausmaß zw. den CFN- und CFT-Bedingungen
- Ältere Gruppe: Oxy-Hb ↑ bei CSN-Bedingung, weniger Aktivierung bei den Bedingungen CST und CFN, Aktivierung bei CFN-Bedingung geringer als bei Single-Task

**St-Amant et al., 2020**

Fläche:

- n-back signifikante Flächenreduktion im Vergleich zu SM
- SRT und DNS keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Fläche im Vergleich zu SM

COP medial-lateral:

- Alle DT-Bedingungen zeigen Abnahme / weniger Variabilität im Vergleich zu SM
- n-back stärkere Abnahme als SRT

COP anterior-posterior:

- keine signifikanten Effekte

SRT- und n-back-Aufgabe:

- keine signifikanten Effekte

DNS:

- rechte Hemisphäre im Vergleich zur linken weniger aktiviert

**Takakura et al., 2015**

Anterior-posterior:

- SOT4-6 signifikant stärkere Ausschwankungen als unter SOT1-3
- SOT5 und 6 signifikant stärkere Ausschwankungen als unter SOT4

Oxy-Hb und Gesamt-Hb ↑ in den Regionen f-Op, p-Op und STG unter den Bedingungen SOT2 und 3 und besonders unter SOT5 und 6

f-Op:

- Aktivität unter SOT5- und 6-Bedingungen signifikant stärker als unter SOT1-3

p-Op:

- Aktivität unter SOT5- und 6-Bedingungen signifikant stärker als unter SOT1, 3, 4

- Aktivität unter SOT2 signifikant stärker als unter SOT1 und signifikant geringer als unter SOT6

STG:

- Aktivität unter SOT5- und 6- Bedingungen signifikant stärker als unter SOT1, 3, 4
- Aktivität unter SOT2 signifikant stärker als unter SOT1 und signifikant geringer als unter SOT5
- Reduktion der Oxy-Hb- und Gesamt-Hb-Reaktionen nach Beendigung der Aufgaben

- Unter SOT6-Bedingungen auch Aktivierung v-PMC und d-PMC
- Unter SOT1-Bedingungen in keiner Region hämodynamische Reaktionen

**Teo et al.,  
2018**

- Im Vergleich zu Bedingung 1 zeigen beide Altersgruppen Abnahme der Gleichgewichtswerte für Bedingungen 2-6
- Ältere Erwachsene: stärkere Abnahme der Gleichgewichtswerte für Bedingungen 3-6 im Vergleich zu jüngeren Erwachsenen

LDLPFC und RDLPFC:

- Oxy-Hb- und HHb-Veränderungen während allen 6 sensorischen Bedingungen bei beiden Altersgruppen

LDLPFC:

Oxy-Hb:

- COND1: kein signifikanter Unterschied zw. beiden Altersgruppen
- COND2-6: ältere Erwachsene größere Oxy-Hb-Zunahme im Vergleich zu jüngeren Erwachsenen und im Vergleich zu COND1

Desoxy-Hb:

- COND1-3: keine signifikanten Unterschiede zw. beiden Altersgruppen
- COND4-6: ältere Erwachsene größere Desoxy-Hb-Abnahme im Vergleich zu jüngeren Erwachsenen,  
beide Altersgruppen signifikante Desoxy-Hb-Abnahme im Vergleich zu COND1

RDLPFC:

Oxy-Hb:

- COND1: keine signifikanten Unterschiede zw. den Altersgruppen
- COND2-5: ältere Erwachsene größere Oxy-Hb-Zunahme im Vergleich zu jüngeren Erwachsenen
- COND2-6: ältere Erwachsene signifikante Zunahme im Vergleich zu COND1
- COND4-6: jüngere Erwachsene signifikante Zunahme im Vergleich zu COND1

Desoxy-Hb:

- COND4-6: ältere Erwachsene signifikant größere Desoxy-Hb-Reduktion im Vergleich zu jüngeren Erwachsenen
- COND4-6: beide Altersgruppen signifikante Desoxy-Hb-Reduktion im Vergleich zu COND1

#### 4.4 Risiko der Verzerrungen

Nachfolgend werden alle Daten zu den Risiken von Verzerrungen der einzelnen Studien dargestellt (Tab.3). Geringe Risiken wurden mit einem „+“ und mit grün gekennzeichnet. Mit dem Symbol „-“ und rot markiert, sind die Daten, welche als hohes Risiko eingeschätzt wurden. War das Risiko durch fehlende Informationen jedoch unklar, wurde dieses durch ein „?“ und mit gelb markiert.

Die Begründungen für die Einschätzungen können anhand von Tabelle 4 nachvollzogen werden. Hierzu wurden Zitate aus den entsprechenden Artikeln und gegebenenfalls Kommentare zur Erklärung der Risiko-Einschätzung notiert.

Mit Hilfe des Diagramms in Abbildung 6 wird nochmals das Risiko der Verzerrungen über alle Studien hinweg dargestellt und ermöglicht so einen Überblick für die Einschätzung der jeweiligen evidenz-basierenden Bereiche.

Tabelle 4: Risiko der Verzerrungen in den einzelnen Studien (Cochrane Risk of Bias Tool)

	Generierung der Randomisierungssequenz	Selektionsbias	Geheimhaltung und Vorhersehbarkeit der Gruppenzuteilung	Selektionsbias	Verblindung von Teilnehmern und Studienpersonal	Performance-Bias	Verblindung bei Endpunkterhebung	Detektionsbias	Unvollständige Daten zu Endpunkten	Attrition-Bias	Selektives Berichten	Reporting-Bias	Andere Ursachen für Bias
<b>Basso Moro, 2014</b>	n.a.	n.a.	?	?	n.a.	+							
<b>Fujita, 2016</b>	-	+	+	?	?	+							
<b>Hinderaker, 2020</b>	-	-	-	?	?	+							
<b>Karim, 2013</b>	n.a.	n.a.	?	?	n.a.	?							
<b>Lin, 2017</b>	-	-	?	?	?	+							
<b>Marusic, 2019</b>	-	-	+	?	?	+							
<b>Rosso, 2017</b>	-	-	?	?	?	+							
<b>St George, 2021</b>	-	-	-	?	?	+							
<b>St-Amant, 2020</b>	n.a.	n.a.	?	?	n.a.	+							
<b>Takakura, 2015</b>	n.a.	n.a.	?	?	n.a.	?							
<b>Teo, 2018</b>	-	-	?	?	?	+							

+ = geringes Risiko, ? = unklares Risiko, - = hohes Risiko, n.a. = nicht anwendbar

**Tabelle 5: Begründungen für die Einschätzungen der Risk of Bias**

	Generierung der Randomisierungssequenz	Geheimhaltung und Vorhersehbarkeit der Gruppenzuteilung	Verblindung von Teilnehmern und Studienpersonal	Verblindung bei Endpunkterhebung	Unvollständige Daten zu Endpunkten	Selektives Berichten	Andere Ursachen für Bias
	<b>Selektionsbias</b>	<b>Selektionsbias</b>	<b>Performance-Bias</b>	<b>Detektionsbias</b>	<b>Attrition-Bias</b>	<b>Reporting-Bias</b>	
<b>Basso Moro et al., 2014</b>	Nur eine Gruppe	Nur eine Gruppe			Nur eine Gruppe	„There was no significant difference ( $t = 1.2, p = .24$ ) in the anxiety state before ( $31.1 \pm 4.5$ ) and after the protocol ( $29.2 \pm 5.2$ )“  → auch nicht signifikante Ergebnisse wurden berichtet	
<b>Fujita et al.,</b>	Gruppe nach WM-	Zuteilung durch	„...there is no			„There was no	

<p><b>2016</b></p>	<p>Spanne          „...individuals scoring <math>\geq 4.0</math> were placed in the high-span group, whereas those scoring <math>\leq 2.5</math> were placed in the low-span group...“</p>	<p>Test → nicht vorhersehbar:          RST: „...we used the results to divide the participants into high and lowWM-span groups...“</p>	<p>difference in difficulty among the stimuli.“</p>			<p>significant difference in the other tasks (S-S task, S-D task, and O-S task) (<math>p &lt; 0.05</math>) between the groups.“          → auch nicht signifikante Ergebnisse wurden berichtet</p>	
<p><b>Hinderaker et al., 2020</b></p>	<p>Gruppen nach Alter          „...eleven healthy younger adults (YA, 5M/6F, age <math>22 \pm 1</math>-year-old) and ten healthy older adults (OA, 4M/6F, age <math>71 \pm 5</math>-year-old) ...“</p>	<p>Gruppen nach Alter</p>	<p>„The order of the three trials (fast, medium, and slow OF) was randomly assigned in the younger adult group. The slow and medium OF trials were randomly assigned in the older adult group and the fast OF trial was</p>			<p>„There was no significant HbO difference in VEST during the slow OF speed when comparing older adults to younger adults.“          → auch nicht signifikante Ergebnisse wurden berichtet</p>	

			performed as the last trial to avoid early fatigue...“				
<b>Karim et al., 2013</b>	Nur eine Gruppe	Nur eine Gruppe			Nur eine Gruppe		
<b>Lin et al., 2017</b>	Gruppen nach Alter „Fifteen healthy middle-aged adults (MA, 5M/10F, age 46±11 years) and 15 healthy older adults (OA, 8M/7F, age 73±5 years) participated in this study.“	Gruppen nach Alter				„However, we did not observe significant changes in COP when participants transitioned to eyes open in the dark from eyes open in the light, on fixed (Trial 3) or sway-referenced (Trial 4) platform conditions.“  → auch nicht signifikante Ergebnisse wurden berichtet	
<b>Marusic et</b>	Gruppen nach Alter	Gruppen nach Alter	„...all participants			„Postural control	

<p><b>al., 2019</b></p>	<p>„... 10 healthy older adults ... were randomly selected from a pool of 152 volunteers ... 10 healthy young adults were recruited and randomly selected from the database of the study program...“</p> <p>→ vorhersehbar in welche Gruppe die Teilnehmer kommen, aber Teilnehmer innerhalb ihrer Altersgruppe randomisiert</p>	<p>→ vorhersehbar in welche Gruppe die Teilnehmer kommen, da nach Alter unterteilt</p>	<p>received a familiarization period (approximately 10 min), in which they got used to the measuring environment and equipment, as well as the postural and cognitive tasks...“</p> <p>→ alle Teilnehmer hatten die gleiche Möglichkeit der Eingewöhnung</p>			<p>Analysis showed no significant main or interaction effects for parameters of COP sway path...“</p> <p>→ auch nicht signifikante Ergebnisse wurden berichtet</p>	
<p><b>Rosso et</b></p>	<p>Gruppen nach Alter</p>	<p>Gruppen nach Alter</p>	<p>„Older adults were</p>			<p>„Activation reduction</p>	

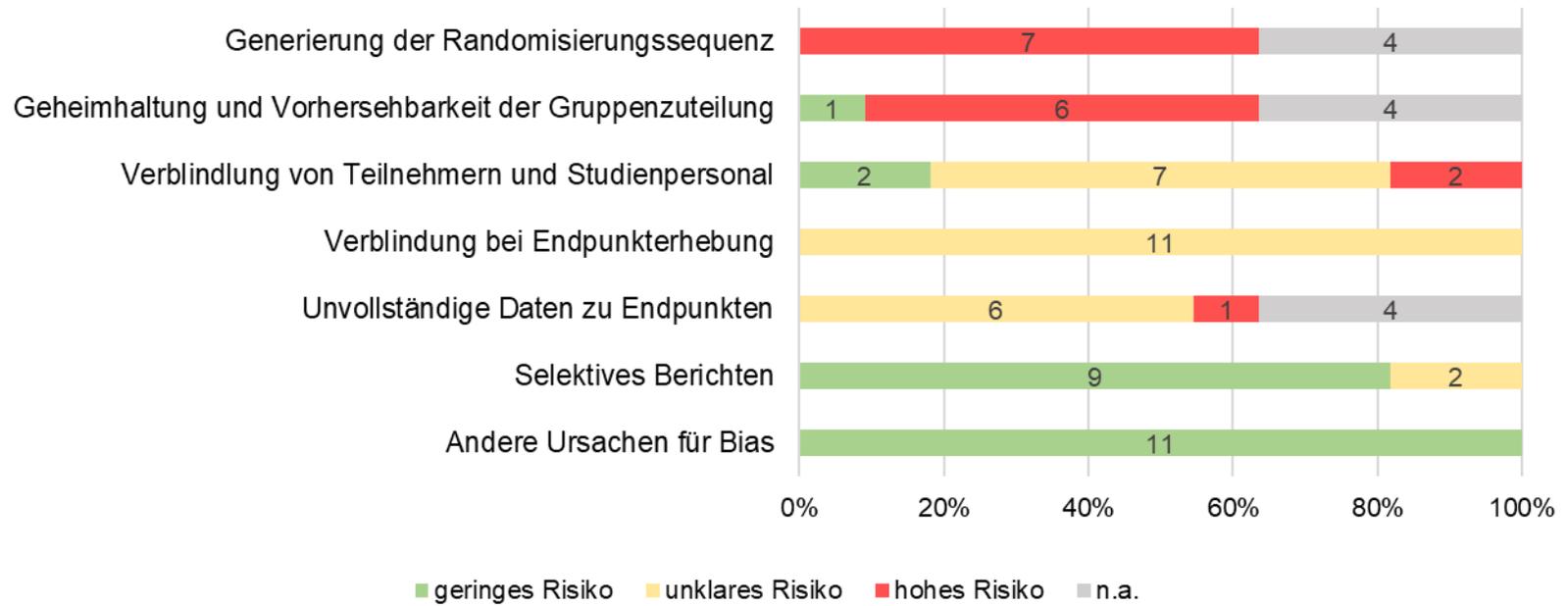
<p><b>al., 2017</b></p>	<p>„Ten older (age range 66–81; seven female) and six younger (age range 22–30; two female) adults...“</p>		<p>screened for cognitive impairment...“  „... with order randomized for each subject.“</p>			<p>was not accompanied by any significant changes in body sway during dual task...“  → auch nicht signifikante Ergebnisse wurden berichtet</p>	
<p><b>St George et al., 2021</b></p>	<p>Gruppen nach Alter  „The young group was comprised of 24 participants, aged 18–28 years...“, „The older group was comprised of 25 participants, aged 60–84 years...“</p>	<p>Gruppen nach Alter</p>	<p>„...this condition [CFT] was only performed in the young group...“</p>		<p>CFT-Bedingung von der Gruppe älterer Erwachsener nicht durchgeführt  → kein Vergleich möglich</p>	<p>„The balance condition did not impact the score and the group by balance condition interaction was also not significant ...“  → auch nicht signifikante Ergebnisse wurden berichtet</p>	
<p><b>St-Amant et al., 2020</b></p>	<p>Nur eine Gruppe</p>	<p>Nur eine Gruppe</p>			<p>Nur eine Gruppe</p>	<p>„...the cognitive tasks were not significantly</p>	

## Ergebnisse

---

						different from one another...“  → auch nicht signifikante Ergebnisse wurden berichtet	
<b>Takakura et al., 2015</b>	Nur eine Gruppe	Nur eine Gruppe			Nur eine Gruppe		
<b>Teo et al., 2018</b>	Gruppen nach Alter  „Twenty young (aged 18-25 years, 10M/10F) and 18 older (aged 66-73 years, 10M/8F) sedentary, otherwise healthy, adults were recruited.“	Gruppen nach Alter				„No significant difference was observed for condition 1 between younger and older adults...“  → auch nicht signifikante Ergebnisse wurden berichtet	

---



**Abbildung 7: Risiko der Verzerrungen über alle Studien hinweg**

## 5 Diskussion

### 5.1 Zusammenfassung der Evidenz

Ziel der Reviews war es, eine Übersicht über die Ergebnisse von Studien zu schaffen, welche das Gleichgewicht während des Einflusses auf das sensorische System betrachteten. Dabei lag der Fokus auf Studien mit fNIRS als Methode, um die Aktivierung des Gehirns während der Gleichgewichtsaufgaben auf einer Messplattform zu untersuchen. Es wurde analysiert, welche Auswirkungen unterschiedliche sensorische Bedingungen auf die Haltungsschwankungen bzw. den COP und auch auf die Gehirnaktivierung und deren Verbreitung haben.

Es ergaben sich elf Studien, welche alle Einschlusskriterien erfüllten und somit geeignet waren. Die Ergebnisse der einzelnen Studien wurden in Tabelle 4 zusammengetragen und werden im Weiteren zusammengefasst und diskutiert.

#### 5.1.1 Überblick der COP-Daten

In den Studien, welche in die Übersichtsarbeit eingeschlossen wurden, wurde mittels Kraftmessplatten oder Posturografie-Plattformen der COP gemessen. Der COP beschreibt Belastungsänderungen in anterior-posteriorer und/oder in medialer-lateraler Richtung. Er misst damit Haltungsschwankungen, welche bei den Gleichgewichtsübungen auftreten. Diese können durch verschiedene sensorische Bedingungen oder Störungen auf eines oder mehrere der sensorischen Systeme ausgelöst werden. Die Ergebnisse, welche sich in den einzelnen Studien ergaben, werden in Tabelle 4 aufgezeigt. Fünf der aufgenommenen Studien betrachteten nur die Schwankungen in anterior-posteriorer Richtung, während vier weitere Studien sowohl diese Bewegungsachse als auch die mediale-laterale untersuchten. Fujita et al. (2016) und Teo et al. (2018) gingen nicht darauf ein, in welche Richtung die Pendelwege gemessen wurden.

Zudem wurden in den Studien unterschiedliche sensorische Systeme beeinflusst. Bei Basso Moro et al. (2014) und Hinderaker et al. (2020) wurde nur das visuelle Feedback beeinträchtigt. Bei fünf weiteren Studien (Karim et al. (2013); Lin et al. (2017); St George et al. (2021); Takakura et al. (2015) und Teo et al. (2018)) wurden die Bedingungen so vorgegeben, dass entweder die propriozeptiven, die visuellen oder beide Informationen gestört worden sind. Bei den restlichen vier Studien sollte das Gleichgewicht durch

Doppelaufgaben, also die Kombination aus einer Haltungsaufgabe und einer kognitiven Aufgabe, beeinflusst werden.

Bei den beiden Untersuchungen von Marusic et al. (2019) und Rosso et al. (2017) konnten hinsichtlich des COPs keine Effekte festgestellt werden. Weder zwischen den Gruppen noch zwischen den Bedingungen.

Gruppeneffekte waren auch bei Lin et al. (2017) nicht ersichtlich. Unterschiede zwischen den Bedingungen konnten nur hinsichtlich der Störungen des propriozeptiven Systems erkannt werden. Die COP-Werte änderten sich signifikant, als die feste Plattform mit einer schwingenden Plattform ausgetauscht wurde. Dabei nahm der COP bei der bewegten Plattform im Vergleich zu der festen Plattform zu. Die bewegte Plattform führte zu vermehrten Haltungsschwankungen. Bei Änderung der visuellen Informationen, also dem Wechsel von Licht zu Dunkelheit, kam es zu keinen signifikanten Unterschieden.

Ähnliche Ergebnisse zeigte ebenfalls die Arbeit von Takakura et al. (2015). Auch hier zeigten sich nur signifikante Effekte zwischen den Bedingungen der Propriozeption. Solange die Platte fest war und nur die visuellen Informationen – durch Schließen der Augen – entfernt wurden, waren keine nennenswerten COP-Veränderungen erkennbar. Jedoch gibt es wesentliche Unterschiede von den Bedingungen SOT1-3 zu SOT4-6. Die Bewegung der Plattform wirkt sich also auf die Haltung aus und ruft Schwankungen hervor. Insbesondere SOT5 und 6 führten zu stärkeren Ausschwankungen des COP in anterior-posteriore Richtung.

Das gleiche Prinzip ist auch bei den COP-Daten der Studie von St George et al. (2021) zu erkennen. Unterschiede zwischen den Gruppen und auch zwischen den Bedingungen lagen vor. Gruppeneffekte gibt es jedoch nur bei den Bedingungen CST, CFN und CFT. Das sind die Voraussetzungen, bei welchen die Füße zusammenstehen und die, bei denen eine Schaumstoffoberfläche als Unterlage dient. Dabei wurde ersichtlich, dass der Schwankungsbereich bei der älteren Gruppe größer war als der der jüngeren Gruppe. Effekte zwischen den Gruppen sind also nur aufgetreten, wenn das propriozeptive System beeinflusst wird. Auch bezüglich der Bedingungen verändern sich die COP-Werte mit Zunahme der Herausforderung. Während der Störung des visuellen Systems, durch Augenschließen, nur zu kleinen Haltungsschwankungen führt, wirkt sich die Schaumstoffoberfläche vermehrt auf das Gleichgewicht aus. Auch das Zusammenstellen der Füße beeinflusst das Gleichgewicht negativ und es kommt zu Unsicherheiten. Die Schwankungen nahmen mit Steigerung der Herausforderungen der sensomotorischen Bedingungen zu.

Teo et al. (2018) kam ebenfalls zu dem Untersuchungsergebnis, dass bei einigen Bedingungen Unterschiede zwischen den Gruppen sowie den Bedingungen zu finden sind. Gruppeneffekte traten bei den Bedingungen COND3-6 auf. Dabei zeigte die ältere Altersgruppe eine stärkere Abnahme des Gleichgewichts im Vergleich zu den jüngeren Erwachsenen. Der Bedingungseffekt zeigte sich bei der Veränderung von COND1 zu COND2-6. Bei diesen Bedingungen zeigten beide Altersgruppen eine Abnahme des Gleichgewichtswerts und damit einhergehend vermehrte Haltungsschwankungen. Somit kam es hier zu Gleichgewichtsveränderungen durch Störungen des propriozeptiven und des visuellen Feedbacks und insbesondere durch das Stören der Informationen beider Systeme.

Die Arbeit von Karim et al. (2013) untersuchte, wie die letzten Autoren auch, das Gleichgewicht während der Beeinflussung der sensorischen Systeme. Er nutzte dazu sechs verschiedene Zustände, welche den Verlust der visuellen und/oder propriozeptiven Rückmeldung hervorrufen. Betrachtet man seine Ergebnisse, ähneln sie denen von Lin et al. (2017) und von Takakura et al. (2015). Es kommt auch hier nur bei bestimmten Bedingungsänderungen zu signifikanten COP-Schwankungen. Signifikante Unterschiede gibt es von Bedingung SOT II zu SOT V, von SOT I zu SOT IV und von SOT IV zu SOT V. Die ersten beiden Bedingungswechsel betreffen das propriozeptive System. Bei diesen Wechseln wird bei gleichbleibendem visuellem Feedback, die feste Unterlage in Schwingung gebracht und das propriozeptive Feedback ändert sich. Bei der Abwandlung des Zustands SOT IV zu SOT V handelt es sich in beiden Fällen um eine schwingende Plattform und zudem wird das visuelle Feedback beeinflusst. Ist also das Gleichgewicht bereits durch eine bewegliche Unterlage gefährdet und man entfernt zudem das Sehvermögen, kommt es ebenso zu vermehrten Haltungsschwankungen. Die größte Zunahme an Schwankungen wurde durch die Veränderung der Bedingung SOT II zu SOT IV erreicht.

Marusic et al. (2019) und Rosso et al. (2017) konnten keine signifikanten Effekte durch ihre Studien mit Doppelaufgaben hinsichtlich der COP-Daten feststellen. Auch Fujita et al. (2016) und St-Amant et al. (2020) verwendeten Dual-Task-Bedingungen, um das Gleichgewicht zu beeinflussen. Anders als die beiden erstgenannten Studien kam es hier teils zu signifikanten Ergebnissen. Fujita et al. (2016) konnte einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen festhalten. Dieser war bei der Dual-Task-Bedingung mit Einbeinstand zu sehen. Die Pendellänge der Low-Span-Gruppe war dabei signifikant länger als die der High-Span-Gruppe. Die genannte Bedingung zeigt somit mehr Schwankungen bei der Low-Span-Gruppe. Bei St-Amant et al. (2020) kam es zu COP-Änderungen in medial-lateraler Richtung während der Doppelaufgaben. Die Doppelaufgaben zeigten eine Abnahme, also weniger Variabilität, im Vergleich zu dem ruhigen Stand auf der Kraftmessplatte.

Bisher wurden COP-Änderungen hauptsächlich durch Störungen der propriozeptiven Informationen gemessen. Hinderaker et al. (2020) konzentrierte sich jedoch auf das visuelle System. Bei mittlerer OF-Geschwindigkeit konnte bezüglich des COP-Werts ein Gruppenunterschied zwischen den beiden Altersgruppen analysiert werden. Die Schwankungen sind bei der Altersgruppe der älteren Erwachsenen signifikant höher als die der jüngeren Gruppe.

Bei Betrachtung aller zusammengetragener Artikel wurden drei mögliche Beeinflussungen des Gleichgewichts ersichtlich. Teils wurden Doppelaufgaben gegeben. In den anderen Fällen würde das visuelle und/oder propriozeptive Feedback durch Änderungen der Bedingungen gestört. Dabei wurde zur Störung des visuellen Systems meist die Bedingung „Augen offen“ zu „Augen geschlossen“ geändert oder aber die Bedingung wechselte von „Augen offen bei Licht“ zu „Augen offen bei Dunkelheit“. Dies verschlechterte das Sehvermögen ebenfalls. Die Propriozeption wurde meist dadurch beeinflusst, dass eine feste Plattform mit einer beweglichen Plattform ausgetauscht wurde.

Bei den Doppelaufgaben kam es nur in wenigen Fällen zu signifikanten Effekten, während Rosso et al. (2017) und Marusic et al. (2019) keine Effekte feststellen konnten. Dies deutet darauf hin, dass diese Beeinflussung und zunehmende Herausforderung nicht durch den COP ausgeglichen werden müssen. Die zusätzliche kortikale Aufgabe macht sich gegebenenfalls durch eine vermehrte neuronale Aktivierung bemerkbar, jedoch nicht durch auffällige Haltungsschwankungen während der Gleichgewichtsaufgabe.

Des Weiteren wurden die visuellen und propriozeptiven Systeme beeinflusst. Hier kam es hinsichtlich der Bedingungen, welche das Sehvermögen betroffen haben, seltener zu Unterschieden. Lediglich Hinderaker et al. (2020) konnte einen Gruppeneffekt feststellen. Bei den restlichen Studien kam es zu keinen signifikanten Unterschieden der COP-Werte, wenn nur die visuellen Informationen verschlechtert oder entfernt wurden. Erst in Kombination mit Änderungen des propriozeptiven Feedbacks wurden Effekte ersichtlich. Zu großen Unterschieden zwischen den Bedingungen und teilweise auch zwischen den Altersgruppen, kam es erst, sobald die Propriozeption in den unterschiedlichen Aufgabenzuständen eine Rolle spielte. Diese Änderungen wurden durch schwingende Plattformen oder Schaumstoffoberflächen provoziert. Weggenommene propriozeptive Informationen verändern den COP zunehmend. Das deutet darauf hin, dass dieses nun fehlende Feedback durch Haltungsschwankungen und damit vorhandene Belastungsänderungen ausgeglichen werden muss. Das entfernte visuelle Feedback wird hingegen weniger durch Pendelbewegungen kompensiert. Hierfür müssen andere Prozesse zur Verfügung stehen bzw. ausreichen, so dass das Gleichgewicht trotz allem aufrechterhalten werden kann.

---

### 5.1.2 Überblick der fNIRS-Daten

Neben dem COP wurden in allen Studien auch die Gehirnaktivität mittels fNIRS gemessen. Genauer gesagt wurden die Konzentrationsänderungen des Hämoglobins im Gehirn untersucht. Es können Änderungen des Sauerstoffverbrauchs in den bestimmten Arealen erfasst werden und Rückschlüsse auf die Aktivität während der Gleichgewichtsaufgaben gezogen werden. Betrachtet wurden in allen Studien das Oxyhämoglobin (Oxy-Hb), welches das sauerstoffreiche Hämoglobin bezeichnet und das Desoxyhämoglobin (Desoxy-Hb), das Hämoglobin, welches frei von Sauerstoff ist. In manchen Fällen wurde zudem das Gesamthämoglobin bei den Messungen mitberücksichtigt und analysiert. Bei den Messungen wurden in den verschiedenen eingeschlossenen Studien unterschiedliche Gehirnregionen fokussiert.

Acht der elf in das Review aufgenommenen Studien betrachteten bei der Messung die Region PFC bzw. DLPFC. Der präfrontale Kortex befindet sich im Frontallappen, welcher wiederum für die motorischen Aufgaben, also das Planen und Ausführen willentlicher Bewegungen, zuständig ist. Vielmehr werden dem PFC aber die exekutiven Funktionen und das Arbeitsgedächtnis zugeschrieben. Zu den exekutiven Funktionen zählen die Planung von Handlungen, deren Steuerung und das Lösen von Problemen durch Erfahrungen.

Basso Moro et al. (2014) beschreibt in dieser Gehirnregion des Frontallappens einen signifikanten Anstieg des Oxyhämoglobins während der Ausführung der Gleichgewichtsaufgaben. Dieser Oxy-Hb-Anstieg ist dabei dreifach so hoch wie die festgestellte Desoxyhämoglobin-Reduktion. Zudem fiel auf, dass das Oxy-Hb mit steigender Schwierigkeit vermehrt zunahm. Diese stärker werdende Aktivität im PFC-Bereich, im Zusammenhang mit zunehmend anspruchsvoller werdender Aufgaben, stellte auch St George et al. (2021) fest. Zumindest bis zu einem bestimmten Zeitpunkt, bei dem die Zunahme in ein Plateau übergeht. Des Weiteren kam die Studie zu dem Ergebnis, dass die gemessene Region, im Vergleich zu der jüngeren Probandengruppe, bei den älteren Probanden stärker aktiviert ist.

Entgegen diesem Ergebnis, dass es während der Gleichgewichtsaufgaben zu einem Gruppeneffekt bezüglich der Gehirnaktivität kommt, stellte Fujita et al. (2016) keine Unterschiede hinsichtlich der unterschiedlichen Altersgruppen fest. Er findet lediglich einen Aktivitätsunterschied zwischen den Bedingungen in der Region DLPFC, aber nur auf der rechten Seite. Auch die Studie von St-Amant et al. (2020) untersuchte die Region des dorsolateralen präfrontalen Kortex und kam zu dem Resultat, dass die rechte Seite aktiver ist

als die linke Hemisphäre. Auch Marusic et al. (2019) kann nur eine Aktivitätssteigerung von Baseline zu Tandemstand während der Doppelaufgabe feststellen.

Ein weiterer Artikel, welcher den Fokus auf den Bereich des DLPFC gelegt hatte, war der von Hinderaker et al. (2020). Die ältere Altersgruppe zeigt hier eine signifikante Aktivitätssteigerung mit Zunahme der Schwierigkeiten. Somit sind die Oxy-Hb-Werte während der mittleren und schnellen OF-Geschwindigkeit signifikant höher.

Auch Teo et al. (2018) legte sein Hauptaugenmerk auf dieselbe Region und kam dabei zu dem Untersuchungsergebnis, dass die Oxy-Hb-Werte ab der Bedingung COND2 bei den älteren Probanden signifikant höhere Aktivitäten erzielen als bei den Jüngeren. Auch die Desoxy-Hb-Werte nahmen ab COND3 bzw. COND4 entsprechend ab. Je höher der Anspruch, desto deutlicher werden die Alterseffekte.

Rosso et al. (2017) berichtet ebenfalls von einer Zunahme der Gehirnaktivität während der Gleichgewichtsübung in der DLPFC-Region.

Allgemein lässt sich zu den Ergebnissen der Studien und der fokussierten Region PFC/DLPFC zusammenfassen, dass in den meisten Untersuchungen eine Aktivitätszunahme zu erkennen war. Jedoch oftmals erst durch herausfordernde Bedingungen. Gerade bei den anspruchsvolleren Zuständen ist die Aktivierung bei den älteren Probanden stärker als die der jüngeren Gruppen. Die Artikel von Fujita et al. (2016) und St-Amant et al. (2020) lassen zudem den Entschluss zu, dass die Herausforderung in Form einer Doppelaufgabe zu einer etwas stärkeren Aktivierung der rechten Gehirnseite führt.

In den Studien von Takakura et al. (2015) und von Fujita et al. (2016) wurde zudem die Region SMA fokussiert. Auch der supplementär-motorische Kortex befindet sich im Frontallappen und ist an der Entwicklung des Bewegungsplanes beteiligt. Fujita et al. (2016) konnte dabei Unterschiede zwischen den Gruppen (bei den Bedingungen O-S und O-D) sowie zwischen den Bedingungen S-S und O-D zeigen. Die Gehirnaktivität war in der High-Span-Gruppe während der Einbeinstand-Bedingungen signifikant höher als in der Vergleichsgruppe. Zudem war in der High-Span-Gruppe die Gehirnaktivität während der O-D-Bedingung ersichtlich stärker als während der S-S-Bedingung.

Eine weitere fokussierte Gehirnregion in einigen Arbeiten, war der temporal-parietaler Bereich. Genauer die Regionen STG und SMG. Dabei liegt der STG im Temporallappen. Dem Temporallappen sind viele Funktionen zugeordnet. Dazu gehören Aufgaben, welche das Riechen, Hören, Sprechen, Verstehen, das visuelle Erkennen und die

---

Gedächtnisbildung betreffen. Der Gyrus temporalis superior (STG) ist zuständig für die Sprachverarbeitung und -entwicklung sowie für die auditive Wahrnehmung. Der SMG befindet sich am Übergang dreier Gehirnlappen, dem Temporallappen, dem Okzipitallappen und dem Parietallappen – welchem er letztendlich zugeschrieben wird. Der Parietallappen nimmt bei der Integration sensorischer Informationen eine wichtige Rolle ein. Das könnte der Grund dafür sein, weshalb er als interessante Gehirnregion untersucht wurde.

Auf diesen temporal-parietalen Bereich konzentrierte sich insbesondere die Arbeit von Karim et al. (2013). Die Untersuchungen kamen zu dem Ergebnis, dass bei den Gleichgewichtsaufgaben, bei welchen sowohl die visuellen als auch die propriozeptiven Informationen beeinträchtigt werden, eine signifikante Oxy-Hb-Zunahme und eine Desoxy-Hb-Reduktionen erfolgen. Stört man hingegen nur eines der beiden sensorischen Systeme, findet die Hämoglobin-Reaktion ebenfalls statt, aber die fällt schwächer aus.

Takakura et al. (2015) betrachtete zehn verschiedene Regionen. Im Bereich der STG kam die Untersuchung, ebenso wie den Bereichen p-Op und f-Op, zu dem Entschluss, dass die Aktivierung mit steigendem Anspruch zunahm.

Auch die beiden Studien von Lin et al. (2017) und von Rosso et al. (2017) untersuchten die Gehirnaktivität im temporal-parietalen Bereich bzw. im Temporalkortex. Beide Artikel konnten eine Zunahme der Aktivität bzw. der Oxyhämoglobinwerte messen. Auch war wieder eine stärkere Aktivierung der entsprechenden Hirnregion bei den älteren Probanden zu erkennen Lin et al. (2017).

Die Arbeit von Lin et al. (2017) betrachtete dabei ebenso den okzipitalen Bereich. Der Okzipitallappen ist Teil des visuellen Systems und wird als Sehzentrum des Gehirns bezeichnet. In diesem Bereich werden die visuellen Impulse verarbeitet. So erklären sich auch die Ergebnisse von Lin et al. (2017). Bei den älteren Probanden stiegen die Oxy-Hb-Werte an und die Aktivierung erweiterte sich in den Okzipitallappen. In der Gruppe der jüngeren Erwachsenen kommt es in dieser Region kaum zu Aktivierungen. Die Ausnahme jedoch zeigt sich, wenn die visuellen Informationen entfernt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich in nahezu allen Bereichen Reaktionen des Hämoglobins aufzeigen. Die Stärke der Aktivierung ist dabei abhängig, wie herausfordernd die jeweiligen Gleichgewichtsaufgaben bzw. deren unterschiedlichen Bedingungen sind. Auch sind die gemessenen Regionen bei den älteren Probanden meist aktiver als die der jüngeren Vergleichsprobanden.

### 5.1.3 Zusammenhang von COP- und fNIRS-Daten

In den einzelnen Studien wurden sowohl COP-Veränderungen als auch Konzentrationsänderungen des Hämoglobins im Gehirn der Probanden festgestellt. Im Folgenden wird darauf eingegangen, inwiefern die gegebenen Haltungsschwankungen und die Gehirnaktivitäten zusammenhängen bzw. in Verbindung stehen.

Betrachtet man die Studie von Lin et al. (2017), ist zu erkennen, dass die Oxyhämoglobin-Werte in allen vier Versuchen und somit unter allen Bedingungen zunahmen. Mit der Ausnahme, dass es bei den jüngeren kaum Aktivitäten im Okzipital-Bereich gab. Zudem gab es auch Konzentrationsunterschiede des Hämoglobins in den Altersgruppen. Die älteren Probanden zeigten stärkere Aktivierungen in allen Regionen. Die COP-Werte zeigten jedoch keine Gruppeneffekte und auch bezüglich der Bedingungen kam es nur teils zu signifikanten Veränderungen. COP-Verschiebungen traten nur bei Störung der propriozeptiven Informationen aus. Dies könnte darauf hinweisen, dass die Beeinflussung des visuellen Systems alleinig durch die Aktivierung des Gehirns ausgeglichen werden kann, während das propriozeptive System zudem durch Belastungsänderungen kompensiert werden muss. Auch die Verluste des Alterns können durch eine erhöhte und weiter verbreitete Hirnaktivität kompensiert werden.

Auch in dem Artikel von Rosso et al. (2017) zeigen die älteren Studienteilnehmer unter der CSN-Bedingung eine stärkere Aktivierung. Jedoch verändert sich auch hier der COP nicht wesentlich. Auch hier kann die Störung des visuellen Systems – durch Schließen der Augen – durch die Gehirnaktivität ausgeglichen werden.

Bei Takakura et al. (2015) konnten sowohl Effekte bezüglich der COP- als auch der fNIRS-Daten erfasst werden. Jedoch wurden die Veränderungen signifikanter, je herausfordernd die Gleichgewichtsaufgaben wurden. Die stärksten Haltungsschwankungen und auch Hirnaktivitäten wurden also erzielt, wenn das propriozeptive System durch eine bewegte Plattform gestört wurde, oder aber beide sensorischen Systeme – propriozeptives und visuelles System – beeinflusst wurden. Dieses Muster zeigt sich auch in der Arbeit von Teo et al. (2018). Mit Zunahme des Anspruchs der Bedingungen nehmen auch die COP-Veränderungen in beiden Altersgruppen zu. Die Steigerung ist dabei bei der älteren Gruppe vergleichsweise noch stärker. Ähnlich bei Betrachtung der Daten aus den fNIRS-Messungen. Die Konzentrationsänderungen ändern sich mit den unterschiedlichen Bedingungen während der Aufgabe. Bewegt sind die Oberfläche der Standfläche wird das Gehirn stärker aktiviert. Wird zudem das visuelle Feedback durch das Schließen der Augen weggenommen und es gehen die Informationen zweier Systeme verloren, nimmt die Aktivierung weiter zu.

---

Insbesondere aus diesen Studien könnte man die Folgerung ziehen, dass die fehlenden visuellen Informationen leichter zu bewältigen und zu kompensieren sind als Störungen des propriozeptiven Systems. Beeinflussungen des propriozeptiven Systems führen in nahezu allen Studien zu signifikant stärkeren Aktivierungen im Gehirn – besonders bei den älteren Probanden. Auch die COP-Schwankungen werden vermehrt durch fehlendes propriozeptives Feedback hervorgerufen. Werden mehrere Systeme gleichzeitig gestört, werden die Höchstwerte bezüglich der Gehirnaktivität sowie der Haltungsschwankungen erzielt. Diese erfolgen, um die Störung auszugleichen und das Gleichgewicht bestmöglich zu erhalten.

Teo et al. (2018) untersuchte zudem die Beziehung zwischen der Hämoglobin-Veränderungen und der Gleichgewichtsleistung. Dabei zeigt sich ein ähnliches Ergebnis wie bereits bei den Studien von Lin et al. (2018) und Rosso et al. (2017). Eine Zunahme der Gehirnaktivität geht mit einer besseren Gleichgewichtsleistung einher. Es folgen weniger Haltungsschwankungen. Werden die Bedingungen während der Gleichgewichtsaufgaben komplexer, erfolgt ein Anstieg der Gehirnaktivität. Diese kann die Herausforderungen bewältigen, ohne dass das Gleichgewicht hinsichtlich des COPs beeinflusst wird. Dies geschieht der Studie von Teo et al. (2018) zufolge aber erst, wenn eine bestimmte Schwierigkeitsstufe erreicht wird. Erst dann konnte dieser Zusammenhang zwischen der Hämoglobin-Veränderung und der Haltungsschwankungen festgestellt werden. Zuvor standen sie in keiner Beziehung zueinander.

## 5.2 Einschränkungen

Die Übersicht weist Einschränkungen bezüglich folgender Faktoren auf:

Besonders hinsichtlich des Selektionsbias, den evidenz-basierenden Bereichen „Generierung der Randomisierungssequenz“ und „Geheimhaltung und Vorhersehbarkeit der Gruppenzuteilung“, liegt ein relativ hohes Risiko von Verzerrungen vor. Grund hierfür ist die Gruppeneinteilung nach Alter, welche vorhersehbar und keineswegs randomisiert abläuft. Des Weiteren sind auch die Risiken bezüglich der Bereiche „Verblindung von Teilnehmern und Studienpersonal“, „Verblindung bei Endpunkterhebung“ sowie „Unvollständige Daten zu Endpunkten“ größtenteils unklar und könnten daher für Verzerrungen der Ergebnisse sorgen und in die Irre führen.

Eine weitere Einschränkung ist die Literatur, welche in der Übersicht enthalten ist. Die Literaturrecherche wurde am 05.07.2021 durchgeführt und enthält somit nur Artikel, welche bis zu diesem Datum in einer der vier auserwählten Datenbanken (Cochrane Library, PsycInfo,

PubMed und Scopus) veröffentlicht wurden. Zudem wurde die Suche auf die Jahreszahl 2005 begrenzt. Es wurden somit auch keine Studien eingeschlossen, welche vor diesem Jahr veröffentlicht wurden. Die Auswahl der Suchbegriffe und weitere festgelegte Einschränkungen während der Suche, kann zum Ausschluss von Studien geführt haben.

Diese Übersichtsarbeit begrenzt sich zudem auf die Untersuchung des COP und der Gehirnaktivität mittels fNIRS. Jedoch sind zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts durchaus noch andere Prozesse, wie beispielsweise die Muskelaktivität, von Bedeutung. Diese wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt, könnten aber weitere Einblicke in das Thema liefern.

### 5.3 Schlussfolgerungen

Im Nachfolgenden werden die Forschungsfragen nochmals im Einzelnen beantwortet:

1. *Wird das Gleichgewicht hinsichtlich des COP durch unterschiedliche sensorische Bedingungen bzw. Störungen des visuellen, vestibulären und / oder propriozeptiven Systems bei gesunden Probanden negativ beeinflusst?*

Schlussfolgernd kann man sagen, dass sich der COP durch unterschiedliche Bedingungen unterschiedlich stark beeinflussen lässt. Je nachdem welches der sensorischen Systeme beeinflusst wird, werden anders starke Haltungsschwankungen hervorgerufen. Jedoch wird der COP durch die Beeinflussung des sensorischen Systems, in Form einer Reduktion von sensorischen Informationen, negativ beeinflusst.

2. *Geht die Störung des visuellen, vestibulären und / oder propriozeptiven Systems bei gesunden Probanden mit einer erhöhten Hirnaktivität einher?*

Ähnliche Ergebnisse lassen die Daten der fNIRS-Messungen zu. Auch hier wird die Aktivität im Gehirn durch die verschiedenen Bedingungen entsprechend geändert. Die Aktivierung erfolgt unterschiedlich weit verbreitet und unterschiedlich stark. Die Störungen der sensorischen Systeme führen aber zu einer Steigerung der Gehirnaktivität.

3. *Wirken sich die Störungen der jeweiligen sensorischen Systeme unterschiedlich auf das Gleichgewicht aus?*

Auffällig war, dass die Entfernung des visuellen Feedbacks anscheinend besser bewältigt werden konnte als die Störungen des propriozeptiven Systems. Diese Beeinflussungen führten meist zu stärkeren Haltungsschwankungen und mussten infolgedessen durch eine

---

erhöhte Gehirnaktivierung kompensiert werden. Eine bewegte Plattform brachte den Probanden daher eher aus dem Gleichgewicht als beispielsweise das Schließen der Augen.

#### *4. Gehen die COP-Daten und die fNIRS-Daten miteinander einher?*

Der Zusammenhang zwischen den Hämoglobin-Veränderungen und der Haltungsschwankungen ist ab einem bestimmten Schwierigkeitsgrad zuerkennen. Das bedeutet, die Zunahme der Gehirnaktivität geht mit einer besseren Gleichgewichtsleistung und somit weniger Haltungsschwankungen einher. Komplexere Bedingungen führen zu einem Anstieg der Gehirnaktivität, ohne dabei den COP zu beeinflussen. Dieser Zusammenhang ist jedoch erst ab einer bestimmten Schwierigkeitsstufe erkennbar. Zuvor haben die beiden Daten keine Beziehung zueinander (Teo et al., 2018).

## **5.4 Ausblick**

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass es zu dieser Thematik bisher nur wenige Studien gibt und daher weitere Studien notwendig sind. Die Gehirnaktivität während statischer und dynamischer Gleichgewichtsaufgaben sollte in Zukunft weiter erforscht werden, um noch bessere und deutlichere Erkenntnisse zu erhalten.

Neben dem COP und der Hämoglobin-Konzentration mittels fNIRS könnte zudem die Muskelaktivität betrachtet werden. Diese könnte bei der Gleichgewichtshaltung eine entscheidende Rolle spielen, da Muskelkontraktionen ebenso Schwankungen ausgleichen können.

Die Ergebnisse der Studien und das dadurch gewonnene Wissen kann Anwendbarkeit in verschiedenen Bereichen finden. Möglicherweise sogar in der Therapie von Patienten mit neurodegenerativen Erkrankungen, wie beispielsweise Alzheimer oder Parkinson.

## 6 Zusammenfassung

Der Mensch hat die Möglichkeit sein Gleichgewicht zu kontrollieren und dieses somit aufrechtzuhalten oder wiederherstellen zu können. Dies erfordert jedoch komplexe Prozesse. Dabei werden verschiedene sensorische Informationen verarbeitet und integriert. Werden diese beeinflusst, kann es zu Störungen des Gleichgewichts führen. Dies spielt insbesondere im Alter eine entscheidende Rolle, da mit der Alterung Verluste und Veränderungen der sensorischen Systeme einhergehen und es zu Störungen des Feedbacks kommen kann. Diese müssen kompensiert werden, um Stürzen entgegenzuwirken.

Bei der Haltungskontrolle spielen verschiedene Regionen im Gehirn eine wesentliche Rolle. Um die aktivierten Gehirnregionen zu lokalisieren und deren Aktivität messen zu können, kann die Methode des fNIRS (funktionelle Nahinfrarotspektroskopie) angewandt werden. Dieses Verfahren wird genutzt, um die Konzentrationsveränderungen des Hämoglobins zu messen.

Ziel der Übersichtsarbeit ist es, die Ergebnisse bereits durchgeführter Studien auszuwerten, welche die Hirnaktivität während Gleichgewichtsaufgaben mit unterschiedlichen sensorischen Bedingungen auf Messplattformen mittels fNIRS bei gesunden Probanden untersucht haben.

Dazu wurden durch einen festgelegten Suchterm Studien in vier auserwählten Datenbanken (Cochrane Library, PsycINFO, PubMed und Scopus) identifiziert und auf Eignung überprüft. Dabei wurde darauf geachtet, dass im Rahmen der Studien nur gesunde Probanden untersucht wurden. Als Intervention wurden Gleichgewichtsaufgaben auf einer Messplattform durchgeführt, während das sensorische System beeinflusst wurde. Zudem wurden nur Studien eingeschlossen, bei welchen das Gleichgewicht mittels COP auf Messplattformen und die Hirnaktivität mittels fNIRS gemessen wurde.

Im Rahmen der Arbeit wurden somit elf Studien überprüft und bewertet.

Alle eingeschlossenen Studien fokussierten die Variablen Oxy-Hb und Deoxy-Hb zur Darstellung der Konzentrationsänderung im Gehirn, sowie den COP zur Veranschaulichung der Haltungsschwankungen während der Gleichgewichtsaufgaben.

Die Ergebnisse der einzelnen Studien werden im Verlauf der Arbeit detailliert aufgezeigt.

Zusammenfassend wurde gezeigt, dass Doppelaufgaben und die Beeinflussung des Sehvermögens, den COP kaum beeinflusst haben. In Kombination mit der Störung der Propriozeption wurden jedoch signifikante Effekte ersichtlich. Eine schwingende Plattform oder eine Schaumstoffoberfläche provozierten vermehrt Haltungsschwankungen während der Aufgaben.

Bezüglich der Hirnaktivität konnten in nahezu allen untersuchten Hirnregionen Reaktionen festgestellt werden. Die Stärke der Gehirnaktivierung und auch deren Ausbreitung war von der Herausforderung der Aufgabe bzw. deren Bedingungen abhängig. Je schwieriger die Bedingungen wurden, desto stärker wurde zumeist die Aktivierung. Bei älteren Probanden war die Aktivierung meist stärker als bei den jüngeren Erwachsenen.

Untersucht man die Beziehung der Hirnaktivität und der Haltungsschwankungen, wird ersichtlich, dass eine Zunahme der Gehirnaktivität mit einer besseren Gleichgewichtsleistung einhergeht. Werden die Bedingungen komplexer, erfolgt ein Anstieg der Gehirnaktivität. Dies wird aber erst ab Erreichen einer bestimmten Schwierigkeitsstufe ersichtlich. Zuvor konnte kein Zusammenhang zwischen der Hämoglobin-Veränderung und den Haltungsschwankungen festgestellt werden.

Die Übersichtarbeit weist Einschränkungen bezüglich einiger evidenz-basierender Bereiche auf, bei welchen ein hohes Risiko von Verzerrungen vorliegt. Zudem wurde die Literaturrecherche durch einige Einschränkungen begrenzt und könnte daher relevante Studien zum Thema ausgeschlossen haben.

Schlussfolgernd kann man sagen, dass die unterschiedlichen Bedingungen den COP unterschiedlich stark beeinflusst haben. Eine bewegte Plattform brachte den Probanden eher aus dem Gleichgewicht als beispielsweise das Schließen der Augen. Der COP wurde durch die Reduktion von sensorischen Informationen jedoch negativ beeinflusst. Auch die Aktivität im Gehirn nahm durch die verschiedenen Bedingungen zu. Die Aktivierung erfolgt unterschiedlich weit verbreitet und unterschiedlich stark.

Da zur Thematik bislang nur wenige Studien durchgeführt wurden, sollte in Zukunft weitere Forschung betrieben werden, um klarere Erkenntnisse und ein besseres Gesamtverständnis erhalten zu können.

## Literaturverzeichnis

- Al-Shargie, F. (2019). *Quantification of Mental Stress using fNIRS Signals*.  
<https://doi.org/10.31224/OSF.IO/UM762>
- Basso Moro, S., Bisconti, S., Muthalib, M., Spezialetti, M., Cutini, S., Ferrari, M., Placidi, G., Quaresima, V., Moro, S. B., Bisconti, S., Muthalib, M., Spezialetti, M., Cutini, S., Ferrari, M., Placidi, G., & Quaresima, V. (2014). A semi-immersive virtual reality incremental swing balance task activates prefrontal cortex: A functional near-infrared spectroscopy study. *NeuroImage*, 85(Part 1), 451–460.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.031>
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2018). Die Struktur des Nervensystems. *Neurowissenschaften*, 191–274. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-57263-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57263-4_7)
- Checkliste zum Bericht einer systematischen Übersicht oder einer Meta-Analyse*. (n.d.).
- Feigenspan, A. (2017). Neuronale Kontrolle der Bewegung. *Prinzipien Der Physiologie*, 495–539. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-54117-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54117-3_12)
- Freiberger, E., & Becker, C. (2006). Stürze im Alter: Prävalenz und Risikofaktoren. *B&G Bewegungstherapie Und Gesundheitssport*, 22(03), 93–97. <https://doi.org/10.1055/S-2006-933492>
- Fujita, H., Kasubuchi, K., Wakata, S., Hiyamizu, M., & Morioka, S. (2016). Role of the Frontal Cortex in Standing Postural Sway Tasks while Dual-Tasking: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Study Examining Working Memory Capacity. *BioMed Research International*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/7053867>
- Gebel, A., Lehmann, T., & Granacher, U. (2020). Balance task difficulty affects postural sway and cortical activity in healthy adolescents. *Experimental Brain Research*, 238(5), 1323–1333. <https://doi.org/10.1007/s00221-020-05810-1>
- Ghosn, N. J., Palmer, J. A., Borich, M. R., Ting, L. H., & Payne, A. M. (2020). Cortical beta oscillatory activity evoked during reactive balance recovery scales with perturbation difficulty and individual balance ability. *Brain Sciences*, 10(11), 1–18. <https://doi.org/10.3390/brainsci10110860>
- Herold, F., Orłowski, K., Börmel, S., & Müller, N. G. (2017). Cortical activation during balancing on a balance board. *Human Movement Science*, 51, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.11.002>
- Heß, T. (2019). *Plantare Druckverteilungsmessung in der Bewegungswissenschaft*.
- Hinderaker, M., Sylcott, B., Williams, K., & Lin, C.-C. C.-C. (2020). Aging Affects the Ability to Process the Optic Flow Stimulations: A Functional Near-Infrared Spectrometry Study. *Journal of Motor Behavior*, 52(4), 466–473.
-

- <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1645639>
- Illert, M. & K.-B. J. P. (2006). Kapitel 5 · Motorisches System. *Neuro- Und Sinnesphysiologie*, 125–130.
- Izzetoglu, M., Nioka, S., Chance, B., Onaral, B., & Society, I. S. P. (2005). Single trial hemodynamic response estimation in a block anagram solution study using fNIR spectroscopy. *2005 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP '05*, V, V633–V636. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2005.1416383>
- Karim, H., Schmidt, B., Dart, D., Beluk, N., & Huppert, T. (2012). Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) of brain function during active balancing using a video game system. *Gait and Posture*, 35(3), 367–372. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.10.007>
- Karim, Helmet, Fuhrman, S. I., Sparto, P., Furman, J., & Huppert, T. (2013). Functional brain imaging of multi-sensory vestibular processing during computerized dynamic posturography using near-infrared spectroscopy. *NeuroImage*, 74, 318–325. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.02.010>
- Lin, C.-C., Barker, J. W., Sparto, P. J., Furman, J. M., & Huppert, T. J. (2017). Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) brain imaging of multi-sensory integration during computerized dynamic posturography in middle-aged and older adults. *Experimental Brain Research*, 235(4), 1247–1256. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-4893-8>
- Lin, Chia-Cheng, Barker, J. W., Sparto, P. J., Furman, J. M., & Huppert, T. J. (2018). “Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) brain imaging of multi-sensory integration during computerized dynamic posturography in middle-aged and older adults”: Correction. *Experimental Brain Research*, 236(4), 1225–1228. <https://doi.org/10.1007/s00221-018-5177-7>
- Marusic, U., Taube, W., Morrison, S. A., Biasutti, L., Grassi, B., De Pauw, K., Meeusen, R., Pisot, R., & Ruffieux, J. (2019). Aging effects on prefrontal cortex oxygenation in a posture-cognition dual-task: an fNIRS pilot study. *European Review of Aging and Physical Activity*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s11556-018-0209-7>
- Naseer, N., & Hong, K.-S. (2015a). fNIRS-based brain-computer interfaces: a review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 0(JAN), 3. <https://doi.org/10.3389/FNHUM.2015.00003>
- Naseer, N., & Hong, K.-S. K.-S. (2015b). fNIRS-based brain-computer interfaces: A review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9(JAN). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00003>
- Nikolaus, T. (2005). Gang, Gleichgewicht und Stürze - Ursachen und Konsequenzen. *DMW - Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 130(15), 958–960. <https://doi.org/10.1055/S-2005-866769>
-

- Ohlendorf, D., Parey, K., Kemper, S., Natrup, J., & Kopp, S. (2008). Können experimentell herbeigeführte Veränderungen der Okklusion das menschliche Gleichgewicht beeinflussen? *Manuelle Medizin* 2008 46:6, 46(6), 412–417. <https://doi.org/10.1007/S00337-008-0650-1>
- Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J., & Paul, J. P. (2016). What is balance?: <Http://Dx.Doi.Org/10.1191/0269215500cr342oa>, 14(4), 402–406. <https://doi.org/10.1191/0269215500CR342OA>
- Rosso, A. L., Cenciarini, M., Sparto, P. J., Loughlin, P. J., Furman, J. M., & Huppert, T. J. (2017). Neuroimaging of an attention demanding dual-task during dynamic postural control. *Gait and Posture*, 57, 193–198. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.06.013>
- Sathe, A., Shenoy, S., & Sathe, P. K. (2021). Evaluation of cerebral cortex activation during balance tasks using fNIRS: A systematic review. *Trends in Sport Sciences*, 28(2), 93–107. <https://doi.org/10.23829/TSS.2021.28.2-3>
- Schmucker, C., Nothacker, M., Möhler, R., Kopp, I., & Meerpohl, J. (2017). Bewertung des Verzerrungsrisikos von systematischen Übersichtsarbeiten: ein Manual für die Leitlinienerstellung. *Cochrane Deutschland, Arbeitsgemeinschaft Der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften - Institut Für Medizinisches Wissensmanagement.*, 1, 1–35. <https://doi.org/10.6094/UNIFR/12657>.
- Scholkmann, F., Kleiser, S., Metz, A. J., Zimmermann, R., Mata Pavia, J., Wolf, U., & Wolf, M. (2014). A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology. *NeuroImage*, 85, 6–27. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.004>
- Scholkmann, Felix, Kleiser, S., Metz, A. J., Zimmermann, R., Mata Pavia, J., Wolf, U., & Wolf, M. (2014). A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology. *NeuroImage*, 85, 6–27. <https://doi.org/10.1016/J.NEUROIMAGE.2013.05.004>
- Seidel-Marzi, O., Hähner, S., Ragert, P., & Carius, D. (2021). Task-Related Hemodynamic Response Alterations During Slacklining: An fNIRS Study in Advanced Slackliners. *Frontiers in Neuroergonomics*, 0, 4. <https://doi.org/10.3389/FNRGO.2021.644490>
- St-Amant, G., Rahman, T., Polskaia, N., Fraser, S., & Lajoie, Y. (2020). Unveiling the cerebral and sensory contributions to automatic postural control during dual-task standing. *Human Movement Science*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2020.102587>
- St George, R. J., Hinder, M. R., Puri, R., Walker, E., & Callisaya, M. L. (2021). Functional Near-infrared Spectroscopy Reveals the Compensatory Potential of Pre-frontal Cortical Activity for Standing Balance in Young and Older Adults. *Neuroscience*, 452, 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.10.027>
-

- Takakura, H., Nishijo, H., Ishikawa, A., & Shojaku, H. (2015). Cerebral Hemodynamic Responses During Dynamic Posturography: Analysis with a Multichannel Near-Infrared Spectroscopy System. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9(NOVEMBER). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00620>
- Teo, W.-P., Goodwill, A. M., Hendy, A. M., Muthalib, M., & Macpherson, H. (2018). Sensory manipulation results in increased dorsolateral prefrontal cortex activation during static postural balance in sedentary older adults: An fNIRS study. *Brain and Behavior*, 8(10). <https://doi.org/10.1002/brb3.1109>
- Wang, B., Zhang, M., Bu, L., Xu, L., Wang, W., & Li, Z. (2016). Posture-related changes in brain functional connectivity as assessed by wavelet phase coherence of NIRS signals in elderly subjects. *Behavioural Brain Research*, 312, 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2016.06.037>
- Witte, K. (2018). Physiologische Grundlagen. *Grundlagen Der Sportmotorik Im Bachelorstudium (Band 1)*, 19–57. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-57868-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57868-1_2)
- Wittenberg, E., Thompson, J., Nam, C. S., & Franz, J. R. (2017). Neuroimaging of human balance control: A systematic review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00170>
- Wolff, W. (2017). Funktionelle Nahinfrarotspektroskopie in der sportpsychologischen Forschung. *Https://Doi.Org/10.1026/1612-5010/A000184*, 24(1), 17–28. <https://doi.org/10.1026/1612-5010/A000184>

## **Anhangsverzeichnis**

Anhang A: Selbstständigkeitserklärung



Studentenservice – Zentrales Prüfungsamt  
Selbstständigkeitserklärung

Name: <b>Geyer</b>	<b>Bitte beachten:</b>
Vorname: <b>Tina</b>	1. Bitte binden Sie dieses Blatt am Ende Ihrer Arbeit ein.
geb. am: <b>31.08.1996</b>	
Matr.-Nr.: <b>438829</b>	

Selbstständigkeitserklärung\*

Ich erkläre gegenüber der Technischen Universität Chemnitz, dass ich die vorliegende **Masterarbeit** selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Die vorliegende Arbeit ist frei von Plagiaten. Alle Ausführungen, die wörtlich oder inhaltlich aus anderen Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keinem anderen Prüfer als Prüfungsleistung eingereicht und ist auch noch nicht veröffentlicht.

Datum: **15.12.2021**

Unterschrift:  .....

---

\* Statement of Authorship

I hereby certify to the Technische Universität Chemnitz that this thesis is all my own work and uses no external material other than that acknowledged in the text.

This work contains no plagiarism and all sentences or passages directly quoted from other people's work or including content derived from such work have been specifically credited to the authors and sources.

This paper has neither been submitted in the same or a similar form to any other examiner nor for the award of any other degree, nor has it previously been published.