

**Aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
der Universität zu Lübeck
Direktor: Prof. Dr. A. Paech
und dem
BG Klinikum Hamburg
Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. K-H Frosch**

**Untersuchung der Eye-Tracking und Virtual-Reality-
Technik mittels VR-Brille in der Diagnostik leichter
Schädel-Hirn-Traumata**

Inauguraldissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
der Universität zu Lübeck
- Aus der Sektion Medizin -

vorgelegt von
Felix Wolfgang Sikorski
aus Achim

Lübeck 2026

1. Berichterstatter/Berichterstatterin:
Prof. Dr. med. Arndt-Peter Schulz

Ko-Betreuer*in:
Prof. Dr. med. Justus Gille

2. Berichterstatter/Berichterstatterin:
PD Dr. med. Dirk Rasche

Tag der mündlichen Prüfung: 25.02.2026

Zum Druck genehmigt. Lübeck, den 03.03.2026
-Promotionskommission der Sektion Medizin-

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	vii
1. EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Fragestellung und Ziel der Arbeit	4
2. MATERIAL UND METHODE	5
2.1 Studiendesign	5
2.2 Ein- und Ausschlusskriterien	6
2.2.1 Einschlusskriterien	6
2.2.2 Ausschlusskriterien	6
2.3 Indextest / Diagnostische Indikatoren	7
2.4 Untersuchungen	8
2.4.1 Biflicker horizontal und vertikal, Hopping, Hopping 3D	9
2.4.2 Sinus (Smooth Pursuit)	9
2.4.3 Divergenz	9
2.4.4 Velo horizontal und Velo vertikal	9
2.4.5 Antisakkaden, Anti Biflicker horizontal und vertikal	10
2.4.6 Würfel	10
2.4.7 Blitzlicht	10

2.4.8 Velo horizontal und Velo vertikal	11
2.4.9 Übersicht der Erfassten Parameter	11
2.5 Referenztest / Synoptische Diagnose	17
2.6 Neurologische Untersuchung	17
2.7 Auswertungsmethoden	20
2.7.1 Auswertungsvariablen	21
2.7.2 Software	21
2.7.3 Statistische Methoden	22
2.7.4 Ethikantrag und Genehmigung	23
2.7.5 Studienzentren	23
2.7.6 Studienverlauf & Patient*innenfluss	23
3. ERGEBNISSE	26
3.1 Stichprobenbeschreibung	26
3.1.1 Altersverteilung	26
3.1.2 Geschlechtsverteilung	26
3.1.3 Schulabschluss und Berufsstand	27
3.2 Anamnese	29
3.3 Unfallhergang	32
3.4 SCAT-3	35
3.4 Neurologischer Befund	37
3.5 Erhebung der Praktikabilität	42
3.6 Explorative Analyse der diagnostischen Testgenauigkeit der mittels ET/VR-Brille erfassten Parameter zu Diagnose eines leichten SHT	45

3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse	51
4. DISKUSSION	53
5. LIMITATIONEN	57
6. ZUSAMMENFASSUNG	59
7. LITERATURVERZEICHNIS	61
8. ANHANG	67
9. DANKSAGUNG	68
10. LEBENSLAUF	70

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AUCs	Area Under the Curves
BG	Berufsgenossenschaft
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CT	Computertomographie
d.h.	Das heisst
DGUV	Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
et al.	und andere
ET/VR	Eyetracking- und Virtual-Reality-Technologie
GCS	Glasgow-Coma-Scale
i.d.R.	in der Regel
MRT	Magnetresonanztomographie
ms	Millisekunde
mTBI	mild traumatic brain injury (leichtes Schädelhirntrauma)
ROCs	Receiver Operating Curves
s.	siehe
SCAT-3	Sport Concussion Assessment Tool, 3rd Edition
sog.	sogenannt
u.a.	unter anderem
VR	Virtual Reality
z.B.	zum Beispiel
°	Grad
°/s	Grad pro Sekunde

#/s	Anzahl pro Sekunde
z.T.	zum Teil
SHT	Schädelhirntrauma
SD	Standartabweichung
ADS/ADHS	Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eyetrax VR-Brille

Abbildung 2: Darstellung der Messung unter entsprechender Stimulation

Abbildung 3: Flussdiagramm Ein- und Ausschluss

Abbildung 4: Altersverteilung

Abbildung 5: Geschlechterverteilung

Abbildung 6: Schlafbedürfnis

Abbildung 7: Lokalisationen

Abbildung 8: Amnesie und Bewusstlosigkeit

Abbildung 9: Symptomverschlechterung nach körperlicher /geistiger Anstrengung

Abbildung 10: Testung des Gleichgewichts

Abbildung 11: ROC-Kurve des Parameters Velo Horizontal Anzahl Lidschlüsse links/rechts zur Diagnose eines SHT

Abbildung 12: ROC-Kurve des Parameters Velo Horizontal Blinzelrate [#s] links/rechts zur Diagnose eines SHT

Abbildung 13: Boxplot des Parameters Velo Horizontal Anzahl Lidschlüsse links/rechts

Abbildung 14: Boxplot des Parameters Velo Horizontal Blinzelrate [#s] links/rechts

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Demographie der Stichprobe I: Kategoriale Variablen
- Tabelle 2: Anamnestische Variablen I
- Tabelle 3: Anamnestische Variablen II
- Tabelle 4: Anamnestische Variablen III
- Tabelle 5: Unfallhergang I
- Tabelle 6: Unfallhergang II
- Tabelle 7: Parameter des SCAT-3 I
- Tabelle 8: Parameter des SCAT-3 II
- Tabelle 9: Neurologischer Befund I
- Tabelle 10: Neurologischer Befund II
- Tabelle 11: Praktikabilität I
- Tabelle 12: Praktikabilität II
- Tabelle 13: AUCs inklusive Standardfehler, p-Werten und Grenzen des 95% Konfidenzintervalls der mittels ET/VR- Brille erfassten Parameter
- Tabelle 14: Deskriptive Kennwerte der Parameter Velo Horizontal Anzahl Lidschlüsse links/rechts und Velo Horizontal Blinzelrate [#s] links/rechts

1. Einleitung und Fragestellung

1.1 Einleitung

Das leichte Schädel-Hirn-Trauma (mTBI) ist eine der häufigsten neurologischen Erkrankungen mit einer geschätzten jährlichen Inzidenz von 200-300/100.000 [23]. Es ist die führende Entität unter allen Schädel-Hirn-Verletzungen, schätzungsweise 90 % aller Kopftraumata sind mTBIs [35]. Die Hauptursache sind Stürze (42 %), gefolgt von Verkehrsunfällen (26 %) und Unfällen am Arbeitsplatz oder in der Schule (15 %) [35]. Nach einem Unfall erfolgt die Diagnose und Behandlung einer mTBI größtenteils in einer Notaufnahme [30].

Die Diagnose einer mTBI allein auf der Grundlage klinischer Kriterien ist mit erheblichen Schwierigkeiten und Problemen verbunden. Studien haben gezeigt, dass bis zu 50 % der Patient*innen, die eine mTBI erlitten haben, eine ungenaue Erstdiagnose erhielten [33,36].

Gedächtnislücken aufgrund einer akuten Schock- und Stressreaktion oder aufgrund anderer Verletzungen, z. B. Blutdruckabfall, werden nicht selten als Ausdruck einer akuten Schädel-Hirn-Trauma fehlinterpretiert. Die klinischen Symptome einer mTBI sind vielfältig und komplex und können somatische Symptome (Kopfschmerzen, Benommenheit, Schwindel und Übelkeit), kognitive Beeinträchtigungen (Aufmerksamkeits-, Gedächtnis- und Exekutivstörungen) und emotionale Veränderungen (psychophysische Unterforderung, erhöhte emotionale Reaktivität, Reizbarkeit, Stressintoleranz, Angst, depressive Stimmung und Schlafstörungen in unterschiedlicher Kombination und Ausprägung) umfassen [1].

Die diagnostische Einstufung hat wichtige therapeutische Konsequenzen (stationäre Aufnahme und Überwachung, bildgebende Untersuchung mittels Computertomographie (CT) und / oder Magnetresonanztomographie (MRT)), sowie einen großen Einfluss auf prognostische Aussagen hinsichtlich der Wiederaufnahme der Arbeit oder der Rückkehr zum Spiel / Wettkampf bei Sportlern [32].

Neueste Forschungen zeigen, dass diese Kopfverletzungen, die derzeit als "leicht" bezeichnet werden, erhebliche mittelfristige Folgen wie das chronische posttraumatische Syndrom [28] und langfristige Risiken wie neuronale Zellveränderungen [2,18] chronische traumatische Enzephalopathie [29] sowie psychosoziale Komplikationen wie posttraumatische Belastungsstörung und erhöhte Suizidalität haben [12,42,45]. Infolgedessen steigt die Inanspruchnahme des Gesundheitswesens, was mit einer größeren Belastung der Notaufnahmen einhergeht, die in den letzten Jahren bereits einen Anstieg der Zahl der Patient*innen, die wegen eines Kopftraumas behandelt werden müssen, zu verzeichnen hatten und bereits stark ausgelastet sind [13,25].

Es besteht ein großer Bedarf an objektiven Methoden zur Erkennung traumatischer Hirnverletzungen oder der Diagnose von mTBI in der Notaufnahme, um die bestmögliche Behandlung zu gewährleisten und die Belastung des Gesundheitssystems zu verringern.

In den letzten Jahren wurden nach traumatischen Hirnverletzungen okulomotorische Störungen festgestellt [3,6,7,8,20,22,44,47]. Etwa die Hälfte aller neuronalen Bahnen im menschlichen Gehirn, einschließlich kortikaler, subkortikaler, zerebellärer und Hirnstamm-Strukturen, sind am visuellen System beteiligt [5,38]. Folglich ist davon auszugehen, dass diffuse und unspezifische traumatische Hirnverletzungen das visuelle neuronale Netzwerk beeinträchtigen. Okulomotorische Funktionen scheinen besonders empfindlich auf traumatische Verletzungen zu reagieren, und ihre Defizite können häufig nach einer mTBI dokumentiert werden [8].

Abnormale Befunde bei neuro-ophthalmologischen Untersuchungen finden sich typischerweise bei der Prüfung von Sakkaden und Antisakkaden, dem okulären Smooth Pursuit, der Vergenz, der Akkommodation, dem vestibulo-okularen Reflex und der Photosensibilität. In den ersten 10 Tagen nach einem leichten Schädel-Hirn-Trauma wurden Beeinträchtigungen der Sakkadenabwehr, verlängerte Sakkadenlatenz, Richtungsfehler, beeinträchtigte räumliche Genauigkeit und Einschränkungen bei gedächtnisgesteuerten Sakkaden nachgewiesen [15,16,19]. Betroffene mit einem posttraumatischen (Postkontusions-)Syndrom zeigten nach 3 bis 5 Monaten im Vergleich zu symptomfreien Kontrollpatient*innen weiterhin

Einschränkungen bei der Sakkadenprüfung. Patient*innen mit akuter mTBI zeigten längere Sakkadenreaktionszeiten, wenn eine kurze zeitliche Lücke zwischen zentral und peripher präsentierten Zielen bestand, nicht aber, wenn die zeitliche Lücke länger war. Dies deutet auf Schwierigkeiten bei der Abwendung der Aufmerksamkeit hin [17]. Ein Rückgang der Beschwerden geht häufig mit einer Normalisierung der Sakkadenfunktion einher. Andere Autoren fanden anhaltende Einschränkungen der Sakkadenfunktion über mehrere Wochen nach einer mTBI [29].

In mehreren Studien wurden Video-Okulographie-Techniken und -Geräte eingesetzt, um die Diagnose einer mTBI durch visuelle Verfolgung zu unterstützen. Die Video-Okulographie zeigte bei Patient*innen mit posttraumatischen (postkontusionellen) Syndromen signifikante Beeinträchtigungen der visuellen Verfolgung [9]. Diese korrelierten sowohl mit bildgebenden (MRT) nachweisbaren Veränderungen der weißen Substanz des Gehirns in der Corona radiata und des Corpus callosum in diffusionsgewichteten Bildern als auch mit Beeinträchtigungen der Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses in neurokognitiven Testuntersuchungen [37].

Die Ergebnisse der bisherigen Studien sind vielversprechend, lassen aber aufgrund fehlender einheitlicher Testprotokolle und kleiner Fallzahlen in unterschiedlichen Patient*innenpopulationen keine allgemeinen Empfehlungen zu [21].

Unser Ziel war es, Patient*innen in der Notaufnahme zu untersuchen und damit möglicherweise eine Lücke in der Diagnose zu schließen, indem wir eine frühzeitige Point-of-Care-Diagnose von mTBI mithilfe einer Virtual Reality-Brille mit integrierter Eye Tracking-Technologie ermöglichen. Bisher war es aufgrund des erheblichen Aufwands nicht möglich, eine mTBI in der Notaufnahme zu diagnostizieren. Transportable Geräte erweitern die Anwendung der VR-Technologie zur Messung von neuropsychologischen Funktionsdefiziten und Beeinträchtigungen des Gleichgewichts und der Haltungsstabilität nach mTBI [12,41,49]. Der Einsatz von tragbaren Geräten in der Notaufnahme könnte eine Diagnose in einem bisher unzugänglichen Bereich ermöglichen. Eine standardisierte Erfassung okulomotorischer Störungen könnte eine Schlüsselrolle bei der Diagnose von mTBI spielen [47].

1.2 Fragestellung und Ziel der Arbeit

Ziel der Studie war es festzustellen, ob der Einsatz von Virtual Reality-Brillen mit integrierter Eye-Tracking-Technologie (ET/VR) zur frühzeitigen Diagnose von leichten Schädel-Hirn-Traumata (mTBI) in der Notaufnahme, eingesetzt werden kann.

Primäre Zielgruppe waren Personen, die ein akutes Schädel-Hirn-Trauma erlitten hatten und innerhalb von 24 Stunden in der Notaufnahme vorstellig wurden. Ziel war es, okulomotorische Biomarker auf ihre Eignung für die Diagnose einer mTBI in einer konsekutiven Kohorte von Patient*innen, die einer äußeren Krafteinwirkung ausgesetzt waren, zu untersuchen und die Praktikabilität der Untersuchung mit ET/VR-Brillen in einer Notaufnahme zu testen.

Es wurde die Effektivität überprüft, ob der Einsatz von Virtual Reality-Brillen mit integrierter Eye-Tracking-Technologie zur frühzeitigen Diagnose von leichten Schädel-Hirn-Traumata (mTBI) in der Notaufnahme, eingesetzt werden kann. Insbesondere wurde hier der Fokus auf die Detektion okulomotorischer Störungen gelegt. Es sollte gezeigt werden, dass so eine Reduzierung diagnostischer Unsicherheiten im komplexen Prozess der Notaufnahme ermöglicht werden könnte.

Das Forschungsvorhaben wurde unter Fördernummer FF-FR 0299 von der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) gefördert. Nach Projektabschluss wurde ein Forschungsbericht erstellt, welcher von mir als Hauptautor verfasst und vom Fördermittelgeber veröffentlicht wurde [39]. Der Bericht enthält Teile dieser Dissertationsschrift in Kurzform.

2. Material und Methode

2.1 Studiendesign

An dieser explorativen prospektiven einarmigen Langzeitstudie beteiligten sich das BG Klinikum Unfallkrankenhaus Berlin und das BG Klinikum Hamburg. In den Rettungsstellen, D-Arzt-Ambulanzen oder Spezialsprechstunden (z.B. für Vereins- und Leistungssportler) der o.g. BG-Kliniken wurden konsekutiv Patient*innen mit einem traumatischen Ereignis, welches geeignet ist, ein leichtes Schädel-Hirn-Trauma hervorzurufen eingeschlossen und mittels ET/VR-Brille (Indextest) untersucht. Der Zeitraum zwischen Trauma und Vorstellung in der Notaufnahme durfte nicht größer als 24 Stunden sein.

Nach Prüfung der Eingangskriterien wurden Patient*Innen über die Studie informiert, die Einverständniserklärung eingeholt, Basisprofilaten elektronisch erhoben und die Untersuchung mittels ET/VR-Brille vorgenommen. Studienspezifisch wurde bei allen Patient*innen der SCAT3 erhoben.

Als Grundlage für die Diagnosestellung eines mTBI wurde die Definition des Amerikanischen Kongresses für Rehabilitationsmedizin verwendet [39], der eine*n Patient*in mit mTBI als eine Person definiert, die eine traumatisch bedingte physiologische Störung der Hirnfunktion erlitten hat, die sich durch mindestens eine der folgenden Eigenschaften manifestiert:

1. Jegliche Periode des Bewusstseinsverlustes
2. Gedächtnisverlust für Ereignisse unmittelbar vor oder nach dem Unfall
3. Veränderungen des mentalen Zustands zum Zeitpunkt des Unfalls und
4. Fokale neurologische Ausfälle, die vorübergehend oder nicht vorübergehend sein können, bei denen die Schwere der Verletzung jedoch folgende Werte nicht übersteigt: Bewusstseinsverlust von etwa 30 Minuten oder weniger; nach 30 Minuten eine anfängliche GCS von 13-15 und eine posttraumatische Amnesie von nicht mehr als 24 Stunden.

Alle weiteren Schritte entsprachen der klinischen Routine (u.a. Entscheidung über stationäre Aufnahme, bildgebende Diagnostik etc.) Die jeweils zu Index- bzw. Referenztest gehörenden Untersuchungen wurden von gegenüber den Ergebnissen der jeweils anderen Testung verblindeten Untersucher*Innen durchgeführt.

2.2 Ein- und Ausschlusskriterien

2.2.1 Einschlusskriterien

- Männer und Frauen im Alter von 18 bis 65 Jahren
- Vorstellung in der teilnehmenden BG-Klinik innerhalb von 24 h nach dem Unfall (Primärversorgung oder sekundäre Zuverlegung aus einer anderen Klinik)
- Geeignetes Unfallereignis zur Hervorrufung eines leichten Schädel-Hirn-Traumas (z. B. direkter Kopfanprall)

2.2.2 Ausschlusskriterien

- Strabismus
- Schädigung der Hirnnerven III (N. oculomotorius), IV (N. trochlearis) und VI (N. abducens)
- Alkoholkonsum (bei Verdacht erfolgt Kontrolle mittels Atemalkoholbestimmung)
- Einnahme sedierender Medikamente (nach Befragung)

Chirurgische Begleitverletzungen stellten kein Ausschlusskriterium dar. Art und Schwere der Verletzungen wurden aber erfasst und dokumentiert. Vorher eingenommene Medikamente wurden ebenfalls mit Namen und Dosis dokumentiert.

2.3 Indextest / Diagnostische Indikatoren

Für die Erfassung, Analyse und Untersuchung der Okulomotorik wurden eyeTrax VR-Brillen verwendet. Die Eye-Tracking-Kameras wurden in eine Virtual-Reality-Brille integriert. In Abbildung 1 ist dargestellt, wie die VR-Brille bei einer Patient*in angelegt ist und die Untersuchung stattfindet. Technische Details sind im Anhang 1 aufgeführt.



Abb. 1: Eyetrax VR-Brille

Die Augenmotorik wurde mit Hilfe einer 3D-Simulation getestet, die visuelle Stimuli auslöst. Die Eye-Tracking-Kameras zeichnen Augenbewegungen und Pupillenreaktionen beim Verfolgen und Suchen von sich bewegenden Objekten sowie von Lichtreizen auf, indem sie Computer-Vision-Algorithmen zur Erkennung und Verfolgung der Pupille im Videobild verwenden. Aufgrund der Leistungsfähigkeit des verwendeten Eye-Trackings können schnelle, nicht bewusst steuerbare Augenbewegungen, wie z.B. Sakkaden für beide Augen analysiert werden. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Darstellung der Messung unter entsprechender Stimulation.

Dies objektiviert die Funktionsanalyse und macht sie weitgehend unabhängig von der Motivation der Patient*innen. Spezifisch relevante Augenbewegungen können

durch den Einsatz von Virtual Reality (VR) gezielt und reproduzierbar ausgelöst werden. So können die gesammelten Ergebnisse interindividuell unter verschiedenen Bedingungen (z.B. Boxer vor und nach mehreren Kopftreffern) oder im Vergleich (Kumulation diverser Messungen an verschiedenen Patient*innen) verglichen werden. Das System ermöglicht kurze Tests sowie die Abschirmung von Außenreizen und Immersion, was externe Störungen deutlich reduziert.

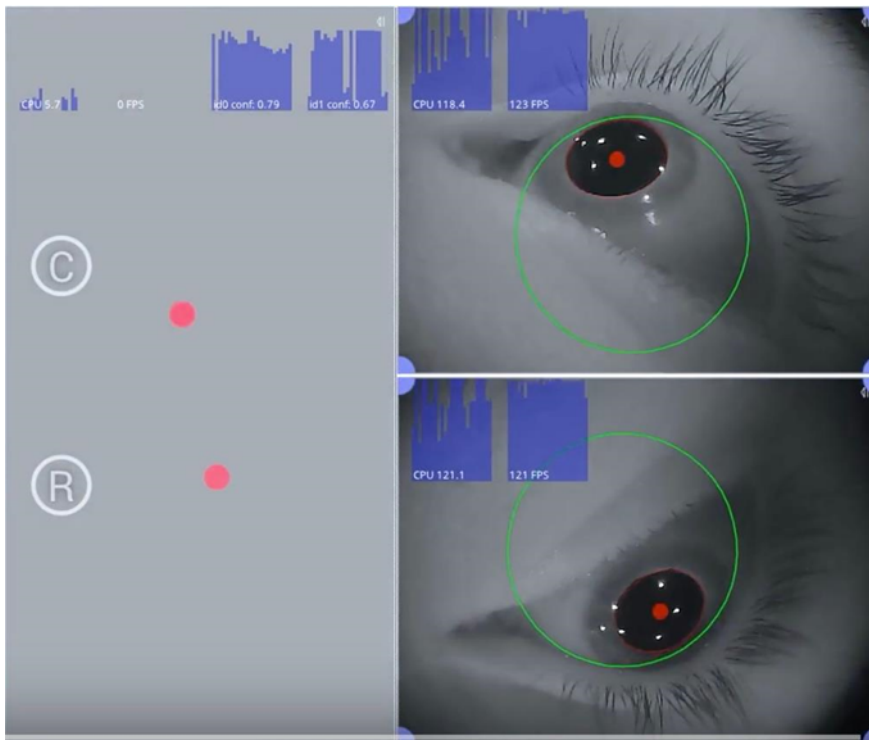


Abb. 2: Darstellung der Messung unter entsprechender Stimulation

Insgesamt wurden 64 Parameter erhoben, die detaillierten Beschreibungen sind unter Punkt 2.4.9 aufgeführt.

2.4 Untersuchungen

Für die Erfassung und Analyse der okkulomotorischen Funktion wurden EyeTrax VR-Brillen (EyeTrax, Dual AMOLED 3,6", eyeTrax GmbH & Co. KG, Osnabrück, Deutschland) verwendet. Technische Details finden sich in Anhang 1.

Die Patient*innen wurden gebeten, aufrecht auf einem Stuhl zu sitzen. Nach einer kurzen Einweisung in die Untersuchung wurde die VR-Brille von den Patient*innen

aufgesetzt. Der Untersucher kontrollierte den Sitz der Brille und vergewisserte sich, dass diese korrekt aufgesetzt war.

Es wurde ein standardisiertes Protokoll abgespielt, das die folgenden Augenbewegungen überprüfte:

2.4.1 Biflicker horizontal und vertikal, Hopping, Hopping 3D

Es wurde eine kurze Instruktion gezeigt, in die Patient*in aufgefordert wurde, sich auf einen orangefarbenen Ball zu konzentrieren. Nach der Einführung wurde ein orangefarbener Ball in verschiedenen Bereichen des Gesichtsfeldes gezeigt, zuerst auf einer statischen horizontalen Linie und dann auf einer statischen vertikalen Linie. Drittens erschien der Ball an verschiedenen Stellen (immer noch in einer 2D-Umgebung) im Gesichtsfeld, danach erschien der Ball in verschiedenen Bereichen des Gesichtsfeldes in 3 Dimensionen. Die Gesamtzeit betrug 49 Sekunden.

Messungen: sakkadische Amplitude, Dauer, Geschwindigkeit und Beschleunigung.

2.4.2 Sinus (Smooth Pursuit)

Der orangefarbene Ball bewegte sich in drei verschiedenen Arten von Sinuswellen. Gesamtzeit: 15 Sekunden.

Messungen: Sakkadenamplitude, Dauer des intersakkadischen Intervalls und Geschwindigkeit.

2.4.3 Divergenz

Der orangefarbene Ball bewegte sich vom linken Gesichtsfeld in die Mitte, wobei er sich vergrößerte und weiter nach rechts bewegte und sich dabei verkleinerte. Die Bewegung wurde dreimal wiederholt. Gesamtzeit: 11 Sekunden.

Messungen: Sakkadenamplitude, Dauer, Geschwindigkeit und Beschleunigung.

2.4.4 Velo horizontal und Velo vertikal

Es wurde eine kurze Anweisung gezeigt, die die Patient*in aufforderte, die Augen so schnell wie möglich von den beiden im Video gezeigten orangefarbenen Kugeln wegzubewegen, erst horizontal, dann vertikal. Danach wurde eine kurze Demonstration gezeigt, wie die Übung durchzuführen ist. Zwei Bälle wurden im

Gesichtsfeld angezeigt, der erste horizontal, der zweite vertikal. Gesamtzeit: 22 Sek. (jeweils 11 Sek.).

Messungen: Sakkadenamplitude, Dauer, Geschwindigkeit und Beschleunigung.

2.4.5 Antisakkaden, Anti Biflicker horizontal und vertikal

Es wurde eine kurze Instruktion gezeigt, in der die Patient*in aufgefordert wurde, sich zunächst auf den orangefarbenen Ball zu konzentrieren. Im zweiten Schritt wurde die Patient*in angewiesen, die Augen von dem erscheinenden blauen Ball wegzubewegen. Die Einführung wurde dreimal gezeigt, um sicherzustellen, dass die Patient*in das Protokoll verstanden hat. Danach wurde ein zentraler orangefarbener Ball gezeigt und vier graue Bälle (oben, unten, links und rechts vom orangefarbenen Ball). Danach verschwand die orangefarbene Kugel und zufällig erschien eine der grauen Kugeln blau. Danach wurde der zentrale orangefarbene Ball gezeigt. Dieser Vorgang wurde 7-mal wiederholt. Danach verschwanden alle Kugeln und die Kugeln erschienen zufällig in den zuvor gezeigten Bereichen. Dies wurde 8-mal wiederholt. Gesamtzeit: 51 Sekunden.

Messungen: Sakkadische Amplitude, Dauer, Geschwindigkeitsbeschleunigung, Treffer und Fehlschüsse.

2.4.6 Würfel

Eine kurze Anweisung wurde gezeigt, die Patient*in wurde angewiesen, die höchste Zahl auf den dann zu sehenden Würfeln zu suchen und sie nach der Übung zu nennen. 5 Würfel erschienen in der 3D-Umgebung, drehten sich zufällig durch den Raum, auf jeder Seite der Würfel standen verschiedene Zahlen von 0-100. Gesamtzeit: 25 Sekunden.

Messungen: Anpassung der Iris, Geschwindigkeit, sakkadische Amplitude

2.4.7 Blitzlicht

Es wurde eine Information gezeigt, die der Patient*in mitteilte, dass vier aufeinanderfolgende Blitze erscheinen werden. Gesamtzeit: 16 Sekunden.

Messungen: Anpassung der Iris, Geschwindigkeit

2.4.8 Velo horizontal und Velo vertikal

Die Patient*innen wurde angewiesen, sich auf den orangefarbenen Ball in der Mitte des Gesichtsfeldes zu konzentrieren und den Kopf auf und ab zu bewegen, wobei der Ball dauerhaft im Auge behalten werden sollte. Dauer: 10 Sekunden. Danach wurde der Patient*in eine kurze Anweisung gezeigt, sich auf den orangefarbenen Ball in der Mitte seines Gesichtsfeldes zu konzentrieren und seinen Kopf nach links und rechts zu bewegen, wobei der Ball weiter fokussiert werden sollte. Gesamtzeit: 11 Sekunden

Messungen: sakkadische Amplitude, Dauer, Geschwindigkeitsbeschleunigung
Danach wurde die Patient*in über das Ende der Untersuchung informiert und aufgefordert, die VR-Brille abzunehmen. Nach Abschluss der Studie erhielten die Patient*innen einen Fragebogen zur Praktikabilität der VR-Brille.

2.4.9 Übersicht der Erfassten Parameter

Im Folgenden ist eine kurze Auflistung und Beschreibung der im Detail erfassten Parameter:

Biflicker Hauptsakkadenamplitude [°] rechts / Biflicker Gain der Hauptsakkade [%] rechts

Erfasst die Amplitude der Hauptsakkaden in Grad und den Gain der Hauptsakkade in Prozent für das rechte Auge bei Biflicker-Messungen.

Biflicker Vertikal V_max der Hauptsakkade [°/s] links

Erfasst die maximale Geschwindigkeit der Hauptsakkade in Grad pro Sekunde für das linke Auge bei vertikalen Bewegungen.

Biflicker Dauer der Hauptsakkade [ms] links

Misst die Dauer der Hauptsakkade in Millisekunden für das linke Auge bei Biflicker-Messungen.

Biflicker Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°] rechts

Erfasst die Richtung der Hauptsakkade in Bezug auf die X-Achse im Uhrzeigersinn in Grad für das rechte Auge.

Biflicker Vertikal Trigger-Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°]

Erfasst die Trigger-Richtung in Bezug auf die X-Achse im Uhrzeigersinn in Grad für vertikale Bewegungen.

Biflicker V_max der Hauptsakkade [°/s] links

Misst die maximale Geschwindigkeit der Hauptsakkade in Grad pro Sekunde für das linke Auge bei Biflicker-Messungen.

Biflicker Vertikal Blinzelrate [#s] links/rechts

Erfasst die Blinzelrate pro Sekunde bei vertikalen Augenbewegungen für das linke und rechte Auge.

Biflicker Vertikal Anzahl Lidschlüsse links/rechts

Erfasst die Anzahl der Lidschlussbewegungen bei vertikalen Augenbewegungen für das linke und rechte Auge.

Biflicker Vertikal Anzahl Sakkaden links/rechts

Zählt die Anzahl der Sakkaden bei vertikalen Bewegungen für das linke und rechte Auge.

Biflicker Dauer der Wiederholung [ms]

Misst die Dauer der Wiederholung der Biflicker-Messungen in Millisekunden.

Biflicker Vertikal Dauer der Wiederholung [ms]

Misst die Dauer der Wiederholung der vertikalen Augenbewegungen bei Biflicker-Messungen in Millisekunden.

Biflicker Hauptsakkadenamplitude [°] links / Biflicker Gain der Hauptsakkade [%] links

Erfasst die Amplitude der Hauptsakkaden in Grad und den Gain der Hauptsakkade in Prozent für das linke Auge bei Biflicker-Messungen.

Biflicker Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°] links

Erfasst die Richtung der Hauptsakkade in Bezug auf die X-Achse im Uhrzeigersinn in Grad für das linke Auge.

Biflicker Anzahl Sakkaden links

Zählt die Anzahl der Sakkaden bei Biflicker-Messungen für das linke Auge.

Biflicker Vertikal V_max der Hauptsakkade [°/s] rechts

Misst die maximale Geschwindigkeit der Hauptsakkade in Grad pro Sekunde für das rechte Auge bei vertikalen Bewegungen.

Biflicker Vertikal Dauer der Hauptsakkade [ms] links/rechts

Misst die Dauer der Hauptsakkade in Millisekunden für das linke und rechte Auge bei vertikalen Bewegungen.

Biflicker Vertikal Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°] rechts

Erfasst die Richtung der Hauptsakkade in Bezug auf die X-Achse im Uhrzeigersinn in Grad für das rechte Auge.

Biflicker Latenz Hauptsakkade zum Trigger [ms] links

Misst die Latenzzeit der Hauptsakkade bis zum Trigger in Millisekunden für das linke Auge.

Biflicker Vertikal Gain der Hauptsakkade [%] rechts

Erfasst den Gain der Hauptsakkade in Prozent für das rechte Auge bei vertikalen Bewegungen.

Biflicker Vertikal Gain der Hauptsakkade [%] links

Erfasst den Gain der Hauptsakkade in Prozent für das linke Auge bei vertikalen Bewegungen.

Biflicker Vertikal Hauptsakkadenamplitude [°] links

Erfasst die Amplitude der Hauptsakkaden in Grad für das linke Auge bei vertikalen Bewegungen.

Biflicker Vertikal Hauptsakkadenamplitude [°] rechts

Erfasst die Amplitude der Hauptsakkaden in Grad für das rechte Auge bei vertikalen Bewegungen.

Biflicker Vertikal Latenz Hauptsakkade zum Trigger [ms] links/rechts

Misst die Latenzzeit der Hauptsakkade bis zum Trigger in Millisekunden für das linke und rechte Auge.

Biflicker Richtungsfehler Prosakkade [%] rechts

Erfasst den Richtungsfehler bei Prosakkaden in Prozent für das rechte Auge.

Biflicker Vertikal Richtungsfehler Prosakkade [%] links

Erfasst den Richtungsfehler bei Prosakkaden in Prozent für das linke Auge.

Biflicker Vertikal Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°] links

Erfasst die Richtung der Hauptsakkade in Bezug auf die X-Achse im Uhrzeigersinn in Grad für das linke Auge.

Biflicker V_max der Hauptsakkade [°/s] rechts

Misst die maximale Geschwindigkeit der Hauptsakkade in Grad pro Sekunde für das rechte Auge bei vertikalen Bewegungen.

Biflicker Trigger-Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°]

Erfasst die Trigger-Richtung in Bezug auf die X-Achse im Uhrzeigersinn in Grad für vertikale Bewegungen.

Biflicker Richtungsfehler Prosakkade [%] links

Erfasst den Richtungsfehler bei Prosakkaden in Prozent für das linke Auge.

Biflicker Anzahl Lidschlüsse links/rechts

Erfasst die Anzahl der Lidschlussbewegungen bei Biflicker-Messungen für das linke und rechte Auge.

Biflicker Blinzelrate [#s] links/rechts

Erfasst die Blinzelrate pro Sekunde bei Biflicker-Messungen für das linke und rechte Auge.

Biflicker Vertikal Richtungsfehler Prosakkade [%] rechts

Erfasst den Richtungsfehler bei Prosakkaden in Prozent für das rechte Auge.

Velo Horizontal Anzahl Lidschlüsse links/rechts

Erfasst die Anzahl der Lidschlussbewegungen bei horizontalen Augenbewegungen für das linke und rechte Auge.

Velo Horizontal Blinzelrate [#s] links/rechts

Misst die Blinzelrate pro Sekunde bei horizontalen Augenbewegungen für das linke und rechte Auge.

Velo Horizontal Dauer der Wiederholung [ms]

Misst die Dauer der Wiederholung der horizontalen Augenbewegungen in Millisekunden.

Velo Horizontal Durchschnittlicher Präzisionsfehler [°] rechts

Erfasst den durchschnittlichen Präzisionsfehler der horizontalen Augenbewegungen in Grad für das rechte Auge.

Velo Horizontal Durchschnitt Spitzengeschwindigkeit [°/s] rechts

Misst die durchschnittliche Spitzengeschwindigkeit der horizontalen Augenbewegungen in Grad pro Sekunde für das rechte Auge.

Velo Horizontal Durchschnittlicher Präzisionsfehler [°] links

Erfasst den durchschnittlichen Präzisionsfehler der horizontalen Augenbewegungen in Grad für das linke Auge.

Velo Horizontal Anzahl Sakkaden links

Zählt die Anzahl der Sakkaden bei horizontalen Bewegungen für das linke Auge.

Velo Horizontal Anzahl Sakkaden rechts

Zählt die Anzahl der Sakkaden bei horizontalen Bewegungen für das rechte Auge.

Velo Vertikal Durchschnitt Spitzengeschwindigkeit [°/s] links

Misst die durchschnittliche Spitzengeschwindigkeit der vertikalen Augenbewegungen in Grad pro Sekunde für das linke Auge.

Velo Vertikal Anzahl Sakkaden rechts

Zählt die Anzahl der Sakkaden bei vertikalen Bewegungen für das rechte Auge.

Velo Vertikal Anzahl Sakkaden links

Zählt die Anzahl der Sakkaden bei vertikalen Bewegungen für das linke Auge.

Velo Vertikal Dauer der Wiederholung [ms]

Misst die Dauer der Wiederholung der vertikalen Augenbewegungen in Millisekunden.

Velo Vertikal Blinzelrate [#s] links

Misst die Blinzelrate pro Sekunde bei vertikalen Augenbewegungen für das linke Auge.

Velo Vertikal Blinzelrate [#s] rechts

Misst die Blinzelrate pro Sekunde bei vertikalen Augenbewegungen für das rechte Auge.

Velo Vertikal Anzahl Lidschlüsse links/rechts

Erfasst die Anzahl der Lidschlussbewegungen bei vertikalen Augenbewegungen für das linke und rechte Auge.

Velo Vertikal Durchschnittlicher Präzisionsfehler [°] links

Misst den durchschnittlichen Präzisionsfehler der vertikalen Augenbewegungen in Grad für das linke Auge.

Velo Vertikal Durchschnittlicher Präzisionsfehler [°] rechts

Misst den durchschnittlichen Präzisionsfehler der vertikalen Augenbewegungen in Grad für das rechte Auge.

Velo Vertikal Durchschnitt Spitzengeschwindigkeit [°/s] rechts

Misst die durchschnittliche Spitzengeschwindigkeit der vertikalen Augenbewegungen in Grad pro Sekunde für das rechte Auge.

2.5 Referenztest / Synoptische Diagnose

Die klinische Diagnose eines Schädel-Hirn-Traumas (SHT) wurde nach Abschluss der Behandlung und verblindet, also ohne Kenntnis der Ergebnisse des Indextests (d.h., der Untersuchung mittels ET/VR-Brille) i. S. einer klinischen Synopsis im Konsens durch zwei unabhängige klinische Expert*Innen gestellt. Die Diagnose wurde auf der Basis aller klinischen, neurologischen, neurofunktionellen, neuropsychologischen und bildgebenden Befunde erstellt. Routinemäßig erfolgten jeweils eine unfallchirurgische und neurologische Anamnese, Untersuchung und Befundung. Im Anschluss erfolgte anhand der erstellten Diagnose die Zuordnung der Patient*innen in die Gruppe SHT / kein SHT.

2.6 Neurologische Untersuchung

Im Folgenden wird eine kurze Beschreibung der erfassten neurologischen Parameter gegeben.

Vestibulär Okulärer Reflex (VOR) horizontal und vertikal: Normale Bewegungen?

Diese Kategorie erfasst, ob der vestibulär okuläre Reflex (VOR) sowohl horizontal als auch vertikal bei den Patient*innen normale Bewegungen zeigt. Der VOR ist ein

Reflex, der die Stabilität der visuellen Wahrnehmung während Kopfbewegungen gewährleistet.

Vestibulär Okulärer Reflex (VOR) horizontal und vertikal: Keine Symptome?

Hier wird angegeben, ob bei den Patient*innen keine Symptome im Zusammenhang mit dem vestibulär okulären Reflex (VOR) sowohl horizontal als auch vertikal festgestellt wurden. Das Fehlen von Symptomen deutet auf eine normale Funktion des Reflexes hin.

Visuelle Bewegungssensitivität (VOR Suppression): Normale Bewegungen?

Dieser Test erfasst, ob die visuelle Bewegungssensitivität, die durch VOR Suppression getestet wird, normale Bewegungen aufweist. Diese Fähigkeit ist wichtig, um Bewegungen und Stabilität der visuellen Wahrnehmung bei visuellen und vestibulären Konflikten zu regulieren.

Visuelle Bewegungssensitivität (VOR Suppression): Keine Symptome?

Hier wird angegeben, ob keine Symptome bei der visuellen Bewegungssensitivität (VOR Suppression) festgestellt wurden. Das Fehlen von Symptomen deutet auf eine normale visuelle Bewegungssensitivität hin.

Proximale und Distale Kraft (4 Extremitäten): 5/5 Kraft

Diese Kategorie erfasst, ob die proximale und distale Kraft in allen vier Extremitäten der Patient*innen normal ist, gemessen mit einer Bewertung von 5/5, was auf volle Kraft und normale Muskelstärke hinweist.

Finger-Nase-Versuch: keine Dysmetrie oder Dyskoordination

Hier wird angegeben, ob der Finger-Nase-Versuch ohne Dysmetrie (Fehlbewegungen) oder Dyskoordination durchgeführt werden konnte. Dieser Test bewertet die Koordination und Feinmotorik der oberen Extremitäten.

Muskeldehnungsreflexe: seitengleich mittellebhaft

Dieser Test gibt an, ob die Muskeldehnungsreflexe auf beiden Seiten des Körpers gleichmäßig und mittellebhaft sind, was auf eine normale neurologische Reaktion hinweist.

Romberg: kein Schwanken oder Fallneigung

Diese Kategorie untersucht, ob die Patient*innen im Romberg-Test, bei dem sie die Augen schließen und aufrecht stehen, kein Schwanken oder Fallneigung zeigen. Das Fehlen von Schwanken deutet auf eine normale propriozeptive und vestibuläre Funktion hin.

Unterberger Tretversuch: Abweichung unter 30°, kein Fehltritt

Hier wird angegeben, ob die Patient*innen beim Unterberger Tretversuch, bei dem die Patient*innen auf der Stelle treten, und eine Drehung beobachten werden kann. Das Fehlen signifikanter Abweichungen deutet auf eine normale vestibuläre Funktion hin.

Einbeinstand (Augen geschlossen +/- partielle Kniebeuge): normal

Dieser Test erfasst, ob die Patient*innen im Einbeinstand mit geschlossenen Augen einer bei Durchführung einer partiellen Kniebeuge stabil stehen können, was auf eine gute Balance und propriozeptive Kontrolle hinweist.

Seiltänzerengang (vorwärts und rückwärts): normal

Hier wird angegeben, ob die Patient*innen beim Seiltänzerengang vorwärts und rückwärts normal laufen können. Dieser Test bewertet die Fähigkeit zur Balance und Koordination.

Sensibilität (4 Extremitäten): intakt

Diese Kategorie gibt an, ob die Sensibilität in allen vier Extremitäten der Patient*innen intakt ist, was bedeutet, dass sie normale Empfindungen in den Armen und Beinen haben.

Sensibilität (Rumpf): intakt

Hier wird erfasst, ob die Sensibilität im Rumpfbereich der Patient*innen intakt ist.

2.7 Auswertungsmethoden

Alle statistischen Analysen erfolgten in explorativer Intention. Primäres Ziel war, die erhobenen Daten auf ihre Eignung zur Diagnose eines leichten SHT (mTBI) in einer konsekutiven Kohorte von Patient*innen zu untersuchen, welche einer externen Krafteinwirkung im Kopfbereich ausgesetzt waren und die Untersuchung mittels ET/VR-Brille auf ihre Praktikabilität hin zu testen.

Alle im Rahmen der diagnostischen Routine dokumentierten Variablen wurden in Abhängigkeit ihrer Skalenart deskriptiv ausgewertet.

Die aufgezeichneten Videos wurden in mehreren Schritten analysiert. Zunächst wurde für die Erstbewertung eine Ad-hoc-Pupillenerkennung durchgeführt, um die Qualität des Bildes beurteilen zu können.

Im zweiten Schritt wurde eine Posthoc-Detektion durch eyeTrax durchgeführt, die eine bessere Datenqualität ermöglichte, da mehrere Parameter bestimmt werden konnten, wie z.B. die Empfindlichkeit des 3D-Augenmodells oder Kontrasteinstellungen aufgrund unterschiedlicher Videoausleuchtung. Der Erkennungsalgorithmus wurde in diesem Schritt auf die jeweilige Messung zugeschnitten. Je nach Länge des Videos dauerte der Prozess 5-10 Minuten pro Messung.

Um eine hochwertige Interpretation der Daten mit ausreichender Datenqualität zu ermöglichen, mussten die verschiedenen Muster innerhalb der Eye-Tracking-Daten kategorisiert werden. Diese Annotation erfolgte manuell, da automatische Verfahren in verrauschten Datensätzen zu viele Fehlklassifikationen zur Folge hatten. Je nach Komplexität der Augenbewegung dauerte dieser Prozess zwischen 30 Minuten und 2 Stunden pro Messung. Jeder Datenpunkt wurde einer Klasse zugeordnet. Der kritische Punkt dabei war, zu erkennen, wann z. B. eine Sakkade in eine Fixation übergeht, wann ein Blinzeln vermerkt wird usw.. Dies wurde von geschultem Personal mit sehr guter Interoperator-Reliabilität durchgeführt.

Die so gewonnenen Klassen konnten dann durch automatische Auswertungen auf die verschiedenen Parameter übertragen und gespeichert werden. Das Verfahren

war vollständig anonymisiert, d.h. ein Operator wusste zu keinem Zeitpunkt, um welchen Datensatz oder welche Patient*in es sich handelte.

Zur Beschreibung der Verteilungen wurden absolute und prozentuale Häufigkeiten oder Mittelwert und Standardabweichung bzw. Median und Spannweite herangezogen. Darüber hinaus wurde die Verteilung der studienspezifisch erhobenen Laborparameter mittels t-Test für unabhängige Stichproben auf Unterschiede zwischen Patient*innen mit vs. ohne SHT geprüft.

Zur explorativen Analyse der Marker wurden nicht-parametrische Receiver Operating Curves (ROCs) berechnet und zunächst die resultierenden Area Under the Curves (AUCs) dokumentiert. Marker mit AUCs, deren Punktschätzung $\geq .60$ und deren p-Wert $\leq .05$ bei Testung gegen die Diagonale ($AUC = .50$) beträgt, wurden auf ihren inkrementellen diagnostischen Wert untereinander untersucht und graphisch mittels Boxplots sowie deskriptiv durch Mittelwert und Standardabweichung und Spannweite beschrieben sowie Sensitivität, Spezifität und dem daraus berechneten Youden Index beschrieben

In Punkt 2.7.3 werden die oben genannten statistischen Methoden beschrieben.

2.7.1 Auswertungsvariablen

- Soziodemographie & Anamnese
- Ereignisbogen zum Unfallgeschehen
- SCAT-3 Beschwerdeliste
- Neurologischer Befund
- Fragebogen zur Praktikabilität patient*innenenseitig
- Variablen des Indextests (s. Anhang)

2.7.2 Software

Alle Auswertungen wurden mit IBM SPSS Statistics Version 27 (Armonk, NY, USA: IBM Corp) durchgeführt.

2.7.3 Statistische Methoden

Im Folgenden werden die benutzten statistischen Methoden beschrieben.

T-Test

Der T-Test ist eine statistische Methode, die verwendet wird, um etwaige Unterschiede zwischen den Mittelwerten zweier Gruppen zu analysieren. Er testet die Nullhypothese, also der Annahme, dass es keinen Unterschied zwischen den Mittelwerten der Gruppen gibt, gegen eine Alternativhypothese, also der Annahme, dass ein Unterschied besteht. Der T-Test beruht auf der Annahme normalverteilter Daten und gleicht die Varianzen der Gruppen ab [47].

Nicht-parametrische Receiver Operating Curves (ROCs)

Die ROC-Kurve zeigt die Fähigkeit eines diagnostischen Tests, zwischen zwei Klassen (SHT/kein SHT) zu unterscheiden. Sie wird durch die Darstellung von Sensitivität (Anteil der korrekt erkannten positiven Fälle) gegen 1-Spezifität (Anteil der falsch-positiven Ergebnisse) gebildet [49].

Area Under the Curves (AUCs)

Die AUC ist eine zusammenfassende Metrik, also ein einzelner numerischer Wert der ROC-Kurve, die die Trennschärfe eines diagnostischen Tests oder eines Klassifikationsmodells quantifiziert. Bei der Interpretation des AUC zeigt ein Wert von 0.7-0.8 eine akzeptable Genauigkeit, ein Wert von 0.8-0.9 eine gute Genauigkeit. Und ein Wert >0.9 eine sehr gute Genauigkeit [52].

P-Wert

Der P-Wert misst die Wahrscheinlichkeit, dass die beobachteten Daten auftreten, wenn die Nullhypothese (Annahme, dass es keinen Unterschied zwischen den Mittelwerten der Gruppen gibt) wahr ist. Er hilft, die Signifikanz eines Ergebnisses zu bewerten. Ein kleiner P-Wert (<0.05) deutet darauf hin, dass die Nullhypothese verworfen werden kann [10].

Youden-Index

Der Youden-Index ist eine Metrik, die verwendet wird, um die Effektivität eines diagnostischen Tests zu bewerten. Er kombiniert Sensitivität und Spezifität in einer einzigen Zahl und hilft, den optimalen Schwellenwert für die Testklassifikation zu bestimmen. Er wird berechnet als: Sensitivität + Spezifität -1. Der maximale Wert des Youden-Index ist 1, was auf perfekte Sensitivität und Spezifität hinweist. Ein Wert von 0 zeigt an, dass der Test nicht besser als Zufall ist [50].

2.7.4 Ethikantrag und Genehmigung

Das Studienprotokoll wurde am 18.10.2018 von der Ethikkommission der Ärztekammer Hamburg genehmigt (PV5863) und beim Deutschen Register für Klinische Studien registriert (Registrierungsnummer: DRKS00032810).

2.7.5 Studienzentren

- BG Klinikum Unfallkrankenhaus Berlin, Klinik für Neurologie, Warener Str. 7 in 12683 Berlin
- BG Klinikum Hamburg, Neurotraumatologisches Zentrum, Bergedorfer Straße 10 in 21033 Hamburg

2.7.6 Studienverlauf & Patient*innenfluss

Die Rekrutierung der Patient*innen wurde im Rekrutierungszeitraum im erheblichen Maße durch die Corona-Pandemie beeinträchtigt. Hier war über Monate z.T. überhaupt kein Einschluss von Patient*innen in den Notaufnahmen beider Studienzentren möglich.

Aus diesen Gründen wurde eine zwölfmonatige Verlängerung des Projekts bis 31. August 2022 durchgeführt. Diese zwölfmonatige Verlängerung ergab sich aus der Tatsache, dass das Erreichen der Hälfte der zu rekrutierenden Patient*innen gem.

Meilenstein 1 sechs Monate länger gedauert hat als ursprünglich geplant und vor dem Hintergrund der damaligen Situation auch für die folgenden Monate von einem ähnlichen Rekrutierungsverlauf ausgegangen werden musste.

Schließlich konnten im Zeitraum von Oktober 2019 bis Januar 2022 insgesamt 122 Patient*innen eingeschlossen und untersucht werden, davon 58 im Zentrum Hamburg und 64 im Zentrum Berlin (Abb. 3).

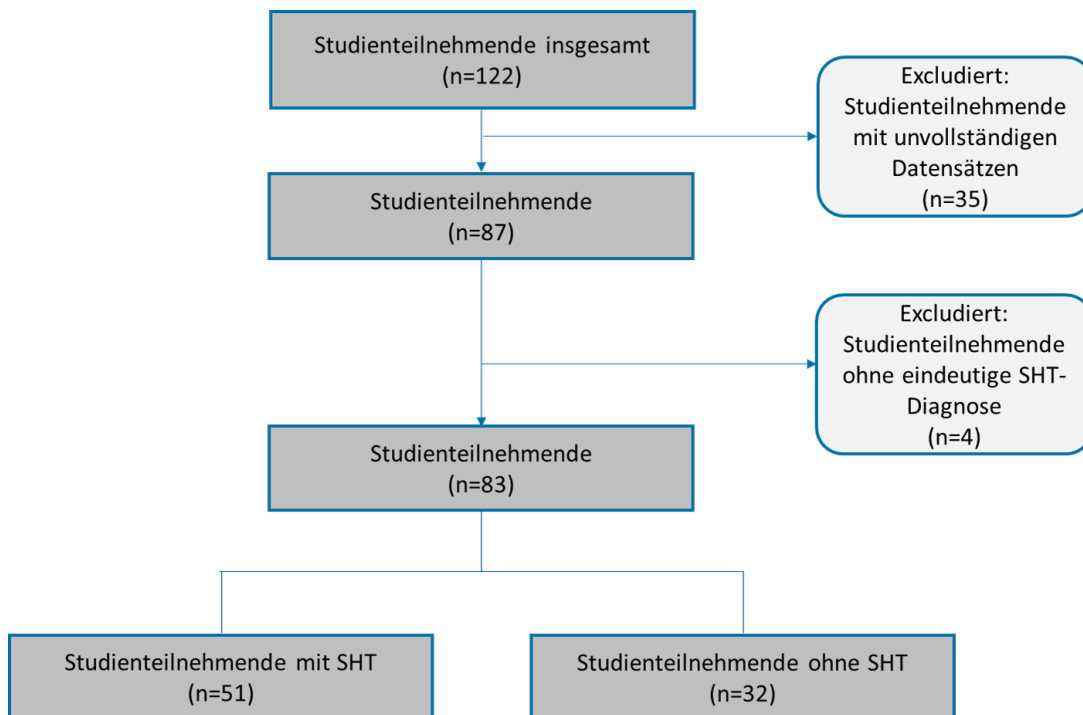


Abb. 3: Flussdiagramm Ein- und Ausschluss

Erfüllte eine Patient*in die Einschlusskriterien, war das vorgesehene Studienprotokoll in der Notaufnahme gut umsetzbar, lediglich eine geringe Anzahl der Patient*innen lehnte eine Teilnahme an der Studie ab (in Hamburg z.B. nur 3 Patient*innen). Grundsätzlich äußerten sich die meisten Patient*innen positiv über die vorgenommenen Untersuchungen, insbesondere über die Untersuchung mit der ET-VR-Brille. Es wurden in beiden Studienzentren keine besonderen Zwischenfälle registriert. Die erhobenen Studiendaten wurden kontinuierlich in die Onlineplattform (SecuTrial) eingepflegt.

Leider konnten von insgesamt 35 Patient*innen die mittels ET/VR-Brille erhobenen Daten der Analyse nicht zugeführt werden, da die Datensätze unvollständig waren. Bei 2 Patient*innen jedes Zentrums war keine eindeutige SHT-Diagnose verfügbar.

Damit ergab sich ein Datensatz von 83 auswertbaren Fällen. Insgesamt zeigten sich davon 51 Patient*innen mit SHT-Diagnose und 32 ohne SHT-Diagnose.

Nach Ausschluss der unvollständigen Datensätze konnte eine ausführliche statistische Auswertung erfolgen, somit ergab sich kein negativer Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse.

3. Ergebnisse

3.1 Stichprobenbeschreibung

3.1.1 Altersverteilung

Der größte Anteil der Patient*innen zeigt sich in der Altersgruppe von 18-29 Jahren. Insbesondere der Anteil mit SHT ist in diesem Kollektiv am größten (Abb. 4). Das Durchschnittsalter in der kein SHT-Gruppe betrug 41 Jahre (SD=15) und in der SHT-Gruppe 39 Jahre (SD=15).

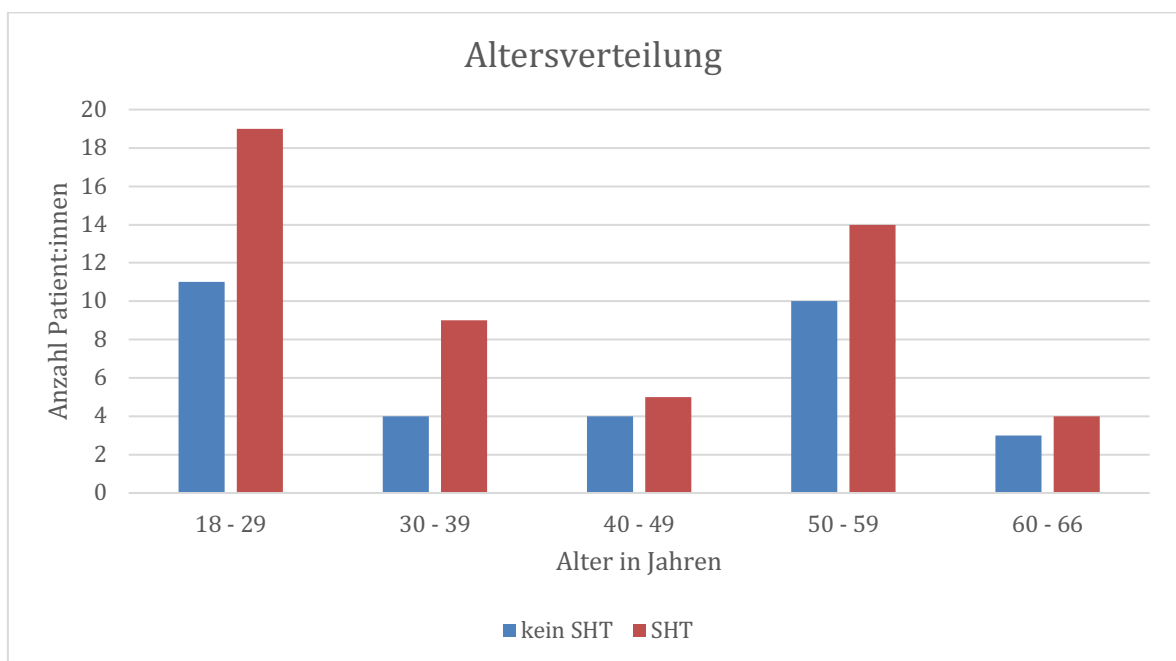


Abb. 4: Altersverteilung

3.1.2 Geschlechtsverteilung

Insgesamt besteht die untersuchte Studienpopulation aus 83 Patient*innen, wovon 54 männlich und 28 weiblich sind. Eine Person hat ihr Geschlecht nicht angegeben. 62% der Patient*innen erhielten die Diagnose eine SHT, wovon 74,5% männlichen Geschlechts waren und 25,5% weiblichen Geschlechts. (Abb. 5)

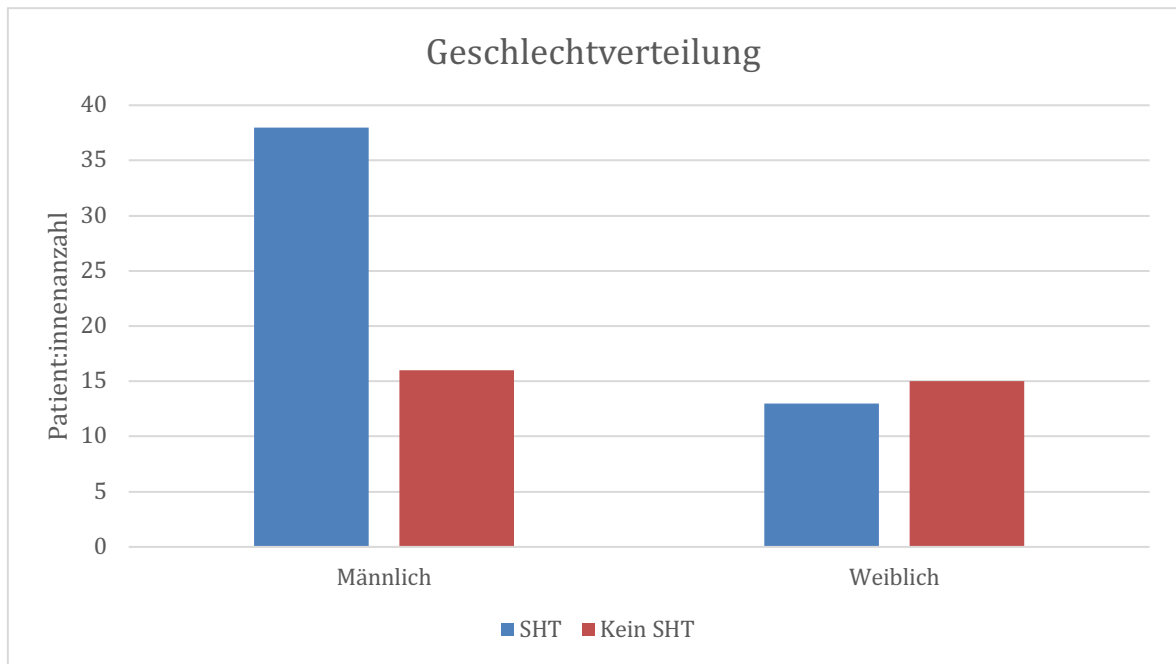


Abb. 5: Geschlechterverteilung

3.1.3 Schulabschluss und Berufsstand

Tabelle 1 zeigt verschiedene demographische und bildungsbezogene Merkmale der untersuchten Studienpopulation. Es werden die Parameter Geschlecht, Händigkeit, Muttersprache, höchster allgemeiner Schulabschluss sowie Berufsstand erfasst und gegenübergestellt.

Der höchste allgemeine Schulabschluss zeigt ein weites Spektrum an, von keinem Schulabschluss bis zum Abitur, wobei das Abitur und die allgemeine Fachhochschulreife mit über 50% am meisten vertreten waren. Über 85% der Studienteilnehmenden waren zum Zeitpunkt der Untersuchung berufstätig (87,5 % in der kein SHT-Gruppe und 84,3 % in der SHT-Gruppe).

Tabelle 1: Demographie der Stichprobe I: Kategoriale Variablen

		Diagnose			
		kein SHT		SHT	
		Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)
Geschlecht	männlich	16	51,6%	38	74,5%
	weiblich	15	48,4%	13	25,5%
Händigkeit	rechtshändig	31	96,9%	44	86,3%
	linkshändig	0	0,0%	6	11,8%
	beidhändig	1	3,1%	1	2,0%
Muttersprache	deutsch	30	93,8%	46	90,2%
	andere	2	6,3%	5	9,8%
Höchster allgemeinbildender Schulabschluss	Schüler/-in, besucht eine allgemeinbildende Vollzeitschule	0	0,0%	0	0,0%
	Von der Schule abgegangen ohne Haupt-/Volksschulabschluss	1	3,1%	0	0,0%
	Haupt-/Volksschulabschluss	3	9,4%	7	13,7%
	Realschulabschluss (Mittlere Reife)	8	25,0%	19	37,3%
	Polytechnische Oberschule der DDR mit Abschluss der 8. oder 9. Klasse	1	3,1%	0	0,0%
	Polytechnische Oberschule der DDR mit Abschluss der 10. Klasse	1	3,1%	3	5,9%
	Fachhochschlureife, Abschluss einer Fachoberschule	5	15,6%	5	9,8%
	Allgemeine oder fachgebundene Hochschulreife/Abitur (Gymnasium bzw. EOS, auch EOS mit Lehre)	11	34,4%	11	21,6%
	Abitur über zweiten Bildungsweg nachgeholt	2	6,3%	6	11,8%
	Einen anderen Schulabschluss	0	0,0%	0	0,0%
Berufsstand	Berufstätig	28	87,5%	43	84,3%
	Arbeitsuchend	1	3,1%	1	2,0%
	sonstiges (Studium / Rente)	3	9,4%	7	13,7%

3.2 Anamnese

Tabelle 2 zeigt einen umfassenden Überblick über gesundheitliche und psychologische Merkmale der Patient*innen der Studienpopulation. Es werden die Parameter Kopfverletzungen (SHT) in der Vorgeschichte, Kopfschmerzen, Lernschwäche, ADS/ADHS dargestellt. Die Prozentzahlen geben die Prozent der beantworteten Fragen an und beziehen sich nicht auf die Gesamtkohorte.

Tabelle 2: Anamnestiche Variablen I

		Diagnose				
		kein SHT		SH T		
		Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	
Kopfverletzungen (SHT) in der Vorgeschichte?	nein	21	65,6%	25	49,0%	
	ja	11	34,4%	26	51,0%	
Anzahl SHT	1	8	72,7%	14	56,0%	
	2	3	27,3%	6	24,0%	
	3	0	0,0%	1	4,0%	
	4	0	0,0%	2	8,0%	
	6	0	0,0%	1	4,0%	
	99	0	0,0%	1	4,0%	
Kopfschmerzen	nein	18	56,3%	25	49,0%	
	ja	14	43,8%	26	51,0%	
Migräne	nein	7	50,0%	17	65,4%	
	ja	7	50,0%	9	34,6%	
Mittlere Stärke (1-10)	3	0	0,0%	4	15,4%	
	4	4	28,6%	7	26,9%	
	5	2	14,3%	4	15,4%	
	6	3	21,4%	3	11,5%	
	7	3	21,4%	4	15,4%	
	8	0	0,0%	2	7,7%	
	9	2	14,3%	0	0,0%	
	10	0	0,0%	2	7,7%	
	Lernschwäche	nein	1	33,3%	3	100,0%
		ja	2	66,7%	0	0,0%
ADS / ADHS	nein	2	66,7%	2	66,7%	
	ja	1	33,3%	1	33,3%	

Kopfverletzungen (SHT) in der Vorgeschichte gaben 34,4 % in der kein SHT-Gruppe und 51 % in der SHT-Gruppe an. Über Kopfschmerzen klagten 43,8 % in der kein SHT-Gruppe und 51 % in der SHT-Gruppe.

Tabelle 3 zeigt einen Überblick über die psychiatrische/psychotherapeutische Vorgeschichte der Patient*innen der Studienpopulation. Es werden die Parameter Depression, Bipolare Störung, Schizophrenie und Angststörung erfasst. Die Prozentzahlen geben die Prozent der beantworteten Fragen an und beziehen sich nicht auf die Gesamtkohorte.

Tabelle 3: Anamnestiche Variablen II

	Diagnose				
	kein SHT		SHT		
	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	
Psychiatrische / Psychotherapeutische Vorgeschichte?	nein	24	75,0%	39	76,5%
	ja	8	25,0%	12	23,5%
Depression	nein	5	62,5%	2	16,7%
	ja	3	37,5%	10	83,3%
Bipolare Störung	nein	8	100,0%	12	100,0%
	ja	0	0,0%	0	0,0%
Schizophrenie	nein	8	100,0%	12	100,0%
	ja	0	0,0%	0	0,0%
Angststörung	nein	8	100,0%	11	91,7%
	ja	0	0,0%	1	8,3%

Es wurden psychiatrische bzw. psychotherapeutische Vorgeschichte bei 25 % in der kein SHT-Gruppe und 23,5 % in der SHT-Gruppe angegeben.

Tabelle 4 zeigt Tabelle eine Übersicht über Schlafprobleme innerhalb der Studienpopulation. Es werden die Parameter Einschlafstörung, Durchschlafstörung und frühes Erwachen erfasst. Die Prozentzahlen geben die Prozent der beantworteten Fragen an und beziehen sich nicht auf die Gesamtkohorte.

Tabelle 4: Anamnestische Variablen III

		Diagnose			
		kein SHT		SHT	
		Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)
Schlaf	Normales Schlafbedürfnis	21	67,7%	42	82,4%
	Hohes Schlafbedürfnis	5	16,1%	6	11,8%
	Geringes Schlafbedürfnis	5	16,1%	3	5,9%
Einschlafstörung	nein	29	90,6%	45	88,2%
	ja	3	9,4%	6	11,8%
Durchschlafstörung	nein	25	78,1%	46	90,2%
	ja	7	21,9%	5	9,8%
Frühes Erwachen	nein	29	90,6%	50	98,0%
	ja	3	9,4%	1	2,0%

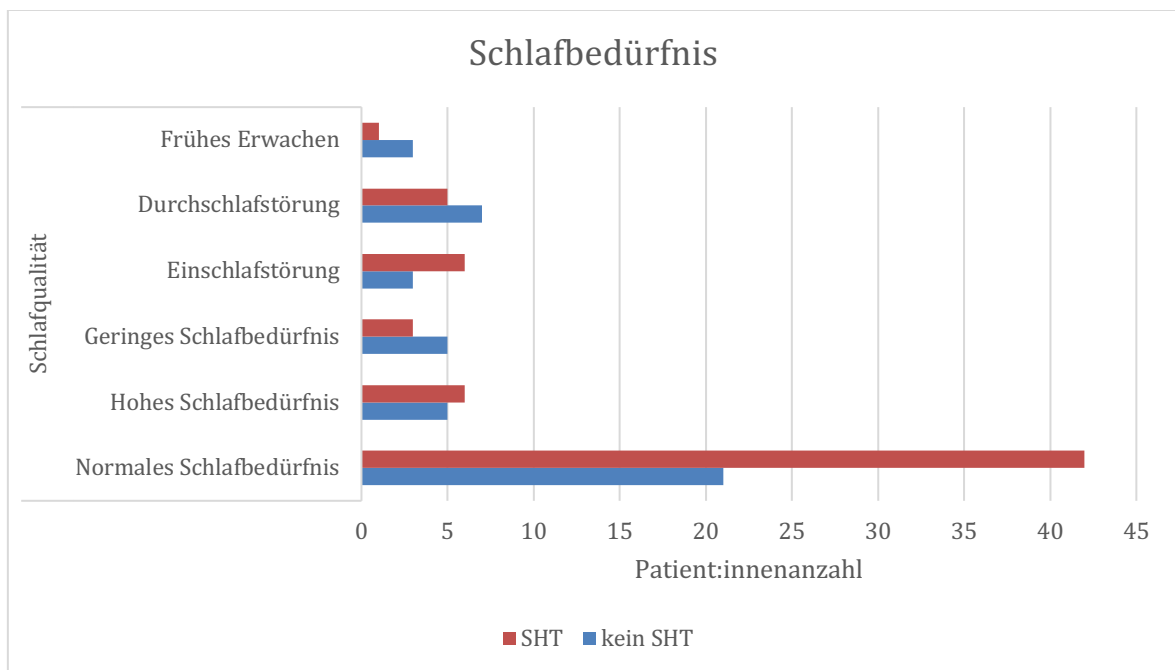


Abb. 6: Schlafbedürfnis

Insgesamt zeigt sich eine nur geringfügige Einschränkung der Schlafqualität für alle untersuchten Patient*innen (Abb. 6).

3.3 Unfallhergang

Tabelle 5 zeigt eine detaillierte Übersicht über verschiedene Aspekte von Kopfverletzungen innerhalb der Studienpopulation. Es werden die Parameter Ort des Aufpralls, Hinweise auf eine Hirnblutung, Hinweise auf einen Bruch des Schädelknochens, Hinweise auf ein Subdural-/Epiduralhämatom und Ort der Verletzungen erfasst.

Tabelle 5: Unfallhergang I

		Diagnose			
		kein SHT		SHT	
		Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)
Ort des Aufpralls	vorne	11	36,7%	17	40,5%
	hinten	10	33,3%	9	21,4%
	rechts	7	23,3%	4	9,5%
	links	0	0,0%	7	16,7%
	oben	2	6,7%	4	9,5%
	unten	0	0,0%	1	2,4%
Hinweise auf eine Hirnblutung?	nein	32	100,0%	51	100,0%
	ja	0	0,0%	0	0,0%
Hinweise auf einen Bruch des Schädelknochens?	nein	32	100,0%	50	98,0%
	ja	0	0,0%	1	2,0%
Hinweise auf ein Subdural-/Epiduralhämatom?	nein	32	100,0%	50	100,0%
	ja	0	0,0%	0	0,0%
Ort der Verletzungen	vorne	10	33,3%	17	42,5%
	hinten	11	36,7%	9	22,5%
	rechts	7	23,3%	3	7,5%
	links	0	0,0%	6	15,0%
	oben	2	6,7%	4	10,0%
	unten	0	0,0%	1	2,5%

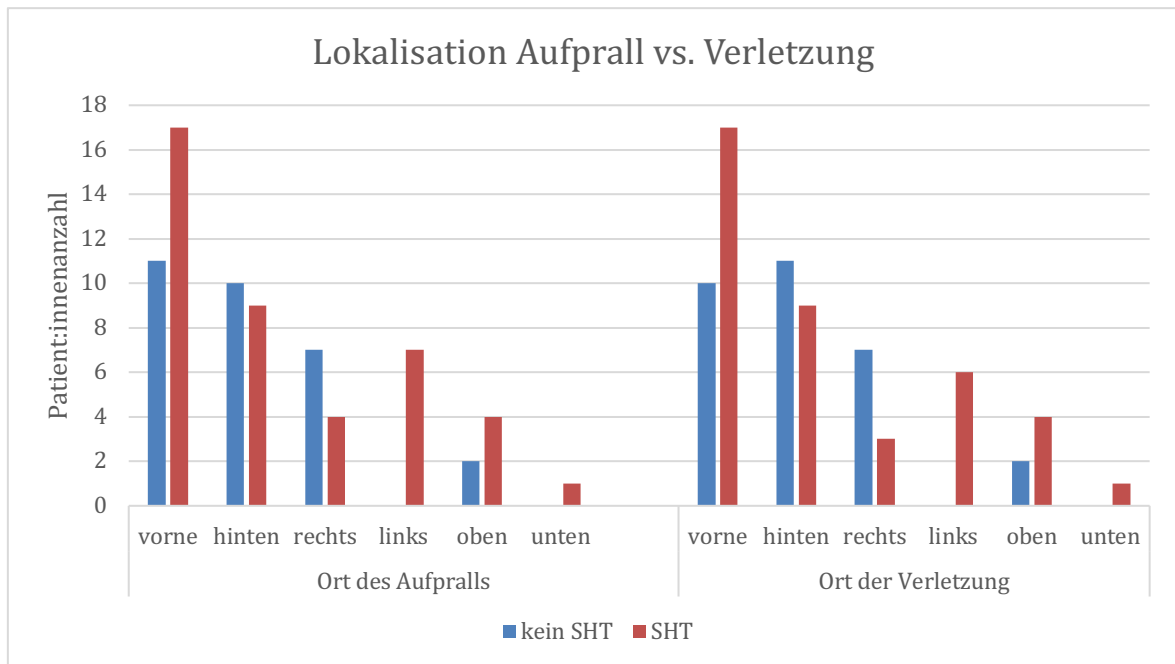


Abb. 7: Lokalisationen

Insgesamt zeigt sich, dass der Ort des Aufpralls nahezu identisch mit dem Ort der Verletzung ist. In nur einem Fall ist der Ort des Aufpralls im vorderen Bereich des Kopfes und die Verletzung zeigt sich im hinteren Bereich. Der häufigste Ort für den Aufprall sowie die Verletzung ist im vorderen Bereich (36,7 % bei nicht SHT, 40,5% bei SHT) gefolgt vom hinteren Bereich (33,3% bei nicht SHT, 21,4% bei SHT). Die rechte Seite ist mit 23,3% bei nicht SHT und 9,5% bei SHT der Fälle betroffen, wobei die linke Seite überhaupt nicht betroffen ist (Abb. 7).

Tabelle 6 zeigt eine Übersicht über die Symptome und Folgen von Kopfverletzungen innerhalb der Studienpopulation. Es werden die Parameter retrograde Amnesie, anterograde Amnesie, Bewusstlosigkeit, Benommenheit, Verwirrtheit, langsames Antworten, Wiederholung von Fragen, Vergesslichkeit und epileptische Anfälle erfasst.

Tabelle 6: Unfallhergang II

		Diagnose			
		kein SHT		SHT	
		Anzahl	Anzahl Spalten (%)	Anzahl	Anzahl Spalten (%)
Retrograde Amnesie: Fehlen Erinnerungen an Ereignisse kurz vor der Verletzung?	nein	30	93,8%	30	58,8%
	ja	2	6,3%	21	41,2%
Anterograde Amnesie: Fehlen Erinnerungen an Ereignisse kurz nach der Verletzung?	nein	28	87,5%	27	54,0%
	ja	4	12,5%	23	46,0%
Bewusstlosigkeit: Verlor die betroffene Person das Bewusstsein?	nein	26	81,3%	26	52,0%
	ja	6	18,8%	24	48,0%
Benommenheit	nein	26	81,3%	32	64,0%
	ja	6	18,8%	18	36,0%
Verwirrtheit	nein	31	96,9%	43	86,0%
	ja	1	3,1%	7	14,0%
Langsame Antworten	nein	31	96,9%	41	82,0%
	ja	1	3,1%	9	18,0%
Wiederholung von Fragen	nein	32	100,0%	43	86,0%
	ja	0	0,0%	7	14,0%
Vergesslichkeit	nein	32	100,0%	42	84,0%
	ja	0	0,0%	8	16,0%
Epileptische Anfälle?	nein	32	100,0%	46	92,0%
	ja	0	0,0%	4	8,0%

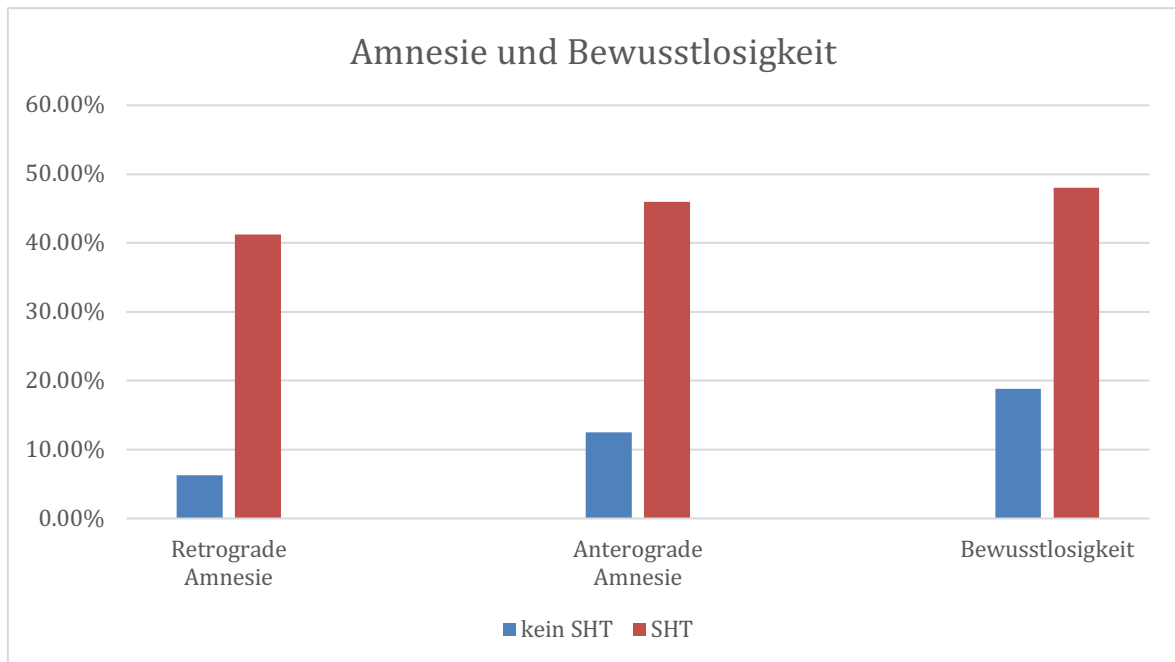


Abb. 8: Amnesie und Bewusstlosigkeit

Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied im Auftreten von Amnesie und Bewusstlosigkeit zwischen der Patient*innen, welche ein SHT erlitten haben zu denen, welche kein SHT erlitten haben. 41,2% der Patient*innen mit SHT haben angegeben, eine Retrograde Amnesie zu haben, gegenüber von 6,3% der Patient*innen, welche kein SHT erlitten haben. 46,0% der Patient*innen mit SHT haben angegeben, eine Anterograde Amnesie zu haben, gegenüber 12,5% der Patient*innen, welche kein SHT erlitten haben. 48,0% der Patient*innen mit SHT haben angegeben, eine Bewusstlosigkeit gehabt zu haben, gegenüber 18,8% der Patient*innen, welche kein SHT erlitten haben (Abb. 8).

3.4 SCAT-3

Tabelle 7 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Symptome, die bei den Teilnehmenden nach einer Kopfverletzung auftreten können. Diese werden in dem SCAT-3 Fragebogen abgefragt. Es werden die Parameter Kopfschmerzen, Druckgefühl im Kopf, Nackenschmerzen, Übelkeit/Erbrechen, Schwindel, verschwommenes Sehen, Gleichgewichtsprobleme, Lichtempfindlichkeit, Geräuschempfindlichkeit, Verlangsamung, sich benebelt fühlen, sich komisch

fühlen, Konzentrationsprobleme, Gedächtnisprobleme, Erschöpfung/Energiemangel, Konfusion/Verwirrtheit, Benommenheit, Einschlafschwierigkeiten, emotionaler als sonst, Reizbarkeit, Traurigkeit und Nervosität/Ängstlichkeit erfasst.

Tabelle 7: Parameter des SCAT-3 I

	Diagnose					
	kein SHT			SHT		
	Median	Minimum	Maximum	Median	Minimum	Maximum
Kopfschmerzen	2	0	5	2	0	6
Druckgefühl im Kopf	1	0	5	2	0	6
Nackenschmerzen	1	0	5	2	0	5
Übelkeit/Erbrechen	0	0	3	0	0	3
Schwindel	0	0	4	1	0	6
Verschwommenes Sehen	0	0	4	0	0	4
Gleichgewichtsprobleme	0	0	2	0	0	4
Lichtempfindlichkeit	0	0	5	0	0	5
Geräuschempfindlichkeit	0	0	3	0	0	4
Verlangsamung	0	0	4	0	0	5
Sich benebelt fühlen	0	0	4	1	0	5
Sich komisch fühlen	0	0	4	1	0	5
Konzentrationsprobleme	0	0	4	0	0	6
Gedächtnisprobleme	0	0	2	0	0	6
Erschöpfung/Energiemangel	1	0	5	2	0	6
Konfusion/Verwirrtheit	0	0	2	0	0	5
Benommenheit	0	0	3	0	0	6
Einschlafschwierigkeiten	0	0	5	0	0	5
Emotionaler als sonst	0	0	4	0	0	3
Reizbarkeit	0	0	2	0	0	6
Traurigkeit	0	0	6	0	0	5
Nervös oder ängstlich	0	0	3	0	0	4

Bei den Patient*innen mit SHT zeigt sich eine erhöhte Symptomschwere im Vergleich zu den Patient*innen ohne SHT.

Tabelle 8 zeigt ob sich die oben genannten Symptome bei oder nach körperlicher oder geistiger Anstrengung verschlimmern.

Tabelle 8: Parameter des SCAT-3 II

		Diagnose			
		kein SHT		SHT	
		Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)
Verschlimmern sich die Symptome bei oder nach körperlicher oder geistiger Anstrengung?	nein	25	83,3%	32	66,7%
	ja	5	16,7%	16	33,3%

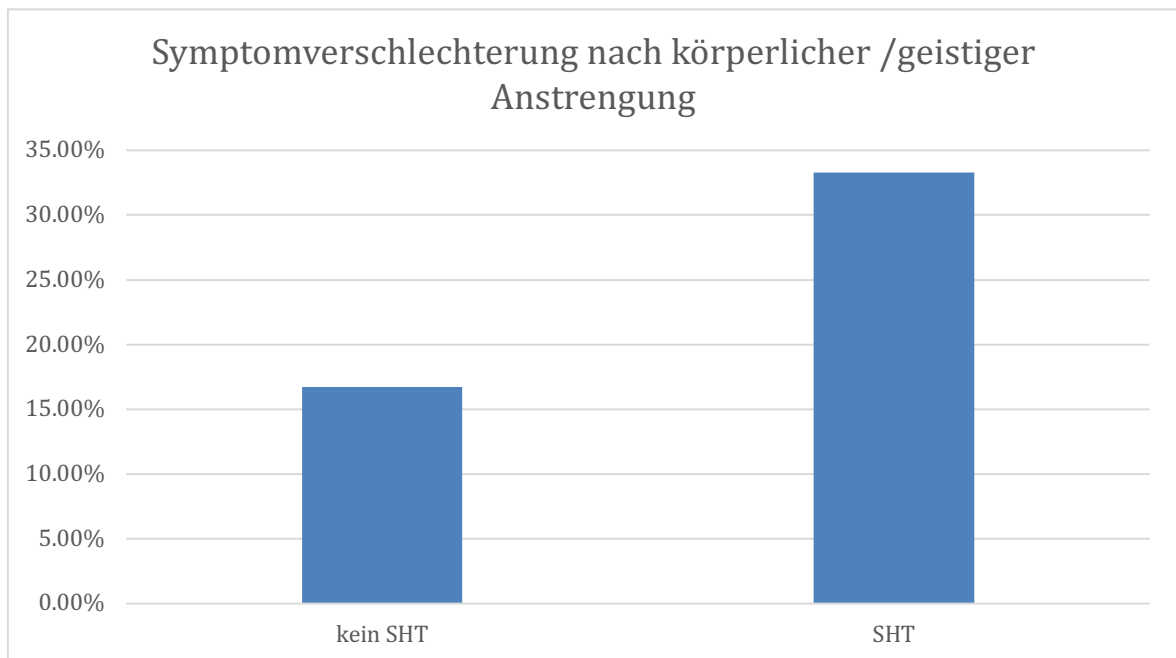


Abb. 9: Symptomverschlechterung nach körperlicher /geistiger Anstrengung

Bei 33,3% der Patient*innen mit SHT zeigt sich eine vermehrt auftretende Symptomverschlechterung im Vergleich zu 16,7% der Patient*innen ohne SHT (Abb. 9).

3.4 Neurologischer Befund

Tabelle 9 zeigt eine detaillierte Übersicht über neurologische und sensorische Funktionen der Patient*innen. Es werden die Parameter Gesichtsmuskulatur

symmetrisch, Sensibilität intakt, Hören intakt, Gaumensegel symmetrisch, Zunge symmetrisch, Schulterhebung normal, Pupillen (seitengleich, rund, lichtreagibel), Gesichtsfeld (Fingerperimetrie normal), Augenfolgebewegungen (Smooth pursuit) im H-Muster (normale Bewegungen und keine Symptome), Sakkaden horizontal und vertikal (normale Bewegungen und keine Symptome) und Konvergenz (bester von 3 Versuchen, nächster Abstand: normale Bewegungen und keine Symptome) erfasst.

Tabelle 9: Neurologischer Befund I

	Diagnose					
	kein SHT			SHT		
	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)		
Gesichtsmuskulatur symmetrisch	sym-	nein	1	3,2%	1	2,0%
		ja	30	96,8%	50	98,0%
Sensibilität intakt		nein	0	0,0%	0	0,0%
		ja	31	100,0%	51	100,0%
Hören intakt		nein	1	3,2%	0	0,0%
		ja	30	96,8%	51	100,0%
Gaumensegel symmetrisch		nein	0	0,0%	0	0,0%
		ja	31	100,0%	51	100,0%
Zunge symmetrisch		nein	0	0,0%	0	0,0%
		ja	31	100,0%	51	100,0%
Schulterhebung normal		nein	0	0,0%	1	2,0%
		ja	31	100,0%	50	98,0%
Pupillen: seitengleich, rund, lichtreagibel		nein	0	0,0%	0	0,0%
		ja	31	100,0%	51	100,0%
Gesichtsfeld: Fingerperimetrie normal		nein	0	0,0%	0	0,0%
		ja	31	100,0%	51	100,0%
Augenfolgebewegungen (Smooth pursuit) H Muster: Normale Bewegungen?		nein	0	0,0%	0	0,0%
		ja	31	100,0%	51	100,0%
Augenfolgebewegungen (Smooth pursuit) H Muster: Keine Symptome?		nein	0	0,0%	0	0,0%
		ja	31	100,0%	51	100,0%
Sakkaden horizontal und vertikal: Normale Bewegungen?		nein	0	0,0%	1	2,0%
		ja	31	100,0%	50	98,0%
Sakkaden horizontal und vertikal: Keine Symptome?		nein	0	0,0%	0	0,0%
		ja	31	100,0%	51	100,0%

		Diagnose			
		kein SHT		SHT	
		Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)
Konvergenz (bester von 3 Versuchen) nächster Abstand: Normale Bewegungen?	nein	0	0,0%	0	0,0%
	ja	31	100,0%	51	100,0%
Konvergenz (bester von 3 Versuchen) nächster Abstand: Keine Symptome?	nein	0	0,0%	1	2,0%
	ja	31	100,0%	50	98,0%

In der neurologischen Untersuchung zeigten sich in der Gruppe SHT und kein SHT keine statistisch relevanten Auffälligkeiten.

Tabelle 10 zeigt eine detaillierte Übersicht über verschiedene neurologische und motorische Funktionen der Patient*innen.

Tabelle 10: Neurologischer Befund II

		Diagnose			
		kein SHT		SHT	
		Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)
Vestibulär Okulärer Reflex (VOR) horizontal und vertikal: Normale Bewegungen?	nein	0	0,0%	1	2,0%
	ja	31	100,0%	50	98,0%
Vestibulär Okulärer Reflex (VOR) horizontal und vertikal: Keine Symptome?	nein	0	0,0%	1	2,0%
	ja	31	100,0%	50	98,0%
Visuelle Bewegungssensitivität (VOR Suppression): Normale Bewegungen?	nein	0	0,0%	1	2,0%
	ja	30	100,0%	50	98,0%
Visuelle Bewegungssensitivität	nein	1	3,3%	1	2,0%

vität (VOR Suppression): Keine Symptome?	ja	29	96,7%	50	98,0%
Proximale and Distale Kraft (4 Extremitäten): 5/5 Kraft	nein	1	3,2%	1	2,0%
	ja	30	96,8%	49	98,0%

		Diagnose			
		kein SHT		SHT	
		Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)
Finger-Nase-Versuch: keine Dysmetrie oder Dyskoordination	nein	0	0,0%	2	3,9%
	ja	31	100,0%	49	96,1%
Muskeldehnungsrelexe: seittengleich mittellebhaft	nein	5	16,1%	2	3,9%
	ja	26	83,9%	49	96,1%
Romberg: kein Schwanken oder Fallneigung	nein	1	3,2%	5	9,8%
	ja	30	96,8%	46	90,2%
Unterberger Tretversuch: Abweichung unter 30°, kein Fehltritt	nein	2	6,9%	6	12,5%
	ja	27	93,1%	42	87,5%
Einbeinstand (Augen geschlossen +/- partielle Kniebeuge): normal	nein	2	6,5%	8	15,7%
	ja	29	93,5%	43	84,3%
Seiltänzerengang (vorwärts und rückwärts): normal	nein	3	9,7%	10	19,6%
	ja	28	90,3%	41	80,4%
Sensibilität (4 Extremitäten): intakt	nein	3	9,7%	0	0,0%
	ja	28	90,3%	51	100,0%
Sensibilität (Rumpf): intakt	nein	0	0,0%	0	0,0%
	ja	31	100,0%	51	100,0%

Im neurologischen Befund zeigen sich bei der Testung des Gleichgewichts deutliche Unterschiede in den beiden Gruppen. Ansonsten sind keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Patient*innen, welche ein SHT erlitten haben, zu den Patient*innen, welche kein SHT erlitten haben, zu benennen.

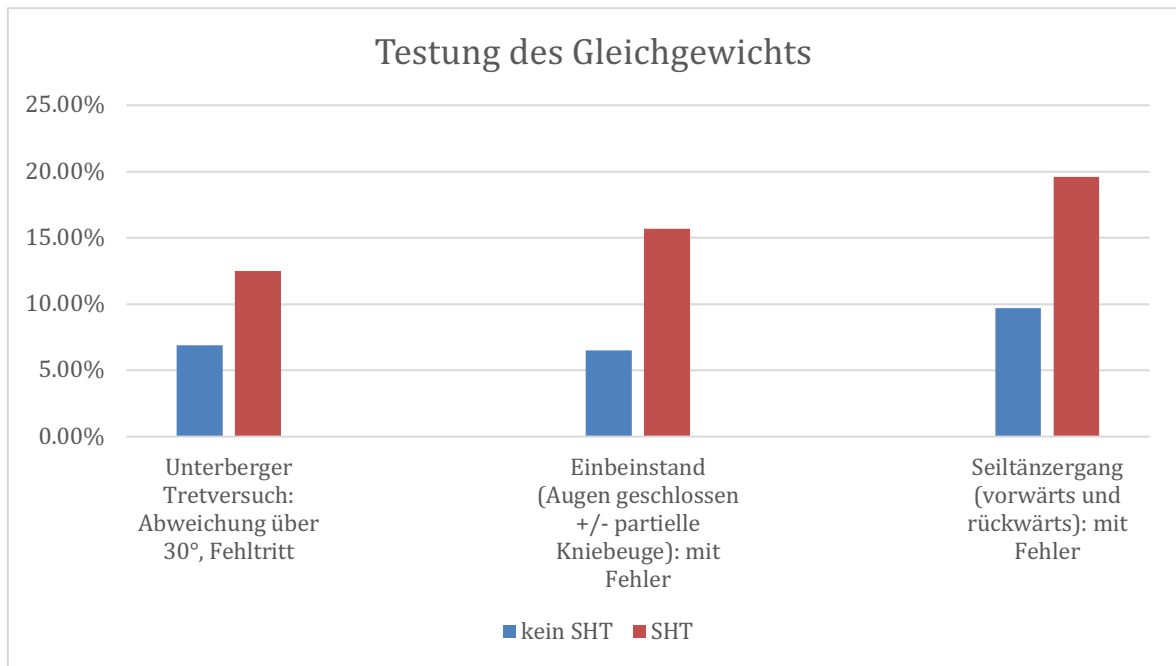


Abb. 10: Testung des Gleichgewichts

Die Testung des Unterberger Tretversuchs war bei 6,9% der Patient*innen ohne SHT und bei 12,5% der Patient*innen mit SHT auffällig. Bei der Untersuchung des Einbeinstands mit geschlossenen Augen zeigten 6,5% der Patient*innen ohne SHT und 15,7% der Patient*innen mit SHT einen pathologischen Befund. Bei der Prüfung des Seiltänzerengangs zeigten 9,7% der Patient*innen ohne SHT und 19,6% der Patient*innen einen auffälligen Befund (Abb.10).

3.5 Erhebung der Praktikabilität

Tabelle 11 zeigt die Erfahrungen der Teilnehmer*innen bezüglich der Untersuchung und erfasst, ob Nebenwirkungen aufgetreten sind, ob die Untersuchung als belastend empfunden wurde und ob die Teilnehmer*innen bereit wären, eine solche Untersuchung erneut durchzuführen.

Tabelle 11: Praktikabilität I

		Diagnose			
		kein SHT		SHT	
		Anzahl	Anzahl Spalten (%)	Anzahl	Anzahl Spalten (%)
Hatte die Untersuchung Nebenwirkungen?	nein	29	90,6%	43	86,0%
	ja	3	9,4%	7	14,0%
Wenn ja, welche?		29	90,6%	44	86,3%
	Augenbrennen, leichte Kopfschmerzen	1	3,1%	0	0,0%
	Die Blitze waren etwas anstrengend für die Augen	0	0,0%	1	2,0%
	kreislaufbelebend	0	0,0%	1	2,0%
	Nackenschmerzen	1	3,1%	0	0,0%
	Schwindel	0	0,0%	1	2,0%
	sehr anstrengend für die Augen, starke Kopfschmerzen	0	0,0%	1	2,0%
	Sicht war etwas verschwommen	0	0,0%	1	2,0%
	vermehrte Kopfschmerzen	0	0,0%	2	3,9%
	Übelkeit	1	3,1%	0	0,0%
Empfanden Sie die Untersuchung als belastend?	Nein	30	93,8%	45	90,0%
	Ja	2	6,3%	5	10,0%
Wenn ja, warum?		30	93,8%	47	92,2%

daher vorher neuropsycholo- gische Testung etwas anstrengend	0	0,0%	1	2,0%
Schmerzen an der Stirn	1	3,1%	0	0,0%

		Diagnose					
		kein SHT			SHT		
		Anzahl	Anzahl Spalten (%)	als ten	Anzahl	Anzahl Spalten (%)	als ten
unangenehm den Bewegungen mit den Augen zu folgen	1	3,1%		0	0,0%		
Ungewissheit und leichte Verwirrung	0	0,0%		1	2,0%		
Untersuchung verstärkt Kopf- schmerzen	0	0,0%		1	2,0%		
Würden Sie eine solche Un- tersuchung noch einmal durchführen lassen?	nein	4	12,5%	4	8,0%		
	ja	28	87,5%	46	92,0%		

Bei der Praktikabilität zeigen sich keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Patient*innen, welche ein SHT erlitten haben zu den Patient*innen, welche kein SHT erlitten haben.

Tabelle 12 zeigt die potenziellen Auswirkungen der Untersuchung und dem subjektiven Erleben durch die Patient*innen. Die erfassten Parameter sind Nebenwirkungen der Untersuchung, die Belastung durch die Untersuchung und die Bereitschaft, eine solche Untersuchung erneut durchführen zu lassen.

Tabelle 12: Praktikabilität II

	Diagnose			
	kein SHT		SHT	
	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)
Sonstige Anmerkungen:	28	87,5%	48	94,1%
Angst vor Blutentnahme	1	3,1%	0	0,0%
	Diagnose			
	kein SHT		SHT	
	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)	Anzahl	Anzahl als Spalten (%)
Bild wird im unteren Bereich unscharf. Die Grafik ist auf sehr niedrigem Niveau.	0	0,0%	1	2,0%
Eine sehr gute Alternative und besser als ein CT, wenn das Ergebnis genauso sicher ist.	0	0,0%	1	2,0%
keine	0	0,0%	1	2,0%
möchte nicht so lange sitzen / zu stressig	1	3,1%	0	0,0%
Unschärfe der Anweisungen als Brillenträger	1	3,1%	0	0,0%
war interessant	1	3,1%	0	0,0%

Die Fragen zur Praktikabilität wurden von den Untersuchten vorwiegend positiv beantwortet, was sich vor allem in einer niedrigen Häufigkeit von Nennungen unerwünschter Effekte bei Einsatz der Brille zeigt. So gaben 10 (12,2%) der Untersuchten an, Nebenwirkungen erlebt zu haben, 7 (8,5%) der Untersuchten empfanden den Einsatz der Brille als belastend. 8 (9,8%) der Untersuchten gaben an, diese oder eine ähnliche Untersuchung nochmal durchführen zu lassen.

3.6 Explorative Analyse der diagnostischen Testgenauigkeit der mittels ET/VR-Brille erfassten Parameter zur Diagnose eines leichten SHT

Tabelle 13 zeigt eine detaillierte Übersicht über verschiedene Parameter der Augenbewegungen der Patient*innen. Es werden spezifische Daten zu Lidschluss, Blinzelrate, Hauptsakkadenamplitude, Spitzengeschwindigkeit, Präzisionsfehler, Dauer der Wiederholung und weiteren Eigenschaften erfasst.

Tabelle 13: AUCs inklusive Standardfehler, p-Werten und Grenzen des 95% Konfidenzintervalls der mittels ET/VR- Brille erfassten Parameter

	Fläche	Std.-Fehler	Asympt. Signifikanz	Untergrenze Asympt. 95% KI	Obergrenze Asympt. 95% KI
Velo Horizontal Anzahl Lidschlüsse links/rechts	0,634	0,062	0,041	0,511	0,756
Velo Horizontal Blinzelrate [#s] links/rechts	0,630	0,063	0,048	0,507	0,752
Biflicker Hauptsakkadenamplitude [°] rechts/ Bif-licker Gain der Hauptsakkade [%] rechts	0,612	0,064	0,089	0,486	0,737
Velo Vertikal Durchschnitt Spitzengeschwindigkeit [°/s] links	0,400	0,067	0,125	0,269	0,530
Biflicker Vertikal V_max der Hauptsakkade [°/s] links	0,404	0,065	0,142	0,277	0,531
Biflicker Dauer der Hauptsakkade [ms] links	0,405	0,062	0,148	0,283	0,527
Biflicker Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°] rechts	0,589	0,065	0,172	0,462	0,717
Velo Vertikal Anzahl Sakkaden rechts	0,585	0,064	0,197	0,459	0,710
Velo Vertikal Anzahl Sakkaden links	0,584	0,064	0,202	0,458	0,710
Velo Horizontal Durchschnitt Spitzengeschwindigkeit [°/s] links	0,424	0,068	0,244	0,291	0,557
Biflicker Vertikal Trigger-Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°]	0,571	0,065	0,278	0,444	0,698
Biflicker V_max der Hauptsakkade [°/s] links	0,431	0,064	0,295	0,305	0,557
Biflicker Vertikal Blinzelrate [#s] links/rechts	0,567	0,063	0,303	0,444	0,691
Velo Horizontal Dauer der Wiederholung [ms]	0,566	0,066	0,310	0,438	0,695
Biflicker Vertikal Anzahl Lidschlüsse links/rechts	0,564	0,063	0,331	0,440	0,687
Biflicker Vertikal Anzahl Sakkaden links/rechts	0,437	0,064	0,335	0,311	0,563
Biflicker Dauer der Wiederholung [ms]	0,561	0,065	0,352	0,433	0,689
Velo Horizontal Durchschnittlicher Präzisionsfehler [°]rechts	0,444	0,063	0,392	0,320	0,568
Velo Horizontal Durchschnitt Spitzengeschwindigkeit [°/s]rechts	0,447	0,066	0,416	0,318	0,575

Biflicker Vertikal Dauer der Wiederholung [ms]	0,451	0,066	0,454	0,322	0,580
Biflicker Hauptsakkadenamplitude [°] links/ Biflicker Gain der Hauptsakkade [%] links	0,547	0,065	0,471	0,420	0,674
Velo Horizontal Durchschnittlicher Präzisionsfehler [°] links	0,454	0,064	0,486	0,329	0,580
Velo Vertikal Dauer der Wiederholung [ms]	0,456	0,065	0,507	0,330	0,583
Biflicker Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°] links	0,538	0,066	0,562	0,409	0,667
Biflicker Anzahl Sakkaden links	0,533	0,064	0,610	0,408	0,659
Biflicker Vertikal V_max der Hauptsakkade [°/s] rechts	0,467	0,069	0,617	0,332	0,603
Biflicker Vertikal Dauer der Hauptsakkade [ms] links/rechts	0,470	0,067	0,650	0,339	0,602
	Fläche	Std.-Fehler	Asympt. Signifikanz	Untergrenze Asympt. 95% KI	Obergrenze Asympt. 95% KI
Biflicker Vertikal Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°] rechts	0,527	0,065	0,677	0,399	0,655
Biflicker Latenz Hauptsakkade zum Trigger [ms] links	0,474	0,065	0,694	0,346	0,602
Biflicker Vertikal Gain der Hauptsakkade [%] rechts	0,475	0,067	0,698	0,343	0,606
Biflicker Vertikal Gain der Hauptsakkade [%] links	0,477	0,066	0,722	0,347	0,607
Velo Horizontal Durchschnittlicher Präzisionsfehler [°]rechts	0,444	0,063	0,392	0,320	0,568
Velo Horizontal Durchschnitt Spitzengeschwindigkeit [°/s]rechts	0,447	0,066	0,416	0,318	0,575
Biflicker Vertikal Dauer der Wiederholung [ms]	0,451	0,066	0,454	0,322	0,580
Biflicker Hauptsakkadenamplitude [°] links/ Biflicker Gain der Hauptsakkade [%] links	0,547	0,065	0,471	0,420	0,674
Velo Horizontal Durchschnittlicher Präzisionsfehler [°] links	0,454	0,064	0,486	0,329	0,580
Velo Vertikal Dauer der Wiederholung [ms]	0,456	0,065	0,507	0,330	0,583
Biflicker Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°] links	0,538	0,066	0,562	0,409	0,667
Biflicker Anzahl Sakkaden links	0,533	0,064	0,610	0,408	0,659
Biflicker Vertikal V_max der Hauptsakkade [°/s] rechts	0,467	0,069	0,617	0,332	0,603
Biflicker Vertikal Dauer der Hauptsakkade [ms] links/rechts	0,470	0,067	0,650	0,339	0,602
Biflicker Vertikal Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°] rechts	0,527	0,065	0,677	0,399	0,655

Biflicker Latenz Hauptsakkade zum Trigger [ms] links	0,474	0,065	0,694	0,346	0,602
Biflicker Vertikal Gain der Hauptsakkade [%] rechts	0,475	0,067	0,698	0,343	0,606
Biflicker Vertikal Gain der Hauptsakkade [%] links	0,477	0,066	0,722	0,347	0,607
Biflicker Vertikal Hauptsakkadenamplitude [°] links	0,478	0,066	0,736	0,349	0,607
Velo Vertikal Blinzelrate [#s]links	0,521	0,065	0,747	0,394	0,649
Velo Vertikal Blinzelrate [#s]rechts	0,521	0,065	0,747	0,394	0,649
	Fläche	Std.-Fehler	Asympt. Signifikanz	Untergrenze Asympt. 95% KI	Obergrenze Asympt. 95% KI
Biflicker Vertikal Hauptsakkadenamplitude [°] rechts	0,479	0,068	0,754	0,347	0,612
Velo Vertikal Anzahl Lidschlüsse links/rechts	0,521	0,065	0,754	0,393	0,648
Biflicker Vertikal Latenz Hauptsakkade zum Trigger [ms] links/rechts	0,519	0,065	0,775	0,390	0,647
Biflicker Richtungsfehler Prosakkade [%] rechts	0,517	0,067	0,793	0,386	0,649
Biflicker Vertikal Richtungsfehler Prosakkade [%] links	0,488	0,068	0,859	0,355	0,622
Velo Vertikal Durchschnittlicher Präzisionsfehler [°] links	0,490	0,064	0,881	0,364	0,616
Biflicker Vertikal Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°] links	0,509	0,065	0,896	0,381	0,636
Biflicker V_max der Hauptsakkade [°/s] rechts	0,508	0,069	0,899	0,373	0,644
Biflicker Trigger-Richtung bzgl. X-Achse im UZS. [°]	0,508	0,065	0,903	0,380	0,636
Velo Horizontal Anzahl Sakkaden links	0,493	0,066	0,918	0,365	0,622
Biflicker Richtungsfehler Prosakkade [%]links	0,494	0,068	0,925	0,361	0,626
Velo Horizontal Anzahl Sakkaden rechts	0,494	0,066	0,925	0,365	0,622
Biflicker Anzahl Lidschlüsse links/rechts	0,506	0,065	0,925	0,378	0,634
Velo Vertikal Durchschnittlicher Präzisionsfehler [°] rechts	0,505	0,069	0,944	0,369	0,640
Biflicker Blinzelrate [#s] links/rechts	0,504	0,065	0,948	0,376	0,633

Biflicker Vertikal Richtungsfehler Prosakkade [%] rechts	0,498	0,067	0,978	0,366	0,630
Velo Vertikal Durchschnitt Spitzengeschwindigkeit [°/s] rechts	0,502	0,066	0,978	0,373	0,630

Die Messwerte sind ursprünglich zweimal, d.h. am rechten und linken Auge, erhoben worden, die Messwertreihen ließen sich ohne Informationsverlust ineinander überführen. Allerdings sind auch hier die erzielten Genauigkeiten nur mäßig, die Punktschätzer ergeben AUCs, also die Wahrscheinlichkeit, ein Paar aus einem positiven und einem negativen Merkmalsträger korrekt zu klassifizieren, von ca. 0,63. Velo Horizontal Anzahl Lidschlüsse kommt dabei bei einer Sensitivität von 0,43 und einer Spezifität von 0,81 auf einen maximalen Youden Index von 0,24, Velo Horizontal Blinzelrate bei einer Sensitivität von 0,43 und einer Spezifität von 0,84 auf einen maximalen Youden Index von 0,28.

Tabelle 14 zeigt eine detaillierte Übersicht über verschiedene Parameter, die die Augenbewegungen und Lidschlussaktivitäten der Patient*innen messen.

Tabelle 14: Deskriptive Kennwerte der Parameter Velo Horizontal Anzahl Lidschlüsse links/rechts und Velo Horizontal Blinzelrate [#s] links/rechts

Diagnose			kein SHT		S H T	
			Statistik	Standard Fehler	Statistik	Standard Fehler
Velo Horizontal Anzahl Lidschlüsse	Mittelwert		2,19	0,900	3,71	0,765
	95% Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	0,35		2,17	
		Obergrenze	4,02		5,24	
	Median		0,00		1,00	
	Varianz		25,899		29,812	
	Standard Abweichung		5,089		5,460	
	Minimum		0		0	
	Maximum		22		22	
	Spannweite		22		22	
	Interquartilbereich		2		5	
	Schiefe		3,008	0,414	2,040	0,333
Kurtosis		8,874	0,809	3,846	0,656	
Velo Horizontal Blinzelrate [#s]	Mittelwert		0,1985	0,08162	0,3364	0,06940
	95% Konfidenzintervall des Mittelwerts	Untergrenze	0,0320		0,1970	

	Ober- grenze	0,3650		0,4758	
Median		0,0000		0,0908	
Varianz		0,213		0,246	
Standard Abweichung		0,46171		0,49563	
Minimum		0,00		0,00	
Maximum		2,00		2,00	
Spannweite		2,00		2,00	
Interquartilbereich		0,16		0,45	
Schiefe		3,008	0,414	2,040	0,333
Kurtosis		8,872	0,809	3,843	0,656

Zwei der 52 mittels Et/VR-Brille erfassten Parameter erreichten eine Signifikanz ($p < .05$) in der explorativen Testung der AUCs gegen die Diagonale: „Velo Horizontal Anzahl Lidschlüsse links/rechts“ und „Velo Horizontal Blinzelrate [#s] links/rechts“.

Im Folgenden ist eine ROC-Kurve der beiden Parameter aufgezeigt (Abb. 11 und Abb. 12). Auch ist eine Boxplot (Abb. 13 und Abb. 14) aufgeführt, um zu verdeutlichen, dass die Auffälligkeiten der beiden Parameter vermehrt bei Patient*innen mit SHT aufgetreten sind.

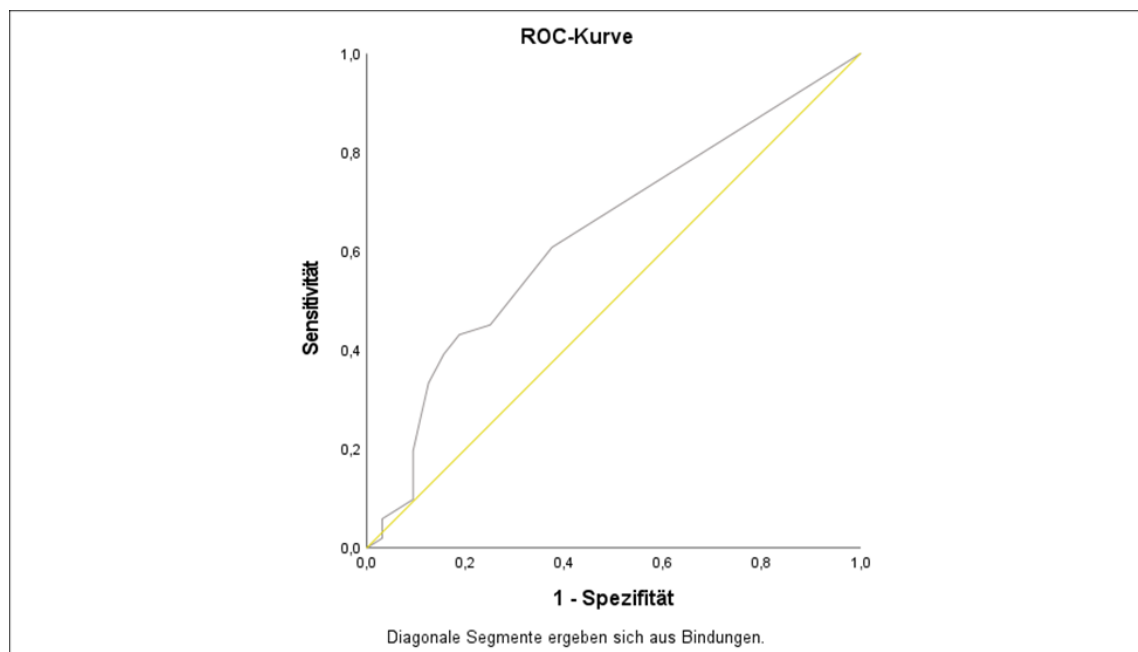


Abb. 11: ROC-Kurve des Parameters Velo Horizontal Anzahl Lidschlüsse links/rechts zur Diagnose eines SHT

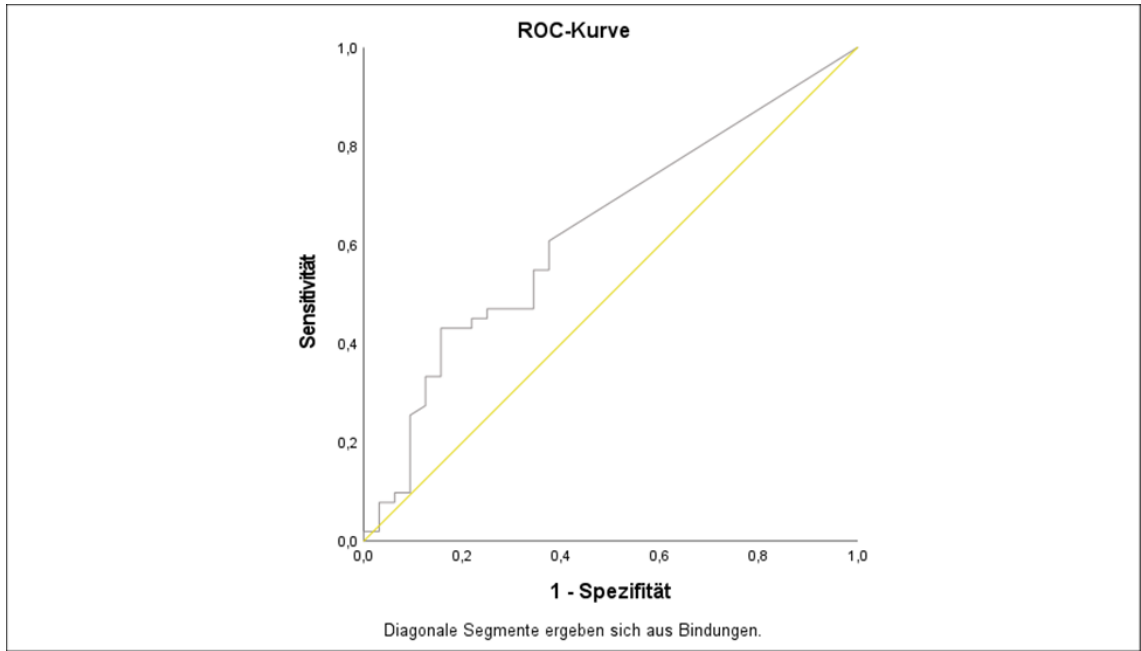


Abb. 12: ROC-Kurve des Parameters Velo Horizontal Blinzelrate [# /s] links/rechts zur Diagnose eines SHT

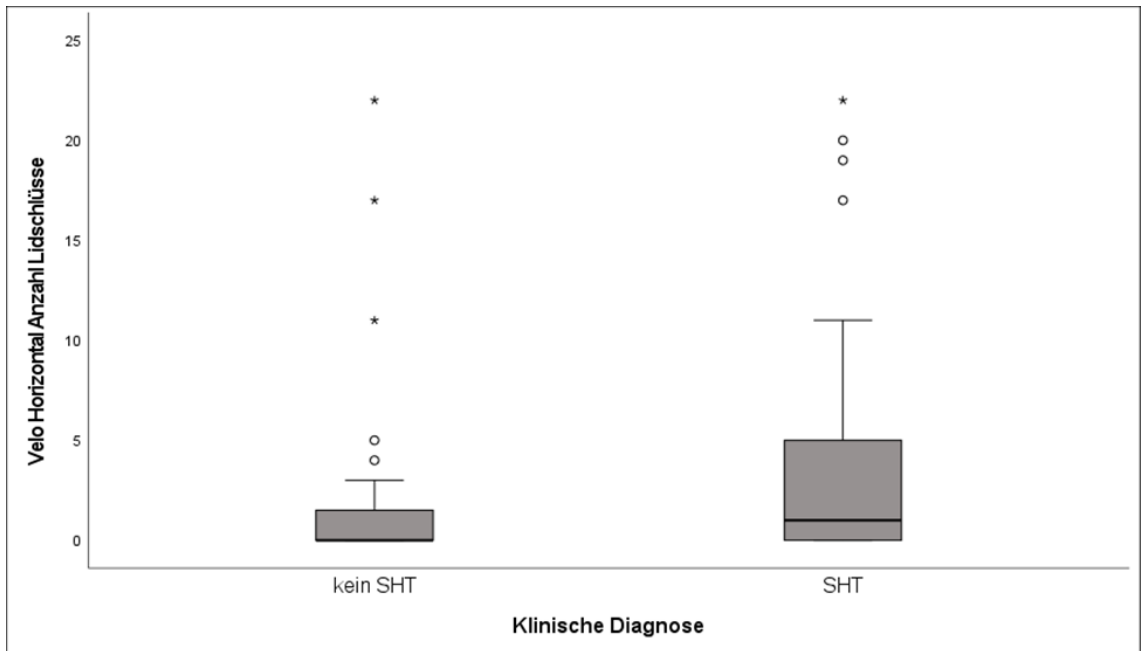


Abb. 13: Boxplot des Parameters Velo Horizontal Anzahl Lidschlüsse links/rechts

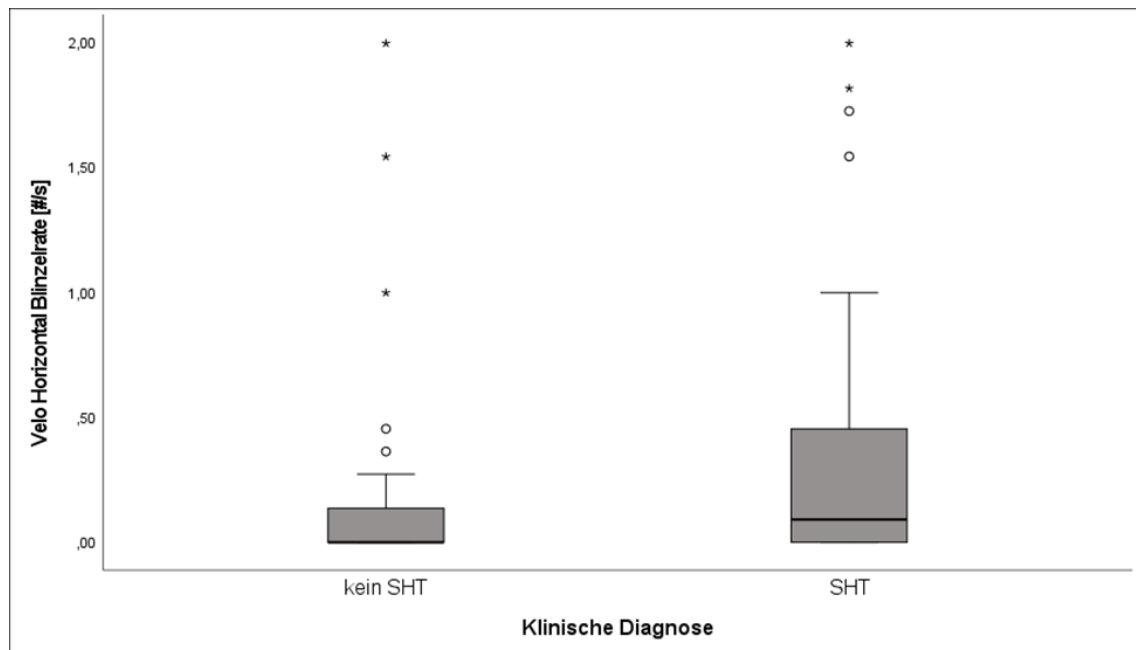


Abb. 14: Boxplot des Parameters Velo Horizontal Blinzelrate [#s] links/rechts

3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Patient:innen wurden in zwei Gruppen eingeteilt (SHT vs. nicht SHT).

Bei der Betrachtung der erfassten Daten fällt auf, dass der größte Anteil der Patient:innen in der Altersgruppe von 18-29 Jahren zu finden ist. Insbesondere der Anteil mit SHT ist in diesem Kollektiv am größten (Abb. 4). Das Durchschnittsalter in der kein SHT-Gruppe betrug 41 Jahre (SD=15) und in der SHT-Gruppe 39 Jahre (SD=15).

Zudem zeigt sich im Auftreten von Amnesie und Bewusstlosigkeit ein deutlicher Unterschied zwischen der Patient*innen, welche ein SHT erlitten haben zu denen, welche kein SHT erlitten haben, zu finden (Abb. 8).

Betrachtet man den SCAT 3-Fragebogen, so fällt die Verschlechterung der Symptome nach psychischer und/oder physischer Belastung vor allem bei Personen mit klinisch nachgewiesenen SHT auf (Abb. 9). Ansonsten sind die Ergebnisse der beiden Gruppen relativ ausgeglichen, wie in Tabelle 8 dargestellt.

Bei der Analyse des neurologischen Untersuchungsbefundes zeigt sich ein deutlicher Einfluss auf Gleichgewicht. Hier zeigt sich in signifikanter Unterschied bei der Testung des Unterberger Tretversuchs, der Untersuchung des Einbeinstands mit geschlossenen Augen und bei der Prüfung des Seiltänzergangs zeigten bei den Patient:innen ein auffälliger Befund (Abb. 10).

Während die Nutzung der ET/VR-Brille seitens der Untersuchten überwiegend unproblematisch zu sein scheint, bieten die Studienergebnisse angesichts der Ergebnisse zur diagnostischen Genauigkeit bzgl. der Detektion eines SHT keine Grundlage, auf der der Einsatz der Brille zu diesem Zweck empfehlenswert erscheint. Lediglich zwei der 52 analysierten Parameter sind statistisch von einer zufälligen Entscheidung zu unterscheiden, wobei beide nur mäßige diagnostische Kennwerte aufweisen. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass in dieser explorativen Studie keine α -Adjustierung vorgenommen wurde. Dass zwei von 52 Tests bei einem Signifikanzniveau von 5% je Test signifikant werden, wäre auch zu erwarten, wenn keiner der Parameter eine Assoziation zum Vorliegen eines SHT aufweist.

Bei allen anderen untersuchten Parametern wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

4. Diskussion

Das vermehrte Auftreten einer Schädelhirntrauma-Diagnose (SHT) in der Altersgruppe von 18 bis 29 Jahren sowie der erhöhte Anteil an männlichen Personen könnte durch eine gesteigerte Risikobereitschaft dieser Gruppen erklärt werden. Es konnte gezeigt werden, dass männliche Personen mehr als doppelt so häufig wie weibliche Personen von Unfällen betroffen waren [46]. Auch Personen im Alter von 17 bis 29 Jahren waren im Vergleich zu Personen über 50 Jahren doppelt so häufig von Unfällen betroffen. Dies zeigt, dass das erhöhte Unfallrisiko teilweise durch alters- und geschlechtsspezifische Unterschiede im risikobehafteten Verhalten erklärt werden kann.

Der hohe Prozentsatz an nachgewiesenen Fällen von Amnesie und Bewusstlosigkeit in der SHT-Gruppe lässt sich durch die intensivere Krafteinwirkung beim Trauma erklären. Schädelhirntraumata entstehen durch Unfälle, bei denen eine größere Menge an Energie auf den Kopf einwirkt, was zu schwereren neurologischen Symptomen wie Gedächtnisverlust und Bewusstseinsstörungen führt [1,29]. Zudem ist bei der Einteilung in die Gruppe SHT bereits eine erhöhte Beschwerdesymptomatik bei den Patient*innen vorhanden [40], sodass dies mit den zu beobachtbaren Ergebnissen gut zu erklären ist.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse zeigt sich ein signifikanter Unterschied in den Gleichgewichtstestungen zwischen der Gruppe mit Schädelhirntrauma (SHT) und der Gruppe ohne Schädelhirntrauma. Diese Unterschiede zeigen, dass ein Schädelhirntrauma einen deutlichen Einfluss auf die Gleichgewichtsfähigkeit der betroffenen Person hat [24]. Besonders auffällig war dies bei spezifischen Testverfahren wie dem Unterberger-Tretversuch, dem Einbeinstand mit geschlossenen Augen und dem Seiltänzerengang. Diese Tests erfordern eine hohe Stabilität und die Fähigkeit, das Gleichgewicht ohne visuelle Orientierung aufrechtzuerhalten. Die Ergebnisse zeigen noch einmal deutlich, wie wichtig eine spezifische und ausführliche Untersuchung bei den Patient*innen notwendig ist, um die Schwere eines SHT einschätzen zu können.

Die Ergebnisse der mittels ET/VR-Brille erhobenen Daten Studie zeigen, dass von den 52 analysierten Parametern nur zwei, nämlich "Velo Horizontal Number of Lid

Closures Left/Right" und "Velo Horizontal Blink Rate [#s] Left/Right", beim explorativen Test der AUCs gegen die Diagonale statistische Signifikanz ($p < 0,05$) erreichten. Dieses mäßige Ergebnis wird dadurch unterstrichen, dass die Punktschätzer, AUCs von etwa 0,63 ergeben, was auf eine begrenzte Trennschärfe hindeutet. Da es sich um eine explorative Studie handelt, wurde außerdem keine α -Anpassung vorgenommen, was die Wahrscheinlichkeit von Fehlern vom Typ I aufgrund von Mehrfachtests erhöht. Diese methodische Einschränkung könnte die unerwartete Signifikanz bei einer Untergruppe von Parametern erklären.

Zudem ist anzumerken, dass die bestehenden diagnostischen Kriterien für leichte traumatische Hirnverletzungen (mTBI) uneinheitlich sind, was zu den in unserer Studie beobachteten Problemen beiträgt. Die unterschiedlichen Terminologien und Methoden zur Phänotypisierung sowie die Heterogenität der Populationen in den verschiedenen Studien führen zu uneinheitlichen Klassifizierungen mit begrenzter klinischer Relevanz. Dies kann dazu führen, dass die tatsächlichen mTBI-Fälle im klinischen Umfeld falsch dargestellt werden. Als Beispiel kann hier die Studie von Pozzato et al. [34] genommen werden. Hier wurde festgestellt, dass nur bei 23 % der Patient*innen, die die Kriterien der Weltgesundheitsorganisation (WHO) erfüllten, eine mTBI diagnostiziert wurde, was darauf hindeutet, dass die tatsächliche Inzidenz der mTBI wahrscheinlich unterschätzt wird.

Darüber hinaus erschweren die breiteren und umfassenderen Diagnosekriterien für Gehirnerschütterungen, die weitgehend auf selbstberichteten Symptomen beruhen, die Unterscheidung zwischen Gehirnerschütterung und mTBI [27]. Diese Unklarheit bei der Klassifizierung könnte zu den Problemen in unserer Studie beigetragen haben und unterstreicht die Notwendigkeit standardisierter Diagnoseinstrumente und eines größeren Bewusstseins für die Pathologie der mTBI [27,34].

Eye-Tracking (ET) und Virtual-Reality-Technologie (VR) haben sich als potenzielle Diagnoseinstrumente zur Unterscheidung zwischen Gehirnerschütterung und mTBI erwiesen. Die Fähigkeit dieser Technologie, okulomotorische Funktionsstörungen zu erkennen, könnte den diagnostischen Prozess vereinfachen und eine weniger invasive Alternative zu herkömmlichen Neuroimaging-Methoden wie MRT- und CT-Scans darstellen [26,43].

Die Durchführung unserer Studie in einer Notaufnahme könnte unsere Ergebnisse

beeinflusst haben. Die stressige Umgebung in Verbindung mit einer akuten Schockreaktion, erhöhter Müdigkeit und der unvorhersehbaren Situationen, welche in einer Notaufnahme auftreten, könnte zu erheblichen Störvariablen geführt haben [50].

Frühere Studien haben gezeigt, dass stressbedingte Cortisolserhöhungen die Konnektivität und Funktion des Salience Network, Central Executive Network und das Default Mode Network beeinflussen können, die alle mit exekutiven Funktionen zusammenhängen [4,52]. Diese Veränderungen könnten sich wiederum auf okulomotorische Parameter auswirken, was unsere Unfähigkeit, konsistente Muster zu finden, erklären könnte.

Ein weiterer kritischer Faktor ist der Zeitpunkt unserer Untersuchungen. In früheren Studien wurden Anomalien der Okulomotorik festgestellt, wenn die Untersuchungen 3-14 Tage nach dem Trauma stattfanden [4,19,43,50].

Hoffer ME et al. [19] zeigten in ihrer Studie, dass sich klinische Symptome wie Kopfschmerzen, Schwindel und Hirnnebel innerhalb der ersten zwei Wochen nach dem Trauma normalisieren. Bei den durchgeführten Augenbewegungsanalysen konnten noch zwei Wochen nach dem Trauma Abnormitäten festgestellt werden. Auch Maruta J et al. [26] haben gezeigt, dass bei den Betroffenen noch Wochen später Abnormitäten im visuellen Tracking bestehen. Diese sind auch mit einer Beeinträchtigung der kognitiven Exekutivfunktionen verbunden, die mit den Fragebögen nicht valide erfasst werden können oder von Patient*innen nicht wahrgenommen werden.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass okulomotorische Defizite innerhalb der ersten 24 Stunden nach dem Trauma, dem Zeitrahmen unserer Studie, möglicherweise nicht sofort nachweisbar sind. Daher könnten spätere diagnostische Ansätze, die sich auf eine subakute Phase konzentrieren, andere Ergebnisse liefern.

In Anbetracht dieser Faktoren empfehlen wir für künftige Untersuchungen die Durchführung von Untersuchungen in unterschiedlichen Zeitintervallen nach dem Trauma, um die Auswirkungen stressbedingter Störfaktoren zu verringern. Darüber hinaus müssen standardisierte Diagnosekriterien und -methoden festgelegt

werden, um die Konsistenz und Zuverlässigkeit der mTBI-Diagnose zu erhöhen. Dies könnte zu einer genaueren Erkennung und besseren Ergebnissen für die Patient*innen in der klinischen Praxis führen.

5. Limitationen

Unsere Studie hat mehrere Einschränkungen, die angesprochen werden müssen.

Aufgrund der Corona-Pandemie musste die Studie unter strengen hygienischen Richtlinien durchgeführt werden. Auch stellte sich die Akquirierung von Patient:innen deutlich schwieriger dar, als zu Beginn der Studie von uns antizipiert. Zusammenfassend führte dies zu einer deutlich geringeren Patient:innenanzahl.

Die Verarbeitung der Rohdaten von der ET/VR-Brille in ein analysierbares Format einen unverhältnismäßig großen Aufwand. Zum Zeitpunkt der Datenerfassung verfügte die ET/VR-Brillensoftware bzw. deren Verwaltungssoftware nicht über integrierte Algorithmen zur automatischen Verarbeitung der Rohdaten. Dies erforderte eine manuelle Sortierung der EyeTrax-Rohdaten, die als Zeitreihendaten erfasst wurden. Die Daten mussten anhand der aufgezeichneten Augenvideos manuell in Lidschlüsse, Fixationen und Sakkaden sortiert werden. Dieser arbeitsintensive Prozess beeinträchtigte unsere Fähigkeit, die Daten effizient zu analysieren, erheblich und führte möglicherweise zu Fehlern bei der Annotation. Zukünftige Versionen der ET/VR-Brille und der zugehörigen Software sollten die Integration automatischer Datenverarbeitungsfunktionen in Betracht ziehen, sodass diese Problematiken nicht mehr auftreten.

Eine weitere wichtige Einschränkung ist, dass die ET/VR-Brille aus hygienischen und sicherheitstechnischen Gründen nicht bei Patient*innen mit offenen Schädelverletzungen eingesetzt werden konnte. Folglich wurde ein erheblicher Teil der Patient*innen von der Studie ausgeschlossen. Aus diesem Grund wurde die statistische Auswertung auf Patient*innen mit geschlossenen Kopfverletzungen beschränkt. Die Einbeziehung von Patient*innen mit offenen Schädelverletzungen hätte wertvolle Erkenntnisse gebracht, insbesondere bei der Untersuchung des möglichen Zusammenhangs zwischen äußeren Verletzungen, stärkeren mechanischen Reizen und nachfolgenden Schäden an den Gehirnstrukturen. Dieser Ausschluss schränkt daher die Verallgemeinerbarkeit unserer Ergebnisse auf eine breitere Gruppe von Patient*innen mit Schädel-Hirn-Traumata ein.

Außerdem gab es in unserer Studie keine gesunde Kontrollgruppe. Das Fehlen einer Kontrollgruppe bedeutet, dass wir unsere Ergebnisse nicht mit Daten aus

einer gesunden Bevölkerung vergleichen konnten. Stattdessen verglichen wir die Studienteilnehmer*innen, indem wir sie in zwei Untergruppen einteilten, die von zwei unabhängigen Experten anhand von ET/VR-basierten Biomarkern klassifiziert wurden. Das Fehlen einer gesunden Kontrollgruppe schränkt unsere Fähigkeit ein, die Genauigkeit und Spezifität unseres ET/VR-basierten diagnostischen Ansatzes bei der Unterscheidung zwischen Gehirnerschütterung und mTBI zu beurteilen. Künftige Studien sollten für aussagekräftigere Vergleiche die Einbeziehung einer Kontrollgruppe in Betracht ziehen.

Schließlich gab es Inkonsistenzen im Fragebogen, der während der Studie verwendet wurde. Als die Studie geplant und angefangen wurde, haben wir uns für die Verwendung des SCAT-3-Fragebogens entschieden. Während der Durchführung wurde der SCAT-5 veröffentlicht. Um die Konsistenz während der gesamten Studie aufrechtzuerhalten, entschieden wir uns dafür, weiterhin den SCAT-3 zu verwenden. Diese Entscheidung könnte sich aufgrund der Unterschiede zwischen den beiden Fragebögen auf die Ergebnisse ausgewirkt haben. Die Verwendung des SCAT-3 anstelle des SCAT-5 könnte die Interpretation der Ergebnisse und unsere Fähigkeit, uns an aktuellen klinischen Leitlinien zu orientieren, beeinflusst haben. Künftige Studien sollten die konsequente Verwendung aktueller Bewertungsinstrumente sicherstellen, um mögliche Verzerrungen durch veraltete Instrumente zu vermeiden.

6. Zusammenfassung

Das Ziel der Studie war die systematische Untersuchung von Point-of-Care-Biomarkern als diagnostische Indikatoren für die Erkennung und den Ausschluss eines leichten Schädel-Hirn-Trauma (mTBI) in einer Notaufnahme unter Verwendung von Eye-Tracking- und Virtual-Reality-Technologie (ET/VR).

Die primäre Zielgruppe umfasste Patient*innen, die ein akutes Kopftrauma erlitten hatten und sich innerhalb von 24 Stunden in der Notaufnahme vorstellten. Das Ziel war es, okulomotorische Biomarker auf ihre Eignung für die Diagnose von mTBI in einer konsekutiven Kohorte von Patient*innen zu untersuchen, die einer äußeren Krafteinwirkung ausgesetzt waren, und die Praktikabilität der Untersuchung mit ET/VR-Brillen in einer Notaufnahme zu testen. Das BG Unfallkrankenhaus Berlin und das BG Klinikum Hamburg nahmen an dieser explorativen prospektiven einarmigen Genauigkeitsstudie teil. In der Notaufnahme wurden Patient*innen mit Verdacht auf mTBI aufgenommen und mit ET/VR-Brillen untersucht. Alle weiteren Schritte entsprachen der klinischen Routine (z. B. Entscheidung über die Krankenhauseinweisung, bildgebende Diagnostik usw.). Die klinische Diagnose einer mTBI wurde nach Abschluss der Behandlung und ohne Kenntnis der Ergebnisse des Index-Tests (der Untersuchung mit ET/VR-Brillen) in Form einer klinischen Zusammenfassung durch den Konsens zweier unabhängiger klinischer Expert*innen gestellt. Die Diagnose basierte auf allen klinischen, neurologischen, neurofunktionellen, neuropsychologischen und bildgebenden Befunden. Zudem erfolgte eine routinemäßige Anamnese zu Traumata und neurologischen Vorerkrankungen. Alle statistischen Analysen erfolgten in explorativer Intention.

Die Verwendung von ET/VR-Brillen erwies sich überwiegend als unproblematisch. Zwei der 52 analysierten Parameter lassen sich statistisch von einer zufälligen Entscheidung unterscheiden. Es konnte kein Unterschied in den okulomotorischen Funktionen zwischen den beiden Untergruppen festgestellt werden. Es wurden keine Korrelationen zwischen den in den VR-Brillen aufgezeichneten Parametern und der Erkennung von mTBI gefunden.

Derzeit kann die Verwendung von VR-Brillen für die Diagnose von mTBI in einer Notaufnahme nicht empfohlen werden.

7. Literaturverzeichnis

1. Alexander MP. Mild traumatic brain injury: Pathophysiology, natural history, and clinical management. *Neurology*. 1. Juli 1995;45(7):1253–60.
2. Arneson D, Zhang G, Ying Z, Zhuang Y, Byun HR, Ahn IS, u. a. Single cell molecular alterations reveal target cells and pathways of concussive brain injury. *Nat Commun*. 25. September 2018;9(1):3894.
3. Capó-Aponte JE, Beltran TA, Walsh DV, Cole WR, Dumayas JY. Validation of Visual Objective Biomarkers for Acute Concussion. *Military Medicine*. 1. März 2018;183(suppl_1):9–17.
4. Chen J, Shi Y, Li N. The role of selective attention in emergency wayfinding: An eye tracking-integrated virtual reality experiment. *Safety Science*. Dezember 2023;168:106320.
5. Ciuffreda KJ, Kapoor N, Rutner D, Suchoff IB, Han ME, Craig S. Occurrence of oculomotor dysfunctions in acquired brain injury: A retrospective analysis. *Optometry - Journal of the American Optometric Association*. April 2007;78(4):155–61.
6. Cochrane GD, Christy JB, Almutairi A, Busettoni C, Swanson MW, Weise KK. Visuo-oculomotor Function and Reaction Times in Athletes with and without Concussion. *Optom Vis Sci*. April 2019;96(4):256–65.
7. DiCesare CA, Kiefer AW, Nalepka P, Myer GD. Quantification and analysis of saccadic and smooth pursuit eye movements and fixations to detect oculomotor deficits. *Behav Res*. Februar 2017;49(1):258–66.
8. Dougherty AL, MacGregor AJ, Han PP, Heltemes KJ, Galarneau MR. Visual dysfunction following blast-related traumatic brain injury from the battlefield. *Brain Injury*. Januar 2011;25(1):8–13.
9. Drew AS, Langan J, Halterman C, Osternig LR, Chou LS, van Donkelaar P. Attentional disengagement dysfunction following mTBI assessed with the gap saccade task. *Neuroscience Letters*. April 2007;417(1):61–5.
10. Edwards AWF. R.A. Fischer, statistical methods for research workers, first edition (1925). In: *Landmark Writings in Western Mathematics 1640-1940*. Elsevier; 2005. S. 856–70.
11. Fralick M, Thiruchelvam D, Tien HC, Redelmeier DA. Risk of suicide after a concussion. *CMAJ*. 19. April 2016;188(7):497–504.
12. Flanagan S. Traumatic brain injury: future assessment tools and treatment prospects. *NDT*. Oktober 2008;877.

13. Gaw CE, Zonfrillo MR. Emergency department visits for head trauma in the United States. *BMC Emerg Med.* Dezember 2016;16(1):5.
14. Hanley JA, McNeil BJ. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology* [Internet]. April 1982.
15. Heitger MH. Eye movement and visuomotor arm movement deficits following mild closed head injury. *Brain.* 7. November 2003;127(3):575–90.
16. Heitger MH, Anderson TJ, Jones RD. Saccade sequences as markers for cerebral dysfunction following mild closed head injury. In: *Progress in Brain Research* [Internet]. Elsevier; 2002. S. 433–48.
17. Heitger MH, Jones RD, Macleod AD, Snell DL, Frampton CM, Anderson TJ. Impaired eye movements in post-concussion syndrome indicate suboptimal brain function beyond the influence of depression, malingering or intellectual ability. *Brain.* 1. Oktober 2009;132(10):2850–70.
18. Hocke LM, Duszynski CC, Debert CT, Dleikan D, Dunn JF. Reduced Functional Connectivity in Adults with Persistent Post-Concussion Symptoms: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Study. *Journal of Neurotrauma.* Juni 2018;35(11):1224–32.
19. Hoffer ME, Balaban C, Szczupak M, Buskirk J, Snapp H, Crawford J, u. a. The use of oculomotor, vestibular, and reaction time tests to assess mild traumatic brain injury (mTBI) over time: OVRT Test to Assess mTBI. *Laryngoscope Investigative Otolaryngology.* August 2017;2(4):157–65.
20. Howell DR, Brilliant AN, Storey EP, Podolak OE, Meehan WP, Master CL. Objective Eye Tracking Deficits Following Concussion for Youth Seen in a Sports Medicine Setting. *J Child Neurol.* Oktober 2018;33(12):794–800.
21. Hunt AW, Mah K, Reed N, Engel L, Keightley M. Oculomotor-Based Vision Assessment in Mild Traumatic Brain Injury: A Systematic Review. *Journal of Head Trauma Rehabilitation.* Juli 2016;31(4):252–61.
22. Kelly KM, Kiderman A, Akhavan S, Quigley MR, Snell ED, Happ E, u. a. Oculomotor, Vestibular, and Reaction Time Effects of Sports-Related Concussion: Video-Oculography in Assessing Sports-Related Concussion. *Journal of Head Trauma Rehabilitation.* Mai 2019;34(3):176–88.
23. Lefevre-Dognin C, Cogné M, Perdrieau V, Granger A, Heslot C, Azouvi P. Definition and epidemiology of mild traumatic brain injury. *Neurochirurgie.* Mai 2021;67(3):218–21.
24. Lin LF, Liou TH, Hu CJ, Ma HP, Ou JC, Chiang YH, u. a. Balance function and sensory integration after mild traumatic brain injury. *Brain Injury* [Internet]. 2. Januar 2015;29(1):41–6.
25. Marin JR, Weaver MD, Yealy DM, Mannix RC. Trends in Visits for Traumatic

- Brain Injury to Emergency Departments in the United States. *JAMA*. 14. Mai 2014;311(18):1917.
26. Maruta J, Spielman LA, Rajashekar U, Ghajar J. Association of Visual Tracking Metrics With Post-concussion Symptomatology. *Front Neurol*. 26. Juli 2018;9:611.
 27. Mayer AR, Quinn DK, Master CL. The spectrum of mild traumatic brain injury: A review. *Neurology*. 8. August 2017;89(6):623–32.
 28. McAllister TW, Arciniegas D. Evaluation and treatment of postconcussive symptoms. *NeuroRehabilitation*. 2002;17(4):265–83.
 29. Mckee AC, Daneshvar DH. The neuropathology of traumatic brain injury. In: *Handbook of Clinical Neurology* [Internet]. Elsevier; 2015 [zitiert 19. Juli 2023]. S. 45–66. Verfügbar unter: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444528926000040>
 30. Michelson E, Huff S, Loparo M, Naunheim R, Perron A, Rahm M, u. a. Emergency Department Time Course for Mild Traumatic Brain Injury Workup. *WestJEM*. 29. Juni 2018;19(4):635–40.
 31. Mullen SJ, Yücel YH, Cusimano M, Schweizer TA, Oentoro A, Gupta N. Saccadic Eye Movements in Mild Traumatic Brain Injury: A Pilot Study OPEN ACCESS. *Can J Neurol Sci*. Januar 2014;41(1):58–65.
 32. Patricios JS, Schneider KJ, Dvorak J, Ahmed OH, Blauwet C, Cantu RC, u. a. Consensus statement on concussion in sport: the 6th International Conference on Concussion in Sport–Amsterdam, October 2022. *Br J Sports Med*. Juni 2023;57(11):695–711.
 33. Powell JM, Ferraro JV, Dikmen SS, Temkin NR, Bell KR. Accuracy of Mild Traumatic Brain Injury Diagnosis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. August 2008;89(8):1550–5.
 34. Pozzato I, Meares S, Kifley A, Craig A, Gillett M, Vu KV, u. a. Challenges in the acute identification of mild traumatic brain injuries: results from an emergency department surveillance study. *BMJ Open*. Februar 2020;10(2):e034494.
 35. Rickels E, von Wild K, Wenzlaff P. Head injury in Germany: A population-based prospective study on epidemiology, causes, treatment and outcome of all degrees of head-injury severity in two distinct areas. *Brain Injury*. November 2010;24(12):1491–504.
 36. Rowe BH, Eliyahu L, Lowes J, Gaudet LA, Beach J, Mrazik M, u. a. Concussion diagnoses among adults presenting to three Canadian emergency departments: Missed opportunities. *The American Journal of Emergency Medicine*. Dezember 2018;36(12):2144–51.
 37. Shenton ME, Hamoda HM, Schneiderman JS, Bouix S, Pasternak O, Rathi Y, u. a. A review of magnetic resonance imaging and diffusion tensor imaging findings in

- mild traumatic brain injury. *Brain Imaging and Behavior*. Juni 2012;6(2):137–92.
38. Shinoda Y, Takahashi M, Sugiuchi Y. Brainstem neural circuits for fixation and generation of saccadic eye movements. In: *Progress in Brain Research* [Internet]. Elsevier; 2019 [zitiert 19. Juli 2023]. S. 95–104. Verfügbar unter: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079612319300834>
 39. Sikorski F, Güthoff C. Biomarker in der Diagnostik leichter Schädel-Hirn-Traumata durch Nutzung der Eye-Tracking und Virtual Reality Technik. August 2023. <https://www.dguv.de/ifa/forschung/projektverzeichnis/ff-fr0299.jsp>
 40. Silverberg ND, Iverson GL, Cogan A, Dams-O'Connor K, Delmonico R, Graf MJP, u. a. The American Congress of Rehabilitation Medicine Diagnostic Criteria for Mild Traumatic Brain Injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. August 2023;104(8):1343–55.
 41. Slobounov S, Slobounov E, Newell K. Application of Virtual Reality Graphics in Assessment of Concussion. *CyberPsychology & Behavior*. April 2006;9(2):188–91.
 42. Stein MB, Jain S, Giacino JT, Levin H, Dikmen S, Nelson LD, u. a. Risk of Posttraumatic Stress Disorder and Major Depression in Civilian Patients After Mild Traumatic Brain Injury: A TRACK-TBI Study. *JAMA Psychiatry*. 1. März 2019;76(3):249.
 43. Stuart S, Hickey A, Vitorio R, Welman K, Foo S, Keen D, u. a. Eye-tracker algorithms to detect saccades during static and dynamic tasks: a structured review. *Physiol Meas*. 26. Februar 2019;40(2):02TR01.
 44. Sussman ES, Ho AL, Pendharkar AV, Ghajar J. Clinical evaluation of concussion: the evolving role of oculomotor assessments. *FOC*. April 2016;40(4):E7.
 45. Theadom A, Starkey N, Barker-Collo S, Jones K, Ameratunga S, Feigin V, u. a. Population-based cohort study of the impacts of mild traumatic brain injury in adults four years post-injury. Sharma P, Herausgeber. *PLoS ONE*. 31. Januar 2018;13(1):e0191655.
 46. Turner C, McClure R. Age and gender differences in risk-taking behaviour as an explanation for high incidence of motor vehicle crashes as a driver in young males. *Injury Control and Safety Promotion* [Internet]. September 2003;10(3):123–30.
 47. Ventura RE, Jancuska JM, Balcer LJ, Galetta SL. Diagnostic Tests for Concussion: Is Vision Part of the Puzzle? *Journal of Neuro-Ophthalmology*. März 2015;35(1):73–81.
 48. Wadhwa RR, Marappa-Ganeshan R. T Test. In: *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024.
 49. Wright WG, McDevitt J, Tierney R, Haran FJ, Appiah-Kubi KO, Dumont A. Assessing subacute mild traumatic brain injury with a portable virtual reality balance device. *Disability and Rehabilitation*. 17. Juli 2017;39(15):1564–72.

50. Yaribeygi H, Panahi Y, Sahraei H, Johnston TP, Sahebkar A. The impact of stress on body function: a review. EXCLI Journal; 16:Doc1057; ISSN 1611-2156 [Internet]. 2017;
51. Youden WJ. Index for rating diagnostic tests. Cancer. 1950 ;3(1):32–5.
52. Zhang W, Hashemi MM, Kaldewaij R, Koch SBJ, Beckmann C, Klumpers F, u. a. Acute stress alters the ‘default’ brain processing. NeuroImage. April 2019;189:870–7.
53. Zweig MH, Campbell G. Receiver-operating characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine. Clin Chem. April 1993;39(4):561–77.

8. Anhang



Technical Specifications

HTC Vive	
Screen	Dual AMOLED 3.6" diagonal
Resolution	1080x1200 pixels per eye
Refresh rate	90 Hz
Field of view	110 degrees
Sensors	SteamVR Tracking, G-sensor, gyroscope, proximity
Tracking	Full roomscale through Lighthouse (5x5 m²)
Head tracking	360 degrees
Weight	470 grams
Connectivity	HDMI 1.4 or DP 1.2, 1x USB 3.0
Cable length	5m (+1m for LinkBox)
Size	190 x 127 x 89-127 mm
Interpupillary Distance	60.6-74.0 mm

Eye Tracking	
Frequency	120 Hz per eye
Resolution	640x480 pixels per eye
Tracking precision	~0.08 degrees
Tracking accuracy	~1.0 degree
Required space	Up to 1 GB per measurement
Duration	10 mins to set up, 2-3 mins per measurement
Power	Up to 200 watts
Illumination	IR-LED (~850 nm), 10-25 mW/sr per diode

World Cam	
Video rate	30 Hz
Resolution	max 1920x1080 pixels
Connectivity	1x USB 2.0

eyeTrax Workstation	
Screen	23" (58,4 cm) Full HD (1920x1080) Non-Glare 120Hz 5ms
CPU	Intel® Core i5-8400, 6 Cores, 2,80 GHz
GPU	NVIDIA® GeForce® GTX 1660 6GB GDDR5
RAM	16 GB
Storage	500 GB SSD + 1 TB HDD
USB	2x USB-C 3.1, 3x USB-A 3.0
Video	2x Mini-DP 1.4, 1x HDMI 2.0
Audio	Mic In, 2-in-1 Out (S/PDIF)
Connectivity	LAN, WIFI Intel® Dualband

9. Danksagung

Die Danksagung am Ende der Arbeit ist nicht so einfach wie ich es mir initial vorgestellt habe. Über die letzten Jahre waren so viele Menschen an der Fertigstellung beteiligt, dass es wirklich schwierig erscheint, unterwegs niemanden zu vergessen oder an einer Stelle zu nennen, die den Eindruck erwecken könnte, als nicht so wichtig gesehen zu werden. Also bitte verzeiht, wenn dieser Eindruck entstehen sollte er ist definitiv nicht gewollt.

Zuerst möchte ich Herrn Dr. Andreas Gonschorek danken, welcher mir die Möglichkeit gegeben hat in seiner Abteilung zu arbeiten und mir die Freiheiten gegeben, hat mich intensiv mit der Thematik und Notwendigkeit einer verbesserten SHT-Diagnostik im klinischen Alltag zu beschäftigen. Auch möchte ich Ihm für die produktive Kritik danken, die er mir in den vielen Gesprächen und Notizen gegeben hat.

Ein besonderer Dank gilt meinem Team im Neurozentrum und der Notaufnahme des BG-Klinikum Hamburg, die dabei geholfen haben, in ihrem stressigen Alltag der Notaufnahme noch die Kapazitäten aufzubringen, Patient:innen zu identifizieren und sie der Studie zuzuführen. Ebenfalls möchte ich an dieser Stelle den Kolleg:innen des Unfallkrankenhauses Berlin danken, welche ebenfalls maßgeblich an der Zuführung der Patient:innen beteiligt waren.

Dankeschön auch an das Team von EyeTrax, insbesondere Herrn Sebastian Weidner, welcher mir bei technischen Problemen jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

Vielen Dank auch an meinen Doktorvater Herrn Prof. Dr. Arndt Peter Schulz, welcher mir mit seiner direkten und klaren Art geholfen hat, eine gute Struktur zu erarbeiten und mir auch für zukünftige wissenschaftliche Arbeiten eine gute Grundlage mitgegeben hat. In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch ausdrücklich bei Frau Dr. Birgitt Kowald bedanken, welche mir bei der Formatierung und dem Aufbau geholfen hat und mir so in den letzten Schritten täglich neue Motivation mit produktiven Vorschlägen gegeben hat.

Auch möchte ich an dieser Stelle erwähnen, dass die statistische Aufarbeitung gemeinsam mit Dipl.-Psych. Claas Güthoff (Unfallkrankenhaus Berlin) sowie Dr. rer. hum. biol. Birgitt Kowald (Unfallkrankenhaus Hamburg) durchgeführt wurde. Hierfür möchte ich mich nochmals ausdrücklich bedanken.

Zuletzt möchte ich Eléna Weiss danken. Mit ihrer herzlichen und liebevollen Art hat sie mir Zuversicht zugesprochen und mir immer wieder Kraft und Motivation gegeben, mit der Arbeit weiterzumachen. Ohne sie wäre die Arbeit nicht entstanden. Dafür bin ich ihr sehr dankbar.

10. Lebenslauf

Name: Felix Sikorski

Alter : 37

Promotion:

2021 - 2026 Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universität zu Lübeck und dem BG Klinikum Hamburg Zentrum für klinische Forschung.
Thema: *Untersuchung der Eye-Tracking und Virtual-Reality-Technik mittels VR-Brille in der Diagnostik leichter Schädel-Hirn-Traumata.*

Beruflicher Werdegang:

Seit 2025 Universitäre psychiatrische Dienste Bern, Kinder- und
Jugendpsychiatrie, Kinder- und Jugendforensik
Assistenzarzt

04 / 2024 Facharzt für physikalische und rehabilitative Medizin

2021-2024 BG-Klinikum Hamburg, Neurozentrum, Neurotraumatologie,
Neurologie, Sportneurologie
Assistenzarzt

2017-2020 BG-Klinikum Hamburg, Fachbereich Rehabilitationsmedizin /
interdisziplinäre Sportmedizin
Assistenzarzt

2017 HELIOS Endo-Klinik Hamburg, Fachbereich Orthopädie
Assistenzarzt

2014-2016 Universitätsmedizin Mainz, Institut für Neuroradiologie
Wissenschaftliche Hilfskraft

2012-2014 Die Radiologen Mainz, Gemeinschaftspraxis für Radiologie
Studentische Hilfskraft

2011-2012 Radiomed Wiesbaden, Gemeinschaftspraxis für Radiologie
Studentische Hilfskraft

2010 Sportgarten Bremen e.V
Aufbau einer Kindereinrichtung in Durban, Südafrika

Universitäre Ausbildung:

2010-2016 Johannes-Gutenberg-Universität Mainz
Studium der Humanmedizin

Praktisches Jahr:

2015-2016 Groote-Schuur-Hospital, Kapstadt, Südafrika
1. *Tertial in der Chirurgie / Traumatologie*

2016 Marienkrankenhaus Hamburg, Hamburg
2. *Tertial in der Anästhesiologie*

2016 Marienkrankenhaus Hamburg, Hamburg
3. *Tertial in der Inneren Medizin*

Famulaturen:

2015 BGU Murnau,
Orthopädie / Unfallchirurgie

2014 Universitätsmedizin Mainz,
Neuroradiologie

2014 Gemeinschaftspraxis „Die Radiologen“ Mainz,
Radiologie

2013 Tonga District Hospital, Südafrika,
Notaufnahme/Chirurgie

2009-2010 Eberhardt Karls-Universität Tübingen
Internationale VWL und Biologie

Schulbildung:

2005-2008 Gymnasiale Oberstufe am Leinplatz, Bremen
Allgemeine Hochschulreife

1999-2005 Gesamtschule Bremen-Mitte, Bremen