Artikel online veröffentlicht: 02.05.2023



# Interaktion von Hör- und Gleichgewichtssinn

## Interaction of Hearing and Balance

OPEN ACCESS

**Autor**
**Ingmar Seiwerth**

**Institute**
Universitätsklinik und Poliklinik für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Kopf- und Hals-Chirurgie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Universitätsklinikum Halle (Saale), Halle (Saale), Deutschland

**Schlüsselwörter**
Hören, Gleichgewichtskontrolle, Posturographie, Hörrehabiliation, Cochlea-Implantat

**Key words**
Audition, postural control, posturography, hearing rehabilitation, cochlear implant

**Bibliografie**
Laryngo-Rhino-Otol 2023; 102: S35–S49
**DOI** 10.1055/a-1960-4641
**ISSN** 0935-8943
© 2023. The Author(s).

This is an open access article published by Thieme under the terms of the Creative Commons Attribution-NonDerivative-NonCommercial-License, permitting copying and reproduction so long as the original work is given appropriate credit. Contents may not be used for commecial purposes, or adapted, remixed, transformed or built upon. (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Georg Thieme Verlag, Rüdigerstraße 14,
70469 Stuttgart, Germany

**Korrespondenzadresse**
Dr. med. Ingmar Seiwerth
Universitätsklinik und Poliklinik für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Kopf- und Hals-Chirurgie
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg,
Universitätsklinikum Halle, Halle (Saale)
Ernst-Grube-Str. 40
06120 Halle (Saale)
Deutschland
ingmar.seiwerth@uk-halle.de

### ZUSAMMENFASSUNG

Es mehren sich zunehmend Hinweise, dass neben visuellen, vestibulären und somatosensorischen Afferenzen auch das Hören eine Rolle bei der Regulation des Gleichgewichts einnimmt. So scheint, insbesondere im Alter, ein progredienter Hörverlust auch mit einer Abnahme der Stabilität einherzugehen. Mehrere Studien untersuchten diesen Zusammenhang bei Normalhörenden, bei Patienten mit konventionellen Hörgeräten sowie nach Versorgung mit implantierbaren Hörsystemen wie auch bei Patienten mit vestibulären Störungen. Trotz der inhomogenen Datenlage und fehlenden Evidenz scheint das Hören mit dem Gleichgewichtsystem zu interagieren mit dem Potential, stabilisierend zu wirken. Es konnten darüber hinaus Erkenntnisse hinsichtlich audiovestibulärer Interaktionsmechanismen gewonnen werden, welche möglicherweise zukünftig in therapeutische Aspekte bei vestibulären Erkrankungen einfließen könnten. Es sind jedoch weitere prospektive kontrollierte Studien erforderlich, um diese Fragestellung auf evidenzbasiertes Niveau zu führen.

### ABSTRACT

There is increasingly assumed that, in addition to visual, vestibular and somatosensory afferents, hearing also plays a role in the regulation of balance. It seems that, especially in old age, progressive hearing loss is associated with a decrease in postural control. Several studies investigated this relationship in normal-hearing people, in patients with conventional hearing aids and with implantable hearing systems, as well as in patients with vestibular disorders. Despite the inhomogeneous study situation and lack of evidence, hearing seems to interact with the balance regulation system with potentially stabilizing effect. Furthermore, insights into audiovestibular interaction mechanisms could be achieved, which could possibly be integrated into therapeutic concepts of patients with vestibular disorders. However, further prospective controlled studies are necessary to bring this issue to an evidence-based level.

**Inhaltsverzeichnis**

| | | |
|---|---|---|
| | Zusammenfassung | S35 |
| | Abstract | S35 |
| 1. | Einleitung | S36 |
| 2. | Anatomie und Physiologie | S36 |
| 3 . | Zusammenhang zwischen Hörverlust und Gleichgewicht | S37 |
| 4 . | Hören und Gleichgewicht in prospektiven Studien | S37 |
| 4.1 | Interaktion von Hören und Gleichgewicht bei Normalhörenden | S38 |

4.1.1 Stabilisierender Effekt auditorischer Reize S38
4.1.2 Kein Einfluss auditorischer Reize auf das Gleichgewicht S39
4.1.3 Destabilisierender Effekt auditorischer Reize S39
5. Interaktion von Hören und Gleichgewicht bei Patienten mit Schwerhörigkeit S40
5.1 Einfluss der Hörrehabilitation mittels Hörgeräten auf das Gleichgewicht S40
5.2 Einfluss der Hörrehabilitation mittels aktiver Mittelohr- und Knochenleitungsimplantate auf das Gleichgewicht S41
5.3 Einfluss der Hörrehabilitation mittels Cochlea Implantat auf das Gleichgewicht S41
6. Interaktion von Hören und Gleichgewicht bei Patienten mit Gleichgewichtsstörungen S42
7. Erklärungsansätze für Mechanismen der audiovestibulären Interaktion S43
7.1 Auditorische Landmarken S43
7.2 Stochastische Resonanz S43
7.3 Umgewichtung posturaler Subsysteme S43
7.4 Hörverlust und Gleichgewicht im Alter S44
8. Einflussfaktoren bei Studien zu Hören und Gleichgewicht S44
8.1 Studiendesign und Studienpopulation S44
8.2 Messverfahren zur Quantifizierung der posturalen Stabilität S44
8.3 Auditorisches Umfeld S44
8.3.1 Schallpräsentation S44
8.3.2 Schallqualität S44
8.4 Schlussfolgerung und Ausblick S47
9. Danksagung S47
Literatur S47


## 1. Einleitung

Die Regulation des Gleichgewichts wird durch komplexe Verarbeitungsprozesse afferenter sensorischer Informationen der peripheren Vestibularorgane, des visuellen Systems sowie der propriozeptiven Sensoren gewährleistet [1]. Während beim gesunden Menschen die Regulation des Gleichgewichts weitestgehend im Hintergrund erfolgt, wird deren Bedeutung in der Regel erst dann deutlich, wenn es in einem dieser sensorischen Systeme zu einem inadäquaten bzw. unterbrochenen Informationsfluss kommt, was sich beispielsweise bei einer akuten Pathologie des peripheren Gleichgewichtssystems als Schwindel und Erbrechen klinisch manifestiert. Auch bei einem Wegfall der visuellen Achse, wie es bei Dunkelheit der Fall ist, zeigt sich ein erhöhtes Sturzrisiko, was besonders deutlich bei einer zusätzlichen Schädigung der anderen beiden Säulen der Fall ist wie beispielsweise bei einem vorgeschädigten peripheren Vestibularorgan oder bei zusätzlicher Unebenheit des Bodens.

In den letzten Jahren wurde zunehmend die Fragestellung untersucht, inwieweit auditive Informationen auf der afferenten Seite ebenfalls zur Gleichgewichtsregulierung beitragen, und ob das Hörorgan gar als vierte Säule der posturalen Regulation zu werten ist. Allein die anatomische Nähe wie auch physiologische Schnittstellen können eine Interaktion zwischen dem Hör- und Gleichgewichtsorgan vermuten lassen. Dennoch wurde dieser Zusammenhang bisher wenig untersucht, auch wenn sich in den letzten Jahren immer mehr Arbeitsgruppen mit dieser Fragestellung beschäftigten. Ob der Einfluss des Hörens auf das Gleichgewicht eher stabilisierend oder destabilisierend wirkt, und in welchem Maße das Hören in Relation zu den anderen sensorischen Säulen bei der posturalen Regulation eine Rolle spielt, kann nicht pauschal beantwortet werden und erfordert eine differenzierte Betrachtung der jeweiligen Situation unter Berücksichtigung der komplexen sensorischen Interaktionsmechanismen.

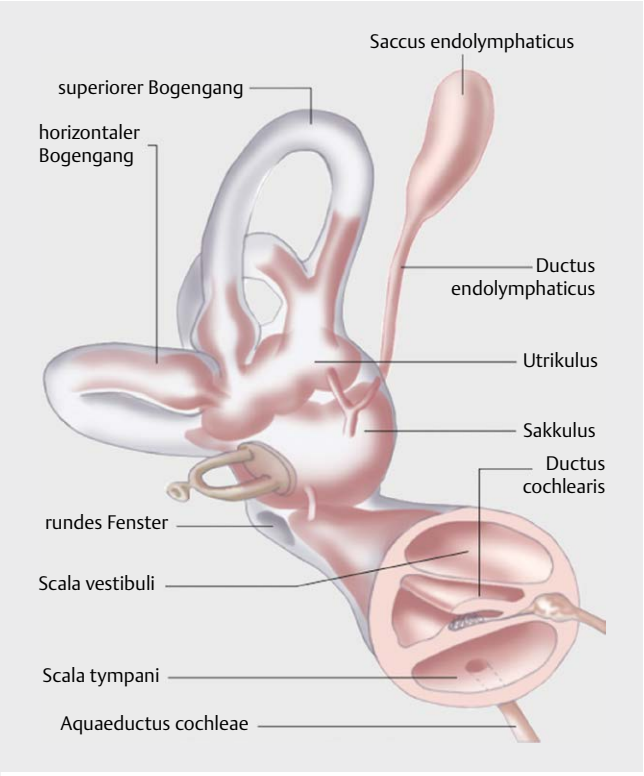
Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen Überblick über dieses Themengebiet mit Erläuterung der anatomischen und physiologischen Zusammenhänge zu schaffen unter Berücksichtigung der aktuellen Studienlage. Zudem soll der Zusammenhang zwischen Hören und Gleichgewicht im Hinblick auf die klinische Bedeutung beleuchtet werden.

## 2. Anatomie und Physiologie

Das Hörorgan, bestehend aus der Cochlea, und das Vestibularorgan, bestehend aus Utrikulus, Sacculus und den drei Bogengängen, sind als Bestandteile des Innenohres anatomisch eng miteinander verbunden, was auch eine funktionelle Interaktion vermuten lässt (▶ **Abb. 1**). Während in der Cochlea auditorische Reize zu Höreindrücken verarbeitet werden, erfasst das Vestibularorgan Änderungen der Position des Kopfes im Raum in Form von Drehbeschleunigungen (Bogengänge) und linearen Beschleunigungen (Otolithenorgane: vertikal: Sacculus, horizontal: Utriculus).

Entwicklungsgeschichtlich betrachtet waren die Otolithenorgane auch als Hörorgane funktionabel: So sind die Maculaorgane bei Fischen neben der Registrierung von Linearbeschleunigungen auch für die Erfassung von Höreindrücken zuständig, was insbesondere Sacculus und Lagena, ein bei Fischen vorkommendes drittes Maculaorgan, betrifft [2].

Auch wenn die akustische Empfindlichkeit der Maculaorgane beim Menschen nur noch rudimentär vorhanden ist, und die Evolution trotz der anatomischen Verbundenheit für eine weitestgehend unabhängige Arbeitsweise des Hör- und des Gleichgewichtsorgans gesorgt hat [3], so lässt sich diese dennoch zu diagnostischen Zwecken nutzen: Eine Stimulation der Otolithenorgane durch Schall, Vibration oder galvanische Reizung kann einen vestibulären Reflex auslösen, welcher durch Erfassung vestibulär evozierter myogener Potentiale (VEMPs) objektivierbar ist [4]. Bei einer überschwelligen Stimulation mit z. B. 500 Hz-Reizen über Luft- oder




▶ **Abb. 1** Schematische Darstellung des häutigen Labyrinths (Quelle: Strutz J, Mann W. Praxis der HNO-Heilkunde, Kopf- und Halschirurgie. Stuttgart: Thieme, 3. Auflage, 2017: 15).

Knochenleitung können entsprechend der neuronalen Projektionen von Sacculus und Utriculus Potentiale mittels Elektroden an der kontralateralen Augenmuskulatur (oVEMPS bei Utriculus) oder dem ipsilateralen Musculus sternocleidomastoideus (cVEMPS bei Sacculus) abgeleitet und die Funktion der Makulaorgane beurteilt werden. An der Signalübertragung akustischer Reize sind überwiegend Typ I Rezeptoren beteiligt, während wiederum Typ II Rezeptoren überwiegend für die Kodierung linearer Beschleunigungsstimuli zuständig sind [2, 4, 5].

Ein Zusammenhang zwischen Cochlea und Sacculus spielt möglicherweise auch bei Degenerationsprozessen eine Rolle: In einer auf VEMPs basierten Studie von 2012 konnten Zuniga et al. [6] bei Patienten über 70 Jahren einen signifikanten Zusammenhang zwischen einem sowohl altersabhängigen als auch lärminduzierten Hörverlust im Hochtonbereich und reduzierter Sacculus-Funktion in Form von reduzierten cVEMP-amplituden nachweisen. Interessanterweise war dieser Zusammenhang für Utriculus und die Bogengänge nicht erkennbar. Die Autoren sehen hier in der Embryologie einen möglichen Erklärungsansatz: So bildet der Sacculus-Anteil des Ohrbläschens in der 6. Entwicklungswoche eine schlauchförmige Ausstülpung, den Ductus Cochlearis, welcher sich zur Cochlea weiterentwickelt, während die Bogengänge aus dem utriculären Anteil des Ohrbläschens entstehen [7].

Die anatomische Verbundenheit zwischen dem Vestibularorgan und der Cochlea lässt sich insbesondere bei Vorliegen einer Pathologie verdeutlichen, wie beispielsweise beim „Syndrom des dritten Fensters“: Kommt es, wie bei dem Bogengangsdehiszenzsyndrom [8–10] zu einem Defekt im knöchernen Labyrinth, liegt neben dem ovalen und dem runden Fenster ein „drittes Fenster“ vor, durch welches sowohl Schallenergie auf das Bogengangssystem wirken kann als auch Schallenergie austreten kann. Das schallinduzierte Auftreten von Schwindel ist klinisch als Tullio-Phänomen bekannt.

Zentralneurologisch spielen bei der posturalen Regulation des Gleichgewichts auf efferenter Seite insbesondere das nigrostriäre und cerebelläre System eine Rolle [11]. Zudem wurden auf mehreren Ebenen Verknüpfungen zwischen vestibulären und cochleären Kerngebieten nachgewiesen, was in einer Arbeit von Anton et al. [12] detailliert und übersichtlich beschrieben wird.

## 3. Zusammenhang zwischen Hörverlust und Gleichgewicht

Epidemiologische Studien konnten vermehrt einen Zusammenhang zwischen einer Reduktion des Hörvermögens und einer verminderten Gleichgewichtsfunktion aufzeigen.

So beschreiben Viljanen et al. [13] in einer prospektiven Beobachtungsstudie an älteren Frauen eine Korrelation zwischen Hörminderung und eingeschränkter Mobilität. In einer weiteren Studie konnte die gleiche Arbeitsgruppe bei älteren weiblichen Zwillingen ein erhöhtes Sturzrisiko bei eingeschränktem Hörvermögen nachweisen [14]. Lin et al. [15] errechneten bei Patienten mit Hörverlust eine Erhöhung des Sturzrisikos um den Faktor 1,4 je 10 dB Hörverlust. Eine systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse von Jiam et al. [16] untersuchte den Zusammenhang zwischen Hörverlust und Stürzen und kam anhand der 12 Studien, welche die Einschlusskriterien erfüllten, zu dem Schluss, dass ein Hörverlust mit einem signifikant erhöhten Sturzrisiko bei älteren Patienten assoziiert ist.

In einer prospektiven Beobachtungsstunde mit 2190 Teilnehmern konnten Chen et al. [17] in einem Beobachtungszeitraum von 10 Jahren einen Zusammenhang zwischen eingeschränktem Hörvermögen und physischer Funktionseinschränkung nachweisen. Zudem beschreiben die Autoren für Frauen ein mit der Hörminderung einhergehendes erhöhtes Risiko für Behinderung oder Pflegebedürftigkeit von jeweils 31 %. Berge et al. [18] zeigten in einer retrospektiven Studie mit Einschluss von 1075 Patienten, dass eine abnehmende Hörschwelle ein starker Prädiktor für eine Zunahme posturaler Instabilität war.

## 4. Hören und Gleichgewicht in prospektiven Studien

Während epidemiologische Studien einen Zusammenhang zwischen Hören und Gleichgewicht erhärten, bleiben dennoch weiterhin Fragen offen, insbesondere welche (patho)-physiologischen Interaktionsmechanismen der audiovestibulären Interaktion zugrunde liegen.

Prospektive Querschnitts- oder Kohortenstudien ermöglichen dem Untersucher, Einflussfaktoren und Endpunkte entsprechend gezielter Fragestellungen zu definieren mit dem Ziel, ein tieferes Verständnis der komplexen intersensorischen Verschaltung zu erhalten als Basis für die langfristige Entwicklung evidenzbasierter therapeutischer Aspekte.

In den letzten Jahren konnte man eine Zunahme der Relevanz dieser Thematik in der Literatur beobachten, was es einerseits erleichtert, den Kenntnisstand über dieses Themengebiet zu erweitern, anderseits wiederum für Unklarheiten sorgt, da die aktuelle Studienlage sich insbesondere durch Inhomogenität und fehlende Vergleichbarkeit auszeichnet [19–21].

## 4.1 Interaktion von Hören und Gleichgewicht bei Normalhörenden

### 4.1.1 Stabilisierender Effekt auditorischer Reize

In der Mehrzahl der Studien, welche die Interaktion von Hören und Gleichgewicht bei Hörgesunden untersuchten, konnte ein eher positiver Einfluss von auditorischem Input auf das Gleichgewicht berichtet werden.

**4.1.1.1 Quasistatische Messverfahren** Hinsichtlich der verwendeten Methoden der Gleichgewichtsmessung wird in den meisten bisher veröffentlichten Arbeiten auf quasistatische Messverfahren wie Fußplatten-Messsysteme zurückgegriffen. Hier wird bewusst der Begriff „quasi"-statisch als Abgrenzung zu dynamisch-mobilen Testverfahren verwendet, da auch beim Stehen geringfügige Bewegungen im Spiel sind.

In einer bereits einige Jahre zurückliegenden Studie untersuchten Easton et al. [22] die Körperschwankung an 18 hörgesunden Probanden (davon 10 von Geburt an blind) mit und ohne Präsentation von Schall über zwei lateral oder einen frontal angeordneten Lautsprecher. Dabei wurde eine Reduktion der Körperschwankung in der binauralen lateralen Situation im Vergleich zur einzelnen frontalen Schallquelle beschrieben, wobei berücksichtigt werden muss, dass eine sehr kurze Distanz (5 cm) zwischen den lateralen Lautsprechern und der Ohrmuschel vorlag.

In einer Pilotstudie befassten sich Kanegaonkar et al. [23] mit dem Gleichgewicht in Abwesenheit von Schall: Es wurde die posturale Stabilität bei 20 jungen, gesunden Teilnehmern auf einem Nintendo Balance Board (Fa. Nintendo, Kyoto, Japan) in unterschiedlichen Testkonditionen untersucht. Die Autoren konnten u. a. erhöhte Schwankungswerte nachweisen, wenn die Untersuchung in einem schallisolierten Raum bzw. mit zusätzlichem Lärmschutz im Vergleich zu einem normalen Untersuchungsraum erfolgte.

Zhong und Yost [24] untersuchten an 19 normalhörenden Teilnehmern wie sich räumliches Hören (frontale Schallquelle mit weißem Rauschen) auf die Durchführung des Tandem- Romberg-Tests sowie des Fukuda-(Unterberger-)Tretversuchs auswirkte. Dabei wurde in beiden Tests eine signifikante Reduktion der Körperschwankung unter auditorischer Reizung beobachtet.

Ross et al. [25] beschrieben bei 19 gesunden Probanden eine Reduktion der Variabilität der Körperschwankung, welche mittels eines Fußplatten-Messsystems erhoben wurde unter Exposition von weißem Rauschen über Kopfhörer. Dieser Effekt konnte von der gleichen Arbeitsgruppe in einer späteren Studie auch bei einer älteren Kohorte nachgewiesen werden [26].

Vitkovic et al. [27] führten eine umfangreiche Studie durch, in welcher die posturale Schwankung auf einem Nintendo-Wii-Balance-Board bei Normalhörenden (n = 50), bei Patienten mit Hörminderung (n = 28) sowie bei Patienten mit vestibulärer Dysfunktion (n = 19) unter verschiedenen auditorischen Konditionen untersucht wurde. Hier wurde insbesondere bei rotatorischen Reizen ein positiver Effekt auf die posturale Stabilität beschrieben.

Bei den Untersuchungen von Gandemer et al. [28, 29] stand die Fragestellung im Vordergrund, inwieweit die Beschaffenheit des auditorischen Umfelds die posturale Stabilität beeinflusst. Die Messung der Körperschwankung erfolgte bei gesunden Probanden (n = 20) mittels eines Fußplatten-Messystems, während weißes Rauschen in einem dreidimensionalen rotierenden Feld präsentiert wurde. Im Vergleich dazu erfolgten Messungen ohne Schallquelle oder mit einer stationären Schallquelle, wobei sich unter rotatorischem 3D-Input eine Reduktion der Körperschwankung im Vergleich zu den Kontrollkonditionen zeigte [28]. In einer darauf aufbauenden Arbeit wurde bei 35 gesunden Teilnehmern die Körperschwankung mit verschiedenen statischen Schallquellen in einem echofreien und einem normalen Raum untersucht. Darüber hinaus wurden in einem weiteren Experiment multiple dreidimensionale Geräuschkulissen wie beispielsweise Motorenlärm, Zikadenzirpen oder Glockenläuten in echofreier Umgebung hinzugeführt. Die Autoren konnten aufzeigen, dass die Reduktion der Körperschwankung um so ausgeprägter war, je reichhaltiger das auditorische Umfeld, dem die Teilnehmer exponiert waren, gestaltet war. Die Autoren erklärten dies anhand eines Modells einer auditorischen räumlichen Landkarte, welche zur Orientierung des Körpers im Raum auf kognitiver Ebene erstellt wird [29].

In einer ebenfalls auf einem Fußplatten-Messystem basierenden Studie von Xu et al. [30] befassten sich die Autoren mit der Frage, in welchem Maße der Frequenzbereich sowie die Lautstärke von Musik bei der Interaktion mit dem Gleichgewichtssystem relevant sind. Hierfür wurde bei 110 jungen Probanden die posturale Stabilität mittels eines Fußplatten-Messystems unter Präsentation von Musik mit unterschiedlichen Frequenzkomponenten (100 Hz, 1000 Hz und 4000 Hz) sowie in zwei Lautstärkegruppen ( ≥ 46,6 dB) erfasst. Hierbei zeigte sich ein Benefit bei 100 Hz und ≥ 46,6 dB, was bei den anderen Frequenzen und bei niedrigem Schallpegel nicht der Fall war. Die Autoren sehen hier einen Zusammenhang zu vorausgehenden experimentellen Studien [31, 32], die zeigten, dass bei Mäusen eine Exposition von 100 Hz bei 70 dB über einen Monat zu einem vestibulären Schaden führte, was laut den Autoren eine mögliche Affinität des Gleichgewichtsorgans zum Niedrigfrequenz-Bereich vermuten lasse.

Anton et al. [33] untersuchten den Einfluss unterschiedlicher auditorischer Reize auf die posturale Kontrolle bei 30 gesunden Probanden. Dabei wurde die Oberkörperschwankung in verschiedenen Standkonditionen unter fünf verschiedenen akustischen Bedingungen in zwei unterschiedlichen Räumen (kurze und lange Nachhallzeit) erfasst. Zusammenfassend zeigte sich eine Zunahme der Stabilität in einem echoreichen Raum unter Präsentation unterbrochener auditorischer Stimuli, während kontinuierliches Rauschen eine Verschlechterung der posturalen Stabilität bewirkte.

Seiwerth et al. [34] untersuchten die posturale Regulation und Stabilität bei 30 Normalhörenden in den Konditionen mit und ohne auditorischem Input. Dabei wurde Rauschen (Fastl-Rauschen [35]) im Freifeld über eine frontale Schallquelle präsentiert. Die Messung erfolgte mittels eines Fußplatten-Messystems. Hierbei zeigte sich keine Änderung in der posturalen Stabilität. Das System erlaubte jedoch eine frequenzspezifische Analyse der posturalen Subsysteme, die unter auditorischem Input eine Umgewichtung hinsicht-

lich ihrer Beteiligung an der posturalen Regulation (Modell der selektiven kompensatorischen Optimierung) aufwiesen.

Bei Ninomiya et al. [36] wurden auf einem Fußplatten-Messystem die posturale Stabilität bei zehn Patienten mit Hörgeräteversorgung und zehn Normalhörenden unter frontaler Schallpräsentation untersucht. Dabei konnte bei Normalhörenden eine Reduktion der Schwankung unter Präsentation auditorischer Reize festgestellt werden.

**4.1.1.2 Dynamisch-mobile Messverfahren** Während die meisten Studien die posturale Stabilität mittels Fußplatten-Messystemen erfassten, wurde diese Fragestellung in einigen Arbeiten auch mittels dynamischer Verfahren untersucht:

Munnings et al. [37] führten mit 44 normalhörenden und gesunden Probanden den Unterberger-(Fukuda-)Tretversuch unter verschiedenen sensomotorischen und auditorischen Bedingungen durch und konnten eine Reduktion der Eigenrotation und der longitudinalen Abweichung unter Abspielen von Metronomklang in einem Standard-Untersuchungsraum nachweisen.

Auch bei Karim et al. [38] zeigte sich bei acht jungen, gesunden Probanden eine Reduktion der Winkelabweichung bei der Durchführung des Unterberger-(Fukuda-)Tretversuchs unter frontaler Präsentation von weißem Rauschen über einen Lautsprecher, was bei Schallpräsentation über Kopfhörer nicht der Fall war.

Seiwerth et al. [39] untersuchten die vestibulopinale Kontrolle mittels Unterberger-(Fukuda-)Tretversuchs unter frontaler Präsentation von Rauschen (Fastl-Rauschen, [35]) bei 30 jungen, gesunden Probanden. Sie konnten einen signifikanten Nutzen unter auditorischem Input hinsichtlich einer Reduktion der longitudinalen Abweichung und der Eigenrotation nachweisen, während sich in der Winkelabweichung kein Unterschied zeigte.

Bei Anton et al. [12] stand die Fragestellung im Vordergrund, wie sich auditorische Reize auf das Gangbild auswirkten. Dabei wurde bei 30 gesunden Probanden eine Schallquelle im Raum präsentiert, während sich die Probanden in unterschiedlichen Gangkonditionen auf die Schallquelle zu bewegten. Dabei konnte eine Reduktion der Oberkörperschwankung beim Gehen mit offenen Augen, mit Tandem-Schritten und beim Gehen über Hindernisse nachgewiesen werden, während sich beim Gehen mit rotierendem Kopf kein Effekt zeigte.

### 4.1.2 Kein Einfluss auditorischer Reize auf das Gleichgewicht

Während in der Mehrzahl der Studien, die den Einfluss des Hörens auf das Gleichgewicht untersuchten, ein gleichgewichtsstabilisierender Einfluss berichtet wird, gibt es auch Arbeiten, die keinen Einfluss oder auch einen destabilisierenden Effekt auditiver Reize auf das Gleichgewicht beschreiben.

So wurde in der bereits erwähnten Arbeit von Easton et al. [22] in einer anderen auditorischen Kondition mit frontaler räumlicher Schallpräsentation kein Einfluss auf die posturale Stabilität festgestellt.

Palm et al. [40] konnten in einer Studie, welche bei 23 gesunden Probanden die Interaktion visueller und auditorischer Afferenzen hinsichtlich der posturalen Stabilität untersuchten, im Vergleich zum visuellen Input keinen Einfluss auditorischer Reize (Musik über Kopfhörer) auf die posturale Stabilität nachweisen.

Chen et al. [41] führten bei 24 gesunden Probanden eine Studie durch, welche den affektiven Einfluss auditorischer Stimuli (unangenehm, neutral oder angenehm) auf die posturale Stabilität untersuchte. Die Präsentation erfolgte über zwei Lautsprecher im Raum, während die posturale Stabilität auf einem Fußplatten-Messsystem evaluiert wurde. Hier zeigte sich sowohl bei angenehmen als auch bei neutralen Geräuschen kein Unterschied, während sich bei unangenehmen Geräuschen eine signifikante Zunahme der Schwankung in anterior-posteriorer Richtung ergab.

Bei Azevedo et al. [42] wurde bei 20 gesunden Probanden die posturale Stabilität auf einem Fußplatten-Messsystem in verschiedenen auditorischen Konditionen (ohne Schall und ohne Hörschutz, ohne Schall und mit Hörschutz, mit Schall und ohne Hörschutz, mit Schall und mit Hörschutz) erfasst. Dabei ließ sich kein Unterschied zwischen den Konditionen erkennen.

Auch bei Maheu et al. [43] wurde bei 14 gesunden Teilnehmern kein Einfluss von weißem Rauschen, welches von einer posterior aufgestellten Schallquelle präsentiert wurde, auf die Stabilität in verschiedenen Standkonditionen nachgewiesen.

Oikawa et al. [44] konnten in einer Studie, die den Effekt des Hörens auf das Gleichgewicht bei Patienten mit Cochlea Implantat (CI) auf einem Fußplatten-Messystem untersuchten, in der Kontrollgruppe von acht gesunden, normalhörenden Probanden keinen Unterschied mit oder ohne Schallpräsentation (weißes Rauschen über einen frontalen Lautsprecher) feststellen.

Auch in der bereits erwähnten Studie von Xu et al. [30], worin ein stabilisierender Effekt bei 100 kHz angeführt ist, zeigte sich in höheren Frequenzen (1000 und 4000 kHz) kein Einfluss.

Ibrahim et al. [45] konnten bei Messung der posturalen Stabilität mittels Romberg auf Schaumstoff und Tandem-Stand-Test bei 21 normalhörenden Probanden keinen Unterschied der Stabilität unter frontaler Präsentation von Schall (3 kHz bei 30 dB) nachweisen.

### 4.1.3 Destabilisierender Effekt auditorischer Reize

Einige wenige Studien berichteten allerdings auch von einen destabilisierenden Effekt auditorischen Inputs auf die Gleichgewichtsregulation bei Normalhörenden.

Bereits 1991 führten Raper und Soames [46] eine Studie mit 30 jungen gesunden Probanden durch, welchen auf einer Fußplattform stehend verschiedene auditorische Stimuli (Ruhe, Reinton von 250 Hz und Hintergrundsprache) in unterschiedlicher räumlicher Anordnung präsentiert wurde. Dabei zeigte sich zusammenfassend eine Erhöhung des Schwankens unter auditorischen Stimuli im Vergleich zur Situation in Ruhe, woraus die Autoren auf einen destabilisierenden Einfluss auf das Gleichgewicht schließen.

Tanaka et al. [47] untersuchten den Einfluss eines über Kopfhörer präsentierten weißen Rauschens, welches von einer Seite zur anderen rotierte bei zwölf gesunden Patienten, und stellten darunter ein erhöhtes Schwanken auf einem Fußplatten-Messystem fest. Nach Aufteilung der Studienpopulation in eine jüngere und eine ältere Gruppe sei dieser Effekt in der älteren Gruppe deutlicher ausgeprägt.

In einer anderen, ebenfalls auf einem Fußplatten-Messsystem basierten Arbeit konnten Park et al. [48] bei elf gesunden Probanden eine Zunahme der Körperschwankung mit zunehmender Frequenz des über Kopfhörer präsentierten Schalls beobachten.

In der Studie von Gago et al. [49] wurde bei 24 hörgesunden Patienten mit M. Alzheimer und bei 24 gesunden Probanden die Si-

tuation nicht mittels aktiver Präsentation auditorischer Stimuli, sondern in der Abwesenheit von Umgebungsgeräuschen durch Tragen eines Gehörschutzes untersucht. Dabei zeigte sich in der schallsupprimierten Situation eine Reduktion der Körperschwankung, welche mittels eines Fußplatten-Messsystems erfasst wurde.

## 5. Interaktion von Hören und Gleichgewicht bei Patienten mit Schwerhörigkeit

Ein stabilisierender Effekt des Hörens auf das Gleichgewicht verleitet zu der Annahme, dass der apparativen Hörrehabilitation neben der primären Intention der Verbesserung des Hörvermögens auch eine Rolle bei der Verbesserung der posturalen Stabilität sowie der Reduktion des Sturzrisikos zukommen kann. Vor diesem Hintergrund sind in den letzten Jahren auch zunehmend Arbeiten entstanden, die dieser Fragestellung überwiegend bei Patienten mit Hörrehabilitation durch Hörgeräte oder CI nachgingen. Allerdings zeichnet sich auch hier, wie es bei Normalhörenden der Fall ist, die Studienlage insbesondere durch eine Inhomogenität hinsichtlich des Studiendesigns, der Studienpopulation wie auch der posturalen und auditorischen Testbedingungen aus, wodurch eine Vergleichbarkeit und Einordnung in den Gesamtkontext deutlich erschwert wird.

### 5.1 Einfluss der Hörrehabilitation mittels Hörgeräten auf das Gleichgewicht

Im Jahr 2020 wurde erstmals eine systematische Übersichtsarbeit, welche den Einfluss von Hörgeräten auf die Gleichgewichtskontrolle untersuchte, von Borsetto et al. [19] veröffentlicht. Bei der Erstellung der Übersichtsarbeit orientierten sich die Autoren an den PRISMA-Kriterien [50]. Die Suchstrategie ergab 5768 Einträge, davon erfüllten letztendlich acht Arbeiten (vier Querschnittstudien, drei kontrollierte Querschnittstudien und eine nicht-randomisierte prospektive Studie) mit insgesamt 200 Patienten die Kriterien zum Einschluss in die systematische Analyse:

Lacerda et al. [51] untersuchten den Einfluss von Hörgeräten bei 56 älteren Patienten mit beidseitiger Innenohrschwerhörigkeit und beidseitiger Hörgeräteversorgung. Dabei wurden jeweils vor sowie vier Monate nach Hörgeräteanpassung der SF-36 Fragebogen zur Beurteilung der Lebensqualität [52], der FES-I Fragebogen [53] zur Evaluation der Angst vor Stürzen beantwortet sowie der Berg-Balance-Scale (BBS) [54] jeweils als Gleichgewichtstest durchgeführt. Dabei zeigte sich eine Verbesserung der Lebensqualität wie auch eine Reduktion der Angst vor Stürzen nach Hörgeräteanpassung.

Bei Rumalla et al. [55] wurde der Romberg-Test auf Schaumstoff sowie der Tandem-Stand-Test unter punktueller frontaler Präsentation von weißem Rauschen jeweils in unversorgter und versorgter Situation, d. h. mit an- und ausgeschalteten Hörgeräten, untersucht. Dabei konnten die 14 Patienten, die 65 Jahre und älter waren, jeweils in der versorgten Situation eine höhere posturale Stabilität aufweisen.

Die Bereits erwähnte Studie von Vitkovic et al. [27] wurde ebenfalls in die Übersichtsarbeit von Borsetto et al. [19] eingeschlossen. Hier zeigte sich in der Gruppe der Hörgeräteversorgten (n = 28) keine signifikante Verbesserung der Stabilität in der Situation mit Hörgeräten. Allerdings war zu beobachten, dass in den Konditionen mit Schallpräsentation das Schwanken in unversorgter Situation eher zunahm, während mit Hörgeräten eine Abnahme des Schwankens eintrat.

Negahban et al. [56] berichten von einer Verbesserung der posturalen Stabilität durch bilaterale Hörgeräteversorgung. So zeigte sich bei 22 Hörgeräteträgern unversorgt ein erhöhtes Schwanken auf einem Fußplatten-Messsystem ohne Hörgeräte im Vergleich zur Situation mit Hörgeräten. Auch eine unversorgte Kontrollgruppe (n = 25) wies im Vergleich zu den Patienten mit Hörgeräten erhöhte Schwankungswerte auf. Dabei wurde jeweils kein Geräusch präsentiert, die Messungen erfolgten in einem normalen Raum.

Des Weiteren wurde die Studie von Shayman et al. [57] eingeschlossen. Hier wurde bei drei Patienten mit Schwerhörigkeit der Einfluss von apparativer Hörrehabilitation auf das Gangbild untersucht. Zwei Patienten waren beidseits mit Hörgeräten versorgt, während ein Patient beidseitig CI-Träger war. Beim Gehen auf Drucksensoren wurden die Schrittlänge und die Gehgeschwindigkeit erfasst, zudem wurde auch der Mini-Balance Evaluation Systems Test (Mini-BEST [58]) durchgeführt. Die Konditionen waren jeweils bestversorgt und unversorgt und die Testung wurde bei Umgebungsgeräuschen durchgeführt, welche von Laufbändern (Ganganalyse) oder einer in der Nähe verlaufenden Autobahn (mini-BEST) erzeugt wurden. Dabei zeigte sich bei allen Patienten eine Verbesserung der Ganggeschwindigkeit in der bestversorgten Situation.

Eine weitere Studie, die nicht das statische Gleichgewicht untersuchte, war die Arbeit von Weaver et al. [59], die der Frage nachgingen, inwieweit sich apparative Hörrehabilitation auf das Gangbild auswirke. Dabei wurden Ganganalysen bei 13 beidseitig hörgeräteversorgten Patienten sowie bei zwölf Patienten mit beidseitigen CI durchgeführt, während von Regengeräuschen überlagertes weißes Rauschen frontal präsentiert wurde. Es konnte bei beiden Gruppen kein Unterschied zwischen den versorgten und unversorgten auditorischen Konditionen festgestellt werden.

In der ebenfalls eingeschlossenen Studie von McDaniel et al. [60] wurde bei 22 erwachsenen Patienten mit bilateraler Hörgeräteversorgung der Sensory Organization Test (SOT), bestehend aus sechs Testkonditionen mit und ohne Hörgeräte auf einem Fußplattenmesssystem durchgeführt. Dabei wurde Stereo-Sprachgemurmel im Raum präsentiert. Die Autoren konnten keine Verbesserung der posturalen Stabilität zwischen den beiden auditorischen Konditionen nachweisen.

Auch die Arbeitsgruppe von Maheu et al. [61] untersuchte den Einfluss des Hörvermögens auf das Gleichgewicht bei 14 Normalhörenden und 18 Patienten mit Innenohrschwerhörigkeit, wovon wiederum zehn Patienten auch eine Vestibulopathie aufwiesen. Die Messung der posturalen Stabilität erfolgte auf einer Druckmessplatte in verschiedenen Konditionen (modified clinical test for sensory integration of balance, mCTSIB [62]). Dabei wurde rosa Rauschen von posterior präsentiert. Es zeigte sich, dass insbesondere die Gruppe der Hörgeschädigten mit Gleichgewichtsstörungen einen Benefit durch Hörgeräte hatte.

In einer weiteren systematischen Übersichtsarbeit aus dem Jahr 2021, welche ebenfalls unter Berücksichtigung der PRISMA-Kriterien durchgeführt wurde, gingen Ernst et al. [21] der Frage nach, inwieweit eine Hörrehabilitation mittels Hörgeräten oder CI zu einer Verbesserung von Gleichgewichtsstörungen im Alter bzw. zu einer Reduktion des Sturzrisikos führen kann. Nach Identifikation

von 2598 Titeln wurden schließlich zehn Studien für die qualitative Analyse eingeschlossen, wovon fünf Studien den Einfluss von Hörgeräten auf das Gleichgewicht untersuchten, welche bereits in der Übersichtsarbeit von Borsetto et al. [19] beschrieben wurden. Dies waren die Arbeiten von Lacerda et al. [51], Rumalla et al. [55] Negahban et al. [56], McDaniel et al. [60] und Weaver et al. [59]. Bei den anderen identifizierten Arbeiten waren die Patienten mittels CI versorgt, worauf in einem späteren Abschnitt gesondert eingegangen wird.

Zu diesem Thema wurde von Carpenter und Campos [20] ebenfalls eine Übersichtsarbeit veröffentlicht, welche jedoch nicht nach PRISMA-Kriterien durchgeführt wurde, allerdings relativ strenge Einschlusskriterien anwendete: So wurden nur Arbeiten berücksichtigt, welche, um eine objektiven Vergleich zu ermöglichen, mindestens einen quantitativen Test mit mindestens 30 s Stehen auf beiden Beinen beinhalteten. Die Autoren befassen sich in dieser Arbeit kritisch mit dem Effekt von Hörverlust auf das Gleichgewicht. Es wurden unter anderem drei Studien mit Hörgeräteversorgten Patienten eingeschlossen, welchen ebenfalls in den vorausgehenden Abschnitten bereits vorgestellt wurden (Negahban et al. [56], Vitcovic et al. [27] und Maheu et al. [61].

In der Studie von Ninomiya et al. [36] zeigte sich, wie bereits erwähnt, eine Verbesserung der Schwankung für Normalhörende, was sowohl in anterio-posteriorer Richtung als auch in mediolateraler Richtung zu beobachten war. Bei der Gruppe mit Hörgeräten war dies jedoch nur in der anterio-posterioren Richtung der Fall.

Neben Normalhörenden untersuchten Ibrahim et al. [45] auch neun Patienten mit Hörgeräteversorgung und konnten in der Situation mit Hörgerät unter Schallpräsentation sowohl bei der Durchführung des Romberg-auf-Schaumstoff-Tests als auch des Tandem-Standtests eine Verbesserung beobachten, was bei Normalhörenden nicht der Fall war.

## 5.2 Einfluss der Hörrehabilitation mittels aktiver Mittelohr- und Knochenleitungsimplantate auf das Gleichgewicht

In einer Studie von Seiwerth et al. [63] wurde der Fragestellung der Interaktion von Hören und Gleichgewicht bei Patienten mit aktiven Mittelohr – und Knochenleitungsimplantaten nachgegangen. Dabei wurde die posturale Stabilität bei 26 mittels quasistatischer und dynamisch-mobiler Messverfahren (Unterberger-(Fukuda)-Tretversuch, Fußplatten-Messsystem, mobile Posturographie mittels Oberkörperschwankungssensor) jeweils in bestversorgter und unversorgter Situation unter frontaler Präsentation von Rauschen (Fastl-Rauschen) untersucht. Dabei zeigte sich nur in der Oberkörperschwankung in einer mobilen Gangmessung ein Benefit durch Bestversorgung, sowie vereinzelt individuelle Verbesserungen in der statischen Posturographie.

## 5.3 Einfluss der Hörrehabilitation mittels Cochlea Implantat auf das Gleichgewicht

Im Vergleich zur Situation bei Normalhörenden oder Patienten mit Hörgeräteversorgung stellt sich die Bewertung audiovestibulärer Interaktionsmechanismen bei Patienten mit CI komplexer dar:

So steht einem möglichen stabilisierenden Benefit durch auditorische Reize eine potenzielle interventionsbedingte vestibuläre Einschränkung gegenüber. Eine Schädigung vestibulärer Strukturen durch die Elektrodeninsertion in die Cochlea liegt allein durch die anatomischen Gegebenheiten im Bereich des Möglichen und wurde bereits mehrfach in prospektiven oder retrospektiven Studien, die die Gleichgewichtsfunktion prä- und postoperativ beurteilten, untersucht. Eine detaillierte Übersicht zu dieser Fragestellung bietet eine im Jahr 2017 veröffentlichten Meta-Analyse von Ibrahim et al. [64]. Es konnten 27 Studien zur Auswertung eingeschlossen werden. Darin zeigte sich ein signifikanter Einfluss der CI-Operation auf die Ergebnisse der kalorischen Testung sowie der VEMP, während kein signifikanter Einfluss auf die Ergebnisse des Video-Kopf-Impulstests, auf posturale Messungen sowie auf subjektive Bewertungen des Gleichgewichts, welche mittels DHI-Fragebogen (Dizzines-Handycap-Inventory) erfasst wurden, zu erkennen war. Die Autoren weisen jedoch auf eine starke Heterogenität der Ergebnisse hin, was auf relevante methodische Unterschiede zurückzuführen sei und eine abschließende Bewertung erschwere [64].

Analog zur Situation bei Patienten mit Hörgeräteversorgung wurden mehrere Studien durchgeführt, bei denen die posturale Stabilität mit und ohne CI untersucht wurde:

So konnten in der bereits erwähnten Übersichtsarbeit von Carpenter und Campos [20] fünf Studien entsprechend der Einschlusskriterien ausgewertet werden:

Suarez et al. [65] konnten bei 13 Kindern mit unilateraler CI-Versorgung mittels eines Fußplatten-Messystems keine Änderung der posturalen Stabilität in den Situationen mit oder ohne CI nachweisen.

Auch eine weitere Arbeitsgruppe um Huang et al. [66], welche die Funktion des Gleichgewichts bei Kindern mit CI untersuchte, konnte bei 24 unilateral implantierten Teilnehmern keinen Unterschied in der Körperschwankung auf einem Fußplatten-Messystem zwischen den Konditionen „CI an“ und „CI aus“ feststellen.

Bei Shayman et al. [67] wurde das Gleichgewicht im Stand bei 13 Erwachsenen mit bilateraler (n = 10) und unilateraler CI-Versorgung in den Konditionen „CI an“ und „CI aus“ mittels am Körperstamm und am Kopf getragenen Sensoren unter frontaler Präsentation von weißem Rauschen untersucht. Dabei zeigte sich eine signifikante Reduktion der Beschleunigung wie auch der Geschwindigkeit von Kopfbewegungen in anteroposteriorer Richtung mit aktiviertem CI. Demgegenüber zeigte sich kein signifikanter Effekt mit CI auf den Körperstamm.

Oikawa et al. [44] untersuchten das Gleichgewicht bei Normalhörenden und acht Patienten mit unilateraler CI-Versorgung mittels eines Fußplatten-Messystems mit aktiviertem CI mit und ohne Präsentation von weißem Rauschen. Dabei zeigte sich in der Abwesenheit visueller Informationen ohne Rauschen eine Verlagerung des Körperschwerpunktes zur CI-versorgten Seite, was mit Schallpräsentation nicht zutraf.

Miwa et al. [68] verwendeten ebenfalls ein Fußplatten-Messsystem, um die Stabilität bei neun Patienten mit unilateraler CI-Versorgung präoperativ sowie > vier Monate postoperativ in den Konditionen „CI an“ und „CI aus“ zu erfassen. Dabei zeigte sich eine signifikante Verbesserung der Stabilität mit aktiviertem CI.

In der systematischen Übersichtsarbeit von Ernst et al. [21] wurden insgesamt sechs Studien mit CI-Patienten eingeschlossen:

Weaver et al. [59] konnten bei der Untersuchung des Gangbilds bei zwölf Patienten keinen Benefit mit aktiviertem CI nachweisen.

Parietti-Winkler et al. [69] führten bei zehn Patienten mit unilateraler CI-Versorgung eine vestibuläre Funktionsdiagnostik sowie eine Überprüfung der posturale Stabilität mittels eines Druckplatten-Messystems präoperativ sowie ein Jahr postoperativ durch. Dabei zeigte sich eine Verbesserung der posturalen Kontrolle ein Jahr nach Implantation, was insbesondere in komplexen sensorischen Testsituationen deutlich wurde. Zudem konnten die Autoren im zeitlichen Verlauf eine Kompensation vestibulärer Defizite beobachten.

Louza et al. [70] berechneten das Sturzrisiko nach CI-Versorgung bei 20 erwachsenen Patienten mittels mobiler Posturographie mit Messzeitpunkten jeweils einen Tag präoperativ sowie drei und fünf Tage postoperativ und konnten keine Änderung des Sturzrisikos nachweisen.

Bei Guigou et al. [71] wurden im Rahmen einer multizentrischen prospektiven Studie 15 uni- und sieben bilateral CI-versorgte Patienten hinsichtlich Ihrer posturalen Stabilität mittels eines Fußplatten-Messsystems untersucht. Dabei wurde in der schallpräsentierenden Kondition Cocktail-Party-Klang rotierend über Kopfhörer abgespielt, was in der bilateral versorgten Gruppe einen destabilisierenden und in der unilateral versorgten Gruppe einen eher stabilisierenden Effekt nach sich zog.

Als weitere Arbeit wurde die Studie von Wiszomirska et al. [72] eingeschlossen. Darin wurde bei 21 Patienten jeweils vor und drei Monate nach CI-Implantation die posturale Stabilität mittels einem Fußplattenmesssystem erfasst, wobei sich keine wesentliche Änderung der Stabilität zeigte. Zudem erfolgte noch der Einschluss der bereits beschriebenen Studie von Oikawa et al. [44] in die Übersichtsarbeit.

Eine weitere, in den Übersichtsarbeiten nicht erwähnte Studie ist eine andere Arbeit von Louza et al. [73]. Hier erfolgte die Erfassung des Sturzrisikos bei 33 Patienten mit CI-Versorgung mittels eines mobilen Messystems mit Focus auf unterschiedliche auditorische Situationen (CI an/aus, mit Musik, mit Sprache), wobei eine geringgradige, jedoch signifikante Reduktion des Sturzrisikos insbesondere unter Präsentation von Musik oder Sprache beobachtet wurde.

Auch Hallemans et al. [74] konnten in einer Pilotstudie bei acht Patienten mit CI und bilateralem kalorischem Ausfall eine Verbesserung des Gangbildes unter Präsentation von Musik beobachten.

Der Zusammenhang zwischen Hören und Gleichgewicht muss bei CI-Patienten gesondert betrachtet werden: So kommen zusätzlich zur reinen Hörverbesserung durch das CI noch weitere zu berücksichtigende Aspekte hinzu: Es gibt Hinweise, dass eine elektrische Co-Stimulation vestibulärer Strukturen, analog zur Stimulation des Nervus fazialis [75], durch das CI erfolgen kann: So konnte in mehreren Studien nachgewiesen werden, dass durch CI-Stimulation eine Reizung der Otolithenorgane im Sinne einer Aufzeichnung von e-cVEMPS [76–79] oder e-oVEMPS [80] möglich ist. Ein Erklärungsansatz wäre die lokale Ausbreitung der elektrischen Reizung auf die vestibulären Strukturen [74, 81].

Borsetto et al. [19] sehen hinsichtlich der Interpretation audiovestibulärer Mechanismen bei CI-versorgten Patienten, abgesehen von der inhomogenen Datenlage, folgende Herausforderungen: So seien Erwachsene oft einseitig CI-versorgt, wodurch der stabilisierende Faktor eines binaural bedingten räumlichen Hörens wegfalle. Darüber hinaus könne die für den cochleären Hörschaden ursächliche Grunderkrankung auch mit einer Degeneration vestibulärer Innenohrstrukturen einhergehen. Ernst et al. [21] betonen, dass der Neuroplastizität und der Adaptation an die CI-Versorgung, welche eine gewisse Zeit beansprucht, eine besondere Bedeutung zukommt. Daher werden Studien, welche beispielsweise Konditionen mit „CI an“ und CI aus“ vergleichen, entsprechend kritisch betrachtet, wohingegen longitudinale Studien, welche ein ausreichendes Zeitfenster zur Neuroadaptation berücksichtigen, als wesentlich aussagekräftiger eingeschätzt werden.

## 6. Interaktion von Hören und Gleichgewicht bei Patienten mit Gleichgewichtsstörungen

Die Mehrzahl der bisher durchgeführten Studien, welche sich mit der Interaktion von Hören und Gleichgewicht befassten, wurden an Normalhörenden oder an Patienten mit apparativer Hörrehabilitation durchgeführt. Es liegt jedoch nahe, auch die Situation bei Patienten mit Gleichgewichtsstörungen zu betrachten. Einige wenige Arbeiten sind dieser Fragestellung auch gezielt nachgegangen bzw. haben sie in ihrem Studiendesign berücksichtigt.

In der Arbeit von Stevens et al. [82] wurde mittels eines schwerpunktbasierten Fußplatten-Messsystems untersucht, inwieweit sich auditorische Reize auf das Gleichgewicht bei zwölf Patienten ohne subjektiven Schwindel und bei acht Patienten mit Gleichgewichtsstörungen unterschiedlicher Genese auswirken. Die Tests erfolgten unter verschiedenen auditorischen, visuellen und propriozeptiven Bedingungen. Dabei wurde u. a. weißes Rauschen räumlich mittels vier über Kreuz angeordneten Lautsprechern präsentiert. Es zeigte sich, dass die Teilnehmer hinsichtlich der posturalen Stabilität um so mehr vom auditorischen Input profitierten, je stärker das Gleichgewicht beeinträchtigt war.

In der bereits mehrfach erwähnten Arbeit von Vitkovic et al. [27] wurden 19 Patienten mit vestibulärer Störung untersucht. Hier fiel insbesondere auf, dass diese Patienten in höherem Ausmaß von einem Benefit auditorischer Reize profitierten, verglichen mit den Patienten und Normalhörenden ohne Gleichgewichtsstörungen. In der ebenfalls bereits zitierten Studie von Shayman et al. [57] zeigte sich der positive Effekt der Hörgerätversorgung insbesondere beim Patienten mit Morbus Menière.

Auch bei Hallemanns et al. [74] hatten alle acht CI-versorgten Patienten eine bilaterale Vestibulopathie und konnten von Musik hinsichtlich des Gangbilds profitieren, und auch Maheu et al. [61] konnten durch Hörgeräte eine Reduktion des Sturzrisikos bei Patienten mit Hörstörung und gleichzeitiger vestibulärer Pathologie nachweisen.

Demgegenüber konnte in der Studie von Wiszomirska et al. [72] auch in der Gruppe mit vestibulären Störungen (n = 10) kein auditorischer Benefit auf die Stabilität nachgewiesen werden.

Dozza et al. [83] stellten im Jahr 2005 eine Methode auditorischen Biofeedbacks bei Patienten mit bilateraler Vestibulopathie vor. Dabei wurde bei neun Patienten mit bilateraler Vestibulopathie und bei einer Kontrollgruppe mit neun gesunden Probanden die posturale Stabilität auf einem Fußplatten-Messsystem aufgezeichnet, während über Kopfhörer auditorische Signale als Biofeedback präsentiert wurden. Hierbei wurden die Informationen der Fußplatte, welche das Schwanken erfassten, direkt in audiologische

Signale umkodiert, welche an den Patienten weitergegeben wurden, wie beispielsweise eine Erhörung der Frequenz oder der Lautstärke entsprechend einer bestimmen Richtung des Schwankens. Es zeigte sich bei beiden Gruppen eine Verbesserung der Stabilität mit auditorischem Biofeedback. Da die auditorischen Signale letztendlich codierte kognitive Informationen über die Position des Körpers im Raum liefern, welche dem Patienten durch den Ausfall der Gleichgewichtsorgane nicht mehr zur Verfügung stehen, steht weniger der rein akustische Charakter des Schalls als vielmehr der Informationsgehalt im Vordergrund des Wirkmechanismus, analog zu vibrotaktilen Biofeedback-Systemen [84].

## 7. Erklärungsansätze für Mechanismen der audiovestibulären Interaktion

### 7.1 Auditorische Landmarken

Es wurden verschiedene Modelle für Mechanismen der audiovestibulären Interaktion entwickelt. Ein Erklärungsansatz für den stabilisierenden Effekt auditorischer Reize ist, dass diese räumlichen Landmarken darstellen und dazu beitragen können, den Körper im Raum korrekt zu orientieren [12, 19, 61]. Voraussetzung für eine korrekte Lokalisation der Schallquelle ist ein intaktes Richtungshören, welches bei Normalhörenden als mittlerer Winkelfehler zwischen zwei und sechs grad angegeben wird [85–87]. Vor diesem Hintergrund kommt auch der apparativen Hörrehabilitation mit einer mutmaßlichen Verbesserung des Richtungshörens eine gewichtige Rolle zu.

Das Modell der auditorischen Landmarken entwickelten Gandemer et al. [29] weiter zur Theorie einer räumlichen auditorischen Landkarte und schlussfolgerten aus ihren Experimenten mit 3D-Schallpräsentation, dass der stabilisierende Effekt von räumlichem Schall um so größer ist, je reichhaltiger das auditorische Umfeld gestaltet ist.

Auch die Auswahl des Untersuchungsraums ist hierbei von Bedeutung. So wird vermutet, dass Reflexionen von Schallquellen, welche sowohl externe Lautsprecher als auch eigene Körpergeräusche sein können, von den Wänden eines normalen Untersuchungsraums reflektiert werden und so als zusätzliche auditorische Landmarken genutzt werden können, was in echoarmen Räumen nicht der Fall ist [23, 33].

### 7.2 Stochastische Resonanz

Bei Versuchen, in denen Schall über Kopfhörer übertragen wurde, kann angenommen werden, dass die stützende Wirkung auditorischer Signale als Landmarken wegfällt. Dies könnte auch die Ergebnisse erklären, bei denen unter Schallpräsentation mittels Kopfhörern kein Unterschied bei der posturalen Stabilität demonstriert werden konnte [38, 40]. Dennoch gibt es auch Experimente mit Kopfhörern mit stabilisierendem Effekt auf das Gleichgewicht [25], sodass der audiovestibulären Interaktion möglicherweise noch weitere Mechanismen zugrunde liegen.

Maheu et al. [43] brachten einen Erklärungsansatz ein, welcher auch von Gandemer et al. [88] aufgegriffen wurde, dass auditorische Reize mittels stochastischer Resonanz stabilisierend auf das Gleichgewicht wirken. Die Theorie der crossmodalen stochastischen Resonanz beschreibt, dass unter auditorischem Input die Sensibilität in anderen an der Gleichgewichtsregulation beteiligten sensorischen Komponenten erhöht wird [89]. Dadurch wird beispielsweise die Detektionsrate für primär unterschwellige visuelle und propriozeptive Signale erhöht und diese in die posturale Regulation integriert [90, 91].

### 7.3 Umgewichtung posturaler Subsysteme

Eine weitere Hypothese audiovestibulärer Interaktionsmechanismen beschreibt, dass es bei einem Ausfall oder Minderfunktion eines an der posturalen Kontrolle beteiligten Systems zu einer Hochregulierung eines anderen Subsystems kommen kann. Dies würde erklären, warum in einigen Studien insbesondere Patienten mit Gleichgewichtsstörungen vermehrt auf auditorische Reize als Feedback zurückgreifen können.

Die posturalen Subsysteme sind, je, nach Alter, Gesundheitszustand und Aufgabe unterschiedlich an der posturalen Regulation beteiligt. Im universellen Modell der selektiven und kompensatorischen Optimierung beschreiben Baltes und Baltes [92] die Möglichkeit, dass optimierte Funktionsfähigkeit durch kompensatorische Ressourcenumverteilung erreicht werden kann. Bezogen auf die Gleichgewichtskontrolle wurde das Prinzip sensorischer Umverteilungsmechanismen bereits von Asslander et al. [93] vorgestellt.

Eine Quantifizierung der hierarchischen Ordnung von an der Gleichgewichtsregulation beteiligten Komponenten erscheint letztendlich schwierig. Es wurden bei Untersuchungen zum Thema Hören und Gleichgewicht auch Experimente durchgeführt, in denen sensorische Subsysteme unterdrückt wurden, um so jeweilige Beteiligungen an der posturalen Regulation zu vergleichen. Dabei scheint das Hören im Vergleich zu den anderen sensorischen Achsen, wie beispielsweise visuellen Reizen, eine eher untergeordnete Rollte einzunehmen [22, 24, 49].

Allerdings scheint bei der Gleichgewichtsregulierung nicht nur der relative Beitrag audiologischer Reize, sondern auch deren potentielle Eigenschaft, eine Umverteilung posturaler Ressourcen zu induzieren, von Bedeutung zu sein. Dabei könnte wiederum der o.g. Erklärungsansatz der stochastischen Resonanz eine Rolle spielen. Dass hierbei sensorische Umverteilungsmechanismen im Gange sind, lassen bereits die Arbeiten an Patienten mit vestibulären Störungen vermuten [27, 57, 82]: So erweist sich diese Patientengruppe als affiner für einen stabilisierenden Effekt auditorischen Inputs als Probanden ohne vestibuläre Störung.

Maheu et al. [43] untersuchten in ihrer Arbeit gezielt Umverteilungsmechanismen posturaler sensorischer Komponenten unter auditorischem Input und beschrieben eine Zunahme der Gewichtung der visuellen Achse in Abwesenheit auditorischer Reize, was für die propriozeptive Achse nicht zutraf. Bei Miwa et al. [68] war ein positiver Effekt der CI-Versorgung deutlicher, wenn die Augen geschlossen waren, als mit offenen Augen.

Auch bei Seiwerth et al. [34] wurde der Aspekt sensorischer Umverteilungsmechanismen mit untersucht. Hier zeigte sich bei Normalhörenden unter auditorischem Input eine reduzierte Aktivität der visuellen und vestibulären Achse, während bei Patienten mit Schwerhörigkeit eine Hochregulierung der vestibulären Achse in bestversorgter Situation zu beobachten war [63].

### 7.4 Hörverlust und Gleichgewicht im Alter

Ergebnisse epidemiologischer Studien konnten zeigen, dass ein Hörverlust auch mit einer Reduktion der posturalen Stabilität einhergehen kann. Abgesehen von einer allgemeinen Reduktion neuronaler und sensorischer Kapazitäten im Alter gibt es weitere Erklärungsansätze [20]: Neben dem bereits erwähnten eingeschränkten binauralen Hörvermögen mit einhergehender Reduktion der Fähigkeit, den Körper im Raum richtig einzuordnen, wurde gezeigt, dass ein eingeschränktes Hörvermögen vermehrt kognitive Ressourcen beansprucht, welche wiederum bei notwendigen posturalen Regulationsprozeduren fehlen und zu einer Instabilität beitragen können [94].

Letztendlich kann man aufgrund der anatomischen Gemeinsamkeiten, der funktionellen Verzahnung und der embryonalen Verbundenheit auch vermuten, dass neuronale und strukturelle Degenerationsprozesse der Cochlea und des Vestibularorgans pathophysiologisch nach ähnlichen Mechanismen ablaufen [20].

## 8. Einflussfaktoren bei Studien zu Hören und Gleichgewicht

Bei Sichtung der Literatur zum Thema Hören und Gleichgewicht fällt insbesondere auf, dass eine große Inhomogenität hinsichtlich multipler Einflussfaktoren vorliegt, was eine Vergleichbarkeit sehr erschwert sowie eine Verallgemeinerung der Ergebnisse unmöglich macht [19–21]. Dies ist auch ein möglicher Erklärungsansatz für die Diskrepanz der Ergebnisse innerhalb der Studien. Im Folgenden werden die relevanten Einflussfaktoren erläutert und eingeordnet (▶ **Abb. 2**).

### 8.1 Studiendesign und Studienpopulation

Die Mehrzahl der bisherigen Arbeiten zum Thema Hören und Gleichgewicht sind experimentelle Querschnittstudien, in denen bei einer Studienpopulation innerhalb eines Testumfelds verschiedene Konditionen miteinander verglichen werden, wie beispielsweise bei Innersubjekt-Studien die Konditionen „bestversorgt“ und „unversorgt“ oder „CI an“ und „CI aus“. Kohortenstudien bilden als Longitudinalstudien, wie bsp. von Lacerda et al. [51] und Wiszomirska et al.[72], bei dieser Fragestellung die Ausnahme. Dabei komme, wie Ernst et al. schlussfolgern [21], der Langzeitbeobachtung mehr Bedeutung zu, da somit auch neuroplastische Lernprozesse beim Zurückgreifen auf auditorische Signale zur Gleichgewichtskontrolle berücksichtigt werden.

Hinsichtlich der Studienpopulation fällt insbesondere eine deutliche Variabilität in Bezug auf das Alter, die Anzahl, den Hör- und Gleichgewichtsstatus sowie Komorbiditäten der Studienteilnehmer auf.

### 8.2 Messverfahren zur Quantifizierung der posturalen Stabilität

Zur Beurteilung der posturalen Kontrolle stehen eine Vielzahl an Methoden und in der klinischen Praxis etablierten Systemen zur Verfügung, denen bei Experimenten zur Interaktion mit auditorischen Signalen eine wichtige Rolle als Einflussfaktoren zukommt: Neben der subjektiven Evaluation des Gleichgewichts mittels Fragebögen [51] gibt es Testverfahren, bei denen der Untersucher das Abschneiden des Tests evaluiert, wie beispielsweise die Erfassung der Dauer des Stehens auf einem Bein, der Tandem-Standtest oder auch Testbatterien wie beim „Timed up and go Test“. Diese Ergebnisse sind jedoch insbesondere aufgrund des subjektiven Charakters kritisch zu bewerten, was Carpenter und Campos [20] in ihrer Übersichtsarbeit veranlasste, nur objektive schwankungsbasierte Messverfahren mit einer Standdauer von > 30 Sekunden in Ihre Übersichtsarbeit einzuschließen.

Viele Arbeitsgruppen führten Untersuchungen zu dieser Fragestellung mittels quasistatischer Messverfahren durch. Dabei steht in der Regel der Proband auf einem Fußplatten-Messsystem, welches mittels Drucksensoren Schwankungen quantifizieren und eine objektive Auswertung gewährleisten kann (Bsp.: ▶ **Abb. 3**).

Demgegenüber besteht die Möglichkeit, Sensoren am Körperstamm (▶ **Abb. 4**) oder Systeme mit mehreren Sensoren [59] oder Reflektoren [74] an Stamm, Extremitäten und dem Kopf der Probanden anzubringen, sodass eine differenzierte Analyse des Schwankens am Körperschwerpunkt, ggf. in Relation zu den Daten der Extremitäten oder des Kopfes, möglich ist. Ganganalysen können zudem auch mit Druckplatten, welche als Strecke angeordnet sind, erfasst werden [57].

Diese Messverfahren ermöglichen neben quasistatischen Tests auch mobile Verfahren wie Gangtests oder Testbatterien wie dem SBDT und kommen möglicherweise klinischen Alltagssituationen näher, wie z. B. bei der Evaluation des Sturzrisikos [95].

Bei allen Testverfahren können zudem auch Störungen oder erschwerte Bedingungen der an der posturalen Regulation beteiligten Systeme induziert werden, wie z. B. das propriozeptive System durch Schaumstoffmatten oder das visuelle System mittels verschlossener Augen.

### 8.3 Auditorisches Umfeld

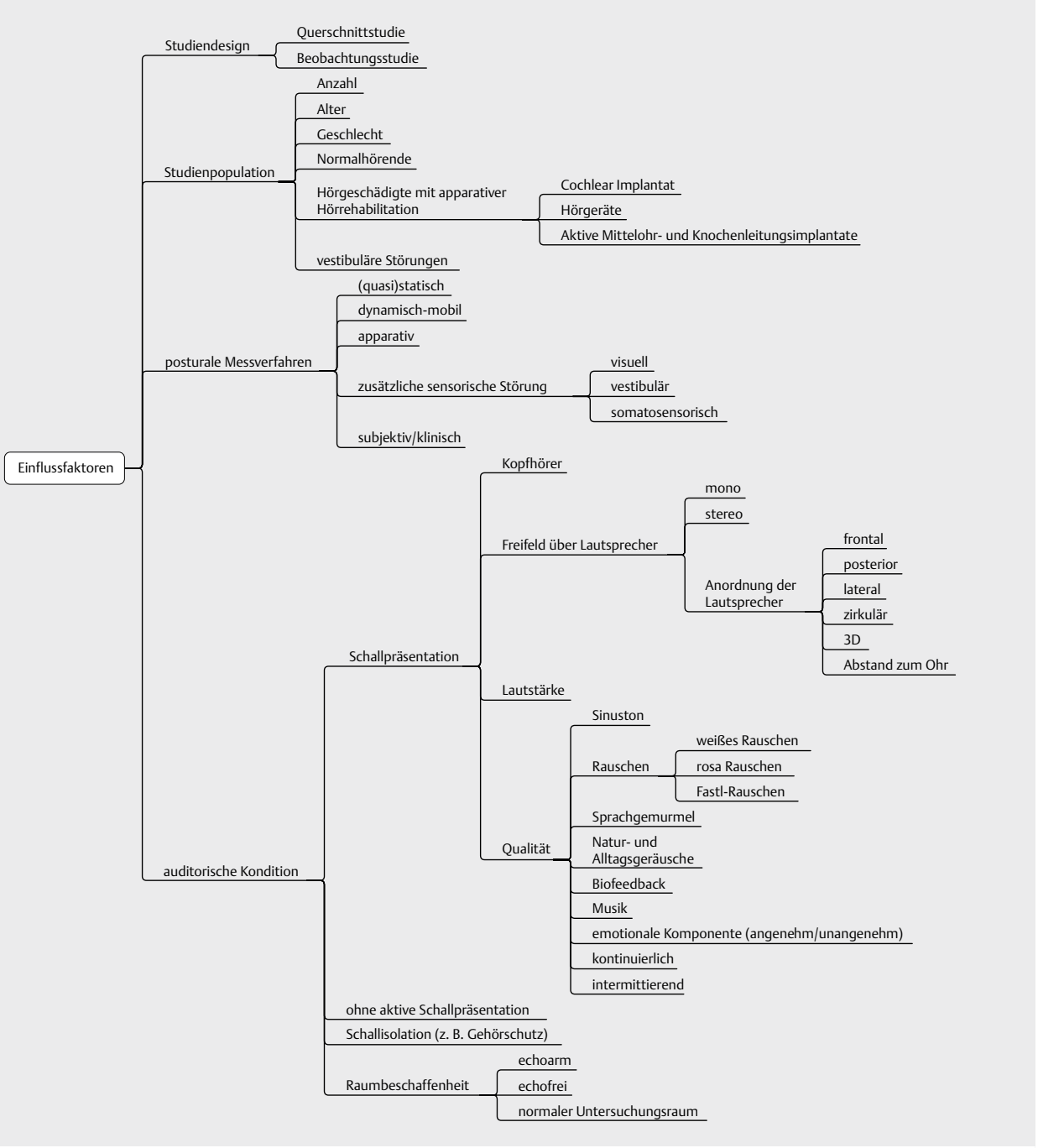
#### 8.3.1 Schallpräsentation

Dem auditorischen Setting kommt bei experimentellen Studien zur Interaktion von Hören und Gleichgewicht eine zentrale Rolle zu. So muss prinzipiell unterschieden werden, ob auditorische Reize aktiv präsentiert werden, ob nur die Umgebungsgeräusche bzw. Schallreflexionen des Untersuchungsraums genutzt wurden oder ob die Messung in kompletter Abschirmung von auditorischen Signalen (z. B. durch Tragen von Gehörschutz) durchgeführt wurde.

Aktive Schallpräsentation kann sowohl über Kopfhörer als auch im Freifeld mittels Lautsprecher(n) in den unterschiedlichsten Anordnungen (mono, stereo, frontal, zirkulär, dreidimensional) präsentiert werden, wobei der Abstand der Schallquelle zum Ohr und die Lautstärke ebenfalls relevante Faktoren darstellen.

Eine weitere Bedeutung kommt darüber hinaus der akustischen Beschaffenheit der Räumlichkeiten zu: Bei einem normalen Untersuchungsraum, in dem die Schallwellen an den Wänden reflektiert werden, muss man eine gewisse Nachhallzeit berücksichtigen, während in einem schallisolierten, echoarmen oder echofreien Raum keine Schallreflexion zu erwarten ist.

Dies alles sollte vor dem Hintergrund des Erklärungsansatzes, dass auditorische Reize als räumliche Landmarken dienen bei der Bewertung von Studien bzw. bei Designs zukünftiger Studien bedacht werden.




▶ **Abb. 2** Übersicht über relevante Einflussfaktoren bei experimentellen Studien zu Hören und Gleichgewicht.

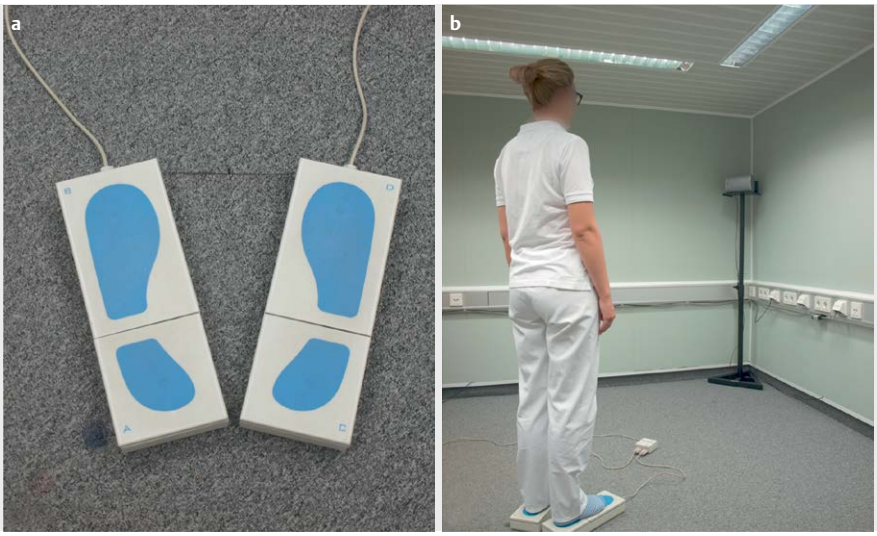
### 8.3.2 Schallqualität

Die Qualität des präsentierten Schalls nimmt ebenfalls eine bedeutende Rolle ein:

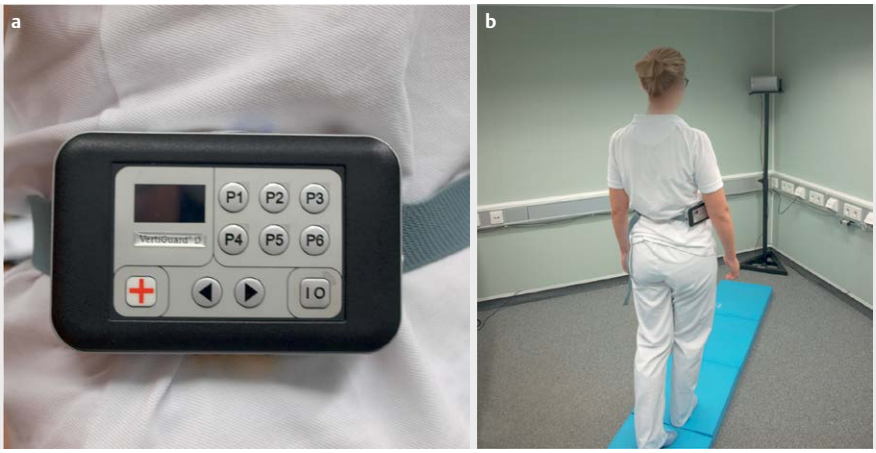
In vielen Arbeiten wurde Rauschen in verschiedenen Abwandlungen (oft weißes Rauschen, teils auch rosa Rauschen oder Fastl-Rauschen) verwendet. Es wurden jedoch auch Versuche mit der Präsentation von Sinustönen, Sprachgemurmel, Musik oder alltäglichen Geräuschen durchgeführt. Dies ist ein wichtiger Aspekt, da auch gezeigt wurde, dass die emotionale Komponente, welche durch ein Geräusch hervorgerufen wird, nicht zu vernachlässigen ist:

Bei Chen et al. [41] zeigte sich bei Geräuschen, die unangenehme Assoziationen hervorrufen, wie beispielsweise „Übergeben“ oder „Schreien“ eine Abnahme der posturalen Stabilität, und auch bei Anton et al. [33] war eine Zunahme der Oberkörperschwankung bei kontinuierlicher Geräuschpräsentation im Vergleich zu einer Verbesserung bei intermittierendem Geräusch zu beobachten.

In der ebenfalls bereits beschriebenen Arbeit von Park et al. [48] wurde das Störempfinden des Geräusches nach Frequenz und Lautstärke mittels einer Sieben-Punkte-Skala erfasst. Dabei war eine si-



▶ **Abb. 3** Beispiel für ein Fußplatten-Messsystem: IBS, (IBS Interactive Balance System (Fa. neurodata GmbH, Wien, Österreich), welches zusätzlich zu Kräfteschwankungen zwischen Vor- und Rückfuß mittels frequenzorientierter Fast-Fourier-Analyse des Kraft-Zeit-Signals eine Analyse posturaler Subsysteme ermöglicht [104, 105] **a**: Fußplatten, angeordnet im 30° Winkel **b**: Einsatz bei Messung mit frontaler Schallpräsentation in echoarmer Kabine.




▶ **Abb. 4** Beispiel für ein Oberkörperschwankungs-Messsystem: Vertiguard (Zeisberg, Metzingen, Germany) welches an der Hüfte in der Nähe des Körperschwerpunktes getragen (**a**) mittels Beschleunigungssensoren die Oberkörperschwankung erfasst. **b**: Einsatz zur dynamisch-mobilen Messung beim Gehen auf Schaumstoffmatten mit frontaler Schallpräsentation in echoarmer Kabine.

gnifikante Zunahme des Grades des subjektiven Störempfindens mit der Zunahme der Frequenz und der Lautstärke zu erkennen. Während objektiv bezüglich der Lautstärke kein Einfluss auf die Stabilität beobachtet werden konnte, zeigte sich eine Zunahme des Schwankens in anteroposteriorer Richtung mit zunehmender Frequenz des präsentierten Geräusches.

Auch in den Arbeiten von Seiwerth et. al. mit Normalhörenden [34, 39] und Patienten mit Hörrehabilitation [96] wurde das präsentierte Geräusch, Fastl-Rauschen (ein Rauschen, das Hinsichtlich seiner spektralen Verteilung und Hüllkurvenschwankung menschlicher Sprache gleicht [35] eher als unangenehm empfunden.

Bei Musik [73, 74] kommt, zusätzlich zu potenziell individuell angenehmen (oder auch unangenehmen) Assoziationen, die rhythmogene Wirkung bei z. B. Ganguntersuchungen hinzu, wodurch ebenfalls eine stabilisierende Wirkung erreicht werden kann [73, 74].

Die Auswahl der Geräusche bei experimentellen Studien ist in gewissem Sinne eine Gratwanderung, da die Geräusche einerseits orientierend als Stütze dienen, jedoch gleichzeitig nicht ablenken sollen. Es wird zudem vermutet, dass das Gleichgewicht beeinträchtigt werden kann, wenn die Probanden gleichzeitig kognitive Aufgaben erfüllen müssen wie beispielsweise Zählen, Rechnen etc., wie es in der Übersicht von Carpenter und Campos [20] beschrieben wird [97–103]. Durch Belegung zentralneurologischer Ressourcen komme es so zu einer Konkurrenzsituation mit der Verschaltung posturaler Systeme, was sich negativ auf die kognitive Testung wie auch auf die posturalen Messungen auswirken könne [20].

## 8.4 Schlussfolgerung und Ausblick

In mehreren epidemiologischen Studien konnte ein Zusammenhang zwischen einer Verschlechterung des Hörvermögens und einer Reduktion der Gleichgewichtsfunktion, Erhöhung des Sturzrisikos oder Einschränkung der Mobilität deutlich aufgezeigt werden.

Auditorische Reize scheinen neben visuellen, propriozeptiven und vestibulären Informationen an posturalen Regulationsprozessen beteiligt zu sein, wenn auch in verhältnismäßig deutlich geringerem Maße als die jeweilige visuelle, propriozeptive oder vestibuläre Achse. Der stabilisierende Effekt scheint höher zu sein, wenn eine der drei anderen Achsen (visuell, vestibulär, propriozeptiv) beeinträchtigt oder ausgefallen ist. Die Studienlage erlaubt auch Einblicke in die komplexen Mechanismen audiovestibulärer Interaktion und bietet mit verschiedenen Modellen Erklärungsansätze wie beispielweise der auditorischen Landkarte oder der stochastischen Resonanz. Auditorische Informationen können sowohl stützend als auch negativ auf die posturale Kontrolle wirken. Ob der Effekt zur Gleichgewichtsregulation eher stabilisierend oder eher störend ist scheint auch mit der Qualität der auditorischen Reize zusammenzuhängen.

Es muss jedoch betont werden, dass die Datenlage hinsichtlich einer Vielzahl an Einflussfaktoren sehr inhomogen ist, was die Vergleichbarkeit, Aussagekraft und Möglichkeit zur Verallgemeinerung der jeweiligen Ergebnisse deutlich einschränkt ist. Zudem muss der Publikation-Bias mit eingerechnet werden, welcher möglicherweise eine Dunkelziffer an nicht veröffentlichten, vermeintlich negativen Ergebnissen vermuten lässt.

Vorbehaltlich der fehlenden Evidenz kann man zusammenfassend unter Berücksichtigung der bisher erschienen Studien annehmen, dass auditorische Informationen das Potential haben, mit dem Gleichgewicht zu interagieren sowie unter bestimmten Umständen stabilisierend auf die posturale Kontrolle zu wirken.

Vor diesem Hintergrund sind folgende klinische Aspekte relevant: So wird die Rolle von apparativen und implantierbaren Hörgeräten um die reine Funktion der Hörverbesserung im Sinne einer möglichen Stütze bei der Gleichgewichtsregulierung erweitert. Zudem sollte bei der Durchführung von Messungen zur posturalen Erfassung in der klinischen Routine bedacht werden, dass Umgebungsgeräusche das Testergebnis beeinflussen können.

In Zukunft könnten auditorische Signale auch eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von Rehabilitationstherapien vestibulärer Erkrankungen im Sinne eines Biofeedback-Systems oder implementiert in Virtual-Reality-Strategien.

Letztendlich sind jedoch zukünftig kontrollierte, prospektive Beobachtungsstudien erforderlich, um Fragestellungen, welche den Zusammenhang zwischen Hören und Gleichgewicht untersuchen, auf evidenzbasierten, wissenschaftlich fundierten Boden zu stellen.

# 9. Danksagung

Ein herzlicher Dank geht insbesondere an Herrn Prof. René Schwesig für die kritische Sichtung des Referates, sowie Herrn Prof. Torsten Rahne, Herrn Prof. Stefan Plontke, Frau Dr. Laura Fröhlich und Frau Dr. Alexandra Gey für wertvolle Anregungen sowie die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

## Interessenkonflikt

Der Autor gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht

## Literatur

[1] Mergner T, Maurer C, Peterka RJ. Sensory contributions to the control of stance: a posture control model. Adv Exp Med Biol 2002; 508: 147–152

[2] Walther LE, Hormann K, Pfaar O. Recording cervical and ocular vestibular evoked myogenic potentials: part 1: anatomy, physiology, methods and normal findings. HNO 2010; 58: 1031–1045

[3] Carey J, Amin N. Evolutionary changes in the cochlea and labyrinth: Solving the problem of sound transmission to the balance organs of the inner ear. Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol 2006; 288: 482–489

[4] Dlugaiczyk J. Evidence-based diagnostic use of VEMPs: From neurophysiological principles to clinical application. German version. HNO 2020; 68: 324–335

[5] Lue JH, Day AS, Cheng PW et al. Vestibular evoked myogenic potentials are heavily dependent on type I hair cell activity of the saccular macula in guinea pigs. Audiol Neurootol 2009; 14: 59–66

[6] Zuniga MG, Dinkes RE, Davalos-Bichara M et al. Association between hearing loss and saccular dysfunction in older individuals. Otol Neurotol 2012; 33: 1586–1592

[7] Sadler TW. Medizinische Embryologie. 10. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2003: 355,358,360

[8] Minor LB, Solomon D, Zinreich JS et al. Sound- and/or pressure-induced vertigo due to bone dehiscence of the superior semicircular canal. Arch Otolaryngol Head Neck Surg 1998; 124: 249–258

[9] Rosowski JJ, Songer JE, Nakajima HH et al. Clinical, experimental, and theoretical investigations of the effect of superior semicircular canal dehiscence on hearing mechanisms. Otol Neurotol 2004; 25: 323–332

[10] Ward BK, Carey JP, Minor LB. Superior Canal Dehiscence Syndrome: Lessons from the First 20 Years. Front Neurol 2017; 8: 177

[11] Schwesig R, Becker S, Lauenroth A et al. A novel posturographic method to differentiate sway patterns of patients with Parkinson's disease from patients with cerebellar ataxia. Biomed Tech (Berl) 2009; 54: 347–356

[12] Anton K, Ernst A, Basta D. A static sound source can improve postural stability during walking. J Vestib Res 2021; 31: 143–149

[13] Viljanen A, Kaprio J, Pyykko I et al. Hearing acuity as a predictor of walking difficulties in older women. J Am Geriatr Soc 2009; 57: 2282–2286

[14] Viljanen A, Kaprio J, Pyykko I et al. Hearing as a predictor of falls and postural balance in older female twins. J Gerontol A Biol Sci Med Sci 2009; 64: 312–317

[15] Lin FR, Ferrucci L. Hearing loss and falls among older adults in the United States. Arch Intern Med 2012; 172: 369–371

[16] Jiam NT, Li C, Agrawal Y. Hearing loss and falls: A systematic review and meta-analysis. Laryngoscope 2016; 126: 2587–2596

[17] Chen DS, Betz J, Yaffe K et al. Association of hearing impairment with declines in physical functioning and the risk of disability in older adults. J Gerontol A Biol Sci Med Sci 2015; 70: 654–661

[18] Berge JE, Nordahl SHG, Aarstad HJ et al. Hearing as an Independent Predictor of Postural Balance in 1075 Patients Evaluated for Dizziness. Otolaryngol Head Neck Surg 2019; 161: 478–484

[19] Borsetto D, Corazzi V, Franchella S et al. The Influence of Hearing Aids on Balance Control: A Systematic Review. Audiol Neurootol 2021; 26: 209–217

[20] Carpenter MG, Campos JL. The Effects of Hearing Loss on Balance: A Critical Review. Ear Hear 2020; 41: 107S–119S

[21] Ernst A, Basta D, Mittmann P et al. Can hearing amplification improve presbyvestibulopathy and/or the risk-to-fall ? Eur Arch Otorhinolaryngol 2021; 278: 2689–2694

[22] Easton RD, Greene AJ, DiZio P et al. Auditory cues for orientation and postural control in sighted and congenitally blind people. Exp Brain Res 1998; 118: 541–550

[23] Kanegaonkar RG, Amin K, Clarke M. The contribution of hearing to normal balance. J Laryngol Otol 2012; 126: 984–988

[24] Zhong X, Yost WA. Relationship between postural stability and spatial hearing. J Am Acad Audiol 2013; 24: 782–788

[25] Ross JM, Balasubramaniam R. Auditory white noise reduces postural fluctuations even in the absence of vision. Exp Brain Res 2015; 233: 2357–2363

[26] Ross JM, Will OJ, McGann Z et al. Auditory white noise reduces age-related fluctuations in balance. Neurosci Lett 2016; 630: 216–221

[27] Vitkovic J, Le C, Lee SL et al. The Contribution of Hearing and Hearing Loss to Balance Control. Audiol Neurootol 2016; 21: 195–202

[28] Gandemer L, Parseihian G, Kronland-Martinet R et al. The influence of horizontally rotating sound on standing balance. Exp Brain Res 2014; 232: 3813–3820

[29] Gandemer L, Parseihian G, Kronland-Martinet R et al. Spatial Cues Provided by Sound Improve Postural Stabilization: Evidence of a Spatial Auditory Map? Front Neurosci 2017; 11: 357

[30] Xu H, Ohgami N, He T et al. Improvement of balance in young adults by a sound component at 100 Hz in music. Sci Rep 2018; 8: 16894

[31] Ohgami N, Oshino R, Ninomiya H et al. Risk Assessment of Neonatal Exposure to Low Frequency Noise Based on Balance in Mice. Front Behav Neurosci 2017; 11: 30

[32] Tamura H, Ohgami N, Yajima I et al. Chronic exposure to low frequency noise at moderate levels causes impaired balance in mice. PLoS One 2012; 7: e39807

[33] Anton K, Ernst A, Basta D. Auditory influence on postural control during stance tasks in different acoustic conditions. J Vestib Res 2019; 29: 287–294

[34] Seiwerth I, Jonen J, Rahne T et al. Postural regulation and stability with acoustic input in normal-hearing subjects. HNO 2020; 68: 100–105

[35] Fastl H. Ein Störgeräusch für Sprachaudiometrie. Audiol Acoustics 1987; 2: 22–13

[36] Ninomiya C, Hiraumi H, Yonemoto K et al. Effect of hearing aids on body balance function in non-reverberant condition: A posturographic study. PLoS One 2021; 16: e0258590

[37] Munnings A, Chisnall B, Oji S et al. Environmental factors that affect the Fukuda stepping test in normal participants. J Laryngol Otol 2015; 129: 450–453

[38] Karim AM, Rumalla K, King LA et al. The effect of spatial auditory landmarks on ambulation. Gait Posture 2018; 60: 171–174

[39] Seiwerth I, Jonen J, Rahne T et al. Influence of hearing on vestibulospinal control in healthy subjects. German version. HNO 2018; 66: 590–597

[40] Palm HG, Strobel J, Achatz G et al. The role and interaction of visual and auditory afferents in postural stability. Gait Posture 2009; 30: 328–333

[41] Chen X, Qu X. Influence of affective auditory stimuli on balance control during static stance. Ergonomics 2017; 60: 404–409

[42] Azevedo R, Teixeira N, Abade E et al. Effects of noise on postural stability when in the standing position. Work 2016; 54: 87–91

[43] Maheu M, Sharp A, Landry SP et al. Sensory reweighting after loss of auditory cues in healthy adults. Gait Posture 2017; 53: 151–154

[44] Oikawa K, Kobayashi Y, Hiraumi H et al. Body balance function of cochlear implant patients with and without sound conditions. Clin Neurophysiol 2018; 129: 2112–2117

[45] Ibrahim I, da Silva SD, Segal B et al. Postural stability: assessment of auditory input in normal hearing individuals and hearing aid users. Hearing Balanc. Commu 2019; 17: 280–287

[46] Raper SA, Soames RW. The influence of stationary auditory fields on postural sway behaviour in man. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 1991; 63: 363–367

[47] Tanaka T, Kojima S, Takeda H et al. The influence of moving auditory stimuli on standing balance in healthy young adults and the elderly. Ergonomics 2001; 44: 1403–1412

[48] Park SH, Lee K, Lockhart T et al. Effects of sound on postural stability during quiet standing. J Neuroeng Rehabil 2011; 8: 67

[49] Gago MF, Fernandes V, Ferreira J et al. Role of the Visual and Auditory Systems in Postural Stability in Alzheimer's Disease. J Alzheimers Dis 2015; 46: 441–449

[50] Moher D, Shamseer L, Clarke M et al. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. Syst Rev 2015; 4: 1

[51] Lacerda CF, Silva LO, de Tavares Canto RS et al. Effects of hearing aids in the balance, quality of life and fear to fall in elderly people with sensorineural hearing loss. Int Arch Otorhinolaryngol 2012; 16: 156–162

[52] Ware JE Jr., Sherbourne CD. The MOS 36-item short-form health survey (SF-36). I. Conceptual framework and item selection. Med Care 1992; 30: 473–483

[53] Yardley L, Beyer N, Hauer K et al. Development and initial validation of the Falls Efficacy Scale-International (FES-I). Age Ageing 2005; 34: 614–619

[54] Berg KO, Wood-Dauphinee SL, Williams JI et al. Measuring balance in the elderly: validation of an instrument. Can J Public Health 1992; 83: S7–S11

[55] Rumalla K, Karim AM, Hullar TE. The effect of hearing aids on postural stability. Laryngoscope 2015; 125: 720–723

[56] Negahban H, Bavarsad Cheshmeh Ali M, Nassadj G. Effect of hearing aids on static balance function in elderly with hearing loss. Gait Posture 2017; 58: 126–129

[57] Shayman CS, Earhart GM, Hullar TE. Improvements in Gait With Hearing Aids and Cochlear Implants. Otol Neurotol 2017; 38: 484–486

[58] Franchignoni F, Horak F, Godi M et al. Using psychometric techniques to improve the Balance Evaluation Systems Test: the mini-BESTest. J Rehabil Med 2010; 42: 323–331

[59] Weaver TS, Shayman CS, Hullar TE. The Effect of Hearing Aids and Cochlear Implants on Balance During Gait. Otol Neurotol 2017; 38: 1327–1332

[60] McDaniel DM, Motts SD, Neeley RA. Effects of Bilateral Hearing Aid Use on Balance in Experienced Adult Hearing Aid Users. Am J Audiol 2018; 27: 121–125

[61] Maheu M, Behtani L, Nooristani M et al. Vestibular Function Modulates the Benefit of Hearing Aids in People With Hearing Loss During Static Postural Control. Ear Hear 2019; 40: 1418–1424

[62] Cohen H, Blatchly CA, Gombash LL. A study of the clinical test of sensory interaction and balance. Phys Ther 1993; 73: 346–351. discussion 351-344

[63] Seiwerth I, Brylok A, Schwesig R et al. Influence of Hearing Rehabilitation With Active Middle Ear and Bone Conduction Implants on Postural Control. Front Neurol 2022; 13: 846999

[64] Ibrahim I, da Silva SD, Segal B et al. Effect of cochlear implant surgery on vestibular function: meta-analysis study. J Otolaryngol Head Neck Surg 2017; 46: 44

[65] Suarez H, Angeli S, Suarez A et al. Balance sensory organization in children with profound hearing loss and cochlear implants. Int J Pediatr Otorhinolaryngol 2007; 71: 629–637

[66] Huang MW, Hsu CJ, Kuan CC et al. Static balance function in children with cochlear implants. Int J Pediatr Otorhinolaryngol 2011; 75: 700–703

[67] Shayman CS, Mancini M, Weaver TS et al. The contribution of cochlear implants to postural stability. Laryngoscope 2018; 128: 1676–1680

[68] Miwa T, Minoda R, Matsuyoshi H et al. The effect of cochlear implants on vestibular-evoked myogenic potential responses and postural stability. Auris Nasus Larynx 2019; 46: 50–57

[69] Parietti-Winkler C, Lion A, Montaut-Verient B et al. Effects of Unilateral Cochlear Implantation on Balance Control and Sensory Organization in Adult Patients with Profound Hearing Loss. Biomed Res Int 2015; 2015: 621845

[70] Louza J, Klappert CL, Ledderose G et al. Cochlear Implant Surgery and the Risk of Falls in an Adult Population. Otol Neurotol 2018; 39: e74–e79

[71] Guigou C, Toupet M, Delemps B et al. Effect of Rotating Auditory Scene on Postural Control in Normal Subjects, Patients With Bilateral Vestibulopathy, Unilateral, or Bilateral Cochlear Implants. Front Neurol 2018; 9: 972

[72] Wiszomirska I, Zdrodowska A, Tacikowska G et al. Does cochlear implantation influence postural stability in patients with hearing loss? Gait Posture 2019; 74: 40–44

[73] Louza J, Rosel C, Gurkov R et al. Influence of Cochlear Implantation on Postural Control and Risk of Falls. Audiol Neurootol 2019; 24: 245–252

[74] Hallemans A, Mertens G, Van de Heyning P et al. Playing Music May Improve the Gait Pattern in Patients with Bilateral Caloric Areflexia Wearing a Cochlear Implant: Results from a Pilot Study. Front Neurol 2017; 8: 404

[75] Cushing SL, Papsin BC, Gordon KA. Incidence and characteristics of facial nerve stimulation in children with cochlear implants. Laryngoscope 2006; 116: 1787–1791

[76] Basta D, Todt I, Goepel F et al. Loss of saccular function after cochlear implantation: the diagnostic impact of intracochlear electrically elicited vestibular evoked myogenic potentials. Audiol Neurootol 2008; 13: 187–192

[77] Coordes A, Basta D, Gotze R et al. Sound-induced vertigo after cochlear implantation. Otol Neurotol 2012; 33: 335–342

[78] Jin Y, Shinjo Y, Akamatsu Y et al. Vestibular evoked myogenic potentials evoked by multichannel cochlear implant – influence of C levels. Acta Otolaryngol 2008; 128: 284–290

[79] Rodriguez Montesdeoca I, Ramos de Miguel A, Gonzalez JCF et al. Differences in Vestibular-Evoked Myogenic Potential Responses by Using Cochlear Implant and Otolith Organ Direct Stimulation. Front Neurol 2021; 12: 663803

[80] Parkes WJ, Gnanasegaram JJ, Cushing SL et al. Vestibular evoked myogenic potential testing as an objective measure of vestibular stimulation with cochlear implants. Laryngoscope 2017; 127: E75–E81

[81] Hallemans A, Herssens N, Mertens G et al. Response to Weaver Ts, Shayman Cs, Huller Te. The Effect of Hearing Aids and Cochlear Implants on Balance during Gait. Otol Neurotol 2017;38: 1327-1332. Otol Neurotol 2018; 39: 518–519

[82] Stevens MN, Barbour DL, Gronski MP et al. Auditory contributions to maintaining balance. J Vestib Res 2016; 26: 433–438

[83] Dozza M, Chiari L, Horak FB. Audio-biofeedback improves balance in patients with bilateral vestibular loss. Arch Phys Med Rehabil 2005; 86: 1401–1403

[84] Basta D, Rossi-Izquierdo M, Soto-Varela A et al. Efficacy of a vibrotactile neurofeedback training in stance and gait conditions for the treatment of balance deficits: a double-blind, placebo-controlled multicenter study. Otol Neurotol 2011; 32: 1492–1499

[85] Akeroyd MA. An overview of the major phenomena of the localization of sound sources by normal-hearing, hearing-impaired, and aided listeners. Trends Hear 2014; 18:

[86] Dorman MF, Loiselle LH, Cook SJ et al. Sound Source Localization by Normal-Hearing Listeners, Hearing-Impaired Listeners and Cochlear Implant Listeners. Audiol Neurootol 2016; 21: 127–131

[87] Makous JC, Middlebrooks JC. Two-dimensional sound localization by human listeners. J Acoust Soc Am 1990; 87: 2188–2200

[88] Gandemer L, Parseihian G, Bourdin C et al. Sound and Posture: an Overview of Recent Findings. Computer Music and Multidisciplinary Reasearch (CMMR) 2016; hal-01311011

[89] Lugo E, Doti R, Faubert J. Ubiquitous crossmodal Stochastic Resonance in humans: auditory noise facilitates tactile, visual and proprioceptive sensations. PLoS One 2008; 3: e2860

[90] Manjarrez E, Mendez I, Martinez L et al. Effects of auditory noise on the psychophysical detection of visual signals: cross-modal stochastic resonance. Neurosci Lett 2007; 415: 231–236

[91] Ohbayashi W, Kakigi R, Nakata H. Effects of white noise on event-related potentials in somatosensory Go/No-go paradigms. Neuroreport 2017; 28: 788–792

[92] Baltes PB, Baltes MM. Selective Optimization with Compensation – a Psychological Model of Successful Aging. Z Padagogik 1989; 35: 85–105

[93] Asslander L, Peterka RJ. Sensory reweighting dynamics in human postural control. J Neurophysiol 2014; 111: 1852–1864

[94] Pichora-Fuller MK, Kramer SE, Eckert MA et al. Hearing Impairment and Cognitive Energy: The Framework for Understanding Effortful Listening (FUEL). Ear Hear 2016; 37: 5S–27S

[95] Basta D, Rossi-Izquierdo M, Soto-Varela A et al. Mobile posturography: posturographic analysis of daily-life mobility. Otol Neurotol 2013; 34: 288–297

[96] Seiwerth I, Frohlich L, Schilde S et al. Clinical and functional results after implantation of the bonebridge, a semi-implantable, active transcutaneous bone conduction device, in children and adults. Eur Arch Otorhinolaryngol 2021. doi:10.1007/s00405-021-06626-7

[97] Bernard-Demanze L, Dumitrescu M, Jimeno P et al. Age-related changes in posture control are differentially affected by postural and cognitive task complexity. Curr Aging Sci 2009; 2: 139–149

[98] Lajoie Y, Teasdale N, Bard C et al. Attentional demands for static and dynamic equilibrium. Exp Brain Res 1993; 97: 139–144

[99] Mahboobin A, Loughlin PJ, Redfern MS. A model-based approach to attention and sensory integration in postural control of older adults. Neurosci Lett 2007; 429: 147–151

[100] Maylor EA, Wing AM. Age differences in postural stability are increased by additional cognitive demands. J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci 1996; 51: P143–P154

[101] Teasdale N, Bard C, LaRue J et al. On the cognitive penetrability of posture control. Exp Aging Res 1993; 19: 1–13

[102] Teasdale N, Simoneau M. Attentional demands for postural control: the effects of aging and sensory reintegration. Gait Posture 2001; 14: 203–210

[103] Woollacott M, Shumway-Cook A. Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. Gait Posture 2002; 16: 1–14

[104] Friedrich M, Grein HJ, Wicher C et al. Influence of pathologic and simulated visual dysfunctions on the postural system. Exp Brain Res 2008; 186: 305–314

[105] Schwesig R, Fischer D, Kluttig A. Are there changes in postural regulation across the lifespan? Somatosens Mot Res 2013; 30: 167–174