

# Gleichgewichtsorgan

■ ■ ■ ■ IMPP-Relevanz ⌚ Lesezeit: 10 min

👁️ Zuletzt verwendet heute um 15:02 Uhr

## ✓ Steckbrief

Das Gleichgewichtsorgan (**Vestibularorgan**) liegt im Felsenbein (Pars petrosa ossis temporalis) und ist Teil des Innenohrs. Das **Innenohr** besteht aus einem knöchernen und einem membranösen Labyrinth, welche locker miteinander verbunden sind. Der Raum zwischen den beiden Strukturen ist mit **Perilymphe** gefüllt (**perilymphatischer Raum**). Im häutigen Labyrinth befinden sich die Sinnesepithelien sowohl des Gleichgewichts- als auch des Hörorgans.

Das Gleichgewichtsorgan (Vestibularorgan) besteht aus drei membranösen **Bogengängen (Ductus semicirculares)** und zwei kammerförmigen Erweiterungen, **Sacculus und Utriculus**. Die Sinnesepithelien, die Drehbeschleunigung registrieren, befinden sich in den Erweiterungen der Bogengänge und werden als **Cristae ampullares** bezeichnet. Die Sinnesepithelien in Sacculus und Utriculus (**Macula utriculi** und **Macula sacculi**) reagieren hingegen auf Linearbeschleunigung.

Die Sinneszellen sind **Haarzellen**, die durch die Auslenkung ihrer Zilien die Frequenz der Aktionspotenziale der zugehörigen afferenten Nervenbahnen modulieren.

## ✓ Aufbau

Die Wahrnehmung der Lage des Körpers (besonders des Kopfes) im Raum wird durch das Vestibularorgan detektiert. Es ist in der Tiefe des Felsenbeins (Pars petrosa des Os temporale) gelegen und Teil des **Innenohrs**. Das Innenohr besteht aus einem knöchernen und einem häutigen (membranösen) Labyrinth. Man unterscheidet das **vestibuläre Labyrinth** und das **kochleäre Labyrinth**. Im **kochleären Labyrinth** befindet sich das **Hörorgan**. Im vestibulären Labyrinth hingegen befinden sich die Sinnesepithelien des Gleichgewichtsorgans. Über den **Ductus reuniens** sind die beiden Teile des Labyrinths miteinander verbunden.

Das häutige Labyrinth ist mit Bindegewebsfasern im Bereich des vestibulären Labyrinths locker mit dem knöchernen Labyrinth verbunden. Der Hohlraum dazwischen wird als **perilymphatischer Raum** bezeichnet und ist mit Perilymphe gefüllt, während das häutige Labyrinth  $K^+$ -reiche **Endolymphe** enthält.

Das Gleichgewichtsorgan (Vestibularorgan) besteht aus drei membranösen Bogengängen (**Ductus semicirculares**) und zwei kammerförmigen Erweiterungen **Sacculus** und **Utriculus**. Die Sinnesepithelien befinden sich zum einen in den Erweiterungen der Bogengänge (Ampullae), wo sie auf

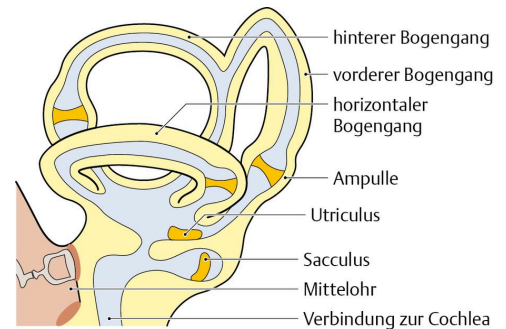
**Drehbeschleunigung** reagieren. Zum anderen befinden sich Sinnesepithelien im Sacculus und im Utriculus, diese reagieren auf **horizontale** (Macula utriculi) und **vertikale** (Macula sacculi) **Linearbeschleunigung**.

### Lerntipp:

In mündlichen Prüfungen wird gerne gefragt, welchen physikalischen Reiz das Vestibularorgan misst. Vorsicht: „Gleichgewicht“ ist hier nicht die richtige Antwort: dabei handelt es sich um einen komplexen physiologischen Zustand, in den verschiedene Sinneseindrücke miteinfließen. Der **physikalische Reiz**, den das Vestibularorgan misst, ist die **Beschleunigung**.

### Vestibularorgan

(Quelle: Gekle et al., Taschenlehrbuch Physiologie, Thieme, 2014)



### Ductus semicirculares

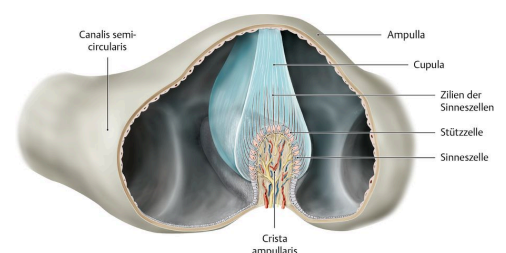
Die kreisförmigen **Bogengänge** sind alle miteinander verbunden und gehen vom Utriculus ab. Sie stehen jeweils nahezu senkrecht zueinander.

Jeder Bogengang besitzt zur Mitte hin eine Aufweitung des Ganges (Ampulle). An deren Basis befindet sich jeweils das hügelartig erhabene Sinnesepithel (**Crista ampullaris**), welches **quer** zum Lumen der Bogengänge steht. Die Sinneszellen des Vestibularorgans sind – analog zur Kochlea – Haarzellen.

Die Haarzellen des Vestibularorgans tragen apikal jeweils **ein langes Kinozilium** und **ca. 80 kürzere Stereozilien** (ca. 6 µm lang). Das gesamte Bündel von Kinozilium und Stereozilien ist durch **Tip links**, extrazelluläre Filamente, miteinander verbunden und vollzieht deshalb jede Bewegung gemeinsam. Bedeckt sind die Haarzellen von einer gallertartigen Kuppel, der sog. **Cupula**. Diese spannt sich von den Sinneszellen bis zur gegenüberliegenden Wand. Die Zusammensetzung ist ähnlich der der Tektorialmembran der Kochlea. Die Haarzellen sind wie in der Kochlea von Stützzellen umgeben. Die Stützzellen reichen durch die gesamte Breite des Epithels und sind über Adherens junctions und Tight junctions mit den Haarzellen verbunden.

### Ampulla und Crista ampullaris

(Quelle: Schünke, Schulte, Schumacher. Prometheus Kopf, Hals und Neuroanatomie. Illustrationen: Voll, Wesker. Thieme, 2018)



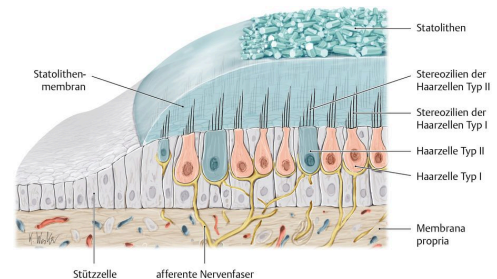
# Sacculus und Utriculus

Sacculus und Utriculus sind die beiden kammerförmigen Erweiterungen des vestibulären Labyrinths. Beide zusammen werden auch als **Maculaorgan** bezeichnet. Das Sinnesepithel befindet sich jeweils am Boden des Utriculus bzw. Sacculus. Im Utriculus (**Macula utriculi**) ist es horizontal zur Körperachse ausgerichtet und im Sacculus (**Macula sacculi**) vertikal. Beide Sinnesepithelien zusammen werden auch als **Macula statica** bezeichnet.

Die Haarzellen sind genauso aufgebaut wie die der **Cristae ampullares**. Der einzige Unterschied ist, dass die Haarzellen nicht von einer gallertartigen Kuppel (Cupula) bedeckt sind, sondern dass über allen Haarzellen eine gallertartige Membran liegt, die sog. **Statokonienmembran** (Otolithenmembran). In diese Membran sind an der Oberfläche Kalziumkarbonatkristalle eingebettet, welche als Ohrstaub (**Otokonien**) oder als Ohrsteine (**Otolithen**) bezeichnet werden. Anders als bei den Cristae ampullares sind die Haarsinneszellen nicht alle gleich ausgerichtet, sondern in verschiedenen Raumrichtungen. Beide Strukturen weisen in ihrer Mitte eine gedachte Linie auf, die sog. Striola, an der sich die Ausrichtung der Kinozilien ändert. Die Kinozilien befinden sich im **Utriculus** auf der **der Striola zugewandten Seite**, im **Sacculus** befinden sich die Kinozilien auf der **der Striola abgewandten Seite**. Die Stereozilien befinden sich auf der jeweils anderen Seite und sind ähnlich einer Treppe entsprechend ihrer Größe (beginnend beim größten Stereozilium neben dem Kinozilium) angeordnet.

## Macula statica

(Quelle: Schünke, Schulte, Schumacher. Prometheus Kopf, Hals und Neuroanatomie. Illustrationen: Voll, Wesker. Thieme, 2018)



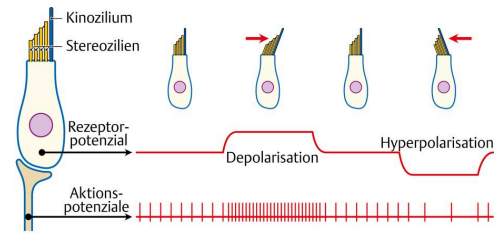
## ✓ Funktionsweise

Die Sinneszellen des Vestibularorgans sind **tonische Sinneszellen**, d.h., sie weisen bereits in Ruhe (ruhiges aufrechtes Halten des Kopfes) eine bestimmte Aktionspotenzialfrequenz auf (50–90 pro Sekunde). Durch Bewegungen der Ampulle kann die Frequenz des Aktionspotenzials **moduliert** werden. Die Modulation erlaubt dem Gehirn zu unterscheiden, in welche Richtung die Bewegung ausgeführt wurde.

Die Haarzellen sind **sekundäre Sinneszellen**, d. h., sie haben kein eigenes Axon, sondern besitzen an ihrer Zellbasis eine Synapse, über die sie Signale mittels Glutamat an das nachgeschaltete Neuron übertragen. Je nach Auslenkungsrichtung der Zilien kommt es entweder zu verstärkter oder zu verminderter Glutamatausschüttung. Entsprechend verändert sich die Impulsfrequenz der afferenten Nervenfasern. Werden die Stereozilien **in Richtung des Kinoziliums** ausgelenkt, führt das zur **Depolarisation** und dann zu einer **verstärkten Glutamatausschüttung**, was zu einer **erhöhten Aktionspotenzialfrequenz** der primären Afferenzen führt. Der umgekehrte Effekt tritt ein, wenn die Zilien in die entgegengesetzte Richtung ausgelenkt

werden. Die Erzeugung des Rezeptorpotenzials erfolgt wie in den Haarzellen der Kochlea.

### Modulierung der



### Aktionspotenzialfrequenz

Je nach Auslenkung des Zilienbündels kommt es zur Depolarisation (Auslenkung in Richtung des Kinoziliums) oder zur Hyperpolarisation (Auslenkung in Gegenrichtung des Kinoziliums).

(Quelle: Gekle et al., Taschenlehrbuch Physiologie, Thieme, 2014)

Die Impulse aus dem vestibulären System sind mit den Zentren der Stützmotorik (v. a. dem Kleinhirn) verbunden. Zusammen mit den peripheren Mechanorezeptoren und dem visuellen System informieren die Afferenzen aus dem Vestibularorgan über die Lage des Körpers im Raum. Letztlich bestehen auch noch Verknüpfungen mit der Blickmotorik, so werden z. B. Bewegungen des Kopfes direkt durch gegenläufige Augenbewegungen ausgeglichen.

### Lerntipp:

Was man sich hier fürs Mündliche merken sollte, ist Folgendes:

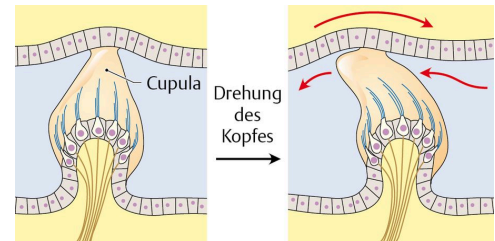
- Das **Gleichgewichtsorgan** besitzt im Gegensatz zum Corti-Organ **Kinozilien**.
- Das Gleichgewichtsorgan vermittelt **Bewegungs-** und **Lageempfindungen**. Die Maculae staticae (im Utriculus und Sacculus) nehmen **Linearbeschleunigungen** wahr, die Cristae ampullares (der Bogengänge) **Drehbeschleunigungen**.

## Bogengangsorgane

Die Bogengangsorgane registrieren **Drehbeschleunigungen** (Winkelbeschleunigungen). Die drei senkrecht aufeinanderstehenden Bogengänge besitzen Erweiterungen (Ampullae), in denen die Haarzellen lokalisiert sind. Diese sind durch gallertige Kuppeln, die Cupulae, bedeckt und von Endolymphe umgeben. Bei Drehbewegungen des Kopfes führt die Trägheit der Endolymphe zu einer Auswölbung der Cupulae und zur Auslenkung der Zilien. Die Dichte von Cupula und Endolymphe ist gleich, sodass die Cupula nur bei Bewegung ausgelenkt wird und damit die Stereozilien der Haarsinneszellen bewegt.

## Auslenkung der Cupula bei Drehung des Kopfes

(Quelle: Gekle et al., Taschenlehrbuch Physiologie, Thieme, 2014)



Durch die Anordnung der drei Bogengänge wird bei Drehbewegung in eine beliebige Richtung immer ein Bogengang erregt (→ Depolarisation). Jeder Bogengang hat einen korrespondierenden Bogengang auf der Gegenseite des Kopfes, der gleichzeitig gehemmt wird (→ Hyperpolarisation). Die Drehbewegung des Kopfes wird also auf beiden Seiten detektiert, führt aber zu entgegengesetzten Signalen. Bei einer Drehung des Kopfes nach rechts kommt es also zu einer Aktivierung der Haarzellen auf der rechten Seite und zu einer Hemmung auf der linken Seite. Das zentrale vestibuläre System errechnet die Differenz der afferenten Signale beider Seiten, was die Sensitivität des Systems weiter erhöht.

### Drehstuhlversuch:

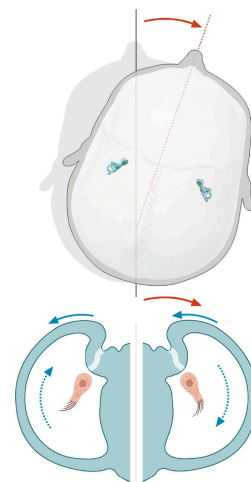
Dreht man einen Probanden auf einem Drehstuhl nach rechts, so wird die rechte Cupula erst ausgelenkt (erhöhte Aktionspotentialfrequenz). Sie schwingt dann nach kurzer Zeit aufgrund ihrer Eigenelastizität in ihre **Ruhelage** (Ruheaktivität) zurück und wird beim Abstoppen schließlich durch negative Beschleunigung kurzzeitig auf die **Gegenseite** ausgelenkt.

### Antagonistische Aktivierung von Haarzellen in zwei kontralateralen Bogengängen

Eine Kopfdrehung nach rechts führt dazu, dass die Endolymphe in beiden Bogengängen trägheitsbedingt nach links strömt. Die elastische Cupula steht dieser Bewegung entgegen, verformt sich und lenkt die Stereozilien der Haarzellen aus.

Durch die spiegelsymmetrische Anordnung der kontralateralen Bogengänge werden die Haarzellen links durch Hyperpolarisation gehemmt, rechts aber aufgrund einer Depolarisation aktiviert; es entsteht stets ein antagonistisches neuronales Signal.

(Quelle: Schünke, Schulte, Schumacher, Prometheus, Kopf- Hals und Neuroanatomie, Thieme, 2014; Grafiker: Karl Wesker)




## Maculaorgane

Die beiden Maculaorgane **Macula sacculi** und **Macula utriculi** stehen etwa senkrecht aufeinander. Während die Macula des Sacculus bei aufrechter Kopfhaltung vertikal liegt, befindet sich die des Utriculus horizontal im

Felsenbein. Die beiden Maculaorgane haben also unterschiedliche Vorzugsrichtungen. Gleichzeitig sind ihre Haarsinneszellen nicht alle gleichsinnig ausgerichtet, sondern in allen möglichen Raumrichtungen. Das heißt, ganz gleich in welche Richtung der **Kopf geneigt** wird, es gibt immer einige Haarzellen, die erregt, und andere, die gehemmt werden. Dieses Aktivitätsmuster wird von den **vestibulären Afferenzen** an das ZNS weitergeleitet und dort ausgewertet.

In die gallertigen Maculae (Otolithenmembran) sind relativ schwere Kalziumkarbonatkristalle (Otolithen) eingelagert. Bei Linearbeschleunigungen (Translationsbeschleunigungen) bleiben die Maculae aufgrund ihrer Trägheit zurück, sodass die Zilien der Haarzellen ausgelenkt werden. Auch in Ruhe kommt es zur leichten Abscherung der Zilien durch die Schwerkraft (Gravitationsbeschleunigung), die die Statolithen samt Maculae in Richtung Boden zieht. Die Maculaorgane registrieren die **Haltung des Kopfes** in Bezug zur Schwerkraft und zur **linearen Beschleunigung** (nach vorne und hinten sowie oben und unten).

### Maculaorgane

 Image description

(Quelle: Gekle et al.,  
Taschenlehrbuch Physiologie, Thieme, 2014)

#### **Blick in die Klinik: Lagerungsschwindel**

Bei bestimmten Bewegungen des Kopfes können traumatisch oder spontan abgelöste Kalziumkarbonatkristalle (Otolithenpartikel) in den Bogengängen (Canalith) oder direkt an der Cupula (Cupulith) Schwindel auslösen. Dann spricht man vom **benignen paroxysmalen Lagerungsschwindel**. Häufig ist er die Folge einer Degeneration der Otolithenmembran oder eines Labyrinthtraumas. Therapeutisch kann man die Kristalle durch spezielle Lagerungsmanöver in Bereiche des Labyrinths verlagern, in denen sie keine Irritationen mehr hervorrufen.

Man kann sich das so vorstellen, als ob man ein paar Sandkörner in einen spiralförmigen Plastikstrohhalm gefüllt hätte. Wenn man den Strohhalm nun hinlegt, rutscht der Sand immer an die tiefste Stelle. Je nachdem, wie man den Strohhalm nun dreht, verlagert sich der Sand. Genauso verfährt man mit den Bogengängen, bis die Kristalle an eine Stelle rutschen, wo sie nicht mehr stören können.

## ✓ IMPP-Fakten im Überblick

- ■ ■ ■ Die **Macula sacculi** registriert **vertikale Linearbeschleunigungen**.
- ■ ■ ■ In den Ampullen der **Ductus semicirculaes** befinden sich gallertige Cupulae.
- ■ ■ ■ Die **Sinneszellen (Haarzellen) der Maculae** im Innenohr nehmen Bewegungen des Kopfes wahr und leiten diese über den N. vestibulocochlearis zu zentralen Kerngebieten.

- ▪ ▪ ▪ Durch die **spiegelsymmetrische Anordnung der kontralateralen Bogengänge** werden die Haarzellen bei einer Kopfdrehung nach rechts auf der linken Seite durch **Hyperpolarisation** gehemmt, auf der rechten Seite aber aufgrund einer **Depolarisation** aktiviert.
- ▪ ▪ ▪ Bei einem **Drehstuhlversuch** nach rechts, steigt die **Aktionspotenzialfrequenz** in den afferenten Fasern der rechten Seite zunächst an und sinkt nach kurzer Zeit in die Ruhelage zurück. Bei einem Stopp der Rotation sinkt die Aktionspotentialfrequenz kurz unter die Frequenz der Ruhelage.
- ▪ ▪ ▪ Auch im Liegen **bei ruhiger Kopfhaltung** treten an den afferenten Nervenfasern des Gleichgewichtsorgans (Cristae ampullares, Macula sacculi und Macula utriculi) **Aktionspotenziale** auf, die über den N. vestibularis weitergeleitet werden.

## Mündliche Prüfungsfragen

Alle▼

zuletzt bearbeitet: 28.05.2024

Fachlicher Beirat: Prof. Dr. med. Joachim Kirsch, 11.06.2024