

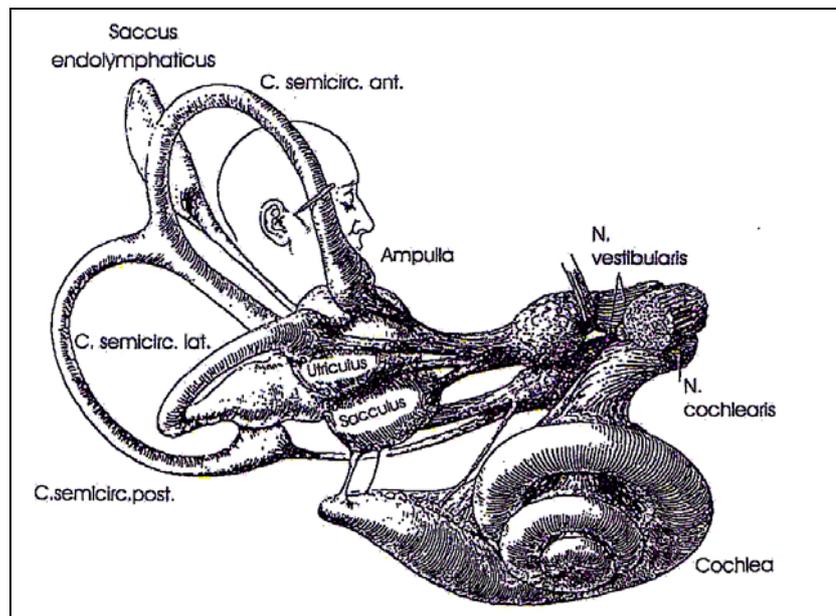
1 EINLEITUNG

1.1 Physiologie und Neuroanatomie des Gleichgewichtsorgans

Der Mensch verfügt, wie alle höheren Wirbeltiere über ein zentrales und ein peripheres Nervensystem. Das periphere Gleichgewichtsorgan gehört zum Innenohr und liegt im Felsenbein des Schädels. Die Vestibularorgane bilden dort den hinteren und den mittleren Labyrinthenteil.

Der achte der zwölf Hirnnerven, der N. vestibulocochlearis, stellt die Verbindung mit den entsprechenden Hirnstammstrukturen, den Vestibulariskernen, und schließlich dem vestibulären Cortex her, der als sensorisch-integratives Zentrum für die Wahrnehmung von Bewegungsreizen gesehen werden muss (Penfield 1957, Friberg et al. 1985).

Das periphere Gleichgewichtsorgan setzt sich bei den Wirbeltieren im wesentlichen aus zwei morphologischen Komponenten, dem Bogengangssystem und den Otolithenorganen, zusammen (Gray 1955). Hierbei sind die Bogengänge für die Registrierung und Verarbeitung von Drehbeschleunigungen und die Otolithen für diese von Linearbeschleunigungen zu primären Sinnesafferenzen verantwortlich, wobei die Otolithen ein schwerkraftabhängiges Verhalten zeigen. Dementsprechend weisen diese Sinnesorgane eine unterschiedliche Anatomie auf.



*Abb.1:
Das menschliche Labyrinth (aus Hardy 1934)*

Zusammen mit der Cochlea, dem Hörorgan, bildet das Vestibularorgan das Labyrinth. Es setzt

sich zusammen aus dem häutigen Labyrinth, welches mit der sogenannten Endolymphe gefüllt ist, und dem umgebenden knöchernen Labyrinth. Das knöcherne Labyrinth ist mit Perilymphe ausgefüllt, und umspült somit das häutige Labyrinth. Der Perilymphraum steht über den Ductus perilymphaticus (Aquaeductus cochleae) mit dem Subarachnoidalraum in Verbindung.

Die Endolymphe wird in der Stria vascularis und den "dark cells" der Cochlea produziert, sie ist kaliumreich und natriumarm. Ihre Resorption erfolgt über den Saccus endolymphaticus, einer Duplikatur der Dura mater. Die Perilymphe entstammt teilweise dem Liquor cerebrospinalis, teilweise wird sie vermutlich, dafür sprechen biochemische Untersuchungen, direkt aus dem Blut filtriert (Baloh und Honrubia 1990). Sie ist eine eiweißarme, kaliumarme und natriumreiche, klare Flüssigkeit. Ihre Resorption erfolgt über die Venen des perilymphatischen Raumes.

1.1.1 Die Bogengänge

Es handelt sich um drei ringförmige Gebilde, die ins Vestibulum münden und dort jeweils eine Erweiterung, die Ampulle, besitzen. In dieser Ampulle befinden sich die sogenannten Cristae ampullares, die als Haarzellen ausgebildeten vestibulären Sinneszellen. Die Zilien dieser Sinneszellen (ein Kinozilium und ca. 50 Stereozilien) ragen in eine gallertige Masse, die Cupula, hinein. Das Lumen der Bogengänge wird durch diese Strukturen verschlossen, so dass bei Verschiebungen der Endolymphe durch Trägheit, wie sie bei Kopfdrehungen zustande kommen, die Cupula diaphragmaartig (McLaren und Hillmann 1977) ausgelenkt wird, zumal sie dieselbe spezifische Dichte besitzt wie die umgebende Endolymphe.

Da die Haarzellen tragende Crista jedoch fest eingebettet ist, kommt es somit zu einer Abscherung der Sinneshaare, welche den adäquaten Reiz für die synaptische Informationsweitergabe auf das ersten Neuron darstellt.

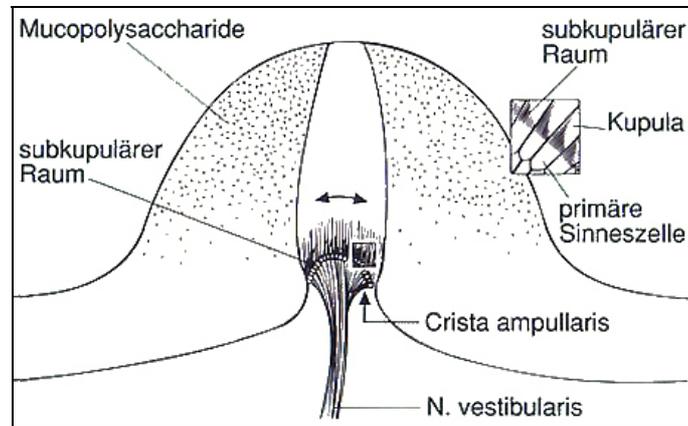


Abb. 2:
Anatomie der Bogengangsampulle mit Cupula (aus Scherer 1997)

Je nach Richtung der Abscherung spricht man von utrikulopetaler bzw. utrikulofugaler Auslenkung. Wegen der quasi orthogonalen Anordnung der Bogengänge in den drei Ebenen des Raumes, kommt es bei jeder Drehbeschleunigung zu einer typischen Erregung in mindestens zwei der drei Bogengangspaare (Hamann 1994).

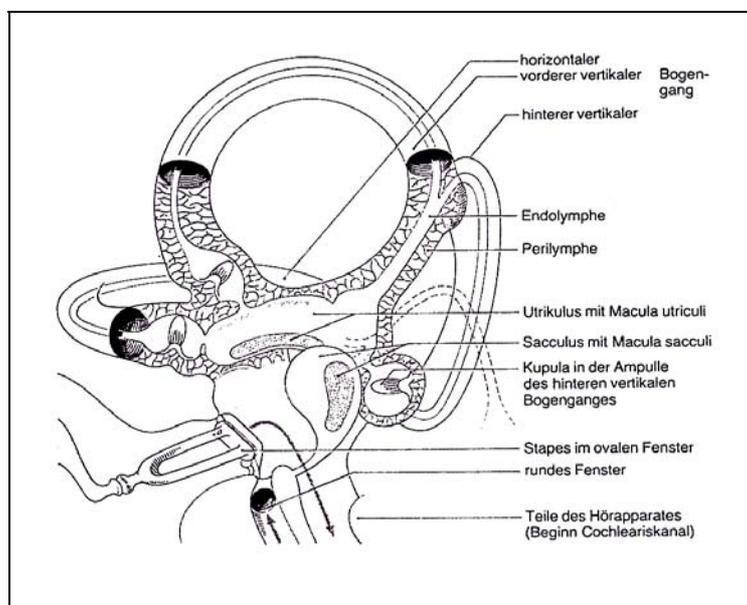
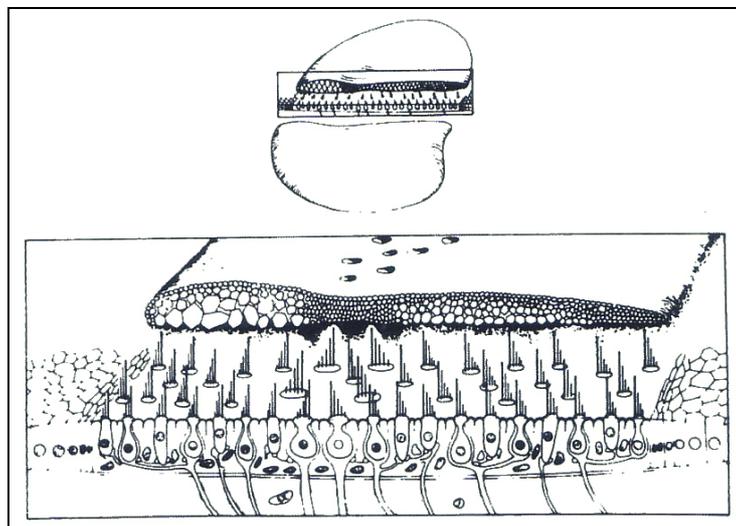


Abb. 3:
Das vestibuläre Labyrinth (aus Hamann 1994)

1.1.2 Die Otolithenorgane

Die beiden Otolithenorgane, Utrikulus und Sakkulus, liegen im Vestibulum nahe der Vereinigungsstelle der Bogengänge und sind etwa rechtwinklig zueinander angeordnet. Die Macula utriculi liegt annähernd in einer Ebene mit dem horizontalen Bogengang, welcher bei ca. 20-30 ° Neigung des Kopfes nach posterior waagrecht liegt (Curthoys 1977).

Die Otolithenorgane verfügen ebenso wie die Cristaorgane über die typischen Haarzellen mit Zilien, die in eine gallertige Masse hineinragen, welche durch die Aufnahme von Otokonien (Otolithen), bestehend aus calcithaltigen Kristallen, ein doppelt bis dreimal so hohes



*Abb. 4:
Macula utriculi mit aufgelagerten Otokonien
(aus Lindemann 1973)*

spezifisches Gewicht wie die umgebende Endolymphe gewinnen.

Aufgrund dieser anatomischen Besonderheit kommen bei Bewegungen zusätzliche Trägheitskräfte zum Tragen, und auch in Ruhe übt die Schwerkraft einen ständigen Reiz auf die Otolithenorgane aus. Da die Sinneszellen jedoch nicht auf senkrecht zur Oberfläche angreifende Kräfte, sondern auf Scherkräfte reagieren, wird der Utrikulus bei aufrechter Kopfhaltung nur wenig gereizt, so dass überwiegend der lotrecht stehende Sakkulus die Informationen über die Kopfhaltung liefert. Bei Translationsbewegungen wird dementsprechend überwiegend der Utrikulus gereizt.

Aufgrund der besonderen Anordnung (Abb. 5 und 6) der zilientragenden Sinneszellen entsteht die Möglichkeit der multidirektionalen Perzeption.

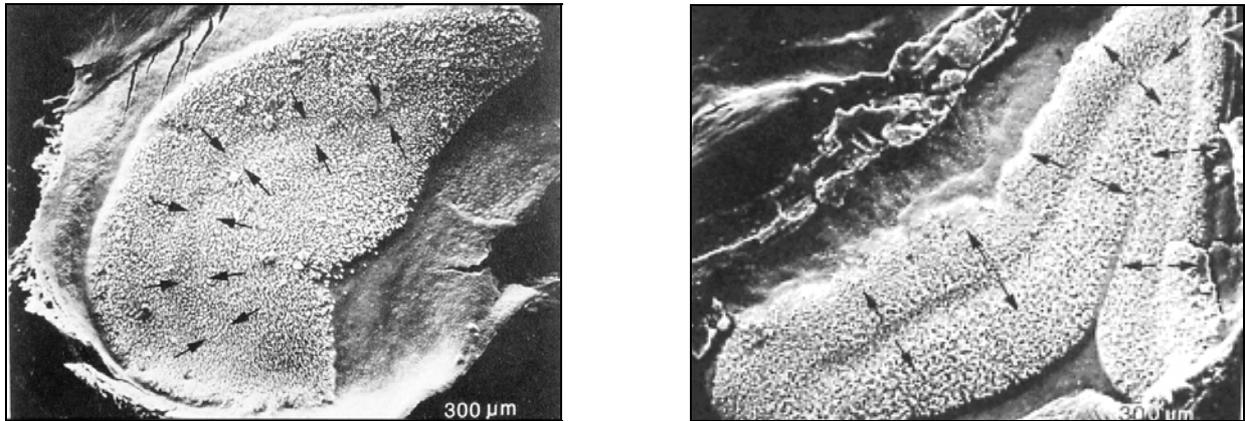


Abb. 5 und 6:
Anordnung der zilientragenden Sinneszellen auf Utrikulus (links) und Sakkulus (rechts) (Pfeile)

Während die Bogengangsorgane aufgrund ihrer spiegelbildlichen Anordnung im Kopf die Erregungsdifferenz zwischen beiden Seiten nach dem „Push-Pull“-Prinzip weitermelden (Hamann 1994), arbeiten die Otolithenorgane nach dem Summationsprinzip (Curthoys 1987). Bei einer Kopfdrehung um dessen vertikale Mittelachse (z-Achse, yaw) kommt es bei den Makulaorganen dementsprechend zur Erregung ebenso vieler Haarzellen auf der einen Seite wie auf der anderen Seite gehemmt werden. Bei Translationsbewegungen und Drehbewegungen außerhalb der Mittelachse hingegen werden beide Seiten gleichsinnig erregt bzw. gehemmt.

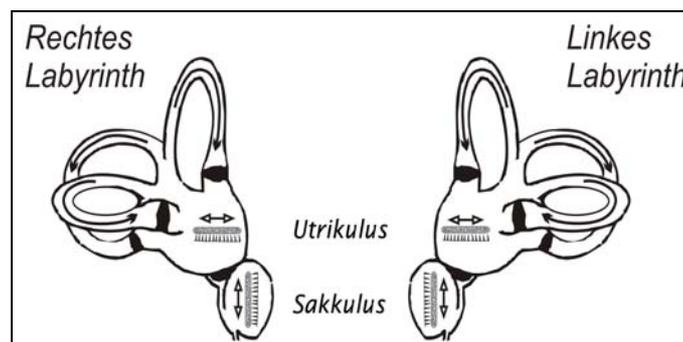


Abb. 7:
Topographische Beziehung zwischen Bogengängen und Otolithenorganen

Somit wird deutlich, dass aufgrund der Anordnung und der damit verbundenen Aufgabenverteilung der einzelnen vestibulären Organe alle Bewegungen in der dreidimensionalen Welt registriert und verarbeitet werden können. Bei natürlichen Kopf- und Körperbewegungen sind erstens Rotationsbewegungen um die drei orthogonalen Achsen sowie Translationsbewegungen entlang dieser Achsen möglich. Daraus ergeben sich sechs Freiheitsgrade, die von den Gleichgewichtsorganen erfasst werden müssen.

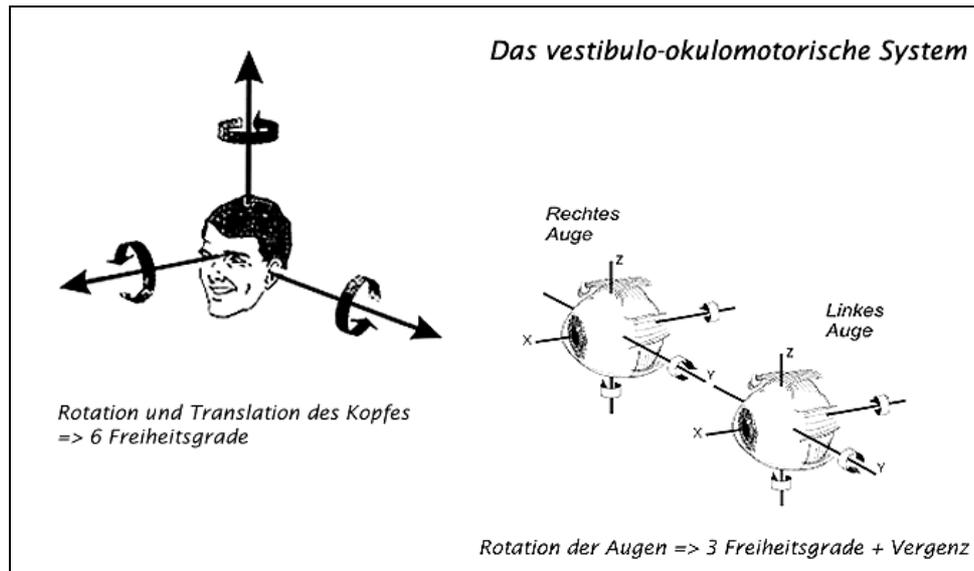


Abb. 8:
Freiheitsgrade von Kopf- und Augenbewegungen

Neben der Richtung einer Bewegung werden Reize betreffend Beschleunigung und Geschwindigkeit dieser Bewegungen verarbeitet.

Aufgrund der annähernd orthogonalen Anordnung der drei Bogengangspaare wird es möglich, Rotationen des Kopfes um jede beliebige Achse vollständig zu erfassen.

Nahezu alle Bewegungen des Kopfes gehen mit einer Linearbeschleunigung, entweder durch Neigung des Kopfes zur Schwerkraft oder durch Translation des Kopfes, einher. Aufgrund der exzentrischen Lage der Labyrinth im Schädel kommt bei Rotation eine weitere Einflussgröße, nämlich die Zentrifugalkraft, zum Tragen. Die adäquaten Organe zur Erfassung dieser Reize sind die Otolithenmakulae, Utrikulus und Sakkulus.

Ein weiteres wesentliches Instrument zur Erhaltung des Gleichgewichtes stellt das visuelle System dar. So ist es nicht verwunderlich das beide Systeme, visuelles und vestibuläres, auf verschiedene Arten miteinander verknüpft sind. Bereits 1933 wurde von Lorente de No der vestibulo-okuläre Reflex (VOR) beschrieben, dessen Ursprung jedoch zunächst nur in den Afferenzen der primären Sinneszellen des Bogengangapparates gesehen wurde (Szentágothai

1950). Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, dass auch der Otolithenapparat Verbindungen zum visuellen System besitzt, so dass im Folgenden zwischen zwei unterschiedlichen Reflexbögen unterschieden werden muss (Matsuo und Cohen 1984, Clement et al., Viévielle et al., Berthoz et al. 1986, Büttner-Ennever und Büttner 1988). In diesem Sinne verfügt der Mensch sowohl über einen canal-okulären Reflex (COR), wie auch über einen otolith-okulären Reflex (OOR), deren Aufgaben und Verschaltungen zum besseren Verständnis dargelegt werden sollen.

1.1.3 Der canal-okuläre Reflex (COR)

Jede Kopfdrehung löst eine kompensatorische Augenbewegung in entgegengesetzter Richtung aus, die es ermöglicht, das Blickfeld auf der Netzhaut zu stabilisieren. Die Signale, die diesen Reflex generieren, entstammen vor allem den Bogengängen. Sie werden über den N. vestibularis zu den Vestibulariskernen geleitet, von welchen erregende und hemmende Verbindungen zu den Motoneuronen der äußeren Augenmuskeln ziehen. So wird es möglich, Kopfbewegungen in jeder Ebene mit einer kompensatorischen Augenbewegung zu beantworten.

Übersteigt eine Kopfdrehung einen Winkel von ca. 10-20°, so kommt es zu einem sogenannten okulären Nystagmus. Die kompensatorische Augenbewegung wird von einer schnellen antikompensatorischen Bewegung unterbrochen und es entsteht das typische Bild eines vestibulären Nystagmus.

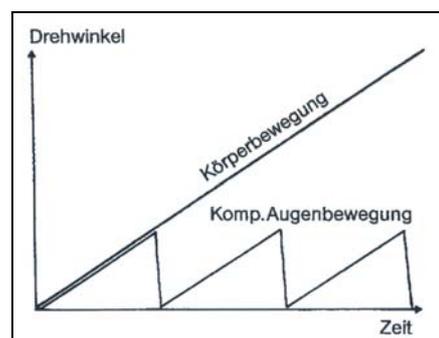


Abb. 9:
Vestibulärer Nystagmus (aus Scherer 1997)

1.1.4 Der otolith-okuläre Reflex (OOR)

Wird der Kopf in aufrechter Lage zur Seite gekippt, so wird ein typischer otolith-okulärer Reflex ausgelöst. Die Augen drehen sich in entgegengesetzter Richtung zur Kopfkippung und verbleiben in dieser Position bis der Kopf erneut bewegt wird. Diese statische Komponente des OOR ist seit langem bekannt (Barany 1907, Fischer 1927), neuere Arbeiten zeigen jedoch, dass auch die Otolithenmakulae wie die Cupulae der Bogengänge dynamische Eigenschaften besitzen (Fernández und Goldberg 1976, Lichtenberg et al. 1982, Collewijn et al. 1985, Teiwes et al. 1993). Man spricht vom sogenannten linear vestibulo-okulären Reflex (LVOR), welcher durch reine lineare bzw. translatorische Bewegungen des Kopfes hervorgerufen wird. Er wurde erstmals durch Jongkees & Philipszoon (1962) und Niven et al. (1965) beschrieben. Da sich diese Arbeit insbesondere mit den adäquaten Reizen und den Antworten der Otolithenorgane beschäftigt, soll auf diese Eigenschaften im Rahmen der Diskussion näher eingegangen werden.

1.1.5 Der Reflexbogen des vestibulo-okulären Reflexes (VOR)

Der Reflexbogen des VOR ist ein Drei-Neuronen-Bogen, bestehend aus Haarzelle, einem pseudobipolaren afferenten Neuron im Ganglion Scarpa, einem Zwischenneuron im Nucleus vestibularis und schließlich einem Effektorneuron im Nucleus oculomotorius, und verläuft demnach ausschließlich auf Hirnstammebene. Er wurde erstmals 1933 von Lorente de Nó beschrieben und 1943 von Szentágothai bestätigt.

Die afferenten Informationen von den Sinneszellen in Makulae und Cupulae gelangen über den Nervus vestibularis zum ipsilateralen Vestibulariskerngebiet, bestehend aus den Nuclei vestibulares medialis (Schwalbe), lateralis (Deiters), superior (Bechterew) und inferior. Zwischen den Kerngebieten beider Seiten bestehen vor allem inhibitorische Kommissuren, die zur Regelung der Sensitivität der Gegenseite dienen. Im Fasciculus longitudinalis medialis verlaufen von den vier Kerngebieten sowohl exzitatorische, als auch inhibitorische Bahnen zu den ipsi- und kontralateralen Augenmuskelkernen. Ihre komplexe Verschaltung geht aus Abb. 10 (Nieuwenhuys R. et al. 1991) hervor.

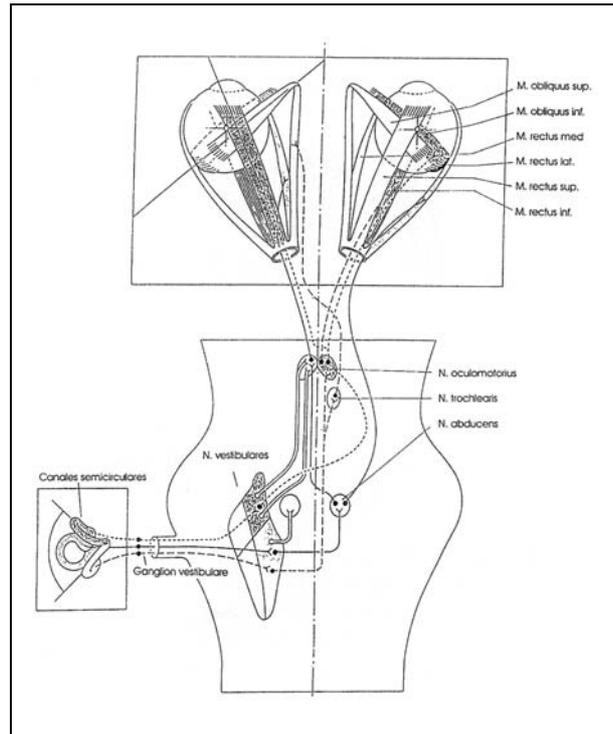


Abb. 10:
Überblick über die vestibulookulären Reflexbahnen
(nach Nieuwenhuys 1991)

Durch systematische Ableitung der Potentiale in den vestibulären und okulomotorischen Nuclei nach Reizung jedes einzelnen Bogenganges (Cohen und Suzuki 1963, Cohen 1974, Uchino und Suzuki 1983) konnten die neuronalen Verschaltungen aufgeklärt werden. Die Reizung des horizontalen Bogenganges bewirkt demzufolge eine disynaptische Aktivierung des kontralateralen Musculus rectus medialis, sowie eine disynaptische Hemmung des ipsilateralen Musculus rectus lateralis. Analog bewirkt eine Reizung des vorderen Bogenganges eine disynaptische Aktivierung des kontralateralen Musculus rectus superior und des Musculus obliquus inferior, sowie eine disynaptische Inhibition des ipsilateralen Musculus obliquus superior und des Musculus rectus inferior. Schließlich bewirkt die Reizung des posterioren Bogenganges eine disynaptische Aktivierung des kontralateralen Musculus obliquus superior und des Musculus rectus inferior, sowie eine disynaptische Inhibition des ipsilateralen Musculus rectus superior und des Musculus obliquus inferior.

Hess und Dieringer haben 1991 an der Ratte die drei Komponenten der Augenbewegungen beim linearen vestibulo-okulären Reflex studiert. Während einer sinusförmigen Beschleunigung auf einem Linearschlitten wurden an Ratten mittels „Search-Coil“-Technik 3D-Augenbewegungen registriert. Die Tiere wurden in Stufen von 15° zur

Beschleunigungsachse über einen Bereich von 360° gekippt. Die Ergebnisse der Studie zeigten eine klare richtungsspezifische Abstimmung der Reizantworten. Bei Beschleunigung entlang diagonalen Körperachsen wurden maximale vertikale und torsionale Reflexantworten beobachtet. Die enge Übereinstimmung dieser bevorzugten, linearen Beschleunigungsachsen mit der Orientierung der vertikalen Bogengänge bestätigt die Ansicht, dass zwischen den Afferenzen der Makulae und denen der vertikalen Bogengänge eine synergistische Interaktion besteht. Der genaue Verlauf der otolith-okulären Reflexbahn konnte jedoch bisher nicht vollständig geklärt werden (Dieterich 1992).

Die Zeitkonstante der okulären Reizantwort beträgt etwa 12-20 s (Büttner et al. 1978) und liegt damit deutlich über der Zeitkonstanten von 4-6 s, die in den Nervenfasern des N. vestibularis gefunden wurde (Büttner und Waespe 1981). Diese Verzögerung der Reizantwort wird auf den sogenannten Velocity-Storage-Mechanismus zurückgeführt, der zunächst beim Affen (Raphan et al. 1977), später jedoch auch beim Menschen nachgewiesen werden konnte (Raphan et al. 1979, Cohen et al. 1981, Waespe und Schwarz 1986). Der Velocity-Storage-Mechanismus ist notwendig, um das im Frequenzbereich normaler Kopfbewegungen geschwindigkeits-proportionale Signal der Bogengänge für die Okulomotorik verwertbar zu machen. Zur Augensteuerung wird ein winkelproportionales Signal benötigt, so dass das Bogengangssignal neural integriert werden muss.

Zunächst wurde wegen des ähnlichen zeitlichen Verlaufes des VOR beim Menschen eine vergleichbare Zeitkonstante angenommen, jedoch berechneten Goldberg und Fernández (1971) aufgrund der unterschiedlichen Morphologie der menschlichen Bogengänge einen Wert, der 1,68 mal so groß wie beim Affen ist. Mit Hilfe des Velocity-Storage-Mechanismus wird es möglich, vestibuläre und visuelle Afferenzen optimal aufeinander abzustimmen. Hierbei bewegt sich das Frequenzoptimum der Bogengänge im Bereich von 0,5-5 Hz, das der Otolithenorgane im Bereich von 0-2 Hz.

1.1.6 Augentorsion

Da sich diese Arbeit insbesondere mit den Otolithenorganreaktionen, und damit mit der Augentorsion beschäftigt, soll hierauf auch im Hinblick auf die Historie näher eingegangen werden.

Vor über 200 Jahren wurde von Hunter (1786) erstmals beschrieben, dass sich das Auge um seine Blickachse drehen kann. Er bemerkte beim Blick in den Spiegel eine Augendrehung bei Neigung des Kopfes zur Seite.

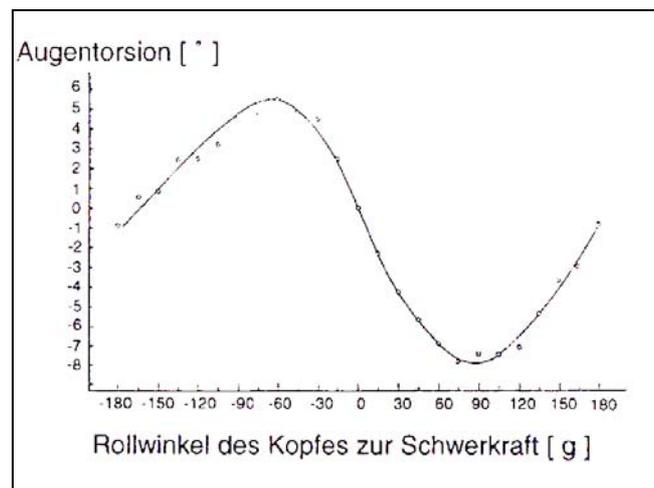


Abb. 11:

*Statische Augentorsion in Abhängigkeit vom Rollwinkel des Kopfes zur Schwerkraft
(aus: Miller 1961)*

Seit dieser Zeit wurden immer neue Methoden zur Messung der Augentorsion und der Erforschung ihrer Ursache entwickelt, die im Hinblick auf Objektivität, zeitliche Auflösung und Genauigkeit konkurrierten.

Erst gegen Ende des 18. Jahrhunderts wurden die ersten quantitativen Aufzeichnungen der Augentorsion gewonnen (Skrebitzky 1871, Nagel 1871). Man verwendete subjektive Methoden wie die Nachbildmethode (Ruete 1845) und die Verschiebung des blinden Fleckes, so dass man quantitativ recht unterschiedliche Ergebnisse erhielt. Allen Untersuchungen war jedoch gemein, dass sie die Abhängigkeit der Torsion von der Querschleunigung (Translation) des Kopfes zeigten. Mulder (1875) postulierte schon damals die Existenz einer statischen und einer dynamischen Komponente der Augentorsion.

1907 entwickelte Bárány einen Apparat zur objektiven Registrierung der statischen Augentorsion. Er prägte den Begriff des otolith-okulären Reflexes für das Phänomen der Augengegenrollung. Man stellte fest, dass, unabhängig vom Grad der Kippung der Körperlängsachse, bzw. des Kopfes, die Augentorsion bei ca. $\pm 6^\circ$ Rollwinkel ihr Maximum erreicht. Eine Begrenzung aufgrund anatomischer Ursachen kommt allerdings für dieses Verhalten nicht in Frage. 1959 konnte von Woellner et al. bei Experimenten in der Humanzentrifuge eine lineare Abhängigkeit der Torsion vom Schwerkrafteinfluss bis oberhalb 1g nachgewiesen werden, welche dieses Verhalten erklärt. Aus der Abbildung 12 wird ersichtlich, dass die Augentorsion in erster Linie von der Querbeschleunigung, also den Scherkräften, die auf den Utrikulus wirken, abhängig ist. Dementsprechend wird bei Labyrinthektomierten (z.B. bei Zustand nach Entfernung eines Akustikusneurinoms) keine, oder nur eine geringe Torsion beobachtet, die auf den Einfluss der Halsrezeptoren, somatosensorische, sowie propriozeptive Einflüsse zurückgeführt werden kann (Krejcová 1971, Takemori et al. 1989, Diamond et al. 1983).

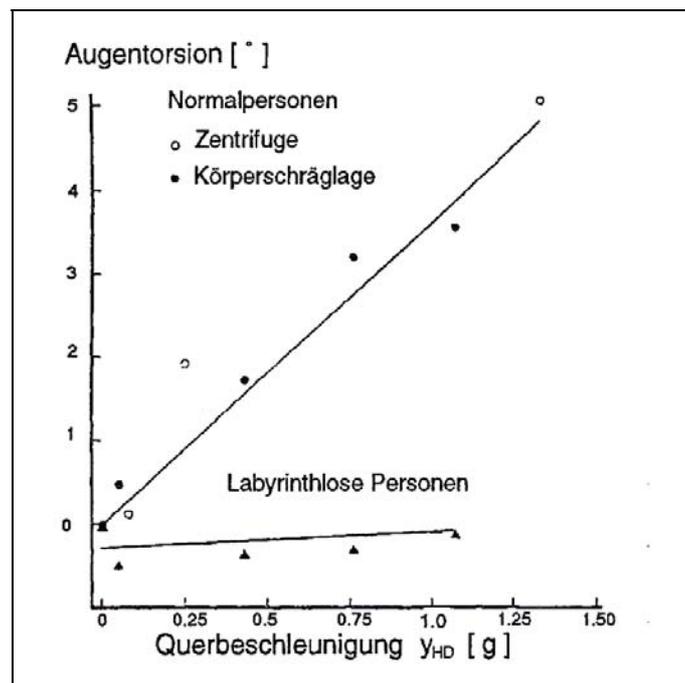


Abb. 12:

Statische Augentorsion bei verschiedenen Rollwinkeln des Kopfes und Querbeschleunigungen in einer Zentrifuge. Normalpersonen und Labyrinthektomierte. (aus : Woellner 1959)

Der Einfluss der Sakkuli auf die Augentorsion blieb bis heute unklar und ist unter anderem Gegenstand der derzeitigen Forschung.

Vierzig Jahre später wurde dann zum ersten Mal mit Hilfe von Photographien die dynamische Augentorsion untersucht (Free et al. 1960, Graybiel et al. 1959). Quantitative, objektive Untersuchungen dieses Phänomens wurden erstmals mit Hilfe der kinephographischen Methode nach Jones (1963) möglich.

1981 wurde von Young und Lichtenberg erstmals die Augentorsion bei reiner Linearbeschleunigung, sowohl sinusförmig als auch sprungförmig, auf einem Schlitten untersucht. Auf diese Weise konnten Bogengangseinflüsse ausgeschaltet werden (Young et al. 1981, Lichtenberg et al. 1982). Weitere Aufzeichnungen wurden während Parabelflügen, also teilweise unter Schwerelosigkeit durchgeführt (Young et al. 1981). Es wurde mit photographischen Verfahren gearbeitet, denen nach wie vor der Makel der Ungenauigkeit anhaftete.

Ebenfalls zu Beginn der sechziger Jahre wurde die sogenannte „Scleral-Search-Coil“-Technik (Robinson 1963) entwickelt, bei der mit Hilfe von elektromagnetischen Haftschalen, die auf den Bulbus aufgebracht werden, elektrische Potentialänderungen bei Bewegungen des Auges registriert werden können. Auch torsionale Bewegungen können auf diese Weise erfasst werden, jedoch handelt es sich wegen der Notwendigkeit des festen Haftens auf dem Bulbus um eine halbinvasive Technik, die bei weitem nicht jedem Patienten zugemutet werden kann, geschweige denn toleriert wird. Es wurden jedoch die ersten umfangreichen Studien der dreidimensionalen Augenbewegungen am Menschen und am Rhesusaffen durchgeführt (Collewijn et al. 1985, Henn et al. 1988, Paige 1991).

Zu Beginn der siebziger Jahre schließlich etablierten sich videobasierende Verfahren zur Objektivierung von Augenbewegungen. Zunächst wurden nur zweidimensionale Methoden (Merchant et al. 1974, Levine 1984, Barbur et al. 1987) mit unterschiedlichen Prinzipien verwendet. Einige Jahre später versuchten sich einige Autoren in der Entwicklung eines dreidimensionalen Systems, um die Augentorsion erfassen zu können. Zwei verschiedene Wege wurden hierbei beschritten, erstens der Einsatz von markierten Kontaktlinsen (Alston 1989, Ott 1990), und zweitens die Registrierung der Positionsveränderung des natürlichen Irisprofiles im Verlauf einer Untersuchung (Hatamian & Anderson 1983, Parker et al. 1985, Viéville 1987, Clarke et al. 1988, Yamanobe et al. 1990, Moore et al. 1991). Vielen moderneren Verfahren ist gemein, dass sie auf dem sogenannten Polar-Korrelationsverfahren von Hatamian basieren, sie unterscheiden sich letztlich nur in der Art der Aufzeichnung, der

Art der Auswertung der Daten sowie, und das ist entscheidend, der Genauigkeit der gewonnenen Ergebnisse.

Mit dem bei der vorliegenden Arbeit verwendeten Videookulographie-System (VOG) können Augenbewegungen jeder Art registriert und analysiert werden. Die Augentorsion kann mit einer Auflösung von $< 0,1$ Grad bestimmt werden. Das System besitzt eine Abtastrate von 25 Hz. Es handelt sich um ein nicht-invasives Verfahren, welches bei nahezu allen Patienten anwendbar ist und vom Benutzer nach kurzer Einweisung leicht zu handhaben ist.

1.2 Die thermische Prüfung und ihre klinische Anwendung

Die thermische Prüfung ist nach wie vor ein essentielles Instrumentarium in der klinischen Gleichgewichtsprüfung. Mit unterschiedlich temperiertem Wasser oder feuchter Luft werden die äußeren Gehörgänge gespült und damit eine vestibuläre Reizung erzeugt, welche über den vestibulo-okulären Reflex (VOR) sichtbare Augenbewegungen (Nystagmen) auslöst.

Üblicherweise wird im klinischen Alltag in folgender Reihenfolge vorgegangen: rechts Warmspülung, links Warmspülung, links Kaltspülung, rechts Kaltspülung. Auf diese Weise werden beim Gesunden abwechselnd Rechts- bzw. Linksnystagmen erzeugt. Zwischen den Untersuchungsteilen sollte eine Pause von mindestens 10 Minuten (empirischer Wert) eingehalten werden, um zu gewährleisten, dass die vestibuläre Reaktion vollständig abgeklungen ist, und die Folgeuntersuchung gänzlich unbeeinflusst bleibt (Scherer 1984).

Die erzeugten Reaktionen werden entweder vom Untersucher direkt durch Verwendung der sogenannten Frenzelbrille beurteilt oder mit Hilfe der Elektronystagmographie (ENG) aufgezeichnet und später ausgewertet.

Seit den 90iger Jahren wird auch die Videookulographie zur direkten Darstellung der okulären Reizantwort genutzt. Die Nystagmen können noch während ihrer Entstehung am Bildschirm betrachtet werden.

Die Untersuchung lässt Schlüsse auf die Erregbarkeit der Vestibularorgane im Seitenvergleich zu. Die differentialdiagnostischen Möglichkeiten, die sich hieraus ergeben, können aus der Tabelle 1 entnommen werden.

fehlende Reizantwort	einseitig	<ul style="list-style-type: none"> • akuter Ausfall des Gleichgewichtsorgans (mit Spontannystagmus zur Gegenseite) • einseitiger Ausfall z.B. bei ACN (mit Kopfschüttelnystagmus zur Gegenseite) • denkbar bei konnatalem oder frühkindlichem, gut kompensiertem Ausfall
fehlende Reizantwort	beidseitig	<ul style="list-style-type: none"> • Z.n. Intoxikation mit ototoxischen Medikamenten • Missbildungen und Agenesien der Gleichgewichtsorgane • seltener: ACN bds.
verstärkte Reizantwort	beidseitig	<ul style="list-style-type: none"> • Schaden im Vestibulocerebellum, speziell im Bereich des Flokkulus (Enthemmung des zentral-vestibulären Systems) • enthemmte Phase nach Alkoholgenuss (evtl. Seitendifferenzen)
verstärkte Reizantwort	einseitig	<ul style="list-style-type: none"> • bei Spülung eines radikal operierten Ohres • bei Spülung eines Ohres mit epithelisierter Pauke (am lateralen Schenkel des horizontalen Bogengangs tritt eine erhöhte Temperaturdifferenz auf)
Seitendifferenz der Reizantwort (statistisch signifikant)		<ul style="list-style-type: none"> • akute Funktionsstörung eines Gleichgewichtsorgans, eines Gleichgewichtsnerven oder des Hirnstamms (mit Spontannystagmus zur gesunden Seite) • alte einseitige Funktionsstörung (mit Provokationsnystagmus) • langsam fortschreitender, funktionseinschränkender Prozess, z.B. ACN (mit sensorineuraler Hörstörung)

Tab.1: Thermische Prüfung – Differentialdiagnostik

Wie aus der technischen Anordnung bei der thermischen Prüfung bereits zu sehen ist, können die Vestibularorgane zwar seitengetreunt untersucht werden, eine Unterscheidung zwischen Otolithenorgan- oder Bogengangreiz bzw. -antwort lässt sich jedoch nicht treffen.

1.3 Bisheriger Stand der Untersuchungen zur Dreidimensionalität der Reizantwort bei thermischer Prüfung

Schon frühzeitig konnten eingehende Untersuchungen belegen, dass es eine wesentliche Funktion des Gleichgewichtsorgans ist, bei Kopfbewegungen kompensatorische Augenbewegungen auszulösen, die das Blickfeld stabilisieren (Barany 1907, Lorente de Nó 1933, Szentágothai 1950). Derartige Augenbewegungen setzen sich aus horizontalen, vertikalen und torsionalen sowie langsamen und schnellen Komponenten zusammen. Diese Reaktion wird als vestibulo-okulärer Reflex (VOR) bezeichnet.

Bei der täglichen Routine in der Diagnostik von Gleichgewichtsstörungen in der Klinik hat man sich diese Entdeckung zunutze gemacht. Zur seitengetrenten Prüfung der peripheren Gleichgewichtsorgane wird, wie oben bereits erwähnt, die sogenannte thermische Prüfung durchgeführt (Barany 1907). Bei Beobachtungen mit der Frenzelbrille lässt sich zwar die Komplexität der erzeugten Augenbewegungen erahnen, jedoch nicht objektivieren. Im Rahmen der Elektronystagmographie können nur horizontale und vertikale, nicht aber torsionale Augenbewegungen erfasst werden. Durch die Entwicklung der Videookulographie (Clarke et al. 1989, Scherer et al. 1991) wurde es erstmals möglich, Augenbewegungen in allen drei orthogonalen Achsen (d.h. torsionale, vertikale und horizontale Bewegungen) zu erfassen und zu objektivieren, ohne dem Probanden/Patienten eine invasive Diagnostik zumuten zu müssen wie z.B. bei der „Scleral-Search-Coil“-Technik (Robinson et al. 1963, Collewijn 1985).

Im Rahmen eines Forschungsprojektes des hiesigen Labors, "Die Untersuchung der menschlichen Gleichgewichtsfunktion unter veränderten Schwerkraftbedingungen", kam die Methode zum Einsatz. Hierbei fiel ein bisher unbekanntes Phänomen, eine langsame Drehung des Augapfels, im Folgenden tonisch torsionale Deviation (TTD) genannt, auf (Clarke et al. 1991/1993). Es zeigte sich, dass diese bei thermischer Prüfung aufgetretene langsame Augenrollung bei steigendem Schwerkrafteinfluss (1,5 - 3,0 g) zunimmt und somit schwerkraftabhängig zu sein scheint (Abb. 14).

Das Phänomen der Augengegenrollung (Abb.13) ist seit den Berichten von Bárány (1907) und Fischer (1927) als otolith-okulärer Reflex bekannt. So liegt es nahe, die beobachtete tonisch torsionalen Deviation dem Otolithenorgansystem zuzuschreiben.

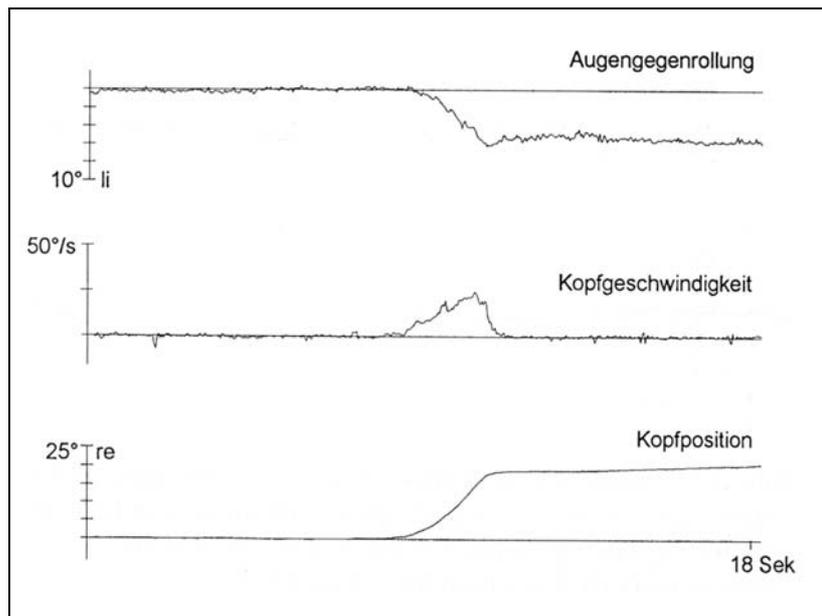


Abb. 13:
Augengegenrollung bei Kippung des Kopfes um 30° nach rechts (OOR)

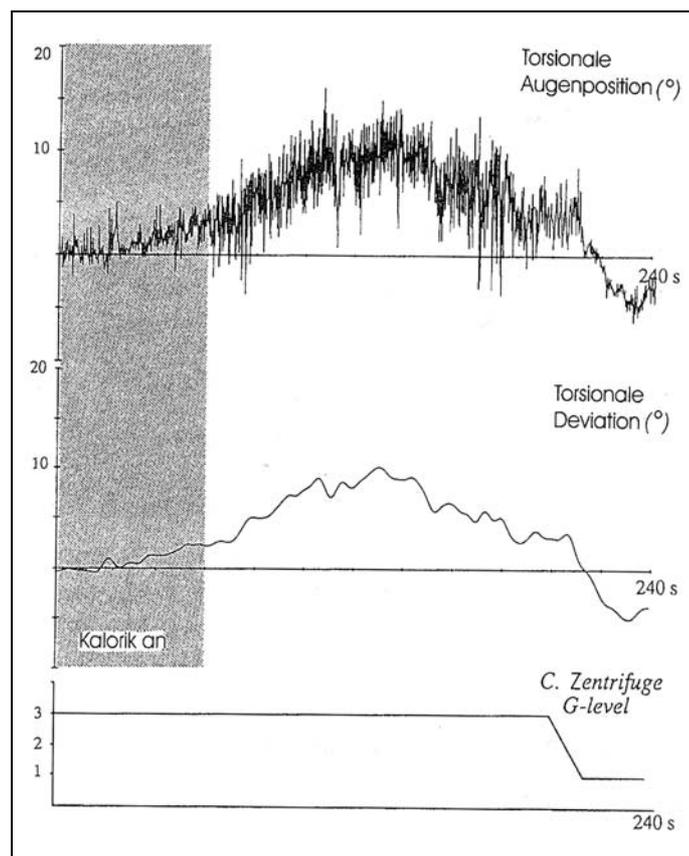


Abb. 14:
Tonisch torsionale Deviation bei kalorischer Reizung unter erhöhten Schwerkraftbedingungen in der Humanzentrifuge

Sollte es nun möglich sein diese offenbar schwerkraftabhängige Komponente der kalorischen Reizantwort als eine Otolithenorganreaktion zu identifizieren, so könnte die klinisch etablierte thermische Gleichgewichtsprüfung in Verbindung mit der VOG-Technik wertvolle differentialdiagnostische Aspekte im Hinblick auf die Diagnose von Gleichgewichtsstörungen liefern, d.h. es wäre möglich zwischen Bogengangs- und Otolithenorganaffektionen zu unterscheiden.

1.4 Pathophysiologie des peripheren Gleichgewichtsorgans

Das entscheidende subjektive Symptom von Gleichgewichtsstörungen ist der Schwindel, seine messbare Ausdrucksform der Nystagmus.

Dieser kommt zustande wenn:

- einer der Sinnesrezeptoren einem pathologischen Reiz ausgesetzt ist (z.B. zervikale Störung, Labyrinthitis, Beginn eines Menière'schen Anfalls)
- einer der Sinnesrezeptoren eine akut auftretende Minderfunktion hat (z.B. akuter einseitiger vestibulärer Ausfall)
- im Bereich des zentralvestibulären Systems eine Seitendifferenz neuronaler Aktivität besteht (z.B. lokalisierte Prozesse im Hirnstamms oder im Vestibulocerebellums, z.B. bei MS)

Man unterscheidet verschiedene Arten von Schwindel:

physiologischen Schwindel: Schwindel bei Bewegungen, Kinetosen, Höhenschwindel

pathologischen Schwindel: Dauerschwindel, Anfallsschwindel, Schwindel im Zusammenhang mit Bewegungen oder Körperlagen

Unter Umständen lässt die Art des Schwindels Rückschlüsse auf die Herkunft des Symptoms zu, daher ist bei jeder Erkrankung, die mit dem Symptom Schwindel einhergeht, eine sorgfältige Anamnese anzustreben.

Als pathologischer Schwindel wird jede Änderung des statischen oder visuellen Bezuges zur Umwelt bezeichnet, sofern diese nicht in Zusammenhang mit einer Bewegung erfolgt. Dem Schwindel liegt eine Störung der statischen Sensoren und/oder deren zentraler Verschaltung zugrunde.

Die thermische Prüfung der peripheren Gleichgewichtsorgane stellt das grundlegende Instrumentarium der in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungsmethode dar. Daher soll auf die Anhaltspunkte, die diese Untersuchung im Hinblick auf die Differentialdiagnose der Gleichgewichtsstörungen liefert, im Folgenden näher eingegangen werden.

Aus der Tabelle 1 geht hervor, dass es bisher mit Hilfe der thermischen Prüfung nicht möglich war, bei einseitigen Störungen des peripheren Gleichgewichtsorgans zwischen Affektionen der Otolithenorgane und solchen der Bogengänge zu unterscheiden. Seit einigen

Jahren werden unterschiedliche Ansätze verfolgt, die die diesbezügliche Differentialdiagnose der peripheren Gleichgewichtsstörungen zum Ziel haben.