

## 1 Einleitung

### **1.1 Die Kinetose, ein weltweites Problem**

Unter Kinetose, abgeleitet aus dem Griechischem η ινησιζ, übersetzt -Bewegung-, versteht man die Unfähigkeit des vestibulären Systems, unphysiologische vestibuläre Reize, wie sie zum Beispiel bei Fahrzeugbewegungen oder in der Raumfahrt auftreten, adäquat zu verarbeiten.

Sie ist im Bereich der Wirbeltiere ein ubiquitär verbreitetes Problem, wobei je nach Spezies eine unterschiedliche Empfindlichkeit besteht (Money 1970).

Dieses Phänomen ist, seit sich der Mensch Hilfsmittel zur Fortbewegung bedient, unter den verschiedensten Begriffen -insbesondere See- bzw. Reisekrankheit- bekannt. Schon aus dem Altertum gibt es lebendige Berichte darüber. Seneca zum Beispiel sprang auf einer Reise von Neapel nach Puteoli vom Schiff um schwimmend schneller an Land zu kommen, da er so seekrank war. Bereits Hippocrates vermutete, daß Schiffsbewegungen dafür verantwortlich sein könnten (nach Taylor 1949). So leitet sich auch das englische Wort ‚nausea‘ und das französische ‚la nausée‘ -Übelkeit- von dem griechischem ναυζ -Schiff- ab. Bis ins 19. Jahrhundert gab es die verschiedensten Theorien über die Genese; manche machten die Bewegungen des Mageninhaltes verantwortlich (Whiting 1838), andere vermuteten eine übermäßige Gallenabsonderung (Bennett 1874), wieder andere eine Störung des Tractus Circulatorius (Nunn 1881) oder vermuteten eine Veränderung der Blutzufuhr des Gehirns (Whitham 1887).

‚Irritationen‘ der Gleichgewichtsorgane wurden erstmals als mögliche Ursache der Kinetose erkannt, nachdem Goltz 1870 die Theorie entwickelt hatte, daß Teile des Innenohres der Gleichgewichtsempfindung dienen und durch Untersuchungen von Breuer, Mach und Crum-Brown in den Jahren 1873 und 1874 bestätigt worden waren. Man erkannte die Ähnlichkeit der Symptomatik mit der Menièreschen Erkrankung. J.A. Irwin, der beobachtet hatte, daß Taubstumme, bei denen kein

Innenohr und damit kein Gleichgewichtsorgan ausgebildet ist, nicht seekrank wurden, prägte 1881 den Begriff der Bewegungskrankheit (Irwin 1881).

Insbesondere im militärischen Bereich zeigten sich immer wieder die Auswirkungen und Konsequenzen der Seekrankheit. Schon während des 2. punischen Krieges (218-201 v.Chr.) mußte Scipio africanus eine Schlacht gegen Hannibal verschieben, da seine Soldaten wegen der Seekrankheit nicht kampffähig waren. Es ist deswegen nicht verwunderlich, daß das Problem der Kinetose Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts in den Blickpunkt des wissenschaftlichen Interesses rückte, als in den Weltkriegen die Kampfkraft der Soldaten während der Seetransporte stark beeinträchtigt wurde. So werden die hohen Verluste bei der Invasion in der Normandie teilweise mit einer kinetosebedingten Kampfunfähigkeit erklärt (Fischer 1979). Seit den sechziger Jahren mit Beginn der bemannten Raumfahrt tritt als kinetoseähnlicher Symptomkomplex das Space Adaption Syndrome (SAS) auf. Das Leistungsvermögen der Astronauten ist während der ersten Tage teilweise deutlich beeinträchtigt. Dies ist insbesondere bei kurzen Missionen problematisch, da zum Beispiel Space Shuttle Missionen jeweils nur wenige Tage dauern. Es soll sogar zum vorzeitigen Abbruch von Raummissionen geführt haben (Fischer 1979).

Im Zeitalter der Mobilität und des weltweiten Tourismus bleibt es zum Beispiel beim Flug durch Turbulenzen weiterhin ein häufig anzutreffendes Beschwerdebild.

Die Kenntnisse über der Kinetose sind bis heute beschränkt. Es gilt zwar als gesichert, daß durch einen Sinneskonflikt eine Kinetose auslöst wird. Nicht geklärt ist aber, warum eine so hohe individuelle Variabilität der Kinetoseempfindlichkeit besteht.

In Ermangelung einer exakten Kenntnis der Ursachen sind die therapeutischen Möglichkeiten begrenzt. Sie beschränken sich größtenteils auf präventives Verhalten einer symptomatischen Therapie.

Die Beteiligung des Gleichgewichtsorgans an der Entstehung der Kinetose gilt heute jedoch als unbestritten. Besonderes Augenmerk wird bei bisherigen Arbeiten dem Otolithenorgan gewidmet, da es hierarchisch höher steht als die Bogengänge und deswegen viel effektiver eine Kinetose auslösen kann.

## 1.2 Die Anatomie des Gleichgewichtorgans

Das Vestibularorgan des Menschen ist ein paariges Organ und liegt eingebettet im Felsenbein, dessen Verknöcherung ebenso wie das der Mittelohrknochen bereits im 4. Embryonalmonat beginnt und zum Zeitpunkt der Geburt abgeschlossen ist. Es ändert beim späteren Schädelwachstum nur noch seine Lage, bleibt aber von weiteren Wachstumseinflüssen in Form und Größe ausgespart.

Der in der Embryonalentwicklung zum Ausdruck kommende sehr hohe Stellenwert des Vestibularorgans zeigt sich auch darin, daß in der Evolution seit Jahrmillionen bis heute ein einheitliches Bauprinzip bei den Vertebraten beibehalten wird und nur Variationen im Feinbau auftreten.

Grundsätzlich sind anatomisch und funktionell zwei Bereiche zu unterscheiden: Die Vorhofabschnitte mit Sacculus und Utriculus und die drei senkrecht zueinander liegenden Bogengängen mit jeweils einer Ampulle.

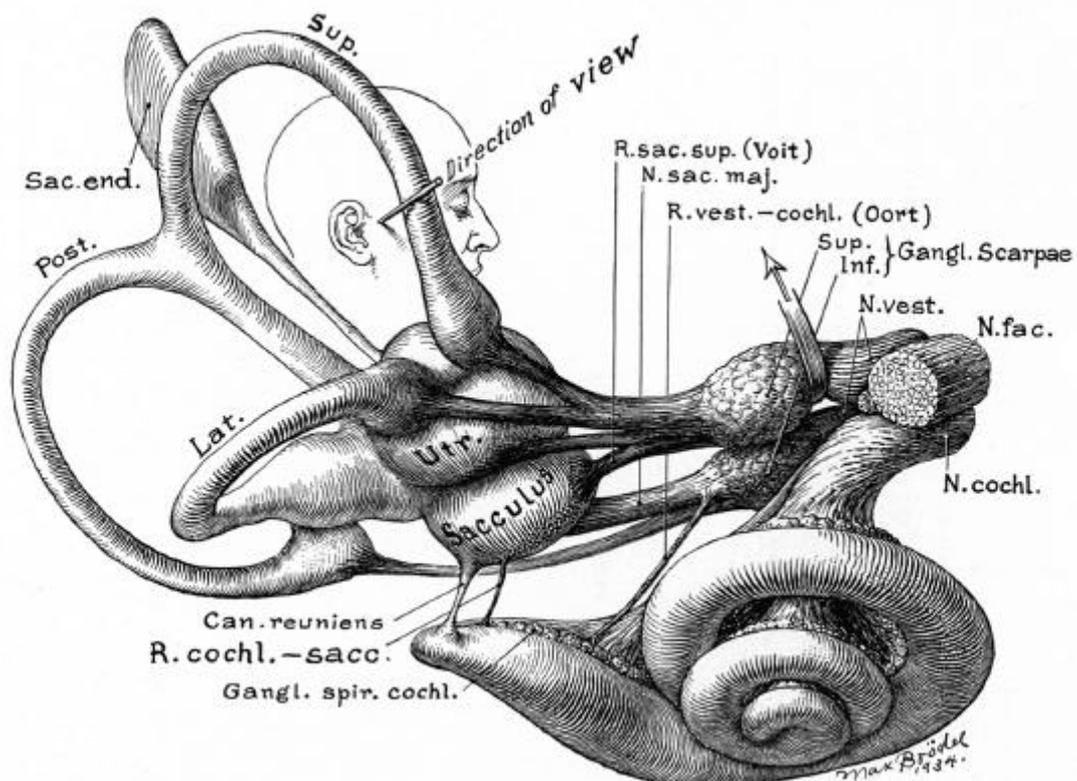


Abb. 1: Das vestibuläre Labyrinth des Menschen (nach Hardy 1934)

### 1.2.1 Otolithenorgane

Sacculus und Utriculus sind annähernd rechtwinkelig zueinander positioniert. Die Macula des Sacculus steht annähernd senkrecht, die Macula des Utriculus ist von der Horizontalebene etwas nach dorsal gekippt.

Das Epithel der Sinnesendstellen von Utriculus und Sacculus besteht aus zwei Typen von Sinneszellen und Stützzellen. Von der Oberfläche der Sinneszellen gehen 60 - 80 Zilien aus, die in den endolymphatischen Raum in die Otolithenmembran hineinragen. Die Haarbüschel sind derart angeordnet, daß eine multidirektionale Antwort der Maculaorgane ermöglicht wird. Die Sinneszellen sind nicht einheitlich polarisiert. Bei der Macula des Utriculus konvergieren sie auf eine Linie, Striola genannt, beim Sacculus divergieren sie davon. Die Fasern arbeiten entsprechend der Rezeptorenanordnung nach dem Summationsprinzip (Parker 1979).

Die Otolithenmembran besteht aus hyaluronidase-resistenten Sulfomukopolysacchariden und hat Faserstruktur. An deren Oberfläche finden sich in einem Netz die Otolithen; sie bestehen aus Calciumkarbonat. Beim Fisch sind dies im Sacculus und Utriculus jeweils einzelne kompakte Otolithen, welche eine lebenslange, dem Fischwachstum angepaßte Größenzunahme zeigen. Bei höheren Vertebraten finden sich sogenannte Otokonien mit einer Vielzahl von Otolithenkristallen in den Maculaorganen.

Die Genese bzw. der ‚Umsatz‘ der Otokonien ist noch nicht vollständig geklärt, es wird aber vermutet, daß intracellulär gebildetes organische Material, bestehend aus Protein und Polysacchariden mit Kalzifizierungspunkten exkretiert wird (Mann 1983). Bis heute ist nicht gesichert, ob die Otokonien und die Otokonienmembran während des Lebens einem ständigen Umbau unterliegen. Bei Hühnern wurde eine starke Einlagerung von Tetracyclin in die Otolithen in der Embryonalphase gefunden, und eine geringe Einlagerung bei erwachsenen Hühnern. Dies spricht für einen ständigen Umbau der Otolithen während des Lebens (Balsamo 2000). Im Laufe des Alterns beim Menschen scheint es aber zu einer quantitativen Abnahme der Otokonienmasse zu kommen (Igarashi 1993).

Die Steuerung der Otolithenentwicklung erfolgt durch genetische, aber auch Umweltfaktoren. Bei Zebrafischen konnten 7 Gene isoliert werden, die das

Otolithenwachstum steuern. Zebrafische, die eine Mutation eines oder mehrerer dieser Gene aufwiesen, wiesen ein Fehlen von Otolithen auf (Whitfield 1996). Außerdem konnte gezeigt werden, daß die ständig auf die Otolithen einwirkende Gravitationskraft ihre Größe beeinflusst (Moormann 1998, Anken 1998).

### 1.2.2 Bogengangorgane

Das Bogengangssystem besteht aus drei nahezu senkrecht zueinander stehenden Bogengängen. Jeweils das eine Ende der Bogengänge sitzt der Ampulle auf und das andere Ende endet am Vorhof –der Utriculus bildet dabei einen Teil des Vorhofes- wobei der obere und hintere Bogengang einen gemeinsamen vertikalen Kanal zum Vorhof haben. In Vergleichsstudien zeigte sich, daß die Größe des Lumens und des Durchmessers des Endolymphschlauches nicht von der Größe der Spezies, sondern eher von den dynamischen Eigenschaften der Kopfbewegungen abhängt (Mevill Jones 1974).

Die Ampullen der Bogengänge enthalten die Sinnesendstellen der Bogengänge. Darin sind auf der Crista Ampullaris die Sinnes- und Stützzellen angeordnet. Deren Haare strahlen in die Kupula ein, die der Crista Ampullaris aufsitzt. Die Kupula schließt das Lumen des Bogengangs zum Vestibulum vollständig ab und hat die gleiche Dichte wie die Endolympe der Bogengänge.

### 1.2.3 Nervus Vestibularis

Der N. vestibularis ist beim Menschen aus ca. 18000 Nervenfasern zusammengesetzt. Sie bestehen aus afferenten, zu einem geringen Teil auch aus efferenten Fasern des vestibulären Systems. Die efferenten Fasern verlaufen zum größten Teil zu den Bogengängen und Utriculus, zu einem geringen Anteil aber auch zum Sacculus (Scherer 1996).

Die Gleichgewichtsinformationen werden von bipolaren Nervenzellen des Ganglion Scarpaes des Nervus vestibularis gesammelt und zu den Vestibulariskernen des Stammhirns geleitet.

#### 1.2.4 Besondere Strukturen des Vestibularorgans beim Fisch

Ein einheitlicher Aufbau des Vestibularorgans findet sich bei allen Wirbeltieren. Dieser Aufbau konnte bei einzelnen Fischarten mehr als 100 Millionen Jahre zurückverfolgt werden (Gray 1955). So zeigt das Vestibularorgan der Fische in Anatomie und Funktion eine hohe Übereinstimmung mit prinzipiell gleicher Arbeitsweise (Löwenstein 1971).

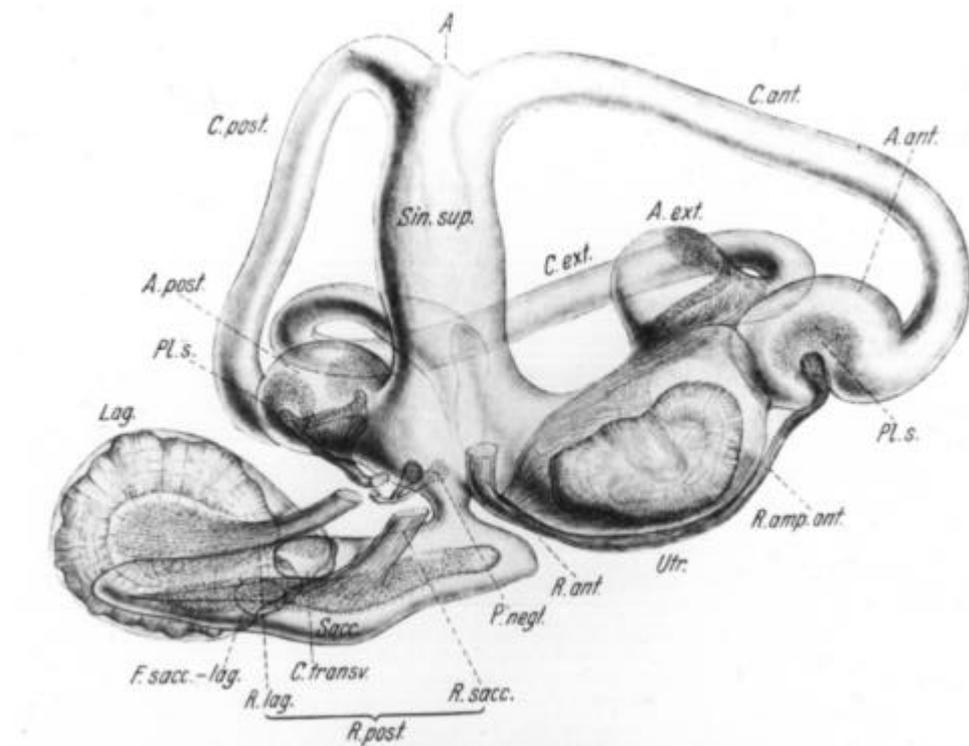


Abb. 2: Labyrinth eines Fisches (*Phoxinus laevis*) von lateral gesehen (nach Löwenstein 1932)

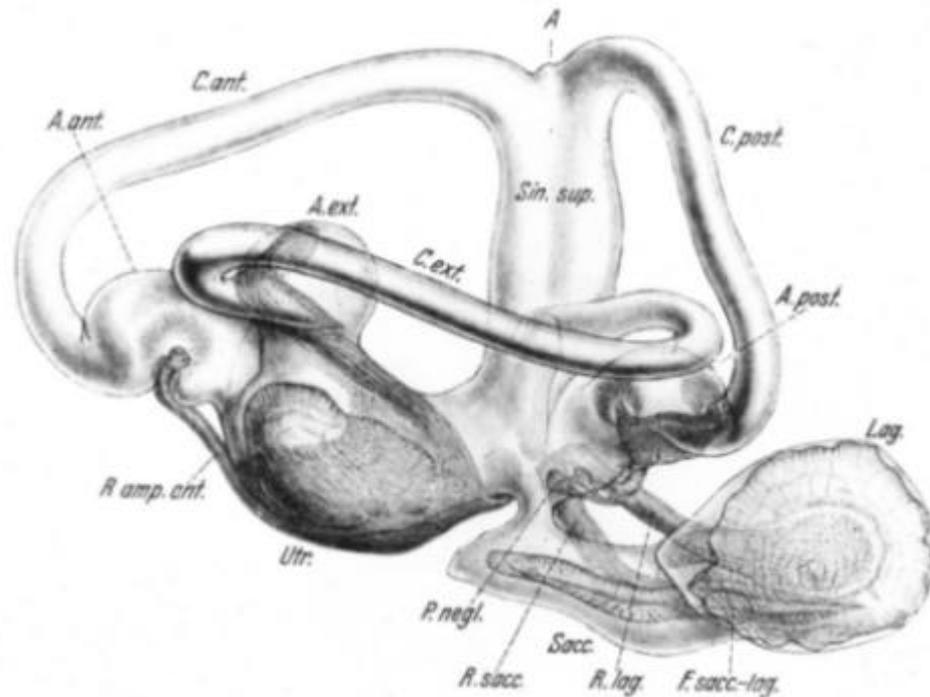


Abb. 3: Labyrinth eines Fisches (*Phoxinus laevis*) von medial gesehen (nach Löwenstein 1932)

Der Aufbau zeigt große Ähnlichkeiten mit der des Menschen. Das Vestibularorgan besteht aus einem Vorhofabschnitt mit Utriculus und Sacculus und aus drei Bogengängen mit ihren Ampullen. Die Lage ist der des Menschen vergleichbar; das Gleichgewichtsorgan liegt auf beiden Seiten im hinteren lateralen Anteil des Schädels, wo es nur teilweise von Knorpel umgeben ist.

Im Bereich des Sacculus gibt es beim Fisch einen kleinen sackförmigen Auswuchs, die Lagena. Sie stellt das Hörorgan des Fisches dar; aus ihr entwickelt sich bei den höheren Wirbeltieren ein komplexes eigenständiges Organ, bei den höheren Säugetieren die Schnecke.

Die Morphologie der Otokonien ist sehr variabel und bei den verschiedenen Spezies sehr unterschiedlich; die meisten Knochenfische wie auch die hier untersuchten Spezies bilden einzelne große feste Monolithen aus Aragonit -eine spezielle Kristallstruktur des Calciumcarbonats- bestehend aus: Der Sagitta im Sacculus, dem Astericus in der Lagena und dem Lapillus im Utriculus (Carlström 1955). Das spezifische Gewicht der Otolithen liegt 2,74 über dem der Endolymphe. Sie zeigen

entsprechend ihrer Größenzunahme einen schichtweisen Aufbau, welcher sogar ähnlich den Jahresringen beim Baum zur Altersbestimmung der Fische herangezogen werden kann (Kingsmill 1993, Blacker 1975).

Besondere Erwähnung bedarf die Physiologie des Vestibularapparats beim Plattfisch, in der vorliegenden Arbeit vertreten durch die Scholle. Sie wandelt sich vom aufrecht schwimmenden Fisch um durch Drehung des ganzen Körpers nach links zum Plattfisch. Diese Entwicklung, die bereits 14 Tage nach Ausschlüpfen aus den Eiern stattfindet, ist verbunden mit einer Verschiebung der Augen nach rechts, die dadurch oben zu liegen kommen (auch ‚Rechtsäugigkeit‘ genannt). Die Gleichgewichtsorgane behalten bezogen auf den Schädel annähernd ihre Position bei und werden durch die Körperdrehung in die Seitenlage gedreht; sie arbeiten dann nicht mehr nebeneinander, sondern in Linksseitenlage schräg übereinander (Groot 1976, Graf 1985).

Die hier untersuchten Schollen wiesen alle eine Rotation nach links auf; es gibt aber auch Fische, die eine Drehung nach rechts in gleichartiger Weise vollziehen. (Blacker 1975)

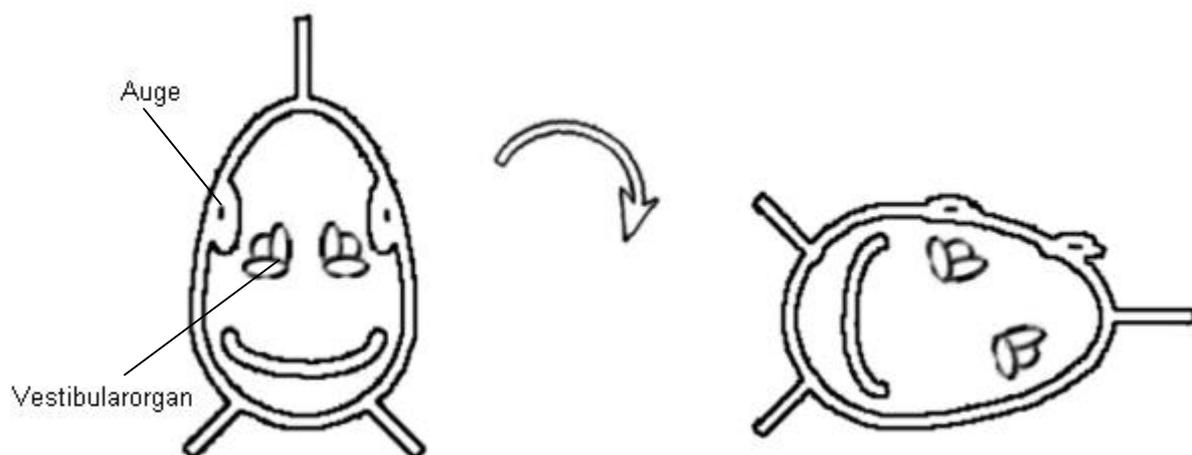


Abb. 4: Schollendrehung; die Augen wandern nach oben und die Vestibularorgane werden in Seitenlage gedreht.

Zusätzlich zu den Haarzellen im Vestibularapparat sind diese beim Fisch auch auf der Körperoberfläche als sogenanntes Seitenlinienorgan zu finden. Es findet sich lateral vom Vestibularorgan als rinnenartige Furche in der Haut und ist ein Sinnesorgan zur Messung der Strömung.

#### 1.2.5 Besondere Strukturen des Vestibularorgans beim Menschen

Auch beim Menschen findet sich wie zuvor erwähnt der typische Aufbau des Vestibularorgans mit seinen zwei Bereichen, den drei Bogengängen und den beiden Otolithenorganen von Sacculus und Utriculus.

Beim Menschen beträgt die Oberfläche der Macula Utriculi ca. 4,29 mm<sup>2</sup> mit 33000 Sinneszellen, die Macula Sacculi hat 18800 Sinneszellen auf einer Fläche von 2,44 mm<sup>2</sup> (Rosenhall 1972). Die Anzahl der Sinneszellen reduziert sich jenseits des 40. Lebensjahres bis zu 20% (Engström 1974, Makoto 1993). Den Haarzellen aufliegend findet sich die Otokonienmembran, in der Calciumkarbonatkristalle in Form von hexagonalen Prismen (Statokonien) eingelagert sind. Deren spezifisches Gewicht ist 2,71 mal so hoch wie das der Endolymphe (Carlström 1955). Bei der Anordnung fällt auf, daß sie an der Macula Sacculi zentral eine stärkere, an der Macula Utriculi dagegen zentral eine dünnere Kristallisationszone aufweisen (Lindemann 1969).

### **1.3 Die Physiologie des peripheren Gleichgewichtsorgans**

Das Gleichgewichtsorgan ist ein für Geschwindigkeitsänderungen – das heißt Beschleunigung – sensibles Organ. Dabei sind zwei Arten von Sinneszellagern zu unterscheiden.

#### 1.3.1 Otolithenorgan

Als physiologischen Reiz für die Otolithenorgane beschrieben erstmals Breuer (1874) und Mach (1873, 1874) die geradlinige oder lineare Beschleunigung.

Die mit Abstand stärkste Linearbeschleunigung ist unter normalen Bedingungen die Schwerkraft, so daß die Otolithenorgane in erster Linie zur Bestimmung der

Körperlage bzw. Neigung dienen (Brooks 1939). Dabei erfolgt die Reizübertragung in die Makulaorgane durch Verschiebung der Otolithen, welche die entstehenden Scherkräfte über die Otolithenmembran auf die Haarzellen übertragen (von Holst 1950).

Erst die Benutzung von schnellen Verkehrsmitteln hat für den Menschen neue und sehr starke, in der bisherigen Evolution unbekannte Linearbeschleunigungen ergeben. So werden diese starken Reize als Änderung der Körperlage interpretiert, was z.B. bei Piloten in der Luftfahrt zu Fehlinterpretationen geführt hat. Andererseits konnten aufgrund dieses Phänomens mittlerweile auch klinische Tests zur seitengetrenten Überprüfung der Otolithenorgane entwickelt werden, die sogenannte Prüfung der subjektiven Vertikale bei exzentrischer Rotation (Clarke 1995, 1998).

Unter Laborbedingungen ist es sehr schwierig die Schwelle für die Empfindung der Otolithenorgane zu messen, weil die Gravitation stört. Die untere Empfindungsschwelle konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Die hohe Empfindlichkeit zeigt sich daran, daß noch bei 0,005 g eine Reizung der Otolithenorgane möglich war (Parker 1978), das entspricht einer Otolithenverschiebung von 0,15  $\mu\text{m}$  (Howard 1982).

### 1.3.2 Bogengangsystem

Der physiologische Reiz des Bogengangapparats ist die Dreh- oder Winkelbeschleunigung, wobei die Reaktion auf eine Drehbeschleunigung von den Faktoren Größe und Wirkungsdauer des Reizes abhängt (Mulders Gesetz).

Unter dem Einfluß von Drehbeschleunigungen gerät die Endolymphe der Bogengänge in Bewegung. Am kräftigsten ist diese Strömung, wenn die Winkelbeschleunigung in der Ebene des Bogenganges liegt, am geringsten, wenn der Bogengang genau senkrecht zur Ebene der Beschleunigung steht. Durch die Anordnung der Bogengänge ist die Wahrnehmung von Drehbewegungen in allen Raumebenen möglich. Die eigentliche Reizübertragung auf die Haarzellen erfolgt

mit Hilfe der Cupula. Da diese dieselbe Dichte hat wie die umgebende Endolymphe, kommt es nur bei Flüssigkeitsbewegung zu einer Cupulabewegung, nicht aber bei Lagewechsel. Dieser ist ein reiner Reiz der Otolithenorgane.

Eine Beeinflussung beziehungsweise Modifikation der Reizantwort der Bogengänge erfolgt durch die Otolithenorgane zum Beispiel bei Kopfbewegungen (Curthoys 1995).

### 1.3.3 Nervale Afferenzen

Sowohl die Rezeptorzellen in der Crista der Ampullen, als auch der Makulae gehören als Haarzellen zu den Mechanorezeptoren, bei denen die Bewegung der Zilien eine elektrische Reaktion in der Zelle bewirkt. Dabei bestimmt die Richtung der Bewegung wie das Ruhepotential verändert wird (Prinzip der Frequenzmodulation). Eine Abbiegung in Richtung des Kinoziliums bewirkt eine Zunahme der Nervenaktivität bzw. eine Depolarisation; erfolgt die Abbiegung in die andere Richtung kommt es zu einer Hyperpolarisation und einer Frequenzabnahme. In den Otolithenorganen geht das Ruhepotential von den Nervenzellen aus und wird nicht direkt durch den Tonus der Otolithen ausgelöst. Beim Menschen liegt es bei 60–90 Aktionspotentialen pro Sekunde. Die Zahl der Aktionspotentiale pro Sekunde ändert sich proportional zur Beschleunigung.

Diese Funktionsweise wurde zuerst 1950 von v Holst und Schön vertreten und durch Untersuchungen an einseitig entstateten Goldfischen, die kurzzeitiger Schwerelosigkeit ausgesetzt wurden, bestätigt (Baumgarten 1985).

## **1.4 Die Physiologie der Gleichgewichtsempfindung**

Zur Orientierung im Raum verfügen höher entwickelte Lebewesen über drei verschiedene sensible und sensorische Systeme zur Orientierung: Das Vestibularorgan, das visuelle System und das propriozeptive System.

Der Vestibularapparat mißt die Lagebefindlichkeit im Gravitationsfeld, bzw. die gradlinigen Beschleunigungen und die Drehbeschleunigungen, die der Kopf erfährt.

Das optische System orientiert den Körper in Bezug auf seine Umgebung und registriert Bewegungen im dreidimensionalen Raum.

Das propriozeptive System stellt ein internes Bezugssystem zur Verfügung und orientiert über die Lage von Rumpf und Extremitäten und gleichzeitig über Stütz- und Bewegungsmotorik.

Der Fisch verfügt außer den bereits genannten Sinnesorganen über zusätzliche Mechanismen zur Orientierung:

Das Seitenlinienorgan, eine Rinne an beiden Seiten der Körperoberfläche, dient als Strömungsmesser des umgebenden Wassers.

Der Lichtrückenreflex, ausgelöst über das optische System, bewirkt eine Ausrichtung des Fisches im Raum mit dem Rücken in Richtung des einstrahlenden Lichts (von Holst 1935). Der Einfluß des Lichtrückenreflexes auf die Orientierung ist bei den verschiedenen Fischarten sehr unterschiedlich, spielt aber insbesondere bei oberflächennah lebenden Fischen eine nicht unerhebliche Rolle.

Im Zentralnervensystem erfolgt die weitgehend unbewußt ablaufende Verschaltung dieser Systeme.

Jedes System bezieht sich auf bekannte Orientierungsgrößen, mit denen die Ist-Werte verrechnet werden. Dabei hat jedes System seine Besonderheiten und physiologischen Grenzen. Die Informationen werden bei der Verschaltung individuell unterschiedlich gewichtet. So werden zum Beispiel die Informationen des Otolithensystems und damit des Schwerkraftmesssystems um so stärker gewertet, je weniger Informationen vom propriozeptiven System zur Verfügung stehen.

Bei einem funktionierenden physiologischem System stimmen die Meldungen der verschiedenen Gleichgewichtssysteme miteinander überein bzw. können miteinander koordiniert werden. Dabei sind sie mit den bereits im Laufe der Entwicklung erworbenen Mustern der Erlebnisreaktionen und motorischen Reaktionen vereinbar.

Bei der dynamischen Orientierung werden die Reize, die eine Veränderung in der Beziehung zur Umwelt anzeigen, mit der vorbestehenden statischen Orientierung verglichen. Zusätzliche kompensatorische Mechanismen wie der optokinetische

Nystagmus über den oculo-vestibulären Reflex unterstützen eine Stabilisierung des sich verändernden Systems.

## **1.5 Kinetoseentstehung**

Als Auslöser der Kinetose wird heute die Unfähigkeit des vestibulären Systems angesehen, unphysiologische vestibuläre Reize adäquat zu verarbeiten (Scherer 1975, Holtmann 1987). Es muß aber betont werden, daß es sich bei der Kinetose nicht um ein eigentlich pathologisches Geschehen im Sinne einer Erkrankung handelt, sondern um die physiologische Reaktion auf extreme Reizsituationen. Gekennzeichnet ist die Kinetose durch ein Schwindelgefühl und eine Fülle von vegetativen Körperreaktionen mit den Kardinalsymptomen Übelkeit und Erbrechen.

### 1.5.1 Kinetoseauslösende Faktoren

Unterschiedliche Reize können eine Kinetose auslösen. Die isolierte starke Reizung des Bogengangsystems oder des Otolithenorgans eines Vestibularorgans reicht aus um das Bild einer Kinetose hervorrufen (Sjöberg 1929).

Besonders leicht läßt sich eine Kinetose aber durch simultane, dabei aber inkongruente Reizung von unterschiedlichen Funktionseinheiten des vestibulären Systems erzeugen. Erreichen läßt sich dies sowohl, indem gleichzeitig das Otolithenorgan und die Bogengänge des Vestibularorgans gereizt werden, als auch indem zwei unterschiedliche Sinnessysteme des vestibulären Systems gereizt werden, wie zum Beispiel bei gleichzeitiger visueller und vestibulärer Reizung.

Die Reizung zweier Anteile des Vestibularapparats erfolgt bei kombinierten Bewegungsabläufen, wenn zum Beispiel eine horizontale gradlinige Beschleunigung simultan mit einer Drehbeschleunigung um die sagittale Achse auftritt. Dies wird als vestibulärer Corioliseffekt bezeichnet (Gudrey 1965). Dabei handelt es sich genaugenommen aber nicht um den in der Physik von Coriolis 1846 beschriebenen Corioliseffekt, bei welchem es um Scheinkräfte geht, die bei gradlinigen Bewegungen in einem rotierendem Bezugssystem auftreten (Groen 1957). In der Medizin beschreiben sie lediglich das gleichzeitige Auftreten von linearen und

Drehbeschleunigungen und werden deshalb besser als Pseudo-Corioliskräfte bezeichnet.

Die gleichzeitige Reizung zweier unterschiedlicher Sinnessysteme geschieht, wenn zu einem optokinetischen Reiz, wie zum Beispiel beim Blick aus dem Seitenfenster eines fahrenden Autos ein vestibulärer Reiz durch eine Kurvenfahrt tritt (Scherer 1996).

### 1.5.2 Beteiligte Strukturen an der Kinetose

Sicher ist, daß das Vestibularorgan eine zentrale Stellung bei der Kinetoseentstehung einnimmt. Es konnte gezeigt werden, daß z. B. Labyrinthlose beziehungsweise labyrinthgeschädigte Individuen keine Kinetoseempfindlichkeit aufweisen (Sjöberg 1929, 1931, Colehour 1965, Kennedy 1968).

Der Otolithenapparat nimmt bei der Kinetoseentstehung eine dominierende Rolle ein. Dies deckt sich mit Beobachtungen, daß Kinetose insbesondere in der See- und Raumfahrt auftritt. Sowohl in der See- als auch in der Raumfahrt kommen insbesondere lineare, also otolithenwirksame Beschleunigungskräfte zum tragen (Watanabe 1991, Markus 1993, Helling 1994). In der Seefahrt erfolgt eine ständige Stimulation durch wechselnde Beschleunigungen in der Gravitationsachse. In der Raumfahrt fehlt die sonst ständig auf den Menschen einwirkende Gravitation.

### 1.5.3 Aktuelle Modellvorstellung zur Kinetoseentstehung

Bei der Ätiologie werden heute verschiedene Modelle diskutiert.

Am weitesten verbreitet und heute im wesentlichen als Ursache einer Kinetose anerkannt ist die Sinneskonflikttheorie, wie sie bereits Claremont (1931) und Brooks (1939) in den 30iger Jahren formuliert haben. Sie besagt, daß die beteiligten Sinnesorgane (Vestibularorgan mit Otolithenapparat und Bogengängen, visuelle System und Propiorezeptoren) bei der Gleichgewichtsempfindung widersprüchliche Informationen liefern (Reason 1978). Zum Beispiel entsteht ein solcher Sinneskonflikt beim Lesen in einem fahrenden Auto; während die Vestibularorgane wechselnde Beschleunigungen registrieren wird von den Augen eine ruhende Umgebung aufgenommen. Ein intravestibulärer Sinneskonflikt entsteht zum Beispiel

während einer reinen Linearbeschleunigungen. Der Otolithenreiz wird aufgrund der Bogengangmodulation durch die Otolithenorgane nicht von einem entsprechendem Bogengangreiz begleitet, so daß zwischen Otolithenorgan und Bogengängen ein Sinneskonflikt entsteht und eine Kinetose ausgelöst werden kann (Curthoys 1995). Eine andere Theorie sieht die Überstimulation des vestibulären Systems als Ursache an (Quix 1922, Wit 1953).

Außerdem wird diskutiert, ob eine Inkongruenz zwischen zentral gespeicherten Bewegungsmustern und akut auftretenden Bewegungen zu einer Kinetose führt (Groen 1957). Unterstützt wird diese Überlegung durch die Beobachtung, daß Seefahrer nach längerer Exposition eine Habituation zeigen, die aber unter Umständen nur auf einen Schiffstyp beschränkt ist.

#### 1.5.4 Das Space Adaption Syndrom

In der bemannten Raumfahrt können bei ca. 50 % der Astronauten insbesondere in den ersten Tagen kinetoseähnliche Symptome beobachtet werden. Sie werden unter dem Begriff ‚Space Adaption Syndrom‘ (SAS) zusammengefaßt. Aufgrund der Parallelen der Symptome und zum Teil Ursachen wird das SAS der Kinetose zugeordnet.

Untersuchungen bei Astronauten zeigten, daß die Otolithenorgane die wesentliche Rolle bei Entstehung eines Space Adaption Syndroms (SAS) spielen (Diamond 1991, 1992). Das Bogengangsystem scheint im Vergleich dazu nur eine untergeordnete Rolle zu spielen. Astronauten, die in Schwerelosigkeit auf einem elektrischen Drehstuhl Corioliskräften ausgesetzt waren, zeigten kaum Symptome eines SAS (Graybiel 1974).

#### 1.5.5 Das Problem der individuell unterschiedlichen Kinetoseanfälligkeit

Die individuell unterschiedliche Kinetoseempfindlichkeit bzw. die eines Space Adaption Syndroms (SAS) werden durch die verbreiteten Kinetosemodelle nicht ausreichend erklärt.

Psychische und physische Faktoren, die über eine vermehrte Abgabe von Noradrenalin und Adrenalin zu einer Modulation der neuralen Aktivität in den Vestibulariskernen führen, reichen zur Erklärung des Ausmaßes der Variabilität nicht aus (Kubo 1974).

Es wird diskutiert, ob ein Seitenunterschied der Empfindlichkeit der Vestibularorgane für eine erhöhte Kinetoseempfindlichkeit verantwortlich sein könnte. Unter alltäglichen Bewegungsreizen wäre denkbar, daß das System die Unterschiede zentral vollständig kompensieren kann, jedoch könnte es bei unphysiologisch starken Reizen zu einer Dekompensation kommen.

Wie schon oben erwähnt, hat der Otolithenapparat gegenüber den Bogengängen eine besondere Bedeutung bei der Kinetoseentstehung; schon frühere Arbeiten heben seine Bedeutung bei der Entstehung der Kinetose hervor (Wit 1953, Watanabe 1991).

Eine wesentliche Annahme geht davon aus, daß eine unterschiedliche Empfindlichkeit der Otolithenorgane zwischen rechts und links verantwortlich sein könnte. Da die Sinneszellen von Sacculus und Utriculus wahrscheinlich proportional zur Masse der Otolithen bei Linearbeschleunigungen gereizt werden (Baumgarten 1972, 1975), könnte eine Massedifferenz der Otolithen unterschiedlich starke Reize bei einer auf sie einwirkenden Linearbeschleunigung hervorrufen.

Gestützt durch die Beobachtung, daß Astronauten, bei denen Hinweise für eine asymmetrische Otolithenempfindlichkeit bestanden, unter Schwerelosigkeit vermehrt Symptome eines SAS zeigten, veranlaßte von Baumgarten (1979) zu vermuteten, daß eine kleine Differenz der Otolithenpaargewichte unter Erdanziehungskraft durch neuronale Mechanismen ausreichend kompensiert sei. Bei Fehlen der Gravitationskraft könnten die dann schwerelosen Otolithen bei Kopf und Körperbewegungen stärker disloziert werden und zu einer vestibulären Instabilität führen. Zum einen würden dabei die Otolithen aufgrund ihrer unterschiedlichen Masse verschieden stark disloziert werden und zu einem interotolithären Sinneskonflikt führen. Zum anderen würden diese zentral als Änderung der Körperlage interpretierten Otolitheninformationen durch das visuelle System nicht bestätigt werden und zu einem Sinneskonflikt führen.

## **1.6 Bisherige vestibuläre Experimente am Fisch**

Es wurde schon vor längerer Zeit beobachtet, daß auch Fische beim Transport teilweise mit einem Schwimmverhalten reagieren, das dem einer Kinetose ähnlich ist (Money 1970).

Fische befinden sich in ihrer natürlichen Umgebung im Wasser oft dann in einem Zustand der Schweben, wenn die Auftriebskräfte im Wasser die Gravitationskräfte ausgleichen. Deshalb dachte man anfänglich, daß Fische sich am schnellsten im Weltraum an den Zustand der Schwerelosigkeit gewöhnen würden. Genaugenommen befindet sich aber bei Fischen im Wasser nur der Körper selbst im Schweben, während der Reiz auf die Statolithenorgane durch die Gravitation, im Gegensatz zur echten Schwerelosigkeit, nicht aufgehoben ist.

Bei Skylab-Missionen 1973 wurde bei mitgeführten kleinen Fischen (*Fundulus*) über mehrere Tage eine Änderung des Schwimmverhaltens mit Schrauben- und Loopingbewegungen unter verminderter Gravitation beobachtet. Die Loopingbewegungen erfolgten stets in Tauchposition; das bedeutet, die Fische schwammen die Loopings immer mit dem Bauch zum Loopingzentrum. Bei längerem Aufenthalt im Weltraum trat eine Normalisierung dieser Bewegungen auf (Baumgarten 1975). Dies korreliert mit der Beobachtung, daß Astronauten, die unter SAS litten, ebenfalls von Überschlagempfindungen mit dem Gefühl nach hinten zu kippen berichteten (Shillinger 1973).

Die Schwimmuster bei Fischen wurden bei Untersuchungen bei anderen Arten (*Oryzias latipes*) bei Parabelflügen bestätigt. Es konnte dabei innerhalb der Fischart eine individuell deutlich unterschiedliche Ausprägung der Symptomatik gefunden werden. Ijiri war darüber hinaus in der Lage zwei unterschiedliche Fischstämme zu züchten, von denen die eine Linie eine Loopinganfälligkeit unter Hypogravitation zeigte die andere jedoch nicht (Ijiri 1995).

Untersuchungen an Fischen, denen einseitig der Utriculus ausgeschaltet wurde, zeigten postoperativ Roll- und Schraubenbewegungen, die nach einigen Tagen kompensiert wurden. Bei Einwirkung von Hypogravitation kam es bei diesen vorher kompensierten Fischen zum Neuauftreten der postoperativen Bewegungsmuster (Wetzig 1983).