

Aus der Universitäts-Ohrenklinik Frankfurt a. M.
(Direktor: Prof. O. Voß.)

Über den experimentellen Nachweis der Endolymphbewegung im Bogengangsapparat des Ohrlabyrinths bei adäquater (rotatorischer) und kalorischer Reizung.

Physiologische Erklärung der Auslösung des Nystagmus durch Endolymphbewegung.

Von Dr. med. **Marcus Maier**, früher Assistent der Klinik, jetzt Hals-, Nasen-, Ohrenarzt, Stuttgart und **Hans Lion**, Medizinalpraktikant der Klinik.

Durch eine größere Anzahl von Versuchen an Modellen, am toten und lebenden Tier (ausführliche Arbeit mit zwei Kurven und zwei Skizzen und Literaturangabe in Pflügers Archiv, Bd. 187, Heft 1/3) ist es uns gelungen, den experimentellen, für das Auge sichtbaren, Nachweis der Endolymphbewegung im Bogengangsapparat des Ohrlabyrinths bei adäquater (rotatorischer) und kalorischer Reizung zu erbringen. Die Endolymphbewegung konnte, bei kalorischer Reizung des Labyrinths durch Spülung des Trommelfells, beim lebenden Tier dem Auge sichtbar gemacht werden, während dies für die rotatorische Erregung aus äußeren technischen Gründen unterbleiben mußte. Doch waren die Ergebnisse am Modell und am toten Tier bei der Rotation so einwandfrei, daß die Strömung auch in vivo als sicher angenommen werden darf.

Es ergibt sich, daß ein fundamentaler Unterschied zwischen der Endolymphbewegung bei rotatorischer und bei kalorischer Erregung besteht.

Die experimentell gefundenen Gesetze der Endolymphbewegung seien hier kurz angeführt:

I. Bei kalorischer Reizung.

1. Die Endolymphbewegung ist schon durch ganz geringes Temperaturgefälle (0,5 C) zu erzielen.
2. Die zentrale Strömung ist stets rascher als die Randströmung.
3. Der Strömungsbeginn ist abhängig:
 - a) von der lichten Weite des Bogengangs (Strömungsbeginn um so eher, je größer der Durchmesser),
 - b) vom Wärmeleitungshindernis (je größer dieses, um so später Strömungsbeginn),

- c) von der Neigung der Bogengangsebene zur Horizontalen (später einsetzend mit zunehmender Neigung; Sinusfunktion), ist nicht abhängig:
- d) von der Spüldauer.
- 4. Die Strömungsgeschwindigkeit bzw. Strömungsbeschleunigung steigt vom Nullpunkt bis zum Maximum allmählich an, um dann asymptotisch zu verlaufen.
Sie ist abhängig:
 - a) vom Temperaturgefälle (je höher Temperaturgefälle, desto größere Geschwindigkeit,
 - b) von der lichten Weite des Bogengangs (je weiter der Bogengang, um so größer die Geschwindigkeit),
 - c) vom Wärmeleitungshindernis (je größer dieses, um so langsamer Geschwindigkeitsanstieg),
 - d) von der Neigung der Bogengangsebene zur Horizontalen (nimmt ab mit der Neigung; Sinusfunktion); nicht abhängig:
 - e) von der Dauer der Spülung.
- 5. Die Strömungsdauer ist beendet, wenn im gesamten Bogengang die gleiche Temperatur herrscht.
Sie ist abhängig:
 - a) vom Temperaturgefälle (je größer dieses, um so länger die Strömungsdauer),
 - b) von der Weite des Bogengangs (je weiter dieser, um so länger die Strömungsdauer),
 - c) vom Wärmeleitungshindernis (je größer dieses, um so länger die Strömungsdauer),
 - d) von der Spüldauer (je länger Spülung, um so länger Strömungsdauer),
 - e) von der Neigung der Bogengangsebene zur Horizontalen (nimmt ab mit dem Neigungswinkel).

II. Bei rotatorischer Reizung.

- 1. Die Endolymphbewegung ist schon durch ganz geringe mikroskopisch kleine Drehung zu erzielen.
- 2. Die zentrale Strömung ist rascher als die Randströmung.
- 3. Bei gleichmäßiger Drehung eines Bogengangs haben wir vier Stadien der Endolymphbewegung zu unterscheiden.
 - a) Stillstand der Endolymph (bei Beginn der Bewegung des Bogengangs),
 - b) Stadium der gleichmäßig beschleunigten Bewegung,
 - c) Stadium der gleichmäßigen Bewegung,
 - d) Stadium der Nachströmung, gleichmäßig verlangsamte Bewegung (nach Drehungsschluß).

4. Der Beginn des Stadiums c ist von der lichten Weite des Bogengangs abhängig (je weiter der Bogengang, desto später Stadium c).
 5. Die Dauer des Stadiums a ist außerordentlich gering.
 6. Die Dauer des Stadiums b steht in direktem Verhältnis zur Weite des Bogengangs und im umgekehrten Verhältnis zur Drehungsgeschwindigkeit.
 7. Die Dauer des Stadiums c hängt ab von der Dauer der gleichmäßigen Drehung.
 8. Die Dauer des Stadiums d steht in direktem Verhältnis zur Weite des Bogengangs und zur Drehungsgeschwindigkeit, außerdem bis zu einer bestimmten optimalen Umdrehungszahl (10).
 9. Für die gleichmäßige Drehung des Bogengangs in exzentrischer Stellung sind die bis jetzt aufgestellten Sätze gültig. Wir haben nur eine geringere Intensität beobachten können.
 10. Mit steigendem Winkel der Bogengangsebene zur Horizontalen nehmen die Zahlen entsprechend der Sinusfunktion ab.
- III. Bei der kalorischen Erregung des Labyrinths sind die Geschwindigkeitsänderungen in der Zeiteinheit auf die Gesamtströmungsdauer verteilt. Die Endolymph setzt sich langsam in Bewegung bis zu einem Maximum, um dann noch langsamer abzuklingen. Bei der rotatorisch-gleichmäßigen Erregung sind dagegen die Geschwindigkeitsänderungen in der Zeiteinheit bei Beginn und nach Schluß der Drehung ganz außerordentlich große; während der übrigen Zeit bewegt sich die Flüssigkeit gleichmäßig und steht im Verhältnis zum Bogengang still.

Wenn wir versuchen wollen, uns das Zustandekommen des Labyrinthreizes und seine Folgen klar zu machen, so müssen wir auf Grund unserer experimentell gefundenen Gesetze unterscheiden zwischen kalorischer und adäquater (rotatorischer) Erregung.

Kalorische Erregung.

Spülen wir gegen das Trommelfell eines Menschen mit 5 ccm Wasser (nach der von Kobrak angegebenen Methode) mit anderer als Körpertemperatur, so wird nach Überbrückung des Wärmeleitungshindernisses zwischen Trommelfell und Bogengang auf Grund der Erwärmung oder Abkühlung des proximalen Teiles der Bogengänge eine Strömung der Endolymph in der einen oder anderen Richtung eintreten. Die Strömungsbeschleunigung wird in dem Bogengang am größten sein, dessen Ebene sich am meisten der Senkrechten nähert. Wir wollen einen solchen optimalen Fall betrachten. Vom Spülungsbeginn bis zum Strömungs-

beginn vergeht eine gewisse Zeit, die abhängig ist vom Wärmeleitungshindernis, von der lichten Weite des häutigen Bogenganges und von der Stellung des Bogenganges zur Horizontalen. In dieser Zeitspanne findet keinerlei Erregung des Vestibularapparates statt: Die Zone der Latenzzeit (ungefähr 20 Sekunden). Diese ist bei demselben Menschen bei wechselnder Kopfstellung und bei verschiedenen Menschen auf Grund anatomischer Differenzen verschieden.

Infolge der langsam einsetzenden Strömung mit ganz geringer Beschleunigung in der Zeiteinheit folgt nun eine Zone, in der die Sinneshaare der Cupula wohl schon eine ganz geringe Abbiegung erleiden; aber in bezug auf den auszulösenden Nystagmus als Indikator ist die Reizschwelle noch nicht erreicht. Es muß mit der Möglichkeit gerechnet werden, daß durch diese minimale Abbiegung der Härchen, und zwar bei verschiedenen Menschen in verschieden starkem Grade infolge Unter- oder Übererregbarkeit des Nervensystems geringste Reize zentralwärts gesandt werden können, die jedoch nicht so stark sind, um rhythmische Augenbewegungen hervorzurufen, wohl aber unregelmäßige Zuckungen: Die Zone der unregelmäßigen Zuckungen (geringste Nervenirregung; ungefähr von der 20.—23. Sekunde nach Beginn). Diese fällt bei manchen Menschen aus den eben erwähnten Gründen aus.

Jetzt tritt der Zustand ein, in dem die Strömung durch die größere Beschleunigung in der Zeiteinheit so stark ist, daß infolge der jetzt stärker abgebogenen Sinneshaare der Cupula der hierdurch bewirkte Reiz so kräftig ist, daß als Reflex die typische langsame Komponente der Augenbewegung ausgelöst wird: Zone der langsamen Komponente (mittlere Nervenirregung; ungefähr 23.—24. Sekunde nach Beginn).

Nun erreicht die Strömung der Endolympe ihre stärkste Beschleunigung in der Zeiteinheit, die Sinneshaare die stärkste Abbiegung und damit wird auch die während des Ablaufs der Spülung stärkste Reizfolge zentralwärts gesandt; infolgedessen: Zone der regelmäßigen rhythmischen Zuckungen (stärkste Nervenirregung, ungefähr 24. bis 70. Sekunde).

Von nun an verlangsamt sich die Strömung stetig. Die Beschleunigung in der Zeiteinheit wird dauernd geringer, die Sinneshäärchen richten sich infolge ihrer Elastizität langsam wieder auf, die zentralgeleiteten Reize werden schwächer und schwächer, bis die Reizschwelle unterschritten ist: Zone des Nystagmusabklingens (abnehmende Nervenirregung bis Erregungsschluß; 70.—160. Sekunde).

Die jetzt noch bestehende Strömung der Endolympe hat eine solch geringe Beschleunigung in der Zeiteinheit, daß die hierdurch noch bedingte Abbiegung der Sinneshäärchen zu gering ist, um einen Reflex auszulösen.

Aus diesen Versuchen geht hervor, daß durch die kalorische Reizung eine ständige Änderung der Beschleunigung der Endolymphströmung in der Zeiteinheit hervorgerufen wird.

Mithin werden auf das Endorgan des Nervus vestibularis ständig an Intensität verschiedene Reize ausgeübt.

Wir können unsere Versuchsergebnisse auf eine kalorische Spülung beim Menschen übertragen mit der Einschränkung, daß infolge der Blutzirkulation in den wärmeleitenden Medien — hauptsächlich Knochen — das Temperaturgefälle rascher ausgeglichen wird und damit die Strömungsdauer verkürzt wird. Wir haben um so mehr Berechtigung zu dieser Behauptung, als wir durch Messungen im äußeren Gehörgang nachweisen konnten, daß bei einer 5 ccm Spülung mit 10^0 unter Körpertemperatur nach ungefähr 160 Sekunden bereits die Körpertemperatur im äußeren Gehörgang wieder erreicht war. Wir möchten hier nicht unerwähnt lassen, daß andererseits durch Zurückbleiben von verschieden großen Wassermengen im äußeren Gehörgang auf Grund seiner verschiedenartigen Krümmungen bei den verschiedenen Individuen, oder gar im Mittelohr bei Trommelfelldefekten das Temperaturgefälle länger oder kürzer andauern kann.

Aus unseren Versuchen mußte hervorgehen, daß bei einer gleichmäßigen Durchwärmung des ganzen Bogengangsapparates keine Endolymphströmung und mithin kein Nystagmus als Reflex auftreten konnte. Wir versuchten dies durch lange Zeit (10 Minuten) durchgeführte Dauer-spülung zu erreichen. Wir konnten hiermit den Nystagmus jedoch nicht zum Verschwinden bringen. Die Überlegung sagte uns auch bald, daß infolge der Blutzirkulation mit zunehmender Entfernung von der Wärmequelle (Trommelfell und Gehörgang) ein zunehmender Wärmeabfall dauernd vorhanden sein mußte. Dagegen fanden wir bei Brünings, daß mit Hilfe von Joulescher Stromwärme durch elektrische Hochfrequenzapparate infolge gleichmäßiger Durchwärmung des ganzen Bogengangsapparates kein Reiz des Nervus vestibularis festzustellen war.

Unter der Reizschwelle liegen auch die minimalen Strömungen, die bei der Erwärmung des Bogenganges in Pessimumstellung auf Grund der Ausdehnung der Endolymph nach beiden Seiten von der Erwärmungsstelle aus stattfinden; hierunter fallen auch die Strömungen, die wir infolge der Ausbiegungen einzelner Abschnitte des Bogenganges aus der Bogengangsebene auch in Pessimumstellung beobachten konnten.

Die eingehend von Brünings beschriebenen Erscheinungen bei Optimum- und Pessimumstellung der Bogengänge werden durch unsere Versuchsergebnisse auf physikalischer Grundlage bestätigt.

Adäquate (rotatorische) Erregung.

Drehen wir einen Menschen gleichmäßig auf dem Drehstuhl, so wird in den Bogengängen auf Grund der oben angeführten Gesetze eine von der Neigung der einzelnen Bogengänge zur Horizontalen abhängige verschieden starke Strömung der Endolympe hervorgerufen werden. Betrachten wir, entsprechend der kalorischen Erregung, bei der hierfür günstigen wagrechten Stellung des Bogenganges, wie sich die Vorgänge abspielen. Im ersten Augenblick der Drehung, für die nur ein Bruchteil einer Sekunde in Betracht kommt, wird die Endolympe auf Grund des Trägheitsgesetzes stillstehen. Das periphere Ende der Sinneshaare der Cupula oder die Cupula selbst werden infolgedessen durch die stehende Flüssigkeit gezogen und erleiden eine ruckartige und kräftige Abbiegung, entgegengesetzt der Drehungsrichtung. Als Reflex tritt sofort mit dem Beginn der Drehung ein lebhafter rhythmischer Nystagmus auf. Nun erreicht die Strömung der Endolympe eine zunehmende Geschwindigkeit in der Zeiteinheit, bis sie auf Grund der inneren Reibung, abhängig von der Drehungsgeschwindigkeit und der lichten Weite des häutigen Bogenganges ziemlich rasch dessen Geschwindigkeit erhält. Bis zu diesem Zeitpunkt werden die Sinneshärcchen dauernd eine zunehmende Abbiegung durch die strömende Flüssigkeit, die noch nicht dieselbe Geschwindigkeit wie der häutige Bogengang erreicht hat, erleiden. Hierdurch werden dauernd neue Reize zentralwärts gesandt. Dieser Vorgang spielt sich ebenfalls in einer außerordentlich kurzen Zeitspanne ab.

In dem Augenblick nun, in dem die Geschwindigkeit der Endolympe, die gleiche geworden ist, wie die des häutigen Bogenganges wirkt die Endolympe nicht mehr als verbiegende Kraft auf die Härcchen. Mithin würden sich diese auf Grund ihrer Elastizität wieder aufrichten, wenn nicht ein anderer Faktor — die Zentrifugalkraft —, den wir bisher nicht erwähnten, der aber vom ersten Augenblick der Drehung mitspielt, seine Wirkung auf die Härcchen in der gleichen Richtung ausüben würde. Infolgedessen werden bei fortdauernder weiterer Drehung die Härcchen bis zu einem Maximum abgebogen; vermutlich ungefähr am Ende der zehnten Drehung. Ein weiteres Abbiegen der Härcchen ist danach nicht mehr möglich. (Es mag vielleicht auffallend erscheinen, daß eine verhältnismäßig so lange Zeit erforderlich ist, um die Härcchen unter dem Einfluß der Zentrifugalkraft maximal abzubiegen. Wir müssen jedoch annehmen, daß die Differenz des spezifischen Gewichtes der Sinneszellen und der Endolympe nur minimal ist. Da infolgedessen auch ihre Massen sich nur um ein Weniges unterscheiden, und die auf sie ausgeübte Beschleunigung keine sehr große ist, so wird diese von uns angegebene Zeit für das Erreichen der maximalen Abbiegung notwendig sein.)

Wir sind von der Voraussetzung einer gleichmäßigen Drehung ausgegangen; denn es besteht ein großer Unterschied zwischen dieser und der ungleichmäßigen, bei der die Endolymph dauernd neue Stöße und der Vestibularapparat neue Reize erhält. Mit dieser letzteren Bewegung müssen wir bei den mit der Hand gedrehten Drehstühlen rechnen. Durch den von Herrn Prof. Voß in unserer Klinik angegebenen elektrischen Drehstuhl war es uns möglich, eine völlig gleichmäßige Drehung in jeder beliebigen Umdrehungszeit auszuführen. Mit dem Erreichen der maximalen Abbiegung, wie sie nur durch den Drehreiz — im Gegensatz zum kalorischen Reiz — und zwar durch den äußerst intensiven, wir möchten sagen pathologischen, zustandekommt, werden jedoch trotz keiner weiteren Bewegung der Sinneshärchen noch einige Zeit Reize zentralwärts gesandt werden. Denn wir möchten annehmen, daß durch diese Überreizung (mehr als zwei- bis dreimalige Drehung), für die es in der Natur kaum Beispiele gibt, im angegriffenen Endapparat gewisse stärkere chemische Umsetzungen vor sich gehen, als dies beim kalorischen Reiz der Fall ist. Diese abnormen Reaktionen bedingen bis zu ihrem Abklingen weitere Reize (vgl. Nachwirkung bei Überreizung andere Sinnesorgane). Es mußte also nach einer gewissen Zeit, die sich zusammensetzt aus Abbiegungs- und Nachwirkungsreizen, der Nystagmus während der gleichmäßigen Drehung aufhören. In der Tat sahen wir unsere Vermutungen durch entsprechende Untersuchungen, die wir mit Grahe zusammen ausführten, bestätigt. Der Nystagmus sistierte bei Ausschaltung des optischen Nystagmus nach ungefähr 20—40 Sekunden während der weiter fortgesetzten gleichmäßigen Drehung. Wie wir später fanden, sind diese Versuche auch schon von Buys mit ähnlichen Ergebnissen ausgeführt worden.

Die Zone des rhythmischen Nystagmus dauert also bei der gleichmäßigen Drehung ungefähr 20—40 Sekunden. (Bei der ungleichmäßigen Drehung von 0 bis Drehungsschluß.) Die nystagmusfreie Zone dauert bis Drehungsschluß.

Beim Anhalten des Drehstuhles bei gleichmäßiger und nicht gleichmäßiger Drehung schießt infolge des Trägheitsgesetzes die Endolymph einen Augenblick weiter und zwar haben wir einen Geschwindigkeitsabfall in dieser kurzen Zeitspanne von der Umdrehungsgeschwindigkeit des Bogenganges bis 0. Infolgedessen tritt eine neue stoßartige kräftige Verbiegung der Sinneshärchen von der alten Stellung über die Ruhelage hinaus nach der entgegengesetzten Seite ein. Verstärkt wird diese durch die Strömung bedingte Bewegung, durch die Elastizität der Härchen, die plötzlich der Wirkung der Zentrifugalkraft entronnen sind. Diese Bewegung wird um so schnellender sein, je mehr die Härchen auf Grund häufigerer Drehungen vorher der Zentrifugalkraft unterlegen waren. Allerdings gibt es hier ein Maximum, das sich klinisch dadurch

zeigt, daß wir ein Anschwellen des Nachnystagmus nur bis ungefähr zehn Umdrehungen haben. Bei einer häufigeren Umdrehung haben wir keine Verstärkung des Nachreizes mehr. Dieser entgegengesetzten ruckartigen Abbiegung und ihren Folgen entspricht die Zone des Nachnystagmus (ungefähr 20—40 Sekunden nach Drehungsschluß) mit bekanntlich ebenfalls entgegengesetzter Richtung. Dieser Nachnystagmus, der, wie theoretisch vermutet, die gleiche Dauer wie der rhythmische Nystagmus während der Drehung hat, überdauert die Endolymphbewegung auf Grund der oben angeführten, auch hier vor sich gehenden chemischen Umsetzungen.

Diese Erscheinung zusammen mit unseren Beobachtungen, daß die gesamte Geschwindigkeitsänderung bei der rotatorischen Erregung auf die ganz kurze Zeitspanne des Drehungsbeginns und des Drehungsschlusses fällt, gibt uns das Recht anzunehmen, daß die reizauslösende Kraft hier eine bedeutend stärkere ist als bei der kalorischen Erregung, bei der die Geschwindigkeitsänderung sich auf die gesamte Strömungsdauer verteilt, und wo der Reiz nicht imstande ist eine Nachdauer des Nystagmus hervorzurufen; denn wir können durch Sistierung der Strömung und damit des Reizes bei der kalorischen Untersuchung jeder Zeit durch Pessimumstellung den Nystagmus sofort zum Verschwinden bringen.

Bei der Wirkung aller dieser Reize muß eine gewisse Variationsbreite vorhanden sein und zwar erstens auf Grund individueller Variationen des Bogengangsapparates, als auch bedingt durch ein stumpferes oder sensibleres Nervensystem.

Wir glauben hiermit eine einfache auf physikalische Grundlagen aufgebaute Erklärung der Nystagmusauslösung und damit der Funktion des Vestibularapparates gegeben zu haben.
