Der Kopfgelenkbereich im Funktionsgefüge der Raumorientierung: systemtheoretische bzw. biokybernetische Gesichtspunkte

B. HASSENSTEIN

Von funktionellen Störungen an bestimmten einzelnen *Gelenken* würde ohne vorangehende Erfahrung kaum jemand vermuten, sie könnten sekundäre Wirkungen auf *Sinnesfunktionen* verschiedener Modalitäten oder gar auf *allgemeine Funktionszustände des Zentralnervensystems* ausüben. Für die allermeisten der weit über 200 Gelenke des Menschen trifft dies auch nicht zu; doch gilt es für den nur wenige Einzelgelenke umfassenden Kopfgelenkbereich. Wie ist dies funktionell zu verstehen?

Der folgende Beitrag soll in die Diskussion über die Physiologie des Kopfgelenkbereichs eine Denkweise einbringen, die in der vergleichenden Physiologie v.a. von Albrecht Bethe (Ordinarius für Physiologie in Frankfurt; 1872–1954) und Erich von Holst (zuletzt am Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie Seewiesen; 1908–1962) entwickelt wurde: die biologische Systemtheorie, auch Biokybernetik genannt. Ein Charakteristikum dieser Denkweise besteht in folgendem: Die Bewegungssteuerung wird nicht als Bündel von Reflexen betrachtet, sondern als Ergebnis einer *Datenverarbeitung* für zahlreiche gleichzeitig empfangene biologische Signale. Hieraus können bei *isolierter* Reizung *Reflexe* als isolierte Verhaltensantworten folgen; doch sind die Reflexe nicht als die *elementaren Bausteine der Verhaltenssteuerung* zu betrachten.

Im Zentrum des Interesses dieser Tagung steht die Beweglichkeit

- zwischen Körper und Kopf und
- zwischen Kopf und Augen.

Ein kleiner Demonstrationsversuch, der einige Probleme der Koordination dieser Bewegungen gut zum Ausdruck bringt, ist der *Nick-/Leseversuch* (englisch: „nod and read experiment"; Hassenstein 1965):

Wie in Abb. 1 dargestellt, nimmt die Versuchsperson (Vp) ein Buch oder eine Zeitung zur Hand und hält den Text mit ausgestreckten Armen etwa waagerecht

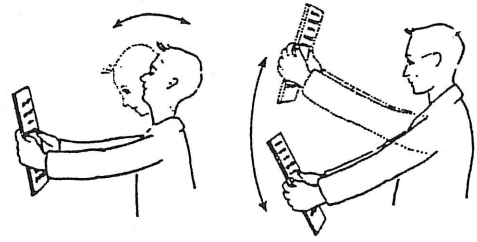


Abb. 1. Nick-/Leseversuch. (Nach Hassenstein 1965)

vor sich; es soll gerade noch gut möglich sein, den Text zu lesen. Nun werden zwei Versuche durchgeführt:

1. Versuch: Der Kopf wird in mittlerer Geschwindigkeit in „nickender" Bewegung abwechselnd gesenkt und gehoben. Eine Einzelbewegung dauert etwa 1 s. Dabei bleibt der Blick auf das Papier gerichtet. Die Augen müssen also die Kopfbewegungen ausgleichen („kompensieren"). Ergebnis: Man kann trotz der Bewegungen ungehindert lesen.

2. Versuch: Der Kopf wird stillgehalten; dafür wird mit den Armen das Papier auf- und abbewegt. Die Bewegungen sollen ungefähr die gleiche Winkelgeschwindigkeit haben wie zuvor; auch der überstrichene Winkel soll etwa gleich sein, so daß die Bewegungen der Augen in den Augenhöhlen, die notwendig sind, um den zu lesenden Text im Blick zu behalten, in ihrem Winkelmaß denen im 1. Versuch entsprechen. Ergebnis: Obwohl die Augen innerhalb ihrer Höhlen dieselben Bewegungen ausführen wie im 1. Versuch, gelingt das Lesen viel schlechter. Die Buchstaben verschwimmen für manche Beobachter so sehr, daß sie überhaupt nicht mehr zu lesen sind.

Erklärung: Die *willkürliche Kopfbewegung* schließt eine winkelgetreue *Gegensteuerung der Augenbewegungen* ein (auch bei geschlossenen Lidern tastbar). Dadurch bleibt bei offenen Augen die Beziehung zwischen Netzhaut und Sehobjekt konstant, und das Lesen ist ungestört. Bei der Bewegung des Textes mit den *eigenen Armen* stellt das Zentralnervensystem jedoch *keine* entsprechenden Gegensteuerimpulse für die Augäpfel zur Verfügung. Die Augen müssen daher dem *bewegten Seheindruck* folgen, so als ob das Sehobjekt von jemand anderem bewegt würde (man kann letzteres auch als Vergleichsversuch durchführen). Um eine Bewegung *visuell* wahrzunehmen und darauf reagieren zu können, muß nun notwendigerweise bereits eine *Bildverschiebung* stattgefunden haben, weil diese ja den auslösenden Reiz darstellt. Diese Bildverschiebung aber stört das Formensehen, das auf Bildkonstanz angewiesen ist. Darum ist das Lesen im 2. Versuch gestört.

Rein *visuell* ausgelöste Folgebewegungen führen also nicht zum bestmöglichen Gestaltsehergebnis. Das beste Lesen wird erreicht durch *von innen* gesteuerte Gegenbewegung der Augen zu willkürlichen Winkelbewegungen des Kopfes.

Jederzeit abrufbare Informationswerte der Raumlageorientierung

Zu jeder Zeit sind im menschlichen Zentralnervensystem 4 Informationswerte der Raumlage repräsentiert:

- die Position des Kopfes relativ zum Schwerelot,
- etwaige Drehbewegungen des Kopfes relativ zur Umwelt,
- die Position des Körpers relativ zum Schwerelot,
- etwaige Drehbewegungen des Körpers relativ zur Umwelt.

Der Biologe fragt nach der funktionellen Bedeutung dieser dauernden Repräsentation von 4 Zustandsvariablen. Die Antwort lautet: Immer wenn eine ungewollte Abweichung des Kopfes oder Körpers von der Soll-Position eine Gegenregulie-

rung erfordert, sind bei unterschiedlichen Körper- und Kopfpositionen auch andere Korrekturreaktionen erforderlich. Das gleiche gilt naturgemäß für jede spontane willkürliche Körperbewegung. Bei der Organisation von Körperaktivitäten muß daher *jederzeit* die Information über die augenblickliche Lage und den Bewegungszustand von Kopf und Körper eingeholt und funktionsgerecht eingerechnet werden können. Dazu müssen die genannten 4 Informationswerte jederzeit existieren und abrufbar sein.

Zur Gewinnung und dauernden Kontrolle der 4 Informationswerte dienen nun die Meldungen von mehr als 6 Sinnesorgansystemen zusammen, vor allem:

- Meldungen der Statolithen (Otolithen) über die *Richtung der Schwerkraft;*
- Meldungen der *Drehbeschleunigungs*messer des Bogengangsystems; diese werden der mathematischen Operation der *zeitlichen Integration* unterworfen, um dann als Dreh*bewegungs*meldungen in die Raumorientierung einzugehen;
- Meldungen der Augen über Drehbewegungen relativ zur Umgebung;
- Meldungen der Ohren über die Richtung von Schallquellen;
- Berührungs- und Druckmeldungen der Haut, z. B. der Fußsohlen;
- Sinnesmeldungen über die Position des Kopfes relativ zum Rumpf.

Letzteren wird themabedingt in der folgenden Erörterung besondere Aufmerksamkeit gelten.

Hierzu sei jedoch zunächst noch auf eine methodische Voraussetzung hingewiesen: Sinnesmeldungen lassen sich in der Regel als *Meßwerte* auffassen. Wo Meßwerte vorliegen, darf man nach der Art der *Meßskala* fragen, auf welche sie projiziert werden. Im Fall der Raumorientierung ist diese Meßskala natürlich nicht eindimensional linear wie die Skalen der Temperaturen oder der Lautstärken, sondern es handelt sich um *Winkelangaben* (einschließlich Winkel*änderungs*meldungen), und diese bilden eine *zirkuläre* Skala. Will man dies in einer Kurzformel ausdrücken, so lautet diese für jeden beliebigen Winkelwert: $\alpha = 360° + \alpha$. So etwas wäre für Temperaturen oder sonstige Meßwerte auf einer *linearen* Skala undenkbar.

Gegenseitige Bestätigung

Fragt man nun nach der Art und Weise, in der die Daten der Statolithen, der Bogengänge, des Sehens und des Richtungshörens zu *einer* Positionsmeldung verrechnet werden, so handelt es sich um den logisch eigentümlichen Vorgang der *gegenseitigen Bestätigung:* Melden beispielsweise die Bogengänge *und* die Augen je eine relative Drehgeschwindigkeit zur Umgebung von 90°/s, so *bestätigen* sich diese Meldungen gegenseitig; es wäre absurd, wenn sie sich addierten und damit den falschen Wert von 180°/s ergäben.

Ein augenfälliges Beispiel für den Vorgang der „Bestätigung" im Unterschied zur Addition bietet der Gesichtssinn: Betrachtet man die Umwelt zunächst mit einem Auge und öffnet dann das andere, so wird das wahrgenommene Bild nicht heller, obwohl der visuelle Kortex den doppelten Signaleinstrom empfängt; würde statt dessen der Lichtwelleneinstrom in *eines* der Augen schlagartig verdoppelt, so würde man das als Helligkeitssprung wahrnehmen (was man beispielweise durch Manipulation am Fernsehapparat reproduzieren kann). Der funktionelle Sinn des

Datenverarbeitungsmodus der „Bestätigung" liegt naturgemäß darin, daß die Sinnesorgane der Raumorientierung auf diese Weise problemlos zusammenarbeiten, wenn sie *parallel zueinander* tätig sind, sich aber auch gegenseitig ohne Bruch in ihrer Funktion *ablösen* und *vertreten* können, beispielsweise beim Übergang aus dem Hellen (Labyrinth und Auge tätig) in lichtlose Dunkelheit (nur Labyrinth tätig). Bezeichnet man die Wahrnehmung mit W, den wahrgenommenen Positionswinkel mit α und die verschiedenen Sinnesmodalitäten mit den Ziffern 1 und 2, so lautet die mathematisch-logische Formel für das Prinzip der „Bestätigung":

$$W_1(\alpha) = W_2(\alpha) = W_1(\alpha) + W_2(\alpha) \qquad (1)$$

Winkelsubtraktion

Ganz anders aber werden die Winkelmeldungen des *Kopfgelenkbereichs* verrechnet: Sie *bestätigen* nicht die Meldungen des Labyrinths, der Augen und der Ohren, sondern sie werden von diesen vor der Bildung des Raumlage-Endergebnisses *subtrahiert*. Warum das funktionell unumgänglich ist, ergibt sich aus folgender Überlegung:

Die Gleichgewichtskorrekturreaktionen der Beine, Arme und des Achsenskeletts bestimmen die Raumlage nicht des Kopfes, sondern des Rumpfes. Die Raumlagesinnesorgane (Statolithen, Bogengänge, Augen) befinden sich dagegen im Kopf, registrieren also primär *dessen* Position und Bewegungszustand. Das Auswertungsendergebnis, das die Gleichgewichtsreaktionen steuert - und auch ins Bewußtsein eintritt! -, bezieht sich jedoch nicht auf die Position des Kopfes, sondern auf die des Rumpfes. Um *diesen* Funktionswert zu gewinnen, gibt es gar keinen anderen Weg, als die Labyrinth- und Augenmeldungen durch die jeweils bestehenden Kopf-Rumpf-Beziehungen zu korrigieren, d.h. alle existierenden Winkelwerte zwischen Kopf und Körperachse von den *primär* wahrgenommenen *kopfbezogenen* Werten zu *subtrahieren;* denn erst das ergibt in allen 3 Dimensionen die Position des *Rumpfes*.

Hierbei handelt es sich um einen Spezialfall für die in der Raumorientierung gültige triviale allgemeine biokybernetische Beziehung zwischen Sinnesorgan und Sinnesorganträger: Die Körperposition ergibt sich aus den Positionsmeldungen der Sinnesorgane *abzüglich* etwaiger Meldungen über die Position des Sinnesorganträgers relativ zum Körper; durch den Sinnesorganträger registrierte bzw. durch ihn hervorgebrachte Winkeländerungen zwischen Körper und Sinnesorgan werden daher in die Sinnesorganmeldungen quantitativ eingerechnet, indem sie von ihnen *subtrahiert* werden. Auf den Kopfgelenkbereich des Menschen bezogen heißt das beispielsweise: Wenn bei ruhigem Stehen durch aktives oder passives Nicken, Drehen oder Zur-Seite-Neigen des Kopfes *keine* Raumlagestabilisierungsreflexe, wie etwa bei einem unfreiwilligen Sturz, ausgelöst und auch keine Positionsänderungen des eigenen Körpers subjektiv empfunden werden, so liegt das an der *mathematischen Subtraktion* der entstehenden Sinnesmeldungen über die Kopfstellung aus dem Kopfgelenkbereich von den übrigen, einander bestätigenden Meldungen (zu vermuten, hier seien eher kognitive Einsichten verantwortlich, würde nicht mit der Unfähigkeit zusammenpassen, etwaige pathologische Fehlmeldungen der Raumlagesinne durch verstandesmäßige Einsicht zu korrigieren).

Auf kürzeste Form zusammengedrängt, lautet die Aussage dieses Absatzes, wenn man den Buchstaben W für „Wahrnehmung der Raumlage" verwendet:

$$W(\text{Rumpf}) = W(\text{Kopf}) - W(\text{Winkel Kopf/Rumpf}) \qquad (2)$$

Darin steckt für den *Kopfgelenkbereich* folgende Konsequenz: Er ist nicht nur ein Organ motorischer Beweglichkeit, sondern *auch ein Sinnesorgan*. Über alle Winkelbeziehungen zwischen Halswirbeln müssen Winkelmeldungen an die beschriebene Raumlageinstanz gelangen, wo sie mit denen der Labyrinthe und Augen zusammenwirken. Sie müssen ihnen in der Präzision etwa gleichkommen; denn die Genauigkeit des Gesamtsystems kann die Genauigkeit des am wenigsten präzise arbeitenden Teilsystems nicht überschreiten.

Ruhefrequenz

Im Hintergrund der eben durchgeführten Erörterung steht natürlich das Anliegen, pathologische Raumlageempfindungen, wie etwa den *Drehschwindel*, funktionell besser zu verstehen. Hierzu ist aber zusätzlich noch etwas weiteres zu bedenken: Der Skalenwert *0*, also die Meldung „kein Reiz", wird bei der Übertragung vom Sinnesorgan zum Zentralnervensystem in der Regel nicht durch die physiologische Nervenimpulsfrequenz *0*, also „keine Impulse", ausgedrückt, sondern durch eine *Ruhefrequenz* von beispielsweise 10 oder 40 Impulsen/s. Dies bietet zwei funktionelle Vorteile:

1. Ein *sehr schwacher* Reiz würde ohne Mitwirkung einer Ruhefrequenz durch eine Frequenzerhöhung von 0 auf beispielsweise 1 Impuls/s wiedergegeben werden, wäre also am Empfänger, da dort nur jede Sekunde ein Impuls einträfe, erst nach frühestens 2 s quantitativ erfaßbar; bei Verwendung der Ruhefrequenz 10 Impulse/s würde aber derselbe schwache Reiz zur Frequenz 11 Impulse/s führen, und das Ergebnis wäre nach dem Bruchteil einer Sekunde übermittelt; die Information kann daher vom Empfänger in viel kürzerer Zeit quantitativ erfaßt werden.
2. Eine Ruhefrequenz macht Abweichungen in *zwei Richtungen* (plus oder minus) übertragbar (durch Frequenzänderungen von 10 zu 11 *oder* zu 9 Impulsen/s), was sonst unmöglich wäre.

Nach alledem sind im Rahmen der Raumlagedatenverarbeitung die beiden Prozesse „Bestätigung" und „Subtraktion" zwangsläufig als so beschaffen zu betrachten, daß der *Signal*wert *0* durch bestimmte *Ruhefrequenzen* wiedergegeben wird. Wie diese dann *im einzelnen* verrechnet werden, braucht hier nicht erörtert zu werden.

So sinnreich das Prinzip der *Ruhefrequenz* für die periphere Signalübertragung auch ist, so birgt es doch die Gefahr einer speziellen pathologischen Störung in sich: Falls das Sinnesorgan einmal *ausfällt*, bedeutet die daraufhin im Zentrum eintreffende *Impulsfrequenz* 0 nicht „kein Reiz empfangen", sondern „extreme negative Abweichung von der den Reiz 0 repräsentierenden Ruhefrequenz", und das wiederum bedeutet: *maximaler einseitiger Reiz*. Daraus können, sofern es sich

um Raumlagesinnesmeldungen handelt, theoretisch zwei ganz unterschiedliche Konsequenzen folgen:

Erste denkbare Konsequenz: Das *Ausfallen* des Sinnesorgans führt zur *Wahrnehmung* einer extremen *Abweichung* des Körpers von der Normallage und u. U. zu entsprechenden automatischen Kompensationsreaktionen. Ein solcher Effekt ließ sich besonders deutlich bei Fischen des freien Wassers (Gegensatz: Bodenfische) beobachten, denen experimentell ein Labyrinth entfernt wurde: Entweder nehmen diese Tiere permanent eine Schräglage ein oder sie rotieren sogar zeitweise um ihre Längsachse. Die Erscheinung verschwindet erst im Lauf von einigen Tagen (v. Holst 1948), kann aber als Folge von Aufregung vorübergehend wiederkehren.

Zweite denkbare Konsequenz: Die durch den Ausfall eines Sinnesorgans und dessen Ruhefrequenz bedingte Raumlagefehlmeldung würde in die obengenannte „Bestätigungsinstanz" gelangen. Dort aber würde sie die sonstigen eintreffenden Positionsmeldungen gar nicht bestätigen, sondern mit ihnen in krassen Widerspruch treten. Die möglichen sekundären Folgen einer solchen Diskordanz seien erst ab S. 13 dieses Referats näher betrachtet. Wir kehren zunächst noch einmal zur *ersten* denkbaren Konsequenz des Ausfalls einer Raumlagesinnesmeldung zurück, einer extremen Fehlinformation über die Raumlage:

Aus den vorangegangenen Erörterungen folgt eine für die Anfangsphase biokybernetischer Untersuchungen typische „Wenn-Dann-Aussage": Wenn 1) die Sinnesmeldungen über die jeweilige Kopf-Rumpf-Winkelbeziehung, an deren Existenz wegen ihrer physiologischen *Notwendigkeit* nicht zu zweifeln ist, aus dem *Kopfgelenkbereich* (und nicht aus Muskeln oder der Halshaut) stammen und wenn 2) in ihnen das Kodierungsprinzip der *Ruhefrequenz* verwirklicht ist, dann *müssen* der Ausfall oder die pathologische Veränderung dieser Sinnesmeldungen Fehlinformationen über die jeweilige Raumlage zur Folge haben. Wären diese Fehlinformationen *statisch*, würden sie eine nicht existierende Körper*lage*, wären sie *kinetisch*, würden sie eine *Drehung im Raum* vortäuschen bzw. zum Bewußtsein bringen. Letzteres wäre mit dem Phänomen des *Drehschwindels* identisch, der sich durch diesen Gedankengang - unter den angegebenen Voraussetzungen - als *zwingende* Konsequenz von Ausfällen oder Änderungen von Kopfstellung-Sinnesmeldungen aus dem Kopfgelenkbereich herausstellen würde.

Efferenzkopie

Außer Sinnesmeldungen und Ruhefrequenzen gelangt noch eine weitere Art von Eingangssignalen in die zentralnervöse Raumlage-Registrierungs-Instanz: die *Efferenzkopie* von zentralnervösen Bewegungskommandos. Die Existenz und die Wirksamkeit von Efferenzkopien - nach dem „Reafferenzprinzip" von v. Holst u. Mittelstaedt (1950) - lassen sich am anschaulichsten an einem eigentlich trivialen, aus 2 Teilen bestehenden Versuch demonstrieren:

Versuch a: Man hält ein Auge mit der Hand zu. Bei unbewegtem Kopf lasse man den Blick des freien Auges nach oben, nach unten und nach den Seiten schweifen. Dadurch bewegt man die Augäpfel in ihren Höhlen in verschiedene Richtungen. Niemand wird dabei unerwartete oder bemerkenswerte Beobachtungen machen, etwa die, daß sich - anstatt des Blickes - die *Umwelt* zu bewegen scheint.

Versuch b: Man hält ein Auge mit der Hand zu und bewegt mit der anderen Hand ganz vorsichtig den Augapfel des freien Auges, z. B. drückt man mit dem Zeigefinger ein wenig unterhalb des äußeren Augenwinkels auf das untere Lid oder man faßt das untere Lid mit Daumen und Zeigefinger, indem man eine kleine Falte abhebt, und zieht ganz schwach und ruckweise daran. Jetzt hat man, wenn man es richtig macht, den unerwarteten Eindruck, die *Umwelt bewege sich.* Wir unterliegen also einer Bewegungstäuschung. Diese verschwindet auch nicht, wenn man sich gedanklich klar macht, daß man einer Täuschung unterliegt. Sie entsteht bei Versuch a niemals. Offensichtlich wird in Versuch b die zuständige Datenverarbeitung *nicht* davon unterrichtet, daß die wahrgenommene Bildverschiebung auf einer *Augapfeldrehung* beruht; so wird fälschlich eine *Umweltbewegung* registriert.

Deutung: Die zentralnervöse Auswertungsinstanz für Bildverschiebungen auf der Retina scheint in Versuch b – anders als im Versuch a – nicht über die Konsequenzen der eigenen Fingerbewegungen informiert zu werden, ähnlich wie dies beim eingangs beschriebenen Nick-Leseversuch hinsichtlich der *Arm*bewegungen der Fall war. Dementsprechend zeigen sich erwartungsgemäß gleiche Scheinbewegungen, wenn die Augäpfel nicht von den eigenen Fingern, sondern von einer anderen Person bewegt werden. Daher läßt sich die Erfahrung von Versuch b folgendermaßen verallgemeinern: *Fremdbestimmte* (=passive) Augenbewegungen führen zu der durch den Willen nicht kompensierbaren Wahrnehmung einer relativen Umweltbewegung. Bei der *aktiven* Augapfeldrehung durch Kontraktion der eigenen Augenmuskeln (Versuch a) geschieht folglich etwas, was die Wahrnehmungskonsequenz der retinalen Bildverschiebung abändert: Die retinale Bildverschiebung wird zwar als solche perzipiert, aber nicht als Umweltbewegung wahrgenommen. Mit anderen Worten: Für die Wahrnehmung von Umweltbewegung wird, formal betrachtet, der von den *Augenmuskeln verursachte* Bildverschiebungsbetrag von dem *wahrgenommenen* Bildverschiebungsbetrag *subtrahiert,* bevor der (relative) Umweltbewegungsbetrag zum Bewußtsein kommt. Diesen Zusammenhang kann man mit folgender Formel ausdrücken:

retinale Bildverschiebung $\dot{\beta}$ – aktive Augendrehung $\dot{\alpha}$ = wahrgenommene relative Umweltbewegung $\dot{\gamma}$

bzw.

$$\dot{\beta} - \dot{\alpha} = \dot{\gamma} \tag{3}$$

drückt eine beobachtbare mathematische Beziehung zwischen einer *Reizsituation* $\dot{\beta}$, einer *motorischen Aktion* $\dot{\alpha}$ und einer *Wahrnehmung* $\dot{\gamma}$ aus. Diese mathematische Beziehung ist zugleich die Beschreibung eines realen physiologischen Geschehens, einer Datenverarbeitung. An welcher Stelle des Zentralnervensystems sich diese abspielt und welche physiologischen Einzelprozesse ihr zugrunde liegen, ist noch unbekannt. Doch läßt sich biokybernetisch formulieren, was zur Verwirklichung dieses realen funktionellen Zusammenhangs hinreichend und notwendig ist: 1) ein physiologisches Signal $\dot{\beta}$, das den Winkelwert der retinalen Bildverschiebung repräsentiert; 2) ein physiologisches Signal $\dot{\alpha}$, das den Winkelwert der von den Augenmuskeln hervorgebrachten Augenbewegungen repräsentiert; 3) eine peri-

phere oder zentralnervöse Instanz, die den 2. Winkelwert vom 1. mathematisch subtrahiert; 4) eine Instanz, die den so entstandenen Differenzbetrag $\dot{\gamma}$ als Wahrnehmung zum Bewußtsein bringt.

Die Kernfrage dieses Abschnitts lautet nun: Welchen Ursprung hat das eben unter 2) genannte physiologische Signal $\dot{\alpha}$, das die Winkelwerte der von den Augenmuskeln hervorgebrachten Augenbewegungen repräsentiert? Die jeweilige Augenstellung relativ zum Kopf ist zunächst natürlich durch die jeweiligen *Längen* der verschiedenen *Augenmuskeln* repräsentiert; doch kommen diese nicht als Quelle für die erforderlichen physiologischen Signale in Frage: Bei aktiven und passiven Augapfeldrehungen ändern sich die Augenmuskellängen gleichartig. Hiernach erhebt sich die Frage: Welche Quelle kommt für physiologische Signale $\dot{\alpha}$ in Frage, die allein aktive, nicht aber passive Augenbewegungen widerspiegeln?

Hierfür bietet sich das steuernde *zentralnervöse Kommando* selbst an. Die durch Gl. 3 beschriebene funktionelle Leistung würde dadurch erbracht werden, daß ein dem Augenbewegungs*kommando quantitativ gleichendes Signal* erzeugt und als Winkeländerungswert $\dot{\alpha}$ vom retinalen Bildverschiebungswinkelwert $\dot{\beta}$ subtrahiert würde. Hierzu wäre im Prinzip nichts weiter erforderlich, als daß von der Nervenbahn, die das Augenbewegungskommando überträgt, eine kollaterale Bahn abzweigen würde; sie würde automatisch stets dasselbe Signal führen wie die Kommandobahn. Dieses Signal wäre so etwas wie ein Duplikat bzw. eine *Kopie* des Kommandos. Das gedankliche Konzept für ein derartiges Signal stammt von v. Holst u. Mittelstaedt (1950); sie nannten es sinngemäß *Efferenzkopie*. Die Efferenzkopie wäre im ungestörten Normalfall quantitativ äquivalent zur Augenstellungsmeldung aus den *Muskeln;* diese Äquivalenz zwischen Kommando und Ausführung kann bei Augenbewegungen vorausgesetzt werden, weil hier die Ausführung der Kommandos keinen unvorhersehbaren wechselnden mechanischen Widerständen begegnet, wie dies etwa bei Extremitätenbewegungen der Fall ist.

Bevor diskutiert wird, ob der eben beschriebene funktionelle Zusammenhang tatsächlich verwirklicht ist, sei er durch Abb. 2 graphisch dargestellt: Die rechte senkrechte Bahn geht vom Zentrum aus und überträgt das Kommando für die Augenbewegung; eine *Abzweigung* nach links überträgt die eben definierte *Efferenzkopie* zur Subtraktionsinstanz. Das Sinnesorgan (links unten) nimmt Relativ-

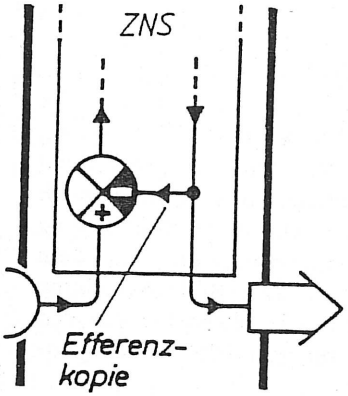


Abb. 2. Reafferenzprinzip (Erklärung s. Text)

bewegungen zwischen Umwelt und Sinnesorgan wahr. Die unkorrigierten Meldungen dieses Sinnesorgans repräsentieren noch die Summe aus solchen Meldungen, die durch die Eigenaktivität - hier Eigendrehung - des Sinnesorgans hervorgerufen wurden (*Re*afferenz genannt), zuzüglich eventueller Meldungen von unabhängigen Umweltgeschehnissen (*Ex*afferenz). Nun erfolgt die Subtraktion: Die Reafferenz spiegelt quantitativ das Augenbewegungskommando und damit auch dessen Kopie, die Efferenzkopie, wider; durch deren Subtraktion wird daher die Reafferenz aus der Sinnesorganmeldung eliminiert. Übrig bleibt die Exafferenz, also die Meldung über *nicht* vom Organismus selbst aktiv hervorgebrachte Änderungen seiner Umweltbeziehungen.

Die Existenz und Wirksamkeit der Efferenzkopie der Augenbewegungskommandos nach Abb.2 läßt sich durch mehrere unabhängige Beobachtungen überzeugend belegen (Hassenstein 1965). An dieser Stelle seien die visuellen Bewegungstäuschungen bei *Augenmuskellähmungen* genannt: Blicksprungkommandos lassen sich auch bei Augenmuskellähmungen nicht unterdrücken, werden aber nicht befolgt; sie erzeugen trotzdem Efferenzkopien. Wegen der nicht erfolgenden Blickbewegungen sendet die Retina keine der Efferenzkopie entsprechende Reafferenz. Daher können Reafferenz und Efferenzkopie einander nicht wie sonst auslöschen. Von der Subtraktionsinstanz aus läuft daher jetzt die *nichtkompensierte negative Efferenzkopie* ins Zentrum, wo sie als Exafferenz gewertet und dementsprechend als (unzutreffende) Wahrnehmung einer Umweltbewegung ins Bewußtsein tritt. Die bekannten, überaus störenden visuellen Bewegungstäuschungen bei Augenmuskellähmungen bringen also die *Efferenzkopien der nicht unterdrückbaren Augenbewegungskommandos* zur Erscheinung. Die Efferenzkopie zeigt hier den zusätzlichen Charakter einer *Bewegungserwartung;* wird diese nicht erfüllt, d.h. durch keine tatsächliche Bildverschiebung bestätigt, so wandelt sie sich zur Ursache einer *visuellen Scheinbewegung.*

Hiermit ist am Beispiel der Augenbewegungen dargelegt worden: Außer Sinnesmeldungen und Ruhefrequenzen gehören auch *Efferenzkopien* zu den Eingangssignalen für diejenige Instanz, die, wie auf S.2f. beschrieben, die jederzeit abrufbaren Informationswerte über die Raumlage von Kopf und Körper in sich repräsentiert. Man muß möglicherweise auch in anderen Sinnessystemen als dem visuellen mit dem Auftreten und Wirksamwerden von Efferenzkopien rechnen.

Schwindel

Raumlagewahrnehmungen können von der unlustbetonten Empfindung des Schwindels begleitet sein. Die Ursachen sind überaus verschieden: widersprüchliche Meldungen verschiedener Raumlagesinnesorgane, wie z.B. nach Schluß eines langdauernden, schnellen Walzertanzes (Widerspruch zwischen Bewegungsmeldungen des Labyrinths und Seheindrücken); Funktionsmängel von Gleichgewichtsorganen; visuelle Wahrnehmung eines steilen Abgrunds. Die Schwindelempfindung ist mit zwei anderen unlustbehafteten Gefühlen vergleichbar, dem Schmerz und der Angst. Auf Schmerz und Angst reagieren Menschen und Tiere durch Entfernen der Schmerzursache oder Flucht vor der Gefahr.

Als allgemeine, vermutlich angeborene Reaktion auf Schwindelgefühle kann das Verbessern der Vorsorge gegen den Gleichgewichtsverlust gelten, beispielsweise durch Sich-Festhalten, breitbeiniges Stehen oder Sichentfernen vom steilen Abgrund. Der Schwindel ist somit als ebenso natürlich und lebenswichtig anzusehen wie Schmerz und Angst und muß, gerade auch wenn kein Anlaß erkennbar ist, als Indikator für eine funktionelle Störung ernst genommen werden.

Nystagmus

Im Zusammenhang mit dem Kopfgelenkbereich spielt der *Nystagmus* als Indikator für Fehlfunktionen der Raumlageorientierung eine Rolle. Störungen im Kopfgelenkbereich können einen Nystagmus auslösen. Wenn *Gleichgewichtsstörungen* und *Drehschwindel* zugleich auftreten; hat nach Hülse (1983) der Nystagmus als objektives Indiz für die Gleichgewichtsstörungen zu gelten; denn Gleichgewichtsstörungen sind als solche schwer meßbar, und Schwindel ist primär nur ein subjektives Phänomen, das möglichst der Objektivierung bedarf.

Biologischer Sinn und Richtung des Nystagmus

In biologischer Sicht ist der Nystagmus ein Bewegungsprogramm der Augäpfel zum Ermöglichen des ungestörten Formen- und Gestaltsehens trotz Relativbewegungen zwischen Kopf und Umwelt. Aufgabe ist daher das Herbeiführen zumindest kurzdauernder stabiler Raumbeziehungen zwischen Auge und Umwelt, weil dies für das Gestaltsehen erforderlich ist. Die Phasen der *stabilen* Beziehung sind die *langsamen* Phasen des Nystagmus. Dabei *folgen* die Augen der gesehenen Umweltbewegung.

Daher sind die *langsamen* Phasen auch das *funktionell wichtigere* am Nystagmus. Die *schnellen* Sakkaden sind nicht zum Sehen da, sondern dazu, die Augäpfel - falls erforderlich - durch *Überholen* der relativen Kopfdrehbewegung in eine Position zur gesehenen Umwelt zu bringen, die dann während der langsamen Phase möglichst lange beibehalten werden kann.

Wenn man bei einem Nystagmus von dessen *Richtung* spricht, so hält man sich nicht an die langsamen Phasen, obwohl diese funktionell das wichtigere sind, sondern an die schnellen Phasen, weil sie auffälliger sind. Nur aus dieser nomenklatorischen Festlegung ergibt sich der Satz: Die Kopfdrehung geht einher mit einem Nystagmus „in derselben Drehrichtung". Die bisweilen geäußerte Hypothese, die schnelle, der relativen Kopfdrehung vorauseilende Nystagmusphase habe den funktionellen Sinn, neu am voreilenden Blickfeldrand Auftauchendes schnellstmöglich ins Auge zu fassen, hat im Vergleich zur vorher genannten Auffassung kein Gewicht.

Nystagmus ohne Sichtkontakt mit der Umwelt

Der pathologische Nystagmus wird

- bei geschlossenen Augen,
- in der Dunkelheit oder
- mit der Frenzel-Brille

registriert. Daher ist nun der Nystagmus ohne Sichtkontakt zu besprechen, wie er im *physiologischen Normalgeschehen* vorkommt.

Ein leicht durchführbarer, eigentlich trivialer und doch lehrreicher Versuch ist der folgende: Man legt die Endglieder der Finger auf die geschlossenen Augenlider, so daß man die Augenbewegungen fühlen kann, und dreht sich dann willkürlich um die eigene Achse. Dies kann geschehen:

- im Stehen durch Umsetzen der Füße,
- mit feststehenden Füßen durch Sichdrehen in der Hüfte,
- durch Drehen allein des Kopfes auf dem Hals,
- sitzend auf einem Drehstuhl durch Abstoßen mit den Füßen.

In allen Fällen fühlt man einen Nystagmus in Richtung der willkürlichen Körperdrehung mit dem funktionellen Sinn der Gegendrehung der Augäpfel in den Augenhöhlen, um sie so genau wie möglich in einer räumlich konstanten Position zu halten. Daher sind die langsamen Nystagmusphasen Ausdruck der im Zentralnervensystem repräsentierten Informationswerte über den Bewegungszustand des eigenen Kopfes, und zwar mit umgekehrtem Vorzeichen und der gleichen Winkelgeschwindigkeit.

Aus dem beschriebenen Anschauungsversuch läßt sich herleiten: Das Konzept der *Reflexe* ist ungeeignet zur theoretischen Einsicht in diese funktionellen Zusammenhänge, denn man müßte sonst lauter verschiedene Reflexe formulieren:

Fuß-Nystagmusreflex,
Rumpf-Nystagmusreflex,
Hals-Nystagmusreflex usw.

In Wirklichkeit sammelt und verrechnet *eine* Zentralinstanz alle für die Kopfbewegung gegen die Umwelt relevanten Daten und bildet *einen* Funktionswert dafür. Dies ist in Abb. 3 schematisch dargestellt.

HWS-bedingter spontaner Nystagmus

Im Lichte der vorangegangenen Erörterungen hat ein Nystagmus bei einem *unbewegten* HWS-Patienten folgende Bedeutung:

Seine innere zentralnervöse Positionsinstanz repräsentiert mit ihrem Informationswert fälschlich eine dauernd wahrgenommene Drehung des Kopfes gegen die Umgebung: Dies bringt das dauernd Signal an die Augäpfel hervor, diese Scheindrehung durch Gegenbewegungen zu kompensieren, um dadurch vermeintlich das Formensehen zu unterstützen. Die langsamen Phasen des Nystagmus repräsentieren - mit umgekehrtem Vorzeichen - den im Zentralnervensystem repräsentierten

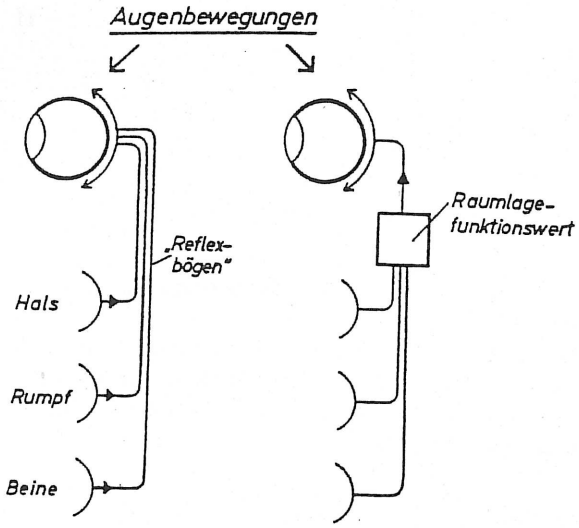


Abb. 3. Konzept der Reflexe bzw. zentralen Datenverarbeitung zur Erklärung der funktionellen Zusammenhänge beim Nystagmus ohne Sichtkontakt

Informationswert über die jeweilige Drehbewegungssituation. Damit zeigen die *schnellen* Phasen des Nystagmus die Richtung an, in der sich der Patient infolge seiner zervikalen Fehlmeldungen *gedreht fühlt*. Ein solches Drehgefühl, das nicht den Tatsachen entspricht, also mit den übrigen Positionssinnesmeldungen im Widerspruch steht, empfindet man als *Drehschwindel*.

Zervikalnystagmus bei beidseitigem Labyrinthausfall

Besonders lehrreich, wenn auch nicht primär für den Kopfgelenkbereich, ist der Zervikalnystagmus (*ohne* Störung im Kopfgelenkbereich) als Indiz für *beidseitigen Labyrinthausfall*. Diese aus dem Rahmen fallende Reaktion lehrt nämlich, mit welcher Art von womöglich *langsamen Adaptationsvorgängen* man innerhalb des Systems der Raumlagereaktionen rechnen muß.

Wird bei der Drehung mit einem Drehstuhl der Kopf (mit geschlossenen Lidern) *festgehalten*, so löst die dabei erfolgende *Hals*drehung beim Gesunden keinen Nystagmus aus; doch ist dies der Fall, wenn *beide* Labyrinthe fehlen. Daß ausgerechnet der Ausfall beider Labyrinthe den vom Kopfgelenkbereich ausgelösten Nystagmus zur Folge hat, ist darum so überraschend, weil beim Experiment der Kopf im Raum *fixiert bleibt*, die Labyrinthe also, auch wenn sie intakt vorhanden wären, die Meldung *Null* absenden würden.

In diesem Befund drückt sich daher eine Umschaltung, vielleicht „Umeichung" aus: Bei *intakten* Labyrinthen führt jede aktive Kopf- oder Körperdrehung nur dann zu einem „spontanen" Nystagmus, wenn auch das *Labyrinth* die Drehung wahrnimmt und *bestätigt*. Fallen beide Labyrinthe aus, wird dagegen von nun an die Drehung des Kopfes *relativ zum Körper* auch ohne die Bestätigung durch das Labyrinth als Zeichen für die Drehung des Kopfes *relativ zur Umwelt* gewertet und zur Erzeugung des Nystagmus zugelassen. Es wird gleichsam vorausgesetzt: Falls

keine anderslautenden Meldungen vorliegen, sei der Körperstamm gegenüber der Umgebung nicht in Drehung, sondern in Ruhe. Ob es sich bei der hier zum Ausdruck kommenden Änderung der Reaktionsnorm um eine *sofortige* Umschaltung oder um eine eher langsame Umeichung handelt, muß dahingestellt bleiben. Ähnliche Umstellungen muß man vielleicht auch bei Störungen der Sinnesfunktion der Halswirbelgelenke als denkbar ins Auge fassen.

Konsequenzen interner Widersprüche im Zentralnervensystem

Es ist eine eigentümliche, meines Wissens noch unerklärte Eigenschaft des Zentralnervensystems, daß interne *Informationskonflikte* generalisierte Effekte haben können. Im folgenden, anscheinend „weit hergeholten" Beispiel ist dies eindrucksvoll zu erkennen: Der Innsbrucker Experimentalpsychologe Ivo Kohler hatte bestimmte Versuchspersonen (Vpn) tagelang Brillen tragen lassen, die das *Gesichtsfeld verformten,* so beispielsweise alle geraden senkrechten Linien nach einer Seite durchgebogen erscheinen ließen (Kohler 1951). Dies wurde mit der Zeit durch die zentralnervöse visuelle Raumauswertung der Vpn *korrigiert;* danach sahen für sie senkrechte Geraden trotz der künstlichen Verzerrung wieder gerade aus. Nach Abnahme der Brille aber schienen dann senkrechte Geraden zunächst nach der *anderen* Seite gekrümmt zu sein. Kohler legte einer Vp dieses Stadiums auf einer Tischplatte eine metallene Kette vor und gab dieser eine solche Gegenkrümmung, daß die Vp die nun in Wirklichkeit im Bogen liegende Kette als *gerade* wahrnahm. Nun folgte das für unseren Problemkreis bedeutsame Experiment: Der Experimentator zog vor den Augen der Vp die Kette in die Länge, so daß sie in Wirklichkeit gerade wurde; für die Vp aber *krümmte* sich dadurch die Kette, obwohl sie aber zugleich auseinandergezogen wurde! Diese in sich widerspruchsvolle Wahrnehmung hatte für die Vp prompt eine ausgefallene Konsequenz: Ihr wurde übel. Auch wenn man sich vor dicken Aquariumscheiben bewegt, entspricht mitunter die Wahrnehmung (hier: Bewegungswahrnehmung) nicht der Erwartung, was gelegentlich ebenfalls Übelkeit hervorruft. Das gleiche gilt für einen Kurzsichtigen, der erstmals eine Brille trägt, an die er sich noch nicht gewöhnt hat; auch hier bestätigen die Bewegungserwartungen und die wahrgenommenen Bewegungen einander nicht, sondern treten miteinander in Konflikt.

Die eben beschriebenen Beispiele lehren: Treten zentralnervöse Informationswerte, die im Normalfall einander bestätigen, zueinander in Widerspruch, so kann das ein vegetatives Symptom, Übelkeit, hervorrufen. Diesem Schema entsprechen auch die Seekrankheit bzw. allgemein die „Bewegungskrankheiten": Pathogen sind nicht die Quantität und die Dauer der Reizung (die in einer Gymnastikstunde natürlich viel größer sein können), sondern die *Inkongruenzen im Informationsgehalt zwischen verschiedenen Sinnesmeldungen über denselben Sachverhalt.* Darauf ist die Datenverarbeitung offensichtlich nicht eingerichtet. Sofern die Nausea als Modellfall für pathologische Wirkungen von Widersprüchen zwischen zentralnervösen Informationswerten gelten darf, ist es sinnvoll, sich auch das weite Spektrum von deren Symptomen vor Augen zu führen: Erbrechen, Kreislaufkollaps, Apathie, begrenzte bis fehlende willentliche Beeinflußbarkeit des eigenen psychi-

schen Zustandes, stunden- bis tagelange Nachwirkungen in Form von Bewegungshalluzinationen.

So ungewohnt die Kausalbeziehung zwischen einem *isolierten* zentralnervösen Phänomen und *generalisierten Allgemein*symptomen auch auf den ersten Blick erscheinen mag - wir müssen beim Zentralnervensystem mit mehreren ähnlichen Funktionszusammenhängen rechnen. Einige davon wurden durch Experimente der elektrischen Hirnreizung an der Katze (Hess 1956) bzw. am Haushuhn (v. Holst 1960) aufgedeckt. Durch die Reizung an jeweils *eng begrenzten* Positionen des Gehirns können folgende *in den ganzen Körper ausstrahlende* Wirkungen eintreten:

- *allgemeine Atonie* (Katze): Auf die betreffende isolierte Reizung hin sinkt das Tier auf der Stelle in sich zusammen, die Beine liegen quer übereinander, der Schwanz wird nicht um den Körper gerollt;
- *Müdewerden, Schlaf* (Katze): Nach Beginn der elektrischen Reizung Aufsuchen eines geeigneten Schlafplatzes, sich Niederlegen in die bekannte Schlafhaltung mit um den Körper gelegtem Schwanz, danach sofortiges Einschlafen;
- *allgemeine Ataxie* (Haushuhn): Während der Reizung torkelt das Huhn, es versucht mit den Flügeln Gleichgewicht zu halten, doch immer wieder stehen die Beine in falscher Richtung;
- *Flexibilitas cerea* (Haushuhn): Auf Reizung „friert" das Tier in der Stellung ein, die es gerade einnimmt, doch sind Körper und Gliedmaßen biegsam wie Wachs, d.h. sie behalten die Position bei, in die man sie in den Gelenken umbiegt.

Diese Befunde tragen zwar nichts Spezielles zum Problem der Bedeutung des Kopfgelenkbereichs bei, veranschaulichen aber die Beeinflußbarkeit des allgemeinen Funktionszustands des Zentralnervensystems durch *eng begrenzte* Erregungsvorgänge; dabei handelt es sich jeweils um unterschiedliche Weisen der *Einschränkung der normalen Funktionsfähigkeit*. Die genannten Gehirnreizexperimente können als neurophysiologische *Modelle* für ähnliche Zusammenhänge aus der Verhaltensbiologie und der menschlichen Neurophysiologie gelten:

- *Angst* blockiert, je stärker sie aktiviert ist, um so mehr alles Verhalten des *Spielbereichs:* Erkunden, Neugierde, Spielen, spielerisches Nachahmen;
- *Aufregung und Angst* können vorübergehend die Wahrnehmung von Schmerz, von anderen Reizen sowie auch das Denken blockieren;
- *chronische starke Schmerzen*, Schwindel, Übelkeit etc. können das Motivationsgefüge eines Menschen so weitgehend beeinträchtigen, daß man von „Persönlichkeitsveränderungen" sprechen muß.

Die Frage nach dem histologischen Substrat für die beschriebenen Zustandsveränderungen des Zentralnervensystems und auch für die „Ausstrahlung" bzw. Irradiation pathologischer Signale von Instanzen der Raumlageorientierung in andere Instanzen hinein scheint heute noch nicht zu beantworten zu sein. Dieser Mangel darf jedoch nicht als Grund dafür herhalten, den beschriebenen Erscheinungen etwa die Realität abzusprechen oder sie ins Reich des „rein Psychogenen" oder der Simulation zu verbannen.

Physiologische Grundlage der Winkelinformationen aus dem Kopfgelenkbereich

In der nun folgenden Diskussion soll es als unbezweifelbar und bewiesen gelten, daß die Winkelbeziehungen zwischen Kopf und Rumpf propriozeptiv gemessen und in die Raumlagewahrnehmung und -steuerung einbezogen werden. Dabei setzt sich der Gesamtwinkel in 2facher Hinsicht aus Teilwinkeln zusammen:

- Die Winkel in allen Gelenken der Halswirbelsäule addieren sich,
- die Winkel, die beim Nicken, Drehen und Seitwärtsneigen des Kopfes entstehen, addieren sich *vektoriell.*

Den Löwenanteil liefern die Gelenkbeziehungen Kopf/Atlas und Atlas/Axis. Bei der Feinheit der Abstimmung werden aber auch die übrigen Gelenkbeziehungen präzise einbezogen.

Die Rezeptoren für die zu messenden Winkel könnten in den *Muskeln* oder im *Gelenkapparat* liegen. Die folgenden Überlegungen hierzu sind wegen der Spärlichkeit und Widersprüchlichkeit der verfügbaren Informationen von ganz vorläufigem Charakter.

Falls die *Muskeln* als Substrat für die Messung von Winkelbeziehungen zwischen Skelettelementen dienen sollen, so ist nicht ihre Spannung, sondern ihre jeweilige *Länge* von Bedeutung. Als Sinnesorgane für die jeweilige Länge von Muskeln gelten die *Muskelspindeln.* In ihnen sind jedoch die sensorischen Anteile, die Längenrezeptoren, mit motorischen, den intrafusalen Muskelfasern, in Reihe geschaltet. Die Muskelspindelafferenz meldet also gar nicht die Muskellänge, sondern - aufgrund der γ-Innervierung der intrafusalen Muskeln - die Differenz zwischen der tatsächlichen und der durch die Willkürinnervierung angestrebten Länge. Hierdurch offenbaren sich die Muskelspindeln auch als etwas anderes als Sinnesorgane, nämlich als *Regler.* Zwar ließe sich die Muskellängenangabe theoretisch aus den afferenten Spindelmeldungen wieder herausrechnen, dies aber nur unter Einrechnung der γ-Efferenz sowie des Muskeltonus, der sich seinerseits wieder aus der α-Efferenz *und* dem mechanischen Widerstand gegen die Muskelverkürzung ergibt. Beim heutigen Stand der Kenntnisse ist zu bezweifeln, ob man dem Zentralnervensystem diese Datenverarbeitung zutrauen kann, ja ob sie überhaupt mit hinreichender Genauigkeit *möglich* wäre. Der Vorstellung, daß die Winkelangabe der Halswirbelsäule durch *Muskelspindeln* geliefert wird, stellen sich also gewichtige Schwierigkeiten entgegen.

Damit erstarkt die Vermutung, die Winkelrezeptoren säßen im *Gelenkbereich.* Ein Schlüsselexperiment hierfür bestände aus 2 Teilen: Registrierung von Raumlagereflexen auf Kopfdrehungen eines Versuchstieres a) nach Denervierung von Haut und Muskeln des Halses bei intakter Gelenkinnervierung, b) nach Denervierung der Gelenke bei intakten Muskeln und intakter Haut. Dieses Experiment wurde in der Tat an dezerebrierten Katzen durchgeführt (McCouch et al. 1950) und hatte das mit obiger Vermutung konforme Ergebnis: *erhaltene* Raumlagereaktionen bei a), *fehlende* bei b). Allerdings scheinen bis heute weder die verantwortlichen Rezeptoren noch die entsprechenden afferenten Nervenbahnen identifiziert worden zu sein.

Zur Methodik der vorstehenden Ausführungen, Zusammenfassung und Schlußbemerkung

Mitunter können funktionelle Zusammenhänge aus Beobachtungen und Experimenten richtig hergeleitet werden, lange bevor die zugrundeliegenden Elementarprozesse der Forschung zugänglich sind. So waren die Gesetze des Vererbungsgeschehens seit Jahrzehnten bekannt und mathematisch formuliert, ehe man die materiellen Träger der Erbanlagen zytologisch lokalisierte und später biochemisch identifizierte. In der vorstehenden Erörterung wurde ein ähnlicher Versuch für die Funktion des Kopfgelenkbereichs des Menschen skizziert. Als Ergebnis schälte sich heraus:

1) Im Kopfgelenkbereich befinden sich Sinnesrezeptoren für die Position des Kopfes relativ zum Rumpf.
2) Während die Raumlagemeldungen von Statolithen, Bogengängen und Augen nach dem logischen Prinzip der *gegenseitigen Bestätigung* (und damit Vertretbarkeit) zusammenwirken, werden die Sinnesmeldungen über die Kopf-Rumpf-Winkelbeziehungen von den Raumlagemeßwerten der Kopfsinnesorgane mathematisch *subtrahiert* und liefern daraufhin die Information über die räumliche Position des *Rumpfes*.
3) Etwaiger Ausfall oder pathologische Modifizierung der raumlagerelevanten Sinnesmeldungen aus dem Kopfgelenkbereich können - u.a. durch Wegfall der *Ruhefrequenzen* - zu Fehlinformationen über die Raumlage (beispielsweise in Form des Drehschwindels) führen, ferner zur Inkongruenz solcher Raumlageinformationen, die im Normalfall einander bestätigen.
4) Beim *Nystagmus* sind die *langsamen* Phasen Gegenbewegungen zum Zwecke der Kompensation von Relativbewegungen des Kopfes gegen die Umwelt; die *schnellen* Phasen sind sprunghafte Überholbewegungen der Kopfeigenbewegung, um danach vorübergehend, aber möglichst lange, eine neue raumkonstante Position einzunehmen. Deswegen spiegelt ein ohne Sichtkontakt mit der Umwelt vor sich gehender Spontannystagmus durch seine *langsamen* Phasen einen pathologisch entstandenen falschen Informationswert über eine (nicht vorhandene) Drehung des Kopfes bzw. des ganzen Körpers im Raum wider, was sich subjektiv als Drehschwindel äußert.
5) Inkongruenz, d.h. Informationswidersprüche, zwischen Raumlagemeldungen, die einander im Normalfall bestätigen, können pathogene Folgen auf den funktionellen Allgemeinzustand des Zentralnervensystems haben, die von Übelkeit und Kopfschmerz bis zu Änderungen der Persönlichkeit reichen.
6) Fügt man die eben formulierten Aussagen 3) und 4) zusammen, so folgt aus ihnen: Schäden in den Rezeptoren des Kopfgelenkbereichs können *pathologische Zustandsänderungen des Zentralnervensystems* verursachen.
7) Die Muskeln besitzen in ihren Muskelspindeln keine eigentlichen *Längen*meßorgane und dürften daher kaum die fraglichen Winkelstellungsrezeptoren beherbergen; diese müßten daher wohl im Gelenkapparat lokalisiert sein, sind aber dort bisher nicht auffindbar.

Die in diesem Referat vorgetragenen Überlegungen könnten in Versicherungsfällen bedeutsam werden, in denen röntgenologisch keine morphologischen Unfallsfolgen an der Halswirbelsäule erkennbar sind. Etwaige Symptome wie Schwindel, Gleichgewichtsstörungen, Benommenheit, Übelkeit etc. können in diesem Fall leicht zuungunsten von Antragstellern pauschal als psychogen oder gar als simuliert eingeordnet werden. Eine wissenschaftliche Theorie rein funktioneller Symptome von röntgenologisch nicht feststellbaren Schäden kann womöglich die Kriterien verbessern, nach denen man auch hier echte von unechten Unfallfolgen unterscheiden kann.

Literatur

Dvořak J, Dvořak V, Schneider W (Hrsg) (1984) Manuelle Medizin. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokyo

Hassenstein B ([5]1977, [1]1965) Biologische Kybernetik. Quelle & Meyer, Heidelberg

Hess WR (1956) Hypothalamus und Thalamus. Experimental-Dokumente. Thieme, Stuttgart

Holst E von (1948) Quantitative Untersuchungen über Umstimmungsvorgänge im Zentralnervensystem. Z Vergl Physiol 31: 134-148 (Neudruck in: „Zur Verhaltensphysiologie bei Tieren und Menschen" Band 2. Piper, München)

Holst E von, Mittelstaedt H (1950) Das Reafferenzprinzip. Naturwiss 37: 464 (Neudruck in: „Zur Verhaltensphysiologie bei Tieren und Menschen" Band 1. Piper, München)

Holst E von, St. Paul U von (1960) Vom Wirkungsgefüge der Triebe. Naturwiss 47: 409-422, (Neudruck in: „Zur Verhaltensphysiologie bei Tieren und Menschen" Band 1. Piper, München) 1970

Hülse M (1983) Die zervikalen Gleichgewichtsstörungen. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokyo

Kohler I (1951) Über Aufbau und Wandlungen der Wahrnehmungswelt. Sitzungsberichte der Österr. Akad. der Wissenschaften. Phil.-histor. Klasse 227: 1-118, und persönliche Mitteilung

McCouch GP, Deering JD, Ling TH (1950) Location of receptors for tonic neck reflexes. J Neurophysiol 14: 191-196

Wolff HD (1982) Die Sonderstellung des Kopfgelenkbereichs - Schwindel und hohes Zervikalsyndrom. Z Allg Med 58: 503-515

Zimmermann M ([20]1980) Kybernetische Aspekte des Nervensystems und der Sinnesorgane. In: Schmidt RF, Thews G (Hrsg) Physiologie des Menschen. Springer, Berlin Heidelberg New York

Inhaltsverzeichnis

Der Kopfgelenkbereich im Funktionsgefüge der Raumorientierung: systemtheoretische bzw. biokybernetische Gesichtspunkte
B. HASSENSTEIN 1

Funktionelle Anatomie der oberen Halswirbelsäule unter besonderer Berücksichtigung des Bandapparates
J. DVOŘÁK 19

Phylogenetische Anmerkungen zur Sonderstellung des Kopfgelenkbereichs
H.-D. WOLFF 47

Nozizeptive Mechanismen im Bewegungsapparat
S. MENSE 71

Zervikal ausgelöste Augenbewegungen
M. DOERR, U. THODEN 83

Zervikale Gleichgewichtsstörungen
M. HÜLSE 93

Obere HWS und Globusgefühl
K. SEIFERT 103

Obere HWS und Ophthalmologie
J. J. SCHIMEK 111

Verletzungen der oberen HWS
K.-S. SATERNUS, J. KOEBKE 117

Klinik von posttraumatischen Funktionsstörungen der oberen HWS: Symptomkombination und Symptomdauer, Frage der Latenz
G. GUTMANN 129

Aus: Hanns-Dieter Wolff (Hrsg.)

Die Sonderstellung des Kopfgelenkbereichs

Grundlagen, Klinik, Begutachtung

Mit Beiträgen von
A. Arlen A. Boesen M. Doerr J. Dvořák K. Foerster
M. Fraunhoffer G. Gutmann B. Hassenstein M. Hülse
J. Koebke P. Krause K. Lewit S. Mense G. Rompe
K.-S. Saternus J. J. Schimek K. Seifert U. Thoden
H.-D. Wolff

Mit 82 Abbildungen und 11 Tabellen

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo 1988