

Balance ist mehr als ein Kinderspiel

Der Gleichgewichtssinn orientiert den Menschen nur über seine Lage im Raum, dachte man bisher. Doch er ist voller Geheimnisse und hat sogar Einfluss auf die kognitiven Fähigkeiten. **Von Fred Mast und Andrew Ellis**

Das Gleichgewichtsorgan ist das an wenigsten verstandene Sinnesorgan unseres Körpers. Tief im Innenohr verborgen, ist seine Leistung nur schwer zu ermessen. Es sind nicht nur Reflexe, die unseren Körper im Gleichgewicht halten. In Wahrheit stecken komplexe Leistungen der Sinnesorgane und vor allem unseres Gehirns dahinter. Neuere Forschungen zeigen zudem, dass das Gleichgewicht auch mit geistigen Fähigkeiten eines Menschen zusammenhängt. Patienten mit gewissen kognitiven Einschränkungen zeigen oft auch einen schlechten Gleichgewichtssinn. Umgekehrt kann eine gestörte Wahrnehmung des Raums und des eigenen Körpers auch zu kognitiven Defiziten führen.

Das Gleichgewichtsorgan – auch vestibuläres System genannt – wird in die Bogengänge und die Makulaorgane unterteilt. Die drei schlauchartigen und senkrecht zueinander stehenden Bogengänge registrieren Drehbeschleunigungen des Kopfes in jede Richtung: nicken, rollen (zur Seite neigen) und drehen sowie Kombinationen dieser Rotationen. Die Bogengänge sind mit einer Flüssigkeit gefüllt, deren Trägheit bei Kopfdrehungen detektiert wird (siehe Grafik).

Die Makulaorgane (Utriculus und Sacculus) reagieren auf Linearbeschleunigungen in einer der drei Raumrichtungen. Dazu zählt auch die nach unten gerichtete Erdbeschleunigung, also die Schwerkraft. Die Makulaorgane sind mit Haarzellen und kleinen Calcit-Kristallen (Otokonien) bestückt, die in eine gallertartige Substanz eingelagert sind. Wird der Kopf beschleunigt, so führt dies zu einer Abscherung der Sinneshaare durch die relative Verschiebung der Otokonien gegenüber den Makulaorganen.

Durch diese raffinierten Rezeptoren in den Bogengängen und den Makulaorganen wird das Gehirn mit wichtigen Sinnesdaten über die Bewegungen und die Orientierung des Kopfes im dreidimensionalen Raum versorgt. Man könnte nun denken, dass der Organismus damit ausreichend über seine Lage und Bewegung im Raum informiert ist und es für das Verständnis von Gleichgewicht keiner weiteren Erklärung bedarf.

Doch das wäre ein Trugschluss. Von den Signalen der Rezeptoren bis zur Wahrnehmung von Raum und Eigenbewegung liegt ein weiter Weg. Denn was die Sinnesorgane messen, ist fast immer mehrdeutig und fehlerbehaftet und erlaubt für sich allein keine Aussage über die Orientierung des eigenen Körpers im Raum und seine Bewegung darin. Notwendig sind vielmehr komplexe Schritte der Informationsverarbeitung im Gehirn, welche die Signale der Sinnesorgane sinnvoll interpretieren.

Verwirrende Signale

Bewegungen können schon deshalb nicht direkt aus den Sinnesinformationen erschlossen werden, weil die Rezeptoren mit einer Messungenauigkeit behaftet sind. Das bedeutet, dass ein und dieselbe Bewegung nicht immer das gleiche Signal an den Rezeptoren auslöst. Die sensorischen Informationen geben den verursachenden Reiz daher mit einer Unsicherheit wieder, der man Rechnung tragen muss. Noch wichtiger ist, dass die Sinnesinformationen prinzipiell mehrdeutig sein können. Aus den gemessenen Signalen kann deshalb nicht eindeutig auf die Reizursache (Bewegung des Kopfes) geschlossen werden.

Diese Mehrdeutigkeit zeigt sich beim Gleichgewichtssystem sehr deutlich. Die Makulaorgane detektieren Linearbeschleunigungen, die das Resultat einer Translation sein können (der Bus, in dem man sitzt, fährt brüsk an) oder durch die Veränderung der Kopposition (Neigung) relativ zur Schwerkraft verursacht sein können (wenn man den Kopf zurückneigt und ein Flugzeug am Himmel beobachtet). Bevor eine bewusste Wahrnehmung entsteht, muss diese Mehrdeutigkeit vom Gehirn aufgelöst werden. Das Gehirn muss dazu aus dem sensorischen Messsignal den jeweiligen Anteil von Trans-

lation und Schwerkraft schätzen und voneinander trennen. Wie gelingt ihm das?

An dieser Stelle kommt das Wissen eines Menschen ins Spiel. Wenn man im Bus sitzt, dann kann man davon ausgehen, dass Translationen durch Anfahren oder Abbremsen viel wahrscheinlicher sind als Neigungen gegenüber der Schwerkraft, und man nimmt die Bewegungen dementsprechend wahr. Experimente, die in totaler Dunkelheit und in Unkenntnis des Bewegungsprofils durchgeführt wurden, haben aber gezeigt, dass sich Personen nicht über Neigung oder Translation im Klaren sind. Bei einigen Flugunfällen wurde dies dem Piloten zum Verhängnis; bei schlechten Sichtverhältnissen wurde eine lineare Beschleunigung fälschlicherweise als Neigung in Rückwärtslage – als Steigflug also – interpretiert und durch einen eigentlich nicht beabsichtigten Sinkflug mit Absturzfolge kompensiert.

Eine Mehrdeutigkeit von sensorischen Signalen kann auch mithilfe der anderen Sinne aufgeklärt werden. Das multisensorische Zusammenwirken verhilft zu einer eindeutigen Wahrnehmung. Beim Betrachten von Vexierbildern zum Beispiel erreichen uns zwei mögliche Interpretation desselben Reizes, und unsere Wahrnehmung wechselt von einer Interpretation zur anderen. Dies kommt beim Gleichgewichtssinn aber nur äusserst selten vor – gerade bei der Wahrnehmung von Bewegung sind eindeutige Interpretationen enorm wichtig.

Um eine eindeutige Wahrnehmung von Bewegung zu erzeugen, braucht das Gehirn physikalisches Wissen über die Gesetze der Bewegung. Erst mit diesem Wissen kann die Sinnesinformation interpretiert werden. Erschwerend kommt dazu, dass dies in Echtzeit geschehen muss, während einer Bewegung also. Wenn wir auf die sensorische Information nur nachträglich reagieren könnten, wäre die zeitliche Verzögerung zu gross. Die Lösung, die unser Gehirn für dieses Problem gefunden hat, besteht aus Vorhersagen von der erwarteten Bewegung und der zu erwartenden Sinnesinformation.

Das Gehirn vergleicht also fortlaufend die erwarteten Signale mit den bei einer Bewegung gemessenen. Dazu benützt es ein internes Modell der eigenen Kopfbewegungen und der daraus resultierenden Sinnesinformationen. Die Wahrnehmung von Bewegung ist also nicht das Produkt passiver Reizverarbeitung. Der Inhalt unserer Wahrnehmung wird vom Gehirn aktiv konstruiert.

Neben der Mehrdeutigkeit gibt es ein weiteres Problem, das vom Gehirn gelöst werden muss: Aus aktiven Eigenbewegungen unseres Körpers oder durch von aussen auf unseren Körper einwirkende Kräfte können identische Sinnesinformationen resultieren. Die Unterscheidung der beiden Phänomene scheint auf den ersten Blick trivial zu sein, denn Eigenbewegungen haben wir ja selbst eingeleitet und bei Fremdbewegungen sind wir passiv.

So einfach ist die Sache aber nicht, denn auf eine Fremdbewegung, die uns aus dem Gleichgewicht bringen kann, müssen wir sehr schnell reagieren. Letztere entsteht dann, wenn wir im Tram stehen und der Wagen brüsk anhalten muss. Wir machen einen schnellen Schritt zur Seite und kontrollieren somit das Gleichgewicht. Wir kompensieren diese Fremdbewegung durch eine geeignete motorische Gegenmassnahme.

Als motorisch aktive Wesen sind Menschen natürlich oft Urheber ihrer eigenen Körperbewegungen. Selbst initiierte Eigenbewegungen wie zum Beispiel ein plötzliches Losrennen lösen nicht, wie die Situation im Tram, kompensiert werden, obschon der vestibuläre Reiz identisch sein kann. Wie

Um eine eindeutige Wahrnehmung von Bewegung zu erzeugen, braucht das Gehirn Wissen über die Gesetze der Bewegung.

Die Autoren



Fred Mast ist Professor für Psychologie an der Universität Bern und leitet die Abteilung Kognitive Wahrnehmung und Methodenlehre.



Andrew Ellis ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Psychologie der Universität Bern und beschäftigt sich mit Mechanismen der mentalen Simulation.

kann es sein, dass, je nach Situation, der Reflex, der uns das Gleichgewicht ermöglicht, sofort ausgeführt wird oder eben nicht?

Ein bahnbrechender Lösungsvorschlag zur Unterscheidung von Eigen- und Fremdbewegung wurde bereits 1950 von Erich von Holst und Horst Mittelstaedt formuliert. Ihr sogenanntes Reafferenzprinzip kann man sich anhand eines anderen Sinns sehr einfach klarmachen: des Sehens. Bei jeder Veränderung der Blickrichtung verändert sich die Stelle auf der Netzhaut, an der ein bestimmtes Objekt aus unserer Umgebung abgebildet wird. Genau so wie sich Objekte auf einem Kameradisplay von rechts nach links verschieben, wenn wir die Kamera nach rechts schwenken.

Die Veränderung der sensorischen Information auf der Netzhaut schreiben wir aber nicht einer Verschiebung der Objekte in der Aussenwelt zu. Wir erleben den Raum um uns als stabiles und ruhendes Bezugssystem und nicht als verwackelte Aufnahme, wie sie beim Filmen mit einer Handkamera beim Gehen entstehen kann. Diese Stabilität des Wahrnehmungsraumes ist eine aktive Leistung unseres Wahrnehmungssystems. Auf die sensorischen Informationen können wir uns dabei offenbar nicht verlassen, denn diese ändern sich als Folge selbst erzeugter Blickbewegungen.

Neuronen für Fremdbewegungen

Die Idee des Reafferenzprinzips besteht nun darin, dass sich der Organismus eine Kopie des motorischen Befehls (Efferenz) an die Augenmuskeln besorgt und diese dann wiederum zur Kompensation des Einflusses der Blickbewegung auf die sensorische Information (Afferenz) verwendet. Die Kopie des motorischen Befehls an die Augenmuskeln wird dazu verwendet, die erwarteten sensorischen Signale vorherzusagen: Wenn ich den Blick in diese Richtung wende, verändert sich das Bild auf der Netzhaut, obwohl sich in der Umgebung nichts verändert.

Liegt der Veränderung des Abbildes auf unserer Netzhaut aber eine tatsächliche Bewegung in der Aussenwelt zugrunde, so muss diese zur Wahrnehmung gelangen. Denn Bewegungsinformation ist höchst relevant, in der Savanne sowie im Strassenverkehr. Der Einfluss eigener Blickbewegungen auf die Abbildung auf unserer Netzhaut soll hingegen nicht wahrgenommen werden.

Doch wie ist das Reafferenzprinzip im Gehirn implementiert? Im Kontext von Blickbewegungen hat sich die Suche nach der Efferenzkopie als schwierig erwiesen. Demgegenüber ist das vestibuläre System geradezu prädestiniert für die Erforschung der Verarbeitung von Sinnesinformationen im Gehirn. Eine Forschergruppe um die Neurowissenschaftlerin Kathleen Cullen von der McGill-Universität in Montreal konnte aufzeigen, dass gewisse Neuronen im Hirnstamm auf Bewegungsreize spezialisiert sind, die nicht das Resultat einer selbst ausgeführten Bewegung sind. Die Neuronen sind nicht mehr aktiv, wenn dieselbe vestibuläre Stimulation als Konsequenz einer beabsichtigten Kopfbewegung auftritt.

Die vestibulären Neuronen im Hirnstamm feuern also nur dann, wenn die Bewegung nicht antizipiert war, wie zum Beispiel beim plötzlichen Abbremsen bei einer Zug- oder Tramfahrt. Cullen und ihrem Team ist damit der Nachweis gelungen, dass bereits Neuronen im Hirnstamm erfolgreich zwischen verschiedenen Reizursachen bei identischen sensorischen Informationen unterscheiden können. Von aussen verursachte Fremdbewegungen sollen kompensiert werden, wohingegen intendierte Eigenbewegungen ungehindert zur Ausführung gelangen sollen. Das Gehirn muss also die Bedeutung eines Signals erschliessen, und diese liegt nicht im Signal selbst.

Letztlich ist die Bezeichnung Gleichgewichtsorgan missverständlich. Gleichgewicht lässt sich nicht an einem Sinnesorgan festmachen, sondern resultiert aus dem Zusammenwirken einer Vielzahl von Prozessen im Gehirn und im Körper. Anhand des Gleichgewichtssystems lässt sich zeigen,



Raffiniert: Der Gleichgewichtssinn ist der wohl am meisten verkannte Sinn des Menschen.

Mitdenken

Wie das Gehirn auf einen unerwarteten Schubs reagiert



Situation: Person läuft mit konstanter Geschwindigkeit von links nach rechts und wird von hinten gestossen.

Das Gehirn erhält vom Gleichgewichtsorgan sensorische Informationen, die sich aus der eigen- und fremdverursachten Bewegung (Schubs) zusammensetzen.

Das Gehirn erwartet eine konstante Geschwindigkeit, weil das Laufen eine intendierte Bewegung ist.

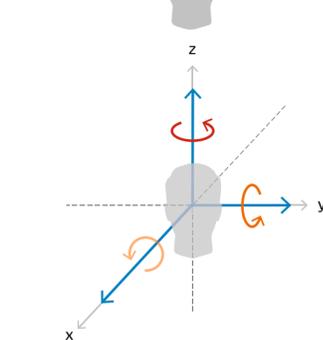
Quelle: Fred Mast und Andrew Ellis

Versteckt im Innenohr

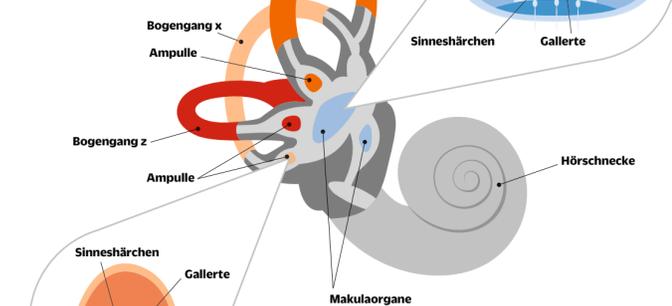
Das Gleichgewichtsorgan misst Bewegungen

■ Makulaorgane ■ Bogengänge

1 Das Gleichgewichtsorgan (vestibuläres System) befindet sich im Innenohr. Es misst lineare Beschleunigungen (blau) und Drehbeschleunigungen (rot/orange) um die drei Raumachsen (x, y, z).



2 Die Bogengänge stehen senkrecht zueinander und sind mit Flüssigkeit gefüllt. Bei Drehbeschleunigungen führt die Trägheit der Flüssigkeit zu einer Kräfteinwirkung auf die Sinneshaaren.



3 In den Makulaorganen befinden sich Calcit-Kristalle (Otokonien), die bei linearen Beschleunigungen Sinneshaaren reizen.

Wenn wir entscheiden sollen, ob ein Stapel von Bauklötzen umfällt, müssen wir in unserem Gehirn eine Simulation laufen lassen.

das das Gehirn interne Modelle der eigenen Körperbewegung benützt, um Sinnesdaten auszuwerten. Dasselbe Prinzip gilt auch für andere Sinne. Man geht davon aus, dass der ganze Körper und dessen Interaktion mit dem externen Raum intern repräsentiert wird. Das Gehirn führt ein Simulationsmodell des Organismus in der Umwelt aus, um die sensorischen Konsequenzen unserer Bewegungen zu antizipieren.

Gleichgewichtsinformationen spielen auch bei kognitiven Prozessen eine Rolle. Das ist plausibel, denn simulierte Sinnesdaten können auch in geistige Prozesse eingebunden sein oder diese erst ermöglichen. Patienten mit Gleichgewichtsstörungen bekunden oft auch Schwierigkeiten, wenn sie ihren eigenen Körper nur in der Vorstellung bewegen müssen. Dies ist zum Beispiel dann erforderlich, wenn man am Telefon Wegbeschreibungen geben soll. Dabei muss man sich räumlich in den Standort einer anderen Person hineinversetzen, um ihr aus ihrer Perspektive entsprechende Richtungsinformationen zu geben.

Unsere Studien haben gezeigt, dass Patienten mit beidseitigem Ausfall des Gleichgewichtsorgans in solchen und anderen Aufgaben beeinträchtigt sind, die eine mentale Aktivierung der eigenen Körperrepräsentation erfordern. Der chronische Ausfall vestibulärer Sinnesinformationen beeinträchtigt die Fähigkeit, sich den eigenen Körper in Bewegung vorzustellen. Zudem gaben die Patienten an, dass ihnen die blosse Vorstellung von Tätigkeiten wie Springen oder Hüpfen Probleme bereitet. Diese Tätigkeiten können im Alltag Schwindel erzeugen und die Körperhaltung destabilisieren.

Fehler im internen Modell

Moderne Forschungsansätze zum intuitiven Physikwissen gehen davon aus, dass wir die Fähigkeit besitzen, das dynamische Verhalten komplexer Systeme zu simulieren. Wenn wir entscheiden sollen, ob ein Stapel von Bauklötzen umfällt oder nicht, müssen wir in unserem Gehirn eine Simulation laufen lassen – nur so können wir das nötige Wissen extrahieren. Analog könnte es sich mit komplexen Bewegungen unseres Körpers im dreidimensionalen Raum verhalten. Um uns mental im dreidimensionalen Raum zu bewegen, werden Kopf- und Körperbewegungen und die daraus resultierenden Geschwindigkeiten und Positionen anhand eines internen Modells simuliert.

Es ist anzunehmen, dass die internen Modelle bei Patienten mit vestibulären Problemen wegen des chronischen Ausfalls sensorischer Daten nicht mehr adäquat funktionieren. Gezieltes Trainieren der Vorstellung kann ein Instrument sein, diese Körperbewegungen, die die Patienten oft vermeiden, mental zu simulieren und später physisch auszuführen. In Zusammenarbeit mit Dominique Vibert vom Inselspital Bern testen wir gegenwärtig mittels eines Vorstellungstrainings den Einfluss auf die Rehabilitation von Patienten mit vestibulären Störungen.

Eine Umfrage in den USA hat zudem ergeben, dass Patienten mit vestibulären Beeinträchtigungen oft den Umgang mit Zahlen als sehr herausfordernd betrachten. In unseren Untersuchungen konnten wir diese Schwierigkeit mit experimentellen Untersuchungen bestätigen. Zahlreiche weitere Untersuchungen weisen auf den Zusammenhang von Kognition und Gleichgewicht hin. Dies verdeutlicht, dass eine einseitige Beschäftigung mit Sinnesinformation nicht zum Verständnis von Wahrnehmung ausreicht. Das Gehirn ist ein informationsverarbeitendes System – in Sachen Gleichgewicht ganz besonders.

Grafik: Corinne Spähig