

Über den Gleichgewichtssinn.

Von E. Mach.

(Dritte Mittheilung.)

1.

Die Vorstellungen, die ich mir im Jahre 1865 über die Empfindung des Gleichgewichtes und der Bewegung bei Gelegenheit anderer Versuche gebildet habe, sind in Pogg. Ann. Bd. 126 S. 327 in der Note „über Flüssigkeiten, welche suspendirte Körperchen enthalten“, kurz angedeutet. Die betreffende Stelle lautet:

„Überall liegt hier die einfache Bemerkung zu Grunde, dass ein Körper von einem andern nur dann einen Druck erleidet, wenn er dem letzteren Beschleunigung nimmt. Wenn man aus bedeutender Höhe ins Wasser springt und dabei eine Last in der Hand hält, kann man leicht bemerken, dass der Druck im Fall aufhört. Hieher gehört noch eine Erscheinung, die meines Wissens noch nicht besprochen wurde. Ich meine die merkwürdige Veränderung des Gemeingefühls, welche man beim Fallen, auch schon beim Schaukeln empfindet. Die Erklärung ist einfach. Beim Fallen hört der hydrostatische Druck des Blutes auf, die Gelenke werden von den Extremitäten nicht mehr gedrückt, der ganze Körper verhält sich wie schwerlos. Ähnlich müsste man sich befinden, wenn man plötzlich auf einen kleinen Planeten versetzt würde. Die Schwerlosigkeit des Körpers kann noch weitere physiologische Wirkungen haben (Seekrankheit).“

Diese Vorstellung, dass es Empfindungen im ganzen Körper sein können, welche uns Gleichgewicht und Bewegung erkennen lassen, ist in der ersten und zweiten Mittheilung nicht aufgegeben, aber in den Hintergrund getreten, weil ich unter dem unmittelbaren Eindruck der Experimente die Überzeugung gewonnen habe, dass die Hauptsache im Kopfe vorgeht.

In der ersten Mittheilung ist den älteren Vorstellungen auf S. 4 und 9 Raum gelassen und die S. 10 entwickelte Anwendung des Schwerpunkts- und Flächenprincipes, so wie die S. 12 in der Anmerkung gegebene Auseinandersetzung ist auf je zwei miteinander verbundene Körpertheile übertragbar.

Auch die zweite Mittheilung kommt S. 10 im Text und in der Anmerkung auf die ältere Vorstellung zurück. Diese Vorstellungen sollen nun hier nochmals besprochen werden, nicht um die in der ersten und zweiten Mittheilung gewonnenen, welche specielle Ausbildungen der älteren sind, aufzugeben, sondern um das Verhältniss beider Auffassungen und ihre beiderseitige Leistungsfähigkeit zu beleuchten.

2.

Diese älteren Vorstellungen, welche nicht so originell sind, als ich früher dachte, indem Purkyně schon mehrere derselben, wenn auch nicht ausdrücklich formulirt, so doch gestreift hat, lassen sich in folgende Punkte zusammenfassen.

1. Hat irgend ein Körpertheil die Masse m und die Beschleunigung φ , welche letztere durch die Wirkung eines andern Körpertheiles von der Beschleunigung φ' relativ gegen diesen aufgehoben werden, oder in ψ umgewandelt werden soll, wobei alle Beschleunigungen in demselben Sinne positiv gezählt werden, so ist hiezu die Kraft $m(\varphi - \varphi')$ respective $m[\psi - (\varphi - \varphi')]$ erforderlich. Dies ist dem Principe nach längst bekannt und in der Note über suspendirte Körper durch passende Beispiele erläutert.

Die Kraft $m(\varphi - \varphi')$ oder $m[\psi - (\varphi - \varphi')]$ kann nun von einem lebenden Körper entweder als Druck empfunden werden, wenn die Beschleunigungsänderung von m durch die blosse Festigkeit geschieht, oder sie wird als Muskelanstrengung empfunden, wenn in der Ruhe oder in der Bewegung des ganzen Körpers m in einer bestimmten Lage erhalten oder demselben eine gewisse Bewegung ertheilt wird.

Bedeutet T das Trägheitsmoment eines Körpertheiles mit der Winkelbeschleunigung φ und wird diese durch einen andern Körpertheil von der Winkelbeschleunigung φ' relativ gegen

letzteren aufgehoben oder in ψ umgewandelt, so ist das hiezu erforderliche statische Moment T ($\varphi - \varphi'$) beziehungsweise $T [\psi - (\varphi - \varphi')]$, welches statische Drehungsmoment wieder als Druck oder Muskelanstrengung empfunden werden kann.

2. Selbstverständlich sind diese Anschauungen auf alle Körperteile anwendbar, ob nun vom Rumpfe, von den Extremitäten, dem Kopfe oder dem Gehirn die Rede ist. Auf das Drehungsmoment, welches das Gehirn bei Drehungen erhält, hat schon Purkyně hingewiesen. Freilich sind seine Ausdrücke, sowie jene der Nachfolger nicht immer ganz deutlich. Ich weiss z. B. nicht, wie es zu verstehen ist, wenn Wundt (Physiologische Psychologie S. 211) sagt: „In Folge der Drehbewegung wird das Cerebellum durch die Centrifugalkraft einen Druck nach der Seite der Drehung erfahren“

3. Auch das Blut kann, wie in der obigen Exposition, als ein Theil des Körpers aufgefasst werden, der gegen das Ganze durch die Schwere oder durch eine andere Kraft eine veränderliche Beschleunigung erhält. In diesem Sinne habe ich von einem veränderlichen hydrostatischen Drucke des Blutes gesprochen. Letztere Vorstellung ist ebenfalls nicht ganz originell, indem schon Purkyně von einer Affection der Blutmasse durch die Centrifugalkraft spricht und sogar — vielleicht ein fruchtbarer Gedanke — an eine therapeutische Verwerthung dieses Factums denkt.

4. Endlich lässt sich die sub 1. gegebene Anschauung auch auf die Druckempfindung der Haut übertragen. Der Druck jeder Stütze oder Unterlage auf die Haut erfährt eine Aenderung, wenn die Relativbeschleunigung der Stütze und der Körperstelle eine Normalcomponente gegen die Berührungsfläche ergibt.

3.

Unter den berührten Punkten wollen wir nun auf die Hautempfindung nicht weiter eingehen. Selbstverständlich fühlt man das Weichen einer Stütze oder Unterlage und gelangt dadurch zur Kenntniss von Bewegungen. Auch sind alle in der ersten Mittheilung entwickelten Grundsätze auf die Hautempfindung anwendbar.

Dass Druck auf das Gehirn bei den gewöhnlich vorkommenden Progressiv- und Winkelbeschleunigungen eine Rolle spielt, ist mir, abgesehen von der Unbestimmtheit der Ableitungen, die man in dieser Richtung versucht hat, durch die Versuche unwahrscheinlich. Die Winkelbeschleunigung des Gehirns bleibt allerdings dieselbe, ob sich in meinem Apparate der Kopf in oder ausser der Rotationsaxe befindet. Allein der von der Centrifugal-Beschleunigung abhängige Druck ändert sich wesentlich, wenn man aus der Axe tritt. Mir ist aber hiebei, sowie bei andern Lagenänderungen des Kopfes, keine wesentliche Änderung der Erscheinungen aufgefallen. Gewisse mir wenigstens sehr unbestimmt erscheinende und schwer zu beschreibende Druckgefühle im Kopfe mögen sich aus der directen Affection des Gehirns ableiten lassen, schwerlich aber die eigenthümlichen Raumvorstellungen, die durch die Bewegung erregt werden.

Den Einfluss von Beschleunigungen auf die Blutmasse kennt Jedermann. In der erhobenen Hand leeren sich die Venen. Man kann sie aber ziemlich stark füllen, wenn man die ausgestreckte gehobene Hand oder den ganzen Körper bei ausgestrecktem Arm rasch um eine Verticalaxe schwingt. Da nun die Thätigkeit aller Organe wesentlich von der Blutzufuhr abhängt, so muss die Affection der Blutmasse durch Beschleunigungen, die Veränderung ihrer Vertheilung im Körper, mächtige secundäre Folgen haben. Diese Folgen müssen desto auffallender werden, je weniger der die Blutvertheilung regulirende Apparat schnell und kräftig genug wirken kann, um die Massenbeschleunigungen zu compensiren. Auf diese Erscheinungen kann jedoch nur der Physiologe eingehen.

4.

Die Druck- und Muskelempfindungen des Körpers haben eine rein physikalische Seite. Von diesen allein soll hier zunächst ausführlicher die Rede sein. Knüpfen wir an die in der zweiten Mittheilung S. 12 (Anmerkung) erwähnte Beobachtung an.

Beim Ausgiessen von Quecksilber aus einem Gefäss hat man die Empfindung der gewaltsamen Hebung derjenigen Hand, welche

das Gefäss hält. Man kann auch beim aufmerksamen Zusehen wahrnehmen, dass sich der Arm wirklich etwas hebt. Man empfindet die Verminderung der Muskelanstrengung, welche zur Erhaltung des Gefässes nöthig ist, und indem man dieselbe nicht ebenso rasch zu vermindern vermag, als es eben zur Erhaltung des Gefässes erfordert wird, hebt sich der Arm etwas. Jede solche Verminderung eines Widerstandes gegen einen Muskel scheint von dem activen Muskel als ein Weichen des Widerstandes und ein Fortbewegen in der dem Widerstand entgegengesetzten Richtung empfunden zu werden.

Ich habe mir zwei Blechgefässe, jedes für etwa vier Kilogramm Wasser mit bequemen Handhaben anfertigen lassen. Dieselben haben am Boden ein Ansatzrohr, über welches ein kurzes Kautschukrohr von 15^{mm} Durchmesser im Lichten gezogen und durch einen Quetschhahn verschlossen wird. Mit diesem einfachen Apparat wurden folgende Versuche angestellt.

Versuch 1. Man fasst mit jeder Hand ein gefülltes Gefäss. Auf Commando werden beide Quetschhähne gleichzeitig geöffnet und das Wasser fliesst in untergestellte Behälter ab. Man verspürt hiebei namentlich gegen das Ende des Versuches, weil da in der Zeiteinheit der grösste Bruchtheil des noch vorhandenen Gewichtes abfliesst, eine deutliche Erhebung der Arme.

Versuch 2. Auf den Kopf wird eine innen gepolsterte Holzkappe aufgesetzt, jedoch so fest, dass man den Kopf nothwendig mitdrehen muss, wenn man die Kappe dreht. In der Nähe des rechten und linken Ohres befindet sich an der Kappe ein Haken. Am rechten Haken greift eine Schnur ein, welche horizontal nach vorne über eine Rolle geht und an der eines der beschriebenen Gefässe hängt. Eine zweite Schnur geht vom linken Haken horizontal nach hinten über eine zweite Rolle und trägt das zweite Gefäss. Beide Gefässe zusammen ertheilen dem Kopfe ein übrigens beliebig variables Drehungsmoment, welches durch die Muskel im Gleichgewicht gehalten wird. Lässt man nun das Wasser aus den Gefässen abfliessen, so fühlt man eine Drehung des Kopfes entgegen demjenigen Sinn, in welchem er durch die Gewichte gedreht würde. Bemerkenswerth ist, dass alle diese

Drehungen sehr stark empfunden, aber nur unmerklich ausgeführt werden.

Versuch 3. Man befestigt quer über den Rücken an beiden Schultern eine Holzleiste und lässt in der eben angegebenen Weise rechts das eine Gefäss nach vorn, links das andere nach hinten ziehen. Auch hier meint man sich beim Abfliessen des Wassers dem Widerstande entgegen zu drehen.

Versuch 4. An dem linken Ende derselben Leiste hängt das eine Gefäss direct und zieht nach unten, das andere befindet sich an einer Schnur, welche von dem rechten Ende der Leiste vertical nach oben über eine Rolle abgeht. Man meint beim Abfliessen des Wassers nach rechts umzusinken.

Versuch 5. An beiden Enden der Leiste rechts und links hängt eines der Gefässe. Beim Abfliessen meint man sich zu strecken und sich aus dem Boden zu erheben.

Bei keinem der fünf Versuche trat eine Erscheinung ein, die sich mit den eigenthümlichen Raumvorstellungen und optischen Phänomenen der beiden vorigen Mittheilungen in Vergleich bringen liesse.

5.

In den beschriebenen Versuchen herrscht nun die Eigenthümlichkeit vor, dass man die entstehenden Empfindungen nicht auf eine Bewegung des ganzen Körpers, sondern auf eine Änderung der relativen Stellung der eben afficirten Theile zu einander bezieht.

Bei den Versuchen 1 und 5 fühlt man Erhebung der Arme, Streckung des Körpers, Emporwachsen aus dem Boden. Hiebei geht nun eigentlich eine Verminderung des Körpergewichtes vor sich. Eine solche Verminderung des Körpergewichtes bedingt aber in den Versuchen der ersten und zweiten Mittheilung die Empfindung des Versinkens des Körpers.

In Versuch 2 greift am Kopf ein Drehungsmoment an, welches denselben von oben gesehen verkehrt wie den Uhrzeiger zu drehen strebt. Diesem Drehungsmoment halten die Muskeln das Gleichgewicht. Wird das Drehungsmoment rasch vermindert, so meint man, der Kopf werde wie der Uhrzeiger gedreht; wird es rasch vermehrt, so empfindet man eine Kopfdrehung dem

Uhrzeiger entgegen. Gesetzt nun, der Rumpf würde eine Winkelbeschleunigung im Sinne des Uhrzeigers erhalten, so erhielte der Kopf gegen den Rumpf eine umgekehrte relative Winkelbeschleunigung, die Muskeln, welche dieses Drehungsmoment zu vernichten streben, den Kopf in seiner Lage zu halten suchen, aber auf dieses anwachsende Drehungsmoment nicht gefasst sind, würden nach den eben mitgetheilten Versuchen eine Kopfdrehung dem Uhrzeiger entgegen signalisiren. Nach den Versuchen der ersten und zweiten Mittheilung empfindet man aber eine Drehung des ganzen Körpers im Sinne des Uhrzeigers.

Obgleich also die in der Note von 1865 benützten Grundsätze gewiss richtig sind und die in der ersten und zweiten Mittheilung gemachten Anwendungen auch durch die Erfahrung bestätigt werden, so scheint die Anwendung derselben auf die Muskelgefühle zur Erklärung der Bewegungsempfindungen doch insofern nicht auszureichen, als wir in den Muskelgefühlen theils andere, theils auch den geforderten widersprechende Bewegungsanzeigen zu sehen gewohnt sind.

6.

Muskelempfindungen werden bei jeder veränderlichen Bewegung entstehen müssen, das wird nicht bestritten werden können. Sie werden wohl oft auch die Aufmerksamkeit auf sich ziehen. Allein zur sicheren Erkenntniss der Locomotion scheint noch ein anderes Mittel gefordert. Teleologisch ist dies auch begreiflich. Die Muskelempfindungen haben zu berichten über den Erfolg mechanischer Arbeiten, auch solcher, welche mit der Locomotion nichts zu schaffen haben. Dieser Erfolg ist hauptsächlich bestimmt durch die Veränderungen in der Relativstellung der Körpertheile. Dies geforderte Organ, welches eben bloß auf Locomotion reagirt und sonst keine mechanische Arbeit zu verrichten hat, wäre nach meiner Auffassung das Labyrinth. Ob sich die bei Bewegungen eintretenden optischen Erscheinungen nach den angegebenen Grundsätzen ableiten lassen, wenn man das Auge mit seinem Muskelapparat in Betracht zieht, können wohl nur besondere Versuche lehren. Immer blieben dann aber noch die Bewegungsgefühle übrig, bei welchen das Auge nicht mitspielt.

7.

Noch durch ein Beispiel will ich erläutern, wie verschiedene Ergebnisse man erhält, wenn man dieselben mechanischen Grundsätze auf verschiedene Körpertheile anwendet. Der Beobachter, der in dem (von oben gesehen) im Sinne des Uhrzeigers rotirenden Apparat sitzt, ist so zu sagen eine Fessel'sche Maschine und alle Erscheinungen derselben müssen an ihm auftreten, wenn gleich sie an verschiedenen Theilen in verschiedener Weise empfunden werden. Nickt er bejahend mit dem Kopfe, so wird hiebei dieser ganze Kopf etwas verdreht und zwar von hinten gesehen verkehrt wie der Uhrzeiger. Gleichzeitig wird der Kopf etwas nach links hintübergeworfen. Beide Bewegungen merkt man durch die Muskeln. Ausserdem meint aber der Beobachter, dass sich der ganze vor ihm befindliche Raum sammt ihm selbst im Sinne des Uhrzeigers dreht, also gerade entgegengesetzt, als er seinen Kopf gedreht fühlt.