

kann man ähnlich wie oben die Amplitude a ausrechnen, wobei für die tägliche Änderung wieder der Mittelwert aus den oben berechneten extremen Änderungen eingesetzt wird:

$$a \cdot \frac{\sin(1^\circ)}{1^\circ} = 8,02 \text{ s}$$

$$\Rightarrow a = \frac{8,02 \text{ s}}{\sin(1^\circ)} = 459,5 \text{ s} = 7,66 \text{ min.}$$

Auch das passt sehr gut zu dem Extremwert der exakten Funktion $z_2(t)$ aus Abschnitt 3.

Wenn man den Anfangszeitpunkt auf den Jahresbeginn legt, dann muss man die Zeiten in z_1 und z_2 entsprechend verschieben: Die Periode von z_1 beginnt am 21. März bei $t = 81$, die von z_2 am 3. Juli bei $t = 183$, und daraus ergibt sich die Zeitgleichung:

$$z(t) = 9,89 \cdot \sin(2(t - 81)) + 7,66 \cdot \sin(t - 183).$$

Den Graph der Zeitgleichung zeigt Abbildung 14.

Vergleicht man diesen Graphen mit Abbildung 1, dann sieht man, dass der Term eine passable Näherung für die Zeitgleichung ist; wenn man die Zeit-Variable noch präzisiert (wir haben ja schlicht »Zeit in Tagen = Winkel in Grad« gesetzt), dann kann man damit auch quantitativ gute Resultate erzielen.

Literatur

KELLER, H.-U. (Hg.) (2008). *Kosmos Himmelsjahr 2009*. Stuttgart: Kosmos Verlag (erscheint jährlich aktualisiert).

<http://www.sonnenuntergang.de> (31.10.2013)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Zeitgleichung> (31.10.2013)

<http://epod.usra.edu/blog/2003/01/analemma-for-greece.html> (31.10.2013)

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Analemma_300dpi.png (31.10.2013)

Dr. BERTHOLD SCHUPPAR ist Oberstudienrat im Hochschuldienst a. D. und lehrt an der TU Dortmund.

Adresse: TU Dortmund, Fakultät Mathematik, IEEM, 44221 Dortmund; berthold.schuppar@tu-dortmund.de

Trägheitskraft

Eine spannende Brücke zwischen lebensweltlichen Sinneseindrücken und der Newton'schen Mechanik – Teil 1: Sachanalyse



HANS-OTTO CARMESIN

Lernende verfügen über ergiebige lebensweltliche Kompetenzen zur Newton'schen Mechanik: Sie erleben Kräfte sowie Beschleunigungen mit ihrem Kraftsinn, Gleichgewichtssinn und Sehsinn. Da sie auch beschleunigt beobachten, gehören die Zentrifugalkraft sowie andere Trägheitskräfte zu ihren alltäglichen Wahrnehmungen. Hierzu werden für den Unterricht nützliche physiologische Grundlagen, lebensweltliche sowie physikalische Perspektiven und klärende effiziente Unterrichtsstrategien entwickelt.

1 Einleitung

Durch Gespräche mit Schülern kann man erfahren, dass sie vor der Behandlung der Newton'schen Mechanik im Unterricht Zentrifugalkräfte sowie die dabei auftretenden Sinneseindrücke stimmig beschreiben und erläutern. Was bewirkt der Unterricht? In vielen Klassen werden Trägheitskräfte kaum behandelt, da dies im Curriculum nicht gefordert wird (CHROST, GEHRMANN, MUNDLOS, RODE & SCHOBLINSKI-VOIGT, 2007) und da ein Verzicht auf Trägheitskräfte teils propagiert wird (GALLI & KAPLAN, 2002). Viele Lernende, die an einem solchen Me-

chanikunterricht teilgenommen haben, sagen anschließend, es gäbe keine Zentrifugalkraft oder die Zentrifugalkraft sei tangential gerichtet. Beides ist falsch (VOGEL, 1977). Doch warum ist die Zentrifugalkraft wichtig?

Die Zentrifugalkraft ist ein Beispiel für Trägheitskräfte. Diese erfahren wir alltäglich, wenn wir uns beschleunigt bewegen. Wir erleben bei jeder Kreisbewegung Sinneseindrücke zur Zentrifugalkraft durch den Kraftsinn und als Beschleunigungsinformation auch über den Gleichgewichtssinn. Diese Sinneseindrücke sind grundlegend für unseren aufrechten Gang und unsere Bewegungssteuerung. Aber wäre es für die Schülerin-

nen und Schüler nicht einfacher die Newton'sche Mechanik ausschließlich am Beispiel der Inertialsysteme zu erlernen? Da der Mensch seine Sinnesindrücke zu Kräften permanent zur Stabilisierung der Körperlage einsetzt und oft beschleunigt, würden Unstimmigkeiten zum Gelernten Inertialsystem schnell auffallen (s. Abschnitt 2.6). Daher sollten die Schüler befähigt werden, ihre Sinnesindrücke im Bezug zur Newton'schen Mechanik auszuschärfen und zu deuten. Ferner sollten sie befähigt werden, die beiden Perspektiven des ruhenden sowie des beschleunigten Beobachters praktisch, wahrnehmend, messend sowie argumentativ einzunehmen. Das führt zu robusten, umfassenden und alltagstauglichen Kompetenzen. Würde man die Schüler nur befähigen, die Newton'schen Axiome im Inertialsystem anzuwenden, dann könnten leicht Widersprüche zu alltäglichen Erfahrungen entstehen (s. Abschnitt 2.6.). Das wäre wenig überzeugend. Auch ist kaum zu erwarten, dass viele Lernende selbstständig erschließen, wie sie ihre Alltagserfahrungen zu Beschleunigungen auf Inertialsysteme übertragen können, wenn sie das nicht im Unterricht lernen. Hinzu kommt, dass die Experten aus verständlichen Gründen selten bereit sind, sich auf Sinnesindrücke zu Trägheitskräften einzulassen, weil sie an die Perspektive des Inertialsystems gewöhnt sind (s. Abschnitt 2.6.).

Und wie steht das Bildungssystem zu dieser Thematik? Aktuell wird die Zentrifugalkraft in manchen Schulbüchern zur Newton'schen Mechanik behandelt (BOYSEN, HEISE, LICHTENBERGER, SCHEPERS & SCHLICHTING, 1997), in anderen weggelassen (BAYAER u.a., 1997). Ebenso wird sie in manchen Curricula behandelt (MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG, 1999), in anderen nicht (CHROST et al., 2007). In der Physikdidaktik bekennt man sich zur Notwendigkeit eines Zugangs zur Physik über die Sinne (KIRCHER, GIRWIDZ & HÄUSSLER, 2001). Ebenso fordert die Pädagogik den Lebensweltbezug als zentrales Ziel (ZDARZIL, 1978), und die eigenen Sinne gehören zur permanent präsenten Lebenswelt der Schüler. Auch renommierte empirische Lernwirksamkeitsforscher propagieren einen Zugang zur Physik über Sinne (HATTIE, 2012), beispielsweise bei der Energie. Eine Konkretisierung zeigt CARMESIN (2001).

Bei dem vorgestellten Konzept können die Schülerinnen und Schüler lernen, ihre Sinnesindrücke fachgerecht auszuschärfen, zu verbalisieren und zu deuten. Dazu erleben sie spannende Bewegungen (z.B. Abb. 1), untersuchen diese messend und entdecken physikalische sowie fächerübergreifende Zusammenhänge (Abb. 2).

Der Aufsatz wird in zwei Teilen in zwei aufeinander folgenden Heften präsentiert. In diesem ersten Teil wird eine Sachanalyse präsentiert. Im zweiten Teil wird ein Unterrichtsversuch in Klasse 10 vorgestellt, analysiert und diskutiert.

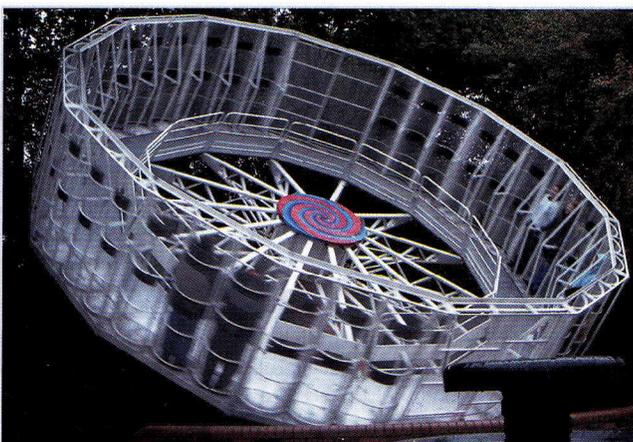


Abb. 1. Lernende erleben und messen die Zentrifugalkraft auf einer Exkursion (CARMESIN, 2004).

2 Sachanalyse

Der wissenschaftliche Kraftbegriff

In der Fachliteratur wird der Kraftbegriff für beschleunigte und unbeschleunigte Systeme entwickelt. Beispielsweise werden dazu bei GERTHSEN (VOGEL, 1977) drei Gruppen von Kräften eingeführt: *Nahwirkungskräfte* beruhen auf direktem Kontakt zwischen den Körpern. *Fernwirkungskräfte* benötigen keinen direkten Kontakt und lassen sich nicht global durch einen Wechsel des Bezugssystems beseitigen. *Trägheitskräfte* benötigen ebenfalls keinen direkten Kontakt, lassen sich aber durch Wahl eines passenden Bezugssystems beseitigen. Nicht behandelt werden hier die sogenannten »d'Alembert'schen Trägheitskräfte«, da diese begrifflich nicht grundlegend sind. *Wechselwirkungsprinzip*: Wenn ein Körper A auf einen Körper B eine Kraft F ausübt, dann übt der Körper B auf den Körper A eine Kraft $-F$ aus. Wenn in einem nach vorne beschleunigten Bus eine Masse reibungsfrei am Boden liegt, dann wird diese Masse innerhalb des Busses nach hinten beschleunigt. Im Bus ordnet man der Beschleunigung eine nach hinten gerichtete Trägheitskraft zu (VOGEL 1977). Offenbar übt gar kein Körper eine Kraft auf die Masse aus, außer der hier unwichtigen Normalkraft. Daher gibt es auch keine Gegenkraft $-F$. Das Wechselwirkungsprinzip ist also nicht verletzt, sondern es ist nicht anwendbar, weil die Voraussetzung nicht erfüllt ist.

Fazit: Trägheitskräfte bilden eine von drei Gruppen von Kräften. Trägheitskräfte werden nicht von einem Körper auf einen anderen ausgeübt. Wenn man Untergeneralisierungen vermeiden will, dann muss man Trägheitskräfte unterrichten.

Trägheit: Wenn in einem Inertialsystem auf einen Körper mit einer Masse m genau eine Kraft F wirkt, dann erfährt der Körper die Beschleunigung $a = \frac{F}{m}$. Diese Eigenschaft der Masse der Beschleunigung entgegen zu wirken nennt man die Trägheit der Masse. In einem System, das eine Beschleunigung a erfährt, kann man aufgrund der Trägheit bei einer Masse m die Trägheitskraft $-m \cdot a$ beobachten.

2.1 Sinne zur Einschätzung der Dynamik des Körpers

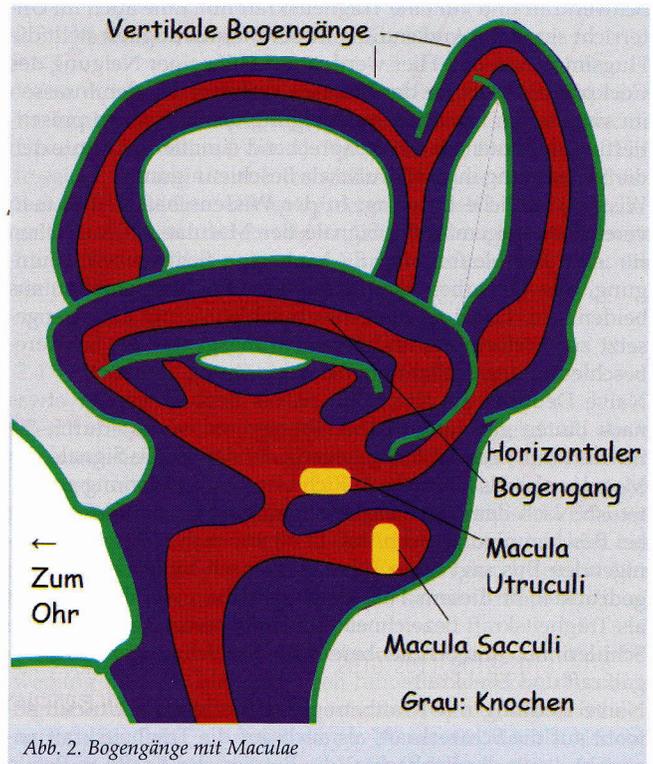


Abb. 2. Bogengänge mit Maculae

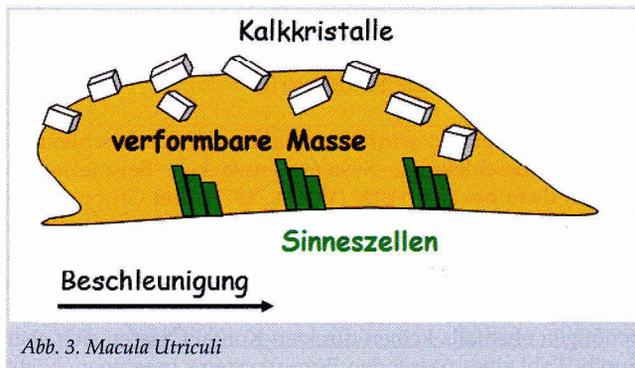


Abb. 3. Macula Utriculi

2.1.1 Gleichgewichtssinn

Wir haben einen Gleichgewichtssinn, der uns ständig bewusst macht, welche Drehbeschleunigung, welche Beschleunigung und welche Schwerkraft wir erfahren (SCHMIDT & THEWS, 1995). Die drei Richtungen der Drehbeschleunigung werden in drei zueinander senkrecht stehenden Bogengängen im Innenohr erfasst (Abb. 2). Dazu befindet sich in jedem Bogengang eine Flüssigkeit, die durch eine Drehbeschleunigung zu strömen beginnt. Diese Strömung neigt Haarsinneszellen und stimuliert diese.

Die waagerechte Linearbeschleunigung wird durch die *Macula Utriculi* erfasst (Abb. 3). Diese besteht im Wesentlichen aus elastisch gelagerten Kalkkristallen als trägen Massen. Bei einer Beschleunigung sowie bei der Schwerkraft wird die Lagerung elastisch verformt. Diese Verformung stimuliert eingelagerte Sinneszellen. Ganz analog funktioniert die *Macula Sacculi*. Beim stehenden Menschen ist sie vertikal ausgerichtet, wogegen die *Macula Utriculi* waagrecht orientiert ist.

Nachdem wir die Funktionsweise des Gleichgewichtssinns betrachtet haben, kommen wir zur Deutung. Hier gibt es verschiedene Möglichkeiten:

Mehrdeutigkeit: Die Maculae werden im Schwerfeld und bei Linearbeschleunigung verformt. Sie weisen daher auf eine Schwerebeschleunigung, eine Linearbeschleunigung, eine Schwerkraft und auf eine Trägheitskraft hin. Eine auch im Unterricht sinnvolle Anwendung dieser Mehrdeutigkeit stellt die Flugsimulation dar. Hier werden mit Hilfe einer Neigung des Cockpits die Maculae der Insassen verformt. Da den Insassen im simulierten Fenster keine Neigung des Flugzeugs präsentiert wird, deuten sie bei entsprechend simulierten Kontexten die Verformung ihrer Maculae als Beschleunigung.

Wissenschaftliche Deutung: In der Wissenschaft deutet man vereinbarungsgemäß die Signale der Maculae als Anzeichen für eine Beschleunigung. Es kann eine Schwerebeschleunigung, eine Linearbeschleunigung oder eine Kombination aus beiden sein. Dabei ist die Linearbeschleunigung entgegengesetzt zur Verformung und vereinbarungsgemäß die Schwerebeschleunigung in Richtung der Verformung gerichtet.

Naive Deutung als Kraft: Ein naiver Beobachter, der etwas nach hinten geneigt ist (Abb. 4b) sagt, er werde »durch die Schwerkraft nach hinten gezogen«. Er deutet die Signale der Maculae also als Kraft, die in Richtung der Verformung gerichtet ist. Nach dem gleichen Schema deutet er die Verformung bei Beschleunigung (Abb. 4a). In einem nach vorne beschleunigenden Bus sagt er, er fühle sich »nach hinten in den Sitz gedrückt«. In diesem Fall kann man die geschilderte Kraft als Trägheitskraft bezeichnen. Bei Drehbewegung kennen die Schülerinnen und Schüler bereits die Bezeichnungen Zentrifugalkraft und Fliehkraft.

Naive Deutung mit Kraftbetrag: Da die *Macula Utriculi* sowohl auf die Schwerkraft, als auch auf die Trägheitskraft anspricht, kann der Beobachter die Beträge der Kräfte in Bezug

auf seine Körpermasse M einschätzen. Beispielsweise führt die Schwerkraft $F = M \cdot g$ zu einer Verformung der *Macula Utriculi*. Wenn die gleiche Verformung bei einer Beschleunigung a auftritt, kann der Beobachter dies durch eine Trägheitskraft vom gleichen Betrag $M \cdot g$ deuten.

Nachdem wir die Funktionsweise und die Deutungen betrachtet haben, kommen wir zur wohl wichtigsten Anwendung, zur Stabilisierung der Körperlage:

Schutzreaktion gegen Umkippen: Der Beobachter wirkt dem Umkippen nach einer einfachen Regel entgegen, indem er eine Kraft auf seinen Rumpf ausübt, die der durch die *Maculae* signalisierten Schwerkraft, Trägheitskraft oder Summe aus beiden entgegenwirkt.

Schutzreaktion gegen Wegrutschen: Wenn der Beobachter in einem bremsenden Auto fährt, dann droht er nach vorne wegzurutschen. Dem wirkt er durch eine nach hinten gerichtete Kraft auf seinen Rumpf entgegen. Diese kann durch den Sicherheitsgurt ausgeübt werden. Wenn so das Wegrutschen verhindert wird, dann sind die Beträge der nach vorne gerichteten Trägheitskraft und der nach hinten gerichteten Kraft gleich.

Wie beim Vermeiden des Umkippen gilt die einfache Regel, dass der Beobachter dem Wegrutschen entgegenwirkt, indem er eine Kraft auf seinen Rumpf ausübt, die der durch die *Maculae* signalisierten Schwerkraft, Trägheitskraft oder Summe aus beiden entgegenwirkt.

Nachdem wir die Funktionsweise, Deutungen und Anwendungen betrachtet haben, analysieren wir strukturgleiche Beschleunigungssensoren und einen für den Unterricht wichtigen Modellversuch: Die *Maculae* können als Systeme aus einer Masse und einer Feder aufgefasst werden. Sie können daher leicht durch strukturgleiche Modellversuche nachgebildet werden. Auch sind die *Maculae* strukturgleich zu vielen Beschleunigungssensoren. Für den Unterricht interessant ist auch ein alternatives Messprinzip: Die Bogenwasserwaage funktioniert nicht nach dem Masse-Feder-Prinzip, sondern sie vergleicht die am Erdboden bekannte Schwerebeschleunigung mit der zu messenden Linearbeschleunigung (CARMESIN, 2001).

Modellversuch: Die *Maculae* sind im Körper in den beiden Innenohren punktuell lokalisiert. Lernende können die Wirkungsweise im Modellversuch durch ein Masse-Feder-System nachbilden. Daher eignet sich der Gleichgewichtssinn gut für den Physikunterricht.

2.1.2 Kraftsinn

Wir haben einen Kraftsinn, der uns ständig bewusst macht, welche Kraft wir aufwenden, um eine bestimmte Gelenkstelle einzuhalten und welche Belastung durch eine einwirkende Kraft, wie beispielsweise die Schwerkraft, auftritt. Hierfür fügt unser Zentralnervensystem die verfügbaren neuronalen Informationen zusammen. Dabei nutzt es Mechanosensoren der Haut, der Sehnen und der Gelenke sowie Sinneszellen in den Muskeln (SCHMIDT & THEWS, 1995). Der Kraftsinn kann gut bei der Einführung des Kraftbegriffs im Unterricht genutzt werden. Das ist jedoch kein Thema in diesem Bericht. Dieser Sinn wird daher im Folgenden nicht ausführlich behandelt.

2.1.3 Sehen

Das Sehsystem stellt die räumliche Lage und die Bewegung des Körpers nach Möglichkeit fest. Die Lage kann prinzipiell nur in Form von Winkeldifferenzen erfasst werden. Erst das dreidimensionale Sehen lässt Schätzungen von Streckenlängen zu. Die Geschwindigkeit wird durch spezialisierte Zellen in Form von Winkelgeschwindigkeiten erfasst. Auch hier können absolute Geschwindigkeiten erst durch Schätzungen der Ent-

fernung gefolgert werden. Daher kann der Beobachter ohne Messgeräte die Dynamik seines Körpers mit den Augen nur grob schätzen (BIRBAUMER & SCHMIDT, 1991).

Naive Erfassung von Beschleunigung: Ein naiver Beobachter ermittelt eine Beschleunigung nicht eindeutig mit Hilfe der Signale der Maculae. Denn er deutet diese Signale schon als Trägheitskraft mit entgegengesetzter Richtung (s. Abschnitt 2.2.1) oder zumindest mehrdeutig (s. o.). Ein naiver Beobachter ermittelt eine Beschleunigung überwiegend visuell.

Fazit: Für die Bewegung des Körpers sind Gleichgewichts-, Kraft- und Sehsinn wesentlich. Für den aufrechten Gang ist das mehrdeutige Maculaorgan existenziell wichtig.

2.2 Macula Utriculi bei Linearbeschleunigung

1.2.1 Sinneseindruck



Abb. 4. (a) Bei einem aufrechten nach vorne beschleunigten Beobachter ist die Macula Utriculi nach hinten verformt (links). (b) Bei einem nach hinten geneigten unbeschleunigten Beobachter ist die Macula Utriculi nach hinten verformt (Mitte). (c) Bei einem liegenden unbeschleunigten Beobachter ist die Macula Utriculi nach hinten verformt, also von ihm aus gesehen in rückwärtige Richtung (rechts).

Bei einem nach vorne beschleunigten aufrechten Beobachter verformt sich die Macula Utriculi nach hinten (Abb. 4a) und signalisiert diese Verformung ans Gehirn. Wir untersuchen, bei welchen unbeschleunigten Beobachtern eine solche Verformung auch auftritt. Es ist offenbar immer der Fall, wenn der Beobachter nach hinten geneigt ist (Abb. 4b), beispielsweise wenn er sich geneigt hinten anlehnt. Es ist auch der Fall, wenn der Beobachter auf dem Rücken liegt (Abb. 4c). Ein nach hinten geneigter unbeschleunigter Beobachter stellt durch seine Macula Utriculi eine in eine rückwärtige Richtung gerichtete Kraft fest. Da die Macula Utriculi eines nach vorne beschleunigten aufrechten Beobachters die gleiche Verformung anzeigt, legt auch seine Macula Utriculi eine nach hinten gerichtete Kraft nahe. Diese Kraft nennt man Trägheitskraft (VOGEL, 1977). Der Beobachter sagt in der Alltagssprache, dass »ihn eine Kraft nach hinten zieht«.

2.2.2 Schutzreaktion gegen Umkippen

Wenn der nach vorne beschleunigte Beobachter beispielsweise in einem nach vorne beschleunigten Bus steht (Abb. 5), kann er den Vorgang in seinem körpereigenen beschleunigten System »durchdenken« und entsprechend handeln. D. h. er kann mit seinen Maculae Utriculi feststellen, dass ihn »etwas nach hinten zieht«. Als Schutzreaktion gegen das Umkippen kann er auf seinen Rumpf eine Kraft nach vorne ausüben.

Nun analysieren wir im Gedankenexperiment, inwieweit ein Beobachter auf der Basis eines Inertialsystems eine Schutzreaktion gegen Umkippen planen könnte: Der Beobachter im nach vorne beschleunigten Bus könnte versuchen, ein unbeschleunigtes System (Inertialsystem) zu suchen. Erfahrungsgemäß kann er die Straße verwenden. Dann müsste er irgendwie feststellen, dass der Bus nach vorne beschleunigt. Das ist

visuell kaum möglich, er könnte den Tacho langfristig beobachten, wenn er diesen zufällig einsehen kann. Daraus könnte er schließen, dass sein Rumpf aufgrund des Trägheitsprinzips dazu neigt zurückzubleiben. Als Schutzreaktion gegen das Umkippen könnte er auf seinen Rumpf eine Kraft nach vorne ausüben. Es ist völlig klar, dass eine solche Planung praktisch kaum durchführbar ist und den Beobachter nicht zuverlässig vor dem Umkippen schützt.

Fazit: Eine Signalverarbeitung im Rahmen eines Inertialsystems wäre ungeeignet als zuverlässige Schutzreaktion gegen Umkippen.



Abb. 5. Wenn ein Fahrgast im nach vorne beschleunigten Bus steht, dann kann er durch seinen Arm eine nach vorne gerichtete Kraft auf seinen Rumpf ausüben, um nicht nach hinten umzukippen.

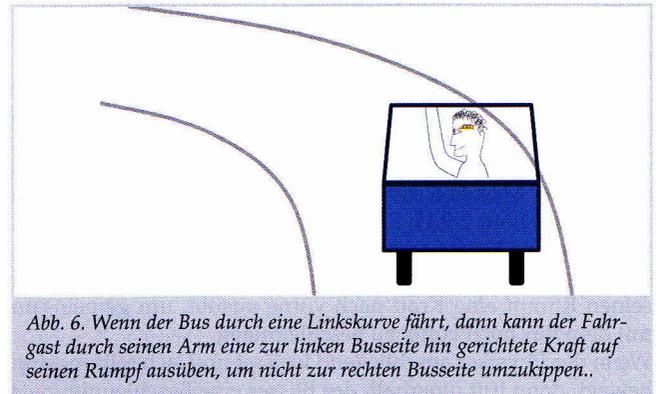


Abb. 6. Wenn der Bus durch eine Linkskurve fährt, dann kann der Fahrgast durch seinen Arm eine zur linken Busseite hin gerichtete Kraft auf seinen Rumpf ausüben, um nicht zur rechten Busseite hin umzukippen..

2.3 Macula Utriculi bei einer Kreisbewegung

Wenn ein Beobachter in einem Bus fährt, der sich auf einer Kreisbahn nach links bewegt, dann verformt sich die Macula Utriculi nach rechts (Abb. 6). Nun kann der Fahrgast mit Hilfe seiner Macula Utriculi feststellen, dass »es ihn zur rechten Busseite hin zieht«. Die entsprechende Kraft ist die Zentrifugalkraft. Er kann durch seinen Arm eine zur linken Busseite hin gerichtete Kraft auf seinen Rumpf ausüben, um nicht zur rechten Busseite hin umzukippen.

2.4 Macula Utriculi beim Kippen nach hinten

Wenn ein Beobachter etwas nach hinten geneigt ist, dann verformt sich die Macula Utriculi nach hinten (Abb. 3). Nun kann er mit Hilfe seiner Macula Utriculi feststellen, dass »es ihn nach hinten zieht«. Die entsprechende Kraft ist die Schwerkraft; Beschreibungen mittels Drehmoment werden hier aus curricularen Gründen vermieden. Er kann durch seinen Arm eine nach vorne gerichtete Kraft auf seinen Rumpf ausüben, um nicht nach hinten umzukippen.

Fazit: Die Beispiele der Linearbeschleunigung, der Kreisbewegung und der Neigung nach hinten illustrieren, dass eine Signalverarbeitung im beschleunigten System geeignet ist, den aufrechten Gang zu stabilisieren: Wenn die Macula Utriculi über die Beschleunigung eine Kraft (Schwerkraft oder Träg-

heitskraft) signalisiert, dann schützt man sich zuverlässig vor Umkippen, indem man eine entgegengesetzt gerichtete Kraft auf den Rumpf ausübt. Da das Maculaorgan Schwer- und Trägheitskräfte zugleich signalisiert, kann es den aufrechten Gang gegenüber beiden Kräften stabilisieren.

2.5 Beobachterperspektiven

Dadurch, dass manche gar nichts über die Newton'sche Mechanik gelernt haben, manche die Grundgleichung der Mechanik kennen, manche auch Bezugssysteme transformieren können und manche häufig die Newton'sche Mechanik beruflich nutzen, kommt es zu sehr unterschiedlichen Sichtweisen in der Bevölkerung:

Zunächst betrachten wir einen naiven Beobachter: Der naive Beobachter, der sich in einem nach vorne beschleunigenden Bus (Abb. 5) festhält, stellt mithilfe der Macula Utriculi eine Trägheitskraft F_T nach hinten fest (s. Abschnitt 2.2.1). Er wirkt dem Wegrutschen entgegen, indem er eine Kraft F vom gleichen Betrag nach vorne ausübt. Er deutet die erreichte stabile Lage durch ein Kräftegleichgewicht.

Wenn der naive Beobachter anschließend loslässt und sich reibungsfrei bewegt, dann tritt innerhalb des Busses eine Beschleunigung a nach hinten auf, die er visuell feststellen kann. Für die so festgestellten Größen kann er die Grundgleichung der Mechanik bestätigen, also $F_T = m \cdot a$.

Während der naive Beobachter von seinen Sinneseindrücken ausgeht, bevorzugen die meisten Physiker eine Betrachtung im Rahmen eines Inertialsystems: Der Physiker, der sich in einem nach vorne beschleunigenden Bus (Abb. 5) festhält, stellt mithilfe der Macula Utriculi eine Trägheitskraft F_T nach hinten fest (s. Abschnitt 2.2.1). Er wirkt dem Wegrutschen entgegen, indem er eine Kraft F vom gleichen Betrag nach vorne ausübt. Er deutet die erreichte stabile Lage im Bus dadurch, dass er auf seinen Rumpf eine Kraft nach vorne ausübt, um gemeinsam mit dem Bus nach vorne zu beschleunigen.

Wenn der Physiker anschließend loslässt und sich reibungsfrei bewegt, dann tritt innerhalb des Busses eine Beschleunigung a nach hinten auf, die er visuell feststellen kann. Diese kann er dadurch deuten, dass auf ihn keine Kraft ausgeübt wird und daher seine Beschleunigung null ist. Für die so festgestellten Größen kann er für beide Fälle die Grundgleichung der Mechanik bestätigen, also $F = m \cdot a$. Auch kann er sich darüber freuen, dass er hierfür keine Trägheitskraft benötigt.

Jeder dieser zwei Standpunkte scheint zunächst für sich gesehen stimmig zu sein. Allerdings zeigen weitere Beispiele, dass man zum Vernetzen seiner Sinneseindrücke mit der Newton'schen Mechanik wissen muss, wie man Bezugssysteme transformiert. Dazu betrachten wir einen naiven Beobachter, der nicht weiß, wie man ins Inertialsystem transformiert: Wenn der naive Beobachter wie oben die Trägheitskraft F_T feststellt, anschließend wie oben loslässt und die Beschleunigung mit dem Beschleunigungssensor misst, dann erhält er die Beschleunigung relativ zum Straßenrand null. Daraus folgt, dass er die Grundgleichung der Mechanik nicht bestätigen kann. Denn der Beschleunigungssensor misst die absolute Beschleunigung, d. h. die in einem System ohne Gravitation mit dem Beschleunigungssensor messbare Beschleunigung.

Als weiteres Beispiel betrachten wir einen naiven Beobachter im Karussell. Er stellt die Zentrifugalkraft F_T nach außen fest. Zudem stellt er durch den Bahnverlauf fest, dass er eine Beschleunigung a zur Drehachse hin, also nach innen erfährt. Daher stellt er fest, dass $F_T = -m \cdot a$ gilt. Daraus folgt, dass er die Grundgleichung der Mechanik nicht bestätigen kann.

Gemäß BROCKHAUS (1998) ist ein *Paradoxon* eine »der allgemeinen Erfahrung zuwiderlaufende, scheinbar widersinnige Aussage«. Da die Zentrifugalkraft und allgemeiner die Träg-

heitskraft der allgemeinen Erfahrung entspricht (s. o.), ist nach BROCKHAUS die Grundgleichung der Mechanik wegen des umgekehrten Vorzeichens der Kraft ein Paradoxon. Dieses Paradoxon wird aufgelöst, indem man zwischen ruhendem und beschleunigtem System unterscheidet. Gemäß BROCKHAUS kann in der Physik ein zu physikalischen Gesetzen im Widerspruch stehendes Phänomen als Paradoxon bezeichnet werden. Dann wäre das lebensweltliche Phänomen der Zentrifugalkraft und allgemeiner der Trägheitskraft ein Paradoxon, da das Vorzeichen der Trägheitskraft anders ist als das der Kraft in der Grundgleichung der Mechanik. Auch dieses Paradoxon wird aufgelöst, indem man zwischen ruhendem und beschleunigtem System unterscheidet.

In beiden Sichtweisen besteht das Paradoxon in den entgegengesetzten Richtungen von Trägheitskraft und im Ruhesystem beschleunigender Kraft.

Fazit: Die mit der Grundgleichung der Mechanik und der Trägheitskraft verbundenen Paradoxa kann vermeiden, wer weiß, dass die Trägheitskraft entgegengesetzt zur im Ruhesystem beschleunigenden Kraft gerichtet ist.

Im Prinzip könnte ein naiver Beobachter bei auftretenden Unstimmigkeiten einen bekannten Physiker um Hilfe bitten. Doch für diesen ist es oft am bequemsten Bezugssysteme nicht zu wechseln: Der typische erwachsene Physiker weiß, dass er die Vorgänge ohne Trägheitskräfte beschreiben kann. Er weiß, dass er sich unnötig anstrengen müsste und Flüchtigkeitsfehler riskieren würde, wenn er sich auf Trägheitskräfte einlassen würde. Daher lässt er sich nur ungerne auf die Vorstellung von Trägheitskräften ein. Ausnahmen bilden Geophysiker und Meteorologen, für die beispielsweise die Corioliskraft praktisch ist.

Während die Schüler in der Regel alles lernen, was für die nächste Klassenarbeit wichtig ist, entscheiden sich Erwachsene frei, was sie gebrauchen können und was nicht. Was bleibt also übrig vom Unterricht über Newton'sche Mechanik? Dazu betrachten wir einen typischen erwachsenen Nichtphysiker: Durch Gespräche mit typischen erwachsenen Nichtphysikern kann man erfahren, dass sie nicht an der Zentrifugalkraft zweifeln. Das ist naheliegend, da sie diese als Sinneseindruck alltäglich zum Stabilisieren der Körperlage nutzen. Viele erwachsene Nichtphysiker sagen: »In Physik hatte ich immer eine zwei, weil ich Formeln umstellen konnte. Aber verstanden habe ich Zentrifugalkräfte und andere Kräfte nie.« Das ist naheliegend, denn man gerät leicht in Widersprüche, wenn man nicht den Unterschied von Inertialsystemen und beschleunigten Systemen kennt (s. o. das Beispiel des naiven Beobachters, der nicht weiß, wie man Bezugssysteme transformiert).

Fazit: Wenn der Unterricht über Newton'sche Mechanik nachhaltig sein soll, dann muss man die Lernenden befähigen, ihre Sinneseindrücke zur Beschleunigung mit der Newton'schen Mechanik sachgerecht zu vernetzen. Das kann eine Beschränkung auf Inertialsysteme kaum leisten.

3 Diskussion

3.1 Zusammenfassung

Die Analyse zur Vernetzung von Sinneseindrücken, Sensoren und Newton'scher Mechanik zeigt auf, wie lebensweltliches Lernen möglich ist: Das Maculaorgan signalisiert Schwer- und Trägheitskräfte zugleich. Dadurch stabilisiert es den lebensweltlichen und sogar existenziell wichtigen aufrechten Gang zugleich gegenüber Schwer- sowie Trägheitskräften.

Diese Stabilisierung funktioniert nur durch Signalverarbeitung im beschleunigten Beobachter. Daher können die Lernenden die Newton'sche Mechanik erst dann auf ihre existenzielle Lebenswelt anwenden, wenn sie diese auf beschleunigte Beob-

achter anwenden können. Das beinhaltet Trägheitskräfte oder praktisch gleichwertige Konstrukte.

Aus Sicht der lebensweltlichen Erfahrung der Zentrifugalkraft und anderer Trägheitskräfte ist die Grundgleichung der Mechanik ein Paradoxon (BROCKHAUS, 1998). Aus Sicht der Grundgleichung der Mechanik ist die lebensweltliche Erfahrung der Zentrifugalkraft ein Paradoxon (BROCKHAUS, 1998). Lernende können derartige Paradoxa vermeiden, indem sie erkennen, dass die Trägheitskraft entgegengesetzt zur beschleunigenden Kraft gerichtet ist.

3.2 Umgang mit den Paradoxa

Auslassen: Verbreitet ist das Weglassen der Thematik Zentrifugalkraft und Trägheitskraft (CHROST et al., 2007). Das lässt sich gut durch das Zeitmanagement begründen, hilft den Lernenden aber nur bedingt.

Wegdefinieren: Verbreitet ist es, Trägheitskräfte als Scheinkräfte abzutun (BOYSEN et al., 1997). Damit werden die lebensweltliche Erfahrung sowie der permanente und für den existenziell wichtigen aufrechten Gang wesentliche Sinneseindruck abgewertet. Das erscheint kaum überzeugend.

Klären: Die Paradoxa können im Unterricht geklärt werden, indem zwischen dem ruhenden Beobachter als altersgerechter Variante eines Inertialsystems und dem beschleunigten Beobachter als altersgerechter Variante eines beschleunigten Systems unterschieden wird. Damit lenkt das Paradoxon auf die Wahrheit hin, dass viele physikalische Gesetze auf ein Bezugssystem bezogen sind. Nur so erfüllt das Paradoxon seine Aufgabe (BROCKHAUS, 1998). In Teil 2 des Beitrags wird gezeigt, wie ein derart klärender Unterricht die Schülerinnen und Schüler begeistert, zeiteffizient ist und zugleich zu hervorragenden Klausurergebnissen führt.

3.3 Ausblick auf die Präsentation des Unterrichtsversuchs

In einem weiteren Heft dieser Zeitschrift wird im zweiten Teil des Beitrags ein Unterrichtsversuch vorgestellt, bei dem die Schüler lernten, ihre Sinneseindrücke mit der Newton'schen Mechanik sachgerecht zu vernetzen. Diese Sequenz ist Teil der Unterrichtseinheit (UE) »Newton'sche Mechanik« und wird in Niedersachsen im G8-System in der Klassenstufe 10 am Gymnasium behandelt, im G9-System wurde die gleiche UE in Klassenstufe 11 bearbeitet. Die UE beginnt mit einer Sequenz »Kinematik«. In einer zweiten Unterrichtssequenz wurde die »Physik der drei Newton'schen Axiome in Inertialsystemen« behandelt. In der dritten Sequenz »beschleunigte Systeme« vernetzen die Schüler ihre Sinneseindrücke zur Beschleunigung mit der Newton'schen Mechanik. Diese Sequenz ist für die Lernenden sehr attraktiv, weil sie Trägheitskräfte bei Kreisbewegungen, beim freien Fall und bei Linearbeschleunigungen selbst erleben und messen. Dabei erklären sie sowohl das Zustandekommen der Beschleunigungen und Kräfte als auch das Zustandekommen der Sinneseindrücke.

Literatur

- BAYAER, R. u.a. (1997). *Impulse Physik 2, Klasse 11*. Stuttgart: Klett.
- BIRBAUMER, N. & SCHMIDT, R. (1991). *Biologische Psychologie*. Berlin: Springer.
- BOYSEN, G., HEISE, H., LICHTENBERGER, J., SCHEPERS, H. & SCHLICHTING, H.-J. (1997). *Physik Oberstufe Ausgabe A Band 1*. Berlin: Cornelsen.
- BROCKHAUS GMBH (1998). *Brockhaus – die Enzyklopädie*. Band 16, 20. Auflage, S. 555.
- CARMESIN, H.-O. (2001). Einführung des Energiebegriffs mit Hilfe menschlicher Sinnesorgane. In: Deutsche Physikalische Gesellschaft, *Tagungs-CD Fachdidaktik Physik*, 2001.
- CARMESIN, H.-O. (2004). Messung von Beschleunigungen mit einer Bogenwasserwaage im Physikunterricht einer 11. Klasse. In: NORDMEIER, VOLKER; OBERLÄNDER, ARNE (Hrsg.): *Tagungs-CD Fachdidaktik Physik*. ISBN 3-86541-066-9.
- CHROST, G., GEHRMANN, K., MUNDLOS, B., RODE, M. & SCHLOBINSKI-VOIGT, U. (2007). *Kerncurriculum für das Gymnasium, Schuljahrgänge 5 –10, Naturwissenschaften*. Hannover: Niedersächsisches Kultusministerium.
- GALILI, I. & KAPLAN, D. (2002). Die Schülerinterpretation – Orientierung einer Wasseroberfläche und Trägheitskräfte im Physik-Lehrplan. *PdN. Physik in der Schule*, 2-11.
- HATTIE, J. (2012). *Visible Learning for Teachers*. London: Routledge, 62.
- Kircher, E., Girwidz, R. & Häußler, P. (2001). *Physikdidaktik*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 55.
- MINISTERIUM FÜR SCHULE UND WEITERBILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG (1999). *Richtlinien und Lehrpläne für die Sekundarstufe II – Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen*. Physik. Düsseldorf.
- SCHMIDT, R. & THEWS, G. (1995). *Physiologie des Menschen*. 26. Aufl. Berlin: Springer.
- VOGEL, H. (1977). *Gerthsen – Physik*. 13. Aufl. Berlin: Springer, 39-40.
- ZDARZIL, H. (1978). *Pädagogische Anthropologie*. 2. Aufl. Graz: Styria, 249-251.
- DR. HANS-OTTO CARMESIN studierte in Mainz, habilitierte in Bremen, unterrichtet seit 1999 Physik sowie Mathematik am Gymnasium Athenaeum in Stade und leitet die dortige Sternwarte. Er ist Fachleiter für Physik am Studienseminar in Stade und erhielt den Klaus von Klitzing Preis sowie den Preis der Stiftung Niedersachsen Metall für sein Engagement in den Bereichen Fachdidaktik, Jugend forscht und Schüler-Ingenieur-Akademie.
Anschrift: Harsefelder Straße 40, 21680 Stade,
Hans-Otto.Carmesin@t-online.de