

Trägheitskräfte im Mechanikunterricht?

Thomas Wilhelm

Beschleunigungssensoren sind heute in Technik und Alltag weit verbreitet. Es gibt Beschleunigungssensoren, die das Auslösen eines Airbags steuern oder die Festplatte des Laptops bei Stürzen zur Vermeidung von Beschädigungen abschalten, und Beschleunigungssensoren zur Steuerung moderner Videospiele. In Smartphones und Tablet-PCs werden Beschleunigungssensoren in verschiedensten Apps genutzt. Für den Physikunterricht sind Beschleunigungssensoren in zweierlei Hinsicht interessant:

1. als authentischer Anwendungskontext von physikalischen Inhalten [1] und
2. als authentisches Messgerät für physikalische Größen [2].

Alle Beschleunigungssensoren messen die Auslenkung eines Probekörpers und damit eine Kraft [1]. Immer wieder wird die Frage gestellt, welche Kraft da gemessen wird und welche Richtung diese Kraft bzw. die daraus berechnete Beschleunigung hat.

Bezugssysteme fachlich gesehen

In der Mechanik ist es wichtig, dass man sich stets bewusst ist, aus welchem Bezugssystem heraus man argumentiert. Darüber hinaus ist das die Grundlage der Speziellen Relativitätstheorie. So waren die Themen „Bezugssysteme“ und „Trägheitskräfte“ früher ein wichtiges Thema im Mechanikunterricht der Sekundarstufe II und in der Einführungsvorlesung zur Mechanik an der Universität. Das hat sich geändert, was hier begründet werden soll.

Für Newton gab es einen absoluten Raum, bezüglich dessen man alle Bewegungen beschreiben kann. Bewegungen werden bei ihm entsprechend aus der Sicht eines absolut ruhenden Beobachters beschrieben. Diesen absoluten Raum und ein ausgezeichnetes Bezugssystem gibt es zwar nicht, aber stattdessen können wir ein Bezugssystem nehmen, in dem das erste Newton'sche Axiom gilt. Es wird Inertialsystem genannt.

Für einen in diesem System ruhenden Beobachter, den wir auch als objektiv bezeichnen können, gilt nun nach dem zweiten Newton'schen Axiom das Folgende: Alle Kräfte \vec{F}_i , die auf einen Körper einwirken, müssen vektoriell addiert werden. Die Beschleunigung des Körpers ist dann proportional zu dieser Gesamtkraft (siehe Abb. 1).

Prof. Dr. Thomas Wilhelm war Gymnasiallehrer für Mathematik und Physik, promovierte an der Universität Würzburg über ein verändertes Mechanikkonzept, habilitierte dort über die Videoanalyse von Bewegungen, hatte eine Professur an der Universität Augsburg und ist nun Professor und Geschäftsführender Direktor am Institut für Didaktik der Physik der Universität Frankfurt. E-Mail: Wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Es gilt:

$$m \cdot \vec{a} = \sum_i \vec{F}_i \quad (1)$$

wobei m die Masse des bewegten Körpers und die \vec{F}_i die realen physikalischen Kräfte auf den Körper sind. Das ist die zentrale Gleichung der Newton'schen Dynamik, auch „Grundgleichung der Mechanik“ genannt. Für die Schule formuliert [3]: *Eine resultierende Kraft bewirkt eine Geschwindigkeitsänderung und jede Geschwindigkeitsänderung kommt von einer resultierenden Kraft.* Dabei gibt es drei Grundarten von Geschwindigkeitsänderungen: das Schnellerwerden, das Langsamerwerden und die Richtungsänderung.

Setzt man sich stattdessen auf den bewegten Körper und betrachtet alles aus der subjektiven Sicht des mitbewegten Beobachters in dem beschleunigten Bezugssystem, glaubt man jedoch noch eine weitere Kraft zu sehen oder zu spüren, genannt Trägheitskraft. Nach d'Alembert ist mit der Trägheitskraft $\vec{F}_{\text{Träg}} = -m \cdot \vec{a}$ die Gleichung der Mechanik (1) umformulierbar in

$$\vec{F}_{\text{Träg}} + \sum_i \vec{F}_i = 0 \quad (2)$$

wobei \vec{a} die obige Beschleunigung ist (siehe Abb. 1).

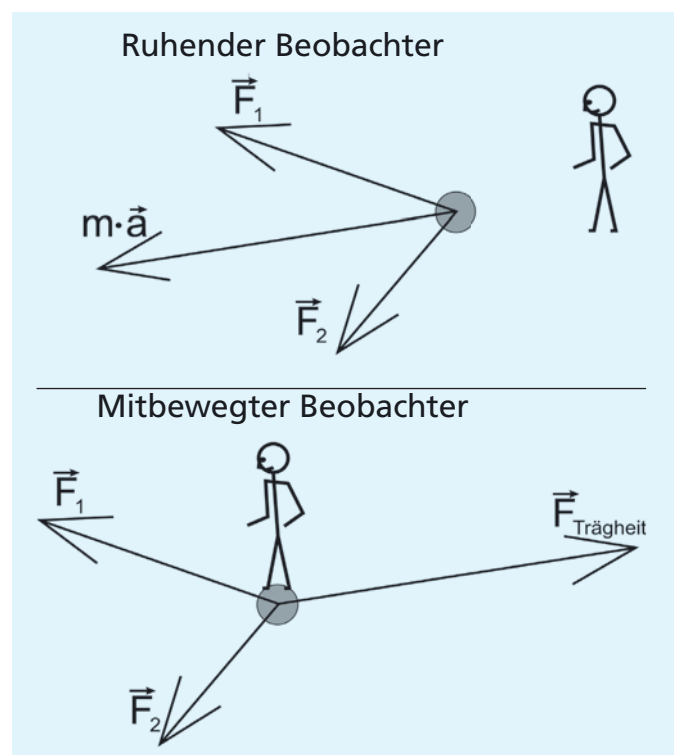


Abb. 1: Vergleich verschiedener Bezugssysteme

Diese Gleichung (2) entspricht formal einem Kräftegleichgewicht der Statik, die dynamische Situation wird damit durch eine Gleichgewichtssituation der Statik beschrieben. Man bezeichnet die Gleichung deshalb in missverständlicher Weise als „dynamisches Gleichgewicht“. Ein Vorgang der Dynamik kann somit auch mit Methoden der Statik behandelt werden, wenn Trägheitskräfte berücksichtigt werden. Manchmal wird das auch das „d'Alembertsche Prinzip“ genannt, obwohl dieses Prinzip noch mehr aussagt.

Bei geradlinigen Beschleunigungen sind die bekannten Trägheitskräfte zu berücksichtigen, die man beim Anfahren und Abbremsen erlebt. Bei rotierenden Bezugssystemen ist im schulischen Kontext nur die Zentrifugalkraft relevant (nicht die Corioliskraft). Zu all diesen Trägheitskräften gibt es aber keinen Wechselwirkungspartner, also keinen zweiten Körper, der eine solche Kraft auf den beschleunigten Beobachter ausübt und auf den selbst die betragsgleiche Kraft ausgeübt wird. Da eine Trägheitskraft also keine Kraft im Sinne der Newton'schen Axiome ist, wird sie als Scheinkraft bezeichnet.

Beispiel Kreisbewegung

Beide Beschreibungen sind äquivalent und physikalisch richtig. Als Beispiel sei eine Kreisbewegung eines Körpers mit konstantem Tempo betrachtet. Nach Newton ist die Bewegung von außen von einem ruhenden Punkt aus zu betrachten. Aus dieser objektiven Sicht stellt man als Bahnkurve des Körpers einen Kreis fest und sieht, dass sich die Geschwindigkeit permanent ändert, nämlich ihre Richtung. Diese Beschleunigung ist durch eine Kraft auf den Körper möglich, die immer nach innen, senkrecht zur Bewegungsrichtung wirkt. In Abb. 2 ist dies eine Zugkraft, die der Pflock über das Seil auf den Körper ausübt – unnötigerweise wird sie auch Zentripetalkraft genannt. Ein Ziel des Physikunterrichts ist, dass Schüler so argumentieren können.

Aus der subjektiven Sicht des mitbewegten Beobachters ist die Geschwindigkeit und die Beschleunigung null, da der Körper in diesem Bezugssystem ruht. Außerdem gibt es ein Kräftegleichgewicht: Zwei Kräfte kompensieren sich, die Zugkraft nach innen ist so groß wie die Zentrifugalkraft (Scheinkraft) nach außen, die auch Fliehkraft genannt wird (Abb. 2). Diese Argumentation verstellt allerdings das Verständnis für die Newton'sche Beschreibung der Bewegung.

Immer wieder findet man Darstellungen der Kreisbewegung, in der eine Geschwindigkeit und gleichzeitig eine Fliehkraft eingezeichnet sind. Das ist allerdings fachlich falsch, da beide in verschiedenen Bezugssystemen gelten. Im Inertialsystem gibt es keine Fliehkraft und im rotierenden Bezugssystem in diesem Fall keine Geschwindigkeit.

Natürlich muss die Zentripetalkraft von einem anderen Körper ausgeübt werden. In Abb. 2 ist das der Pflock in der Mitte, der die Kraft auf die Kugel als Zugkraft ausübt. Entsprechend übt nach dem dritten Newton'schen Axiom die Kugel auch eine Kraft auf den Pflock aus. Wir interessieren uns hier aber nur für den sich auf der Kreisbahn bewegenden Körper.

Lehre unter Berücksichtigung von Alltagsvorstellungen

Für den Physikunterricht ist nicht nur wichtig, was physikalisch richtig ist. Es muss auch überlegt werden, was das Ziel des Unterrichts ist und welche Schülervorstellungen zu berücksichtigen sind. Ein wichtiges Ziel ist sicher das Verständnis der Newton'schen Axiome, was allerdings nur schlecht gelingt. Ein viel genutztes Kriterium dafür, ob das Newton'sche Kraftkonzept verstanden wurde, ist, ob im Test „Force Concept Inventory“ [6] 60 % der Aufgaben richtig gelöst werden können. Nach einem traditionellen Mechanikunterricht der Sekundarstufe II können das allerdings nur

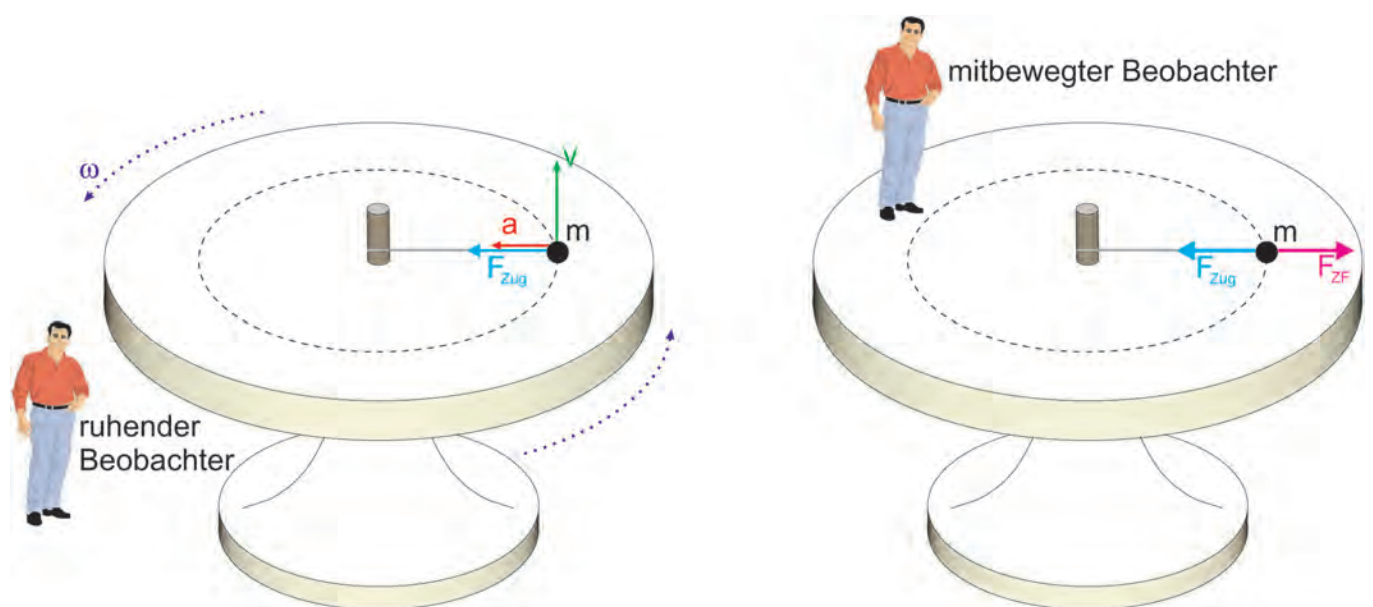


Abb. 2: Die Kreisbewegung in verschiedenen Bezugssystemen (aus [4], nach [5])

maximal 15 % der Schüler [7]. Damit kann die Newton'sche Mechanik als eines der schwierigsten Gebiete der Schulphysik bezeichnet werden.

Nun ist es so, dass die subjektive Sicht des mitbewegten Beobachters in etwa der Alltagssichtweise entspricht, während die Newton'sche Sichtweise des außenstehenden Beobachters dem diametral entgegensteht. Betrachten wir das am Beispiel eines Autos, das mit konstantem Tempo durch eine Kurve fährt (siehe Tab. 1). Im Alltag würde man sagen, es ist natürlich, d.h. normal und nicht erklärungsbedürftig, dass das Auto auf der Straße durch die Kurve fährt. Unnatürlich,

nämlich selten und erklärungsbedürftig, ist es dagegen, wenn das Auto geradeaus aus der Kurve hinausfährt. Dieses Aus-der-Kurve-Fliegen geschieht durch eine Fliehkraft. Die Newton'sche Sicht ist genau umgekehrt. Gemäß dem ersten Newton'schen Gesetz ist es natürlich und nicht erklärungsbedürftig, dass das Auto geradeaus aus der Kurve hinausfährt, was passiert, wenn keine Kraft auf das Auto wirkt. Unnatürlich und erklärungsbedürftig ist, dass das Auto auf der Straße durch die Kurve fährt. Hierzu ist eine Kraft auf das Auto nötig, die auch Zentripetalkraft genannt wird und von der Straße in Form der Haftkraft ausgeübt wird.

	Subjektive Sicht des <i>mitbewegten</i> Beobachters (\approx Alltagssichtweise)	Objektive Sicht des <i>außenstehenden</i> Beobachters (= Newton'sche Sichtweise)
Auto in der Kurve	Natürlich ist, dass das Auto auf der Straße eine Kurve fährt. Hierbei wirkt keine Kraft auf das Auto	Natürlich ist, dass das Auto geradeaus aus der Kurve hinausfährt. Hierbei wirkt keine Kraft auf das Auto (Erstes Newton'sches Gesetz).
	Unnatürlich ist, dass das Auto geradeaus aus der Kurve hinausfährt. Hierbei ist eine Kraft auf das Auto nötig (Fliehkraft).	Unnatürlich ist, dass das Auto auf der Straße eine Kurve fährt. Hierbei ist eine Kraft auf das Auto nötig (Zentripetalkraft).
Kind im Karussell	Natürlich ist, dass das Kind im Karussell im Kreis fährt. Hierbei wirkt keine Kraft auf das Kind.	Natürlich ist, dass das Kind aus dem Karussell hinausgeschleudert wird. Hierbei wirkt keine Kraft auf das Kind (Erstes Newton'sches Gesetz).
	Unnatürlich ist, dass das Kind aus dem Karussell hinausgeschleudert wird. Hierbei ist eine Kraft auf das Kind nötig (Fliehkraft).	Unnatürlich ist, dass das Kind im Karussell im Kreis fährt. Hierbei ist eine Kraft auf das Kind nötig (Zentripetalkraft).

Tab. 1: Vergleich verschiedener Sichtweisen

Ein anderes Beispiel ist ein Kind, das Karussell fährt (Tab. 1). Im Alltag würde man sagen, es ist natürlich und erwartungskonform, dass das Kind im Karussell bleibt und im Kreis fährt. Unnatürlich und (physikalisch und juristisch) erklärungsbedürftig ist es, wenn das Kind aus dem Karussell hinaus geschleudert wird. Dies wird auf eine Fliehkraft zurückgeführt. In der Newton'schen Sichtweise ist es dagegen natürlich und im Falle keiner wirkenden Kräfte normal, dass das Kind aus dem Karussell hinaus geschleudert wird. Unnatürlich und erklärungsbedürftig ist dagegen, dass das Kind im Karussell im Kreis fährt, wozu wieder eine Kraft auf das Kind nach innen nötig ist.

Um die Newton'sche Sicht zu vermitteln, ist es deshalb wichtig, viele Beispiele aus der Sicht eines außenstehenden Beobachters zu besprechen. Ein intensives Behandeln aus der Sicht des mitbewegten Beobachters kann dagegen Fehlvorstellungen noch festigen.

Übungsaufgaben

Früher wurden in Schule und Universität viele Situationen aus der Sicht des mitbewegten Beobachters betrachtet und Aufgaben in diesem Bezugssystem gelöst. Man war der Meinung, dass viele dynamische Probleme dadurch anschaulicher, verständlicher und leichter lösbar wurden. Beispiele

sind Pendel, Fliehkraftregler, Motorräder und Flugzeuge in Kurven und die Kurvenüberhöhung von Straßen. Problematisch wird es, wenn sich die Schüler und Studenten nicht mehr bewusst sind, dass sie subjektiv aus der Sicht des mitbewegten Beobachters argumentieren und über Scheinkräfte reden, d.h. wenn sie zur objektiven Sicht nach dem zweiten Newton'schen Axiom nicht mehr fähig sind.

Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Sichtweisen und unterschiedlichen Aufgabenlösungen seien zwei Beispiele diskutiert. Zunächst sei ein Wunder-Baum, d.h. ein Duftstoffverbreiter in Form eines Nadelbaumes, betrachtet, der am Rückspiegel eines Autos hängt, das durch eine lange Kurve fährt, so dass sich der Baum bereits ausgependelt hat und alle Kräfte konstant sind (siehe Tab. 2). Aus der Sicht des Autofahrers wirken auf das Pendel eine Gewichtskraft, eine Seilkraft durch die Aufhängung und die Zentrifugalkraft, die sich alle kompensieren. Nach der Newton'schen Sichtweise erzeugen dagegen die Gewichtskraft und die Seilkraft die Zentripetalkraft, die nötig ist, damit der Wun-

der-Baum mit dem Auto durch die Kurve fährt.

Beim Motorrad, das durch eine Kurve fährt (Tab. 2), wirken auf das Motorrad die Gewichtskraft, eine Kraft durch den Boden und die Zentrifugalkraft, die sich alle zu null addieren. Für den Neigungswinkel des Motorrades gilt:
 $\tan \alpha = \text{Zentrifugalkraft} / \text{Gewichtskraft}$.

Die Newton'sche Sichtweise ist jedoch, dass die Gewichtskraft und die Bodenkraft die Zentripetalkraft erzeugen, die für die Kurvenfahrt nötig ist und es gilt:

$$\tan \alpha = \text{Zentripetalkraft} / \text{Gewichtskraft}$$

Die Kraft durch den Boden setzt sich wiederum aus der senkrechten Normalkraft und der tangentialen Haftkraft zusammen, so dass es letztlich die Haftkraft ist, die die Kurvenfahrt ermöglicht.

Eine Kräftezerlegung macht die Betrachtung hier nur zusätzlich kompliziert. Kräftezerlegungen sind zudem grundsätzlich in der Schule fachlich unnötig und für die Schüler unnötig schwierig [8].

	Subjektive Sicht des mitbewegten Beobachters (\approx Alltagsichtweise)	Objektive Sicht des außenstehenden Beobachters (= Newton'sche Sichtweise)
Wunder-Baum im Auto	$\vec{F}_G + \vec{F}_{Seil} + \vec{F}_{Zentrifugal} = 0$	$\vec{F}_G + \vec{F}_{Seil} = \vec{F}_{Zentripetal}$
Motorrad in der Kurve	$\vec{F}_G + \vec{F}_{Boden} + \vec{F}_{Zentrifugal} = 0$	$\vec{F}_G + \vec{F}_{Boden} = \vec{F}_{Zentripetal}$

Tab. 2: Verschiedene Lösungen typischer Aufgaben

Empfehlungen

Wichtig ist natürlich, immer zu betonen, aus wessen Sicht man gerade argumentiert: Redet man über eine Kraft, die auf einen Körper wirklich wirkt (z.B. Zentripetalkraft) oder die der mitbewegte Beobachter zu spüren glaubt (z.B. Zentrifugalkraft). Wenn es aber ein Ziel ist, dass Lernende die Newton'sche Dynamik verstehen, sollte nicht nur bei der Erarbeitung sondern auch bei allen Anwendungsaufgaben immer ausschließlich aus der Sicht des ruhenden Beobachters argumentiert werden.

Die Erfahrungen, die wir täglich in beschleunigten Bezugssystemen machen – vor allem in Fahrzeugen, die anfahren, anhalten oder in Kurven fahren –, und die hier erlebten Kräfte werden von Schülern im Unterricht explizit angesprochen [9]. Deshalb müssen solche Situationen und diese Erfahrungen auch im Unterricht besprochen werden. Dabei ist es nicht nötig, die Begriffe „Bezugssystem“, „Inertialsystem“ und „Trägheitskraft“ einzuführen. Stattdessen unterscheidet man zwischen dem, was die mitbewegte Person glaubt, und dem, wie es tatsächlich ist und wie es als außenstehende Beobachter besser wissen. Das Kind im Karussell glaubt, eine Kraft habe es nach außen gedrückt. Tatsächlich hat aber das Karussell das Kind nach innen gedrückt. Der Autofahrer denkt, eine Kraft habe den Wunder-Baum nach außen gelenkt. Tatsächlich gab es eine Kraft zum Kreisinneren.

Aus diesen Gründen verzichten selbst moderne Universitätslehrbücher (z.B. [10, 11]) bei der Einführung der Newton'schen Axiome und ihren Anwendungen zunächst ganz auf nicht-inertiale Bezugssysteme und auf Trägheitskräfte und sollten damit ein Vorbild sein. Kreisbewegungen werden sinnvollerweise zunächst ausschließlich aus der Sicht des außenstehenden Beobachters erklärt. In [10] wird vor der Zentrifugalkraft zunächst als Missverständnis gewarnt und erst 240 Seiten später werden rotierende Bezugssysteme behandelt. In [11] kommen nichtinertiale Bezugssysteme und Trägheitskräfte in der Mechanik nicht vor, sondern nur Bezugssysteme, die sich mit konstanter Geschwindigkeit relativ zueinander bewegen. Interessant sind sie auch nur, wenn man im beschleunigten Bezugssystem eine Bewegung eines Körpers beschreiben will, der dort nicht ruht, während bei den obigen Schulbeispielen der Körper im beschleunigten Bezugssystem ruht.

Gemessen werden kann die Zentripetalbeschleunigung mit den heute in jedem Smartphone eingebauten Beschleunigungssensoren. In [1] ist dargelegt, wie deren Funktionsweise im Unterricht erklärt werden kann: Ein Probekörper, der in einem Sensor nur an einer Feder befestigt ist, wird bei der Kreisbewegung im Sensor nach außen verschoben. Die Feder des Sensors übt folglich auf den Probekörper eine Kraft nach innen aus, so dass sich dieser schließlich mit dem Sensor mitbewegt. Je größer die Beschleunigung des Sensors, desto weiter wird der Probekörper ausgelenkt und desto stärker drückt die Feder gegen diesen Probekörper nach innen. Die Auslenkung ist damit ein Maß für die Zentripetalkraft bzw. die angezeigte Zentripetalbeschleuni-

gung. Für den Physikunterricht ist es sinnvoll, diese Auslenkung als Maß für die Beschleunigung des Smartphones vorzustellen. In jedem Falle sollte man im Unterricht die Behandlung der Zentrifugalkraft vermeiden und immer wieder nach der Beschreibung aus Sicht des außenstehenden, ruhenden Beobachters fragen.

Literatur

- [1] Watzka, B., Scheler, S., Wilhelm, T. (2012): Beschleunigungssensoren. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 61, Nr. 7, S. 25–33
- [2] Lück, S., Wilhelm, T. (2011): Beschleunigungsmessung mit dem iPhone. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 60, Nr. 7, 2011, S. 27–29
- [3] Wilhelm, T. (2016): Elementarisierung in der Mechanik. Weglassen ist die Kunst. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 65, Nr. 5, 2016
- [4] Wiesner, H., Wilhelm, T., Waltner, C., Tobias, V., Rachel, A., Hopf, M. (2011): Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung, Reihe Unterricht Physik, Band 5, Aulis-Verlag
- [5] Tipler, P. A., Mosca, G., Wagner, J. (Hrsg.) (2015): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- [6] Hestenes, D., Wells, M., Swackhamer, G. (1992): Force Concept Inventory. In: The physics teacher 30, S. 141–158
- [7] Wilhelm, T. (2005): Verständnis der newtonschen Mechanik bei bayerischen Elftklässlern – Ergebnisse beim Test „Force Concept Inventory“ in herkömmlichen Klassen und im Würzburger Kinematik-/Dynamikunterricht – In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule PhyDid 2/4, <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/32>
- [8] Wilhelm, T.: Moment mal ... (14): Wie entsteht die Hangabtriebskraft? – In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 64, Nr. 2, 2015, S. 36–38
- [9] Galili, I., Kaplan, D. (2002): Die Schülerinterpretation – Orientierung einer Wasseroberfläche und Trägheitskräfte im Physik-Lehrplan. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 51, Nr. 7, S. 2–11
- [10] Giancoli, D. (2010): Physik. Lehr- und Übungsbuch, 3. aktualisierte Auflage, Pearson, München
- [11] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (2007): Physik. Wiley-VCH, Weinheim