

Messen, was man spürt?



Beschleunigungsmessungen genauer betrachtet

BÄRBEL FROMME – JAN PAUL KLINKE – MIREK HAVLIK

Beschleunigungsmessungen sind oft nicht ganz einfach zu interpretieren. Gefühlte und gemessene Beschleunigungen scheinen nicht immer übereinzustimmen. Mit einem Ansatz von Mohazzabi, der hier auf solche Messungen angewandt wird, lassen sich sowohl gemessene und gefühlte Beschleunigungen bzw. Kräfte als auch das Messprinzip der Sensoren in Einklang bringen.

1 Einleitung

Die Beschleunigung als Änderung der Geschwindigkeit ist eine für Schüler/innen eher schwer verständliche physikalische Größe, da sie nicht direkt wahrgenommen werden kann. Allerdings ist sie inzwischen mit einfachen Mitteln messbar, so dass Beschleunigungsmessungen – insbesondere in Alltagssituationen, wie bei Aufzugfahrten oder in diversen Fahrgeschäften in Freizeitparks oder auf der Kirmes – sehr populär geworden sind (als Auswahl siehe z. B. FROMME, 2009; SCHÜTTLER & WILHELM, 2011; VOGT, 2014; CARMESIN, 2014). Spätestens seit Smartphones und Tablets mit ihren eingebauten Beschleunigungssensoren für die drei unterschiedlichen Raumrichtungen und immer komfortableren Messungs-Apps Einzug in Unterricht und universitäre Physikausbildung gehalten haben, sind solche Messungen nahezu Standard geworden.

Die Messungen sind häufig jedoch nicht einfach interpretierbar, da die Messrichtungen der Beschleunigungssensoren in Fahrgeschäften nicht fest sind, sondern man es hier mit einem mitfahrenden, zumeist mitrotierten Koordinatensystem zu tun hat. In vielen Fällen sind die gemessenen Beschleunigun-

gen zwar mathematisch exakt berechenbar und es zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten (KLINKE, 2008), jedoch sind solche Berechnungen mit Schüler/innen oft kaum möglich. Teilweise recht gut interpretierbar – auch für jüngere Schüler/innen – sind viele Beschleunigungsmessungen auch im mitrotierten Koordinatensystem im Vergleich mit dem, was der Fahrgast selber spürt. Dazu muss man sich aber genau überlegen, was ein Beschleunigungssensor eigentlich misst. Zusätzlich hilfreich ist es, sich das Koordinatensystem der Sensoren während der Messung am Körper angeheftet vorzustellen.

Die Beschleunigungssensoren sind genau genommen Kraftsensoren, die die Beschleunigung aus der Kraft ermitteln, die auf eine sensorinterne bewegliche Masse wirkt. Doch welche Kräfte bzw. zugehörigen Beschleunigungen werden wirklich gemessen? Welche Konsequenzen ergeben sich für die Interpretation der Messwerte, insbesondere für die Beschleunigungsrichtung? Sind es die Trägheitskräfte, die gemessen werden? Was spüren wir selbst im beschleunigten System und wie ist dieses in Einklang mit den gemessenen Beschleunigungen zu bringen?

2 Wann spüren wir Beschleunigungen bzw. Kräfte und was zeigt der Beschleunigungssensor an?

Befindet man sich im beschleunigten System, so spricht man im Allgemeinen vom Spüren der Trägheitskräfte: Im Aufzug meint man bei der Aufwärtsbeschleunigung schwerer zu werden, das „Gewicht“ scheint zuzunehmen und eine Waage oder eine Kraftplatte zeigt diese scheinbare Zunahme auch an (FROMME, 2009). Im beschleunigenden Flugzeug oder Auto meint man nach hinten in den Sitz gepresst zu werden. Bei einem Karussell wie der Zentrifuge (Abschnitt 5) fühlt man sich von der Zentrifugalkraft gegen die Wand gedrückt. Bei Fahrgeschäften mit Pendelbewegung, wie z. B. dem Rocket (Abb. 1 und Abschnitt 5) oder einer Schiffsschaukel wird man beim Durchgang durch die Gleichgewichtslage mit einem Vielfachen des eigenen „Gewichts“ durch die Zentrifugalkraft auf den Sitz gepresst – auch hier fühlt man sich schwerer. Andererseits fühlt man sich im freien Fall schwerelos, obwohl man tatsächlich der Gravitationskraft ausgesetzt ist und mit $1g$ beschleunigt wird. Sitzen wir jedoch völlig regungslos auf einem Stuhl oder stehen ebenso regungslos auf dem Boden, so meinen wir auch hier unsere Gewichtskraft (und damit eigentlich auch die zugehörige Erdbeschleunigung) deutlich zu spüren.



Abb. 1. Fahrgeschäft Rocket (Ride-Index, 2018a, mit freundlicher Genehmigung von FRED BLACHWITZ, Team Ride-Index.).

Auf Beschleunigungssensoren ist das Koordinatensystem für die Messung im Allgemeinen aufgezeichnet (ein Beispiel siehe Abb. 2a); für das Smartphone sind die Achsen der eingebauten Sensoren ebenfalls festgelegt (Abb. 2b). Es wird ein positiver Beschleunigungswert angezeigt, wenn der Sensor in eine der Achsenrichtungen beschleunigt wird. Bei Beschleunigungen entgegen dieser Richtungen – natürlich auch beim Bremsen aus einer Vorwärtsbewegung heraus – wird der Wert negativ angezeigt. Der mitbeschleunigte Beobachter empfindet auf Grund der Trägheit jedoch eine zur angezeigten Beschleunigung entgegengesetzt gerichtete Beschleunigung. Da im Falle der linearen Beschleunigung die Messung mit der intuitiven Erwartung übereinstimmt und solche Messungen häufig auch aus dem Laborsystem heraus gemacht werden (z. B. Beschleunigung eines Wagens auf der schiefen Ebene), wird nicht über die Diskrepanz

zwischen gefühlter und gemessener Beschleunigung bzw. Kraft nachgedacht oder diese als gegeben hingenommen.

Bei der Kreisbewegung kann es dann aber zu einem – u.U. gewünschten – Denkkonflikt kommen (CARMESIN, 2014). Hier argumentieren Schüler/innen und manchmal auch noch Studierende zumeist mit der Zentrifugalkraft oder Zentrifugalbeschleunigung, die sie als einzige hier wirkende, nach außen gerichtete Kraft bzw. Beschleunigung empfinden. Tatsächlich zeigt der Sensor aber einen positiven Beschleunigungswert bei Ausrichtung einer der Sensorachsen in Richtung der *Zentripetalbeschleunigung* an, also entgegen der hier intuitiv erwarteten Beschleunigungsrichtung. Bei genauer Betrachtung im Vergleich mit der linearen Beschleunigung ist das allerdings konsequent, da auch dort die Beschleunigung in Richtung der einwirkenden Kraft und nicht in die der Trägheitskraft angezeigt wird.



Abb. 2. Lage des Koordinatensystems bei Beschleunigungsmessungen. (a) Beispiel eines Beschleunigungssensors; (b) Smartphone. Die dargestellte Messung (aufgenommen mit der App phyphox) zeigt die Beschleunigungswerte eines – nach einer anfänglichen Bewegung – ruhig auf dem Tisch liegenden Smartphones.

Schwieriger wird die Sache im unbewegt liegenden Zustand von Sensor oder Smartphone. Auf den ersten Blick würde man hier einen Beschleunigungswert von Null erwarten. Es wird jedoch die Erdbeschleunigung angezeigt, die in diesem Fall entgegengesetzt zur Sensorachse (z-Achse in Abb. 2) gerichtet ist. Anders als im bewegten Fall, bei dem der Beschleunigungswert negativ bei entgegengesetzter Richtung von Sensorachse und Beschleunigung ausgegeben wird, wird der Wert hier jedoch positiv angezeigt (Abb. 2b unten). Daraus ergeben sich dann u.U. Schwierigkeiten in der Interpretation der Messungen, wenn Erdbeschleunigung und andere Beschleunigungen addiert werden, z. B. bei der senkrechten Kreisbewegung oder der Aufzugsfahrt. Auch beim freien Fall tauchen Fragen auf: Die Messung des Beschleunigungswerts Null steht hier zwar damit in Einklang, was man fühlt (zum Beispiel im Free Fall Tower) – allerdings ist klar, dass in der Realität eine Beschleunigung von $1g$ nach unten vorliegt.

Fazit: Die gemessenen Beschleunigungen scheinen – außer beim freien Fall – den vermeintlich gespürten Beschleunigungen/Kräften entgegen gerichtet zu sein. Allerdings misst der Sensor dabei mal in Richtung der (im Laborsystem) vorliegenden Beschleunigung, bei der Erdbeschleunigung in Ruhe jedoch nicht. Wie kann man das alles physikalisch korrekt in Einklang bringen?

3 Der Ansatz von MOHAZZABI

Gefühle und gemessene Beschleunigungen/Kräfte lassen sich in Einklang bringen, wenn man sich von der Sichtweise verabschiedet, dass es die Trägheitskräfte sind bzw. die Gewichtskraft ist, was man spürt. Dazu ist der einfache Ansatz von PIROOZ MOHAZZABI nützlich (MOHAZZABI, 2006), der zur Betrachtung unter einem etwas anderen Blickwinkel führt. In diesem Modell wird davon ausgegangen, dass man nur *Kontaktkräfte* und damit die entsprechenden Beschleunigungen spürt, also solche Kräfte, die punktuell auf eine Stelle des Körpers durch Stauchung oder Zug einwirken. *Feldkräfte*, die auf alle Stellen des Körpers gleichartig einwirken, spüren wir hingegen nicht. Das hat zur Folge, dass wir uns im freien Fall, wenn der gesamte Körper gleichartig der Gravitationskraft ausgesetzt ist und durch sie beschleunigt wird, schwerelos fühlen. Sitzen wir jedoch vollständig bewegungslos auf einem Stuhl oder stehen auf dem Fußboden, so spüren wir die Stauchung der entsprechenden Körperpartie, also die durch Verformung der Auflagefläche auf uns ausgeübte Rückstellkraft als Kontaktkraft. Wir befinden uns im Kräftegleichgewicht aus Gewichtskraft und Rückstellkraft, bewegen uns nicht, spüren aber die zu unserer

Gewichtskraft gleich große – jedoch entgegengesetzt gerichtete – Rückstellkraft deutlich.

Bei der Kreisbewegung ist der beschleunigte Beobachter insgesamt der Zentrifugalkraft nach außen ausgesetzt, die mit der Zentripetalkraft im Gleichgewicht steht. Letztere wird z. B. durch die Rückstellkraft der Wand eines Karussell-Rotors, oder durch eine Haltekraft wie die Haftreibungskraft beim freien Sitzen auf einer rotierten Scheibe oder zusätzlich durch die eigene Körperkraft beim Festhalten mit den Armen (z. B. in Karussells auf dem Spielplatz) aufgebracht. Auch hier wirkt die Rückstellkraft oder Haltekraft wieder punktuell nur auf Teile des Körpers, die ihr direkt ausgesetzt sind, sie ist also die gespürte Kontaktkraft, während die generalisiert auf den Körper wirkende Zentrifugalkraft als Feldkraft anzusehen ist. (Unterschiede in der Zentrifugalkraft, die sich auf Grund des etwas unterschiedlichen Abstands von verschiedenen Teilen des ausgedehnten menschlichen Körpers von der Drehachse ergeben, seien hier vernachlässigt.) Im Fall der linearen Beschleunigung spüren wir die Rückstellkraft der Rückenlehne oder eine Haltekraft auf Grund der Haftreibung des Sitzes, die jeweils mit der Trägheitskraft im Gleichgewicht steht.

MOHAZZABI benutzt zur Verdeutlichung der Verhältnisse ein Modell, in dem reibungsfrei bewegliche Massen durch Federn gekoppelt sind, das sich sehr gut auch zur Veranschaulichung und zum Verständnis der Beschleunigungssensoren eignet. Man kann verstehen und zeigen, dass der Beschleunigungssensor bzw. eigentliche Kraftsensor grundsätzlich die mit Kontaktkräften assoziierten Beschleunigungen anzeigt (s. Abschnitt 4). Im Modell werden zwei verschiedene Krafteinwirkungs- bzw. Beschleunigungsformen beleuchtet: Zum einen können die

gekoppelten Massen (= verschiedene Teile des menschlichen Körpers) alle gleichzeitig durch dieselbe Kraft beschleunigt werden. Dabei kommt es zu keiner Verformung der koppelnden Federn. Dies ist zum Beispiel beim freien Fall gegeben (Abb. 3a). Zum anderen kann die Krafteinwirkung durch Druck oder Zug auf eine der Massen an den Enden erfolgen (Abb. 3b). Auch dieses führt zu einer Beschleunigung der gesamten Kette von Massen, allerdings werden dabei die Kopplungsfedern gedehnt oder gestaucht. Übertragen auf das, was der Mensch spürt, bedeutet das: Immer wenn es bei der Krafteinwirkung bzw. Beschleunigung zu einer lokalen Verformung des menschlichen Körpers (der Federn im Modell) kommt, ist die Kraft spürbar, bei generalisierter Krafteinwirkung (Beschleunigung) nicht. Das ist beim Beschleunigungssensor ähnlich.

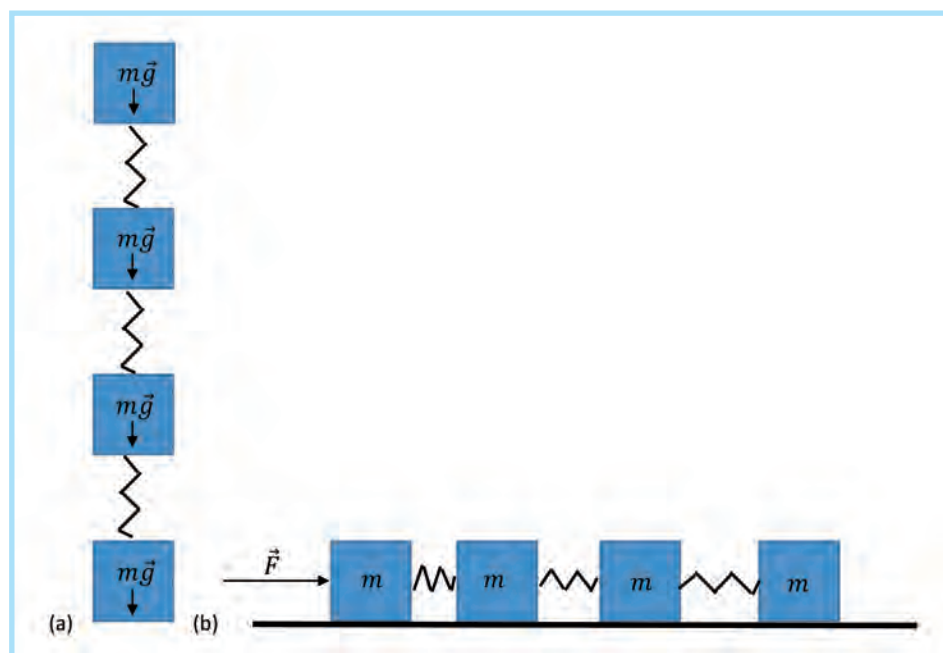
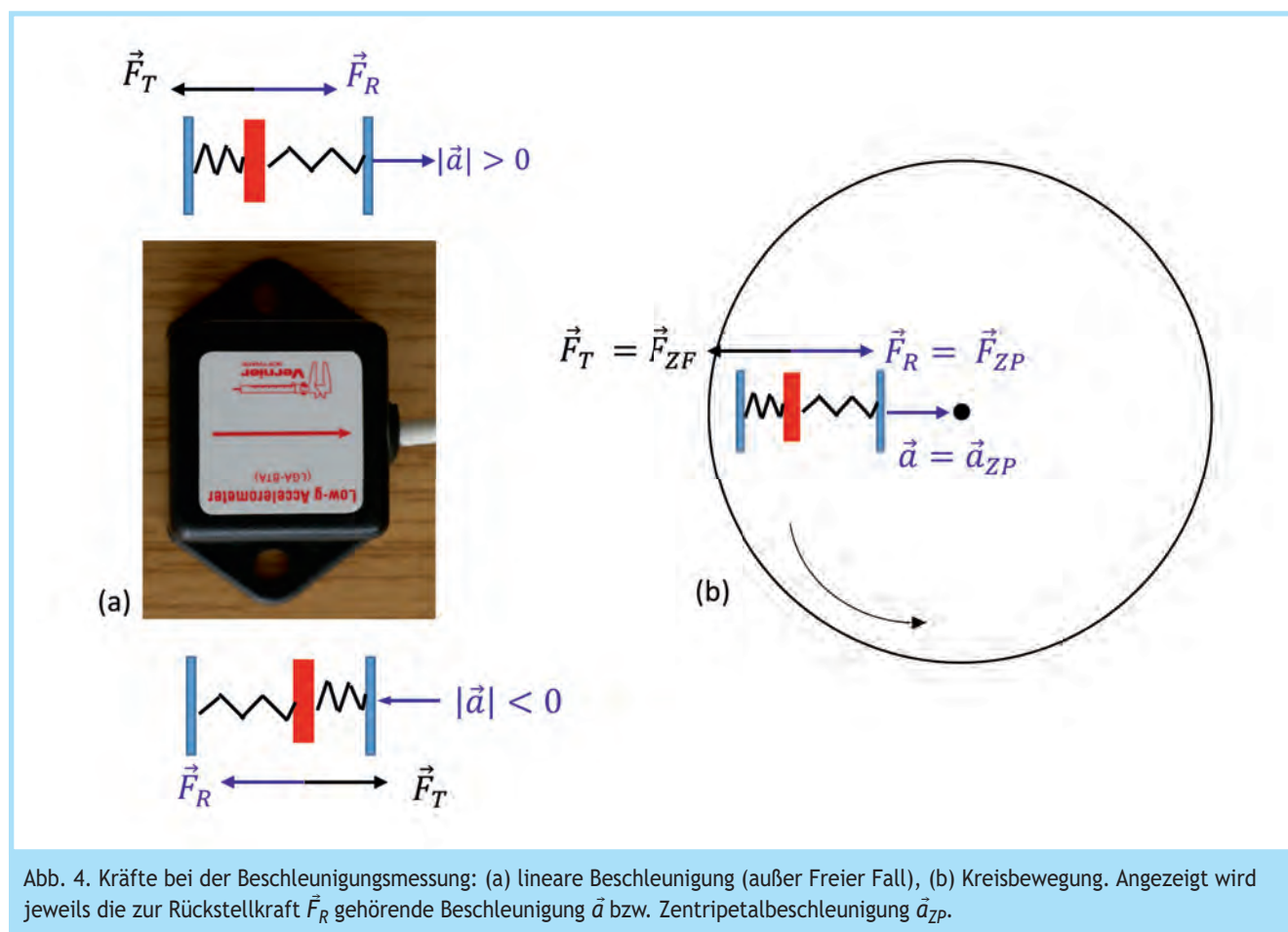


Abb. 3. (a) Feldkräfte (hier dargestellt für freien Fall) wirken auf alle Teile einer durch Federn gekoppelten Kette von Massen gleichartig ein. Die Beschleunigung führt zu keiner Verformung der Federn. (b) Kontaktkräfte, die punktuell angreifen, beschleunigen ebenfalls die gesamte Kette gekoppelter Massen, führen dabei aber zu einer Verformung der Kopplungsfedern (nach MOHAZZABI, 2006).



4 Übertragung auf den Beschleunigungssensor

Beschleunigungsmessung wird häufig kapazitiv durchgeführt; es gibt aber auch weitere Realisationsmöglichkeiten (eine Zusammenfassung findet sich z. B. in WATZKA, SCHELER, WILHELM, 2012). Bei der kapazitiven Messung, die im Folgenden modellhaft betrachtet werden soll, ist eine bewegliche Kondensatorplatte zwischen zwei fest stehenden Platten gelagert. Die bewegliche Kondensatorplatte ist federnd aufgehängt. In den verschiedenen Modellen wird das durch Befestigung an einer Blattfeder (siehe z. B. WATZKA, SCHELER, WILHELM, 2012) bzw. mit als elektrisch isoliert angenommenen Spiralfedern realisiert (beispielsweise in VOGT, 2014). Letzteres soll auch hier modellhaft angenommen werden (Abb. 4–6), da dieses mit den federgekoppelten Massen des Modells von MOHAZZABI gut übereinstimmt.

Zur Beschleunigungsmessung mit den Sensoren wird die Kapazitätsänderung auf Grund einer Abstandsänderung der beweglichen Kondensatorplatte (rot in Abb. 4–6) zu den feststehenden Platten (blau) ausgenutzt. Unter Einwirkung der Trägheitskraft im beschleunigten System (\vec{F}_T oder Zentrifugalkraft \vec{F}_{ZF} in Abb. 4) oder der Gewichtskraft im ruhenden Fall (\vec{G} in Abb. 5) wird die bewegliche Platte so weit ausgelenkt, dass Trägheitskraft oder Gewichtskraft und durch die Federn bewirkte Rückstellkraft \vec{F}_R im Gleichgewicht stehen. (In den Abbildungen sind diese Kräfte der Übersichtlichkeit wegen gegenüber der Platte etwas verschoben eingezeichnet.)

Vom Messsystem angezeigt wird grundsätzlich die mit der Rückstellkraft assoziierte Beschleunigung \vec{a} : Der Wert ist positiv, wenn die Richtung der Rückstellkraft mit der Messrichtung des Sensors übereinstimmt (Pfeil auf dem Sensor der Abb. 4 und 5; für das Smartphone siehe Abb. 2b). Negative Werte erhält man, wenn die Rückstellkraft entgegengesetzt wirkt. Das hat zur Folge, dass bei beschleunigten Bewegungen (außer beim freien Fall, s. u.) die in Sensorachsenrichtung gemessene Beschleunigung der im Laborsystem vorliegenden Beschleunigung entspricht (Abb. 4). Im Falle des ruhenden Sensors ist die in Richtung Rückstellkraft positiv angezeigte Beschleunigung jedoch der eigentlich ursächlichen Erdbeschleunigung entgegengerichtet (Abb. 5).

Wenn man sich also die Sichtweise (bzw. eigentlich „Fühlweise“) von MOHAZZABI aneignet, nämlich dass man als beschleunigter Beobachter nicht die Trägheitskraft oder Gewichtskraft sondern die durch sie bewirkten Rückstellkräfte fühlt, misst der Beschleunigungssensor in jedem Anwendungsfall genau die Kräfte bzw. Beschleunigungen, die der Mensch auch fühlt: nämlich Betrag *und* Richtung der Rückstellkraft = den Körper verformende Kontaktkraft. Wir spüren beispielsweise die Rückstellkraft, die die Rückenlehne eines Flugzeugs oder Autos bei Beschleunigung auf uns ausübt oder die Zentripetalkraft als Rückstellkraft bei der Kreisbewegung. Und wir spüren beim ruhigen Sitzen die Rückstellkraft der Sitzfläche. Tritt in einem

Karussell der Fall ein, dass wir kurzzeitig kopfüber hängen und nur von den Haltebügeln gehalten werden, so wirkt die dadurch ausgeübte Rückstellkraft nun entgegen der Achsenrichtung eines nun ebenfalls auf dem Kopf stehenden mitgeführten Sensors/Smartphone: Die gemessene Beschleunigung ist negativ.

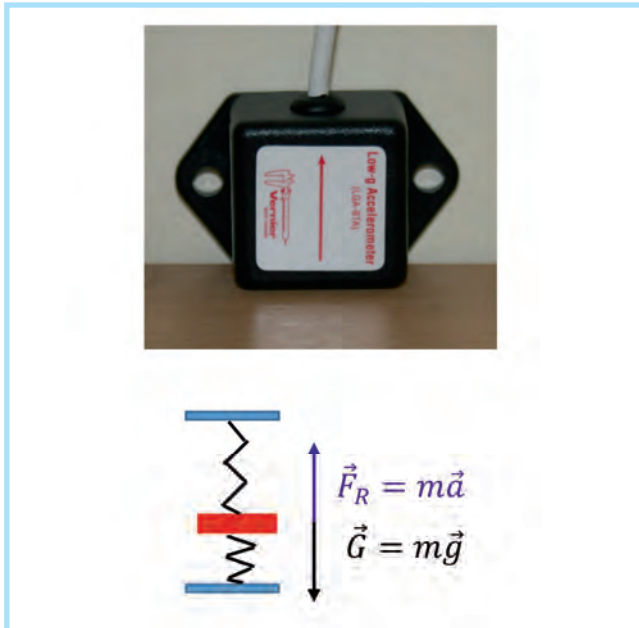


Abb. 5. In Ruhe liegender oder hängender Sensor. Die Beschleunigungsmessung erfolgt in Richtung der Rückstellkraft. Angezeigt wird daher ein zur Erdbeschleunigung entgegengesetzt gerichteter Beschleunigungswert.

Konsistent mit dem Modell und dem was man fühlt ist auch der freie Fall: Natürlich wird der fallende Körper durch die Gravitationskraft mit der Erdbeschleunigung g nach unten beschleunigt. Es handelt sich aber hier um eine Feldkraft, die auf alle Teile des fallenden Körpers gleichartig wirkt. Beim Sensor wird die bewegliche Kondensatorplatte nicht ausgelenkt (Abb. 6, im Modell Abb. 3a), entsprechend fehlen rückstellende Kontaktkräfte und die angezeigte Beschleunigung ist Null. Der Sensor fällt schwerelos – so, wie sich auch der Mensch im freien Fall fühlt.

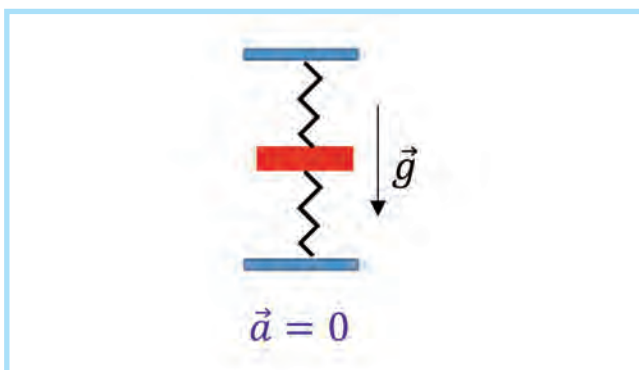


Abb. 6. Gemessene Beschleunigung im freien Fall. Alle Teile des Sensors werden gleichartig mit der Erdbeschleunigung \vec{g} beschleunigt. Die bewegliche Kondensatorplatte wird nicht ausgelenkt. Die gemessene Beschleunigung ist Null.

5 Fahrten in RoundUp und Rocket – zwei Beispiele

Beschleunigungsmessungen bieten also die Möglichkeit, genau das was der Fahrgast in einem Fahrgeschäft spürt, quantitativ zu erfassen und auch mit den physikalischen Gesetzmäßigkeiten in Einklang zu bringen. Dies wird im Folgenden an Messungen in zwei unterschiedlichen Fahrgeschäften demonstriert. Die Messungen wurden mit dem Wireless Dynamics Sensor System (WDSS) der Fa. Vernier durchgeführt, das über Bluetooth mit dem PC verbunden werden kann, sind aber auch mit dem Smartphone möglich.

Das RoundUp ist eine mit konstanter Geschwindigkeit drehende Zentrifuge, in der der Fahrgast steht (siehe z. B. Ride-Index, 2018b). Die Zentrifuge dreht sich zunächst horizontal, wobei der stehende Mitfahrer die Zentripetalkraft als Kontaktkraft durch die Rückenlehne spürt. Im weiteren Verlauf der Fahrt wird die Zentrifuge dann zunehmend schräg, bis fast senkrecht gestellt. Die Drehgeschwindigkeit ist so gewählt, dass die Zentripetalbeschleunigung ungefähr $1g$ beträgt. Gewichtskraft und Zentripetalkraft sind also betragsmäßig fast gleich groß, jedoch ändert sich die Richtung der Zentripetalkraft periodisch. Beim Durchlaufen des unteren Punktes der Bahn spürt der Fahrgast die Addition aus Zentripetalkraft \vec{F}_{ZP} und Gewichtskraft kompensierender Rückstellkraft \vec{F}_R als Kontaktkraft $\vec{F}_{Kontakt}$ (Abb. 7a). Er fühlt sich doppelt so schwer. Im oberen Punkt der Bahn wird die Zentripetalkraft fast vollständig durch die Gewichtskraft geliefert. Der Fahrgast verliert den Kontakt mit der Rückenlehne ($\vec{F}_{Kontakt} \approx 0$). Er fühlt sich nahezu schwerelos.

Im Einklang mit den gefühlten Kräften bzw. Beschleunigungen steht die Messung mit dem Beschleunigungssensor (Abb. 7b), was durch Betrachtung der Auslenkung der beweglichen Kondensatorplatte des Sensors durch die angreifenden Kräfte, einfach nachvollziehbar ist (vgl. die Abbildungen 4 – 6). Im unteren Bahnpunkt sind sowohl Zentripetalkraft als auch Gewichtskraft kompensierende Rückstellkraft gleich und in Messrichtung des Sensors gerichtet. Die gemessene Beschleunigung beträgt etwa $2g$. Im oberen Bahnpunkt sind die Kräfte auf die bewegliche Platte entgegengesetzt gerichtet. Die Platte wird kaum aus der Mittenposition ausgelenkt, die Rückstellkraft ist nahezu Null, was den Gegebenheiten beim freien Fall entspricht: Trotz Beschleunigung wird der Beschleunigungswert Null gemessen; der Fahrgast empfindet Schwerelosigkeit.

Das Rocket (Abb. 1) ist ein Fahrgeschäft mit einem komplizierteren Bewegungsablauf, da zwei verschiedene Bewegungen überlagert werden: eine Pendelbewegung bis über $\pm 90^\circ$ Auslenkung hinaus – ähnlich wie bei einer Schiffschaukel – und eine Drehbewegung um die Pendelachse. Es handelt sich also genau genommen um Kreisbewegungen um zwei verschiedene Achsen, wobei die Geschwindigkeit und damit die Zentripetal/Zentrifugalbeschleunigung der einen (der Pendelbewegung) stark variiert. Der genaue Bewegungsablauf ist in vielen Videos im Internet dokumentiert (der Bewegungsablauf ist z. B. in Rocketvideo, 2016 gut zu sehen. Der Urheber dieses Videos war nicht ermittelbar). Natürlich sollten Schüler/innen und Studierende solche Videos zur Auswertung einer konkreten Fahrt selbst

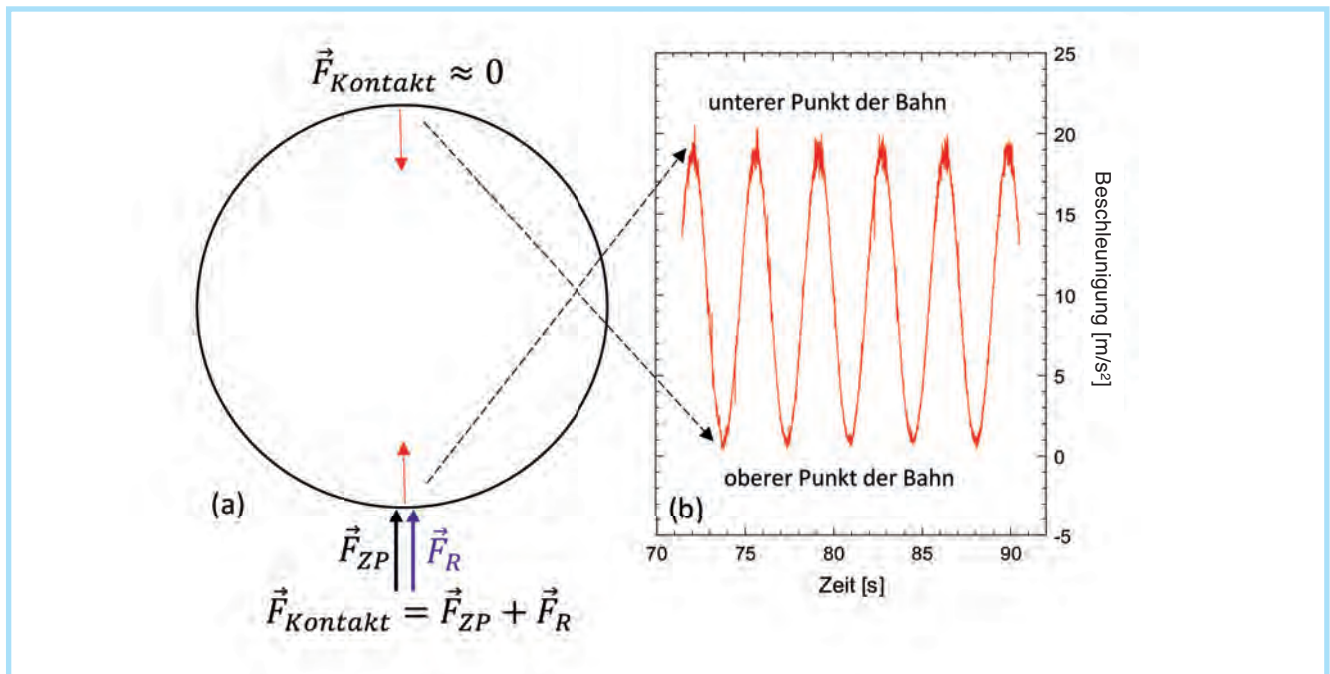


Abb. 7. Messung während der fast senkrechten Stellung des RoundUp (Zentrifuge). (a) Senkrecht stehende Zentrifuge. Die Kontaktkräfte sind eingezeichnet (schwarz: Zentripetalkraft, blau: die Gewichtskraft kompensierende Rückstellkraft). Rot: Messrichtung des Beschleunigungssensors. (b) Messung der Beschleunigung (aus: KLINKE, 2008)

erstellen, indem z. B. eine Gruppe die Beschleunigung während einer Fahrt spürt und misst und eine andere diese Fahrt filmt. Die für Messungen sinnvollen – und von uns für die Messung auch benutzten – Beschleunigungsrichtungen sind in Abbildung 8 zusammen mit einem Messergebnis skizziert.

Die Bewegung läuft so ab, dass der Mitfahrer die Gleichgewichtslage des Pendels grundsätzlich in aufrecht sitzender Position durchläuft, er hier also neben der Rückstellkraft, die die Gewichtskraft kompensiert, noch die Zentripetalkraft der Pendelbewegung als zusätzliche Kontaktkraft bzw. die zugehörigen Beschleunigungen durch die Sitzfläche (blau in Abb. 8) erfährt. Auf Grund der hohen Geschwindigkeiten treten hier die höchsten Beschleunigungen auf. Zeitweilig wird der Mitfahrer zusätzlich im Kreis rotiert. Beim Durchgang des Pendels durch die Gleichgewichtslage spürt der hier aufrecht sitzende Fahrgast dabei zusätzlich die bei dieser Rotation auftretende Zentripetalkraft als Kontaktkraft durch die Rückenlehne (rot in Abb. 8).

Mit wachsender Auslenkung des Pendels wird der Fahrgast immer weiter aus der aufrecht sitzenden Position gekippt, was zur Folge hat, dass die auf Grund seiner Gewichtskraft auftretende Rückstellkraft nicht mehr nur durch die Sitzfläche, sondern zunehmend auch durch die Rückenlehne aufgebracht wird. Beim Schwingen des Pendels auf oder über 90° gelangt der Fahrgast zunächst in liegende und dann auch mit dem Kopf nach unten hängende Position. Damit entfällt die durch die Gewichtskraft bewirkte Rückstellkraft durch die Sitzfläche. Im Umkehrpunkt des Pendels, wo auch die Zentripetalkraft bei der Schwingung entfällt, hebt der Fahrgast quasi von der Sitzfläche ab. Die gemessene Beschleunigung wird kurzzeitig Null oder sogar negativ, da nun eine entgegengesetzt gerichtete Rück-

stellkraft durch das Haltesystem (Haltebügel und Handgriffe, an denen man sich instinktiv festklammert, da man das äußerst unangenehme Gefühl hat abzustürzen) vorliegt. Auch die Kontaktkräfte/Beschleunigungen durch die Rückenlehne können nun abhängig von Rotationsgeschwindigkeit und Liege- bzw. Hängeposition des Fahrgasts Null oder sogar negativ werden, wenn der Fahrgast nicht rotiert wird. Im Umkehrpunkt der Schwingung fühlt sich der Fahrgast bei gleichzeitig fehlender Rotation dann kurzzeitig praktisch komplett schwerelos bzw. nur durch das Haltesystem festgehalten – ein unangenehmer Zustand.

In Abbildung 8 ist die Beschleunigungsmessung der ersten 3 Minuten einer Rocketfahrt dargestellt. Für solche Messungen sollte man darauf achten, dass das Messsystem/Smartphone möglichst Beschleunigungen bis ca. 5g messen kann (vorher ausprobieren) – sonst ist das System im Beschleunigungsmaximum in Sättigung, was aber nur für wenige Messwerte zutrifft. Messungen bis 4g sind zumeist schon mit preiswerten Smartphones möglich. Das Messsystem sollte fest am Körper getragen werden (z. B. in der Tasche einer entsprechenden Weste), so dass es gegen Herunterfallen und auch gegen das Verrutschen der Messachsen während der doch recht rasanten Fahrt gesichert ist.

Während der ersten knapp halben Minute der Aufzeichnung hatte die Fahrt noch nicht begonnen (Bereich 1 in Abb. 8). Abgesehen von einem Ruckeln zu Beginn der Aufzeichnung wird für die Beschleunigung senkrecht zur Sitzfläche erwartungsgemäß die Erdbeschleunigung von knapp 10 m/s^2 gemessen, die von der Rückenlehne aufgebrachte Kontaktkraft ist bei ruhigem Sitzen natürlich Null.

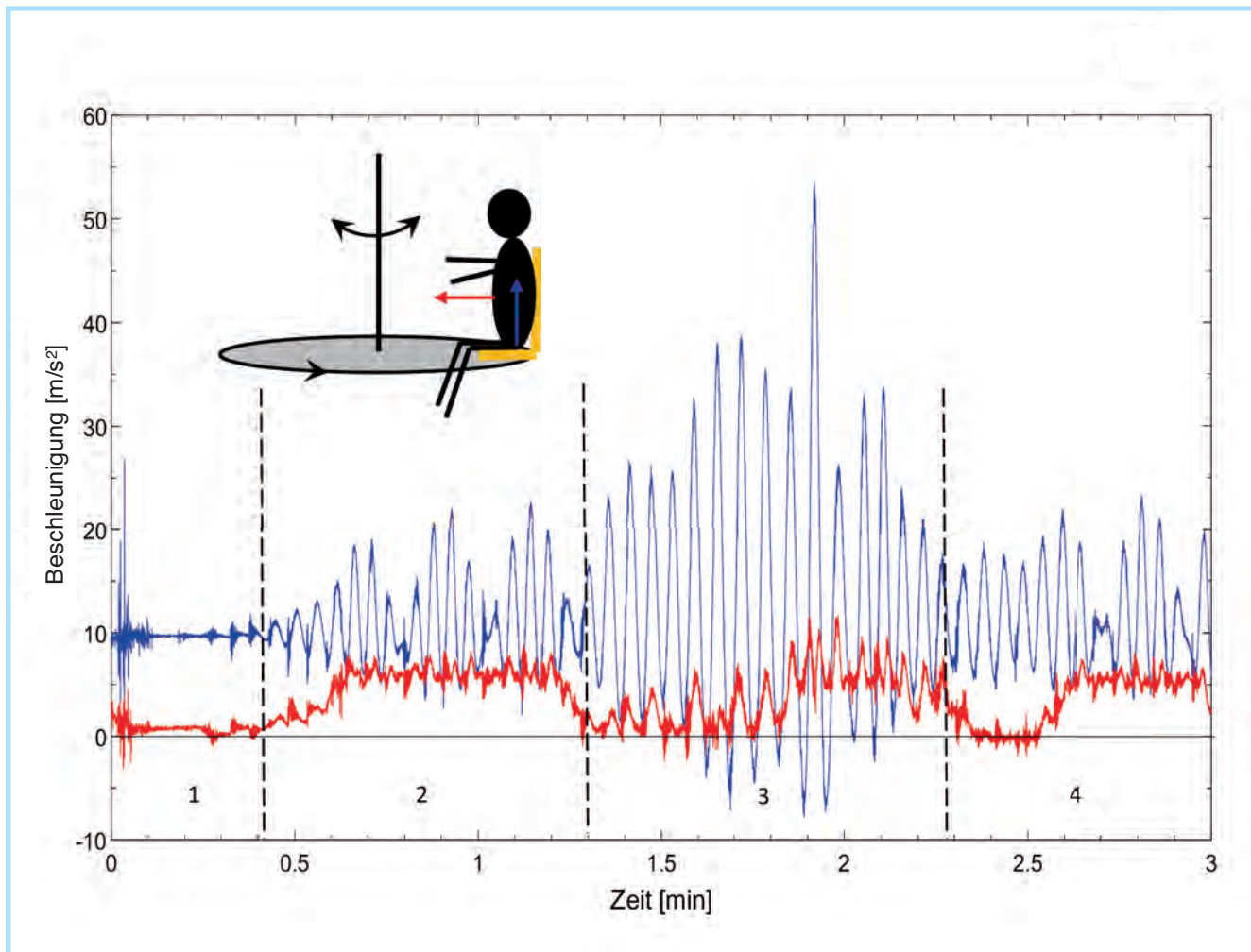


Abb. 8. Beschleunigungen während einer Fahrt im Rocket. Blau: Beschleunigung senkrecht zur Sitzfläche, rot: Beschleunigung senkrecht zur Rückenlehne. Die farbigen Pfeile im Inset entsprechen der jeweiligen Messrichtung der Beschleunigungssensoren. Die verschiedenen Phasen der Fahrt wurden in vier charakteristische Bereiche aufgeteilt.

Im Bereich zwischen etwa 0.5 und 1.3 Minuten schwingt das Rocket mit noch kleiner Amplitude (Bereich 2 in Abb. 8). Gleichzeitig beginnt die Rotation (rot). Beim Durchgang durch die Gleichgewichtslage werden bei der Schwingungsbewegung (blau) nun Beschleunigungen bis etwa $2g$ erreicht. Im Umkehrpunkt, wo die Zentripetalbeschleunigung für diese Bewegung Null ist, ist die senkrecht zur Sitzfläche gemessene Beschleunigung nun kleiner als $1g$, da in der dort nicht mehr ganz aufrechten Sitzposition die durch die Gewichtskraft bewirkte Rückstellkraft nicht mehr ausschließlich vom Sitz, sondern teilweise auch von der Rückenlehne ausgeübt wird. Dieses trägt zu den Schwankungen der in dieser Richtung gemessenen Beschleunigung bei. Die auf den Rücken wirkende Zentripetalbeschleunigung ist im Mittel insgesamt kleiner als $1g$ ($6 - 7 \text{ m/s}^2$) und daher verglichen mit der Beschleunigung, die durch Kontaktkräfte auf die Sitzfläche einwirkt, deutlich geringer. Trotzdem spürt man die durch die Rückenlehne ausgeübte Kontaktkraft sehr deutlich, denn die Beschleunigung ist hier deutlich größer als die in der Startphase eines Airbus A320, die im Maximum $0.3g$ allenfalls unwesentlich überschreitet, wie von uns gemessen wurde.

Zwischen ca. 1.3 und 2.3 Minuten liegt die Phase heftigster Schwingung des Rocket (Bereich 3 in Abb. 8). Hier fühlt sich der Fahrgast zunächst bei einigen Schwingungen im Umkehrpunkt (der nun dicht bei 90° liegt) praktisch schwerelos: Beide Beschleunigungskomponenten sind dort ungefähr Null, die Beschleunigung senkrecht zur Rückenlehne teilweise auch leicht negativ; der Umkehrpunkt des Pendels wurde hier also in einer mit dem Bauch nach unten hängenden Position durchlaufen. Etwa zwischen 1.6 und 2 Minuten werden Auslenkungen von über 90° erreicht – die bei weitem unangenehmste Phase der Fahrt: Der Fahrgast hängt im Umkehrpunkt quasi nach unten, die Beschleunigung senkrecht zur Sitzfläche wird nun negativ. Die Geschwindigkeit beim Nulldurchgang und damit die Zentripetalbeschleunigung werden maximal. Es wird sogar einmal eine Beschleunigung von mehr als $5g$ und damit der maximal zulässige Wert nahezu erreicht. Denn eine kurzzeitige vertikale Beschleunigung von $6g$ gilt als gesundheitlich tolerabel, mehr darf in Fahrgeschäften nicht erreicht werden (HANNEMANN, 2009; STERN, 2003). Während der heftigen Pendelbewegung wird der Fahrgast auch immer wieder zusätzlich um die Pendelachse rotiert. In den Umkehr-

punkten der Pendelbewegung zwischen ca. 1.6 und 1.8 Minuten führt dieses zu einer besonders unangenehmen Position, da der Fahrgast hier auch den Kontakt zur Rückenlehne verloren hat und sich daher im freien Fall wähnt, der nur durch die Rückhaltebügel/Haltegriffe aufgehalten wird. Anschließend folgt wieder eine Pendelbewegung mit geringerer Amplitude bei der teilweise die Rotation fehlt (Bereich 4 in Abb. 8).

Die Pendelbewegung mit ihren verschiedenen Beschleunigungen bei verschiedener Amplitude kann durch Schwenken eines Smartphones in der Hand einfach simuliert werden. So können Schüler/innen die verschiedenen Phasen der Rocketfahrt und die dabei gespürten Beschleunigungen einfach nachvollziehen, was nach der doch recht aufregenden Fahrt zur Verdeutlichung nötig sein könnte. Eine solche Simulation zeigt Abbildung 9. Das Smartphone wurde mit dem Display nach oben (z-Achse nach oben gerichtet, vgl. Abb. 2b) gehalten und am ausgestreckten Arm hin und her geschwungen, wobei bewusst bestimmte Bewegungsphasen gewählt wurden. Man sieht zum Beispiel deutlich, dass bei einer Auslenkung von 90° die Beschleunigung in den Umkehrpunkten erwartungsgemäß Null ist (Bereiche a in Abb. 9). Bei der realen Fahrt (Abb. 8) liegt diese Auslenkung in den Bereichen um 1.4 und 2.1 Minuten vor. Bei Auslenkungen weit über 90° (z-Achse zeigt dann praktisch nach unten) ergibt sich – wie bei der realen Fahrt im Bereich zwischen 1.6 und 2 Minuten (Abb. 8) – die Vorzeichenumkehr in den Umkehrpunkten der Pendelbewegung und es werden Beschleunigungen von etwa $-1g$ gemessen (Bereich b in Abb. 9).



Abb. 9. Simulation markanter Phasen der Fahrt mit dem Rocket durch Pendelbewegung eines Smartphones am ausgestreckten Arm (App phyphox). a: Auslenkung bis 90° , b: Auslenkung weit über 90° .

6 Schlussbemerkung

Die Differenzierung zwischen Kontakt- und Feldkräften erlaubt es, gemessene Kräfte und Beschleunigungen mit den gespürten in Einklang zu bringen und erleichtert so die Interpretation von Messwerten bei komplexeren Bewegungen. Hiermit verbunden ist jedoch ein Wechsel der Perspektive, ein „gefühlmäßiges Umdenken“: weg vom Spüren der Trägheitskräfte, hin zum Spüren von Rückstellkräften. Dieses ist zunächst nicht ganz einfach und bedarf der Übung, ist aber durchaus lohnend.

Literatur

- CARMESIN, H.-O. (2014). Trägheitskraft – Eine spannende Brücke zwischen lebensweltlichen Sinneseindrücken und der Newton'schen Mechanik – Teil 2/1. *MNU*, 67(5), 282–288.
- FROMME, B. (2009). Physik im Aufzug. *MNU*, 62(5), 280–284.
- HANNEMANN, K. (2009). Wieviel g kann ein Mensch aushalten? <https://www.ds.mpg.de/131983/18> (09.01.2019).
- KLINKE, J. P. (2008). Möglichkeiten zur Modellierung und Untersuchung von Rotationsbewegungen und deren Überlagerungen in populären Fahrgeschäften. <https://www.physik.uni-bielefeld.de/didaktik/Examensarbeiten/Masterarbeit%20Klinke.pdf> (09.01.2019).
- MOHAZZABI, P. (2006). Why Do We Feel Weightless in Free Fall? *The Physics Teacher*, 44, 240–242.
- Ride-Index (2018a). <http://www.ride-index.de/include.php?path=content/content.php&contentid=1590> (09.01.2019).
- Ride-Index (2018b): <http://www.ride-index.de/include.php?path=content/content.php&contentid=502> (09.01.2019)
- Rocketvideo (2016). <https://www.youtube.com/watch?v=384Nu-rgtm0> (09.01.2019).
- SCHÜTTLER, M., WILHELM, T. (2011). Physik im Freizeitpark – Möglichkeiten und Vergleich von Videoanalyse, Beschleunigungsmessung und GPS. *PhyDidB – Didaktik der Physik – DPG Frühjahrstagung Münster 2011*. <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/238> (09.01.2019).
- STERN (2003), Schneller als das Spaceshuttle. <https://www.stern.de/reise/g-kraefte-schneller-als-das-spaceshuttle-3514224.html> (09.01.2019).
- VOGT, P. (2014). Tablet-Computer als Mess- und Experimentiermittel im Physikunterricht. In: A. BRESGES, A. PALLACK, L. MÄHLER (Hrsg.): *Unterricht mit Tablet-Computern lebendig gestalten*. *MNU Themenspezial MINT*, 66–78.
- WATZKA, B., SCHELER, S., WILHELM, T. (2012). Beschleunigungssensoren. *PdN-PhiS*, 6(7), 25–33.
- PROF. DR. BÄRBEL FROMME, Universität Bielefeld, Fakultät für Physik, Physik und ihre Didaktik, Universitätsstr. 25, 33615 Bielefeld, bfromme@physik.uni-bielefeld.de
- JAN PAUL KLINKE, Lehrer am Städtischen Gymnasium Gütersloh, Absolvent der Universität Bielefeld
- MIREK HAVLIK, Lehrer im Vorbereitungsdienst, Absolvent der Universität Bielefeld