

Ein Messsystem für den Physikunterricht zur direkten und genauen Bestimmung der zeitlichen Verläufe von Beschleunigungen

Uwe Hoffmann und German Hacker
Physikalisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg, Abt.
Didaktik der Physik, Staudtstr. 7, 91058 Erlangen
(Eingegangen: 26.08.2002; Angenommen: 18.01.2003)

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein von uns entwickeltes Messsystem vorgestellt, mit dem Beschleunigungen direkt und einfach gemessen und per Funk an einen Computer zur Auswertung gesandt werden können. Die Beschleunigungswerte werden dabei zeitabhängig mit einer Genauigkeit im 10^{-2} g-Bereich aufgenommen. Es sind Aufnahmezeiten bis in den Bereich von 10^2 Messwerten pro Sekunde möglich, wodurch auch der zeitliche Verlauf einer Bewegung mit sich entsprechend schnell ändernder Beschleunigung aufgezeichnet werden kann.

Das Kernstück des Systems ist der von der Firma Analog Devices entwickelte Beschleunigungssensor ADXL-202/210, der die x- und y-Komponente einer Beschleunigung \vec{a} bestimmen kann. Er wurde von uns mit einer Elektronik zur Weiterverarbeitung, Speicherung und drahtlosen Übertragung der Messdaten versehen. Mit Hilfe einer zusätzlich entwickelten Software wird die Aufnahme der Daten durch den Computer gesteuert und praktisch in Echtzeit grafisch und numerisch ausgegeben.

1. Einführung - Beschleunigungsmessung im Physikunterricht

Im Physikunterricht wird der zeitliche Verlauf der Beschleunigung einer Bewegung meist indirekt aus der zeitabhängigen Funktion der Geschwindigkeit oder des Ortes gewonnen. Typischerweise werden hierfür Tachogeneratoren oder Speichenräder in Verbindung mit einem Messwerterfassungssystem eingesetzt. Die Bestimmung der Beschleunigung erfolgt dabei nur für eine Richtung. Eine weitere Möglichkeit zur indirekten, zeitabhängigen Beschleunigungsmessung ist die Videoanalyse (vgl. [Hil00]). Mit ihr lassen sich die Komponenten einer Beschleunigung \vec{a} in x- und y-Richtung untersuchen. Außerdem können mit diesem Verfahren sehr viele alltägliche Bewegungen – sofern sie nicht schneller ablaufen, als es die Bildrate von 25 Bildern/s erlaubt – analysiert werden. Da hier die zeitabhängige Ortsfunktion die Grundlage der indirekten $\vec{a}(t)$ -Bestimmung bildet, liegt die effektive zeitliche Aufnahmezeit für die Beschleunigungswerte unter dem Wert von 25/s.

Trotz dieser etablierten experimentellen Möglichkeiten¹⁾ entziehen sich nach wie vor zahlreiche Bewegungsvorgänge – vor allem viele alltägliche – auf Grund ihrer Komplexität und ihrer Schnelligkeit weitgehend einer schülergemäßen Elementarisierung und damit der Behandlung im Physikunterricht. Alltägliche Bewegungsabläufe, bei denen zeitlich sich schnell ändernde Beschleunigungen auftreten, z.B. der Aufprall eines Sturzhelmes auf dem Boden, können nicht oder nur mühsam genauer untersucht werden.

Mit Hilfe des ADXL-202/210-Beschleunigungssensors von Analog Devices (vgl. [Ana02]), dem Kern-

stück des von uns entwickelten Messsystems, wird nun genau dies möglich. Mit einer Aufnahmezeit von mindestens 60 Messwerten pro Sekunde und einer Genauigkeit des Absolutwerts der Beschleunigung im Bereich von 10^{-2} g (auch im Folgenden steht 1 g für die Erdbeschleunigung, nicht für 1 Gramm!) werden zahlreiche alltägliche Bewegungen für die Untersuchung im Physikunterricht zugänglich. Physikalische Fragen zum Alltag der Schüler wie z.B. „In welchem Maße federn weiche Schuhsohlen besser als harte?“ oder „Welche maximale Bremsbeschleunigung kann man mit einer hydraulischen Fahrradbremse erreichen?“ können mit unserem Messsystem im Unterricht sofort und schnell experimentell umgesetzt und beantwortet werden.

2. Physikalisch-technisches Messprinzip des ADXL-Beschleunigungssensors

Beim ADXL-202/210 handelt es sich um einen integrierten Schaltkreis, der einen mikromechanischen Aufbau zur Messung der x- und y-Komponente einer Beschleunigung \vec{a} inklusive elektronischer Signalaufbereitung enthält. Er ist eine Entwicklung für den Bereich der Sicherheitstechnik und soll helfen, z.B. kleinste Stöße auf Gegenstände zu registrieren.

Der Messung der Beschleunigung durch den ADXL liegt zu Grunde, dass ein kleiner Probekörper („seismische Masse“) in zwei senkrecht zueinander stehenden Raumrichtungen (x und y) durch eine von außen wirkende Kraft aus seiner Ruhelage heraus verschoben wird. Durch Gegenkräfte in x- und y-Richtung, die durch federnde Elemente erzeugt werden, stellt sich je nach Kraft eine Ortsauslenkung

(x, y) des Probekörpers ein, die proportional zur wirkenden Kraft $\vec{F} = (F_x, F_y)$ ist. Mit dem zweiten newtonschen Gesetz $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ folgt hieraus unmittelbar die Beschleunigung $\vec{a} = (a_x, a_y)$. Zur Bestimmung der Ortsauslenkung sind am Probekörper parallel zu den Richtungen x und y jeweils Plättchen angebracht, deren Position sich bei einer Auslenkung zwischen je zwei von außen heranragenden Kondensatorplatten verschiebt. Eine an den Kondensatorplatten anliegende elektrische Wechselspannung wird hierdurch messbar verändert. Die sich anschließende integrierte Auswertelektronik gibt dann die Werte der Beschleunigungen wahlweise in Form analoger oder digitaler elektrischer Signale aus.

Genauigkeit der Messung der Beschleunigungswerte und zeitliches Auflösungsvermögen

Der Typ ADXL-202 kann Beschleunigungen bis zu einem Wert von $\pm 2 \text{ g}$, der ADXL-210 bis zu $\pm 10 \text{ g}$ messen ($1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^2$).

Auf Grund verschiedenster Anwendungsmöglichkeiten der Beschleunigungsmessung kann durch eine äußere Beschaltung des ADXL die Anzahl der durch ihn pro Sekunde und Richtung aufzunehmenden Messwerte (die sog. Abtastrate) eingestellt werden. Neben der durch die Abtastrate bestimmten zeitlichen Auflösung ist die Auflösung bzw. Genauigkeit der Messung der Beschleunigungswerte wichtig. Sie unterliegt einem internen, technisch bedingten Messfehler des ADXL, der mit der Abtastrate verknüpft ist. Er wird umso geringer, je kleiner die Abtastrate ist. Die beschreibenden Daten und Zusammenhänge können dem Datenblatt des ADXL (vgl. [Ana02]) entnommen werden. Ein typischer Wert für die Auflösung einer Beschleunigung, der vom Hersteller empfohlen und bei unserem System eingestellt wurde, beträgt $5 \cdot 10^{-3} \text{ g} = 5 \text{ mg} \approx 0,05 \text{ m/s}^2$ bei einer Abtastrate von mindestens $60/\text{s}$. Diese Genauigkeit der Beschleunigungswerte reicht zwar nicht aus, um z.B. die Gezeitenwirkung durch den Mond auf der Erde zu registrieren (Bereich 10^{-6} g), sie entspricht aber z.B. der Zentripetalbeschleunigung, der ein Radfahrer bei einer Geschwindigkeit von 18 km/h beim Durchfahren einer Kreisbahn mit einem Radius von 500 m (!) ausgesetzt ist. Für zahlreiche schulische Zwecke ist sie daher völlig ausreichend.

Die effektive Genauigkeit der Aufnahme der Beschleunigungswerte durch das Messsystem wird aber nicht nur durch den ADXL bestimmt. Die Weiterverarbeitung des elektrischen Signals nach dem ADXL verschlechtert die Auflösung der Beschleunigungswerte zusätzlich, allerdings wiederum in einem für Messungen im Rahmen des Physikunterrichts unerheblichen Maß.

Wir benutzen das vom ADXL ausgegebene digitale, pulswidenmodulierte Signal (PWM-Signal) zur Weiterverarbeitung der Messdaten. Dieses Signal

wird von einem Mikro-Controller (Typ PIC16F84) verarbeitet. Hierzu misst dieser zum einen die Zeit zwischen dem Springen des Signals von Low auf High und dem anschließenden Rücksprung sowie die Zeit zwischen zwei Sprüngen von Low auf High (Gesamtdauer eines Pulses; vgl. Abb.1). Je genauer der Controller diese Zeiten bestimmen kann, desto genauer wird letztendlich auch der Wert der Beschleunigung zu einem bestimmten Zeitpunkt angegeben werden können. Da im Mikro-Controller 8 Bit Auflösung pro Zeitwert verwendet werden, kann die Auflösung der Beschleunigung nicht besser als ca. 16 mg sein (im Messbereich $\pm 2 \text{ g}$; $4 \text{ g} / 2^8 \approx 16 \text{ mg}$). Die Datenspeicherung bzw. Datenweitergabe an den PC, die das Messsystem leistet, wird im folgenden Abschnitt erklärt. Eine ausführliche und detaillierte Beschreibung findet man in [Hof01].

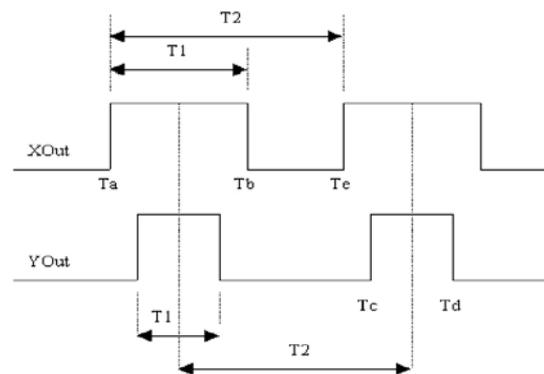


Abb.1: Dargestellt ist hier symbolisch der zeitliche Verlauf des vom ADXL ausgegebenen digitalen Signals für beide Messrichtungen (Xout und YOut). Die Information über die Beschleunigung ist durch die Pulsweitenmodulierung gegeben. Das Signal wird vom Mikro-Controller eingelesen, indem dieser zum einen die Zeit zwischen dem Springen des Signals von Low auf High und dem anschließenden Rücksprung ($T1$) sowie die Zeit zwischen zwei Sprüngen von Low auf High (Gesamtdauer eines Pulses, $T2$) misst.

3. Das Messsystem zum Beschleunigungssensor

Das von uns entwickelte Beschleunigungsmesssystem besteht aus einer sog. *Messbox*, die den Sensorbaustein ADXL enthält und der sog. *Empfängerbox* (vgl. Abb.2). Die Beschleunigungsmesswerte, die der ADXL ausgibt, können vom Messsystem in zwei Betriebsmodi weiterverarbeitet werden.

Im „Direct“-Modus werden die Daten direkt von einem FM-Funkmodul, das sich mit dem ADXL in der Messbox befindet (vgl. Abb.3), zur Empfängerbox, die an die serielle Schnittstelle (COM1/2-Port) des PC angeschlossen ist, übertragen. Die vorher aktivierte Software gibt die Daten sofort graphisch am Bildschirm – angetragen über einer Zeitachse – aus (Abb.4).

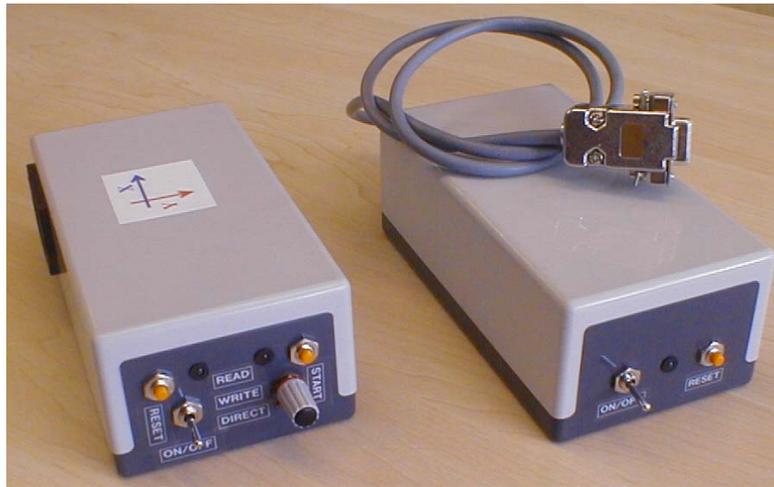


Abb.2: Die Abbildung zeigt links die Messbox mit dem Wahlschalter für die zwei Betriebsmodi („Write“ und „Direct“), sowie den Auslesemodus „Read“. Rechts ist die Empfängerbox zu erkennen mit ihrem Anschlusskabel für die serielle Schnittstelle des Computers.

Im „Write“-Modus werden die Daten in einen seriellen EEPROM-Speicher (Typ 24C65; vgl. Abb.3) geschrieben („Write“). Zu einem beliebigen Zeitpunkt nach dem Einlesen können die Beschleunigungsmesswerte dann per Funk an den Empfänger und damit den PC übertragen werden („Read“-

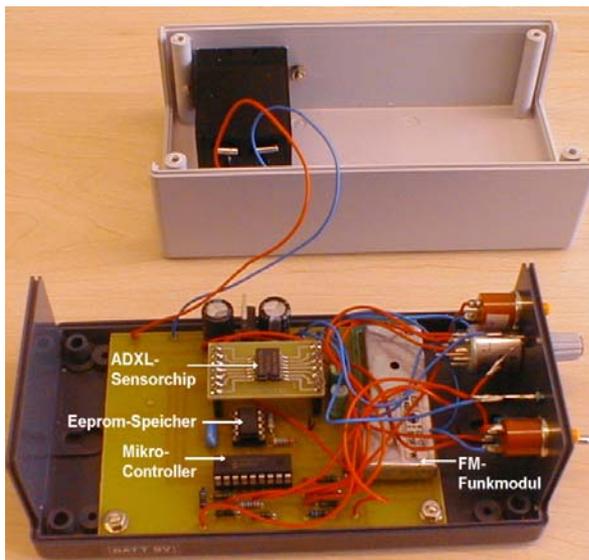


Abb.3: Zu erkennen ist die geöffnete Messbox (unten) mit den hier entsprechend beschrifteten wesentlichen Bestandteilen. Im Deckel (oben) befindet sich nur das Batteriefach.

Modus). Während des Einlesens werden auch sie am Bildschirm grafisch über einer Zeitachse sowie numerisch dargestellt (Abb.4).

Die Steuerung des Datenstromes in der Messbox übernimmt der bereits erwähnte Mikro-Controller. Dieser dekodiert das PWM-Signal des ADXL und speichert es in seinem internen Datenspeicher zwischen.

Im „Direct“-Modus oder im Auslesemodus des EEPROM-Speichers („Read“-Modus) werden die

Messwerte gemäß dem RS232-Übertragungsprotokoll (1 Startbit, 8 Datenbits, 1 Stopbit) neu kodiert. Die nun im RS232-Format vorliegenden Daten werden anschließend an das FM-Funkmodul (Abb.3) zur drahtlosen Übertragung an die Empfängerbox weitergegeben. Die Datenrate beträgt hierbei 1200 Bit/s, d.h. ca. 0,83 ms pro Datenbit. Berücksichtigt man, dass noch Kontrollbits übertragen werden, beträgt die Dauer des Sendens eines Wertepaars (a_x, a_y) durch die Funkübertragung ca. 42 ms. Zur Messung und Ausgabe des Wertepaars benötigt der ADXL hingegen bei den hier gewählten Einstellungen nur maximal 3 ms. Während der Funkübertragung können keine vom ADXL kommenden Werte eingelesen werden, sie gehen verloren. Letztendlich dauert das Messen und Übertragen eines Wertepaars etwa 45 ms. Dies entspricht einer effektiven Aufnahmezeit im „Direct“-Modus von ca. 23/s, ein Wert, der experimentell bestätigt werden konnte.

Im „Write“-Modus entfällt die sofortige und mit 42 ms pro Wertepaar relativ lang dauernde Funkübertragung zunächst. Die Daten werden hier dauerhaft mit einer Rate von 115/s bzw. ca. 8,7 ms pro Wertepaar in den EEPROM-Speicher geschrieben. Die vom ADXL ausgegebenen mindestens 60 Wertepaare pro Sekunde können so sicher abgespeichert werden, manche werden auf Grund der höheren Rate des Abspeicherns ggf. auch zweimal in den Speicher geschrieben. Die effektive Aufnahmezeit ist folglich mit 60/s mindestens etwa 2,5-mal so hoch wie im „Direct“-Modus (ca. 23/s).

Es steht ein Speicherplatz von 64 kB zur Verfügung. Dies entspricht einer maximalen Messdauer von 2,5 min bei 115 Wertepaaren, die pro Sekunde gespeichert werden. Bei einer Überschreitung dieser maximalen Messdauer wird die Messung beendet. Das Auslesen des gesamten Speichers dauert knapp 12 min.

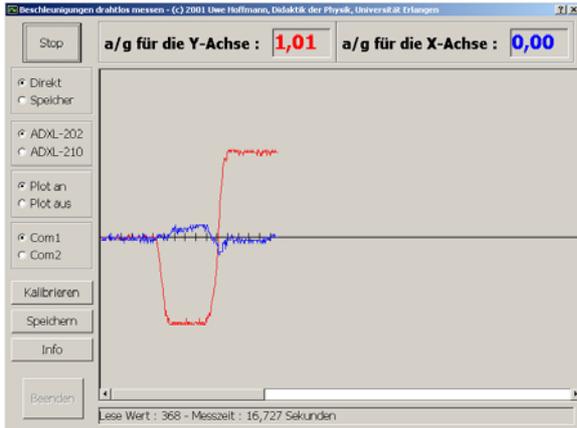
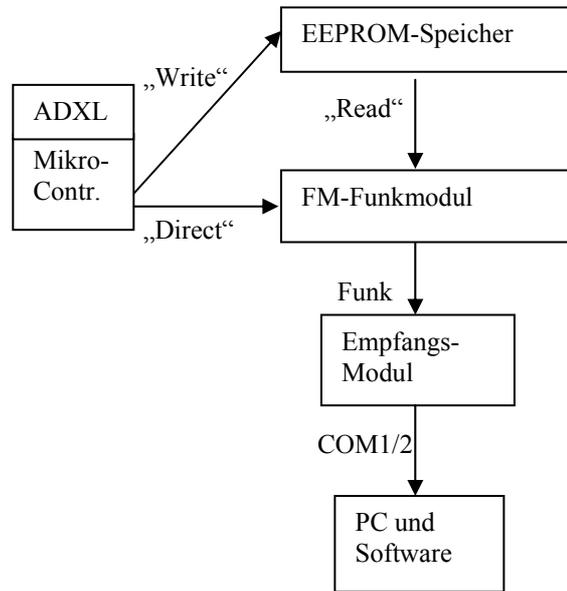


Abb.4: Die Abbildung zeigt einen Screenshot der Software-Oberfläche während einer Messung. Die aktuellen Werte der Beschleunigungen in x- und y-Richtung werden sowohl grafisch als auch numerisch ausgegeben. Die Bedienungsfunktionen am linken Rand des Fensters sind weitestgehend selbsterklärend. Sie werden in [Hof01] ausführlich beschrieben. Die Software dient der Steuerung der Datenaufnahme und -speicherung sowie der einfachen grafischen Darstellung. Eine weitergehende Bearbeitung der Daten kann mit jedem gängigen Tabellenkalkulationsprogramm vorgenommen werden. Anm.: Aufgrund der Veröffentlichung dieses Artikels im Internet wurde die farbliche Kennzeichnung der Messkurven im Monitorbild hier beibehalten. Sofern dieser Artikel ausgedruckt wird, sollte der Druck daher in Farbe erfolgen, um die Grafiken besser interpretieren zu können.

Das eigentliche Starten der Messungen in den verschiedenen Modi erfolgt jeweils in Abstimmung mit der Software durch Drücken der „Start“-Taste an der Messbox (vgl. Abb.2).

Einen Überblick über den Datenstrom bei einer Messung gibt folgendes Flussdiagramm:



Kalibrierung des ADXL vor Messungen

Vor Messungen muss der ADXL kalibriert werden, d.h. es wird bestimmt, in welcher Position für die beiden Messrichtungen der Wert Null ($a_x = 0, a_y = 0$) ausgegeben werden soll. Dies kann z.B. dann geschehen, wenn die beiden Achsen horizontal ausgerichtet sind. Wird dann eine der Achsen während einer sich anschließenden Messung vertikal ausgerichtet, wird für sie der Wert der Erdbeschleunigung 1 g angezeigt (bzw. für jede andere Ausrichtung der Betrag der vektoriellen Komponente parallel zur Gewichtskraft \vec{F}_G). Die Messbox befindet sich dabei in Ruhe (vgl. hierzu Abb.5). Würde man sie

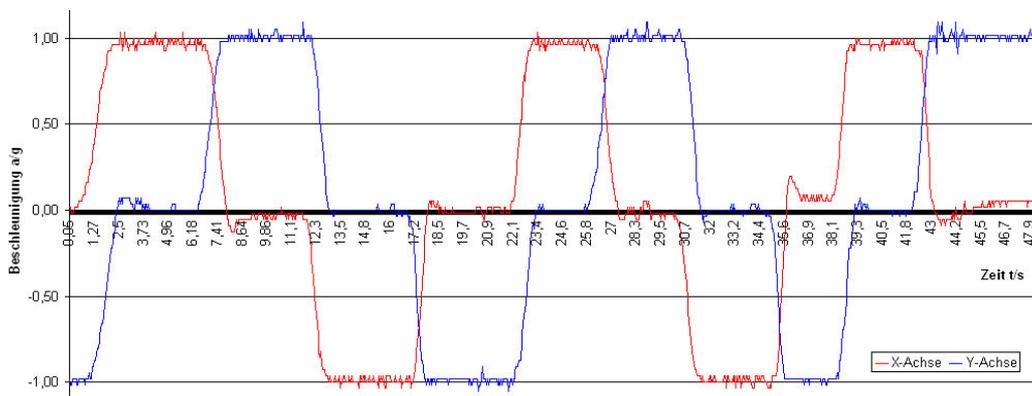


Abb.5: Das Diagramm zeigt den zeitlichen Verlauf der von der Messbox registrierten Beschleunigungen in beide senkrecht zueinander stehenden Messrichtungen (x-Achse, y-Achse). Die Kalibrierung auf Null erfolgte für beide Richtungen in der horizontalen Lage. Bei der anschließenden Messung wurde die Messbox um die horizontal gehaltene Achse gedreht, die senkrecht zu x und y steht. Die Messbox wurde immer genau dann etwa 5 s lang in Ruhe gehalten, wenn eine der Achsen x und y parallel zur vertikalen Richtung stand. Auf diese Weise folgen nacheinander die zu erkennenden Werte $+1\text{ g}$ oder -1 g , je nach Achse und Ausrichtung. Von $t = 0\text{ s}$ bis etwa $t = 22,1\text{ s}$ wurde die Messbox einmal um 360° gedreht; es schließt sich eine zweite Drehung an.

nun frei fallen lassen, würde die Anzeige auf Null zurückgehen!

Man beachte hierzu, dass der ADXL die Beschleunigungen durch die Verschiebung eines Probekörpers aus einer festen Nulllage heraus registriert. Es kann daher prinzipiell nicht unterschieden werden, ob die Verschiebung durch die Gewichtskraft (wie im hier beschriebenen statischen Fall) oder auf Grund von Trägheit (z.B. Einwirkung einer konstanten Kraft auf die Messbox) zu Stande kommt. Folgender wichtiger Fall verdeutlicht dies:

Beide Achsen des Gerätes werden wie beschrieben in der Horizontalen auf Null kalibriert. Eine Achse wird danach vertikal ausgerichtet, so dass für sie der Wert $+1\text{ g}$ angezeigt wird. Was ist nun zu erwarten, wenn die Messbox z.B. einen kleinen Schlag von unten nach oben – also *entgegen* der Richtung der Gewichtskraft – erfährt? Die Antwort findet man, wenn man sich wieder daran erinnert, dass die Ursache für den Wert „ $+1\text{ g}$ “ darin liegt, dass der Probekörper („seismische Masse“) im ADXL durch die Gewichtskraft nach unten verschoben wurde. Durch den Schlag von unten nach oben wird er auf Grund der Trägheit zunächst bzgl. des ADXL noch weiter in diese Richtung verschoben. Der angezeigte Wert muss also größer als $+1\text{ g}$ sein. Als Anwendung, bei der eine ähnliche Überlegung nötig ist, kann das im Folgenden aufgeführte Beispiel zum Treppensteigen dienen. Man beachte, dass bei den folgenden Messungen 4 (a) und 4 (c) die Kalibrierung auch so hätte erfolgen können, dass die vom Messsystem ausgegebene Erdbeschleunigung von $+1\text{ g}$ nicht angezeigt werden würde. Es bleibt dem Nutzer überlassen, welche Variante der Kalibrierung er verwendet.

4. Experimente mit dem Beschleunigungs-Messsystem

Im Folgenden werden beispielhaft drei Experimente mit dem Messsystem kurz beschrieben. Damit soll gezeigt werden, welche für den Physikunterricht bisher kaum möglichen Messungen mit dem System nun zugänglich werden. Die dargestellten Messwerte wurden jeweils mit der Software des Messsystems im standardisierten Dateiformat *.csv abgespeichert und anschließend mit dem Programm MS-Excel eingelesen und grafisch neu dargestellt (Einfügen von Skalierung und Beschriftung).

a) Messung des zeitlichen Verlaufs der Beschleunigungen, denen eine Person beim Treppensteigen ausgesetzt ist

Bei dieser Messung wird untersucht, welchen Beschleunigungen ein Mensch in Richtung seiner Körperachse ausgesetzt ist, wenn er Treppen hinabsteigt. Bei der hierzu ausgewählten Treppe folgt nach einigen Stufen jeweils ein kurzer Treppenabsatz.

Die Messbox wird hier so kalibriert, dass die beiden Messrichtungen (x und y) in der horizontalen Ebene liegen. Nach dem Kalibrieren wird die Messbox gedreht, so dass eine Messrichtung parallel zur Körperachse steht. Im Stillstand registriert das Messsystem in diese Richtung nun den Beschleunigungswert $+1\text{ g}$. Das Ergebnis der Messung zeigt Abb. 6. Man erkennt, dass bei jedem Schritt jeweils Beschleunigungen im Bereich von $\pm 1\text{ g}$ um den Wert $+1\text{ g}$ herum auftreten. Die Beschleunigungen auf Grund einer Kraft entgegen der Richtung der Gravitationskraft (in Abb. 6 positiv nach oben angetragen) sind

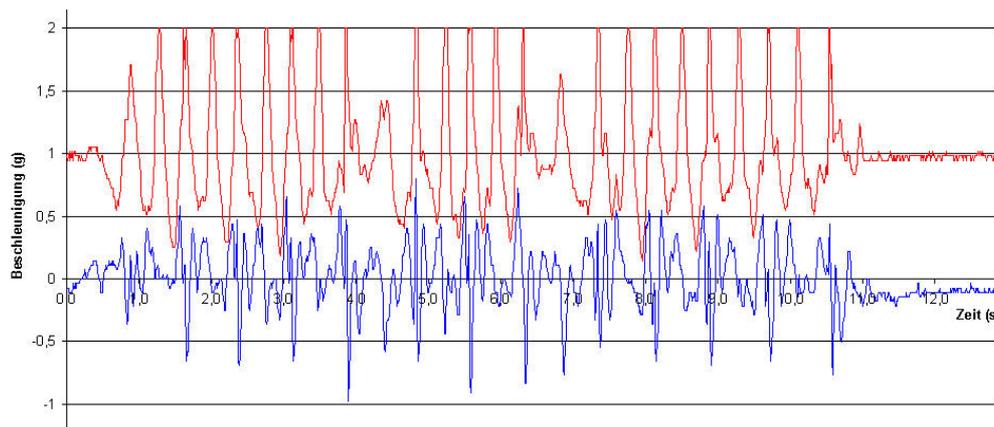


Abb.6: Die Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Beschleunigung, die auf den Körper eines Treppen hinabsteigenden Menschen wirkt. Die obere, rote Kurve zeigt die Beschleunigungskomponente in vertikaler Richtung, die untere, blaue Kurve die Komponente in die Richtung quer dazu, parallel zur Laufrichtung. Von physiologischer Bedeutung, z.B. in Bezug auf die Belastung von Knie- oder Hüftgelenken, ist die Beschleunigung in Richtung der Körperachse (obere Kurve). Ihr Betrag schwankt um den Wert der Erdbeschleunigung im Bereich von etwa $\pm 1\text{ g}$. Zu erkennen ist die Abfolge von neun Beschleunigungsspitzen (davon acht mit 2 g in positiver Richtung), die neun Stufen entsprechen. Dann folgt eine Unterbrechung mit unregelmäßigen Beschleunigungswerten (von $t \approx 4,0\text{ s}$ bis ca. $4,7\text{ s}$; Treppenabsatz). Daran schließen sich offenbar wieder fünf Stufen, ein Treppenabsatz und noch einmal neun Stufen an (nur Verlauf der oberen, roten Kurve). Danach, etwa ab der 11. Sekunde blieb die Testperson sehr ruhig stehen.

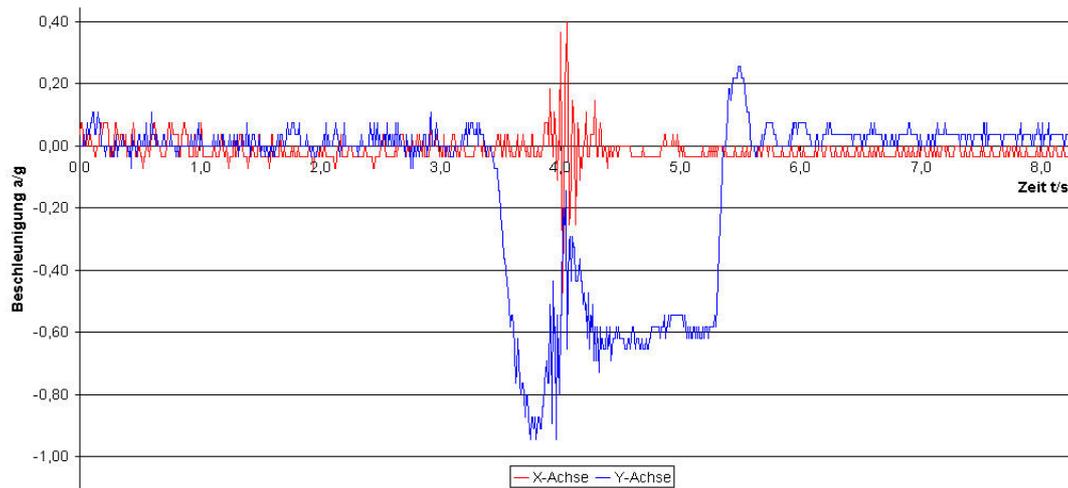


Abb.7: Das Diagramm zeigt den zeitlichen Verlauf der Beschleunigungen quer (x: rot) und längs (y: blau) der Fahrtrichtung während der Vollbremsung (vgl. Text). Der eigentliche Bremsvorgang beginnt bei $t \approx 3,3$ s. Die Verläufe der beiden Kurven können wie folgt interpretiert werden:

$t \approx 3,3$ s: Die Bremsbeschleunigung steigt auf etwa $-0,9$ g an (blaue Kurve, Y-Achse).

$t \approx 3,8$ s: Zu diesem Zeitpunkt muss mindestens ein Rad beginnen zu blockieren, es treten stark schwankende Querbeschleunigungen (rote Kurve, X-Achse) im Bereich von ca. $\pm 0,3$ g auf. Der Wagen beginnt offenbar zu schlingern. Das ABS greift ein. Es regelt die Bremsbeschleunigung herunter bis etwa auf $-0,2$ g.

$t \approx 4,1$ s: Die Querbeschleunigungen werden kleiner. Das ABS regelt die Bremsbeschleunigung wieder auf ca. $-0,6$ g hoch und hält diesen Wert in etwa konstant. Der Wagen stabilisiert sich.

$t \approx 5,3$ s: Der Wagen kommt mit der konstanten Bremsbeschleunigung von ca. $-0,6$ g zum Stehen. Durch das Ausfedern der Karosserie („Nickbewegung“) nach dem Stillstand der Räder tritt noch eine kurz wirkende Beschleunigung (bei $t \approx 5,4$ s) in Fahrtrichtung auf (ca. $+0,2$ g).

dabei etwas größer als die in Gegenrichtung. Dies ist anschaulich dadurch erklärbar, das offenbar die Beschleunigung, die beim Treten mit dem Fuß auf die Stufe auf den Körper wirkt, größer ist als die, die beim Abstoßen mit dem Fuß (nach oben) auftritt.

b) Vollbremsung eines PKW mit elektronischem Anti-Blockier-System (ABS): Messung des zeitlichen Verlaufs der Brems- und Querbeschleunigungen

Bei dieser Messung wird bei der Vollbremsung eines PKW mit ABS die horizontal, quer zur Fahrtrichtung auftretende Beschleunigung (sog. *Querbeschleunigung*; x-Achse) sowie die parallel zur Fahrtrichtung auftretende Beschleunigung (sog. *Bremsbeschleunigung*; y-Achse) aufgezeichnet. Die Richtung der Bremsbeschleunigung wird so festgelegt, dass die Werte negativ ausgegeben werden. Das Vorzeichen der Querbeschleunigung ist hier unerheblich. Die Messbox wird horizontal auf dem Armaturenbrett des PKW befestigt und die Messdaten im Modus „Write“ zunächst in den EEPROM-Speicher geschrieben und später ausgelesen und ausgewertet. Das Ergebnisdiagramm der Messung ist in Abbildung 7 zu sehen. Die bei der Vollbremsung zunächst auftretende maximale Bremsbeschleunigung beträgt etwa $-0,9$ g. Das elektronische Anti-Blockier-System regelt die Bremsbeschleunigung auf einen

annähernd konstanten Wert von $-0,6$ g. herunter (vgl. Abb. 7).

c) Messung des zeitlichen Verlaufs der Beschleunigung in Fahrtrichtung eines Aufzugs

Bei dieser Messung wird die Beschleunigung in vertikaler Richtung während einer Aufzugsfahrt aufgezeichnet. Die Beschleunigungsachse (x) zeigt im positiven Sinn nach oben. Sie wird in horizontaler Lage auf Null kalibriert. In der vertikalen Messausrichtung wird in Ruhe wieder der Wert $+1$ g ausgegeben (vgl. Abb. 8).

5. Abschließende Bemerkungen

Das von uns entwickelte Beschleunigungsmesssystem ermöglicht durch seine ortsunabhängige, flexible Einsetzbarkeit zum einen die Untersuchung bisher kaum zugänglicher alltäglicher Bewegungsabläufe und eröffnet somit dem Physikunterricht neue Inhalte. Zum anderen ergeben sich aber auch eine Reihe aus fachdidaktischer Sicht interessante unterstützende Anwendungen zu methodischen Zugängen zum Beschleunigungsbegriff. Bekannte und vieldiskutierte Unterrichtskonzepte zur Mechanik erhalten ein neues experimentelles Hilfsmittel. So ist z.B. mit unserem Messsystem die Möglichkeit einer zusätzlichen Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen einer Kraft und der Änderung eines Bewe-

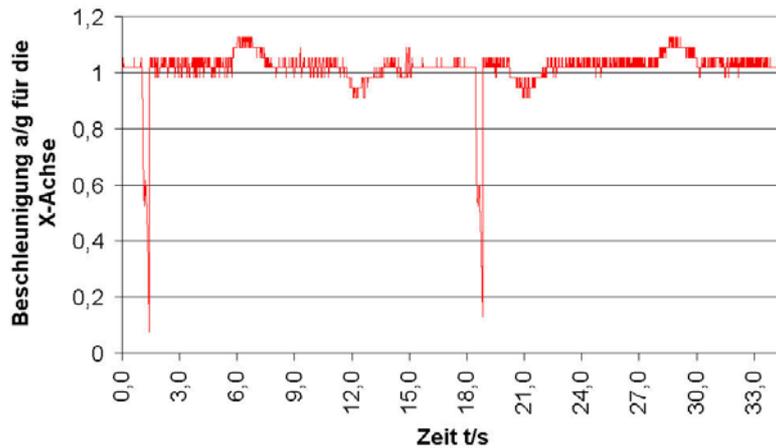


Abb.8: Das Diagramm zeigt die bei einer Aufzugsfahrt wirkende Beschleunigung in Fahrtrichtung (x ist positiv nach unten gerichtet). Die Messbox wurde bei einer Testperson in Hüfthöhe befestigt. Die Fahrt mit dem Aufzug geht aus der Ruhe zunächst nach oben bis zu einem Halt und dann wieder die gleiche Strecke zurück nach unten. Die Fahrt beginnt bei $t = 0$ s mit dem Drücken der Stockwerkstaste im Aufzug. Die zweite Beschleunigungsachse wurde bei der Nachbearbeitung der Daten entfernt, da sie hier irrelevant ist. Der Verlauf der Kurve kann wie folgt interpretiert werden: $t \approx 1$ s Die Beschleunigung geht sehr kurze Zeit fast auf Null zurück (d.h. fast freier Fall!). Der Grund ist, dass die Aufzugskabine im Stillstand nicht durch das Tragseil sondern durch eine mechanische Verriegelung gehalten wird, die vor der Fahrt gelöst wird. Die Kabine „fällt“ dabei offenbar – für den Benutzer kaum spürbar – ein sehr kurzes Stück, bis sie vollständig vom Tragseil gehalten wird und der Beschleunigungswert wieder auf $+1$ g ansteigt. Der Aufzug wird dann nach oben in Bewegung versetzt, d.h. beschleunigt (von $t \approx 5,5$ s bis etwa 7,5 s). Die auftretende Beschleunigung beträgt hierbei ca. $0,1$ g. Anschließend bewegt sich die Kabine mit konstanter Geschwindigkeit nach oben (von $t \approx 7,5$ s bis etwa 11 s). Von $t \approx 11$ s bis etwa 13,5 s wird die Fahrt bis zum Stillstand verlangsamt (Beschleunigung entgegen der Richtung der Gewichtskraft). Etwa bei $t = 18$ s beginnt wieder die Fahrt zurück nach unten mit einem erneuten Lösen der Verriegelung. Die beiden folgenden kurzen, entgegengesetzt gerichteten Beschleunigungsphasen der Kabine haben - im Vergleich mit der Fahrt nach oben – nun das umgekehrte Vorzeichen.

gungszustands bei der Einführung des Kraftbegriffs über den dynamischen Fall denkbar. Der Trägheitssatz kann mit dem Messsystem auf eine weitere Weise veranschaulicht werden, da der verwendete Beschleunigungssensor nicht zwischen Stillstand und Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit unterscheidet.

Weiterhin sind ergänzende oder bestätigende Messungen zu Vorhersagen bzw. Prozessbeschreibungen durch Modellbildungssysteme sicher interessante experimentelle Einsatzmöglichkeiten.

Anwendungsmöglichkeiten für das Messsystem zu finden, dazu Unterrichtskonzepte zu entwickeln und diese dann zu erproben und zu evaluieren, wird nun die Aufgabe sein, die sich der bisherigen technischen Entwicklung des Systems anschließt. Ein erster, vielversprechender Einsatz im Unterricht gibt Anlass zur Hoffnung, dass sich der Einsatz des Messsystems im Physikunterricht positiv auf Motivation und Lernerfolg bei den Schülern auswirken kann.

Interessenten für ein Fertiggerät, bestehend aus der Messbox mit zwei austauschbaren Sensoren (ADXL-202 und -210), der Empfängerbox und der Software, können sich an die Autoren dieses Artikels wenden (Selbstkostenpreis ca. 270 €).

6. Wichtige technische Daten des Messsystems

Maximale Beschleunigungswerte (ADXL-202/210)	ca. ± 2 g ca. ± 10 g
Aufnahmerate der Beschleunigungsmesswerte („Direct“- bzw. „Read“-Modus)	ca. 23/s bzw. mind. ²⁾ 60/s
maximale Auflösung der Beschleunigungswerte	ca. 16 mg $\approx 0,16$ m/s ²
Stromversorgung (Messbox und Empfängerbox)	je 9 V-Block
Zeit zum Auslesen des 64 kB-Speichers (2,5 min Messzeit)	ca. 12 min
Reichweite der Funkübertragung (neue Batterien)	ca. 10 m (Luft)
Größe von Mess- und Empfängerbox (l, b, h)	je 15,0 cm, 8,0 cm, 5,5 cm

¹⁾ Weitere Möglichkeiten bieten Sensoren der Firma Vernier [Ver02], die – angeschlossen über Kabel - zusammen mit einem Messwerterfassungssystem als Beschleunigungsmesser eingesetzt werden können. Trotz dieses eigenen Angebots verweist die Firma Vernier in [Ver02] auf die von uns eingesetzten, die Beschleunigung direkt als Signal liefernden Sensoren der Firma Analog Devices [Ana02].

²⁾ Die Angabe einer *mindestens* vorhandenen Abtastrate des ADXL ($60/s = 60 \text{ Hz}$) erfolgt aus technisch bedingten Gründen. Die Abtastrate des ADXL wird wesentlich durch die Bandbreite einer Tiefpassfilterung des Wechselspannungssignals bestimmt, das die Information über die Beschleunigungswerte trägt. Da die Filterung in unserem Fall für Frequenzen größer als 60 Hz erfolgt, der Filter aber höhere Frequenzen nicht völlig, sondern nur zum Teil („3 dB-Filter“) eliminiert, können auch noch Signale mit etwas höheren Frequenzen passieren. Dies erhöht dann in gleichem Maße die Abtastrate des ADXL. Wir nennen als Abtastrate daher $60/s$, obwohl der tatsächliche Wert höher liegen kann. Genauere Informationen zu den technischen Daten des ADXL findet man unter [Ana02].

7. Literatur

[Ana02] Internetseite der Firma Analog Devices:
<http://www.analog.com>

[Bla99] Blankenbach, K.-H., El-Awdan M., Low-Cost-Mechanikexperimente mit Mikroelektronik-Sensor:

http://www.fh-pforzheim.de/fb05/mitarbeiter/blankenbach/industrie_artikel/vortraege/dpg_beschleunigungssensor_03_99/bschl_sensor_tagungsband_cd.htm

[Hil00] Hilscher, H., Videoeinsatz in der Lehre, Physik in der Schule 38 (2000) 3, S. 193 – 200

[Hof01] Hoffmann, U., Beschleunigungen messen mit dem ADXL, Zulassungsarbeit zum ersten Staatsexamen, Universität Erlangen, Didaktik der Physik, Erlangen, 2001

[Ver02] Internetseite der Firma Vernier mit Hinweisen zu Beschleunigungssensoren:

<http://www.vernier.com/probes/acc-din.html>

Kontakt

Uwe Hoffmann, Dr. German Hacker
Physikalisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg
Abt. Didaktik der Physik
Staudtstr. 7
91058 Erlangen
Tel.: 09131/85-28363
Fax.: 09131/85-28039

E-Mail: german.hacker@physik.uni-erlangen.de
Internet: <http://www.physik.uni-erlangen.de/didaktik>