

Die folgenden Original-Seiten der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“ wurden mit expliziter Genehmigung des Aulis-Verlages (Dr. Brigitte Abel) und des Friedrich-Verlages (Hubertus Rollfing) auf die Webseite www.thomas-wilhelm.net gestellt. Vielen Dank für die Erlaubnis.

Die exakte Quellenangabe des Zeitschriftenartikels ist:

WATZKA, B.; SCHELER, S.; WILHELM, T.

Beschleunigungssensoren

Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 61, Nr. 7, 2012, S. 25 - 33

Beschleunigungssensoren

B. Watzka, St. Scheler, Th. Wilhelm

Beschleunigungssensoren sind in der Technik aber auch im Alltag weit verbreitet. Das wohl bekannteste Beispiel ist der Sensor, der das Auslösen eines Airbags steuert. Darüber hinaus gibt es viele weitere Anwendungen, zum Beispiel zur Vermeidung von Beschädigungen der Festplatte bei harten Stößen und Erschütterungen oder Stürzen (Head-Crash), zur Steuerung moderner Videospiele oder zur Analyse von Bewegungsabläufen im Leistungssport. Sogar in Mobiltelefonen und MP3-Playern werden bereits Beschleunigungssensoren genutzt. Durch diese zunehmende Verbreitung ist die Funktionsweise der Beschleunigungssensoren auch von Interesse im Physikunterricht.

Inhalt dieses Artikels ist eine Übersicht über Beschleunigungssensoren, aus der das Messprinzip sowie die relevanten Bauteile der Sensoren und die gemessenen physikalischen Größen hervorgehen. Ferner sind in Kurzdarstellungen die fachlichen Grundlagen zum Aufbau und zur Funktionsweise der Beschleunigungssensoren erläutert. Abschließend sind unterrichtsrelevante Aspekte für die Vermittlung der fachlichen Grundlagen im Physikunterricht beschrieben. Dabei liegt der Fokus auf der Vermittlung des Aufbaus und der Funktionsweise der Sensoren unter Verwendung von Schemazeichnungen und Modellexperimenten.

1 Fachliche Grundlagen

Grundsätzlich sind Beschleunigungen über die Trägheit von Probekörpern registrierbar. Ein Probekörper mit der Masse m ist über elastisch verformbare Halterungen, z.B. Blattfedern, im Sensor befestigt. Diese werden bei einer Beschleunigung des Sensors verformt. Im Bezugssystem des Sensors führen die Trägheitskräfte zu einer Auslenkung des Probekörpers, welche bei linearen Federkräften proportional zur Beschleunigung sind.

Um die Auslenkung des Probekörpers und damit die Beschleunigung zu detektieren, werden verschiedene physikalische Messprinzipien angewandt. Im Wesentlichen lässt sich zwischen kapazitiven und Hall-Effekt-Sensoren sowie piezoresistiven und piezoelektrischen Beschleunigungssensoren unterscheiden. Außerdem verringern verschiedene Dämpfungsmechanismen das Schwingungsverhalten des Feder-Masse-Systems und nehmen unter anderem Einfluss auf das Ansprechverhalten des Sensors.

1.1 Kapazitive Beschleunigungssensoren

In modernen Anwendungen kommen häufig kapazitive Beschleunigungssensoren zum Einsatz. Sie haben sich besonders für fehlerarme Messungen bewährt [1]. Ihr charakteristischer Messbereich reicht bis zur 50-fachen Erdbeschleunigung, was ei-

nem Wert von ca. $\pm 500 \text{ m/s}^2$ entspricht. Ferner können sie mittlerweile als Low-Cost-Bauelemente gefertigt werden [2]. Die physikalische Grundlage, nämlich die Abhängigkeit der Kapazität vom Abstand der Kondensatorplatten, ist im Unterschied zum piezoelektrischen Effekt fester Teil des Physikunterrichts.

Die Auslenkung des Probekörpers führt zu einer Änderung der Kapazität der Anordnung. Der Probekörper ist als eine Kondensatorelektrode realisiert. Eine zweite Elektrode ist fest mit dem Gehäuse verbunden. Erfährt diese Anordnung eine Beschleunigung, so ändert sich deshalb der Abstand zwischen den Kondensatorelektroden und damit die Kapazität C des Kondensators. Für einen Plattenkondensator mit einer Fläche A gilt

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

für den Plattenabstand d . Der Kapazitätsunterschied

$$\begin{aligned} \Delta C &= C_1 - C_0 \\ &= \varepsilon \frac{A}{d \pm \Delta d} - \varepsilon \frac{A}{d} \\ &= \mp \varepsilon A \frac{\Delta d}{d(d \pm \Delta d)} \\ &= \mp C_0 \frac{\Delta d}{d \pm \Delta d} \end{aligned}$$

Tab. 1: Übersicht über das Messprinzip, die maßgebenden Bauteile und die relevanten, physikalischen Größen von verschiedenen Beschleunigungssensoren

Sensor	Messprinzip	relevante Bauteile	relevante physikalische Größen
kapazitiver Beschleunigungssensor	Kapazitätsänderung Wheatstone'sche Brückenschaltung mit Differentialkondensator	Feder-Masse-System Kondensatoren	elektrische Feldstärke Kapazität
Hall-Effekt Beschleunigungssensor	Änderung der Hallspannung	Feder-Masse-System Hall-Sensor	magnetische Flussdichte, Lorentzkraft, elektrische Feldstärke Hallspannung
piezoresistiver Beschleunigungssensor	Widerstandsänderung Wheatstone'sche Brückenschaltung	Feder-Masse-System Dehnungsmessstreifen	elektrischer Widerstand, spezifischer Widerstand
piezoelektrischer Beschleunigungssensor	Ladungsverschiebung Ladungsverstärkung	Feder-Masse-System piezoelektrisches Element	mechanische Spannung, elektrische Polarisation, Oberflächenladungen, elektrische Feldstärke

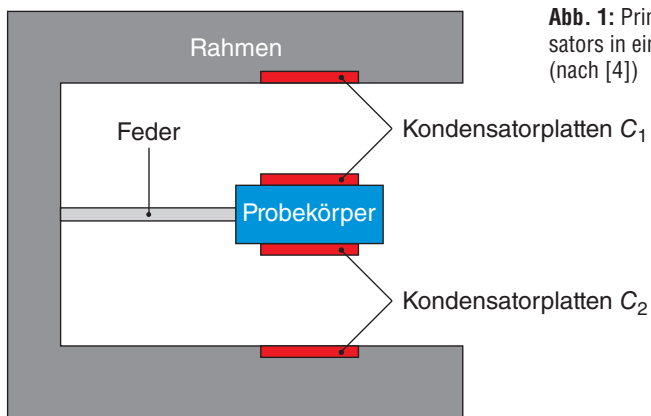


Abb. 1: Prinzip eines Differentialkondensators in einem Beschleunigungssensor (nach [4])

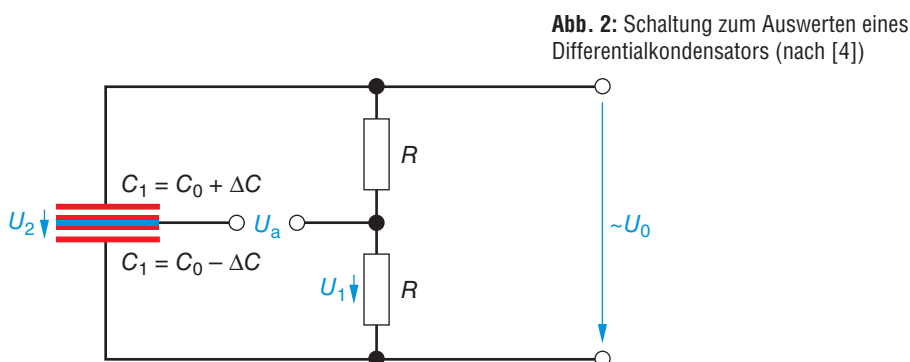


Abb. 2: Schaltung zum Auswerten eines Differentialkondensators (nach [4])

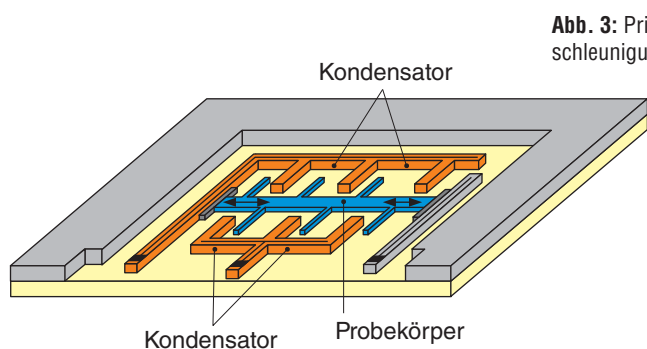


Abb. 3: Prinzip eines kapazitiven Beschleunigungssensors (nach [5])

ist jedoch nicht linear in Δd . In solchen Fällen verwendet man zur Linearisierung und zur Kompensation von Temperatureinflüssen eine Differenzbildung [3], in diesem Fall Differentialkondensatoren [2]. Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Differentialkondensators mit Biegebalken als Federelement. Der Probekörper ist gleichzeitig die Mittelelektrode eines Dreiplatten-Kondensators.

Verschiebt sich der Probekörper um Δd aus der Mittelstellung d_0 , dann ändern sich die beiden Kapazitäten C_1 und C_2 symmetrisch um $\pm \Delta C$. Diese gegensinnige Kapazitätsvariation wird durch eine Brückenschaltung, wie sie in Abb. 2 dargestellt ist, ausgewertet.

Wird an diese Schaltung eine Wechselspannung U_0 angelegt, dann ist der Spannungsabfall U_1 an einem ohmschen Widerstand gleich $U_0/2$. In der linken Masche ist

$$U_2 = U_0 \frac{Z_{C_2}}{Z_{C_1} + Z_{C_2}}$$

für die komplexen Widerstände

$$Z = (i\omega C)^{-1}$$

der Kondensatoren. Damit ergibt sich für die Ausgangsspannung nach einigen Äquivalenzumformungen

$$U_a = U_1 - U_2 = \frac{U_0}{2} \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1}$$

und mit den Kapazitäten

$$C_1 = \frac{\epsilon A}{d - \Delta d}$$

und

$$C_2 = \frac{\epsilon A}{d + \Delta d}$$

folgt hieraus nach weiterer Äquivalenzumformung

$$U_a = \frac{U_0}{2} \frac{\Delta d}{d}$$

Der Differentialkondensator liefert also eine Spannung, die proportional zur Auslenkung Δd ist und damit auch für kleine Δd proportional zur beschleunigenden Kraft ist.

Um die Kapazität des Kondensators zu erhöhen, wird die Fläche der Elektroden vergrößert, indem sie kammförmig (meanderförmig) gestaltet werden. In Abb. 3 ist der prinzipielle Aufbau eines solchen kapazitiven Beschleunigungssensors dargestellt.

Moderne Sensorelemente sind mikro-mechanische Bauteile, das heißt, dass sie die Größe von einigen 100 μm haben. Die

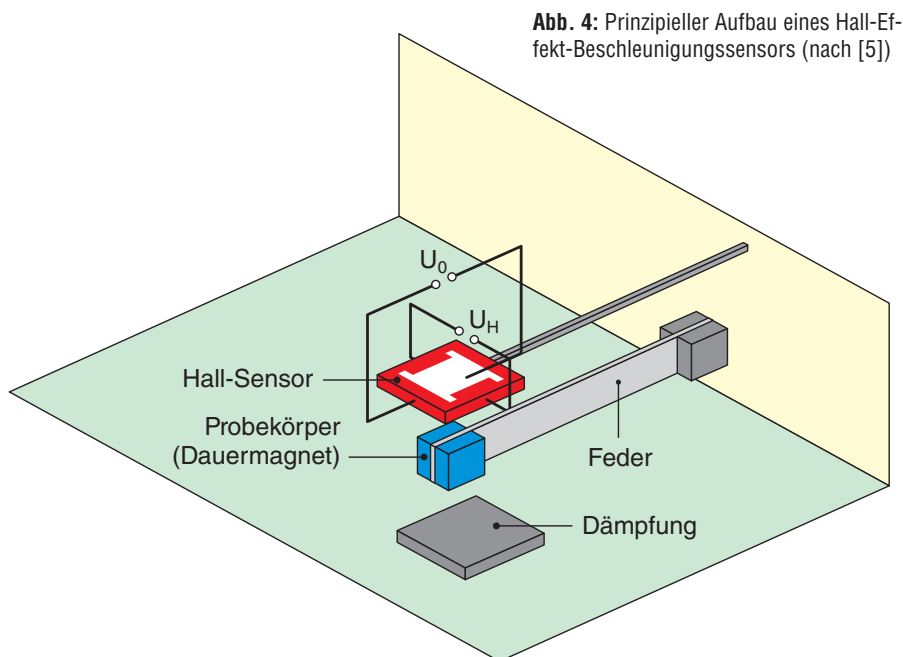


Abb. 4: Prinzipieller Aufbau eines Hall-Effekt-Beschleunigungssensors (nach [5])

Kapazitäten dieser Differentialkondensatoren liegen im Picofarad-Bereich und die Kapazitätsänderungen im Bereich einiger Femtofarad. Wegen dieser kleinen Kapazitäten ist es notwendig, die Auswerteelektronik auf dem Sensorchip zu integrieren [2].

Ein großer Vorteil kapazitiver Sensoren ist die Möglichkeit, mit den Kondensatoren eine elektrostatische Rückstellkraft zu erzeugen. Zwischen den elektrisch geladenen Platten eines Kondensators wirkt eine anziehende elektrostatische Kraft gemäß dem Coulombschen Gesetz. Um eine große Dämpfung der Bewegung des Probekörpers zu erzielen, wird deshalb eine Kompensationsspannung an den Elektroden von C_1 und C_2 angelegt, die durch ein Rückkopplungssystem am Sensorausgang gesteuert wird. Die dadurch erzeugte Kraft führt bei geeigneter Dimensionierung zu einer Stabilisierung der Ruhelage des Differentialkondensators. Durch diese elektrische Regelschleife kann eine verbesserte Linearität, eine höhere Empfindlichkeit und ein größerer Beschleunigungsbereich erreicht werden [6].

1.2 Hall-Effekt-Beschleunigungssensoren

Im Falle des Hall-Effekt-Beschleunigungssensors ist der Probekörper als Dauermagnet realisiert. Über dem Feder-Masse-System ist ein Hall-Sensor samt Auswertelektronik positioniert. Eine Kupferplatte zur Dämpfung befindet sich unterhalb des Feder-Masse-Systems [5] (siehe Abb. 4).

Die Auslenkung des Probekörpers (hier Dauermagnet) wird per Hall-Effekt erfasst. Sie verursacht eine Änderung der magnetischen Flussdichte \vec{B} durch den Hall-Sensor und folglich eine Änderung der erzeugten Hall-Spannung [5].

Für die Hall-Spannung U_H gilt:

$$U_H = R \frac{IB}{d}$$

Um Beschleunigungen per Hall-Effekt zu ermitteln, muss die sich ändernde magnetische Flussdichte \vec{B} des ausgelenkten Probekörpers (Dauermagnet) gemessen werden. Dazu müssen also die Werte R_H , d und I bekannt sein.

1.3 Piezoresistive Beschleunigungssensoren

Die Auslenkung des Probekörpers wird in diesem Fall mittels piezoresistiver Elemente erfasst. Diese ändern bei Verformungen ihren elektrischen Widerstand. Häufig werden als piezoresistive Elemente Metall- oder Halbleiter-Dehnungsmessstreifen (kurz DMS) verwendet. Sie sind meist auf den Trägern oder Biegebalken aufgebracht,

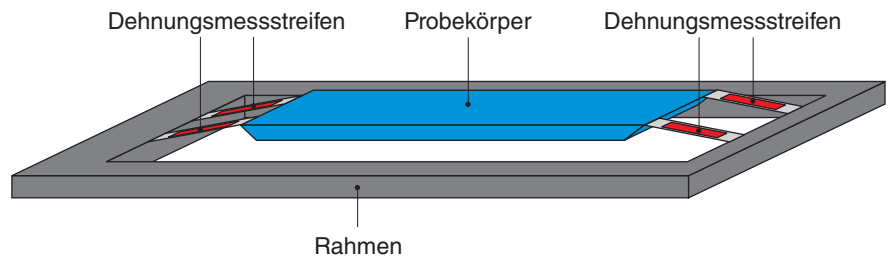


Abb. 5: Prinzipieller Aufbau eines piezoresistiven Beschleunigungssensors (nach [6])

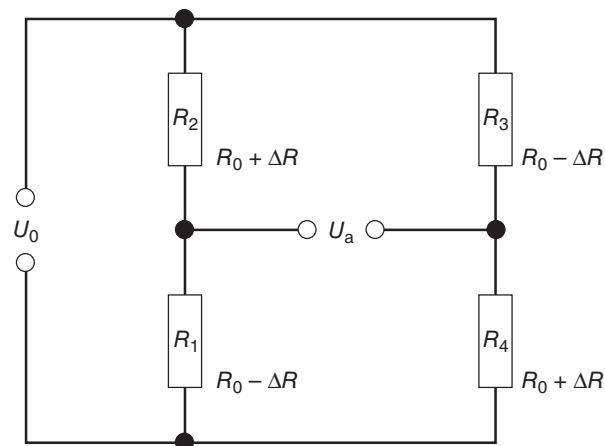


Abb. 6: Vollbrückenschaltung (nach [2]), in der R_1 und R_4 gedehnt sowie R_2 und R_3 gestaucht werden.

an denen der Probekörper befestigt ist (siehe Abb. 5).

Der elektrische Widerstand R eines Leiters ist von dessen Länge l , seiner Querschnittsfläche A und seinem spezifischen Widerstand ρ abhängig. Es gilt:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Aus der Gleichung ist ersichtlich, dass für eine Widerstandsänderung eines Leiters zwei Ursachen in Frage kommen. Die erste beruht auf Änderungen des spezifischen Widerstands, die zweite auf Änderungen der Leitergeometrie.

Wirkt eine Kraft auf den Leiter, erhält man für die relative Widerstandsänderung nach [6]

$$\frac{\Delta R}{R} = k \varepsilon,$$

wobei k der k -Faktor (auch Gauge-Faktor genannt) und ε die relative Längendehnung $\Delta l/l$ ist. Der k -Faktor ist temperaturabhängig und von der relativen Längenänderung ε abhängig. Er ist ein Maß für die Dehnungsempfindlichkeit des Materials. In Metall-DMS ist vor allem die Leitergeometrie für die Widerstandsänderung ausschlaggebend. Aus diesem Grund haben sie kleine k -Faktoren.

In Halbleiter-DMS ist die Änderung des spezifischen Widerstands ausschlaggebend für die Widerstandsänderung. Sie ha-

ben große k -Faktoren und zeigen in nur kleinen Bereichen eine lineare Kennlinie ([4], [6]).

Die Widerstandsänderung wird meist mithilfe einer Vollbrückenschaltung gemessen. Dabei kommen vier gleichartige DMS in einer Wheatstone'schen Brücke zum Einsatz. Zwei der DMS werden bei der Auslenkung des Probekörpers gestaucht, zwei gedehnt. Die Vollbrückenschaltung ermöglicht zum einen die DMS so anzuordnen, dass die Ausgangsspannung proportional zur Widerstandsänderung ist, zum anderen die Kompensation störender Einflüsse wie beispielsweise die Temperaturabhängigkeit (siehe Abb. 6).

Für stromlose, hochohmige Messungen der Brückenspannung U_a gilt

$$\begin{aligned} U_a &= U_3 - U_1 \\ &= U_0 \left(\frac{R_0 + \Delta R}{2R_0} - \frac{R_0 - \Delta R}{2R_0} \right) \\ &= U_0 \frac{\Delta R}{R_0} \\ &= U_0 k \varepsilon. \end{aligned}$$

1.4 Piezoelektrische Beschleunigungssensoren

Die Messwerterfassung erfolgt über ein piezoelektrisches Element. Zum Einsatz kommen beispielsweise Keramiken wie Barium- und Blei-Zirkonium-Titanat, Quarz, Zinkoxid oder Polymere wie PVDF [4].

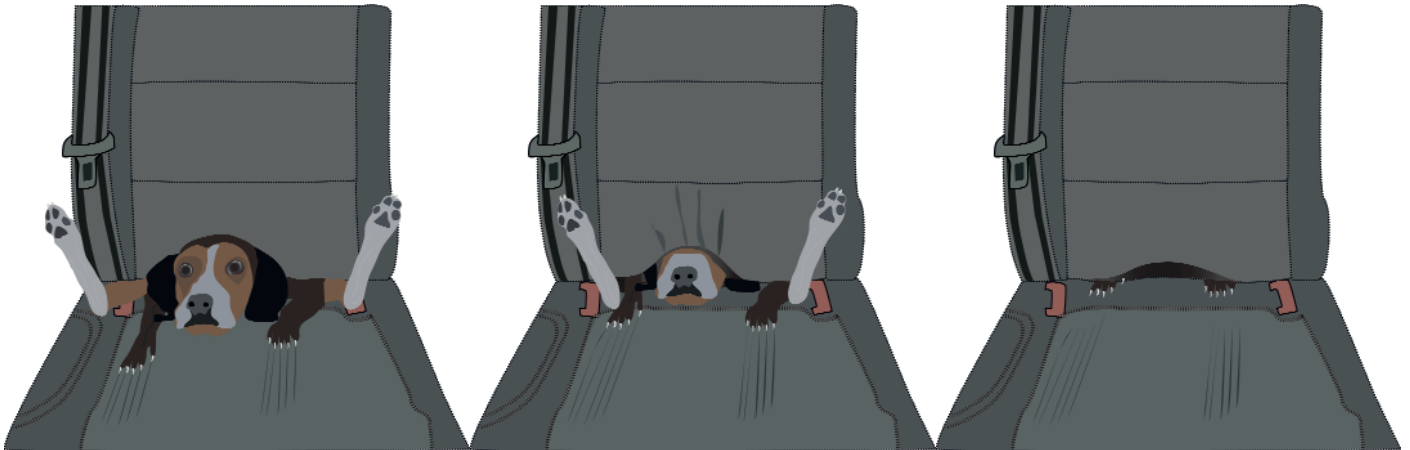


Abb. 7: Bildfolge aus der VW-Werbung mit dem Text „Woran messen Sie eigentlich die Beschleunigung Ihres Autos?“

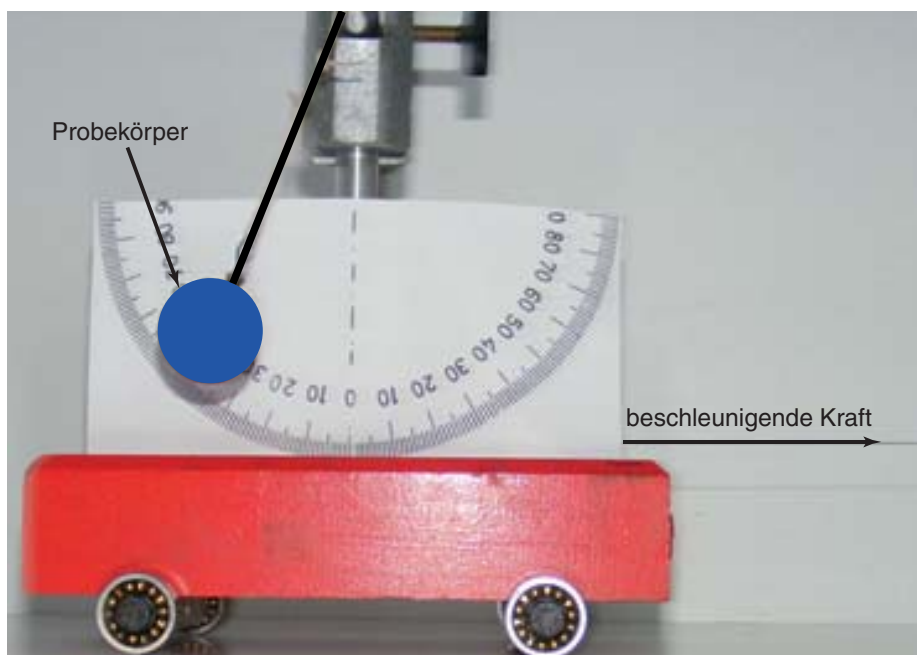


Abb. 8: Ein Probekörper erfährt im Bezugssystem des Wagens eine Kraft (nach [8])

Piezoelektrische Kristalle wie Quarz reagieren bei einer Krafteinwirkung mit einer dielektrischen Ladungsverschiebung. Dadurch entstehen in den Elementarzellen des Kristalls induzierte Dipolmomente, die sich ausrichten und damit zur Verschiebungspolarisation des Materials führen. Auf der Oberfläche entstehen dann Oberflächenladungen, die zum Aufbau eines elektrischen Feldes führen. Mittels angebrachten Elektroden kann eine elektrische Spannung gemessen werden. Generell ermöglichen piezoelektrische Beschleunigungssensoren nur dynamische Messungen – sie reagieren nur auf Kraftänderungen.

2 Beschleunigungsmessung im Unterricht

Die Einführung der Beschleunigungsmessung erfolgt über die Anknüpfung an Vorerfahrungen, die Lernende aus ihrem Alltag mitbringen. Diskutiert werden muss die Kraft, die man im beschleunigten Sys-

Tab. 2: Inhalte des Unterrichtsgesprächs zum anfahrenen Auto

Subjektive Beschreibung im Auto	Objektive Beschreibung von außen	Für den Sensor wichtige Aspekte
Ein nicht befestigter Körper im anfahrenen Auto, wie ein sitzender Hund, bewegt sich im Auto nach hinten. Er glaubt eine Kraft nach hinten zu spüren, die ihn nach hinten beschleunigt. So wird er im Auto nach hinten verschoben.	Das anfahrenen Auto beschleunigt nach vorne; dazu wirkt eine Kraft auf das Auto nach vorne. Auf einen nicht befestigten Körper im Auto (sitzender Hund) wirkt keine Kraft, so dass er sich nicht mit dem Auto mitbewegt. Das Auto fährt unter ihm nach vorne weg.	Ein Probekörper, der in einem Sensor nur an einer Feder befestigt ist, wird im Sensor nach hinten verschoben, wenn der Sensor nach vorne beschleunigt wird.
Hat der Hund schließlich festen Kontakt mit dem Auto (Sitzlehne oder Rückwand), so wird der Hund scheinbar nach hinten an den Sitz gepresst; er glaubt eine Kraft nach hinten zu spüren.	Hat der Hund schließlich festen Kontakt mit dem Auto (Sitzlehne oder Rückwand), so übt das Auto eine Kraft auf den Hund nach vorne aus und beschleunigt auch ihn, er bewegt sich nun mit dem Auto nach vorne mit.	Die Feder übt auf den Probekörper eine Kraft nach vorne aus, so dass sich dieser schließlich mit dem Sensor mitbewegt.
Je größer die Beschleunigung des Autos, desto tiefer wird der Hund in den Sitz gedrückt.	Je größer die Beschleunigung des Autos, desto stärker drückt das Auto auf den Hund und desto stärker wird der Sitz zusammengedrückt.	Je größer die Beschleunigung des Sensors, desto weiter wird der Probekörper ausgelenkt und desto stärker drückt die Feder gegen diesen Probekörper.

	eigene Erfahrungen	Werbung mit dem Hund	Modellexperiment	Beschleunigungssensoren
Objekt	Insasse eines Autos als Probekörper	Hund als Probekörper	Probemasse des Fadenpendels Probekörper	Probekörper der Masse m
Aktion	Beschleunigung des Autos	Beschleunigung des Autos	Beschleunigung des Wagens	Beschleunigung des Sensors
Resultat	Reaktion des Probekörpers auf die Beschleunigung aufgrund der Trägheitskraft			
	Der Probekörper (Insasse) wird gegen den Sitz gepresst oder vom Sicherheitsgurt zurückgehalten	Der Probekörper (Hund) wird verschoben	Der Probekörper wird ausgelenkt	Der Probekörper wird ausgelenkt

Tab. 3: Übersicht einer Ergebnissicherung

tem zu spüren glaubt. Sicher kennen die meisten Lernenden die Tatsache, dass sich in nach vorne beschleunigten Fahrzeugen Dinge nach hinten bewegen, oder das Gefühl, in einem stark beschleunigten Fahrzeug in den Sitz gedrückt zu werden. Diese Erfahrung wird über die Bildfolge aus der Werbung (siehe Abb. 7) samt Werbetext aktiviert und dient als Diskussionsgrundlage für das folgende Unterrichtsgespräch. Dabei ist es wichtig, dass die Schüler die Situation auch aus der objektiven Sicht eines außen stehenden Beobachters beschreiben können. Der Begriff „Trägheitskraft“ muss nicht erwähnt werden, es genügt, zu formulieren, dass der Probekörper im beschleunigten System eine Kraft gegen die objektive Beschleunigungsrichtung zu spüren glaubt.

Die Ziele des einführenden Unterrichtsgesprächs sind erstens, die Situation auf den Bildern zu beschreiben und mit den eigenen Erfahrungen in Verbindung zu bringen. Zweitens die eigenen Erfahrungen und die dargestellte Situation auf den Bildern physikalisch zu beschreiben – auch aus objektiver Sicht – sowie drittens aus den eigenen Erfahrungen heraus die Bildfolge für andere Bewegungen fortzuführen und physikalisch zu beschreiben. Die tabellarische Übersicht aus Tab. 2 zeigt mögliche Inhalte des einführenden Unterrichtsgesprächs zum anfahrens Auto. Analog kann das abbremsende und stehende Auto betrachtet werden.

2.1 Beschleunigungen messen – Erarbeitung des grundlegenden Messprinzips

Um den prinzipiellen Aufbau und die Funktionsweise von Beschleunigungssensoren zu vermitteln, werden Schemazeichnungen eingesetzt und ein Modellexperiment durchgeführt. Die Schemazeichnungen stellen die wesentlichen Bestandteile und das grundlegende Prinzip der Sensoren in gleichen Farben dar. So ist beispielsweise

der Probekörper stets blau und die Erfassung der Auslenkung rot abgebildet. Diese Darstellungsweise ermöglicht die verschiedenen Beschleunigungssensoren miteinander zu vergleichen und damit Gemeinsamkeiten und Unterschiede hervorzuheben (siehe Abb. 1, 4 und 5). Allen gemeinsam ist die Auslenkung des Probekörpers.

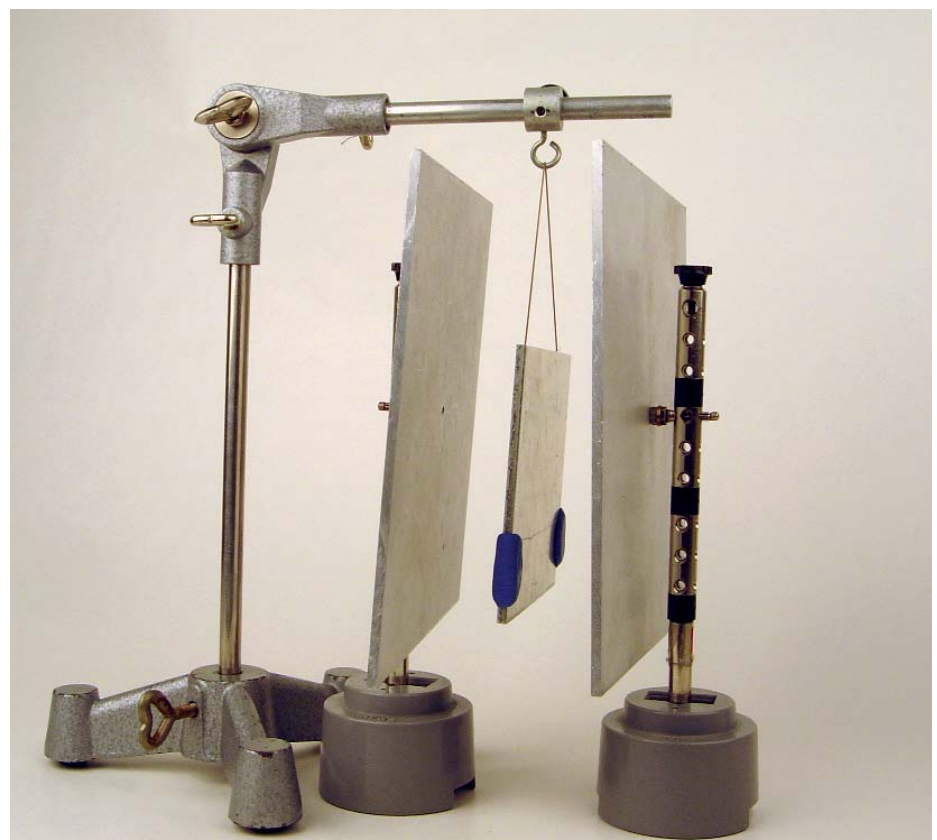
Das Modellexperiment nach [8] in Abb. 8 stellt dar, wie ein Probekörper auf eine Beschleunigung reagiert. Das Experiment besteht im Wesentlichen aus einem Wagen, auf dem ein Fadenpendel und eine Winkelscheibe angebracht sind. Der Wagen wird über eine Masse beschleunigt, die mit einer Schnur an dem Wagen befestigt ist. Die Beschleunigung des Wagens führt zur Auslenkung des Fadenpendels. Ihre Rich-

tung ist der Beschleunigungsrichtung des Wagens entgegengesetzt. Im Gleichgewichtszustand ist die Auslenkung für kleine Winkel näherungsweise proportional zur auslenkenden Kraft [7].

2.2 Erarbeitung der kapazitiven Beschleunigungsmessung

Ein kapazitiver Beschleunigungssensor wandelt die Beschleunigung und damit die Auslenkung des Probekörpers in ein elektrisches Signal um. Die Grundlage, dass die Kapazität eines Kondensators vom Abstand der Platten abhängt, ist zwar Bestandteil des Physikunterrichts, aber die Funktionsweise eines Differentialkondensators geht über das Übliche hinaus. Durch die Verwendung eines einfachen

Abb. 9: Modellexperiment eines Differentialkondensators



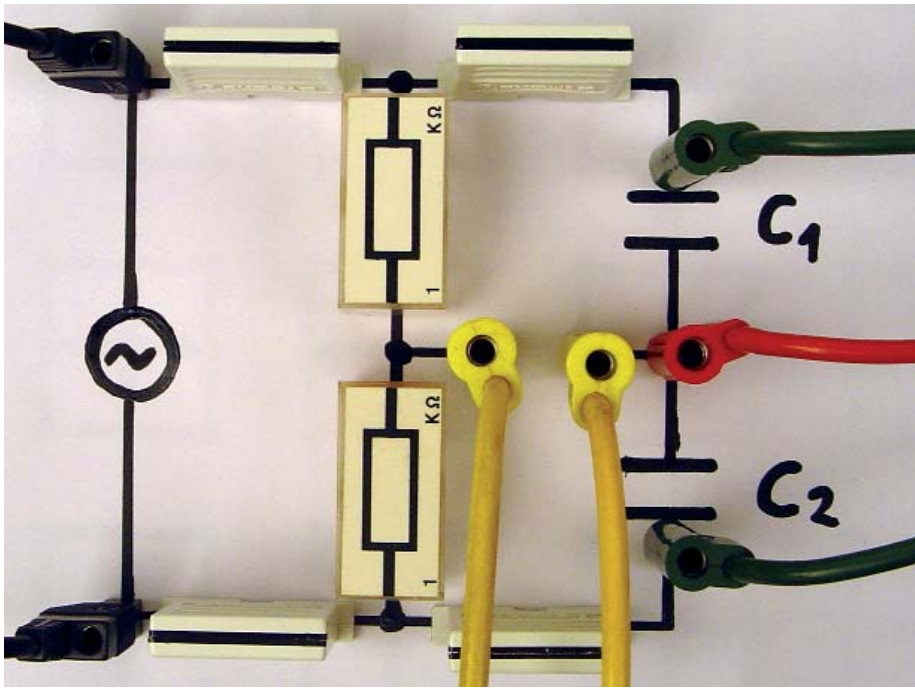


Abb. 10: Messbrücke entsprechend dem Schaltplan aus Abb. 2. Für die Widerstände wurde $R = 1 \text{ k}\Omega$ gewählt.

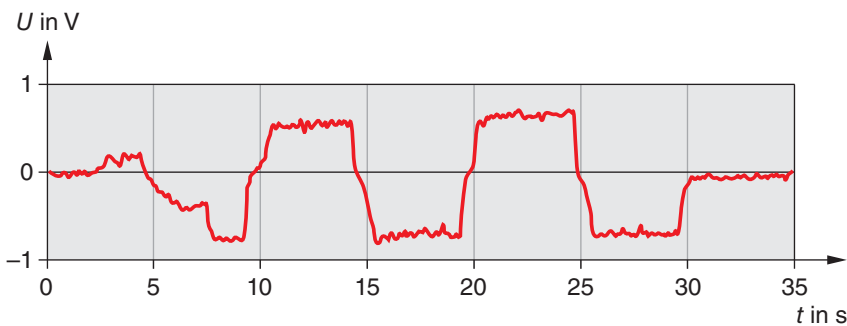
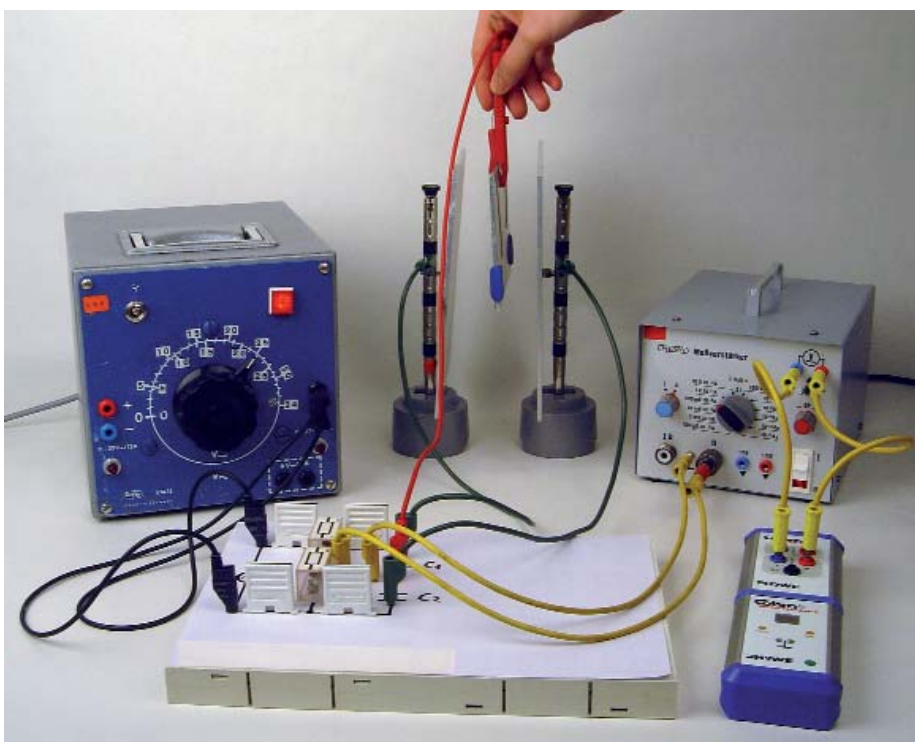


Abb. 11: Spannungsverlauf beim Verschieben der mittleren Platte mit der Hand

Abb. 12: Aufbau für Messungen am Modell eines Differentialkondensators



Modells kann die Wirkungsweise aber plausibel gemacht werden. Bereits ein minimaler Aufbau wie in Abb. 9 eignet sich als Modellexperiment für einen solchen Beschleunigungssensor. Es besteht aus zwei gängigen, großen Kondensatorplatten und einer beweglichen Platte in der Mitte. Um einen Kurzschluss des Kondensators beim Auslenken der mittleren Platte zu verhindern, wurden zwei Abstandhalter aus Knetmasse angebracht. Die Kapazität zwischen zwei benachbarten Platten beträgt jeweils ca. 30 pF bei einem Abstand von rund 2 cm .

Trotz dieser kleinen Kapazität und den entsprechend kleinen Kapazitätsänderungen lassen sich Bewegungen der mittleren Platte durch eine Messbrücke wie in den Abbildungen 2 und 10 auswerten. Der Differentialkondensator wandelt also zunächst nur eine Ortsänderung in ein proportionales Spannungssignal um. Durch Verschieben der mittleren Platte per Hand aus der Mittelstellung zu den äußeren Platten lässt sich erkennen, wie die Spannung entsprechend ansteigt beziehungsweise abfällt. Abb. 11 zeigt einen dabei gemessenen Spannungsverlauf für dieses Modell. Die Plateaus entsprechen Positionen nahe den äußeren Platten. In der Mittelstellung ist die Ausgangsspannung ungefähr null, da die beiden Kapazitäten dort fast gleich sind und die Brücke somit ausgeglichen ist.

Zum Messen der Ausgangsspannung ist aufgrund der empfindlichen Brückenschaltung ein Messgerät mit sehr hohem Innenwiderstand nötig. Eine Messung mit einem Digitalmultimeter ist problemlos möglich. Zur Anzeige des Spannungsverlaufs mit einem Drehspulinstrument muss jedoch ein Messverstärker verwendet werden, wobei keine effektive Verstärkung notwendig ist, sondern nur der Einfluss des Messgerätes auf die Schaltung verringert wird. Auch für die Messung mit einem Messwerterfassungssystem wurde aus diesem Grund ein Messverstärker (ohne effektive Verstärkung) benutzt. An die Brücke wurde eine Wechselspannung von 25 V angelegt und bei maximaler Verschiebung eine Spannung von 1 V gemessen (siehe Abb. 12).

In der Technik wird die Rückstellkraft, welche auf den Probekörper wirkt, durch Feder Elemente erzeugt. Im Gültigkeitsbereich des Hooke'schen Gesetzes ist dann die Auslenkung ebenfalls proportional zur auslenkenden Kraft. Praktisch lässt sich eine reine Federaufhängung für den Modellsensor nur äußerst schwer umsetzen, daher wurde ein Aufbau gemäß Abbildung 13 und 14 gewählt.

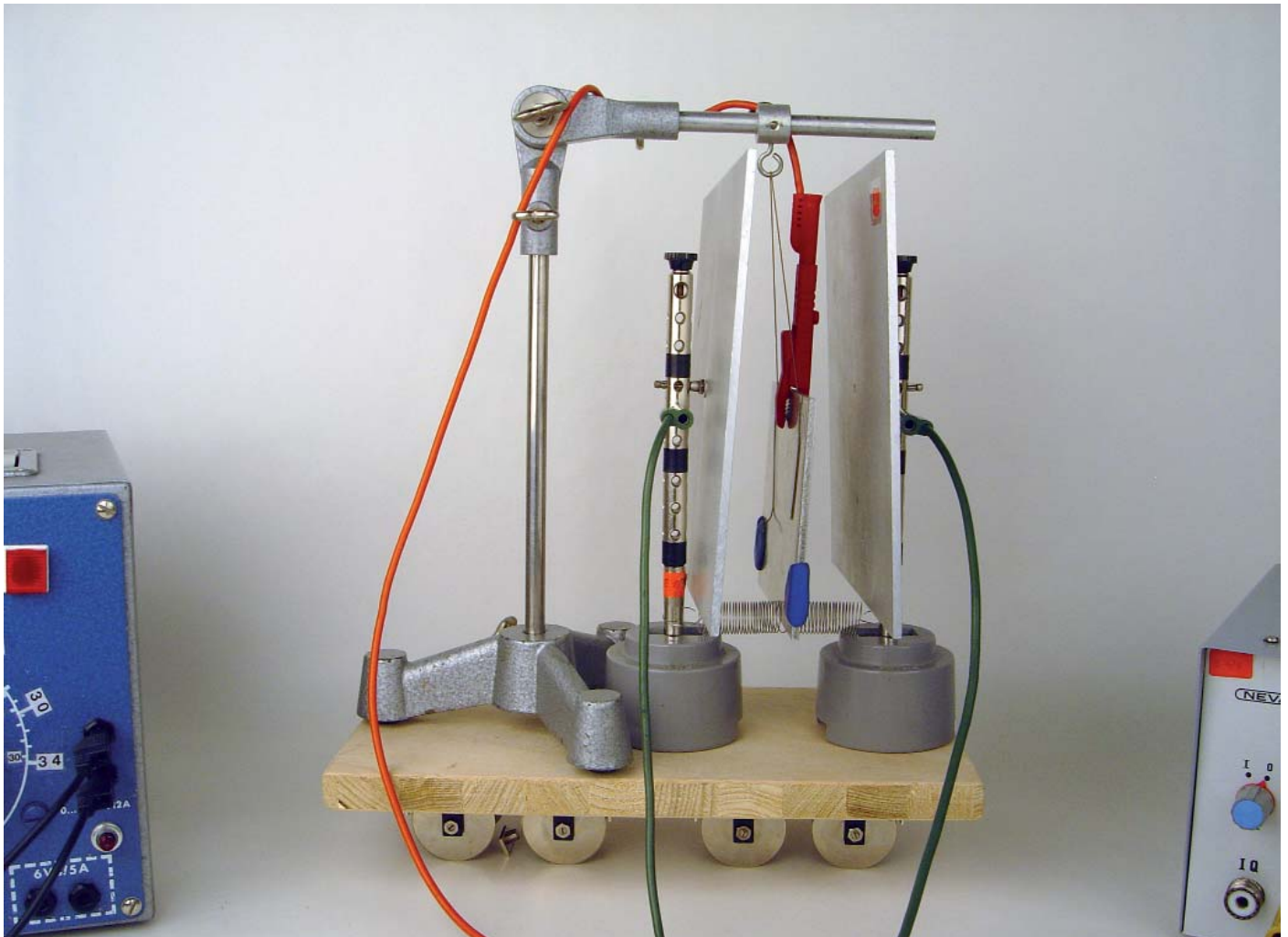
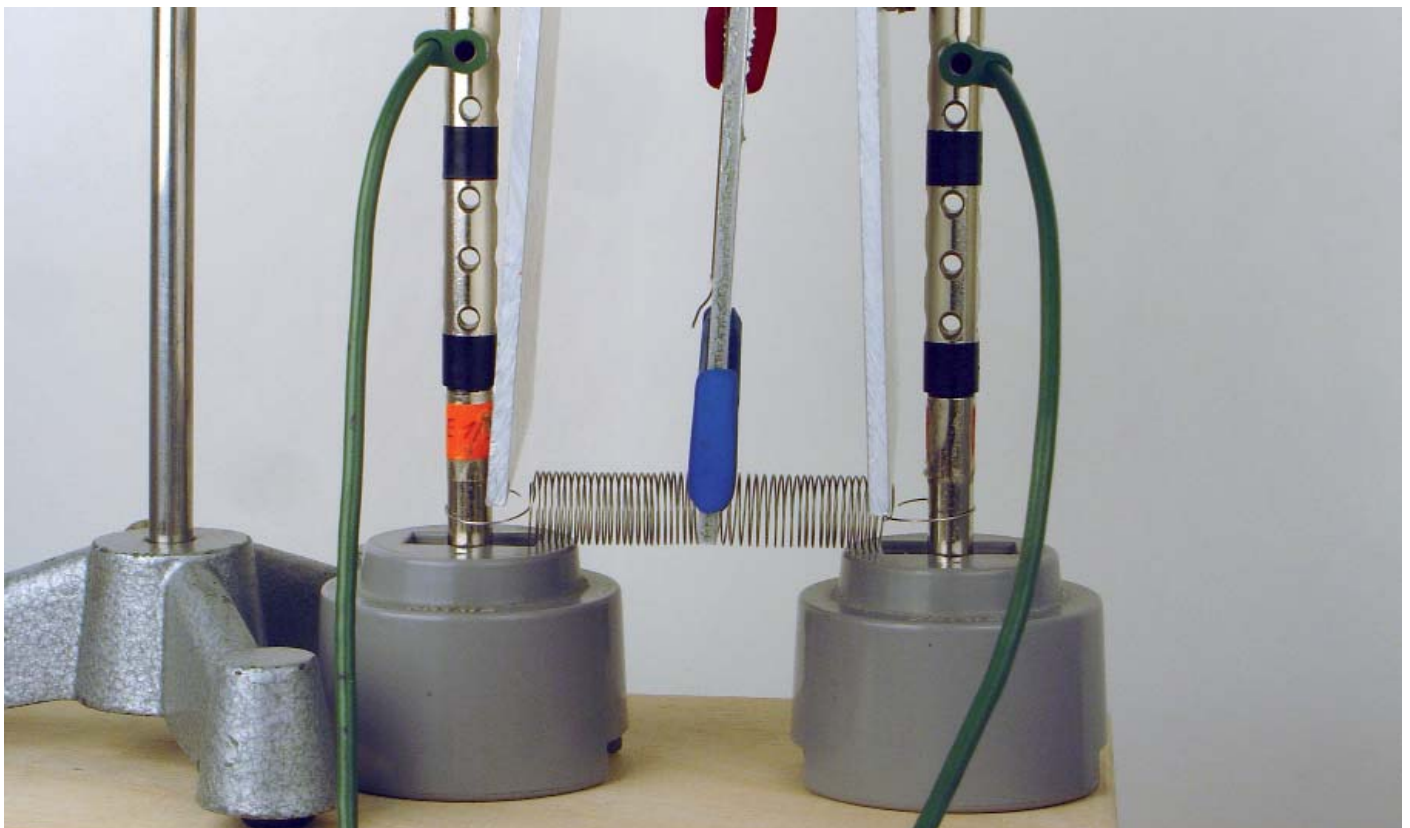


Abb. 13: Modell eines kapazitiven Beschleunigungssensors

Abb. 14: Eine Feder bewirkt, dass die Auslenkung proportional zur beschleunigenden Kraft ist



Der Spannungsverlauf, der mit diesem Modell beim Hin- und Herschieben des Wagens gemessen wurde, eignet sich nur schlecht zur quantitativen Messung von Beschleunigungen, lässt aber durchaus qualitative Aussagen über die Bewegungen des Wagens zu. In Abb. 15 wurde der Wagen bei $t = 2,3$ s nur ganz kurz ca. 10 cm in die eine Richtung verschoben (Peak nach unten) und sofort bei $t = 2,6$ s wieder angehalten (Peak nach oben). Da der Wa-

gen ab $t = 2,6$ s wieder steht, ergibt sich eine unerwünschte Schwingung. Bei $t = 8$ s wiederholt sich der Verlauf mit umgekehrten Vorzeichen. Man erkennt also deutlich, dass ein Beschleunigungsvorgang zu einer gedämpften Schwingung führt, wobei die Dämpfung und die Schwingungsfrequenz von der verwendeten Feder abhängen. Dieser Effekt ist im Prinzip auch bei den kommerziellen Beschleunigungssensoren vorhanden. Des Weiteren erkennt man bei der

Durchführung, dass es abhängig vom Plattenabstand und der Federhärte eine maximale Beschleunigung gibt, die mit dieser Konfiguration messbar ist. Auch das ist eine wichtige Eigenschaft von Beschleunigungssensoren in der Praxis.

2.3 Erarbeitung der Hall-Effekt-Beschleunigungsmessung

Die Funktionsweise des Hall-Effekt-Beschleunigungssensors erfolgt in drei Schritten. In den ersten beiden Schritten wird in zwei qualitativen Versuchen mittels eines einfachen Hall-Effekt-Sensors, eines Dauermagneten und eines Voltmeters die Abhängigkeit der Hall-Spannung U_H von der magnetischen Flussdichte \vec{B} gezeigt. Dazu wird ein gewöhnlicher Hall-Effekt-Sensor (z. B. [9]) an eine Spannungsquelle und ein Voltmeter angeschlossen. Vor den Hall-Effekt-Sensor wird in geringem Abstand ein Dauermagnet positioniert (siehe Abb. 16).

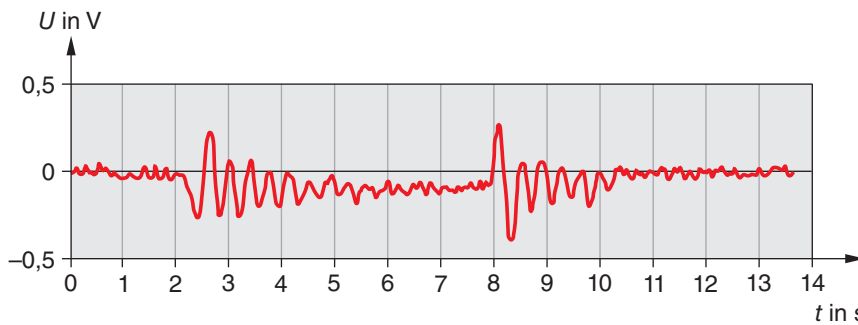


Abb. 15: Ausgangsspannung der Messbrücke beim zweimaligen kurzen Verschieben des Wagens mit der Hand

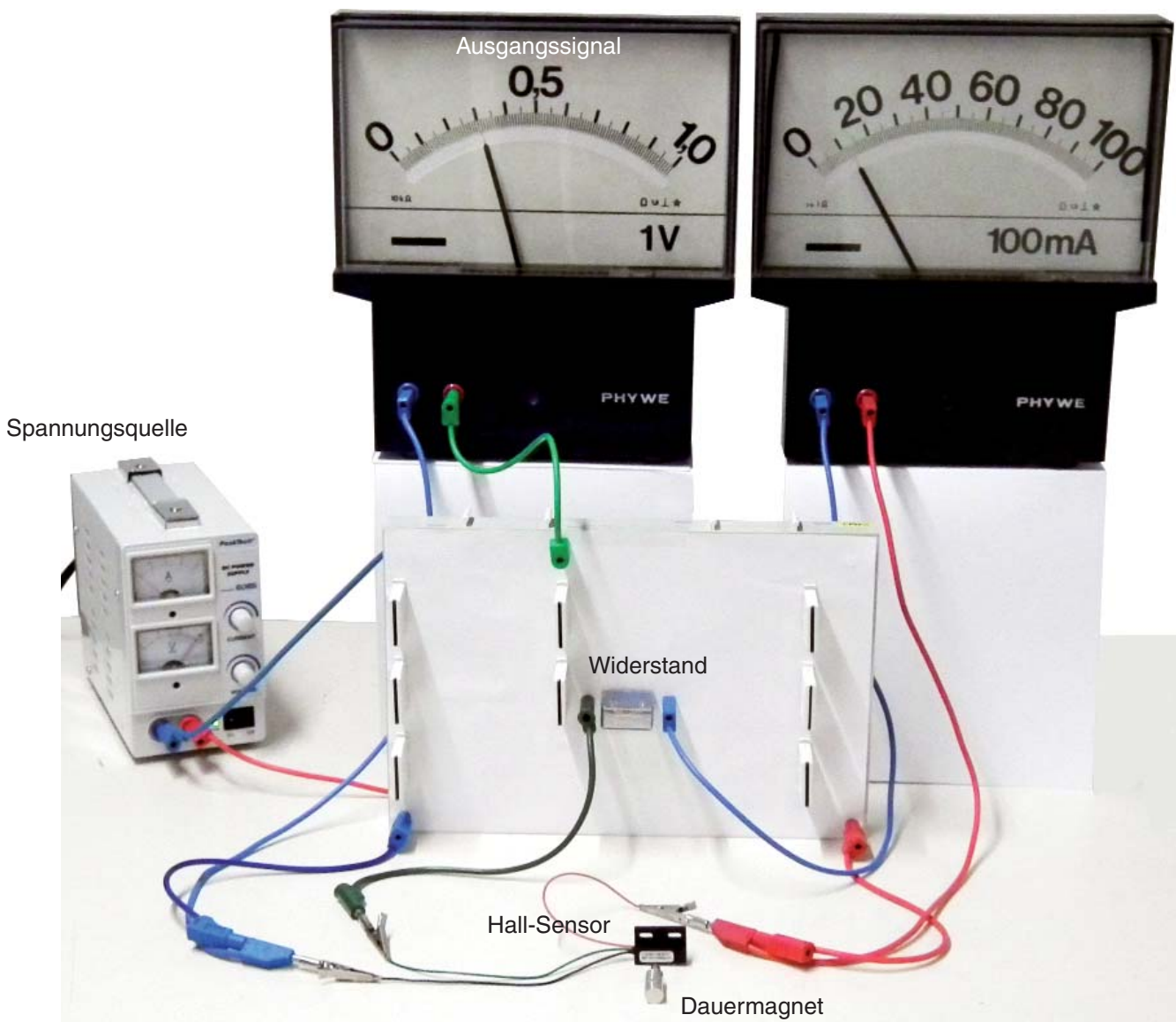


Abb. 16: Hall-Effekt-Sensor

Die geradlinige Verschiebung des Dauermagneten auf den Hall-Effekt-Sensor zu bzw. von diesem weg führt zur Zunahme bzw. Abnahme der Hall-Spannung. Im zweiten Schritt des Versuchs wird der Dauermagnet nicht auf den Hall-Effekt-Sensor zu bzw. von diesem weg bewegt, sondern links und rechts an ihm vorbei. Befindet sich der Dauermagnet in der Mitte vor dem Hall-Effekt-Sensor, ist die Hall-Spannung am größten. Die Verschiebung des Dauermagneten führt zu einer Abnahme der Hall-Spannung. In einem dritten Schritt erfolgt die quantitative Durchführung der beiden zuvor beschriebenen qualitativen Experimente.

Als Hall-Effekt-Sensoren können übliche Hall-Effekt-Sensoren [9] oder bereits lineare Positions-Hall-Effekt-Sensoren [10] eingesetzt werden. Die „normalen“ Hall-Effekt-Sensoren bieten ein größeres experimentelles Einsatzspektrum an. Sie ermöglichen z. B. auch die Demonstration der Winkelabhängigkeit der Hall-Spannung von der magnetischen Flussdichte \vec{B} . Auch aus didaktischer Sicht ist die Verwendung von gewöhnlichen Hall-Effekt-Sensoren den linearen Positions-Hall-Effekt-Sensoren vorzuziehen. Letztere liefern eine Hall-Spannung, die sich linear mit dem Abstand des Dauermagneten verändert. Dieser gemessene lineare Zusammenhang verleitet dazu, auch zwischen der magnetischen Flussdichte \vec{B} und dem Abstand zum Magneten einen linearen Zusammenhang anzunehmen und führt so zu Fehlvorstellungen.

2.4 Erarbeitung der piezoelektrischen Beschleunigungsmessung

Das Funktionsprinzip eines piezoelektrischen Beschleunigungssensor lässt sich nach [8] mit einem einfachen Modellexperiment (Abb. 17) demonstrieren. Es stellt eine Erweiterung des ersten Modellexperiments (Abb. 18) dar. Anstelle der Winkelscheibe kommt ein piezoelektrisches Element und ein Voltmeter zum Einsatz. Das piezoelektrische Element ist so angebracht, dass bei einer Beschleunigung der ausgeleitete Probekörper eine Kraft auf die sensitive Fläche des Elements ausüben kann. Das Voltmeter zeigt abhängig von der Kraft, die auf das piezoelektrische Element wirkt, einen Spannungspuls an. Eine höhere Beschleunigung des Wagens führt zu einer größeren Kraft vom Probekörper auf das piezoelektrische Element.

Wie bereits im Abschnitt 2.4 beschrieben wurde, reagieren piezoelektrische Elemente nur auf Kraftänderungen. Das Voltmeter zeigt also nur dann eine Spannung



Abb. 17: Modell eines piezoelektrischen Beschleunigungssensors vergrößert (nach [8])



Abb. 18: Piezoelektrischen Beschleunigungssensor in der Messanordnung (nach [8])

an, wenn sich die Beschleunigung des Wagens ändert.

Literatur

- [1] H. Bauer (Hrsg.), *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch* (Bosch), 25. Aufl., Wiesbaden: Vieweg (2003)
- [2] W.-D. Schmidt: *Sensorschaltungstechnik*, 2. Aufl., Würzburg: Vogel (2002)
- [3] M. Weidinger & T. Wilhelm: *Differenzbildung bei Sensoren - Differentialtransformator und Differenzspulensensor im Unterricht*, in: PdN-PhiS 57, Nr. 4, 2008, S. 5 – 9
- [4] H.-R. Tränkle & E. Obermeier, *Sensortechnik - Handbuch für Praxis und Wissenschaft*, Berlin: Springer Verlag (1998)
- [5] Robert Bosch GmbH, *Sicherheits- und Komfortsysteme*, Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn Verlag (2004)
- [6] M. Laible, R. K. Müller, B. Bill & K. Gehrke: *Mechanische Größen, elektrisch gemessen – Grundlagen und Beispiele zur technischen Ausführung*, Renningen: Expert Verlag (2009)
- [7] J. Grehn, J. Krause (Hrsg.), *Metzler Physik*,

3. Aufl., Hannover: Schroedel (1998)

[8] B. Eckert, W. Stetzenbach & H.-J. Jodl, *Low Cost – High Tech, Freihandversuche Physik*. Köln: Aulis Verlag (2000).

[9] *Halleffektsensor Typ 55100 Hamlin*, Conrad Bestell-Nr.: 503655 – 62, 7,55 €

[10] *Linearer Positionssensor von Honeywell SS495A*, Conrad Bestell-Nr.: 505291 – 62, 3 €

Anschriften der Verfasser

Bianca Watzka, M.A., Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München, Theresienstr. 37, 80333 München, E-Mail: Bianca.Watzka@physik.uni-muenchen.de;
 StR Stefan Scheler, Deutschhaus-Gymnasium Würzburg, Zeller-Straße 41, 97082 Würzburg, E-Mail: stefanscheler@yahoo.de;
 Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main, E-Mail: wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, WWW: www.thomas-wilhelm.net