

# Differentialtransformator und Differenzspulensensor im Unterricht – Differenzbildung bei Sensoren

M. Weidinger u. T. Wilhelm

## 1. Einleitung

Herkömmlicher Physikunterricht, der nur auf der Demonstration und Begründung physikalischer Zusammenhänge beruht, ist für Schüler nicht unbedingt motivierend, denn Physik wird hier häufig als Selbstzweck erlebt. Dagegen hat sich gezeigt, dass für Schüler direkte Bezüge zu ihrer Erfahrungswelt motivierend sind, da Physik damit einen subjektiven Erklärungswert erhält. Deshalb sind u.a. Sensoren, wie sie in der Technik genutzt werden, für den Physikunterricht interessant [1].

Die physikdidaktische Forschung zeigte außerdem, dass es für Mädchen wichtig ist, welche Anwendungen und alltäglichen Kontexte man wählt, während dies bei Jungen keine Bedeutung hat [2]. Bei herkömmlichem Physikunterricht nimmt das Interesse von Schülerinnen an Physik im Lauf der Schuljahre stark ab. Mädchen interessieren sich i. Allg. weniger für die reine Wissenschaft Physik, sondern mehr für Anwendungen bei Mensch und Natur und die gesellschaftliche Bedeutung der Physik. Besonders großes Interesse haben Mädchen hingegen bei Inhalten mit Bezug zum menschlichen Körper, wozu auch Anwendungen in der medizinischen Diagnostik und Therapie gehören. Deshalb ist die Medizintechnik für den Physikunterricht von großer didaktischer Relevanz.

Beispiele sind Messungen am Herz-Kreislaufsystem, wie EKG, Körperfettmessung, Lügendetektor, Puls- und Blutdruckmessung. Den Blutdruck misst man bei chirurgischen Eingriffen kontinuierlich und direkt im Blut (invasiv). Der Blutdruck wird entweder über einen mit Salzlösung gefüllten Katheder an einen Druckmesswandler außerhalb des Blutgefäßes übertragen (extravaskulär) oder der Druckmesswandler wird direkt in das Blutgefäß eingeführt (intravaskulär). Der Druckmesswandler besteht meist aus einem Hohlkörper, der zum Blut bzw. zur Salzlösung hin durch eine Membran abgeschlossen ist, die durch den Druck ausgelenkt wird. Der Drucksensor erfasst die Auslenkungen der Membran und formt sie in Spannungen um. Die Membranauslenkung wird mit Dehnungsmessstreifen, mit kapazitiven Sensoren oder mit induktiven Sensoren gemessen. Bei induktiven Sensoren verstimmt ein an die Membran gekoppelter Ferritkern einen Differentialtransformator oder verändert eine Induktivität.

Im Folgenden werden Schulversuche zu diesen induktiven Sensoren vorgestellt [3]. Sie zeigen, wie man mit einfachen Mitteln im Physikunterricht demonstrieren kann, eine Auslenkung in ein proportionales Spannungssignal zu übertragen.

## 2. Die Idee der Differenzbildung

Ein Sensor erfasst eine physikalische Größe, wie z.B. die Auslenkung einer Membran, und erzeugt dazu aufgrund eines physikalischen Effektes ein eindeutiges elektrisches Signal, meist

eine auswertbare Spannung. Dieses Signal ist häufig nicht proportional zu der zu erfassenden physikalischen Größe, was aber meist gewünscht ist. Die Idee ist nun, eine Differenzbildung durchzuführen.

Betrachten wir eine physikalische Größe  $h$ . Ein Sensor erzeugt in Abhängigkeit von  $h$  ein nichtlineares temperaturabhängiges Signal  $y = a_0 + a_1h + a_2h^2 + f(T)$ , wobei  $f(T)$  ein lineares von der Temperatur  $T$  abhängiges Störglied darstellt. Nehmen wir an, die physikalische Größe  $h$  wird nun aus der Ruhelage  $x_0$  um  $\Delta x$  auf den Wert  $h = x_0 + \Delta x$  oder  $h = x_0 - \Delta x$  ausgelenkt. Nun werden zwei Sensoren so angebracht, dass sie unterschiedlich ausgelenkt werden. Z.B. werden zwei identische Sensoren 1 und 2 so auf eine Membran befestigt, dass der eine gedehnt der andere entsprechend gestaucht wird. Die beiden Ausgangssignale der Sensoren sind damit  $y_1 = a_0 + a_1(x_0 + \Delta x) + a_2(x_0 + \Delta x)^2 + f(T)$  und  $y_2 = a_0 + a_1(x_0 - \Delta x) + a_2(x_0 - \Delta x)^2 + f(T)$ . Führt man die beiden Ausgangssignale  $y_1$  und  $y_2$  einem Differenzbildner  $y_1 - y_2 = 2 \cdot (a_1 + 2a_2x_0) \cdot \Delta x$  zu, heben sich die konstanten, die quadratischen und die temperaturabhängigen Terme auf. In der elektronischen Messtechnik bezeichnet man derartige Schaltungen als Parallelstruktur [4]. Differenzbildner können beispielsweise Differenzverstärker oder Brückenschaltungen sein. Das Ausgangssignal  $y_1 - y_2$  am Differenzbildner zeichnet sich durch Linearität bzgl. der Auslenkung  $\Delta x$ , durch Temperaturunabhängigkeit und Verdopplung der Sensorempfindlichkeit um den Faktor 2 aus.

### 3. Der Differentialtransformator

Beim Differentialtransformator handelt es sich um eine Sonderform eines Transformators, bei dem die Kopplung zwischen Primär- und Sekundärwicklung von der Stellung eines weichmagnetischen Kerns (z.B. eines Ferritkerns) abhängt. In Abb. 1 ist das Kopplungsschaltbild des Transformators und in Abb. 2 eine mögliche technische Anordnung aufgeführt. Die Primärspule  $L_0$  (innen gewickelt, hellgrau) wird mit einer Wechselspannung  $U_0$  von einigen kHz betrieben. Die beiden Sekundärspulen  $L_1$  und  $L_2$  (schwarz) sind außen um  $L_0$  gewickelt und gegensätzlich zueinander in Reihe geschaltet (Abb. 1), so dass sich die in ihnen induzierten Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  subtrahieren. Bei symmetrischem Aufbau sind in der Mittelstellung des Kerns die beiden Teilinduktivitäten gleich groß und heben sich aus diesem Grund gerade auf;  $U_x$  ist Null. Verschiebt man den Kern um  $\Delta l$  nach links oder rechts, so überwiegt einmal die eine, dann wieder die andere Teilinduktionsspannung. Der Betrag der Ausgangsspannung ist proportional zur Auslenkung aus der Mittellage:  $U_x \sim \Delta l$ . Je nach Stellung des Kerns ist die Ausgangsspannung gleichpha-

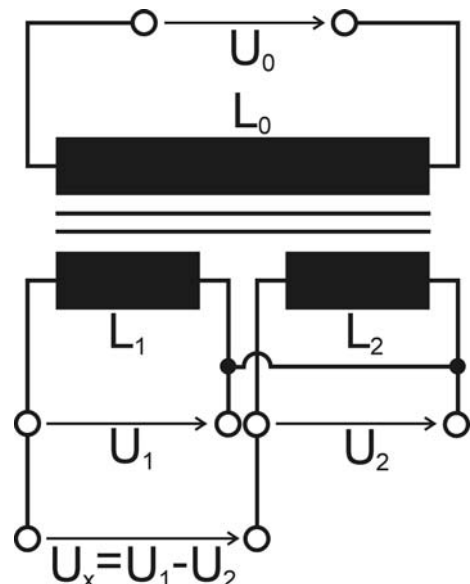


Abb. 1: Elektrisches Schaltbild des Differentialtransformators (nach [5])

sig oder gegenphasig zur Speisenspannung. Damit ändert sich die Phase beim Durchgang des Kerns durch die Mittellage um  $180^\circ$  [6, 6.2 + 6.3]. Die Phase gibt somit Aufschluss über die Richtung der Auslenkung (ob nach rechts oder links). Bei technischen Anwendungen wird das Differenzsignal nach der Verstärkung über einen phasenselektiven Gleichrichter ausgewertet, denn mit Hilfe des Vorzeichens dieser Ausgangsgleichspannung kann dann die Stellung des Kerns eindeutig

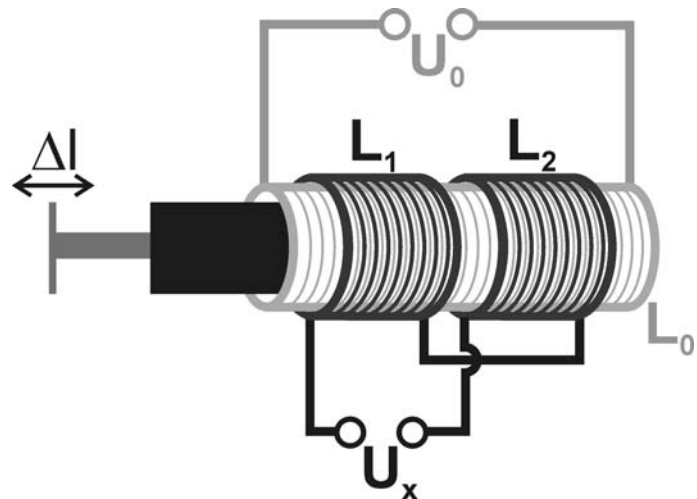


Abb. 2: Mögliche Anordnung der Spulen eines Differentialtransformators in der Technik

einschließlich der Richtung bestimmt werden. Bei Erregerspannungen von 1 V erreicht man Empfindlichkeiten von  $2 \text{ mV}/\mu\text{m}$  [7, S. 215].

Der Differentialtransformator eignet sich gut für Messungen im Mikrometer- und Millimeterbereich. Der Vorteil der Differentialtransformatoren ist, dass sie durch die gegensätzlich geschalteten Sekundärspulen die Differenzspannung selbst erzeugen. Es ist keine weitere Schaltung, wie eine Brückenschaltung zur Herstellung einer Differenzspannung nötig (siehe Abschnitt 5) und deshalb werden keine zusätzlichen Widerstände benötigt [5]. Bei gleich bleibender Qualität erhält man einen Sensor, der billiger und kleiner ist als andere induktive Messwertwandler. Da der Messvorgang im Sensor berührungsfrei geschieht, ist er auch verschleißfrei.

Das erste beim Menschen eingesetzte Tip-Manometer zur Messung des arteriellen Drucks und von Herzgeräuschen, enthielt auch einen Differentialtransformator [7, S. 215 und 8, S. 214]. Heute werden diese Sensoren in vielen Bereichen eingesetzt, um Bewegungen, Positionen, Hübe und Auslenkungen in Fahrzeugen, Maschinen und Fertigungsanlagen zu messen und zu überwachen. Im Flugzeug zeigen sie dem Piloten oder Autopiloten z.B. die Stellung des Ruders, der Landeklappen, des Fahrwerks oder der Antennen an [9].

#### 4. Ein Schulversuch zum Differentialtransformator

Der Differentialtransformator kann bereits in der Sekundarstufe I oder auch in der Sekundarstufe II behandelt werden. Durch obiges Rechenbeispiel zur Parallelstruktur (Abschnitt 2) kann den Schülern bewusst gemacht werden, dass zur Linearisierung des Sensorausgangssignals eine Differenzbildung zwischen zwei gegensinnig wirkenden Sensoren notwendig ist. Den Subtraktionseffekt, der durch entgegengesetzte Reihenschaltung der Spulen erreicht wird, könnte man sich mit einem Analogieexperiment mit Hilfe von zwei Batterien verdeutlichen. Hält man zwei Batterien mit gleicher Klemmspannung (vorher prüfen) an zwei gleichen Polen aneinander und verbindet dann auch noch die anderen zwei Pole über ein Voltmeter, so subtrahieren sich die beiden Spannungen zu Null. Dieser Fall entspricht der symmetrischen

Kernstellung. Ist eine der beiden Batterien schwächer als die andere, so lässt sich eine Differenzspannung messen, wie im Fall der Auslenkung des Kerns aus der Mittellage.

Für einen Schulversuch werden nicht wie in technischen Varianten (Abb. 2) die Sekundärspulen und die Primärspule auf einen gemeinsamen Spulenkörper gewickelt, sondern die Sekundärspulen mit 800 Windungen (von Phywe, Querschnitt des Eisenkerns 2 cm, Länge 4 cm,  $8 \Omega$ , 2 mH) links und rechts von der Primärspule mit 400 Windungen aufgestellt und gegensätzlich in Reihe geschaltet (einen Aufbau mit anderen Spulen findet man in [10, S. 64]). Abb. 3 zeigt den entsprechenden Versuchsaufbau. Die Speisewechselspannung (Kabel in der Mitte) beträgt einige Volt.

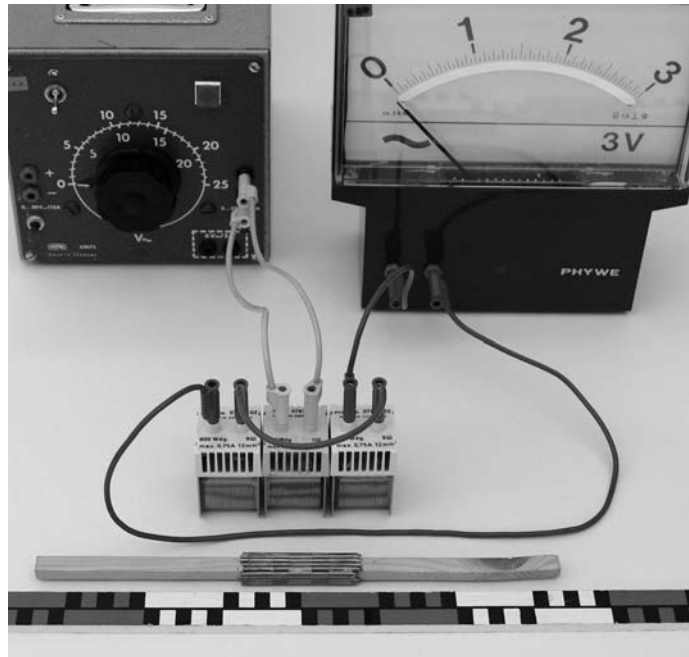


Abb. 3: Versuchsaufbau eines Differentialtransformators im Schulversuch. Im Vordergrund der Kern aus Eisennägeln, die auf dem Umfang eines Holzstabs befestigt sind.

Der Eisenkern, der nun in die Spulen gesteckt wird, muss von außen bewegt werden können. Deshalb nimmt man am besten keinen Eisenkern der Lehrmittelfirmen, sondern baut sich selbst einen: Man nimmt Eisenstifte (z.B. 8 cm) oder sägt die Köpfe von Eisennägeln ab. Die Nägel befestigt man (z.B. mit Klebestreifen) nebeneinander auf dem Umfang eines längeren Holzstabs (vgl. Abb. 3, Vordergrund), so dass man einen Kern einheitlicher Länge erhält. Man markiert sich eine Stelle auf dem Holzstab, durchfährt den Differentialtransformator und bestimmt den Ort des Stabes mit Hilfe eines Lineals. Zu jedem Ort notiert man sich den Spannungswert, den man am Voltmeter abgreift. In Abhängigkeit vom Ort erhält man den in Abb. 4 dargestellten Spannungsverlauf (Betrag der Spannung ohne Phase), wobei  $x = 0$  die Kernmittellage ist. Wie erwartet ergibt sich eine lineare Abhängigkeit der induzierten Spannung von der Auslenkung in einem weiten Bereich um die Mittelstellung (bis ca.  $\pm 2$  cm). Ein Vergleich der verwendeten Baulängen zeigt, dass der Proportionalitätsbereich hier so weit geht, bis die Nägel die eine Sekundärspule ganz verlassen haben.

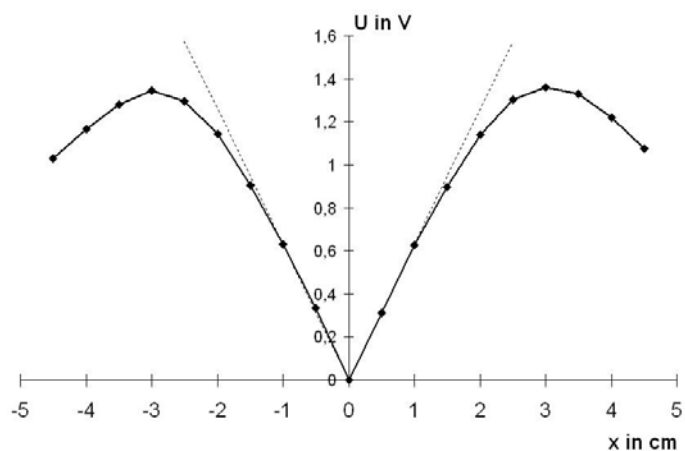


Abb. 4: Kennlinienverlauf des Differentialtransformators

## 5. Der Differenzspulensensor

Ein anderer induktiver Orts-Sensor ist der Differenzspulensensor, bei dem die Differenzbildung über eine Wheatstonesche Brückenschaltung geschieht. Zum Verständnis der Schaltung dieses Sensors und vieler anderer Sensoren ist es hilfreich, wenn die Schüler aus der Mittelstufe die Wheatstonesche Brückenschaltung aus vier Widerständen kennen. Die einfachste Brückenschaltung bei Sensoren ist die Viertelbrücke, bei der nur einer der vier Widerstände ein Sensor ist. Baut man zwei oder vier Sensoren in eine Schaltung, so spricht man von einer Halb- oder Vollbrückenschaltung. Halb- oder Vollbrücke können zur Differenzbildung verwendet werden. Die Differenzbildung wird dabei durch Messung der Differenzspannung in der Brückenmitte erreicht.

Bei dem Differenzspulensensor erfolgt die Differenzbildung der Spannungen an  $L_1$  und  $L_2$  in einer solchen Brückenschaltung, wobei hier eine mit Wechselspannung  $U_0$  (einige kHz) gespeiste Halbbrückenschaltung verwendet wird (Abb. 5). Ein Ferritkern, der durch beide Spulen geht, wird aus der Mittellage verschoben, so dass sich beide Induktivitäten gleichzeitig ändern. Die Brückenausgangsspannung  $U_x$  lässt sich aus der Spannungsteilerregel be-

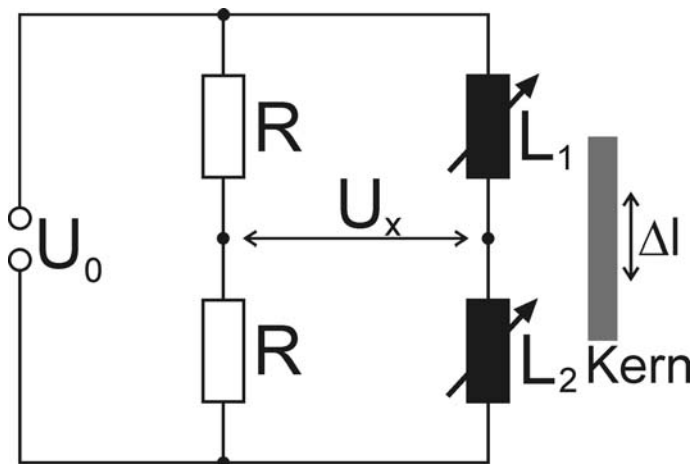


Abb. 5: Induktive Halbbrücken-Schaltung eines Differenzspulensensors

rechnen. Zur Herleitung benutzt man den komplexen induktiven Widerstand  $i\omega L$ , den die Spulen im Wechselstromkreis aufweisen. Es folgt:

$$U_x = U_0 \left[ \frac{i\omega L_2}{i\omega L_1 + i\omega L_2} - \frac{R}{2R} \right] = U_0 \left[ \frac{L_2}{L_1 + L_2} - \frac{1}{2} \right]. \text{ Im unausgelenkten Fall, für } L_1 = L_2 = L_0, \text{ ist}$$

$U_x = 0$ ; die Brücke ist abgeglichen.

Durch die kleinen Auslenkungen  $\Delta l$  aus der Mittellage wird bei beiden Spulen die gleiche Induktivitätsänderung  $\Delta L$  erzeugt, so dass sich die Teilinduktivitäten zu  $L_1 = L_0 - \Delta L$  und  $L_2 = L_0 + \Delta L$  ergeben. Setzt man dies in die obige Gleichung ein, erhält man:

$$U_x = U_0 \left[ \frac{L_0 + \Delta L}{2L_0} - \frac{1}{2} \right] = U_0 \frac{\Delta L}{2L_0}. \text{ Diese Gleichung gibt bereits den linearen Zusammenhang}$$

zwischen der Brückenspannung  $U_x$  und der Induktivitätsänderung  $\Delta L$  an. Um  $\Delta L$  noch auf die Ortsänderung  $\Delta l$  zurückzuführen, nutzt man, dass nach den Gesetzen der Differentialrechnung für kleine Änderungen gilt:  $\Delta L = \frac{dL}{dl} \Delta l$ , wobei der Wert  $dL/dl$  für nicht allzu große Auslen-

kungen die konstante Steilheit der Kennlinie im Nullpunkt darstellt. Dieser Wert wird vom Hersteller experimentell im Spulenmittelpunkt ermittelt und steht dann für die Auswertung

zur Verfügung.

zur Verfügung. Damit hängt nun die Brückenspannung  $U_x = \frac{U_0}{2L_0} \frac{dL}{dl} \Delta l$  linear von der Auslenkung  $\Delta l$  des Kerns aus der Mittellage ab. Je nach Stellung des Kerns ist die Brückenspannung gleichphasig bzw. gegenphasig zur Speisespannung. Mit Differenzspulensensoren sind Messungen im Bereich von Mikrometern bis zu Metern realisierbar.

### 6. Ein Vorversuch zum Differenzspulensensor

In der zwölften Jahrgangsstufe wird die in einer Spule induzierte Selbstinduktionsspannung als  $U_{\text{ind}} = -L \, dI/dt$  behandelt. Es lohnt sich, die Wirkung der Konstante  $L$  auf die Induktionsspannung näher zu betrachten, da sie in der induktiven Sensorik die Hauptrolle spielt.

Dass sich die Induktivität einer Spule durch Einbringen eines weichmagnetischen Kerns ändert, kann man mit dem Versuch aus Abb. 6 zeigen. Verwendet werden wie oben wieder zwei kleine Spulen mit 800 Windungen, ein  $10 \, \Omega$ -Widerstand, Wechselspannung ( $5 \, \text{V}$ ) und ein Voltmeter. Der Widerstand und die beiden Spulen werden in Reihe geschaltet, so dass sich die Spulen zu einer einzigen langen Spule mit 1600 Windungen addieren. Als Eisenkern nimmt man den in Abschnitt 4 beschriebenen Kern, bei dem Eisennägeln ohne Köpfe nebeneinander auf dem Umfang eines Holzstabs befestigt wurden (vgl. Abb. 3, Vordergrund).

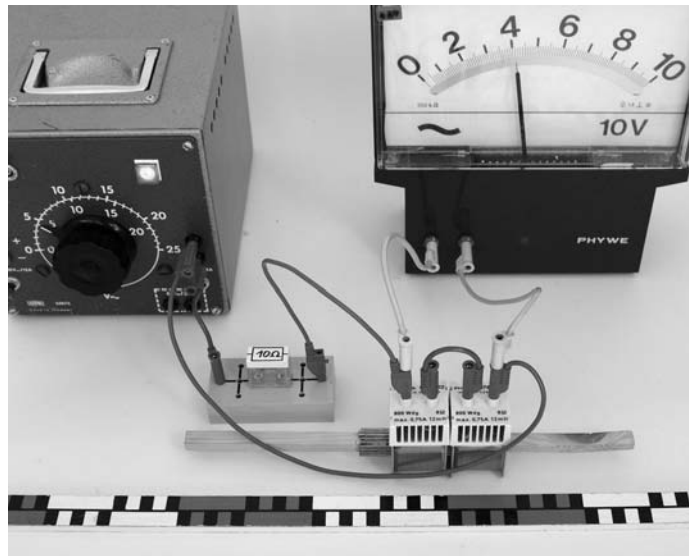


Abb. 6: Vorversuch: Spannung an einer (doppelten) Spule in Abhängigkeit von der Ankerstellung. Der Kern besteht aus Eisennägeln, die auf dem Umfang eines Holzstabs befestigt sind.

Umfang eines Holzstabs befestigt wurden (vgl. Abb. 3, Vordergrund).

Man kann natürlich auch nur eine einzige Spule nehmen, um die Idee des Vorversuchs deutlicher zu machen. Will man aber dann zum Differenzspulensensor übergehen, ist der Schritt von einer doppelten Spule zu zwei Spulen in der Brückenschaltung einfacher. Denn so muss man nur einen einzigen Kern für beide Versuche mit der doppelten Spulenlänge basteln und nicht noch einen zusätzlichen kurzen Eisenkern.

Es werden ca.  $5 \, \text{V}$  Wechselspannung angelegt, der Eisenkern in die doppelte Spule hineingebracht und die Spannung an der langen Spule gemessen (Abb. 6). In Abhängigkeit vom Ort erhält man den in Abb. 7 zu sehenden Spannungsverlauf, wobei  $x = 0$  die

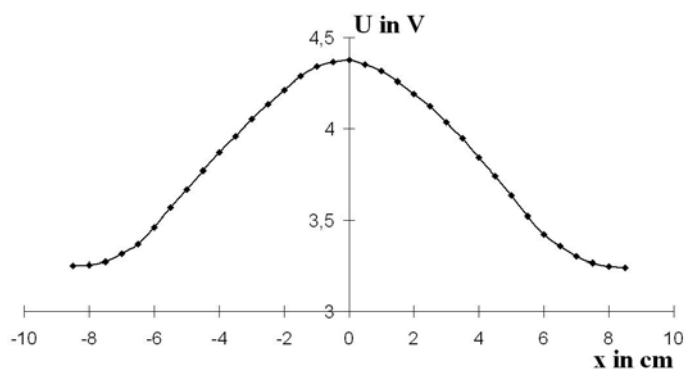


Abb. 7: Abhängigkeit der Spulenspannung von der Ankerstellung

Kernmittelstellung ist. Aufgrund der starken Nichtlinearität ist diese Anordnung schlecht für sensorische Erfassungen geeignet.

### 7. Ein Schulversuch zum Differenzspulensensor

Durch eine geringe Veränderung der Schaltung des Vorversuchs kann daraus ein Differenzspulensensor gebaut werden. Abb. 8 zeigt ein Modell eines Differenzspulensensors im Physikunterricht. Die Brückenschaltung besteht aus obigen zwei Induktivitäten mit 800 Windungen und zwei Widerständen mit je  $10 \Omega$ . Der Versuch wird bei niedriger Wechselspannung (ca. 5 Volt) durchgeführt. Das Voltmeter misst die Brückenspannung (siehe Abb. 5). Während der Eisenkern durch die Spulen geschoben wird, wird die Brückenspannung erfasst, woraus sich eine Kennlinie (Abb. 9) ergibt. Wie erwartet ergibt sich eine lineare Abhängigkeit der Brückenspannung von der Auslenkung in einem weiten Bereich um die Mittelstellung (bis ca.  $\pm 2$  cm). In der Mittelstellung des Kerns

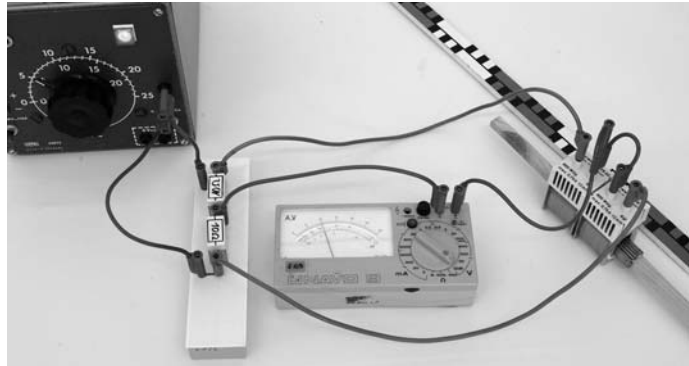


Abb. 8: Versuchsaufbau zum Differenzspulensensor

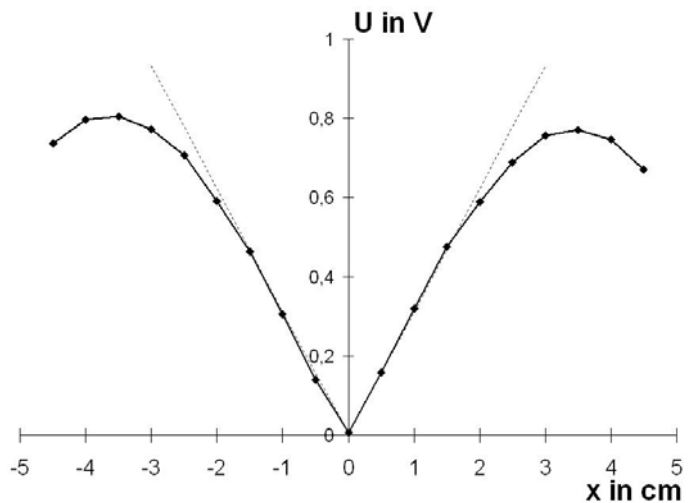


Abb. 9: Kennlinienverlauf des Differenzspulensensors

zwischen den Spulen ist die Brückenspannung Null. Da die Wechselspannungsmessgeräte nur Effektivwerte ausgeben, ist nur der Betrag der Brückenspannung zu sehen. Um die Richtung der Auslenkung am Vorzeichen ablesen zu können, müsste das Signal noch phasenselektiv gleichgerichtet werden, was die gängigen schulischen Möglichkeiten übersteigt. Mit diesem Versuch lernen die Schüler eine wichtige technische Linearisierungsmethode kennen. Außerdem hat das im Lehrplan vorgesehene Prinzip der Selbstinduktion hier eine weitere Anwendung gefunden.

### 8. Einbindung in den Unterricht

Wichtig ist, dass die Sensoren nicht um ihrer selbst willen unterrichtet werden, sondern im Zusammenhang mit einer konkreten Anwendung, um deren Nutzen in unserer Welt aufzuzeigen. Eine solche Anwendung ist bei diesen Sensoren die invasive Blutdruckmessung in der Arterie, wie sie bei chirurgischen Eingriffen genutzt wird. Hier wird der Blutdruck kontinuierlich gemessen und man erhält den zeitlichen Verlauf von Amplitude, Frequenz und Phase an

der interessierenden Stelle. Bei den bekannteren unblutigen Verfahren, bei denen die Arterie mit einer Manschette abgeklemmt wird und der systolische und diastolische Druck durch Abhören von Geräuschen (auskultatorische Methode) oder durch die Berechnung aus Druckschwankungen in der Manschette (oszillometrische Methode) bestimmt werden, erhält man dagegen in einem längeren Messvorgang nur ein einziges Wertepaar. Ein größeres Problem, wie die kontinuierliche Blutdruckmessung, wird hier erst durch die Lösung eines speziellen technischen Teilproblems, die Umwandlung von Orten in Spannungen, lösbar.

Dennoch ist das Lernziel nicht die Kenntnis von Medizintechnik oder von speziellen Sensoren, sondern grundlegende physikalische Inhalte, die in diesem Kontext gezeigt werden. Mit einem Schulversuch zum Differenzspulensensor wird einerseits ein Anwendungsbeispiel der Selbstinduktion gezeigt und andererseits eine weitere Anwendung der Wheatstoneschen Brückenschaltung, die häufig bei Sensoren eingesetzt wird. Der Versuch ist einfach und kann als Schülerexperiment durchgeführt werden. Die Wheatstonesche Brückenschaltung kann zwar in naturwissenschaftlichen Schulzweigen bereits in der Sekundarstufe I behandelt werden; allerdings wird die Induktivität erst in der Oberstufe behandelt. Einfacher zu verstehen ist der Differentialtransformator, der eine weitere Anwendung des Transformators ist. Er lässt sich bereits in der Sekundarstufe I behandeln und eignet sich ebenso für Schülerexperimente.

#### **Literatur:**

- [1] *Girwidz, R.*: Sensoren: Physik erleben, verstehen und anwenden. Chancen und Perspektiven für den Unterricht – In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 17, Nr. 91, 2006
- [2] *Häußler, P.; Bündner, W.; Duit, R.; Gräber, W.; Mayer, J.*: *Naturwissenschaftsdidaktische Forschung - Perspektiven für die Unterrichtspraxis*, Leibniz Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, Kiel, 1998
- [3] *Weidinger, M.*: *Medizintechnik - Physikalische Funktionsprinzipien und Anregungen für den Physikunterricht*, Staatsexamensarbeit, 2006, [www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/medizintechnik.htm](http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/arbeiten/medizintechnik.htm)
- [4] *Schmidt, W.-D.*: *Sensorschaltungstechnik Elektronik 8*, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1997
- [5] *Ribitsch, V.*: *Einführung in die physikalisch-chemischen Übungen (Vorlesung)*, Uni Graz, [http://physchem.kfunigraz.ac.at/rc/Ribitsch\\_Pfragner/ExperiMeth%20L%E4nge%20ind%20Messverfahren.pdf](http://physchem.kfunigraz.ac.at/rc/Ribitsch_Pfragner/ExperiMeth%20L%E4nge%20ind%20Messverfahren.pdf)
- [6] *Bergmann, K.*: *Elektrische Messtechnik, elektrische und elektronische Verfahren, Anlagen und Systeme*, Vieweg-Verlag, 1981, Braunschweig
- [7] *Port, J.*: *Vorlesungsskript Biomedizinische Technik I + II*, Institut für Biomedizinische Technik an der Universität Stuttgart Prof. Dr. rer. nat. J. Nagel, unveröffentlicht, 2002
- [8] *Faust, U.*: *Messwandler in der Medizin* – In: *Hutten, H.*: *Biomedizinische Technik 4. Medizinische Sondergebiete*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1991
- [9] Nach Angaben der Herstellerfirma [www.micro-epsilon.de](http://www.micro-epsilon.de) (LVDT-Sensoren)
- [10] *Eckert, B.; Stetzenbach, W.; Jodl, H.-J.*: *Low Cost – High Tech: Freihandversuche Physik. Anregungen für einen zeitgemäßen Unterricht*, Aulis-Verlag Deubner, Köln, 2000

#### **Anschrift der Verfasser:**

*StRef Markus Weidinger*, AR Dr. *Thomas Wilhelm*, Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, [wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de](mailto:wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de)