

## Sensorik mit Widerständen

Ulrich Böhm und Raimund Girwidz

### 1. Einführung, elektrische Widerstände

Der Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung gehört zu den elementaren Grundlagen in der Elektrizitätslehre. Zudem ist der elektrische Widerstand in der Regel die erste physikalische Größe, mit der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in der Elektrizitätslehre quantifiziert werden. Deshalb sollte die Beziehung  $R = \rho(T) \cdot \frac{\ell}{A}$  nicht einfach vorgegeben werden. Ein Verständnis dafür, dass der Ladungstransport von der Geometrie des Leiters (Querschnitt und Länge), von Materialeigenschaften (spezifischer Widerstand  $\rho$ ) und der Temperatur beeinflusst wird, kann entsprechend vertieft und mit konkreten Anwendungen verknüpft werden. Experimente mit Sensoren sind für Schülerversuche in der 8. oder 10. Jahrgangsstufe gut geeignet. Am einfachsten kann man die elektrischen Widerstände von Sensoren direkt mit einem Multimeter messen.

Physikalische Erklärungen für Temperaturabhängigkeiten müssen auf qualitativer Ebene bleiben. Ladungsträgerdichte und Beweglichkeit sollten allerdings als entscheidende Faktoren herausgestellt werden: In Metallen verringern Gitterschwingungen die Beweglichkeit der Ladungsträger, in NTC-Halbleitern ist die Zunahme der Ladungsträger der dominante Faktor, bei PTC-Widerständen / Kaltleitern ist beispielsweise die Sperrschichtwirkung in keramischen Materialien entscheidend.

Nachfolgend werden verschiedene Anwendungen und Experimentieranschläge zusammengetragen, die bereits im Unterricht getestet wurden.

### 2. Schülerübungen an Stationen

Die Arbeit mit Sensoren unterstützt ein funktionelles und ergebnisorientiertes Denken. Messen ist hierbei nicht mehr nur Selbstzweck, sondern dient einem konkreten Untersuchungsziel: Es gilt, die Funktion und Arbeitsweise eines Gerätes herauszufinden.

Durch den Stationenbetrieb lassen sich die Kosten für neue Geräte gering halten. Es folgen Vorschläge für eigenständiges Arbeiten von Schülerinnen und Schülern an Stationen. Die Übungen wurden bereits im Unterricht durchgeführt. Bei den Arbeitsanweisungen wurde versucht, möglichst knappe Anregungen zu geben. Nicht intendiert war das starre Abarbeiten eines Aufgabenkataloges. Eigene Überlegungen und kreative Untersuchungsideen sollten angeregt werden. Ein weiteres Anliegen war, den Umgang mit Fachliteratur und Datenblättern zu lernen. Zum Stundenende sollten die Arbeitsgruppen ihren Sensor dem Plenum vorstellen, um das Darstellen und Erklären von physikalischen Sachverhalten zu üben.

#### Station 1: Joystick

Joysticks und Steuerhebel auf Spielkonsolen sind fast allen Schülern von Computer- und Videospiele bekannt, nicht aber ihre Funktionsweise. Sie bieten damit einen guten Anknüpfungspunkt an die Alltagswelt. Für die Untersuchung in der Schule können Schüler eigene Joysticks mitbringen. Diese lassen sich meist aufschrauben. Als weiteres Hilfsmittel ist nur ein Ohmmeter nötig.

*Aufbau und Funktionsweise:*

Ein Joystick lässt sich in zwei Raumrichtungen bewegen. Der Griff ist mit zwei Potentiometern verbunden, jeweils eines für eine Koordinatenachse (siehe Abb. 1). Die Position wird vom Gameport eines Computers über zwei Widerstandsmessungen erfasst.

**Aufgaben:**

Finde heraus, wie der Computer die Stellung des Joysticks ermittelt. Schraube dazu den Joystick vorsichtig auf.

Für weitere Untersuchungen steht ein Ohmmeter zur Verfügung.

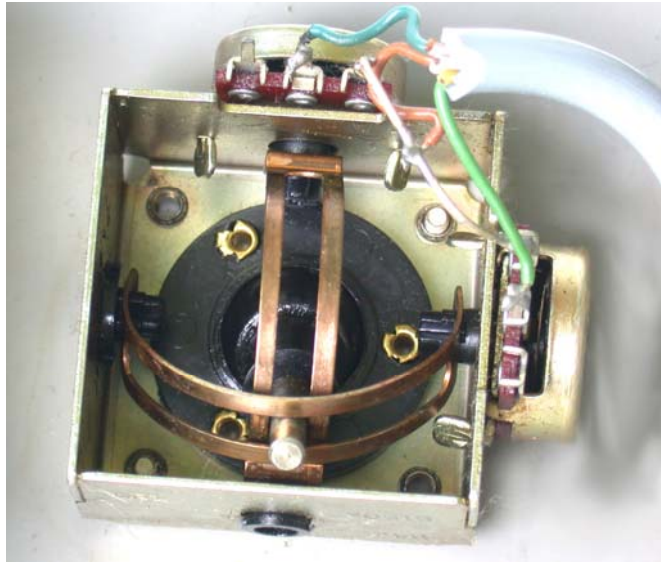


Abb. 1: Joystick geöffnet

**Station 2: Wassermelder**

Das Gerät wird auf dem Boden abgestellt und gibt bei auslaufendem Wasser einen Warnton aus. An der Unterseite des Gerätes befinden sich drei Leiterbahnen. Die beiden äußeren sind miteinander verbunden, während die mittlere durch einen Nichtleiter von den anderen getrennt ist. Wasser überbrückt die Isolation - ein (kleiner) Strom kann fließen und über eine Transistorschaltung einen Alarm auslösen.

**Aufgaben:**

Öffne vorsichtig das Gerät und versuche durch Ausprobieren und einfache Versuche die Funktionsweise zu verstehen.

Erweiterung: Konstruiere einen Überlaufschutz, der das Überschreiten eines vorgegebenen Füllstands in einem Wasserbecken anzeigt. Als Hilfsmittel stehen Krokodilklemmen, zwei Metallplatten, Drähte und der Wassermelder zur Verfügung.

**Station 3: Dehnungsmessstreifen**

Dehnungsmessstreifen (DMS) kommen in Waagen, Manometern und bei Kraftsensoren zum Einsatz (Funktionsweise siehe Infokasten).

DMS kann man mit einem guten Klebstoff auf dickeres Tonpapier aufkleben. Damit die Anschlusskontakte nicht durch mechanische Beanspruchung abreißen, sollten sie zusätzlich durch einen Klebstreifen auf dem Karton fixiert werden. Mit einem Ohmmeter ist beim Verbiegen des Kartons eine Widerstandsänderung messbar. Die Änderung liegt im Prozentbereich. Qualitativ lässt sich der Effekt aber mit einem Multimeter gut nachweisen. Für quantitative Versuche empfiehlt sich eine Brückenschaltung mit vier Dehnungsmessstreifen.

In einem Vorversuch sollen Schüler zunächst das Verhalten eines Konstantandrahtes untersuchen.

Aufgaben:

- Bestimme mit einem Ohmmeter den Widerstand eines Konstantandrahtes und vergleiche den gemessenen mit dem errechneten Wert.
- Hänge ein Gewicht an den Konstantandraht und untersuche, ob sich der Widerstand ändert.
- Worauf ist die Widerstandsänderung bei Belastung zurückzuführen? Tipp: Überlege, wovon der Widerstand eines Drahtes abhängt und welche Größen sich bei Belastung ändern.



Versuche mit dem DMS:

- Messe den Widerstand des Dehnungsmessstreifens (DMS), und untersuche, wie sich der Widerstand bei Verformung ändert.
- Lässt sich ein Zusammenhang zwischen Kraft und Widerstandsänderung feststellen?
- Warum verwendet man Konstantan als Material für den DMS?
- Versuche, anhand der Beschreibung (siehe [1]) die Funktionsweise zu verstehen und deinen Mitschülern kurz zu erklären.

#### Station 4: Drucksensor

Der Drucksensor (FSR: Force sensitive Resistor) ist im Informationskasten erklärt.

Im Experiment sollten Kräfte nur auf den inneren Bereich des Drucksensors ausgeübt werden. Deshalb legt man einen kleinen Gegenstand z.B. eine Schraubenmutter (Durchmesser 9 mm) auf den FSR-Sensor (Durchmesser 12,5 mm) und darauf das Gewicht. Entsprechend den Herstellerangaben ist der Sensor aber nicht für genaue Kraftmessungen geeignet und liefert keine gut reproduzierbaren Messwerte. Im Schulbereich lassen sich damit aber grundsätzliche Aspekte behandeln.

Aufgaben:

- Untersuche mit einem Ohmmeter, wie sich der Widerstand eines Drucksensors ändert, wenn man auf den Sensor drückt.
- Kann man mit einem Drucksensor einen Kraftmesser bauen? Stelle verschiedene Gewichte auf den Sensor und untersuche, ob man aus der Widerstandsänderung auf das Gewicht schließen kann.



Abb. ...: FSR-Sensor.

- Modellversuch: Feuchte einen Schwamm an (nicht zu nass machen). SchlieÙe den Schwamm an ein Ohmmeter an (Kabel links und rechts mit Krokodilklemmen anschließen). Drücke auf den Schwamm und beobachte, wie sich der Widerstand ändert. (Funktionsweise siehe Infokasten)
- Versuche, anhand des Datenblattes [3] die Funktionsweise des Drucksensors zu verstehen und deinen Mitschülern kurz zu erklären.

Mögliche Weiterführung:

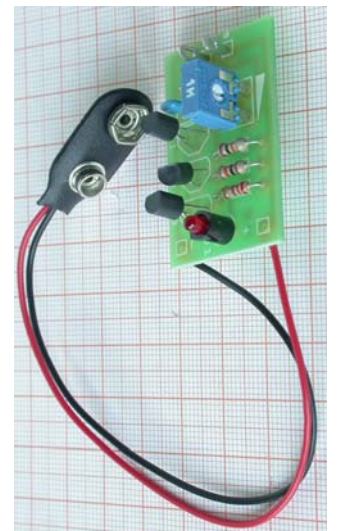
Als fortführende Anwendung lassen sich auch Alarmschaltungen konzipieren, mit denen ein Diebstahl von Exponaten (siehe auch [4]) oder der Eintritt von Personen in einen Raum erfasst werden kann.

### Station 5: Lügendetektor

Der Lügendetektor (Funktionsweise siehe Infokasten) stellt Veränderungen des Hautwiderstandes fest und zeigt kleine Änderungen über eine LED an.

Aufgabenstellung:

- Messe mit einem Ohmmeter bei verschiedenen Personen den Widerstand zwischen Daumen und Zeigefinger.
- Wie ändert sich der Widerstand, wenn man die Finger anfeuchtet? Verwende dazu verschiedene Flüssigkeiten: Leitungswasser, Salzwasser, destilliertes Wasser.
- Wie ändert sich der Widerstand der Haut bei zunehmendem Abstand der beiden Kontaktstellen?
- Lese die Beschreibung des Lügendetektors und teste seine Funktionsweise.



### 3. Sensoren bei der Behandlung des elektrischen Widerstandes im Unterricht und weitere Ideen

Eine Methode ist, Sensoren als Beispiele für die Anwendung physikalischer Gesetzmäßigkeiten zu behandeln. Im Prinzip lassen sich aber auch umgekehrt physikalische Gesetzmäßigkeiten an Sensoranwendungen "entdecken". Hierzu in Stichpunkten einige Vorschläge zu drei Schwerpunktthemen (Einflussfaktoren auf den elektrischen Widerstand):

- Joystick, Winkelsensor, Dehnungsmessstreifen zum Einfluss von Länge und Querschnitt auf die Größe des Widerstandes (Geometriefaktoren)
- Kohlemikrofon, Lügendetektor, Drucksensor, Körperfettmessung (siehe auch den Beitrag Ziegelbauer & Girwidz in diesem Heft) zur Rolle des spezifischen Widerstandes (Materialfaktor).
- Platin-Widerstände als Temperatursensoren, NTC-Widerstand aus der KFZ-Kühlerregelung, Duracell Power-Check zum Test des Ladezustands von Batterien

(Prinzip siehe Infokasten) zur Behandlung der Temperaturabhängigkeit von elektrischen Widerständen (Temperaturfaktor).

### Information Dehnungsmessstreifen (DMS)

Beim Metall-Dehnungsmessstreifen werden geometrische Effekte ausgenutzt. Beim Halbleiter-Dehnungsmessstreifen verändert sich durch die mechanische Belastung zusätzlich die Bänderstruktur und damit die Leitfähigkeit um Größenordnungen stärker als beim metallischen DMS. Man spricht hier auch von piezoresistiven Sensoren.

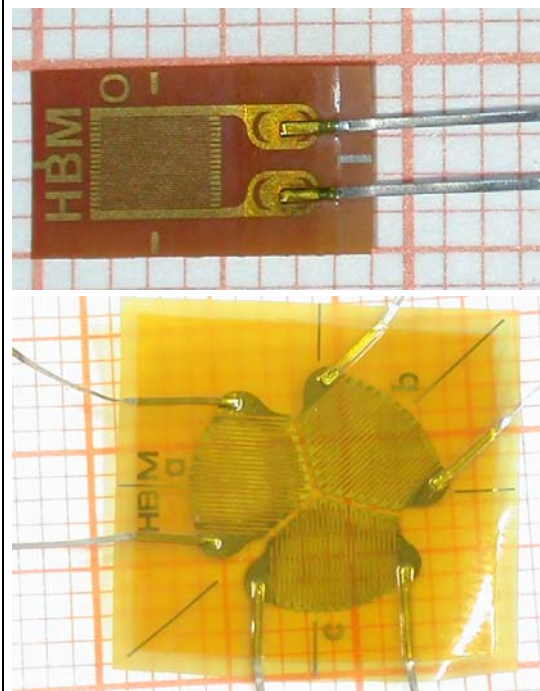
Für den Unterricht eignen sich vor allem die billigeren und relativ einfach erklärbaren Metallwiderstände in Form von Folien-DMS. Wird auf einen Draht eine Zugkraft ausgeübt, so verlängert er sich. Außerdem verringert sich der Querschnitt. Beide Effekte führen zu einer Vergrößerung seines Widerstandes. Daraus kann man auf die Kraft schließen.

#### a) Folien-DMS

Auf eine dünne Kunststofffolie wird eine Metalllegierung (meist Konstantan) oder ein Halbleiter in einer sehr dünnen Schicht von wenigen Mikrometern Dicke aufgebracht. Dann werden in einem Ätzprozess mäanderförmige Bahnen hergestellt.

Dehnung oder Stauchung des DMS ändert dessen Widerstand. Durch Form und Orientierung der mäanderförmigen Bahnen lässt sich das Signal abhängig von der Dehnungsrichtung machen.

Die Folien werden auf die Messstellen aufgeklebt. Vorteilhaft ist die einfache Produktion, nachteilig, dass die Folien nur Temperaturen bis ca. 80 °C vertragen und viele Kleber mit der Zeit ein Schrumpfungsverhalten zeigen.



#### b) Dünnschicht-DMS

Hierbei wird der DMS in Dünnschichttechnik (Halbleitertechnologie) auf eine Membran oder ein Biegeelement aufgebracht. Die Auftragung erfolgt im Vakuum in ca. 50 nm Dicke, isoliert durch eine dünne nicht leitende Oxidschicht. Die Bearbeitung erfolgt über fotolithographische Ätzprozesse und dann Lasertrimmen. Dies ermöglicht eine gute Verbindung zur Unterlage, allerdings bei einem höheren Herstellungsaufwand.

Die Widerstandsänderungen bei Metall-DMS sind relativ gering und liegen in der Regel bestenfalls im Prozentbereich. Für Standard-DMS aus Konstantan gilt:  $\frac{\Delta R}{R} \approx 2 \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell}$ . Das be-

deutet, dass die relative Widerstandsänderung doppelt so groß ist wie die relative Längenänderung.

Für eine höhere Empfindlichkeit und zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit werden Dehnungsmessstreifen in Brückenschaltungen eingesetzt.

### Information FSR-Drucksensoren

FSR-Sensoren (Force Sensing Resistor - kraftabhängiger Widerstand) werden von der Firma Interlink Electronics hergestellt und bestehen aus drei Komponenten:

1. Die Trägerfolie. Auf ihrer Innenseite ist eine schwarze, aus halbleitendem Polymer bestehende FSR-Schicht aufgedruckt.
2. Die Klebeschicht. Sie besteht aus einer doppelseitig klebenden Folie definierter Dicke. Sie verbindet die Komponenten des Sensors fest miteinander und stellt einen konstanten Abstand zwischen den Trägerfolien her.
3. Die Trägerfolie für die Elektroden. Auf ihrer Innenseite sind kammartige Elektroden aufgedruckt, die sich nicht berühren.



Abb. : Schichten und Aufbau des FSR-Sensors

Der FSR- Sensor ändert seinen elektrischen Widerstand bei Druck auf die Sensorfläche. Die Elektroden kontaktieren dann die untere Schicht, und zwischen den Kontaktelektroden werden Widerstandsbrücken aufgebaut. Mit steigender Kraft auf die Oberfläche werden immer mehr Widerstandsbrücken aufgebaut und parallel geschaltet. (Beschreibung nach [2], [3]) Im unbelasteten Zustand beträgt der Widerstand mehrere M $\Omega$ ; er sinkt bei Belastung schnell unter 100 k $\Omega$ . FSR-Sensoren sind nicht für genaue Messungen konzipiert. Dafür verwendet man Dehnungsmessstreifen auf Membranen, piezoresistive Sensoren oder Piezoelemente.

Anwendungen:

- ❖ Taster zum Schalten
- ❖ In Alarmanlagen zum Überwachen, ob ein Gegenstand von seinem Platz entfernt wird z.B. bei Exponaten in einem Museum
- ❖ Im KFZ registrieren FSR-Sensoren, ob ein Sitzplatz besetzt ist und deshalb der Sicherheitsgurt verwendet werden sollte.
- ❖ FSR-Sensoren werden in der Orthopädie und Unfallchirurgie z.B. für ganganalytische Untersuchungen eingesetzt. Dazu werden in die Schuhsole Sensoren eingebaut und geben Informationen über Bein- / Fußbelastungen und Gelenkstellungen beim Gehen. [5]



### Information Powercheck (Duracell-Batterie)

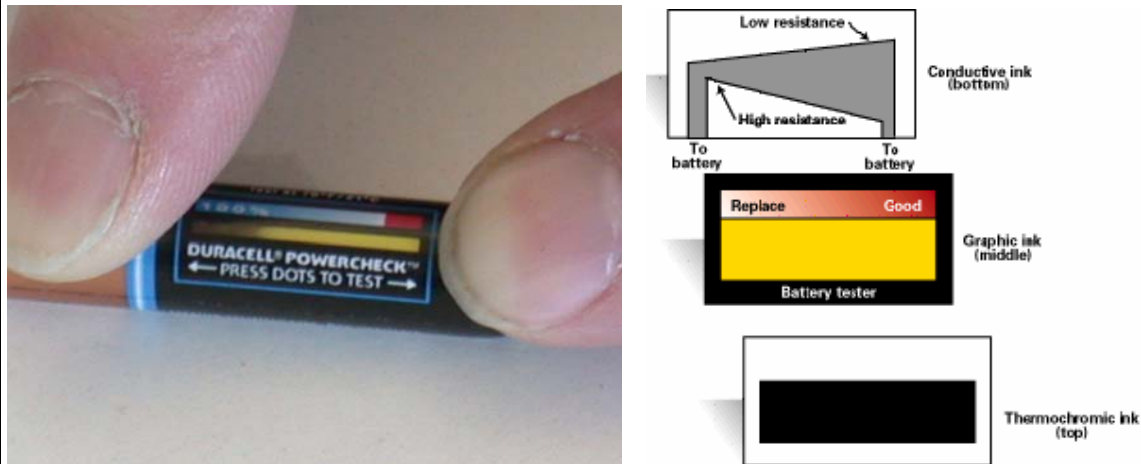


Abbildung: "Powercheck" von Duracell

Drückt man auf zwei Kontaktpunkte an der Batterie, so erkennt man an einer Farbskala den Ladezustand der Batterie.

Drei Elemente sind für die Anzeigefunktion von Bedeutung [6]:

- ❖ Die untere Schicht ist eine leitfähige Tinte (Widerstand), die sich beim Test erwärmt.
- ❖ Die mittlere, passive Schicht enthält gelbe Tinte. Sie dient nur als Indikator.
- ❖ Die oberste Schicht enthält die thermochrome leucodye Tinte (griech. leukos = klar blank), die bei einer definierten Temperatur einen Farbumschlag von schwarz zu transparent durchführt. Die Leucodye Tinte ist so eingestellt, dass der Farbwechsel oberhalb der typischen Umgebungstemperatur erfolgt, ca. bei 38 °C.

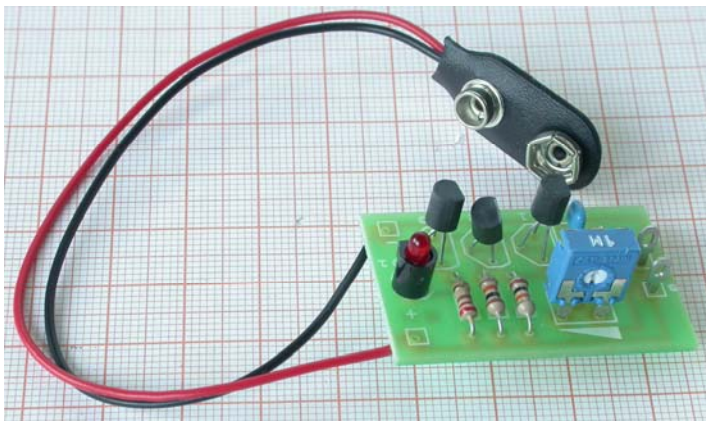
Funktionsweise:

Beim Testen der Batterie fließt Strom durch einen keilförmigen Streifen mit leitfähiger Tinte in der untersten Schicht. Der Strom führt zu einer Erwärmung. Durch die Form der Leitungsschicht ist der Widerstand an einem Ende größer als am anderen (siehe Abb. ...). Je nach Ladezustand der Batterie werden deshalb nur Teilabschnitte der thermochromen Tinte in der obersten Schicht ausreichend erwärmt. Dort wird die Tinte transparent und die darunter liegende gelbe Tinte wird sichtbar.

### Information zum Lügendetektor

Die Hautoberfläche besteht aus einer Schicht abgestorbener Hautzellen. Diese Schicht leitet den elektrischen Strom nur schlecht. Die tiefer gelegenen Schichten enthalten mehr Feuchtigkeit und leiten den Strom wesentlich besser. Leitfähige Schichten in der Tiefe der Haut sind über Schweißdrüsen mit der Oberfläche verbunden. Die Aktivität dieser Schweißdrüsen wird vom Sympathikus gesteuert. Über die Veränderungen in der elektrischen Leitfähigkeit der Haut kann die Erregung des sympathischen Nervensystems nachgewiesen werden. So ist die Leitfähigkeit der Haut ein sensibler Indikator für Stress. Vor allem die Schweißdrüsen an Hand- und Fußinnenflächen reagieren auf Emotionen.

Weitere Informationen siehe: [www.hautwiderstand.de](http://www.hautwiderstand.de) und [www.quarks.de](http://www.quarks.de)



Der abgebildete, einfache "Lügendetektor" aus dem Elektronikfachhandel stellt Veränderungen des Hautwiderstandes fest und zeigt dies über eine LED an.

#### Material / Bezugsquellen:

Wasseralarm: Conrad 61 03 73-07 Preis: 8,58 €

DMS: Elektronikfachhandel. Für Experimentierzwecke bekamen wir die DMS von der Fa. HSM kostenlos gestellt.

FSR-Drucksensor: Im Elektronikhandel für 5-10 €

Lügendetektor: Conrad 11 72 93-07 6,86 €



## Unterrichtserfahrungen

Kreativität und eigenständiges naturwissenschaftliches Denken verlangen eine gewisse Freiheit in der Aufgabenstellung. Gewünscht war, dass die Schüler so vorgehen wie wir Lehrer, als wir die Geräte zum ersten Mal in die Hand bekamen: Wir haben geschraubt und getestet bis uns die Funktion klar war. Das gelingt bei einigen Schülern nicht auf Anhieb. Der Anspruch eines selbstorganisierten Lernens kann manche Schüler anfangs sehr stark fordern. Anderen hat aber gerade das selbständige Ausprobieren sofort Spaß gemacht. Insgesamt hatten wir den Eindruck, dass die Schüler bei solchen Übungen mehr Einsatz und Forschergeist zeigen, als bei "konventionellen" Übungen, bei denen die Vorgaben enger sind.

Ein Fragebogen, den die Schüler nach den Übungsstunden ausfüllten, zeigte eine sehr positive Bewertung, vor allem auch von Schülern, die sonst nicht besonders gut im Unterricht waren. Sie hatten das Gefühl, auch einmal einen konkreten Sachverhalt verstehen zu können. Besonders positiv sind uns die Diskussionen der Schüler untereinander aufgefallen, wenn es um das Finden von Erklärungen ging. Die Schüler haben sich auf jeden Fall mit der Materie auseinandergesetzt.

Auch eine Variation in der Unterrichtsform und eine Methodenvielfalt (hier das Arbeiten an Stationen) ist eine Abwechslung und macht Unterricht attraktiver, selbst wenn es uns sicher nie gelingt, alle Schüler für die Physik zu begeistern.

Auf jeden Fall hat es auch uns Spaß gemacht, zu recherchieren und die Funktionsweise der Geräte in Experimenten aufzudecken.

-----  
**Literatur:**

[1] Baumgartner, F. (2001). [http://www.ntb.ch/Pubs/sensordemo/pdf/NTB\\_02\\_DMS.pdf](http://www.ntb.ch/Pubs/sensordemo/pdf/NTB_02_DMS.pdf) (22.8.2005)

[2] <http://www.interlinkelec.com/documents/datasheets/fsrdatasheet.pdf> (10.7.2005)

[3] aus Conrad Datenblatt über FSR-Sensoren:

[http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/182519-an-01-de-Drucksensor\\_FSR-149AS.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/182519-an-01-de-Drucksensor_FSR-149AS.pdf) (10.7.2005)

[4] Eckert, B., Stetzenbach, W., Jodl, H.J. (2000). Low Cost – High Tech. Köln: Aulis.

[5] <http://edoc.hu-berlin.de/dissertationen/hegewald-guenther-2000-05-17>

[http://www.medilogic.com/german/produkte/furtherProducts/further\\_Products.htm](http://www.medilogic.com/german/produkte/furtherProducts/further_Products.htm)

[6] Mitteilungen / Information der Fa. Duracell

*Dank: Die Unterrichtsvorschläge werden in dem BMBF-Projekt "Physik im Kontext" ([www.physik-im-kontext.de](http://www.physik-im-kontext.de)) getestet und weiterentwickelt.*