

Authentisches Lernen mit Atemalkoholsensoren im Physikunterricht

– Physikalische Grundlagen, Visualisierungen und Experimente –

Authentic Learning with a Breath Analyzer for Alcohol in a physics course

– Physical Background, Visualization and Experiments –

Bianca Watzka*, Ludwig Dominik Buchner*, Raimund Girwidz*

* Ludwig-Maximilians-Universität München, Theresienstraße 37, 80333 München
Bianca.Watzka@lmu.de, LudwigBuchner@yahoo.de und Girwidz@lmu.de
(Eingegangen: 15.02.2016; Angenommen: 12.01.2017)

Kurzfassung

Authentisches Lernen ist ein Ansatz, bei dem der Realitätsbezug und die Lebensnähe besonders wichtig sind. Beides soll Schülerinnen und Schüler motivieren, sich mit der Anwendung physikalischer Inhalte auseinanderzusetzen. Außerdem wird angenommen, dass sie sich positiv auf den Wissenserwerb und die Wissensanwendung auswirken. Eine Möglichkeit für die Umsetzung authentischen Lernens ist das Einbinden von Geräten aus dem Alltag in den Unterricht. Eine didaktische Herausforderung ist dabei, die oftmals komplizierten physikalischen Sachverhalte schülergerecht zu veranschaulichen, ohne Einbußen in der Realitätsnähe, im Kontextbezug und in der Authentizität hinnehmen zu müssen.

In diesem Beitrag geht es um Atemalkoholmessgeräte aus Halbleitermaterialien. Es werden zuerst ihre fachlichen und messtechnischen Grundlagen beschrieben und anschließend die beiden physikdidaktischen Themen diskutiert: Authentisches Lernen und Visualisierungen. Bezüglich des authentischen Lernens werden charakteristische Merkmale aufgezeigt. Für die Visualisierungen werden theoretische Grundlagen anhand von Beispielen erläutert. Der Fokus liegt auf der lernförderlichen Darstellung physikalischer Sachverhalte und auf dem Herstellen authentischer Anwendungsbezüge. Zuletzt werden einige Experimente vorgestellt, mit denen entweder interessante Kontexte zum Thema Alkohol im Alltag behandelt oder fachliche Grundlagen erschlossen werden können.

Abstract

Authentic learning is an approach that takes account of using knowledge in real-life contexts. The intention is to motivate and to activate students to learn physics. It is expected that authentic learning can help students to become adept at problem solving because it will improve the acquisition and applicability of conceptual and procedural knowledge. In an authentic learning environment, a device from everyday life is to be seen as a source for issues that are embedded in several real-world contexts. The downside is that explaining the complex physical principles of the device is a challenging task for physics teachers. The use of visualization helps to make the complexity manageable. Visualization is an important and useful tool to help students to achieve a conceptual understanding.

This paper is about an alcohol breath analyzer that uses a semi-conductor sensor. The physical concepts and technological aspects are explained. Then, auxiliary visualization is presented to support basic conceptual understanding (including photos, schematic drawings, diagrams etc.). Finally, school experiments are described.

1. Einleitung und Hinführung

Anwendungen von Sensoren können für Lernende interessante und authentische Anknüpfungspunkte bieten, die zur Betrachtung der physikalischen Grundlagen motivieren [1].

Nachfolgend werden in diesem Abschnitt als Erstes einige Anwendungen von Gassensoren vorgestellt. Dabei wird aufgezeigt, welche Merkmale authen-

tischen Lernens für das Physiklernen vorteilhaft sein können.

Nach einer kurzen Zusammenstellung der Eigenschaften von Ethanol werden die Grundlagen der Atemalkoholanalyse sowie Aufbau und Funktionsweise von Atemalkoholsensoren beschrieben. Danach werden didaktische Aspekte des Lernens mit Sensoren behandelt und speziell die Themen authen-

tisches Lernen, Visualisierungen und experimentelle Zugänge genauer betrachtet.

1.1. Anwendungen von Gassensoren

Das Anwendungsgebiet von Gassensoren reicht von der Atemanalyse bis zur Messung schädlicher Emissionen. In der Industrie werden Gassensoren u. a. eingesetzt, um das Ausströmen schädlicher Substanzen z. B. bei Verbrennungen zu messen. Moderne PKWs enthalten Gassensoren an der Fahrzeugfront, um Abgasbelastungen durch das vorausfahrende Fahrzeug zu detektieren und die Klimaanlage bei Bedarf von Außenluft auf Umluft umzuschalten. Im medizinischen Bereich können Gassensoren eingesetzt werden, um bei Diabetikern Azeton im Atem zu messen und darüber einen kritischen Blutzuckerspiegel zu erkennen. Im Lebensmittelbereich können z. B. Aromen, die beim Verderben von Lebensmitteln entstehen, mittels Gassensoren detektiert werden. Auch Mundgeruch oder Alkohol in der Atemluft (siehe Abb. 1) können mit Gassensoren gemessen werden.



Abb. 1: Das linke Bild zeigt eine Atemalkoholanalyse mit dem AlcoScan AL7000 (siehe Abschnitt 8). Dessen Sensor ist auswechselbar und im rechten Bild zu sehen.

1.2. Merkmale authentischen Lernens mit Sensoren

Die beschriebenen Anwendungen sind reell und lebensnah. Außerdem führt das Verwenden des Sensors in der Anwendungssituation zum Erwerb handlungsbezogenen Wissens. Sein Einsatz hat eine erkennbar praktische Bedeutung und verfolgt nicht nur einen Selbstzweck als Lerninhalt. Dazu kommt, dass die Nutzung des Sensors während des Experimentierens im Unterricht zeigt, wie erworbenes Wissen konkret angewandt wird. Die drei Faktoren: der Bezug zu realen Anwendungen, die Relevanz der Anwendung und die realitätsnahen Aktivitäten im Unterricht, charakterisieren den Begriff Authentizität, der in diesem Beitrag für das Lernen mit Sensoren als Zielsetzung verfolgt wird (siehe dazu Abschnitt 4).

1.3. Metalloidsensoren für die Atemalkoholanalyse

Es gibt verschiedene Verfahren für die Bestimmung von Gaskonzentrationen. Besonders interessant für den Physikunterricht sind Gassensoren, die bei Kon-

takt mit einem Gas mit einer Änderung der elektrischen Leitfähigkeit einer Metalloxidschicht reagieren.

In diesem Beitrag geht es exemplarisch um die Messung des Alkoholgehalts im Atem mit Gassensoren aus Halbleitermaterialien.

2. Kennwerte und Messung

2.1. Physikalische Kennwerte

Alkohol ist die umgangssprachliche Bezeichnung für Ethanol. Es hat eine molare Masse von 46,07 Gramm pro Mol (Wasser: 18,02 Gramm pro Mol). Bei 20 °C beträgt der Dampfdruck von Ethanol 58,7 hPa (Wasser: 23,4 hPa) und die Dichte 0,79 g pro cm³. Der Siedepunkt liegt bei ca. 78 °C (siehe auch Abb. 2 und Abschnitt 6.1.3).

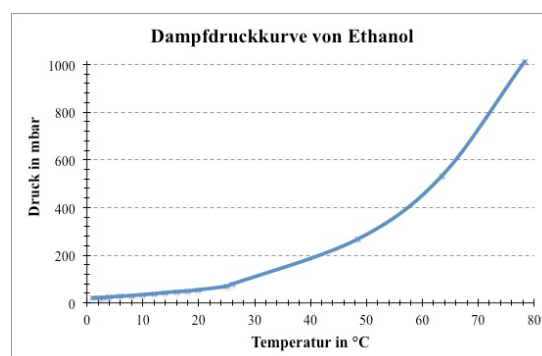


Abb. 2: Dampfdruck von Ethanol als Funktion der Temperatur [2]

2.2. Messung der Alkoholisierung

Als Untersuchungsproben für die Ermittlung des Alkoholisierungsgrades einer Person eignen sich Atemluft, Urin, Speichel oder Blut. Häufig zum Einsatz kommen die Blut- und die Atemalkoholanalyse. Beide Messverfahren sind für die Beweissicherung bei Bußgeld- und Strafverfahren interessant. Für die Blutalkoholanalyse spricht, dass sie ein objektives und durch den Probanden nicht manipulierbares Verfahren ist. Ungünstig ist der im Vergleich zur Atemalkoholanalyse höhere Zeit- und Kostenaufwand. Darüber hinaus wird in Deutschland aus Art. 2 GG das sogenannte Verfassungsgebot des „mildesten Mittels“ abgeleitet. Im Kern besagt es, dass bei Einschränkungen der Grundrechte das mildeste Mittel anzuwenden ist. Dies spricht für die Atemalkoholanalyse. Sie ist ein Verfahren, bei dem kein körperlicher Eingriff nötig ist.

2.3. Blutalkoholanalyse

Die Blutalkoholanalyse nutzt die Resorption des konsumierten Alkohols durch die Schleimhäute in Mund, Magen und Darm aus. Bei der Analyse wird zunächst aus Venen eine Serum- (oder Plasma)probe entnommen, anschließend die Alkoholkonzentration in dieser Probe oder in der geronnenen und zentrifugierten Serumprobe bestimmt und zuletzt mit einem

festgelegten Faktor auf die Blutalkoholkonzentration (BAK) im Vollblut umgerechnet. Die Umrechnung von venöser Blutalkoholkonzentration auf die Alkoholkonzentration von Vollblut ist nur näherungsweise möglich, da die Verteilung des Alkohols im Körper individuellen Schwankungen unterliegt. Beispielsweise ist die Distribution abhängig von der Körperzusammensetzung, insbesondere vom Fett- und Wasseranteil.

Die Blutalkoholkonzentration (BAK) wird in Promille angegeben. Sie bezieht sich auf die Ethanolmasse in Gramm je Kilogramm Blut.

2.4. Atemalkoholanalyse

Die Atemalkoholanalyse ist um ein Vielfaches schneller, einfacher und kostengünstiger als die Blutalkoholanalyse.

Bei der Bestimmung des Alkoholgehalts von Atemluft wird ausgenutzt, dass Ethanol aus dem Blut in die Atemluft abgegeben wird [3], [4]. Die Atemalkoholanalyse sollte frühestens zehn Minuten nach dem Alkoholkonsum erfolgen. Ansonsten könnten Restalkoholbestände in den Mundschleimhäuten den Messwert verfälschen.

Die Einheit der Atemalkoholkonzentration (AAK) ist Milligramm pro Liter Luft. Gegenwärtig ist die Atemalkoholanalyse in Deutschland ein zulässiges Beweismittel für Bußgeld-, aber nicht für Strafverfahren. Deshalb kann eine Verurteilung in einem Strafverfahren nicht ausschließlich auf eine Atemalkoholanalyse gestützt werden.

2.5. Größen und Gesetz von Henry

Die beiden Größen Atem- und Blutalkoholkonzentration lassen sich wegen erheblicher, individueller Schwankungen und wegen des zeitlichen Verlaufs der Alkoholkonzentration im Organismus nicht exakt ineinander umrechnen. Jedoch ließen sich aus medizinischen Trinkversuchen und Praxistests Grenzwerte für die Atemalkoholkonzentration ermitteln, die bestehenden Grenzwerten der BAK im StVG entsprechen [5]. Im statistischen Mittel liegt das Verhältnis von AAK zu BAK bei etwa 1:2100. Eine AAK von 0,25 mg/l entspricht etwa einer BAK von 0,525 ‰. Im StVG ist das Verhältnis beider Grenzwerte auf 1:2000 festgelegt. Somit entspricht eine AAK von 0,25 mg/l einer BAK von 0,5 ‰ [4].

Der Zusammenhang zwischen der Atem- und der Blutalkoholkonzentration wird näherungsweise durch das Gesetz von Henry beschrieben. Danach ist der Partialdruck eines Gases über einer Flüssigkeit direkt proportional zur Konzentration des Gases in der Flüssigkeit.

Die Proportionalitätskonstante ist natürlich materialabhängig, und die Proportionalität gilt nur für konstante Temperaturen, für geringe Konzentrationen des gelösten Stoffes, kleine Partialdrücke und für Gleichgewichtszustände. Sind diese Bedingungen

erfüllt, dann ist die Konzentration der gelösten Substanz in der Flüssigkeit in guter Näherung direkt proportional zur Konzentration im gasgefüllten Raum über der Flüssigkeit (vgl. Abb. 3).

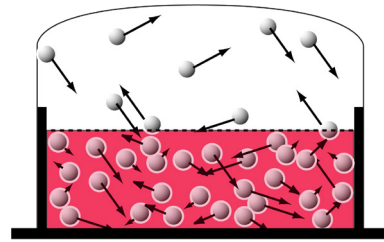


Abb. 3: Visualisierung zum Gesetz von Henry

Häufig sind die geforderten Gleichgewichtszustände streng genommen nicht erfüllt. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn keine geschlossenen, sondern offene Flüssigkeit-Gas-Systeme betrachtet werden (anders als in Abb. 3).

In der Lunge, die eine sehr große Austauschfläche in Relation zum Volumen aufweist, ist die Proportionalität zwischen der Konzentration von Alkohol im Blut und dem Partialdruck von Alkohol in der Atemluft eine akzeptable Annahme. In einer offenen Petrischale wird sich die Proportionalitätskonstante allerdings in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen ständig ändern. Damit sind nur näherungsweise quantitative Experimente möglich.

3. Atemalkoholsensoren: Messtechnik und physikalische Grundlagen

Das sensitive Element (Aktor) der hier behandelten Sensoren ist eine Metalloxidschicht, die auf ein Trägersubstrat aufgebracht ist. Das Metalloxid reagiert an der Oberfläche mit einer gasförmigen Substanz (hier mit Sauerstoff und Ethanol). Durch die Wechselwirkung verändert sich die Anzahldichte der beweglichen Ladungsträger. Folglich resultiert eine Änderung der elektrischen Leitfähigkeit der Metalloxidschicht, wobei die Leitfähigkeitsänderung reversibel ist [6], [7], [8].

Der nachfolgende Abschnitt enthält Erläuterungen zu den theoretischen Grundlagen für die Messung des Atemalkoholgehalts. Genauer betrachtet werden:

- Sensormaterialien und der technische Aufbau,
- messrelevante Eigenschaften der Sensorbestandteile,
- Vorgänge, die zur Änderung der elektrischen Leitfähigkeit führen.

3.1. Materialien und Bauformen

Grundsätzlich schränkt das Messverfahren die Bauformen von Gassensoren aus Halbleitern ein. Das Verfahren stellt im Wesentlichen drei Anforderungen.

- Erstens muss gewährleistet sein, dass eine möglichst große sensitive Halbleiterschicht mit dem zu erfassenden Gas gut wechselwirken kann.

- Zweitens muss die Temperatur der gesamten Halbleiterschicht durch eine Heizung regelbar sein, da die Wechselwirkungen stark temperaturabhängig sind.
- Drittens muss die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit der Halbleiterschicht über Elektroden zu erfassen sein.

Etabliert haben sich zwei verschiedene Bauformen für Gassensoren aus Halbleitermaterialien:

- Röhrchenbauformen oder
- planare Dünnschicht- und Dickschichtsensoren.

Darüber hinaus gibt es Gassensoren mit Katalysatorpillen, sogenannte Pellistoren. Sie basieren auf dem Prinzip der katalytischen Verbrennung und nicht auf der Leitfähigkeitsänderung einer sensitiven Halbleiterschicht [9].

3.1.1. Röhrchenbauformen

Am häufigsten werden Röhrchenbauformen für Gassensoren aus Halbleitermaterialien verwendet. Es gibt direkt (Abb. 4) und indirekt (Abb. 5) beheizte Halbleiterschichten [10].

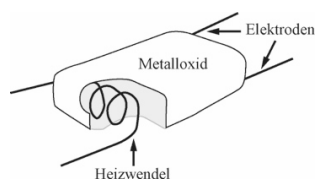


Abb. 4: Gassensor aus Halbleitermaterialien mit direkter Beheizung nach [10]

Bekannte Vertreter der Röhrchenbauform sind die Taguchi-Sensoren der Firma Figaro (siehe Abb. 5).

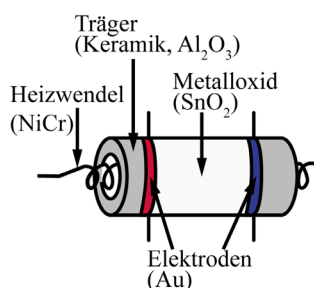


Abb. 5: Aufbau eines Taguchi-Gassensors der Firma Figaro (Röhrchenbauform mit indirekter Beheizung, nach [11])

Bei einer indirekten Beheizung befindet sich die sensitive Halbleiterschicht auf einem Keramikröhrchen, das als Träger dient und die Heizwendel umschließt [10], [11].

Die Abbildung 6 zeigt den Ethanol-Gassensor MQ-3. Er ist als Röhrchenbauform mit indirekter Beheizung umgesetzt. Im linken Bild sieht man das Röhrchen unter dem Gitter hervorschimmern. Das rechte Bild zeigt den geöffneten Sensor mit seinem Gehäuse und dem Keramikröhrchen. Bei genauem Hinse-

hen kann man am linken Rand des weißen Röhrchens die Heizwendel erkennen.



Abb. 6: Ethanol-Gassensor MQ-3. Der linke Teil des Bildes zeigt den Sensor in der Draufsicht. Im rechten Teil der Abbildung ist das Röhrchen zu sehen.

3.1.2. Dünnschicht- / Dickschichtsensoren

Wie stark eine Halbleiterschicht mit einem Gas wechselwirkt, hängt u. a. von ihrer Oberfläche ab. Eine große Oberfläche der Halbleiterschicht wirkt sich günstig auf die Wechselwirkung mit dem Gas aus. Zwei Verfahren zum Aufbringen des Halbleitermaterials kommen zur Anwendung: die Dünnschicht- oder Dickschichttechnik (siehe auch [6]).

- Dünnschichten sind kompakte Schichten, bei denen keine Gasteilchen in die Schicht eindringen können. Folglich sind die Wechselwirkungsprozesse zwischen Gas und Oberfläche durch die geometrischen Maße der Oberfläche beschränkt.
- Eine andere Möglichkeit für das Erreichen einer großen effektiven Oberfläche ist die Dickschichttechnologie. Dabei werden poröse Schichten verwendet, bei denen das Gas ins Innere der Halbleiterschicht eindringen kann [6]. Bei einer kristallinen Struktur kann das Gas an den Oberflächen der einzelnen Einkristalle (auch Körner genannt) oder an den Grenzen zwischen Einkristallen wechselwirken [12].

Bei beiden Varianten wird das Trägersubstrat mit einer Mikroelektrodenstruktur versehen. Die Geometrie der Mikroelektroden reicht von einfachen parallelen Leiterbahnen bis zu kammartigen Strukturen (siehe Abb. 7). Auf der Unterseite des Trägersubstrats sind die Heizleitungen.

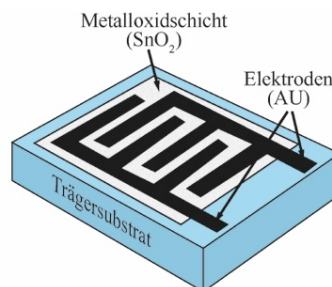


Abb. 7: Schematischer Aufbau eines planaren Gassensors ([6], S. 26)

3.2. Eigenschaften der Sensorteile

Die vier wesentlichen Bestandteile von Gassensoren aus Halbleitermaterialien sind: die sensitive Schicht, das Trägersubstrat, die Heizung und die Elektroden.

- *Die sensitive Schicht*

Die hier beschriebenen Atemalkoholsensoren enthalten eine Halbleiterschicht aus Zinndioxid (SnO_2). Dessen Materialeigenschaften führen bei Wechselwirkungen mit bestimmten Gasen zur Änderung seiner elektrischen Leitfähigkeit. Eine Eigenschaft ist für die Funktionsweise von Atemalkoholsensoren besonders relevant: Zinndioxid hat eine hohe Anzahl an Sauerstofffehlstellen. Dadurch hat es n-leitende Eigenschaften. Elektronen bestimmen als Majoritätsladungsträger im Wesentlichen die elektrische Leitfähigkeit.

- *Das Trägersubstrat*

Beim Atemalkoholsensor ist die Zinndioxidschicht auf einem Träger aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) aufgebracht. Letzteres hat die Eigenschaft, ein sehr guter elektrischer Isolator zu sein (Bandlücke $> 6,0$ eV nach [13]). Im Betrieb des Sensors wirkt sich das Trägermaterial nicht störend auf den Gesamtwiderstand aus.

Außerdem trägt das Substrat neben Messelektroden für das Erfassen des elektrischen Leitwertes der Zinndioxidschicht oft auch Heizbahnen für die Regelung der Betriebstemperatur.

- *Die Heizung*

In Verbindung mit einer Temperaturerfassung (z. B. Messfühler) kann durch die Heizung die Zinndioxidschicht während des Betriebs des Atemalkoholsensors auf konstant hoher Temperatur gehalten werden. In der Regel werden Gassensoren aus Halbleitermaterialien bei hohen Temperaturen zwischen 500 °C und 800 °C betrieben [6].

Dadurch erhält man einen konstanten Grundleitwert und als Ausgangssignal einen elektrischen Sensorwiderstand, der sich nur in Abhängigkeit von der Gaskonzentration ändert [6].

Außerdem ist die Betriebstemperatur ein Faktor, der darüber entscheidet, wie Gase mit der Zinndioxidschicht wechselwirken. Bei tiefen Temperaturen dominiert die Physikalische Adsorption (Physisorption mit Bindungsenergien in der Größenordnung von $0,2$ eV). Bei hohen Temperaturen tritt die Chemische Adsorption (Chemisorption mit Bindungsenergien in der Größenordnung von etwa 2 eV) auf [10].

- *Die Elektroden*

Der in Abbildung 6 gezeigte Atemalkoholsensor enthält Elektroden aus Gold (siehe Datenblatt von MQ-3 in Abschnitt 8). Zwischen den Metallelektroden und dem Zinndioxid bildet sich gewöhnlich ein Schottky-Kontakt aus ([10], [14]). Die Schottky-Barriere ist überwiegend von der Größe der beiden Austrittsarbeiten abhängig. Deshalb muss sie bei der Konstruktion von Atemalkoholsensoren berücksichtigt werden. Sie hat Auswirkungen auf den Gesamtwiderstand des Sensors und beeinflusst folglich auch seine Empfindlichkeit [10]. Während des Sensorbetriebs wirkt sich die Schottky-Barriere aber nicht

störend auf das Messergebnis aus, da sie nicht von Wechselwirkungsprozessen zwischen dem Ethanol dampf und der Zinndioxidschicht abhängt.

Die Katalyse ist ein weiterer Einflussfaktor auf die Funktionsweise des Sensors, der durch den Kontakt zwischen der Halbleiterschicht und den Metallelektroden auftreten kann [10]. Meist werden für die Elektroden Edelmetalle wie Gold oder Platin verwendet [10], [15].

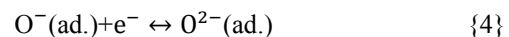
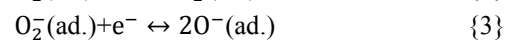
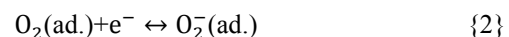
3.3. Funktionsprinzip

Die Ethanolkonzentration kann über den elektrischen Widerstand des Aktors ermittelt werden. In diesem Zusammenhang sind zwei Vorgänge wichtig, die jeweils dazu führen, dass sich die elektrische Leitfähigkeit der Zinndioxidschicht ändert. Die beiden Vorgänge sind:

- die Adsorption von Sauerstoff und
- die Reaktion zwischen adsorbiertem Sauerstoff und Ethanol.

3.3.1. Adsorption von Sauerstoff

Die Anreicherung von Sauerstoff an der Oberfläche der Zinndioxidschicht ist ein Adsorptionsprozess. Dabei können folgende Zwischenstufen durchlaufen werden [16]:



Die Formeln 1 und 2 beschreiben die Adsorption von Sauerstoff an der Zinndioxidoberfläche für Temperaturen kleiner 160 °C [17]. Dabei bindet das Sauerstoffmolekül ein Elektron, wodurch der Sensorwiderstand ansteigt. Außerdem wird dort die Oberfläche der Zinndioxidschicht lokal elektrisch negativ geladen.

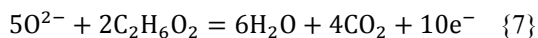
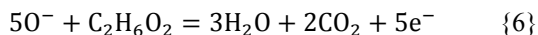
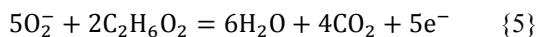
Die beschriebenen Adsorptionsvorgänge in den Formeln 3 und 4 laufen bei hohen Temperaturen ab (um 300 °C). Hier treten auf der Oberfläche von SnO_2 überwiegend die Sauerstoffionen O^{2-} und O^- auf [8], [10]. Formel 3 beschreibt die Chemisorption und die Dissoziation des Sauerstoffions O_2^- durch die Aufnahme eines Elektrons. Dabei entsteht das Ion O^- . Formel 4 beschreibt die Bildung von O^{2-} [8], [18], [19].

Trotz starker chemischer Bindungen zwischen Adsorbens und Adsorbat kann Sauerstoff die Oberfläche der Metalloxidschicht wieder verlassen. Dieser Vorgang heißt Desorption und kann u. a. durch thermische Bewegung ausgelöst werden [6], [8].

3.3.2. Reaktion mit Alkohol

Ethanol dampf ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$) ist ein reduzierendes Gas, das mit Sauerstoff (O_2^- , O^- und O^{2-}) reagieren kann (siehe Formeln 5 bis 7). Die Ethanolmoleküle reagieren mit den Sauerstoffionen zu Kohlenstoffdi-

oxid (CO_2) und Wasser (H_2O). Dabei werden Elektronen an das Leitungsband zurückgegeben [16], [18].



Zusammengefasst führen Adsorptions- und Reaktionsprozesse an der Oberfläche von SnO_2 jeweils zu einer Änderung des Gesamtwiderstandes. Somit sind zwei Prozesse relevant:

- Die Adsorption von Sauerstoff führt zunächst zu einer Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit und zu einem "Grundleitwert" in Luft.
- Die Reaktion zwischen dem adsorbierten Sauerstoff und dem Ethanol dampf verbessert die elektrische Leitfähigkeit wieder.

Sensoren, die für die Detektion eine Metalloxidschicht nutzen, ermitteln die Gaskonzentration c folglich über den elektrischen Widerstand des Sensorelements R_S . Dabei gilt:

$$R_S = R_0 \cdot K \cdot c^{-\alpha} \quad \{8\}$$

Dabei ist K eine für das verwendete Metalloxid spezifische Konstante. Der Exponent α ist ein Maß für die Steigung der Widerstands-Konzentrations-Kennlinie des Sensors (siehe Abb. 8, vgl. [20]). Außerdem ist α charakteristisch für das verwendete Metalloxid und das Gas, das detektiert werden soll.

Beide Werte, K und α , werden in der Regel empirisch ermittelt [21]. Unter standardisierten Bedingungen, d. h. bei einer Temperatur von i. d. R. 20°C und einer relativen Luftfeuchte von i. d. R. 65% , wird das Verhältnis aus dem elektrischen Widerstand des Sensorelements in verschiedenen Gaskonzentrationen (R_S) zum elektrischen Widerstand des Sensors in reiner Luft bestimmt (R_0).

Die Abbildung 8 zeigt eine Kennlinie des Ethanol-Gassensors MQ-3 von Hanwei bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte (Datenblatt und Bezugsquelle in Abschnitt 8).

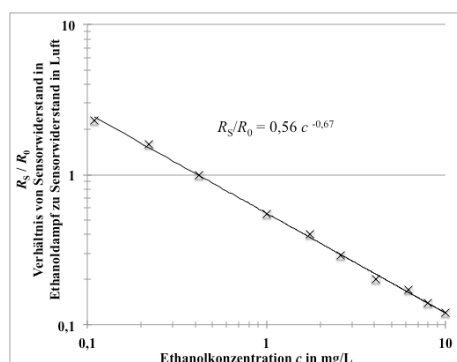


Abb. 8: Widerstands-Konzentrations-Kennlinie des Ethanol-Gassensors MQ-3 von Hanwei. Auf der vertikalen Achse ist das Verhältnis der Widerstandswerte abgetragen, auf der horizontalen Achse die Ethanolkonzentration (beide Achsen in logarithmischem Maßstab).

Durch Logarithmieren erhält man den in der Formel 9 gezeigten linearen Zusammenhang:

$$\log\left(\frac{R_S}{R_0}\right) = \log(K) - \alpha \cdot \log(c) \quad \{9\}$$

3.4. Messschaltung

Der Betrieb von Gassensoren mit einer Metalloxidschicht erfolgt meist in einfachen Schaltungen mit Spannungsteiler oder in Variationen der Wheatstone'schen Brückenschaltung (z. B. Halb- oder Vollbrücken [22]).

Die Abbildung 9 zeigt eine mögliche Messschaltung. Das Sensorelement (hier als R_S bezeichnet) ist mit einem bekannten Lastwiderstand R_L in Reihe geschaltet und Teil des Spannungsteilers. So wird die Widerstandsänderung des Sensors in ein entsprechendes Spannungssignal umgewandelt.

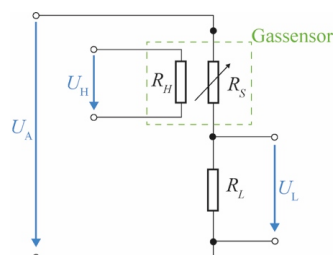


Abb. 9: Einfache Messschaltung zum Auslesen von Änderungen des elektrischen Widerstandes R_S , dessen Größe mit der umgebenden Ethanolkonzentration variiert (nach [23]).

Die Anwendung der Gesetzmäßigkeiten der Reihenschaltung ergibt für den elektrischen Widerstand R_S :

$$R_S = \frac{U_A - U_L}{U_L} \cdot R_L \quad \{10\}$$

Typischerweise liegen Werte für den elektrischen Widerstand des Sensors im Megaohm-Bereich und für den Lastwiderstand im Kiloohm-Bereich (z. B. MQ-3 von Hanwei, vgl. Abschnitt 8).

4. Authentisches Lernen

Bisher gibt es in der Literatur keine eindeutige Definition darüber, was in der Physikdidaktik unter den Begriff Authentizität fällt (z. B. [24], [25], [26], [27]). Shaffer und Resnick [23] nennen vier Merkmale, die authentisches Lernen beschreiben und die nachfolgend jeweils durch das Hauptmerkmal knapp beschrieben und durch ein Beispiel konkretisiert sind:

- Authentische Materialien**, wie sie außerhalb des Klassenzimmers unverstellt vorkommen, sind Teil des Unterrichts (vgl. auch [28] und [29] sowie [30], [31]).

Bezogen auf Atemalkoholsensoren kann festgehalten werden, dass sowohl Originalgeräte als auch deren Bauteile authentische Lernmaterialien sind.

- Authentische Tätigkeiten** sind Messaufgaben wie die Bestimmung der Atemalkoholkonzentration und das Testen der Funktion von Bauelementen.

- *Authentische Bewertungen* und dabei ablaufende Lernprozesse beziehen sich jeweils auf realistische Gegebenheiten.

Bei der Behandlung von Atemalkoholsensoren im Unterricht ist authentisches Bewerten dann relevant, wenn mit den Lernenden z. B. die Grenzen des Messverfahrens betrachtet werden. Falls im Unterricht auch Vorgaben für das Erschließen des Blutalkoholgehalts aus dem Atemalkoholgehalt thematisiert wird, dann können z. B. Bewertungskompetenzen entwickelt werden. Dabei gilt es, Aspekte aus verschiedenen Fachdisziplinen (z. B. Medizin, Jura und Physik) zu verstehen und ein begründetes Urteil über die Aussagekraft von Angaben über die Alkoholisierung einer Person zu treffen.

- *Authentische Lerninhalte* sind für Schülerinnen und Schüler bedeutungsvoll.

Dieser Punkt nimmt beim Lernen mit Sensoren eine besondere Stellung ein, da einerseits Lerninhalte aus der Physik, andererseits Themen aus anderen Fachdisziplinen unterrichtet werden. Bei Atemalkoholsensoren können scheinbar unattraktive physikalische Themen, wie Widerstandsänderungen, Halbleiter oder Spannungsteiler usw. in attraktivere Bezugsrahmen (z. B. aus der Medizin) eingebunden werden.

- *Authentische Arbeitsweisen und Werkzeuge*, wie sie für die Fachdisziplin typisch sind, werden im Unterricht gelernt bzw. genutzt.

Beim Entdecken der Funktionsweise von Atemalkoholsensoren können naturwissenschaftliche Arbeitsweisen in vielfältiger Art und Weise gezeigt werden. Es können z. B. Kompetenzen aus dem Bereich der Erkenntnisgewinnung entwickelt werden (experimentieren, aufnehmen und auswerten von Daten, Darstellung von Daten in Tabellen und Diagrammen usw.).

Auch Kuhn [26] hebt bei der Charakterisierung „authentischer Ankermedien“ den Realitätsbezug hervor. Dabei nennt Kuhn [26, S. 49] die drei Merkmale:

- reale Zusammenhänge aus dem Alltag,
- reale Daten und
- gesellschaftlich relevante und bedeutungsvolle Problemstellungen.

Die drei Merkmale deuten die Betrachtung realitätsbezogener Themen unter verschiedenen Gesichtspunkten (physikalischen, lebensweltlichen, technischen, medizinischen, mathematischen usw.) an. Betrachtet man das Thema Atemalkoholsensoren von einem physikalischen Gesichtspunkt aus, dann erarbeiten die Lernenden die Funktionsweise des Sensors, indem sie sich z. B. Kenntnisse über die Widerstandsänderung von Halbleitermaterialien oder Kenntnisse über Spannungsteiler aneignen. Zusätzlich verlangt das Thema von den Schülerinnen und Schülern auch, dass sie die Perspektive wechseln

und Kenntnisse aus ihrem Alltag, der Mathematik oder der Medizin einbringen. Sie müssen beispielsweise für Aussagen über den Alkoholgehalt u. a. Informationen über Angaben auf Alkoholika einbringen und Volumenangaben umrechnen können.

Epistemologische Merkmale von Authentizität beschreiben u. a. Edelson [32] sowie Chinn und Malhotra [33]. Letztere betrachten dazu den Prozess der Erkenntnisgewinnung und führen Argumente an, die sich auf Unterschiede zwischen Experimenten in der Forschung und experimentellen Versuchen in der Schule beziehen. Je näher die Umsetzung eines experimentellen Versuchs in der Schule dem Experiment in der Forschung kommt, desto höher ist die Authentizität.

In der Einleitung wurden bereits drei Faktoren genannt, die den Begriff Authentizität speziell für das Lernen mit Sensoren charakterisieren sollen. Die drei Faktoren, die realistische Anwendung, die Relevanz der Anwendung für den Benutzer und die situationsgetreuen, unverstellten Handlungen mit dem Sensor, zeigen, dass viele der genannten Kriterien für Authentizität beim Lernen mit Sensoren erfüllt werden können.

5. Visualisierungen

Die Funktionsweise von Atemalkoholsensoren aus Halbleitermaterialien ist sehr komplex, lässt sich aber, didaktisch aufbereitet, gut im Physikunterricht in der Sek. I behandeln. Dabei können Visualisierungen einen anschaulichen Zugang zum Aufbau und zur Funktionsweise von Atemalkoholsensoren erleichtern. Nachfolgend werden entsprechende Visualisierungen vorgestellt und deren didaktischer Nutzen begründet. Die präsentierten Abbildungen sind online in besserer Auflösung bereitgestellt (siehe Abschnitt 8).

5.1. Verborgenes zeigen

Eine Funktion von Abbildungen kann darin bestehen, verborgene Details besser erkennbar zu machen. Girwidz [34] bezeichnet diese Funktion als Zeigefunktion. Ausgangspunkt kann z. B. ein Foto von einem geöffneten Atemalkoholsensor sein. Es zeigt Bestandteile, die nicht direkt beobachtet werden können. Abbildung 6 zeigt das Gehäuse und bei genauem Hinsehen die Heizwendel.

In Kombination mit Schemazeichnungen können außerdem der Aufbau und einzelne Komponenten genauer dargestellt werden (Abb. 10).

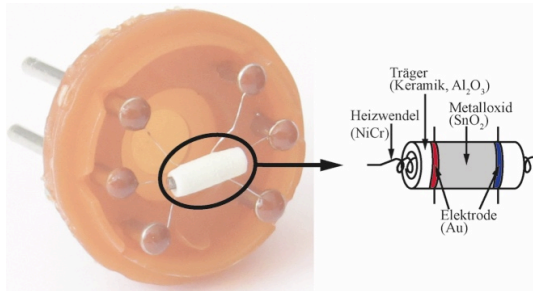


Abb. 10: Die Abbildung zeigt links ein Foto und rechts eine Schemazeichnung des Atemalkoholsensors.

5.2. Vorstellungen unterstützen

Wichtig für ein Verständnis der Funktionsweise von Atemalkoholsensoren sind Vorgänge an der Oberfläche von SnO₂, aus denen eine Änderung des elektrischen Widerstands folgt. Mit beschrifteten Schemazeichnungen lassen sich diese Vorgänge sequenziert veranschaulichen, sodass die Lerninhalte Schritt für Schritt erarbeitet werden können. Zentrale Sequenzen sind: die Adsorption von Sauerstoff und die Reaktionen zwischen Ethanolmolekülen mit adsorbierten Sauerstoffionen (siehe Abschnitt 3.3).

Die Abbildungen 11a bis 11d zeigen Sequenzen der Adsorption von Sauerstoff an der SnO₂-Oberfläche.

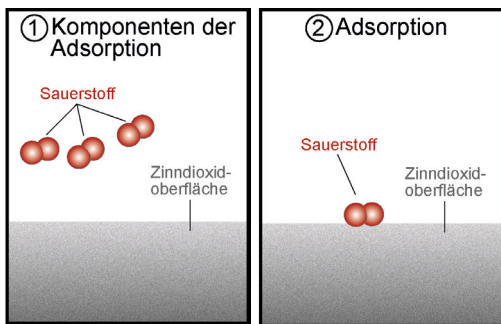


Abb. 11a und 11b: Die linke Schemazeichnung zeigt Komponenten des Adsorptionsvorgangs. In der rechten Zeichnung ist zu sehen, dass sich Sauerstoff an der Zinndioxidoberfläche anlagert.

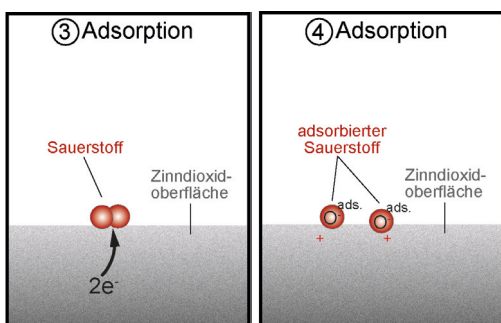


Abb. 11c und 11d: Die linke Zeichnung visualisiert das Binden von Elektronen aus der Zinndioxidschicht durch Sauerstoff. Rechts ist das Resultat des Adsorptionsvorgangs zu sehen.

In Abbildung 12 ist die Reaktion zwischen Ethanolmolekülen und Sauerstoffionen dargestellt.

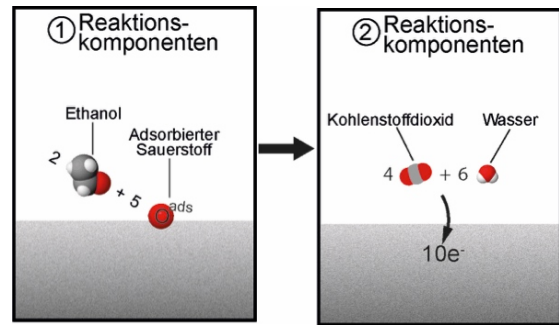


Abb. 12: Beispiel für die Darstellung von Reaktionsvorgängen zwischen Ethanol und adsorbierten Sauerstoff im Kalottenmodell (Sauerstoff ist rot, Wasserstoff ist weiß und Kohlenstoff ist grau dargestellt).

5.3. Wissen strukturieren

Mind- und Concept-Maps stellen Zusammenhänge visuell dar. Flussdiagramme veranschaulichen Prozesse und Abläufe.

Werden diese Visualisierungen im Lernprozess eingesetzt, können sie das Einordnen neuer Informationen in bestehende Wissensstrukturen erleichtern und zur Wissensvernetzung beitragen.

Setzt man die genannten Visualisierungen zu Beginn ein, können sie als Advanced Organizer nützlich sein, um den neuen Lerninhalt vorab zu strukturieren.

In der Erarbeitungsphase lassen sich Zusammenhänge aufzeigen und wichtige und weniger wichtige Komponenten aufdecken.

Der Einsatz zum Abschluss des Lernprozesses dient dazu, den Lernenden nochmals einen Gesamtüberblick zu geben.

Ein exemplarisches Concept-Map zeigt die folgende Abbildung (siehe Abb. 13). Der Aufbau von Atemalkoholsensoren kann durch die Darstellung relevanter Bauteile mit einem Concept-Map visualisiert werden.

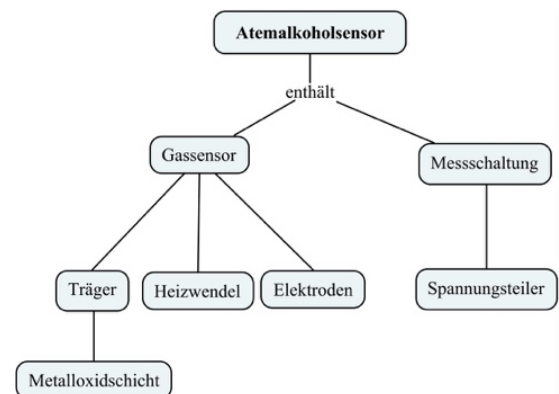


Abb. 13: Concept-Map zum prinzipiellen Aufbau eines Atemalkoholsensors

Flussdiagramme können den Aufbau mentaler Vorstellungen über Abläufe unterstützen [34], was insbesondere für den Physikunterricht interessant ist. Wichtige Vorgänge für die Atemalkoholmessung

sind Wechselwirkungsprozesse, die an der Metalloxidschicht stattfinden und sich auf den elektrischen Widerstand des Sensors auswirken. In Flussdiagrammen über Adsorptions- und Reaktionsprozesse lässt sich dies illustrieren.

Die Abbildung 14 zeigt einen Ausschnitt eines Flussdiagramms, das visuell darstellt, welche Vorgänge den elektrischen Widerstand des Sensors beeinflussen.

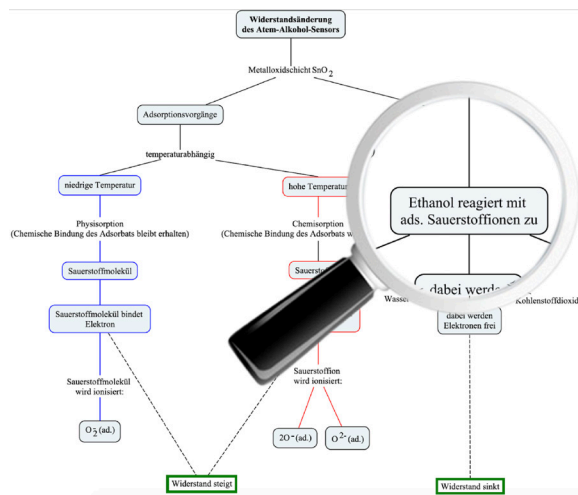


Abb. 14: Aus Platzgründen ist nur ein Ausschnitt eines Flussdiagramms zum Funktionsprinzip des Sensors über eine Lupe vergrößert dargestellt. Es zeigt die Widerstandsänderung infolge von Adsorptions- und Reaktionsvorgängen.

6. Experimente

Eine zentrale Rolle beim authentischen Lernen mit Sensoren spielen Experimente. Dieser Abschnitt stellt einige Beispiele zum Atemalkoholsensor vor. Die Experimente sind nach zwei Funktionen gegliedert:

- explorative Experimente und
- prüfende Experimente.

6.1. Explorative Experimente

Die vorgestellten explorativen Experimente sollen zeigen, wie mit dem Sensor Fragen aus dem Alltag rund um das Thema Alkohol untersucht werden können. Mögliche Untersuchungsfragen sind z. B.:

- Welche Faktoren beeinflussen die Atemalkoholkonzentration und welche Rolle spielt die Zeit?
- Welche Substanzen setzen Alkohol unter kontrollierten Bedingungen frei?
- Welche Werte für die Alkoholkonzentration werden in der Luft direkt über einem Glühwein gemessen, wenn dieser auf ca. 90 °C erhitzt wird?

6.1.1. Atemalkoholkonzentration

Ein einfaches Lehrerdemonstrationsexperiment zur Abnahme der AAK in Abhängigkeit von der Zeit ist

das mehrmalige Messen der AAK direkt nach einer Mundspülung mit 10 cl Bier. Hohe Atemalkoholkonzentrationen lassen sich auch durch ein ca. 30 Sekunden langes Gurgeln mit einer alkoholischen Mundspülung erreichen. Danach wird die Flüssigkeit wieder ausgespuckt und die AAK in Abständen von zwei Minuten gemessen (z. B. mit dem Gerät *AlcoScan AL7000*, vgl. auch Abschnitt 8).

Die Ergebnisse zeigen u. a., dass die AAK direkt nach dem Gurgeln so hoch ist, dass der Wert sogar außerhalb des Messbereichs des Gerätes liegt (hier 4 ‰). Nach vier Minuten ist der Wert schon deutlich gesunken (etwa auf 0,6 ‰) und nach weiteren zehn Minuten liegt die AAK nur noch bei ca. 0,1 ‰ bis 0,2 ‰. Der Versuch macht deutlich, warum eine Atemalkoholkontrolle frühestens zehn Minuten nach dem Konsum alkoholhaltiger Lebensmittel erfolgen darf.

6.1.2. Alkoholfreisetzung

Ethanol ist leicht flüchtig. In der beschriebenen Versuchsreihe werden verschiedene Flüssigkeiten auf die Freisetzung von Ethanol untersucht.

Als Testflüssigkeiten eignen sich u. a. Eau de Parfum, Eau de Toilette, alkoholfreies Bier, Starkbier, Likör, verschiedene Mundspülungen usw. Beispiele für alkoholhaltige Mundspülungen sind die Produkte CB12 mit 1,6 %-Vol. Alkohol oder Listerine Original mit 26,9 %-Vol. Alkohol. Die Mundspülung Dentalux ist hingegen alkoholfrei. Außerdem benötigt man noch einige gleich große Schalen mit großer Oberfläche (z. B. Petrischalen). Diese werden vorab jeweils randvoll gefüllt und abgedeckt. Die Messung kann mit dem *Ethanol-Gassensor MQ-3* (siehe Abschnitt 8), einem Spannungsteiler in Kombination mit einem Voltmeter oder einfacher über eine Widerstandsmessung mit dem Multimeter durchgeführt werden. Bei Betrieb mit einem Spannungsteiler misst man mit dem Voltmeter den Spannungsabfall am Lastwiderstand (siehe Abschnitt 3.4, Abb. 9). Die Messergebnisse zeigen für verschiedene Dampfkonzentrationen von Ethanol entsprechende Spannungsabfälle. Wichtig ist, dass der *Ethanol-Gassensor MQ-3* in geringem und gleichbleibendem Abstand über der Oberfläche der Testflüssigkeiten angebracht wird. Am besten eignet sich Stativmaterial für die Anbringung des Sensors, sodass nur noch die Petrischalen ausgetauscht werden müssen.

Die Messergebnisse zeigen für verschiedene Konzentrationen von Ethanoldampf entsprechende Spannungsabfälle am Lastwiderstand. Beispielsweise steigt über der Petrischale mit Spiritus die elektrische Spannung über dem Lastwiderstand von 3,2 V auf 4,9 V.

Der exakte Wert der Alkoholkonzentration in der Testflüssigkeit kann allerdings nicht angegeben werden. Aus der Messung der Alkoholkonzentration in der Atmosphäre über der Flüssigkeit kann mit

Hilfe des Gesetzes von Henry nur ansatzweise auf die Konzentration in der Flüssigkeit geschlossen werden (siehe Abschnitt 2.5; Gleichgewichtszustand). Eine Rangfolge der Flüssigkeiten nach ihrer Freisetzung von Ethanol kann aber angegeben werden.

Zudem unterscheidet sich auch der Umrechnungsfaktor, weil sich die Umgebungsbedingungen von den Rahmenbedingungen in der Lunge und der Abgabe von Alkohol aus dem Blut unterscheiden (siehe Abschnitt 2.5).

Trotz der Einschränkung auf qualitative Aussagen, ist die Durchführung dieses Experiments sinnvoll. Im Unterricht kann experimentell auf wichtige Faktoren eingegangen werden, die den Verdunstungsvorgang beeinflussen, wie z. B. Temperatur, Oberfläche und Luftströmung. Exemplarisch wird im nächsten Experiment die Temperaturabhängigkeit des Verdunstens von Ethanol gezeigt.

6.1.3. Erhitzen von Glühwein

Beschrieben ist ein qualitatives Experiment zur Temperaturabhängigkeit von Verdunstungsvorgängen und zur Siedetemperatur von Ethanol. Es wird die Änderung des Alkoholgehalts in der Atmosphäre über einer Anordnung zum Erhitzen von Glühwein erfasst. Reiner Alkohol siedet bei 78,4 °C. Oberhalb dieser Temperatur wird der Alkoholgehalt in der Atmosphäre direkt über dem Getränk stark zunehmen.

Für das Erwärmen eignen sich am besten ein Heizrührer und ein Erlenmeyerkolben. Es können aber auch gewöhnliche Wasserkocher oder Tauchsieder (Sicherheitsvorkehrungen beachten) verwendet werden. Die Temperatur des Glühweins kann einfach mit einem Digitalthermometer gemessen werden. Für die Messung des Alkoholgehalts über dem Glühwein bietet sich der Betrieb des *Ethanol-Gassensors MQ-3* mit einem Multimeter oder in der Spannungsteilerschaltung an (siehe Abschnitt 3.4, Abb. 9, Datenblatt in Abschnitt 8). Durch Registrieren der beiden Anzeigewerte ist der Zusammenhang zwischen dem Verdunsten von Ethanol und der Temperatur zu erkennen. Außerdem kann man erkennen, warum Glühwein nicht über 70 °C erhitzt werden sollte (siehe Abb. 15).

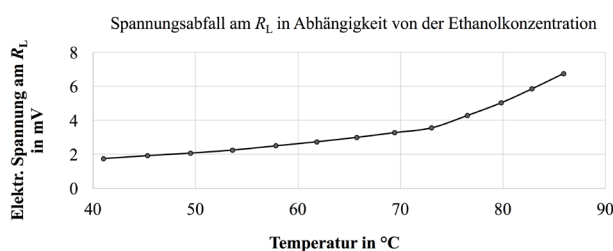


Abb. 15: Messung der Ethanolkonzentration in der Luft über dem Glühwein in Abhängigkeit von der Temperatur; gemessen ist der Spannungsabfall am Lastwiderstand (siehe Abschnitt 3.4, Abb. 9).

Bei der Versuchsauswertung ist ggf. darauf hinzuweisen, dass hier keinesfalls die Alkoholkonzentration in der Flüssigkeit gemessen werden soll. Dafür wäre das Vorgehen völlig ungeeignet, und die Messwerte würden sogar einen Anstieg der Alkoholkonzentration im Glühwein anzeigen. Es ist vielmehr zu erkennen, dass mit Überschreiten der Siedetemperatur von Alkohol die Konzentration über dem Wein stark zunimmt und vermehrt Alkohol entweicht. Dieser Anstieg der Messwerte ist sehr gut zu erkennen, trotz der Schwankungen, die sich aufgrund der ungleichmäßigen Temperaturverteilung in der Flüssigkeit beim Aufheizen und wegen der Turbulenzen in der Luft zwangsläufig ergeben müssen. Die vielen Nebeneinflüsse auf den Kurvenverlauf werden sicher nicht im Unterricht zu behandeln sein. Sehr gut erkennbar und erklärbar ist allerdings der starke Anstieg im Bereich der Siedetemperatur von Alkohol.

Im Physikunterricht ist also nur eine qualitative oder höchstens eine halbquantitative Auswertung der Daten sinnvoll. Dabei ist allerdings eine Diskussion grundlegender Fragen zur Messgenauigkeit und zum Einfluss von Störgrößen sicher reizvoll.

6.2. Hypothesenprüfende Experimente

Nachfolgend werden drei Experimente mit dem *Ethanol-Gassensor MQ-3* vorgestellt, der am einfachsten an ein Multimeter angeschlossen wird. Alternativ kann er auch über eine Spannungsteilerschaltung betrieben werden.

Die Experimente helfen, die Funktionsweise von Atemalkoholsensoren aufzudecken und können dazu beitragen, die Abhängigkeit des Sensorwiderstandes von einzelnen relevanten Größen verständlich zu machen. Es werden folgende Fragestellungen untersucht, zu denen in der Klasse zuerst einmal Vermutungen und entsprechende Hypothesen aufgestellt werden:

- Welchen Einfluss hat die Temperatur auf den elektrischen Widerstand des Sensors?
- Wie beeinflusst Ethanol den elektrischen Widerstand des Sensors?
- Wie erfasst man Widerstandsänderungen?

6.2.1. Optional: Heizspannung, Arbeitstemperatur und elektrischer Sensorwiderstand

Üblicherweise wird im Unterricht zu Halbleitern die temperaturabhängige Änderung der elektrischen Leitfähigkeit von Halbleitermaterialien behandelt. Mit dem hier beschriebenen Experiment kann man daran anknüpfen.

Zunächst stellen die Lernenden Hypothesen darüber auf, ob sich der elektrische Widerstand des Sensors ändert, wenn dessen Temperatur steigt bzw. sinkt. Anschließend begründen die Lernenden ihre Vermutung mit Hilfe des Bändermodells, falls dies im Unterricht behandelt wurde.

Die Abhängigkeit der Arbeitstemperatur des elektrischen Widerstandes des *Ethanol-Gassensors MQ-3* in Luft (siehe Abschnitt 8) lässt sich über die Variation der Heizspannung U_H untersuchen. Dazu wird die Heizspannung schrittweise von 1 V auf 5 V erhöht und gleichzeitig der Sensorwiderstand R_S mittels Spannungsteiler (siehe Abschnitt 3.4, Abb. 9 und Formel 10) oder einfacher über eine Widerstandsmessung mit dem Multimeter bestimmt. Die Messergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Heizspannung U_H die Temperatur des Sensors steigt und der Sensorwiderstand R_S sinkt.

Die Fähigkeit der Lernenden, physikalisch zu argumentieren wird zusätzlich gefördert, wenn diese das Versuchsergebnis mit dem Bändermodell erklären. In diesem Zusammenhang argumentieren die Schülerinnen und Schüler beispielsweise, dass bei Halbleitermaterialien Elektronen durch die thermische Anregung aus dem Valenz- in das Leitungsband übergehen und als bewegliche Ladungsträger zur Verfügung stehen können. Weiterhin schlussfolgern die Schülerinnen und Schüler, dass mit zunehmender Anzahl verfügbarer Ladungsträger der elektrische Widerstand abnimmt.

6.2.2. Änderung des elektrischen Widerstands durch Ethanol

Die Lernenden stellen Hypothesen darüber auf, wie sich der elektrische Widerstand des Sensors ändert, wenn Ethanol in Sensornähe gebracht wird. Ihre Hypothesen begründen die Lernenden mit ihrem Wissen über die Reaktion zwischen Ethanol und adsorbiertem Sauerstoff (siehe Abschnitt 3.3.2), und falls das Bändermodell Gegenstand des Unterrichts ist, auch mit dem Bändermodell. Bei der Formulierung einer alternativen Hypothese ohne Bezug zum Bändermodell argumentieren die Schülerinnen und Schüler, dass durch die Reaktion mit Ethanol zusätzliche Ladungsträger freigesetzt werden und dadurch der elektrische Widerstand sinkt.

Der Einfluss von Ethanol auf den elektrischen Widerstand des Sensors (hier: *Ethanol-Gassensor MQ-3*, vgl. Abschnitt 8) kann in einem halb-quantitativen Experiment mit selbsterstellten Ethanollösungen untersucht werden. Dazu wird der Sensor mit einer Heizspannung U_H von 5 V und in der Spannungsteilerschaltung betrieben und gewartet, bis sich ein konstanter Sensorwiderstand R_S eingestellt hat (siehe Abb. 9). Anschließend hält man den MQ-3-Sensor für einige Sekunden in geringem Abstand über die Ethanollösung und bestimmt über den gemessenen Spannungsabfall den elektrischen Widerstand R_S (vgl. Formel 10).

Die Ergebnisse zeigen ein Absinken des Sensorwiderstandes R_S , wenn dieser über eine Ethanollösung gehalten wird. Auch bei diesem Versuch kann die Fähigkeit der Lernenden zum physikalischen Argumentieren gefördert werden. Dazu können sie die Versuchsbeobachtungen mit dem Bän-

dermodell deuten und ihr Wissen über Reaktionsprozesse anwenden.

6.2.3. Optional: Widerstandsänderungen auslesen

Hier können die Schülerinnen und Schüler den Spannungsteiler als Hilfsmittel für die Bestimmung des elektrischen Sensorwiderstands kennenlernen.

Der *Ethanol-Gassensor MQ-3* (siehe Abschnitt 8) wird mit einem Lastwiderstand (10 k Ω) in Reihe geschaltet. Anhand einer vorgegebenen Schaltskizze können die Lernenden in Gruppen den Versuch selbstständig aufbauen oder im Rahmen eines Demonstrationsversuches der Lehrkraft assistieren. Die Formel für den elektrischen Widerstand R_S des Sensors wird gemeinsam im Unterrichtsgespräch hergeleitet, wobei bei Bedarf zuvor nochmals die Gesetzmäßigkeiten der Reihen- und Parallelschaltung wiederholt werden sollten.

Für mehrere Ethanollösungen können die Schülerinnen und Schüler in Gruppen selbstständig den jeweiligen Spannungsabfall messen oder beim Demonstrationsversuch der Lehrkraft zur Hand gehen. Aus den Spannungsabfällen ergeben sich jeweils die Werte für den elektrischen Widerstand R_S des Sensors.

7. Schlussbemerkung

In diesem Artikel wurden Optionen vorgestellt, wie Atemalkoholsensoren den Physikunterricht der Sekundarstufe I bereichern können. Die Demonstration einer realistischen Anwendung physikalischer Gesetzmäßigkeiten (z. B. Änderung des elektrischen Widerstandes durch Adsorptions- und Reaktionsvorgänge) ist ein Beispiel, wie mit dem Einsatz von Atemalkoholsensoren authentisches Lernen unterstützt werden kann. Auch typische Messtechniken und experimentelles Arbeiten können durch die Implementierung von Atemalkoholsensoren demonstriert werden. Ein Beispiel hierfür ist der Nutzen von Spannungsteilern für die Bestimmung von Widerstandswerten aus gemessenen Spannungsabfällen. Weiterhin sind einfache und kostengünstige Experimente möglich, mit denen Alltagsfragen zum Thema Alkohol explorativ untersucht werden können. Auch hypothesentestende Experimente zur Funktionsweise des Sensors lassen sich einfach realisieren.

Für die didaktische Elementarisierung von Atemalkoholsensoren wurden neben den beschriebenen Experimenten auch verschiedene Visualisierungen vorgeschlagen. So können beispielsweise Schemazeichnungen Verborgenes sichtbar machen (beispielsweise den inneren Aufbau des Sensors). Außerdem können sie den Aufbau mentaler Modelle unterstützen (z. B. zur Reaktion zwischen Ethanol und adsorbiertem Sauerstoff).

8. Bezugsquellen und Datenblätter

Datenblatt des Ethanol-Gassensors MQ-3 von Hanwei:

<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/MQ-3.pdf>

Bezugsquelle des Ethanol-Gassensors MQ-3 von Hanwei, Kosten: 5,36 € :

<http://www.watterott.com/de/Alcohol-Gas-Sensor-MQ-3>

Bedienungsanleitung für den AlcoScan AL7000

<http://www.trendmedic.de/Bedienungsanleitung-Alkoholtester-Alcoscan-AL7000.pdf>

Bezugsquelle des Alkoholtesters AlcoScan AL7000, Kosten: 99 €, inkl. 25 Mundstücke

<http://www.alkomat.net/alkoholtester-ace-i-al7000-mit-wechselsensor-ace-sensor-s-25-mundstuecke-und-kalibriergutschein.32610.html>

Website mit den Abbildungen des Artikels in besserer Auflösung

<http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/sensorik/aas/index.html>

9. Literatur

- [1] Watzka, B. & Girwidz, R. (2015). Einfluss der Kontextorientierung und des Präsentationsmodus von Aufgaben auf den Wissenserwerb und die Transferleistung physikalischer Inhalte. *ZfDN* 21(1), 187-206.
- [2] Baum, M. (2006). Ethanol. In B. Dill, F. Böckler & A. Kirschning (Hrsg.). *RÖMPP Onlinelexikon für Chemie*, Stuttgart: Thieme. URL: <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/Welcome.do> (Stand: 18.01.2017)
- [3] Dettmeyer, R.B. & Verhoff, M.A. (2011). *Rechtsmedizin. Kapitel 13: Forensische Alkoholologie und Toxikologie*. Heidelberg: Springer, 161-215.
- [4] Gilg, T. (2013). Forensische Alkoholologie, Grundlagen und Deutsche Gegebenheiten. In M. Grassberger, E. Türk, K. Yen (Hrsg.), *Klinisch-forensische Medizin*, Berlin: Springer, 499-521.
- [5] Schoknecht, G. (1992). Beweissicherheit der Atemalkoholanalyse - Gutachten des Bundesgesundheitsamtes. *Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr* 86.
- [6] Fleischer, M. (2006). Wie Mikrochips riechen lernen. Funktionsweise und Einsatzgebiete moderner chemischer Sensoren. *Physik Journal* 5(7), 25-31.
- [7] Köck, A.; Tischner, A.; Maier, T.; Kast, M.; Stepper, C.; Januschewsky, J. & Edtmaier, C. (2008). Metalloxid-Nanostrukturen für die Gas-sensorik. *LIFIS Online*, ISSN 1864-6972.
- [8] Bauer, M. (2015). Selektive Messung organischer Rauchgaskomponenten mittels halbleitender mesoporöser WO₃-Schichten. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen.
- [9] Wencker, D. (2006). Sicherheitsaspekte beim Einsatz von Gaswarngeräten. *Gas-Sensoren: sicher?!*. *electronic industrie* 5, 46-49.
- [10] Sänze, S. (2014). Synthese, Charakterisierung und in situ spektroskopische Studie des Ethanol-Gassensormechanismus von Indiumoxid. Dissertation, U Darmstadt.
- [11] Hetznecker, A. (2005). Untersuchung der gas-sensitiven Eigenschaften von SnO₂/NASICON-Kompositen. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- [12] Sachlara, O. (2005). Impedanzspektroskopie an SnO₂-Dickschicht-Sensoren. Dissertation, Eberhard-Karls-Universität Tübingen.
- [13] Korotcenkov, G. & Cho, B.K. (2009). Thin film SnO₂-based gas sensors: Film thickness influence. *Sensors and Actuators B* 142, 321-330.
- [14] Eberheim, A. (2003). Qualifizierung von Halbleiter-Gassensoren für die Detektion spezifischer organischer Rauchgaskomponenten. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen.
- [15] Liepe, J.M. (2004). Entwicklung und Charakterisierung von Halbleitersensoren zur Online-Detektion der Aromaentwicklung bei Backprozessen. Dissertation, TUM.
- [16] Wu, Y.; Zhang, H.; Liu, Y.; Chen, W.; Ma, J.; Li, A. & Qin, Z. (2015). Synthesis and Gas Sensing Properties of Single La-Doped SnO₂ Nanobelts. *Sensors* 15, 14230-14240.
- [17] Wiegleb, G. & Heitbaum, J. (1991). Halbleitersensor auf der Basis von Indium-Zinnoxid, *Exp. Tech. Phys.* 39, 227-237.
- [18] Zhang, Y.; Zheng, X.; Zhong, X. & Deng, S. (2012). The ethanol sensing characteristics of ZnO thin films with low operating temperatures synthesized by pulsed laser deposition. *Meas. Sci. Technol.* 23, 105107 (7 pp.).
- [19] Kohl, D. (1989). Surface processes in the detection of reducing gases with SnO₂-based devices. *Sensors and Actuators* 18, 71-113.
- [20] Tille, T. & Schmitt-Landsiedel, D. (2005). *Mikroelektronik, Halbleiterbauelemente und deren Anwendung in elektronischen Schaltungen*, Berlin: Springer.
- [21] Fraden, J. (2010). *Handbook of modern Sensors*. New York: Springer.
- [22] Schmidt, W.-D. (2007). *Sensorschaltungstechnik*. Würzburg: Vogel Buchverlag.
- [23] FIGARO USA (2002). TGS 822 Product Information. URL: <http://www.figarosensor.com/products/822pdf.pdf> (Stand: 04.08.2015)
- [24] Shaffer, D.W. & Resnick, M. (1999). "Thick" Authenticity: New Media and Authentic Learning. *Journal of Interactive Learning Research* 10(2), 195-215.
- [25] Guderian, P. & Priemer, B. (2008). Interessenförderung durch Schülerlaborbesuche – eine

- Zusammenfassung der Forschung in Deutschland. *PhyDid A* (2/7), 27-36.
- [26] Kuhn, J. (2010). Authentische Aufgaben im theoretischen Rahmen von Instruktions- und Lehr-Lern-Forschung. Optimierung von Ankermedien für eine neue Aufgabenkultur im Physikunterricht. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- [27] Höttecke, D. (2013). Forschend-entdeckenden Unterricht authentisch gestalten. Ein Problemaufriss. In: S. Bernholt (Hrsg.), *Inquiry-based Learning – Forschendes Lernen*. GDCP, Jahrestagung in Hannover 2012, Kiel: IPN.
- [28] Klein, P., Hirth, M., Gröber, S., Kuhn, J. & Müller, A. (2014). Classical Experiments revisited: Smartphone and Tablet PC as Experimental Tools in Acoustics and Optics. *Physics Education* 49(4), 412-418.
- [29] Klein, P., Kuhn, J., Müller, A. & Gröber, S. (2015). Video analysis exercises in regular introductory mechanics physics courses: Effects of conventional methods and possibilities of mobile devices. In W. Schnotz, A. Kauertz, H. Ludwig, A. Müller & J. Pretsch (Eds.), *Multidisciplinary Research on Teaching and Learning*. Basingstoke, UK: Palgrave Macmillan, 270-288.
- [30] Kuhn, J. (2014). Relevant information about using a mobile phone acceleration sensor in physics experiments. *American Journal of Physics* 82, 94.
- [31] Kuhn, J. & Vogt, P. (2015). Smartphone & Co. in Physics Education: Effects of Learning with New Media Experimental Tools in Acoustics. In W. Schnotz, A. Kauertz, H. Ludwig, A. Müller & J. Pretsch (Eds.), *Multidisciplinary Research on Teaching and Learning*. Basingstoke, UK: Palgrave Macmillan, 253-269.
- [32] Edelson, C. (1998). Realising authentic science learning through the adaption of scientific practice. In: B.J. Fraser & K.G. Tobin. (Eds.), *International Handbook of Science Education*, Dordrecht: Kluwer, 317-331.
- [33] Chinn, C.A. & Malhotra, B.A. (2002). Epistemologically Authentic Inquiry in Schools: A Theoretical Framework for Evaluating Inquiry Tasks. *Science Education* 86(2), 175-218.
- [34] Girwidz, R. (2014). Bilder und Visualisierungen für den Physikunterricht. In H. Sowa, A. Glas & M. Miller (Hrsg.), *Bildung der Imagination, Band 2: Bildlichkeit und Vorstellungsbild in Lernprozessen*, Oberhausen: Athena-Verlag, 493-509.