

Pulsoximetrie im Physikunterricht

Tim Storck*, Raimund Girwidz*

*Ludwig-Maximilians-Universität München, Theresienstraße 37, 80333 München
t.s@lmu.de und girwidz@lmu.de

Kurzfassung

Das pulsoximetrische Verfahren zur Bestimmung der partiellen Sauerstoffsättigung im menschlichen Blut bietet einen authentischen Kontext für den Physikunterricht in den Sekundarstufen I und II. Die Messung der Sauerstoffsättigung erfolgt dabei mithilfe moderner Sensorik, die dennoch preislich für den Schulunterricht erschwinglich bleibt. Die Arbeit mit den verwendeten Sensoren gewährleistet nicht nur einen realen Bezug zu moderner Technik, sondern ermöglicht auch ein Einüben naturwissenschaftlicher Arbeitsweise. In diesem Artikel wird ein Unterrichtskonzept zur Pulsoximetrie vorgestellt, das insbesondere auch das Ausbilden von Higher Order Thinking Skills in den Vordergrund stellt.

1. Einleitung

Der Einsatz authentischer Kontexte im Physikunterricht wird vielfach positiv bewertet (z.B. [1], [2], [3], für eine weitere Diskussion siehe auch die in [4] genannten Referenzen). Sensoren wiederum ermöglichen eine Verankerung von physikalischen Inhalten in Anwendungssituationen ([5], [6], [7]). Das Verfahren der Pulsoximetrie (siehe Abb. 1) zur Bestimmung der partiellen Sauerstoffsättigung im Blut

$$S_pO_2 = \frac{c(\text{HbO}_2)}{c(\text{HbO}_2) + c(\text{Hb})} \quad \{1\}$$

(mit $c(\text{HbO}_2)$ als Konzentration des mit Sauerstoff gesättigten Hämoglobins und $c(\text{Hb})$ als die des ungesättigten Hämoglobins) bietet hierbei einen authentischen Kontext mit realem Bezug zu einer aktuellen Technologie, die im medizinischen Alltag vielfach eingesetzt wird und einigen Jugendlichen (z.B. aus dem Krankenhaus) bereits bekannt ist.



Abb. 1: Fingerpulsoximeter [8].

Weiterhin sind die Grundprinzipien des pulsoximetrischen Verfahrens – bei geeigneter Elementarisierung – bereits mit den allgemein unterrichteten Modellen der Schulphysik verstehbar. Dies ermöglicht insbesondere auch ein eigenständiges Entdecken der Sensorfunktionsweise durch die Jugendlichen im Rahmen eines „guided discovery“ Prozesses. Das

vorgestellte Unterrichtskonzept zur Pulsoximetrie basiert auf den Arbeiten, wie sie in [8] und [4] näher vorgestellt werden. In [4] wird auch der technische Hintergrund vertiefend dargestellt.

2. Das Unterrichtskonzept

2.1. Einführung in das Unterrichtsthema und Aktivierung von Vorwissen

Eine realistische Problemstellung aus der Notfall-, Sport- oder Flugmedizin bietet einen authentischen Anwendungskontext und eignet sich als Einstieg in und Motivation für das Unterrichtsthema. Ein Beispiel aus der Sportmedizin ist dabei das Höhenbergsteigen. Die Lernenden kennen die Problematik einer mangelnden Sauerstoffversorgung in großen Höhen. Interessante Einstiege aus dem Bereich der Notfallmedizin bieten die Problematiken der Schlafapnoe, bei der der Schlaf der Patienten im Hinblick auf längere Atemausfälle überwacht werden muss, oder die Kontrolle der Atmung bei anästhesierten Patienten während einer chirurgischen Operation. In der Flugmedizin wiederum finden sich passende Fragestellungen in der Kontrolle der Sauerstoffversorgung in den Flugzeugkabinen auf unterschiedlicher Flughöhe. Nähere Ausführungen zu geeigneten Einstiegen finden sich auch in [4]. In dieser Weise motiviert ergibt sich so auf ganz natürliche Art die Notwendigkeit der instantanen Überwachung, um im Notfall schnell geeignete Maßnahmen zu ergreifen. Das Verfahren der Pulsoximetrie, bei dem die prozentuale Sauerstoffsättigung im Blut zeitnah und nicht-invasiv durch Messung geschätzt wird, bietet eine einfache Lösung des Überwachungsproblems.

All die genannten Einstiege in die Thematik bieten neben ihrer Authentizität auch eine horizontale Fächervernetzung zur Biologie sowie eine günstige Aktivierung des Vorwissens. Atem- und Blutkreis-

lauf und ihre Rollen in der ausreichenden Sauerstoffversorgung der Organe sind den Lernenden aus dem Biologieunterricht bekannt und können zu Beginn der Unterrichtseinheit zur Pulsoximetrie kurz wiederholt werden. Hierzu bieten sich Visualisierungen in ausgezeichneter Weise an. An dieser Stelle lässt sich auch die Abhängigkeit der Blutfarbe vom Sauerstoffanteil thematisieren: Bei einem hohen Anteil an mit Sauerstoff gesättigtem Hämoglobin besitzt das Blut eine hellrote Farbe; ist der Anteil an ungesättigtem Hämoglobin hingegen hoch, ergibt sich eine dunkelrote Farbe (siehe Abb. 2). Die Frage, wie eine Überwachung technisch möglich ist, ohne dass dem Patienten für eine Untersuchung Blut abgenommen werden muss, stellt sich den Lernenden als nächstes und weckt deren Interesse für die nachfolgenden Unterrichtsschritte.

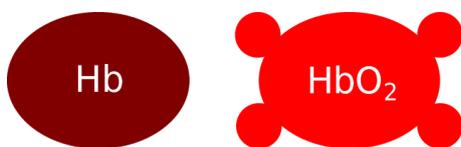


Abb. 2: Visualisierung von Hämoglobin mit und ohne Sauerstoffsättigung ([4], vgl. auch [9]).

2.2. Erfahren - erster Umgang mit dem Sensor

An dieser Stelle erhalten die Jugendlichen einfache Fingerpulsoximeter, die im Handel schon für unter 30 Euro erhältlich und somit für den Einsatz im Schulunterricht erschwinglich sind. Damit lässt sich der Sensor in einer ersten, oberflächlichen Untersuchung erfahren. Die Schülerinnen und Schüler finden heraus, was auf dem Display des Sensors angezeigt wird (die prozentuale Sauerstoffsättigung, die Pulshöhe und gegebenenfalls, je nach Gerät, auch die dynamische Visualisierung des Herzschlags in Form eines Plethysmogramms). (Genau genommen schätzen die Geräte durch Messung die sogenannte partielle Sauerstoffsättigung; für Näheres hierzu siehe [4] oder [10].) Um eine erste Idee zu erhalten, wie die Messung des Sensors funktioniert, betrachten die Lernenden die Messeinheit des Sensors näher. Eine rot blinkende LED, die Licht auf und auch durch den Finger strahlt, fällt schnell ins Auge (siehe Abb. 3).



Abb. 3: Fingermessapparatur mit strahlender LED [8]

Dies führt zu der Suche nach einem geeigneten Signalempfänger sowie dem Entdecken der in Pulsoximetergeräten verwendeten Fotodiode. Eine erste Hypothese lautet zu diesem Zeitpunkt, dass Licht

durch den Finger gestrahlt, dort und insbesondere durch das Blut, in dem der Sauerstoff gebunden ist, absorbiert und schließlich das nach der Absorption verbleibende Signal mithilfe der Fotodiode gemessen wird (siehe auch Abb. 4).

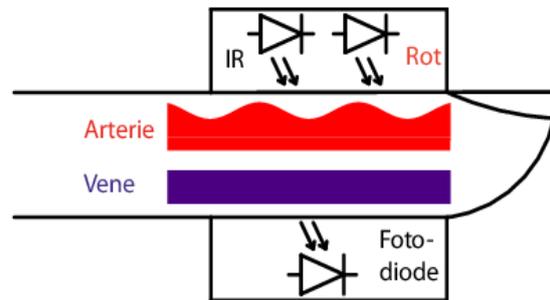


Abb. 4: Schemazeichnung zur Operation der Messeinheit [4].

2.3. Erkennen - Schrittweises Erfassen der Funktionsprinzipien

2.3.1. Physikalischer Hintergrund zur Absorption

Nach den ersten Erfahrungen im Umgang mit dem Sensor sollen die Lernenden das Funktionsprinzip im Hinblick auf die im Schulunterricht behandelten physikalischen Gesetzmäßigkeiten erkennen. Da sauerstoffreiches und -armes Blut unterschiedliche Farben besitzen, ist ein erster Lernschritt die Absorption des durch eine Farbstofflösung gestrahlten Lichts. Damit wird auch eine Anknüpfung an die Inhalte der Atomphysik erreicht, in der die Absorption von Photonen verschiedener Energie durch die Elektronenhüllen der Elemente behandelt wird. Auch an dieser Stelle ergibt sich so eine Aktivierung von Vorwissen. Storck und Girwidz ([4]) stellen hierzu eine geeignete Messapparatur und Versuche vor (siehe Abb. 5).



Abb. 5: Versuchsapparatur zur Messung der Absorption des eingestrahlichten LED-Lichts mithilfe von Küvetten mit Farbstofflösung, LED und Fotodiode ([4]).

So lassen sich etwa Küvetten mit Farbstofflösungen mit LED-Licht durchstrahlen, sodass die Intensität des durchstrahlten und auf einer Fotodiode auftreffenden Lichts gemessen werden kann. Dadurch erkennen die Schülerinnen und Schüler qualitativ, aber eigenständig das Grundprinzip zum Gesetz von Lambert-Beer

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\epsilon(\lambda) \cdot c \cdot d} \quad \{2\}$$

(mit I_0 als emittierte Intensität vor der Absorption durch das Medium, I_1 die Intensität nach der Absorption, Extinktionskoeffizient $\epsilon(\lambda)$, Farbstoffkonzentration c und Lichtweglänge d durch das Medium) (siehe Abb. 6).

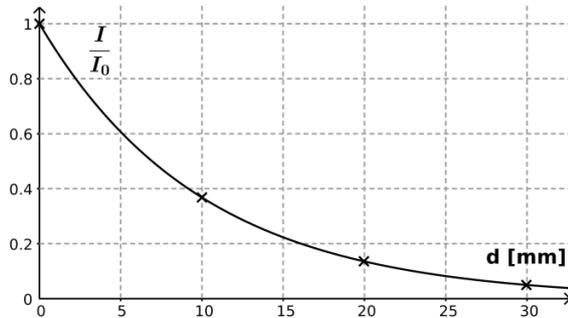
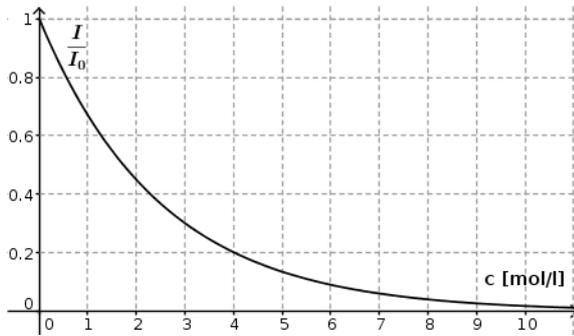


Abb. 6: Schematische Verläufe zum Gesetz von Lambert-Beer ([4]).

Hierzu werden verschiedene Konzentrationen eines Farbstoffs untersucht und Messpunkte in ein Diagramm eingezeichnet (Abb. 6, oben). Neben der Abhängigkeit von der Konzentration kann auch diejenige von der Lichtweglänge mit Hilfe mehrerer hintereinander positionierter Küvetten untersucht werden (Abb. 6, unten). Zusätzlich kann auch mit Animationen wie z.B. mit der Phet-Applikation zum Gesetz von Lambert-Beer ([11]) gearbeitet werden (siehe Abb. 7). Mit dieser lassen sich zeitsparend auch verschiedene Lichtwellenlängen und Farbstoffarten untersuchen. Am Ende dieses Lernabschnitts steht ein qualitatives Verständnis der Abhängigkeit des Empfängersignals sowohl von der eingestrahelten Signalstärke, der eingestrahelten Lichtwellenlänge, der Farbstoffart, der Konzentration des Farbstoffs als auch der Lichtweglänge. Außerdem haben die Lernenden den Begriff und die Bedeutung der Absorptionsrate kennengelernt. An dieser Stelle sollte darauf hingewiesen werden, dass das Gesetz von Lambert-Beer für das Verfahren der Pulsoximetrie nur näherungsweise anwendbar ist ([4], [10]).

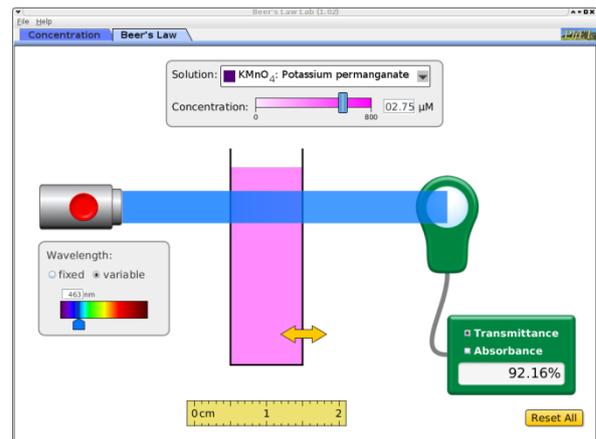


Abb. 7: PhET-Applikation der University of Colorado, <https://phet.colorado.edu/en/simulation/beers-law-lab> ([11]).

2.3.2. Vom gesamten Finger zum Blut

In der Messapparatur des Fingerpulsoximeters wird nicht nur das farbstoffreiche Blut durchstrahlt, sondern der gesamte Finger. Beim verwendeten Messverfahren gelingt offenbar die Differenzierung der Absorption durch den Finger insgesamt von derjenigen lediglich durch das (arterielle) Blut. Durch inhaltliche Hilfestellungen kann nun der Entdeckensprozess der Lernenden günstig angeleitet werden. Ein Plethysmogramm, wie es oft auf dem Gerätedisplay angezeigt wird, liefert einen Ausgangspunkt für das Erkennen des Messprinzips. Durch den pulsierenden Herzschlag werden die Arterien periodisch ausgedehnt und wieder zusammengezogen, sodass sich abwechselnd eine längere und kürzere Lichtweglänge durch die Arterie ergeben. Ein geeigneter Analogieversuch erlaubt es den Lernenden die Situation experimentell zu erfassen (siehe [8] und [4]). Hierzu werden mithilfe variierender Lichtweglängen durch Farbstofflösungen in der bereits zuvor benutzten Messapparatur verschiedene starke Empfangssignale gemessen. Eine längere Lichtweglänge durch die Farbstofflösung steht in Analogie zur ausgedehnten Arterie. Durch Subtrahieren der Absorptionsraten gemessen bei ausgedehnter und nicht-ausgedehnter Arterie gelingt ein Eliminieren des Signalanteils, der rein durch die Absorption durch die übrigen Fingerbestandteile entsteht (siehe Abb. 8). Beim Fingerpulsoximeter wird hierzu mit ausreichend hoher Frequenz gemessen, sodass sichergestellt wird, Signale für die relevanten Ausdehnungszustände der durchstrahlten Arterie zu erhalten.

Auch bei diesem Teil der Lerneinheit bietet es sich an, die Jugendlichen Hypothesen aufstellen und überprüfen zu lassen. Durch akkurate Verbalisierung des gefundenen Wirkprinzips erweitern die Lernenden zusätzlich ihre Kommunikationskompetenz.

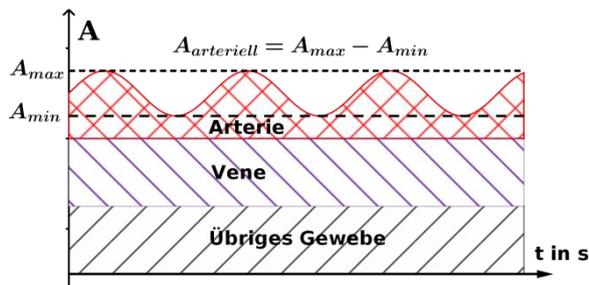


Abb. 8: Stark vereinfachte Schemazeichnung zur Differenzbildung der Absorptionsraten bei unterschiedlich ausgedehnten Arterien ([4]).

2.3.3. Der Sauerstoffanteil im arteriellen Blut

Zu diesem Zeitpunkt ist der Wirkmechanismus so weit verstanden, dass im weiteren Verlauf ausschließlich auf die Absorption im arteriellen Blut fokussiert werden kann. Aus dem Einstieg in das Unterrichtsthema mit seinem Bezug zu den biologischen bzw. medizinischen Grundlagen ist den Lernenden bekannt, dass mit Sauerstoff gesättigtes Hämoglobin im Blut einen anderen Farbstoff bildet als ungesättigtes Hämoglobin. Das teilweise sauerstoffgesättigte Blut, das durch die Arterie fließt und mithilfe des Pulsoximetrie-Verfahrens untersucht werden soll, stellt entsprechend regelmäßig ein Farbstoffgemisch dar. Zu Klärung des weiteren Vorgehens kann auf folgenden Analogieversuch zurückgegriffen werden (siehe [8], [4]): Ein Teebeutel mit zerhackten, getrockneten Blättern von Blaukraut (Rotkohl) wird mit kochendem Wasser übergossen, sodass eine tiefblaue Farbstofflösung entsteht. Gibt man nun ausreichend Säure (z.B. Essig- oder Zitronensäure) hinzu, entsteht eine hellrote Farbstofflösung (chemische Reaktion des im Kraut enthaltenen Farbstoffs Anthocyan). Steht der ursprüngliche Blaukrautfarbstoff in Analogie zum mit Sauerstoff ungesättigten Hämoglobin, so lassen sich die zugegebenen Säuremoleküle in Analogie zu den eingeatmeten Sauerstoffmolekülen verstehen, die das Hämoglobin sättigen. Diese beiden Blaukrautfarbstoffe werden nun mit einem Photospektrometer (z.B. Firma Vernier) untersucht, wobei sich zwei Absorptionskurven abhängig von den eingestrahnten Lichtwellenlängen ergeben (siehe Abb. 9 und 10).



Abb. 9: Spektrophotometer der Firma Vernier ([4]).

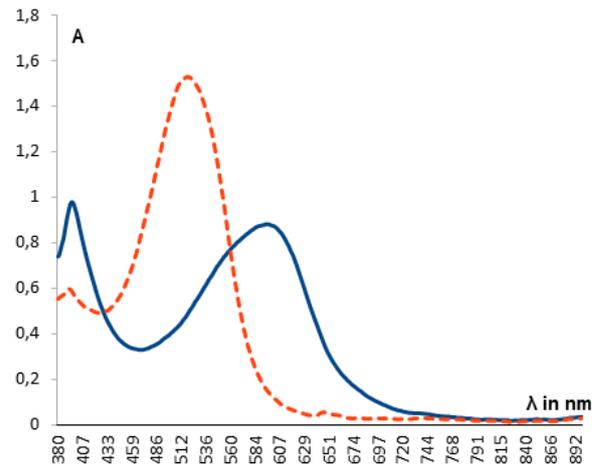


Abb. 10: Absorptionsratenkurven von Blaukrautlösung im neutralen und sauren (gestrichelt) Milieu ([8]).

Diese Kurven stehen wiederum in Analogie zu den Absorptionskurven, die sich für mit Sauerstoff gesättigtes Hämoglobin und ungesättigtes Hämoglobin ergeben (siehe Abb. 11). Bei den meisten am Markt erhältlichen Pulsoximetriegeräten wird mithilfe von abwechselndem Messen bei zwei verschiedenen Lichtwellenlängen (rot, z.B. 660 nm, und IR, z.B. 940 nm) aus den erzielten Absorptionsraten auf das Verhältnis der genannten Hämoglobinderivate im Blut geschlossen. In einer Datenbank im Gerät sind die zu den gemessenen Absorptionsraten passenden Werte der prozentualen Sauerstoffsättigung gespeichert. Der entsprechende Wert wird dann am Gerätedisplay angezeigt. Die Kalibrierung der angezeigten Werte erfolgt zum Zeitpunkt des Gerätedesigns mithilfe von genauen Blutuntersuchungen einer Vielzahl von Probanden. Siehe hierzu auch [12], [13], [10] und [14].

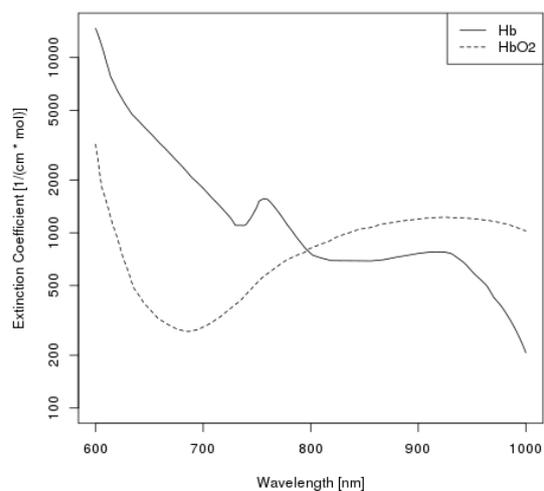


Abb. 11: Logarithmische Darstellung der Extinktionskoeffizienten von ungesättigtem und mit Sauerstoff gesättigtem Hämoglobin (Datenpunkte aus [15], vgl. auch [4]).

Der technische Hintergrund, warum sich aus den Absorptionsraten zu den beiden eingestrahlten Lichtwellenlängen auf die prozentuale Sauerstoffsättigung schließen lässt, wird u.a. näher in [4] oder [12] dargelegt. In [4] wird auch diskutiert, wie sich dieser Hintergrund im Unterricht behandeln lässt.

2.4. Anwenden - Problemstellungen zur Festigung und Vertiefung des Erlernten

Es sind verschiedene Problemstellungen vorstellbar, die das Erlernte anwenden und vertiefen. Eine Auswahl wird in [4] gegeben. Beispielsweise bieten sich kontextorientierte Aufgabenstellungen zu Einflussfaktoren auf die Messung an: Welche Auswirkung auf das Messergebnis haben etwa starkes Umgebungslicht oder ein Nagellack am untersuchten Finger? Die Schülerinnen und Schüler stellen hierzu wieder zunächst Hypothesen auf, kommunizieren diese fachgerecht und überprüfen das Formulierte anschließend im Experiment.

Die Jugendlichen sollten in der Anwendung des Erlernten jedoch nicht nur experimentell arbeiten, sondern im Hinblick auf einen möglichst breiten Kompetenzgewinn auch mit Diagrammen und Visualisierungen im Allgemeinen (vgl. [4]). Weiterhin sind Aufgabenstellungen mit Bewertungscharakter vorstellbar. Ein Beispiel hierzu, das das über die Funktionsprinzipien gewonnene Verständnis mit dem Kontext Höhenbergsteigen verknüpft, findet sich ebenfalls in [4].

3. Zusammenfassung und Ausblick

Die Behandlung des Verfahrens der Pulsoximetrie im Physikunterricht bietet sowohl einen authentischen Kontext anhand moderner Sensorik als auch eine abwechslungsreiche Anknüpfung an die in den Lehrplänen standardmäßig vorgesehenen Inhalte (etwa zur Atomphysik). Durch ein geeignetes Anleiten des Entdeckensprozesses lässt sich der Unterricht zur Pulsoximetrie gewinnbringend als „guided discovery oriented learning“ umsetzen. Entsprechend ausgewählte Problemstellungen zur Festigung des Erlernten runden das Unterrichtskonzept ab.

Unterrichtsmaterialien zur Pulsoximetrie wurden im gymnasialen Unterricht in Bayern in den Sekundarstufen I und II unter anderem von einem der Autoren (mit positiven Rückmeldungen der Schülerinnen und Schülern) eingesetzt. Dabei schätzten die Jugendlichen insbesondere auch den medizinischen Kontext und das experimentelle Arbeiten.

4. Literatur

[1] KUHN, JOCHEN ; MÜLLER, ANDREAS: Context-based science education by newspaper story problems: A study on motivation and

- learning effects. In: *Perspectives in Science* Bd. 2 (2014), Nr. 1, S. 5–21.
- [2] BENNETT, JUDITH ; LUBBEN, FRED ; HOGARTH, SYLVIA: Bringing science to life: A synthesis of the research evidence on the effects of context-based and STS approaches to science teaching. In: *Science Education* Bd. 91 (2007), Nr. 3, S. 347–370.
- [3] DUIT, REINDERS ; MIKELSKIS-SEIFERT, SILKE ; WODZINSKI, CHRISTOPH T.: Physics in context—a program for improving physics instruction in Germany. In: *Contributions from science education research* : Springer, 2007. S. 119–130.
- [4] STORCK, TIM ; GIRWIDZ, RAIMUND: Pulsoximetrie im Physikunterricht. In: *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* Bd. 1 (2016), Nr. 15, S. 1–13.
- [5] GIRWIDZ, RAIMUND: Sensoren: Physik erleben, verstehen und anwenden: Chancen und Perspektiven für den Unterricht. In: *Unterricht Physik* Bd. 17 (2006), Nr. 91.
- [6] KUHN, JOCHEN ; VOGT, PATRIK: Applications and examples of experiments with mobile phones and smartphones in physics lessons. In: *Frontiers in Sensors (FS)* Bd. 1 (2013), Nr. 4, S. 67–73.
- [7] KUHN, JOCHEN: Relevant information about using a mobile phone acceleration sensor in physics experiments. In: *American Journal of Physics* Bd. 82 (2014), Nr. 2, S. 94–94.
- [8] STORCK, TIM ; GIRWIDZ, RAIMUND: Pulsoximetrie als Alltagskontext für entdeckendes Lernen. In: BERNHOLT, S. (Hrsg.): *Heterogenität und Diversität - Vielfalt der Voraussetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Bremen 2014*. Kiel : IPN, 2015. S. 651–653.
- [9] CLARK, SUSANNE A.: Normal Oxygen Transport. In: WEBSTER, J. G. (Hrsg.): *Design of pulse oximeters, Series in Medical Physics and Biomedical Engineering* : CRC Press, 1997. S. 1–12.
- [10] WIEBEN, OLIVER: Light Absorbance in Pulse Oximetry. In: WEBSTER, J. G. (Hrsg.): *Design of pulse oximeters, Series in Medical Physics and Biomedical Engineering* : CRC Press, 1997. S. 40–55.
- [11] *Beer's Law Lab - Solute, Solvent, Solutions - PhET*. URL <https://phet.colorado.edu/en/simulation/beer-law-lab>. - abgerufen am 07.09.2015.
- [12] KÄSTLE, SIEGFRIED ; NOLLER, FRIEDEMANN ; FALK, SIEGFRIED ; BUKTA, ANTON ; MAYER, EBERHARD ; MILLER, DIETMAR: A new family of sensors for

- pulse oximetry. In: *HEWLETT PACKARD JOURNAL* Bd. 48 (1997), S. 39–47.
- [13] NITZAN, MEIR ; ROMEM, AYAL ; KOPPEL, ROBERT: Pulse oximetry: fundamentals and technology update. In: *Medical devices (Auckland, NZ)* Bd. 7 (2014), S. 231.
- [14] SCHOWALTER, JEFFREY S.: Calibration. In: WEBSTER, J. G. (Hrsg.): *Design of pulse oximeters, Series in Medical Physics and Biomedical Engineering* : CRC Press, 1997. S. 159–175.
- [15] PRAHL, SCOTT ; OTHERS: *Tabulated molar extinction coefficient for hemoglobin in water*. URL <http://omlc.org/spectra/hemoglobin/summary.html>. - abgerufen am 07.09.2015.