

Pulsoximetrie im Physikunterricht

Ein Unterrichtskonzept zur Sensorik

Pulsoximetry in physics education

A teaching concept using sensors

Tim Storck*, Raimund Girwidz*

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

(Eingegangen: 14.09.2015; Angenommen: 20.02.2016)

Kurzfassung

Sensoren erschließen authentische Kontexte zu verschiedenen Themen und Basiskonzepten des Physikunterrichts. Sie ermöglichen darüber hinaus das Einüben naturwissenschaftlicher Arbeitsweisen. Lernende können Hypothesen über elementare physikalische Wirkprinzipien der betrachteten Sensoren entwickeln und diese mit Hilfe einfacher Experimente überprüfen. Der vorliegende Beitrag betrachtet die Bestimmung der partiellen Sauerstoffsättigung im menschlichen Blut mit einem Pulsoximeter. Als Sensoren dienen einfache Fingerpulsoximetrie-Geräte. Messverfahren und geeignete Geräte für den Physikunterricht werden beschrieben und ein unterrichtliches Vorgehen wird skizziert. Nach einer kurzen Sequenz zum medizinisch-biologischen Hintergrund erarbeiten die Lernenden in dem vorgestellten Unterrichtskonzept mit Hilfe einfacher Experimente die physikalische Funktionsweise eines Pulsoximeters. Zur Vertiefung und Festigung überprüfen die Jugendlichen Hypothesen, die sie zuvor unter Verwendung des Erlernten aufgestellt haben. Dabei werden speziell auch Störeinflüsse und Grenzen des Messverfahrens untersucht. Schließlich vertiefen die Schülerinnen und Schüler den Erkenntnisgewinn mit Aufgaben zu Abbildungen und Diagrammen und bewerten anhand kontextorientierter Anwendungsaufgaben insbesondere die Eignung des pulsoximetrischen Messverfahrens für das Höhenbergsteigen. Fachspezifische Darstellungsformen und Diskussionen fördern den Kompetenzbereich Kommunikation.

Abstract

The use of real-life sensors allows connecting learning with authentic contexts in high school physics. Active learning of scientific skills is encouraged. Students build hypotheses about the elementary physics employed in the considered sensors and test these hypotheses by conducting basic experiments. This work examines the determination of the partial oxygen saturation in the human blood flow with the help of a pulse oximetry sensor. Basic finger pulse oximetry devices serve as sensors. Measurement processes as well as devices adequate for teaching physics are described and an educational framework is outlined. The educational concept we present starts with a brief sequence on the medical-biological background. Next, the students use elementary experiments to develop an understanding of the physical functionality of a pulse oximetry device. Subsequently, for consolidation and further in-depth insights the students test hypotheses established beforehand on the basis of the newly acquired knowledge. Thereby, interference factors and the limitations of the given measurement process are brought into focus. Finally, students deepen their knowledge by working on problems employing various representational forms; problems utilizing the given context help students to assess the adequateness of the pulse oximetry measurement process with regard to high-altitude climbing. Furthermore, the presented framework fosters students' communication skills.

1. Einführung

Die zeitnahe Messung der Sauerstoffversorgung ist für viele physiologische Fragestellungen in der Notfall- und der Sportmedizin wichtig. Für die Praxis interessant ist vor allem die nicht-invasive Messung der partiellen Sauerstoffsättigung im Blut mit Hilfe

von Pulsoximetrie-Geräten (siehe Abb. 1). Die Preise für einfache Fingerpulsoximeter liegen unter 30 Euro, und damit ist auch ein Einsatz im Schulunterricht gut möglich.

Das Messprinzip basiert zum einen auf der pulsierenden Ausdehnung der Arterien und zum anderen

auf dem Absorptionsverhalten des roten Blutfarbstoffs Hämoglobin. Für mit Sauerstoff gesättigtes Hämoglobin (HbO_2) ist der Extinktionskoeffizient für Licht der Wellenlängen unterhalb von 800 nm kleiner als für ungesättigtes Hämoglobin (Hb); bei Wellenlängen oberhalb von 800 nm verhält es sich umgekehrt (siehe Abb. 5).



Abb.1: Fingerpulsoximeter mit Tablett als Rechen- und Anzeigeeinheit [1].

Nach grundlegenden Anmerkungen zur Kontextorientierung werden nachfolgend einige physikalische Hintergründe zur Messtechnik erläutert. Dabei wird auch deutlich, dass dieses Thema durchaus einige didaktische Herausforderungen für die elementarisierte Behandlung im Unterricht beinhaltet. Daher werden Einsatzmöglichkeiten für den Unterricht der Sekundarstufen I und II dargestellt.

2. Aktualität und Kontextorientierung

Seit den Arbeiten von Brown, Collins und Duguid [2] hat sich „situated learning“ als ein Ansatz etabliert, mit dem theoretisches Lernen im Schulunterricht mit konkreter Anwendung in realen Situationen verknüpft wird. Intendiert ist, anwendbares und nicht träges Wissen aufzubauen [3]. (Mandl & Kopp stellen fest: „Little has changed since A. N. Whitehead wrote this over 75 years ago“ [4].) Lernende sollen einen subjektiven Wert und einen praktischen Nutzen der Lerninhalte erkennen. Im günstigen Fall unterstützt ein Vernetzen mit realen Anwendungen eine effektivere Wissensstrukturierung und ein „episodisches“ Gedächtnis, durch das zuvor erlerntes Wissen besser zugänglich wird [5]. Einen kritischen Überblick zum kontextorientierten Physikunterricht geben Kuhn, Müller, Müller & Vogt [6] und Bennett, Lubben & Hogarth [7]. Mit Hilfe eines modifizierten Anchored-Instruction-Ansatzes konnten über attitudinale bzw. motivational-affektive Effekte hinausgehend auch positive Wirkungen bezüglich Leistungsfähigkeit und Transferaufgaben erzielt werden [8], [9].

Die Bedeutung von Kontexten für den Physikunterricht wird entsprechend vielfach hervorgehoben (z. B. [10], [11], [12], [13]).

Kontexte bieten das Potenzial, Schülerinnen und Schüler für die im Unterricht behandelten Themen zu motivieren und eine positive Einstellung zu Naturwissenschaft und Technik zu erzeugen, ohne das Verständnis physikalischer Ideen zu schwächen [12]. Physiklehrkräfte in Deutschland schätzen den Einsatz von Kontexten dabei insgesamt eher positiv ein [14]. Für Schülerinnen und Schüler wiederum werden „Glaubwürdigkeit, Häufigkeit, Unmittelbarkeit und Aktualität der Erfahrung, die mit dem Kontext verbunden ist“ als wichtige Merkmale genannt [15]. Insoweit „ist davon auszugehen, dass eine angemessene, realitätsnahe Darstellungsform und Komplexität des Kontextes dazu beiträgt, seine Authentizität und damit auch Glaubwürdigkeit auf Schülerebene zu erhöhen“ [15].

Nach Herrington und Reeves wiederum lassen sich zehn Aspekte authentischer Aktivitäten benennen (vgl. [16]):

- Authentische Unterrichtsaktivitäten erweisen sich als relevant für die Erfahrungswelt außerhalb des Klassenzimmers.
- Offene Problemstellungen werden behandelt, bei denen Vorgehensweisen und Ergebnisse nicht bereits von vornherein streng festgelegt sind.
- Komplexe Untersuchungsaufgaben verlangen ein umfassendes zeitliches und intellektuelles Engagement der Lernenden.
- Problemstellungen lassen sich unter verschiedenen Blickwinkeln betrachten und mit Hilfe unterschiedlicher Ressourcen bearbeiten.
- Authentische Aktivitäten unterstützen kollaborierendes Arbeiten.
- Reflektiertes Lernen wird ermöglicht.
- Raum für vertikale Vernetzung ist gegeben, allgemeine Kompetenzen des naturwissenschaftlich-technologischen Arbeitens werden gefördert.
- Authentische Aktivitäten verlangen ganz selbstverständlich Bewertungen, wie sie die reale Lebenswelt mit sich bringt.
- Der Wert der Arbeiten ergibt sich von der Sache her und liegt nicht nur in einem Übungseffekt.
- Die Aufgabenstellungen lassen unterschiedliche Ergebnisse mit konkurrierenden Lösungswegen zu.

In [6] weisen Kuhn, Müller, Müller & Vogt auf die verschiedenen Aspekte und Facetten einer Kontextorientierung hin. Neben einer thematischen Kontextorientierung wird in der Literatur auch eine materielle Kontextorientierung diskutiert [17], [18], [19], [20].

Das vorgestellte Unterrichtskonzept (vgl. auch [1]) nutzt sowohl fachsystematisch-kontextorientierte als auch kontextstrukturierte Elemente (vgl. auch [14]). Die Kontextorientierung führt darüber hinaus zu einem Üben der Erkenntnismethoden (z. B. Experimentieren) der Physik [21].

Mit Sensoren lässt sich die Physik in Anwendungen verankern [22]. Bezüge zu Technologien des Alltags werden nutzbar, und im Sinne einer horizontalen Vernetzung lässt sich an Bereiche wie Biophysik oder Medizin anknüpfen. Das ansonsten nur theoretische physikalische Wissen erhält Praxisbezug und physikalisches Denken wird bei der Behandlung praxisnaher Beispiele vertieft. Insbesondere Kontexte aus der Medizinphysik werden als geeignet angesehen, die Interessen der Mädchen anzusprechen [11]. Die Messung der partiellen Sauerstoffsättigung mit Hilfe von Pulsoximetrie-Geräten ist hier ein interessanter Unterrichtsgegenstand.

Pulsoximetrie-Geräte kommen mittlerweile sehr häufig zum Einsatz, und einige Jugendliche kennen die Geräte bereits aus verschiedenen Kontexten. Derartige Kontexte sind auch für die Lernenden insgesamt als interessant und relevant einzuschätzen: Überwachung der Sauerstoffsättigung im Krankenhaus vor, während und nach Operationen; Einsatz im Bergsport (Sauerstoffkontrolle bei Risikopatienten schon ab 1500 m nötig); Überwachung von Patienten während eines Krankentransports; Überwachung der Atmung beim Krankheitsbild der Schlafapnoe. In Anknüpfung an diese Beispiele aus dem medizinischen Alltag lässt sich der Kontext – wahlweise, je nach Zielgruppe – auch auf den Einsatz in der Luftfahrt oder bei Kampffjetpiloten erweitern. Zum Beispiel verlangt die amerikanische Luftfahrtbehörde, dass der Luftdruck in der Flugzeugkabine auch bei maximaler Flughöhe einen Luftdruck nicht unterschreitet, wie er natürlicherweise bei 2438 m (8000 ft) über dem Meeresspiegel herrscht. Bei Kampffjetpiloten wird die Sauerstoffsättigung im Blut gegen drohende Ohnmacht während des Flugs überwacht [23]. Hintergrund ist hier, dass mit dem Luftdruck in der Regel (z. B. ohne besondere Atmungsmaßnahmen wie Erhöhen der Atemfrequenz) auch der Sauerstoffpartialdruck p_{O_2} im Blut mit zunehmender Höhe über dem Meeresspiegel abnimmt. Ein erniedrigter Sauerstoffpartialdruck führt wiederum zu einer erniedrigten prozentualen Sauerstoffsättigung (siehe Abb. 2).

Aus dem Graph wird ersichtlich, dass – ausgehend von einer Sauerstoffsättigung nahe 100 % – eine signifikante Erniedrigung dieser erst bei einem deutlichen Abfall des Sauerstoffpartialdrucks auftritt.

Mit den genannten Kontexten als Hintergründen und mit dem in der Regel aus dem Biologieunterricht bereits verfügbaren Grundwissen zu Atem- und Blutkreisläufen ergibt sich in natürlicherweise die Fragestellung: Wie lässt sich ein Maß für die Sauerstoffsättigung des Bluts ohne direkten Eingriff in den Körper mit Hilfe eines Pulsoximeters ermitteln?

Trotz der im Detail komplexen Technik der Geräte sind die elementaren Grundprinzipien bereits in der Sekundarstufe I gut verstehbar. In der Sekundarstufe II sind darüber hinaus interessante Erweiterungen denkbar.

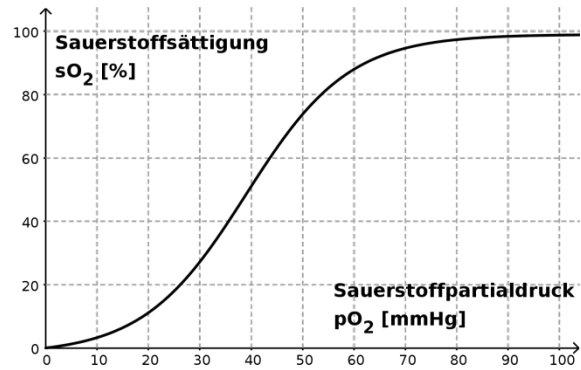


Abb. 2: Schematischer Verlauf der Abhängigkeit der partiellen Sauerstoffsättigung s_{O_2} vom Sauerstoffpartialdruck p_{O_2} nach [24]. Der individuelle Kurvenverlauf ist von verschiedenen Faktoren (z. B. pH-Wert, Temperatur, CO_2 -Konzentration) abhängig.

3. Physikalisch-technologischer Hintergrund

Die prozentuale Sauerstoffsättigung im Blut wird je nach Messverfahren unterschiedlich ermittelt. Einige in der medizinischen Praxis übliche Bezeichnungen und Verfahren sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Bezeichnung	Berechnung	Beschreibung
s_{O_2}	$\frac{c(HbO_2)}{c(Hb_{gesamt})}$	Verhältnis der Konzentration des mit Sauerstoff gesättigten Hämoglobins zu der Summe der Konzentrationen aller im Blut vorhandenen Hämoglobinderivate.
S_aO_2	$\frac{c(HbO_2)}{c(HbO_2) + c(Hb)}$	Im Nenner wird lediglich mit Sauerstoff gesättigtes Hämoglobin sowie ungesättigtes Hämoglobin berücksichtigt. Letzteres kann Sauerstoff aufnehmen. Man spricht von partieller Sauerstoffsättigung. Der Index a steht für die Messung im arteriellen Blut.
S_pO_2	$\frac{c(HbO_2)}{c(HbO_2) + c(Hb)}$	Wie bei S_aO_2 , jedoch mit Index p für die Messung mit einem Pulsoximetrie-Gerät.

Tab. 1: Verschiedene Sauerstoffsättigungsbegriffe

Pulsoximetrie-Geräte ermitteln die prozentuale, partielle Sauerstoffsättigung im arteriellen Blut (siehe Tabelle 1):

$$S_p O_2 = \frac{c(HbO_2)}{c(HbO_2)+c(Hb)} \quad \{1\}$$

In der Berechnung wird die Konzentration des mit Sauerstoff gesättigten Hämoglobins $c(HbO_2)$ zur

Summe der Konzentrationen sowohl des mit Sauerstoff gesättigten als auch des ungesättigten (reduzierten) Hämoglobins $c(\text{Hb})$ ins Verhältnis gesetzt. Gesättigtes Hämoglobin entsteht durch Binden von vier Sauerstoffmolekülen (nicht ganz konsequent ist daher die übliche Bezeichnung HbO_2 , siehe Abb. 3). Das reduzierte Hämoglobin ist in der Lage Sauerstoffmoleküle zu binden, während andere Hämoglobinderivate wie COHb oder MetHb (oxidiertes Hämoglobin) keine Bindung von Sauerstoff erlauben und als dysfunktional bezeichnet werden.

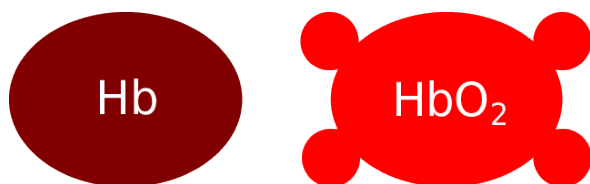


Abb. 3: Elementarisierte Darstellung des Blutfarbstoffs Hämoglobin mit und ohne Sauerstoffsättigung. Jedes Hämoglobinmolekül kann vier O_2 -Moleküle binden.

Da im Formelausdruck {1} nicht alle im Blut vorhandenen Hämoglobinderivate berücksichtigt werden, spricht man von partieller Sauerstoffsättigung.

Entscheidend für das Messverfahren ist zum einen, dass der überwiegende Anteil des Sauerstoffs im Blut an das Hämoglobin gebunden ist (typischerweise mehr als 98 % [24]) und zum anderen, dass die dysfunktionalen Hämoglobinderivate nur einen geringfügigen und konstanten Anteil am Gesamthämoglobin ausmachen. Beide Voraussetzungen sind in der Regel erfüllt. Allerdings kann – aufgrund der 210-fachen Bindungsaffinität des Kohlenstoffmonoxids relativ zu Sauerstoff an Hämoglobin – bei Rauchern oder Personen in Tiefgaragen oder KFZ-Tunneln das Derivat COHb im Blut signifikant erhöht sein und die pulsoximetrische Messung stören [25], [26]. Einige Pulsoximetrie-Geräte begegnen dieser Problematik, indem mehr als zwei, passend zu den Extinktionskoeffizienten der verschiedenen Hämoglobinderivate im Blut gewählte Lichtwellenlängen genutzt werden, um die prozentualen Anteile der Derivate zu erkennen. Derartige Geräte sind nur vereinzelt am Markt vertreten; die allermeisten Geräte nutzen stattdessen lediglich zwei LEDs [26].

Genauere Messungen der Sauerstoffsättigung $s\text{O}_2$ und $S_a\text{O}_2$ gelingen durch Blutentnahme und mit Hilfe photospektrometrischer Untersuchung. Die Abweichungen von $S_a\text{O}_2$ (gemessen als Standardabweichung bei Normalverteilungsannahme) zum pulsoximetrisch erhobenen Wert $S_p\text{O}_2$ betragen bei gesunden Menschen unter kontrollierten Bedingungen oberhalb einer Sättigung von 70 % in der Regel weniger als 2 % [26]. Diese Bedingungen werden auch für die Kalibrierung der Geräte an gesunden Probanden verwendet (zur Kalibrierung siehe auch das Ende dieses Abschnitts). Für kranke Patienten

nimmt die Genauigkeit der Pulsoximetrie-Geräte allerdings ab: bei Einzelmessungen ist im Sättigungsbereich zwischen 80 % und 100 % von einer Genauigkeit von lediglich 3-4 % auszugehen. Trotz dieser für kritische Bereiche geringen Präzision erweisen sich Pulsoximeter in der Praxis als hilfreich, da sie in der Lage sind, rasche Abfälle in der Sättigung zu detektieren [26].

Gesättigtes und nicht gesättigtes Hämoglobin absorbieren Licht verschiedener Wellenlängen unterschiedlich stark (besonders bei 660 nm und 940 nm). Dieser Umstand wird in Pulsoximetrie-Geräten genutzt. Die Geräte messen dazu oft an der Fingerkuppe oder am Ohrläppchen. Dabei wird entweder das transmittierte oder das reflektierte Signal gemessen. Gegenstand dieses Artikels sind die Geräte für die Transmissionsmessung an Fingerkuppen (siehe Abb. 1 und 4).

Eine Mehrzahl der Geräte nutzt zwei verschiedene LEDs, deren Peak-Wellenlängen nahe 660 nm bzw. 940 nm liegen (siehe Abb. 5).

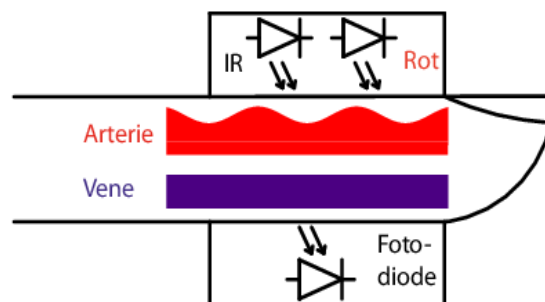


Abb. 4: Fingerpulsoximeter – die Fotodiode misst abwechselnd die transmittierten Signalstärken der beiden LEDs. Schaltskizze: Siehe Abb. 10

Die Wellenlängen sind so gewählt, dass sich die Absorptionsraten bei HbO_2 und Hb möglichst stark unterscheiden und die Kurven der Absorptionsraten in Abhängigkeit von der Wellenlänge im Mittel vergleichsweise flach verlaufen [25]. So wird die Messung relativ unempfindlich gegen Störungen durch Umgebungslicht, Durchblutungsstärke und leichte Abweichungen des Lichts von der optimalen Wellenlänge (etwa durch Temperaturerhöhung aufgrund des Vorwärtsstroms durch die LED); es können übliche LEDs mit einer spektralen Bandbreite von 20 nm bis 60 nm verwendet werden [27]. Bei derartiger Wahl der Wellenlängen der LEDs lässt sich durch Messen der Absorptionsraten im arteriellen Blut bei verschiedenen Lichtwellenlängen und anschließender Verhältnisbildung die partielle Sauerstoffsättigung abschätzen.

Die LEDs werden hierzu abwechselnd angeschaltet und die durch die Fingerkuppe transmittierte Signalstärke wird (als Stromstärke) mit Hilfe einer Fotodiode gemessen. Das regelmäßige Pulsieren der Arterien wird dabei ausgenutzt, um die Absorption durch das arterielle Blut aus dem Signal festzustellen:

Durch den periodischen Herzschlag dehnen sich die arteriellen Adern regelmäßig aus und ziehen sich anschließend wieder zusammen.

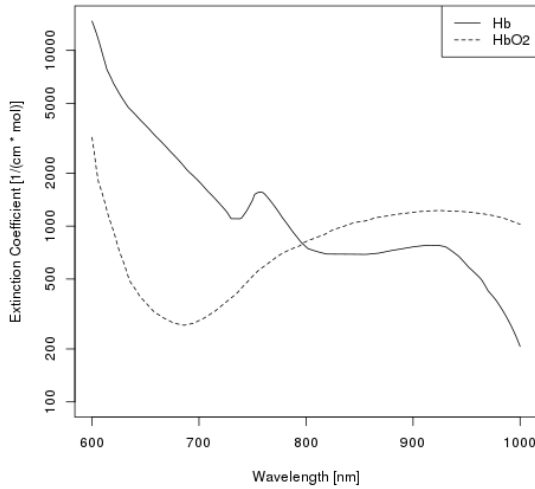


Abb. 5: Extinktionskoeffizienten von HbO₂ und Hb, logarithmisch aufgetragen gegen verschiedene Wellenlängen (Datenpunkte aus [28]). Bei gegebener Konzentration und Lichtweglänge ist die Absorptionsrate für jede Wellenlänge direkt proportional zum Extinktionskoeffizienten.

Die anderen Bestandteile des Fingers wie das Gewebe oder die venösen Adern zeigen dieses Verhalten nicht (bzw. lediglich in vernachlässigbarer Weise). Durch Messungen mit einer ausreichend hohen Signalfrequenz (in der Regel zwischen 200 Hz und 2 kHz, [29]) kann nun der Unterschied in der transmittierten Signalstärke bei maximaler und minimaler arterieller Ausdehnung ermittelt werden.

Bei Annahme der Gültigkeit des Gesetzes von Lambert-Beer lässt sich so die Absorption rein durch arterielles Blut ermitteln. Zunächst gilt ganz allgemein unabhängig vom Sachverhalt im Finger für die Intensität I_1 monochromatischen Lichts nach Durchgang durch ein Medium mit Extinktionskoeffizient $\epsilon(\lambda)$, der Farbstoffkonzentration c und der Lichtweglänge d durch das Medium:

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

I_0 ist die emittierte Intensität vor der Absorption durch das Medium. Bei Kombination zweier verschiedener Medien 1 und 2 ergibt sich:

$$\begin{aligned} I &= I_0 \cdot e^{-[\epsilon_1(\lambda) \cdot c_1 \cdot d_1 + \epsilon_2(\lambda) \cdot c_2 \cdot d_2]} \\ &= I_1 \cdot e^{-\epsilon_2(\lambda) \cdot c_2 \cdot d_2} \end{aligned} \quad \{3\}$$

Dabei ist I_1 die transmittierte Intensität durch das Medium 1. Dies lässt sich entsprechend auf Kombinationen einer höheren Anzahl von Medien verallgemeinern.

Eine entsprechende Anwendung auf die Absorption durch die pulsierende Arterie ergibt bei maximaler Ausdehnung:

$$I = I_1 \cdot e^{-[\epsilon_1(\lambda) \cdot c_1 + \epsilon_2(\lambda) \cdot c_2] \cdot d} \quad \{4\}$$

Dabei ist I_1 die transmittierte Intensität bei minimaler Ausdehnung der arteriellen Adern, also das Produkt der transmittierten Intensitäten durch die verschiedenen Blut- und Gewebeanteile mit ihren individuellen Extinktionskoeffizienten, Konzentrationen und Lichtweglängen. Der zweite Faktor im Formel Ausdruck {4} rechnet um auf die transmittierte Intensität durch das arterielle Blut, das bei maximaler Aderausdehnung als Medium zusätzlich absorbierend wirkt.

ϵ_1 und c_1 bzw. ϵ_2 und c_2 stehen für die Extinktionskoeffizienten und Konzentrationen der Farbstoffe Hb bzw. HbO₂ und d steht für den Unterschied in der Lichtweglänge zwischen maximal und minimal ausgedehnten arteriellen Adern.

Daraus erhält man die Absorptionsrate bei gegebener Lichtwellenlänge λ :

$$A = -\ln\left(\frac{I}{I_1}\right) = [\epsilon_1(\lambda) \cdot c_1 + \epsilon_2(\lambda) \cdot c_2] \cdot d \quad \{5\}$$

Der in d absorbierte Anteil macht nicht mehr als 1 %-2 % des nicht oszillierenden Signalanteils aus [25]. Damit das zu messende Signal nicht im Rauschen untergeht, ist aus diesem Grund die Messapparatur am Finger von Umgebungslicht möglichst abzuschirmen. Ebenso verhindert die Messapparatur, dass das emittierte LED-Licht durch Reflektion auf die Fotodiode trifft, ohne durch den Finger zu gelangen.

Die prinzipiell unbekanntes Lichtweglänge d im gemessenen pulsierenden arteriellen Blut lässt sich über die Messung von Absorptionen bei zwei verschiedenen Wellenlängen eliminieren (vergleiche auch Abb. 6).

Dazu wird das Verhältnis zweier bei verschiedenen Wellenlängen erhobenen Absorptionsraten gebildet:

$$R = \frac{A(\lambda_1)}{A(\lambda_2)} = \frac{\epsilon_1(\lambda_1) \cdot c_1 + \epsilon_2(\lambda_1) \cdot c_2}{\epsilon_1(\lambda_2) \cdot c_1 + \epsilon_2(\lambda_2) \cdot c_2} \quad \{6\}$$

Mit Hilfe des Ausdrucks

$$S_p O_2 = \frac{c_2}{c_1 + c_2} \quad \{7\}$$

und durch geeignetes Umformen lässt sich die partielle Sauerstoffsättigung ermitteln:

$$S_p O_2 = \frac{R \cdot \epsilon_1(\lambda_2) - \epsilon_1(\lambda_1)}{R \cdot [\epsilon_1(\lambda_2) - \epsilon_2(\lambda_2)] + \epsilon_2(\lambda_1) - \epsilon_1(\lambda_1)} \quad \{8\}$$

Zu dem eben skizzierten Vorgehen ist allerdings zu bemerken, dass das Licht durch den Finger weder monochromatisch ist, noch die verschiedenen Fingerbereiche homogene Medien sind. Beispielsweise liegen die Hämoglobinmoleküle als einzelne Partikel vor, die je nach Form bzw. räumlicher Lage das eingestrahelte Licht verschieden streuen. Insgesamt ergibt sich durch Streu- und Reflexionseffekte eine vergrößerte Lichtweglänge durch das Medium. Das Gesetz von Lambert-Beer lässt sich somit genau genommen nur näherungsweise anwenden.

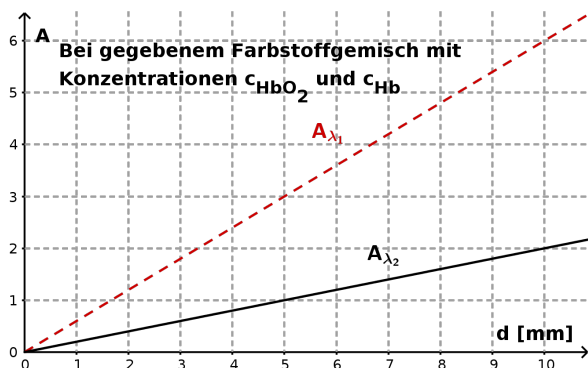


Abb. 6: Der Quotient der Absorptionsraten zu verschiedenen Wellenlängen ist unabhängig von der Lichtweglänge. (vgl. auch [1])

In der Regel werden daher die gemessenen Werte gegen kalibrierte, empirisch ermittelte Werte abgeglichen, die zum Zeitpunkt des Gerätedesigns gewonnen wurden (vgl. [26], [25], [30] und [29] und siehe Abb. 7). Die kalibrierten Werte sind in den Geräten in einer Datenbank gespeichert und werden passend zum erhaltenen Messwert vom Gerät ausgelesen und anstatt der theoretisch berechneten Werte angezeigt.

Eine Beeinträchtigung der Messqualität ist außerdem beispielsweise durch Zittern oder eine zu geringe Durchblutung (etwa bei niedrigen Umgebungstemperaturen) möglich.

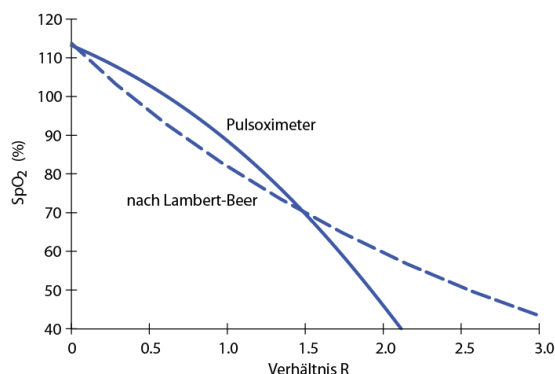


Abb. 7: Vergleich der theoretischen Kurve mit der kalibrierten Kurve eines Pulsoximeters der Firma HP (verändert nach [29]). Die kalibrierte Kurve ergibt sich aus einem mathematischen best-fit an die empirisch ermittelten Werte. Die Ordinatenwerte bei R -Werten nahe 0 sind nur von theoretischer Bedeutung.

4. Entdeckendes Lernen und Experimentieren

Auch zum entdeckenden Lernen und analytischen Denken bietet das Pulsoximeter interessante Perspektiven: Zum einen können in Experimenten grundlegende Gesetzmäßigkeiten aufgedeckt werden, zum anderen lassen sich Anwendungen diskutieren, die Schülerinnen und Schülern aus dem Alltag bekannt sind.

Anhand des Pulsoximeters lassen sich speziell auch grundlegende Fragen und Probleme des Messens realitätsnah aufgreifen und behandeln. Kenngrößen,

Messgenauigkeit, absolute und relative Fehler, Störfaktoren, Linearitätsfehler und weitere Kennwerte lassen sich behandeln. Es geht dabei nicht nur um ein Wissen über Funktionsprinzipien, sondern auch um ein Bewusstsein über Grenzen und den Aussagewert von Messungen.

Das Arbeiten in „Learning Communities“ [31] ermöglicht das gemeinsame Experimentieren der Lernenden (z. B. das Entdecken und Überprüfen der Funktionsweise eines Sensors) innerhalb kleiner Forschergruppen. Lösungsvorschläge zu Problemstellungen werden gemeinsam entwickelt und diskutiert: Eine am Gegenstand ausgerichtete fachliche Kommunikation kann entstehen. Informationen, die von den Lernenden nicht selbstständig erarbeitet werden können, lassen sich auch über eine Internetrecherche finden (was gleichzeitig die Medienkompetenz unterstützt). Präsentationsfähigkeiten werden zusätzlich gefördert, wenn diese Informationen anderen Gruppen vorgestellt werden.

5. Pulsoximetrie im Unterricht

Der Fokus im nachfolgend dargestellten Unterrichtskonzept liegt auf dem Physikunterricht in der Sekundarstufe I. Ergänzungen für einen Unterricht in der Sekundarstufe II werden an geeigneter Stelle vorgeschlagen.

Auch aufgrund der teilweise komplexeren Hintergründe ist eine passende Auswahl und Schwerpunktsetzung nötig und sinnvoll. Bestimmte Funktionsbausteine (z. B. die Auswerteelektronik) des Geräts werden als abgeschlossene und separate Module behandelt, deren detaillierte Wirkprinzipien zunächst nicht weiter analysiert werden sollen. (Eine spätere Analyse auf einem erhöhten Leistungsniveau bietet sich gegebenenfalls an.) Die Abstraktion von momentan unerheblichen technischen Details und die Einbettung in Funktionsmodule ist ein zunehmend wichtiges Analyseinstrument in einer immer stärker modularisiert arbeitenden Technologiesgesellschaft. Man denke hier nur an den modulhaften Aufbau moderner Computer- oder Smartphone-Technologien. Oft ist es gewinnbringend auf qualitative Aussagen zu fokussieren: Erkenntnisse können dann in „je-desto“-Aussagen formuliert werden und müssen nicht weiter quantifiziert bzw. in Formel- ausdrücken betrachtet werden.

„Didaktische Reduktion“ ermöglicht dabei eine Konzentration auf die elementaren Inhalte. Anhand des Vorwissens und der Erfahrungswelt der Lernenden werden Sinn- und Verständnismodule aufgebaut, die nicht mit im Zusammenhang überfrachtenden fachlich-technischen Details belastet sind. Das untersuchte Sensormodul ist somit nicht nur physikalischer Inhalt des Unterrichts, sondern kann auch selbst als Teil einer größeren physikalisch-technologischen Lerneinheit begriffen werden.

Je nach Schwerpunktsetzung durch die Lehrkraft liegt die für die Lernumgebung benötigte Zeit zwi-

schen zwei und sechs Unterrichtsstunden. Im ersten Fall wird der Fokus gezielt auf einzelne Komponenten der vorgestellten Lernumgebung gesetzt, die im Unterricht schülerzentriert mit Experimenten bearbeitet werden, während andere in diesem Artikel diskutierte Komponenten eher in den Hintergrund rücken und – in stärker elementarisierter Form – vornehmlich mit Blick auf die Kompetenz Fachwissen nur kurz behandelt werden. Eine sechsstündige Umsetzung des Konzepts wiederum ermöglicht die Lernumgebung im Rahmen eines konsequenten *Guided-Discovery*-Prozesses zu nutzen. Dabei lassen sich die wichtigen Elemente und Anwendungsfragen mit Hilfe des Aufstellens und Überprüfens von Hypothesen schülerzentriert erarbeiten.

5.1. Kontext

Zunächst sollte mit Hilfe eines der medizinisch-physikalischen Praxisbeispiele, wie sie oben bereits vorgestellt wurden, ein für die Schülerinnen und Schüler spannender Kontext aufgezeigt werden. Anhand dieses Kontexts werden die aus der Biologie bekannten grundsätzlichen Funktionsweisen der Blut- und Atmungskreisläufe kurz wiederholt. Das benötigte Vorwissen lässt sich wie folgt komprimiert zusammenfassen: Die Organe müssen kontinuierlich mit Sauerstoff versorgt werden; das Herz pumpt sauerstoffreiches Blut durch die Arterien zu den Organen; die Arterien, nicht jedoch die Venen, dehnen sich mit dem Pulsschlag regelmäßig merklich aus; im Blut wird Sauerstoff für den Transport an Hämoglobin gebunden; der prozentuale Anteil des mit Sauerstoff gesättigten Hämoglobins am mit Sauerstoff gesättigten und ungesättigten Hämoglobin (partielle Sauerstoffsättigung) ist ein Maß für die aktuelle Versorgung mit Sauerstoff. Gegebenenfalls wird auf die Fachbegriffe Arterien und Venen verzichtet; die Modellvorstellung der sich mit dem Pulsschlag ausdehnenden, Blut transportierenden Adern reicht als Vereinfachung notfalls aus. Ebenfalls kann vereinfachend von Blutteilchen, die Sauerstoffteilchen aufnehmen und abgeben, anstatt von Hämoglobin gesprochen werden.

Mögliche Erweiterungen für die Sekundarstufe II

Als Mathematisierung wird zur Berechnung des Prozentwerts der partiellen Sauerstoffsättigung auf den Formelausdruck

$$S_p O_2 = \frac{c(\text{HbO}_2)}{c(\text{HbO}_2) + c(\text{Hb})} \quad \{9\}$$

und die Bedeutung der Größe Konzentration explizit eingegangen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, im Zusammenhang mit dem gewählten Kontext auf die (sigmoidale) Abhängigkeit der partiellen Sauerstoffsättigung vom Sauerstoffpartialdruck einzugehen (siehe Abb. 2).

Dabei kann auch auf weitere, den Zusammenhang bestimmende Faktoren (z. B. pH-Wert, Temperatur) hingewiesen werden. Zusätzlich vernetzend wirken Anwendungsaufgaben, die den Sauerstoffpartial-

druck zur Höhe über dem Meeresspiegel in Beziehung setzen (siehe hierzu auch 5.4.3 unten).

5.2. Erkennen der Gerätefunktionen

Als technische Umsetzung einer nicht-invasiven und zeitnahen Messung der partiellen Sauerstoffversorgung werden einfache Fingerpulsoximeter vorgestellt und ausprobiert. Die Lernenden klären, wenn möglich eigenständig, die Bedeutung der auf dem Gerätedisplay angezeigten Werte für Pulsfrequenz, partielle Sauerstoffsättigung und – falls ebenfalls angezeigt – das Plethysmogramm, mit dem das regelmäßige Ausdehnen der Arterien graphisch dargestellt wird. Einige Geräte zeigen zusätzlich auch den Perfusionsindex an, dessen Bedeutung als Maß für die Durchblutung den Jugendlichen in diesem Fall mitgeteilt werden sollte. Bereits bei der einführenden Unterrichtssequenz mit Hilfe des Kontexts ist anhand der Abb. 2 deutlich geworden, dass die partielle Sauerstoffsättigung in der Regel nur in größeren Höhen oder extremen Fällen Werte unterhalb von 90 % annimmt. Bei (gemäßigten) Aktivitäten im Klassenzimmer sind keine starken Schwankungen in den von den Geräten angezeigten Sättigungswerten zu erwarten, die nicht auf Fehlmessungen beruhen. Die angezeigten Pulswerte wiederum steigen naturgemäß bei körperlichen Aktivitäten an; entsprechend lassen sich die angezeigten Werte für Puls und Sättigung unterscheiden.

5.3. Verstehen des Messprinzips

Bei näherem Betrachten der Messapparatur erkennen die Schülerinnen und Schüler die (blinkende) rote LED, deren Licht durch den Finger gestrahlt wird (siehe Abb. 8).



Abb. 8: Rote LED auf einer Innenseite der Messapparatur.

Dies leitet hin zum Erkennen der Fotodiode auf der gegenüberliegenden Seite der Messapparatur als Empfangseinheit für das von der LED ausgesendete Signal. Hieraus resultiert eine erste grundsätzliche, noch unpräzise Erkenntnis zum Messprinzip: Das Pulsoximeter misst, wie viel des eingestrahelten Lichts im Finger absorbiert wird.

Der genaue Zusammenhang zur Messung der partiellen Sauerstoffsättigung bleibt an dieser Stelle noch unklar. Gegebenenfalls stellen einige Lernende bereits weiterführende Untersuchungsfragen: Wird das Licht nicht durch das gesamte Fingergewebe absorbiert und nicht nur durch das Blut? Kann das Licht

denn durch den Knochen dringen? Diese Problemstellungen können im weiteren Unterrichtsverlauf als Ankerpunkte dienen.

5.3.1. Gesetz von Lambert-Beer

Als Nächstes wird erarbeitet, wie sich Stoffkonzentrationen in Flüssigkeiten physikalisch bestimmen lassen. Mit Hilfe einer selbstgebauten Spektrometerapparatur (siehe Abb. 9) mit schwarzen Wänden wird LED-Licht durch eine mit Farbstofflösung befüllte Kunststoff-Küvette auf eine Fotodiode gestrahlt (Schaltpläne in Abb. 10).

Die Apparatur in der Abbildung ist für drei hintereinander platzierte Küvetten der Dicke 10 mm ausgelegt, da eine solche Anordnung im weiteren Unterrichtsverlauf benötigt wird. Im beschriebenen ersten Versuch ist allerdings nur eine Küvette von Bedeutung; die beiden anderen Küvetten werden deshalb mit destilliertem Wasser befüllt und in der Messvorrichtung platziert: sie stören die Messung nicht weiter.



Abb. 9: Die Küvetten (im Bild noch außerhalb der Spektrometerapparatur stehend) werden in der Apparatur von links mit dem Licht einer LED durchstrahlt. Die Absorption durch die rote Farbstofflösung bei verschiedenen Konzentrationen zeigt sich in der Stromstärke an der Fotodiode.



Abb. 10: Sender- und Empfängerschaltungen; Sender: z. B. mit LED TLHB850 (Vishay Semiconductors), blau, $I_F = 20\text{mA}$, $U_F = 3,9\text{V}$ oder TLHK5800 (Vishay Semiconductors), rot, $I_F = 20\text{mA}$, $U_F = 1,9\text{V}$, Empfänger: z. B. mit Fotodiode SFH203 (Osram)

Durch Feststellen der Stromstärke an der Fotodiode bei verschiedenen Konzentrationen des gleichen Farbstoffs nehmen die Lernenden das Gesetz von Lambert-Beer qualitativ wahr (siehe Abb. 11).

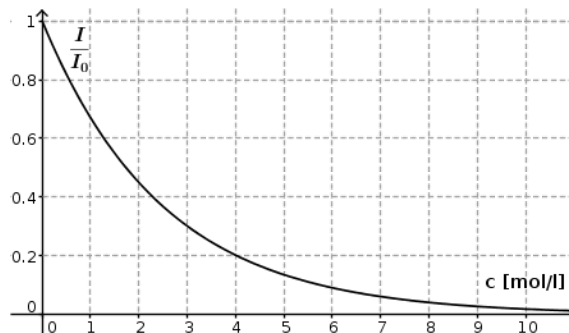


Abb. 11: Schematischer Verlauf zum Gesetz von Lambert-Beer bei konstanter Lichtweglänge und gegebenem Extinktionskoeffizienten

Für den Schülerversuch bietet sich Lebensmittelfarbstoff an, der einfach in gängigen Supermärkten erhältlich ist und in Wasser gelöst wird.

Um die Auswirkung der Lichtweglänge zu erkennen, werden nun die drei Küvetten genutzt. Es werden mehrere Küvetten gleicher Dicke anstatt einer Küvette großer Dicke verwendet, da günstige, im Laborbedarfshandel einfach erhältliche Kunststoff-Küvetten meist nur in der festen Dicke 10 mm erhältlich sind.

Mit klarem, destilliertem Wasser gefüllte Küvetten werden im Versuch schrittweise durch Küvetten mit Farbstofflösung gleicher Konzentration und gleichen Farbstoffs ersetzt. Die vier dabei jeweils an der Fotodiode erhobenen Messwerte zeigen qualitativ die Auswirkung einer zunehmenden Weglänge des Lichts durch die Farbstofflösung (siehe Abb. 12).

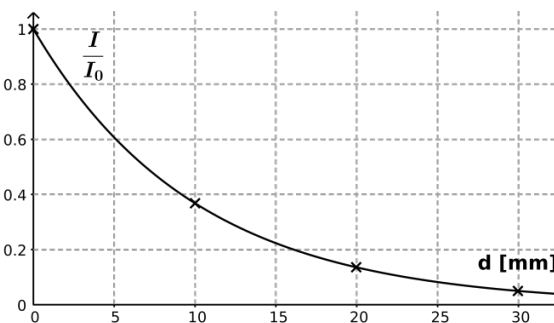


Abb. 12: Schematischer Verlauf zum Gesetz von Lambert-Beer bei konstanter Farbstoffkonzentration und gegebenem Extinktionskoeffizienten. Die vier eingezeichneten Werte entsprechen den vier Messwerten bei keiner, einer, zwei und drei mit Farbstofflösung befüllten Küvetten in der Versuchsapparatur.

Der augenscheinliche didaktische Nachteil, der durch das Arbeiten mit hintereinander platzierten Küvetten entsteht, wirkt hier – in Folge der Analogie zur tatsächlichen Messung durch das Pulsoximeter – durchaus auch vorteilhaft: Das Licht trifft bei seinem Weg durch den Finger auf verschiedene Fingerbestandteile, von denen nur einer das zu messende arterielle Blut ist.

Anschließend sollte mit verschiedenfarbig strahlenden LEDs und verschiedenen Farbstoffen experi-

mentiert werden, um die Abhängigkeit der Lichtabsorption von Farbstoff und Lichtfarbe qualitativ zu untersuchen. Ergänzend zum praktischen Experimentieren mit der oben vorgestellten Apparatur kann die online verfügbare Applikation der University of Colorado aus dem PhET-Projekt zum Gesetz von Lambert-Beer genutzt werden [32] (Abb. 13). Mit der Applikation können Schülerinnen und Schüler die Zusammenhänge (zwischen Weglänge des Lichts bzw. Farbstoffkonzentration und Absorptionsrate) auch quantitativ in einer Simulation untersuchen.

Mögliche Erweiterungen insbesondere für die Sekundarstufe II

Als Mathematisierung wird das Gesetz von Lambert-Beer quantitativ betrachtet. Der exponentielle Abfall der gemessenen Signalstärke bei zunehmender Farbstoffkonzentration oder Lichtweglänge kann anhand des Formelausdrucks bestätigt werden. Durch Logarithmusbildung gelingt der Übergang zur Absorptionsrate. So ergeben sich jeweils lineare Zusammenhänge zwischen Absorptionsrate und Farbstoffkonzentration bzw. Lichtweglänge.

5.3.2. Pulsierende Signalstärke

Als Nächstes wird der Zusammenhang zur Messung der Farbstoffkonzentrationen im Blut hergestellt. Aus dem Einführungskontext sind die unterschiedlichen Farben des sauerstoffreichen und sauerstoffarmen Bluts bereits bekannt.

Um die Absorption durch das arterielle Blut von der übrigen Absorption durch den Finger abzugrenzen, muss ein geeignetes Messverfahren entwickelt werden. Die vom Gerät angezeigte Pulsfrequenz und – falls vorhanden – auch das angezeigte Plethysmogramm geben den entscheidenden Hinweis: Die Ausdehnung der Arterien wechselt periodisch. Dadurch lässt sich ein Signalanteil in der Fotostromstärke ausmachen, der nur durch die Absorption in den Arterien bestimmt ist (siehe Abb. 14). Als Analogieversuch kann die bereits zuvor benutzte Spektrometer-Apparatur für mehrere Küvetten genutzt werden (siehe Abb. 9). Eine der mit Farbstofflösungen befüllten Küvetten wird in die Apparatur periodisch eingesetzt, wieder herausgenommen und dabei durch eine „neutrale“ Küvette mit destilliertem Wasser ersetzt. Dann sind abwechselnd größere und kleinere Signalstärken zu messen. Werden zwei Küvetten mit roter Lösung des gleichen Farbstoffs und gleicher Konzentration und eine Küvette mit einer weiteren, andersfarbigen Lösung verwendet, verstärkt sich zusätzlich die Analogie zur Situation im Finger, bei der auch im nicht ausgedehnten Zustand der Ader arterielles Blut durchstrahlt wird (siehe Abb. 14). Eine der beiden direkt hintereinander platzierten, identisch befüllten Küvetten wird dann periodisch durch die mit destilliertem Wasser befüllte Küvette ersetzt. Ein weiterer Analogieversuch gelingt mit Wasser in einem durchsichtigen, quaderförmigen Becken: Wird das Wasser perio-

disch angeregt, sodass der Wasserspiegel in vertikaler Richtung schwingt lässt sich mit Hilfe eines an der Gefäßwand angebrachten Lineals die minimale und maximale Wasserhöhe und daraus die Höhe der Welle bestimmen.

Mögliche Erweiterungen für die Sekundarstufe II

Wurde die Absorptionsrate als Formelausdruck eingeführt, kann der Signalunterschied in linearisierter Form als Differenz der Absorptionsraten bei maximaler und minimaler Ausdehnung der Arterie verstanden werden (siehe Abb. 14).

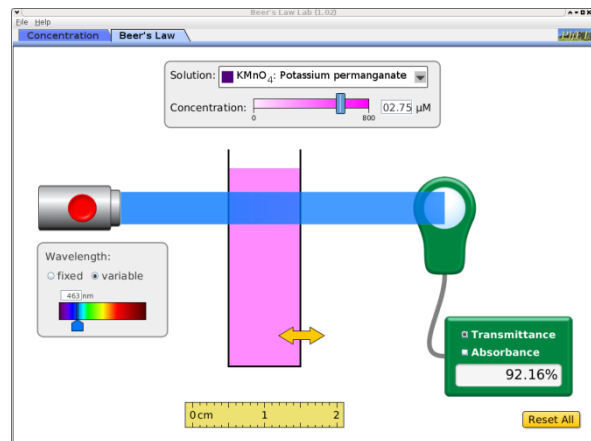


Abb. 13: PhET-Applikation der University of Colorado zum Gesetz von Lambert-Beer, verfügbar unter <https://phet.colorado.edu/en/simulation/beers-law-lab> [32]

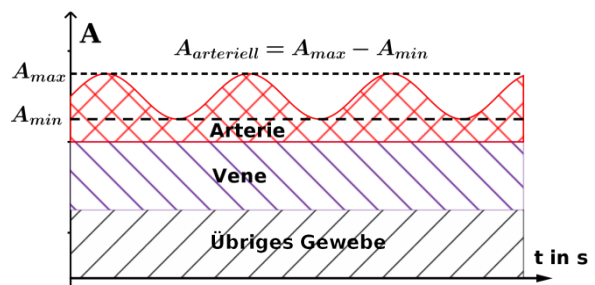


Abb. 14: Absorptionsrate des arteriellen Bluts als Differenz maximal und minimal gemessener Absorptionsraten (Schemazeichnung; in der Realität beträgt der pulsierende Anteil lediglich etwa 1-2% des nicht-alternierenden Anteils [25])

5.3.3. Ermitteln der Sauerstoffsättigung aus dem arteriellen Blut

Das Messsignal für das arterielle Blut ist nun noch nach den Blutfarbstoffen, passend zu sauerstoffreichem und sauerstoffarmem Blut zu differenzieren. Als Analogieversuch eignet sich die Analyse von Blaukrautsaft, der anschließend mit Zitronen- oder Essigsäure versetzt wird. Der blaue, neutrale Blaukrautsaft steht dabei für das ungesättigte Blut, der mit Säure versetzte, dann rote Saft, für das mit Sauerstoff gesättigte Blut. Die „Säureteilchen“ stehen entsprechend für die Sauerstoffmoleküle, die vom

Hämoglobin gebunden werden. Die Herstellung von Blaukrautsaft ist einfach und der Einsatz im Unterricht unbedenklich. Für die Herstellung wird ein Teebeutel mit getrockneten und grob zerkleinerten Blaukrautblättern mit kochendem Wasser übergossen und einige Minuten ziehen gelassen. Nach ausreichender Abkühlung kann die blaue Flüssigkeit zum Experimentieren genutzt werden. Bei Bedarf kann basisches Salz zugegeben werden, um einen tiefblauen Farbstoff zu erhalten, bevor anschließend die Säure dazugegeben wird, die den Saft in hellroten Rotkohlsaft verfärbt. Ein in vielen schulischen Physik- oder Chemiesammlungen vorhandenes Spektrophotometer wie etwa das Produkt SpectroVis Plus der Firma Vernier erlaubt die Messung der Absorptionsrate in Abhängigkeit von der einfallenden Lichtwellenlänge (siehe Abb.15).



Abb. 15: Spektrophotometer der Firma Vernier

Im Falle der Messungen der Blaukraut- bzw. Rotkohllösungen ergeben sich zwei Kurven wie in Abb. 16. Anhand dieser Kurven festigen die Lernenden ihr Grundwissen über Absorption und Farben.

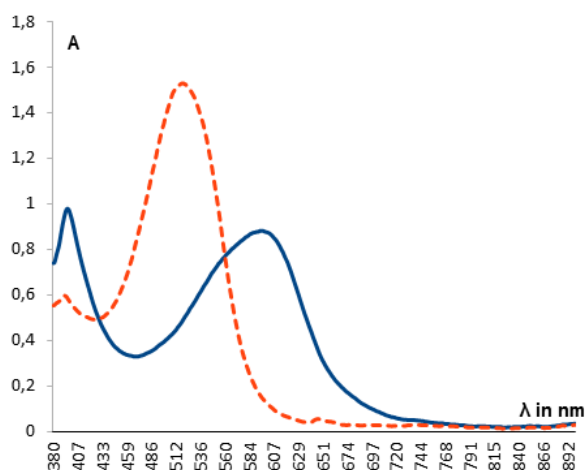


Abb. 16: Absorptionsratenkurven von neutralem Blaukraut- und saurem (gestrichelt) Rotkohlsaft, aufgenommen mit Hilfe des Spektrophotometers aus Abb. 15. (vgl. auch [1])

Aus dem Diagramm ergeben sich weiterhin Wellenlängenbereiche, an denen die Kurven der Absorptionsraten weit auseinanderliegen. Auch hier ergibt sich die Analogie zur Funktionsweise des Pulsoximeters: Derartige Bereiche werden genutzt, um aus den Absorptionsraten des arteriellen Bluts auf dessen Zusammensetzung aus den Einzelfarbstoffen rückzuschließen. Es wird dadurch deutlich, warum

in den Geräten zwei LEDs verschiedener Wellenlänge verwendet werden. Die Schülerinnen und Schüler lernen, mit Hilfe der Absorptionskurven der beiden Blutfarbstoffe HbO₂ und Hb geeignete Wellenlängen für die LEDs auszuwählen.

Mögliche Erweiterungen für die Sekundarstufe II

Anhand des prinzipiellen Verlaufs des Graphen der Absorptionsrate des arteriellen Bluts bei fester Lichtwellenlänge λ und aufgetragen gegen die Lichtweglänge d wird deutlich, dass bei unbekannter Lichtweglänge kein Rückschluss auf die verschiedenen Konzentrationen oder deren Verhältnis möglich ist (vgl. Abb. 6 mit lediglich einer Geraden). Andererseits ist die Lichtweglänge durch das im Finger gemessene arterielle Blut prinzipiell nicht erfassbar. Werden stattdessen zwei Graphen von Absorptionsraten zu unterschiedlichen Lichtwellenlängen wie in Abb. 6 in einem Diagramm dargestellt, erkennen die Jugendlichen einen konstant bleibenden Quotienten der Absorptionsraten bei variierender Lichtweglänge. Die unbekannte Lichtweglänge lässt sich eliminieren:

$$R = \frac{A(\lambda_1)}{A(\lambda_2)} = \frac{\epsilon_1(\lambda_1) \cdot c_1 + \epsilon_2(\lambda_1) \cdot c_2}{\epsilon_1(\lambda_2) \cdot c_1 + \epsilon_2(\lambda_2) \cdot c_2} \quad \{10\}$$

Durch algebraische Umformung kann theoretisch aus dem Quotienten R auf die partielle Sauerstoffsättigung geschlossen werden (siehe Kasten 1). An dieser Stelle sollte allerdings der begrenzte Wert der theoretischen Kurve für die Praxis diskutiert werden. Die höchstens näherungsweise Gültigkeit des Gesetzes von Lambert-Beer ist hier entsprechend zu thematisieren. Der Rückgriff auf kalibrierte Kurven, die in den Speicherbausteinen der Geräte abgelegt sind, wird als Lösung diskutiert (siehe Abb. 7).

Aus den zwei Ausdrücken

$$S_pO_2 = \frac{c_2}{c_1 + c_2}$$

und

$$R = \frac{A(\lambda_1)}{A(\lambda_2)} = \frac{\epsilon_1(\lambda_1) \cdot c_1 + \epsilon_2(\lambda_1) \cdot c_2}{\epsilon_1(\lambda_2) \cdot c_1 + \epsilon_2(\lambda_2) \cdot c_2}$$

lassen sich die Konzentrationen eliminieren und es ergibt sich S_pO_2 in Abhängigkeit bekannter bzw. gemessener Größen:

$$S_pO_2 = \frac{R \cdot \epsilon_1(\lambda_2) - \epsilon_1(\lambda_1)}{R \cdot [\epsilon_1(\lambda_2) - \epsilon_2(\lambda_2)] + \epsilon_2(\lambda_1) - \epsilon_1(\lambda_1)}$$

Kasten 1: Rechnerisches Ermitteln von S_pO_2 aus R .

5.4. Anwenden und Überprüfen des Wissens und Verständnisses

Im Folgenden werden einige Aufgabenstellungen vorgeschlagen, anhand derer das gewonnene Wissen und das Verständnis überprüft und gefestigt werden soll. Neben dem naturwissenschaftlichen Arbeiten und der experimentellen Kompetenz wird auch das Interpretieren von Graphen und Diagrammen eingeübt. Schließlich bearbeiten die Schülerinnen und Schüler transfer- und kontextorientierte Aufgaben,

bei denen neben Fachwissen und Erkenntnisgewinnung auch Kommunikations- und Bewertungskompetenzen betont werden.

5.4.1. Hypothesen experimentell überprüfen

Verschiedene Stoffe zwischen Finger und LED

Die Schülerinnen und Schüler stellen zunächst Hypothesen darüber auf, ob eine Pulsoximetrie-Messung auch dann möglich ist, wenn ein dünner Aluminiumstreifen zwischen Finger und LED bzw. Finger und Fotodiode gebracht wird. Die Lernenden begründen ihre Vermutungen unter Verwendung von Fachsprache. Anschließend folgt eine Prüfung mit Hilfe des Geräts. Nach Diskussion der Versuchsergebnisse und Korrektur der zuvor getätigten Vermutungen wird der Aluminiumstreifen als Nächstes durch ein teilweise lichtdurchlässiges Stofftuch oder einen auf die Haut aufgetragenen Lebensmittelfarbstoff ersetzt. Schülerinnen, die Nagellack oder künstliche Fingernägelaufsätze verwenden, können hierzu ebenfalls Hypothesen aufstellen und überprüfen.

Einfluss des Umgebungslichts

Mit Hilfe unterschiedlicher Lichtquellen (LEDs und Glühlampen verschiedener Intensität und Farbe) kann der Einfluss des Umgebungslichts an der bereits zuvor genutzten Spektrometerapparatur (siehe Abb. 9) oder auch der Fingermesseinheit des Pulsoximetrie-Geräts (siehe Abb. 1) von Schülerinnen und Schülern selbst überprüft werden. Hierzu wird im Aufbau mit der Spektrometerapparatur das Licht aus verschiedenen Winkeln und Abständen (schräg) von oben in die durchmessene Küvette eingestrahlt und der Einfluss auf die Stromstärke an der Fotodiode beobachtet (siehe Abb. 17).

Wird nun bei zunehmend starkem Lichteinfall die Sender-LED der Apparatur wiederholt ein- und ausgeschaltet, werden die relativen Stromstärkeunterschiede immer niedriger. Die Bedeutung der Seitenabdeckungen der Fingermesseinheit wird deutlich.



Abb. 17: Der Einfluss des Umgebungslichts wird mit Hilfe einer Taschenlampe untersucht.

Störungen durch Fingerbewegungen

Ebenfalls lässt sich die Empfindlichkeit der Messung gegenüber Störungen durch Fingerbewegungen untersuchen. Dazu werden beispielsweise die Zitterbewegungen von Patienten im Krankenhaus mit Hilfe rascher Fingerbewegungen simuliert. Zusätzlich kann die Stabilität der Messergebnisse beim Springen auf der Stelle oder bei anderen sportlichen Aktivitäten untersucht werden.

5.4.2. Arbeiten mit Abbildungen

Die Schülerinnen und Schüler sollen anhand verschiedener Graphen die Absorptionsraten verschiedener Farbstofflösungen betrachten und herausfinden, wie die eingesetzten Farbstoffe bei Bestrahlung mit „Tageslicht“ wirken. Die Absorptionsraten sind dabei jeweils gegen die Wellenlänge aufgetragen. Anschließend sollen für Gemische von je zwei verschiedenen Farbstoffen geeignete Wellenlängen für LEDs gefunden werden, mit denen das Verhältnis der Farbstoffkonzentrationen im Gemisch untersucht werden kann. Dieses Vorgehen ist bereits weiter oben bei dem Analogieversuch zur Pulsoximetrie mit neutralem Blaukraut- und saurem Rotkohlsaft beschrieben.

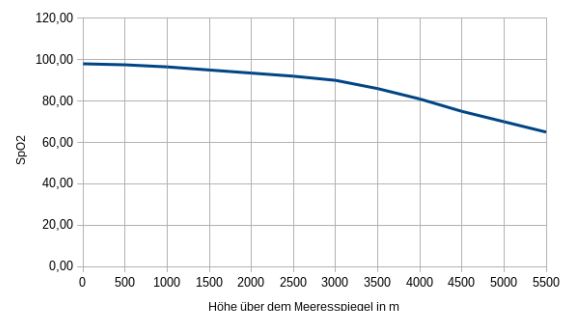
5.4.3. Kontext- und transferorientierte Aufgabenstellungen

Durch Anknüpfung an einen geeigneten medizinischen Kontext können die Jugendlichen die gesundheitliche Bedeutung einer ausreichend hohen Sauerstoffsättigung des Bluts einschätzen. Hier wird nachfolgend exemplarisch eine Aufgabe zum Höhenbergsteigen vorgestellt. Die Lernenden bewerten die Eignung des Pulsoximetrieverfahrens in großen Höhen.

Aufgabe: Eine Gruppe von Höhenbergsteigern misst bei einer mehrtägigen Bergtour jeden Abend mit einem Fingerpulsoximeter die partielle Sauerstoffsättigung. Dabei ergeben sich durchschnittlich für die verschiedenen Tage folgende Werte:

Tag	Mo	Di	Mi	Do	Fr
S_pO_2	94%	90%	86%	78%	88%

Nachstehendes Diagramm zeigt die prozentuale Sauerstoffsättigung für einen typischen Bergsteiger in verschiedenen Höhen über dem Meeresspiegel



- a) Beschreibe den ungefähren Höhenverlauf der Bergtour.
- b) Die Genauigkeit der Messergebnisse von vielen Pulsoximetrieegeräten wird dadurch erreicht, dass die angezeigten Messwerte bereits bei der Geräteentwicklung an die tatsächlich beim Menschen vorliegenden Sauerstoffsättigungswerte, die nach Blutentnahme durch genaue Messmethoden ermittelt wurden, angepasst werden. Gib einen möglichen Grund dafür an, warum der Anzeige eines Pulsoximeters in Höhen über 5000 m über dem Meeresspiegel, wenn überhaupt, nur eingeschränkt vertraut werden sollte.

Mögliche Erweiterungen für die Sekundarstufe II

Die Lernenden erklären die direkte Proportionalität der Intensität zu ihrer zeitlichen Änderung anhand der exponentiellen Verläufe der Graphen wie in Abb. 11 und 12. Weiterhin lässt sich der Extinktionskoeffizient aus der Steigung der Absorptionsrate in deren gegen die Lichtweglänge bei gegebener Lichtwellenlänge und Farbstoffkonzentration aufgetragenen Graphen ermitteln.

6. Schlussbemerkung und Ausblick

Die Untersuchung des messtechnischen Verfahrens der Pulsoximetrie im Physikunterricht in den Sekundarstufen I und II bereichert das Curriculum um authentische Kontexte mit medizinischem und biologischem Hintergrund. Das gewählte dreischrittige Vorgehen – zunächst den Sensor zu erkennen, dann dessen Funktionsweise zu verstehen und schließlich mit diesem Verständnis den Sensor in weiteren Experimenten und Aufgaben einzusetzen – wurde im Rahmen dieses Unterrichtskonzepts bereits in der Praxis mit Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufen I und II bayerischer Gymnasien eingesetzt. Gewinnbringend für den Physikunterricht ist das vorgeschlagene Verfahren auch gerade deshalb, da neben dem Prozess des naturwissenschaftlichen Entdeckens auch derjenige des technologischen Entwickelns verdeutlicht wird: Durch das Verstehen des Messprinzips erkennen die Jugendlichen die kreativen, erfinderischen Einzelschritte, die zur Schaffung eines nicht-invasiven Verfahrens der zeitnahen Messung der partiellen Sauerstoffsättigung im Blut führten. Weitere Information und Materialien sind auf Anfrage bei den Autoren erhältlich.

7. Literatur

- [1] STORCK, TIM ; GIRWIDZ, RAIMUND: Puls-oximetrie 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, 2014, S. 651–653
- [2] BROWN, JOHN SEELY ; COLLINS, ALLAN ; DUGUID, PAUL: Situated cognition and the culture of learning. In: *Educational researcher* Bd. 18 (1989), Nr. 1, S. 32–42
- [3] WHITEHEAD, ALFRED NORTH: *The Aims of Education and Other Essays* : New York, Macmillan, 1929
- [4] MANDL, HEINZ ; KOPP, BIRGITTA: Situated learning: Theories and models. In: *Making it relevant. Context based learning of science*. Münster: Waxmann. S (2005), S. 15–34
- [5] JONASSEN, DANNY HARD: Context is everything. In: *Educational Technology* Bd. 31 (1991), Nr. 6, S. 35–37
- [6] KUHN, JOCHEN ; MÜLLER, ANDREAS ; MÜLLER, WIELAND ; VOGT, PATRIK: Kontextorientierter Physikunterricht. In: *PdN-PhiS* Bd. 5 (2010), Nr. 59, S. 13–25
- [7] 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
- [8] KUHN, JOCHEN: *Authentische Aufgaben im theoretischen Rahmen von Instruktions- und Lehr-Lern-Forschung - Optimierung von Ankermedien für eine neue Aufgabenkultur im Physikunterricht*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010
- [9] 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
- [10] 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
- [11] MÜLLER, RAINER: *Physik in interessanten Kontexten, Handreichung für die Unterrichtsentwicklung*. URL <http://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ifdn-physik/physik-in-interessanten-kontexten-rmueller.pdf>. - abgerufen am 07.09.2015
- [12] BENNETT, JUDITH ; HOGARTH, SYLVIA ; LUBBEN, FRED: *A systematic review of the effects of context-based and Science-Technology-Society (STS) approaches in the teaching of secondary science* : EPPI-Centre, Social Science Research Unit, Institute of Education, University of London, 2003
- [13] CROUCH, CATHERINE H. ; HELLER, KENNETH: Introductory physics in biological context: An approach to improve introductory physics for life science students. In: *American Journal of Physics* Bd. 82 (2014), Nr. 5, S. 378–386

- [14] NAWRATH, DENNIS ; KOMOREK, MICHAEL: Kontextorientierung aus Sicht von Physiklehrkräften. In: *ZfDN* Bd. 19 (2013), S. 233–257
- [15] VAN VORST, HELENA ; DORSCHU, ALEXANDRA ; FECHNER, SABINE ; KAUERTZ, ALEXANDER ; KRABBE, HEIKO ; SUMFLETH, ELKE: Charakterisierung und Strukturierung von Kontexten im naturwissenschaftlichen Unterricht–Vorschlag einer theoretischen Modellierung. In: *ZfDN* Bd. 21 (2014), Nr. 1, S. 29–39
- [16] HERRINGTON, JAN ; OLIVER, RON ; REEVES, THOMAS C.: Patterns of engagement in authentic online learning environments. In: *Australian Journal of Educational Technology* Bd. 19 (2003), Nr. 1, S. 59–71
- [17] KLEIN, PASCAL ; HIRTH, MICHAEL ; GRÖBER, SEBASTIAN ; KUHN, JOCHEN ; MÜLLER, ANDREAS: Classical experiments revisited: smartphones and tablet PCs as experimental tools in acoustics and optics. In: *Physics Education* Bd. 49 (2014), Nr. 4, S. 412
- [18] 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
- [19] KUHN, JOCHEN ; VOGT, PATRIK: Smartphones as experimental tools: Different methods to determine the gravitational acceleration in classroom physics by using everyday devices. In: *European Journal of Physics Education* Bd. 4 (2013), Nr. 1, S. 16–27
- [20] 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
- [21] DUIT, REINDERS ; MIKELSKIS-SEIFERT, SILKE: *Piko-Brief Nr. 5 Kontextorientierter Physikunterricht*. URL <http://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko/pikobriefe032010.pdf>. - abgerufen am 07.09.2015
- [22] GIRWIDZ, RAIMUND: Sensoren: Physik erleben, verstehen und anwenden: Chancen und Perspektiven für den Unterricht. In: *Unterricht Physik* Bd. 17 (2006), Nr. 91
- [23] RUCHALA, JOANNA B.: Applications of Pulse Oximetry. In: WEBSTER, J. G. (Hrsg.): *Design of pulse oximeters, Series in Medical Physics and Biomedical Engineering* : CRC Press, 1997, S. 214–236
- [24] 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
- [25] 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
- [26] NITZAN, MEIR ; ROMEM, AYAL ; KOPPEL, ROBERT: Pulse oximetry: fundamentals and technology update. In: *Medical devices (Auckland, NZ)* Bd. 7 (2014), S. 231
- [27] BOURGEOIS, BRAD W. J.: Light-Emitting Diodes and Their Control. In: WEBSTER, J. G. (Hrsg.): *Design of pulse oximeters, Series in Medical Physics and Biomedical Engineering* : CRC Press, 1997, S. 56–70
- [28] PRAHL, SCOTT ; OTHERS: *Tabulated molar extinction coefficient for hemoglobin in water*. URL <http://omlc.org/spectra/hemoglobin/summary.html>. - abgerufen am 07.09.2015
- [29] 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
- [30] 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
- [31] LAVE, JEAN ; WENGER, ETIENNE: *Situated learning: Legitimate peripheral participation* : Cambridge university press, 1991
- [32] *Beer's Law Lab - Solute, Solvent, Solutions - PhET*. URL <https://phet.colorado.edu/en/simulation/beers-law-lab>. - abgerufen am 07.09.2015