

**Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Messtechnik**

**Technische Universität Kaiserslautern
Arbeitsgruppe Didaktik der Physik**

Schülerforschungszentrum Saarlouis

DBU-Projekt SUSmobil

Befähigung und Begleitung von Schülern zur Durchführung von Umweltstudien mit Smartphone und mobiler Messtechnik – Bewertung von Luftqualität und Abgasen durch Erfassung umwelt- und gesundheitsrelevanter Schadstoffe.

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 33704
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

**Prof. Dr. Andreas Schütze, Sebastian Höfner
(Lehrstuhl für Messtechnik, Universität des Saarlandes),
Prof. Dr. Jochen Kuhn, Dr. Michael Hirth
(AG Didaktik der Physik, TU Kaiserslautern)
&
Benjamin Brück
(Schülerforschungszentrum Saarlouis)**

Kaiserslautern/Saarbrücken/Saarlouis, den 18.08.2020

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	33704	Referat	41	Fördersumme	404.918 €
Antragstitel		Befähigung und Begleitung von Schülern zur Durchführung von Umweltstudien mit Smartphone und mobiler Messtechnik – Bewertung von Luftqualität und Abgasen durch Erfassung umwelt- und gesundheitsrelevanter Schadstoffe			
Stichworte		Smartphone, Experimente, Umweltbildung, Schülerlabore			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
36 Monate	01.07.2017	30.06.2020	1		
Zwischenberichte	02.02.2018 31.07.2019	03.08.2018 31.01.2020	31.01.2019		
Bewilligungsempfänger	Universität des Saarlandes Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät Lehrstuhl für Messtechnik Campus A5.1 66123 Saarbrücken			Tel	0681 302 4663
				Fax	0681 302 4665
				Projektleitung Prof. Dr. Andreas Schütze	
		Bearbeiter Sebastian Höfner			
Kooperationspartner	Schülerforschungszentrum Saarlouis, Herr Benjamin Brück c/o Gemeinschaftsschule "In den Fliesen", St. Nazairer-Allee 6, 66740 Saarlouis TU Kaiserslautern, Fachbereich Physik, AG Didaktik der Physik, Prof. Dr. Kuhn Erwin-Schrödinger-Str., Bau 46-525, 67663 Kaiserslautern				
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Gut 60.000 Todesfälle in Deutschland und mehr als eine halbe Million in der EU waren 2012 auf Luftverschmutzung zurückzuführen, gleichzeitig wurde der Klimawandel in den letzten Jahren immer deutlicher. Trotz aller Anstrengungen zur Reduzierung stellen Schadstoffemissionen nach wie vor eines der größten Umweltprobleme dar. Zwar stieg das Bewusstsein für die vielfältigen Auswirkungen menschlichen Handelns auf unsere Umwelt in den letzten Jahren kontinuierlich an, das persönliche Handeln wird aber noch nicht in ausreichendem Ausmaß nachhaltig gestaltet, auch weil Feedback für Umweltbelastungen fehlt. Gerade bzgl. der persönlichen Auswirkung auf die Umwelt ist die Förderung von Bewusstsein und Handeln im Rahmen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung – speziell für Schülerinnen und Schüler, also die Akteure von morgen – eine zentrale Voraussetzung für die Gestaltung einer zukunftsfähigen Gesellschaft. Risiken wie Luftverschmutzung und Treibhausgasemission bleiben aber heute unbemerkt, weil unsere Sinne solche Einwirkungen oder deren absolutes Ausmaß zum Zeitpunkt der Exposition nicht wahrnehmen bzw. erfassen können. Im Rahmen dieses Projektes sollen daher neue Methoden und Instrumente der Kommunikation, des Lernens, des Dialogs und der Beteiligung entwickelt werden, die primär auf Kinder und Jugendliche sowie auf Schulen als Multiplikatoren und Vermittler zielen.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt - An der Bornau 2 - 49090 Osnabrück - Tel 0541/9633-0 - Fax 0541/9633-190 http://www.dbu.de					

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Moderne Methoden der Umweltmesstechnik – insbesondere auf Basis von Smartphones/Tablets verknüpft mit aktuellen Sensorlösungen – werden Schülerinnen und Schülern nahegebracht. Anschließend werden diese zur Entwicklung eigener Fragestellungen und Durchführung von Studien im Bereich der Umweltmesstechnik angeregt. Die Methoden werden in Schülerlaboren in enger Zusammenarbeit zwischen Fachwissenschaftlern, Fachdidaktikern und Lehrkräften entwickelt und erprobt sowie schließlich über Schülerforschungszentren und Einbettung in den Schulunterricht einem größeren Kreis zugänglich gemacht. Durch die Verbindung von formellen Lernanlässen und informellen Lernanregungen kann ein Mobile Assisted Seamless Learning initiiert werden, um damit „Citizen Science“-Ansätze zu ermöglichen. Begleitend wird das Umweltbewusstsein und -handeln von Schülerinnen und Schülern sowie ihrem Umfeld an Hand von Fragebögen und Interviews erfasst. Die im Projekt entwickelten Ansätze werden nach Ende der Förderlaufzeit dauerhaft etabliert und auch interessierten Dritten zur Verfügung gestellt.

siehe auch: www.susmobil.de

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen des Projekts wurden drei Schülerlabor-Experimente (Module) für Schülerinnen und Schüler der Klassenstufen 7 – 13 entwickelt, die mittlerweile als fester Bestandteil des Angebots im Schülerlabor SinnTec der Universität des Saarlandes und des Schülerforschungszentrum Saarlouis etabliert sind. Im Sinne der Nachhaltigkeit wurden die Module als computerbasierte Selbstlernkurse konzipiert, wodurch es möglich ist, diese mit geringem Aufwand auch auf andere Standorte zu übertragen. Zudem sind sie seit dem Schuljahr 2018/2019 Teil eines verpflichtenden MINT-Praktikums des Max-Planck-Gymnasiums Saarlouis. In den Modulen erarbeiten sich die Schülerinnen und Schüler ein vereinfachtes Funktionsmodell eines Metalloxid-Halbleiter-Gassensors zur Messung flüchtiger organischer Verbindungen (Modul 1), kalibrieren diesen mit Hilfe von Machine Learning Techniken (Modul 2) und führen Messungen mit unterschiedlichen Sensortypen zur Bestimmung der Innenraumlufthausqualität durch (Modul 3). Die Module bildeten die formellen theoretischen und praktischen Grundlagen zur Entwicklung von bisher insgesamt 9 Schülerumweltstudien nach dem Citizen Science Prinzip, welche innerhalb verschiedener Schülerforschungswettbewerbe ausgezeichnet wurden. Nach dem Vorbild des Mobile Assisted Seamless Learnings wurden dabei vor allem Smartphones und Tablets zur orts- und zeitunabhängigen Visualisierung und Auswertung von Messdaten eingesetzt.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Im Zuge der Öffentlichkeitsarbeit und Außendarstellung wurde eine Projekthomepage angelegt, auf der Informationen zu den Modulen und Methodiken sowie zu den Schülerumweltstudien präsentiert werden (siehe www.susmobil.de). Dort sind auch sämtliche Kursunterlagen (Hardware und Software) zum Download bereitgestellt. Die entwickelten Konzepte und Ergebnisse wurden auf verschiedenen Tagungen und Messen in Form von Exponaten, Vorträgen und Posterbeiträgen vorgestellt. In jeweils zwei TV- und Radiobeiträgen (WDR, SR und SR2 KulturRadio) sowie einem Zeitungsartikel (Saarbrücker Zeitung) wurde über das Konzept des Projekts und über die Ergebnisse der Schülerumweltstudien berichtet. Das Projekt wird bei der „Woche der Umwelt“ 2021 im Schloss Bellevue mit einem Stand vertreten sein. Weiterhin wurden die Module bei Veranstaltungen wie dem „Tag der offenen Tür“, dem „Tag der Technik“ und dem Schülerbetriebspraktikum „IngFo“ der Universität des Saarlandes vorgestellt und konnten von Schülergruppen durchgeführt werden. Zudem wurden mehrere Beiträge in wissenschaftlichen Zeitschriften sowie auf einschlägigen Tagungen veröffentlicht.

Fazit

Die im Antrag genannte Zielsetzung konnte erfolgreich umgesetzt werden. Mit Fokus auf die Zielgruppe Klassenstufen 7 – 13 wurden drei Lernmodule entwickelt, welche sowohl die theoretischen als auch die praktischen Grundlagen in Bezug auf moderne Umweltmesstechnik mit Gas- und Feinstaubsensoren vermitteln. Dadurch wird bei den Schülerinnen und Schülern ein Bewusstsein für Luftschadstoffe geschaffen, und diese werden dazu motiviert, eigene Umweltfragestellungen zu entwickeln. Unterstützt werden sie dabei durch den Einsatz von moderner Technik, vor allem Smartphone und Tablet, die es ermöglicht, Sensordaten orts- und zeitunabhängig aufzuzeichnen und zu visualisieren. Die Module sind mittlerweile fester Bestandteil des Angebots des Schülerlabors SinnTec und des Schülerforschungszentrum Saarlouis und können dank ihres Aufbaus mit geringem Aufwand auch auf andere Standorte angepasst werden.

Inhalt

Zusammenfassung.....	7
1 Einleitung.....	8
2 Theoretische Grundlagen.....	9
Luftschadstoffe.....	9
Anorganische Schadstoffe.....	9
Flüchtige organische Verbindungen (VOCs).....	9
Kohlendioxid (CO ₂).....	11
Feinstaub (PM).....	11
Umweltbildung mit Sensoren.....	12
Mobile Assisted Seamless Learning.....	12
Internet of Things (IoT) und Smartphone als Messinstrument.....	13
3 Schülerlabor-Experimente.....	15
Modul 1 – Funktionsweise von MOX-Halbleiter-Gassensoren.....	16
<i>Experimentelle Basis</i>	16
<i>Experimentierphase 1</i>	17
<i>Theoriephase 1</i>	17
<i>Experimentierphase 2</i>	18
<i>Theoriephase 2</i>	19
<i>Zusammenfassung</i>	20
Modul 2 – Kalibrierung von MOX-Halbleiter-Gassensoren.....	21
<i>Experimentelle Basis</i>	21
<i>Wandlung und Zuordnung</i>	22
<i>Vertiefung von Modul 1</i>	23
<i>Merkmalsextraktion</i>	24
<i>Experimenteller Aufbau und Durchführung</i>	25
Modul 3 - Umweltmesstechnik.....	28
<i>Experimentelle Basis</i>	28
<i>Einführung</i>	28
<i>Station 1 – Test der Sensoren</i>	30
<i>Station 2 – Nase vs. Sensor</i>	31
<i>Station 3 – Dicke Luft</i>	33
<i>Station 4 - Feinstaubalarm</i>	35
Dauerhafte Etablierung der Lernmodule und Durchführung von Lehrerfortbildungen.....	37

4	Schülerumweltstudien	38
	<i>Google Maps Schadstoffkarte</i>	38
	<i>Schadstoffkarte 2.0</i>	38
	<i>Untersuchung der Luft in Bienenstöcken</i>	39
	<i>Einfluss von Pflanzen auf die Luftqualität</i>	41
	<i>Feinstaubmessungen an Silvester und vor der Schule</i>	42
	<i>Mobiler Kohlenmonoxid-Melder</i>	42
	<i>Waldbrandfrüherkennung</i>	43
	<i>Mobile Schadstofferkennung</i>	44
	<i>Emissionsarme Stahlerzeugung</i>	44
5	Empirische Begleitforschung	45
	Erfassung umweltrelevanten Verhaltens	45
	Baseline-Erhebung.....	45
	Studienplan, Studienabbruch und Ausblick	47
6	Veröffentlichungen und Außendarstellung.....	49
	<i>Medien</i>	49
	<i>Tagungen</i>	50
	<i>Sonstige Veranstaltungen</i>	51
	<i>Veröffentlichungen</i>	52
	<i>Projektbeirat</i>	53
	Literaturverzeichnis	55
	Tabellenverzeichnis	58
	Abbildungsverzeichnis.....	58

Zusammenfassung

Obwohl das Bewusstsein für Umweltprobleme in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen ist, haben vor allem Schülerinnen und Schüler nur eine abstrakte oder diffuse Vorstellung von Luftverschmutzung und Treibhausgasemissionen. Dies liegt vor allem daran, dass diese Luftschadstoffe meist geruch- und farblos sind und mit menschlichen Sinnen nicht detektiert werden können. Um das Umweltbewusstsein von Schülerinnen und Schülern in dieser Hinsicht nachhaltig zu stärken, ist neben der reinen Vermittlung von formalem Wissen über Schadstoffe und Sensorprinzipien entscheidend, dass Lernen authentisch und kontextorientiert stattfindet. Nur durch das Zusammenspiel aus formellen und informellen Lernszenarien kann ein umfassendes Bild über Luftqualität und Schadstoffe im Sinne der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) vermittelt werden. Durch die Integration von moderner Technik in Form von Smartphone und Tablets bei der Untersuchung von Umweltfragestellungen kann Mobile Assisted Seamless Learning initiiert werden. Dadurch kann Lernen jederzeit und ortsunabhängig stattfinden.

Um zunächst das benötigte Grundwissen über Schadstoffe und Sensorprinzipien zu vermitteln, wurden im Rahmen des Projekts drei Schülerlabor-Experimente (sog. Module) für Schülerinnen und Schüler der Klassenstufen 7 – 13 zum Thema Gas- und Umweltsensorik entwickelt. Darauf aufbauend wurden insgesamt neun Schülerumweltstudien mit Smartphone und mobiler Messtechnik realisiert. Die Module sind als computerbasierte Selbstlernkurse konzipiert und können so im Sinne der Nachhaltigkeit leicht auf andere Schülerlabore und Schülerforschungszentren übertragen und adaptiert werden.

Das erste Modul behandelt die Funktionsweise eines Metalloxid-(MOX)-Halbleiter-Gassensors zur Detektion von flüchtigen organischen Verbindungen. Da in der Mittelstufe noch keine Kenntnisse über Halbleiterphysik einschließlich des Bändermodells zu erwarten sind, wurde ein vereinfachtes Sensormodell entwickelt, das dennoch die wesentlichen Komponenten zur Erklärung des Sensorverhaltens beinhaltet. Die Schülerinnen und Schüler untersuchen das Sensorverhalten in Anwesenheit verschiedener Stoffe und erschließen sich daraus induktiv die Komponenten des vereinfachten Sensormodells.

Im zweiten Modul geht es um die Kalibrierung eines MOX-Halbleiter-Gassensors auf Ethanol mit Hilfe von Machine Learning. Dabei wird das vereinfachte Sensormodell aus Modul 1 um den Faktor einer variablen Sensortemperatur bzw. eines temperaturzyklischen Betriebs zur Steigerung der Sensitivität und Selektivität erweitert. Die Schülerinnen und Schüler erzeugen unterschiedliche Ethanol-Konzentrationen, nehmen Trainingsdaten auf, führen eine Merkmalsextraktion durch und trainieren ein künstliches neuronales Netz zur Erstellung eines mathematischen Vorhersagemodells.

Das dritte Modul beinhaltet die Messung typischer Umweltparameter zur Bestimmung der Innenraumluftqualität. Die Schülerinnen und Schüler lernen die prinzipielle Funktionsweise von CO₂- und Feinstaubsensoren kennen und führen Messungen in insgesamt vier Stationen durch. Jede Station behandelt dabei ein anderes Sensorprinzip. Eingesetzt werden typische IoT-Sensormodule, die auch leicht mit Smartphone und Tablet für mobile Studien verknüpft werden können.

Auf der Grundlage des in den Modulen erarbeiteten Wissens und der dort eingesetzten IoT-Devices haben besonders interessierte Schülerinnen und Schüler die Möglichkeit, eigene Umweltstudien mit der Unterstützung des Internet of Things zu entwickeln. Im Laufe des Projekts wurden insgesamt neun Umweltstudien realisiert, die unterschiedlichste Themenbereiche abdecken. Diese reichen von der Entwicklung eines mobilen CO-Melders über die Untersuchung der Luft in Bienenstöcken und die Wirkung von Pflanzen im Schlafzimmer bis hin zur Entwicklung eines Waldbrand-Früherkennungssystems.

1 Einleitung

Im Jahr 2019 waren gut 70.000 Todesfälle in Deutschland und mehr als eine halbe Million in der EU auf Luftverschmutzung zurückzuführen, gleichzeitig wurde der Klimawandel in den letzten Jahren immer deutlicher [1]. Trotz aller Anstrengungen zur Reduzierung stellen damit Schadstoffemissionen nach wie vor eines der größten Umweltprobleme dar. Zwar stieg das Bewusstsein für die vielfältigen Auswirkungen menschlichen Handelns auf unsere Umwelt in den letzten Jahren kontinuierlich an, dennoch ist dieses häufig eher diffus und abstrakt, gerade auch für Schülerinnen und Schüler, also die Akteure von morgen. Das persönliche Handeln wird noch nicht in ausreichendem Ausmaß nachhaltig gestaltet, auch weil Feedback für Umweltbelastungen, z. B. durch unmittelbare Erfassung, fehlt. Gerade bzgl. der persönlichen Auswirkung auf die Umwelt ist die Vermittlung von entsprechenden Kompetenzen und systemischen Zusammenhängen sowie die Förderung von Bewusstsein und Handeln im Rahmen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) eine zentrale Voraussetzung für die Gestaltung einer zukunftsfähigen Gesellschaft. Systemische Risiken wie Luftverschmutzung und Treibhausgasemission bleiben von den Menschen unbemerkt, weil unsere Sinne solche Einwirkungen oder deren absolutes Ausmaß zum Zeitpunkt der Exposition nicht wahrnehmen bzw. erfassen können. Im Rahmen dieses Projektes wurden neue Methoden und Instrumente der Kommunikation, des Lernens, des Dialogs und der Beteiligung entwickelt, die primär auf Kinder und Jugendliche sowie auf Schulen als Multiplikatoren und Vermittler abzielen.

Dies wurde realisiert, indem Schülerinnen und Schülern zunächst moderne Methoden der Umweltmesstechnik in Form von drei Schülerlabor-Experimenten kennenlernen. Besonders interessierte Schülerinnen und Schüler sollen darauf aufbauend zur Entwicklung eigener Fragestellungen und Durchführung von Studien im Bereich der Umweltmesstechnik angeregt werden. Die Methoden wurden in Schülerlaboren in enger Zusammenarbeit zwischen Fachwissenschaftlern, Fachdidaktikern und Lehrkräften entwickelt und erprobt sowie schließlich über Schülerforschungszentren und Einbettung in den Schulunterricht einem größeren Kreis zugänglich gemacht.

Die Schülerinnen und Schüler werden in den Lernmodulen an die Funktionsweise, Kalibrierung und Einsatz von moderner Umweltmesstechnik herangeführt. Dies dient als Grundlage, um nach Einarbeitung eigene Fragestellungen zu entwickeln und in Umweltstudien zu untersuchen. Durch die Verbindung von formellen Lernanlässen in Schülerlaboren und informellen Lernanregungen außerhalb dieser Einrichtungen kann Mobile Assisted Seamless Learning (MSL) initiiert werden. Messdaten können mit dem Smartphone/Tablet oder PC visualisiert und jederzeit (mobil) und ortsunabhängig ausgewertet werden. Arrondiert werden die fachdidaktisch fundierte, auf BNE bezogene Entwicklung der Bildungsmodule und ihre dauerhafte Etablierung durch eine empirische Begleitforschung zu Wirksamkeit und Reichweite der entwickelten Angebote.

Im Sinne der Nachhaltigkeit wurde darauf geachtet, dass die als computerbasierten Selbstlernkurse konzipierten Lernmodule leicht auf andere Schülerlabore bzw. Schülerforschungszentren zu übertragen werden können. Entsprechende Materialien, wie benötigte Software und Bauanleitungen für Hardware können auf der projekteigenen Homepage heruntergeladen werden www.susmobil.de.

2 Theoretische Grundlagen

Luftschadstoffe

Im Jahr 2019 konnten in Deutschland ca. 70.000 vorzeitige Todesfälle direkt mit Luftverschmutzung in Zusammenhang gebracht werden [1]. Zu den verantwortlichen Schadstoffen zählen vor allem anorganische Schadstoffe (Kohlenmonoxid, Stickoxide, ...), flüchtige organische Verbindungen (Benzol, Formaldehyd, ...) und Feinstaub (PM_{2,5} und PM₁₀). Aber auch das i.d.R. gesundheitlich unkritische Kohlenstoffdioxid wird als Indikator zur Bestimmung der Innenraumluftqualität genutzt. Im Folgenden sollen diese Stoffe in Bezug auf gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen, Grenzwerte und Detektionsmöglichkeiten vorgestellt werden.

Anorganische Schadstoffe

Diese Gase stammen primär aus Verbrennungsprozessen, d. h. aus Verkehrsabgasen, Kraftwerken, Heizungsanlagen sowie industriellen Prozessen. In den Verbrennungsprozessen entsteht CO durch unvollständige Verbrennung, während Stickstoffmonoxid (NO) bei hohen Temperaturen durch die Reaktion von Stickstoff und Sauerstoff aus der Luft gebildet wird. An Luft oxidiert NO dann weiter zu Stickstoffdioxid (NO₂). Gemeinsam mit anderen Stickoxid-Verbindungen werden NO und NO₂ daher unter dem Oberbegriff NO_x erfasst. Bodennahes Ozon bildet sich aus einer Reaktion zwischen NO₂ und Luftsauerstoff (O₂) unter dem Einfluss von UV-Strahlung. SO₂ entsteht durch Schwefelanteile in Brennstoffen wie Kohle oder Diesel. Diese Komponenten führen bereits bei kurzzeitiger Exposition ab Konzentrationen von 180 µg/m³ (Ozon) bis 10 mg/m³ (CO) zu gesundheitlichen Auswirkungen [2]. Für die Langzeitexposition gelten niedrigere Grenzwerte, um Folge- und Langzeitschäden, z. B. Allergien, Asthma oder Krebsrisiken, zu minimieren.

Zur Messung anorganischer Schadstoffe werden in offiziellen Messstationen meist optische Verfahren eingesetzt, daneben eignen sich auch elektrochemische Zellen sowie Halbleiter-Gassensoren (s.u.) für ihren Nachweis.

Flüchtige organische Verbindungen (VOCs)

Flüchtige organische Verbindungen (Englisch „Volatile Organic Compounds“, kurz VOCs) beschreiben eine Gruppe von kohlenstoffhaltigen (organischen) Substanzen, wie beispielsweise Benzol, Formaldehyd oder Isovaleriansäure, die aufgrund ihres hohen Dampfdrucks bei niedrigen Temperaturen verdampfen. Unter den Oberbegriff VOC fällt eine große Zahl von chemischen Verbindungen, deren Wirkung bzgl. Gesundheit, Klima bzw. Geruch unterschiedlich ist. Benzol (C₆H₆) stammt vor allem aus Kraftstoffen und der Petrochemie und ist als Schadstoff sowohl in der Außenluft als auch in Innenräumen von großer Bedeutung, da es krebserregend ist. Von der WHO wird daher ein Grenzwert von nur 5 µg/m³, entsprechend ca. 1,8 ppb (parts per billion) empfohlen [3]. Formaldehyd stammt vor allem aus der chemischen Industrie und ist in Innenräumen von hoher Relevanz, da es aus Möbeln, insbesondere Pressspanplatten, und andere Baumaterialien austritt. Zwar gelten inzwischen strenge Grenzwerte für die Zulassung neuer Materialien, jedoch geben Möbel, Bodenbeläge und Teppiche noch über viele Jahre und Jahrzehnte Formaldehyd ab. Der empfohlene Grenzwert liegt bei 0,1 mg/m³ bzw. 81 ppb [4]. Isovaleriansäure gehört zu den Fettsäuren, tritt natürlich auf, vor allem als Stoffwechselprodukt von Bakterien, der Geruch ist dem Schweißfußgeruch sehr ähnlich, die Geruchsschwelle liegt bei wenigen ppb.

VOCs haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Gesundheit. Diese reichen von Störungen des Nervensystems (z.B. Konzentrationsschwäche und Müdigkeit), über die Ausbildung des Sick-Building-

Syndroms (Augen- und Nasenreizungen, Kopfschmerzen und Schwindel), bis zur Entwicklung von Allergien, Asthma und Krebs [5] [6] [7]. Vor allem in Innenräumen soll die Konzentration dieser Stoffe deshalb so niedrig wie möglich gehalten werden.

Auch VOCs können durch Metalloxid-(MOX)-Halbleiter-Gassensoren gemessen werden. Die Funktionsweise dieser Sensoren beruht auf der Wechselwirkung von ionosorbierten Sauerstoff mit reduzierenden oder oxidierenden Gasen auf der Oberfläche [8], woraus ein sehr breites Detektionsspektrum resultiert. Typischerweise basieren die Sensoren auf polykristallinem SnO_2 , dessen Leitfähigkeit durch Grenzflächen der Kristallite bestimmt wird, sodass die Beschreibung des Leitungsmechanismus auf Korn-Korn-Übergänge beschränkt werden kann, siehe Abbildung 1 links. Diese Annahme ist für die meisten granularen SnO_2 -Schichten gerechtfertigt, da die Oberfläche der Körner an Luft durch ionosorbierten Sauerstoff an Elektronen verarmt ist und für einen Elektronentransport die Elektronen erst die Energiebarriere E_B der Korn-Korn-Übergänge überwinden müssen [8] [9]. Aufgrund der negativ geladenen Sauerstoffatome bildet sich eine Energiebarriere am Übergang, so dass die Wahrscheinlichkeit des Übergangs eines Elektrons von einem Korn zum nächsten sinkt und damit auch der Leitwert. In einer reduzierenden Atmosphäre (z. B. bei Anwesenheit von Kohlenmonoxid CO) steigt der Leitwert an, siehe Abbildung 1 rechts. Das CO -Molekül reagiert mit dem ionosorbierten Sauerstoff an der Oberfläche und ein Elektron wird frei. Das Elektron steht im Volumen wieder zum Elektronentransport zur Verfügung und die Energiebarriere sinkt, was eine Erhöhung der Leitfähigkeit zur Folge hat [10]. Umgekehrt führen oxidierende Gase, z. B. NO_2 oder Ozon, zu einer Erhöhung der Energiebarriere und damit zu einer Abnahme der Leitfähigkeit.

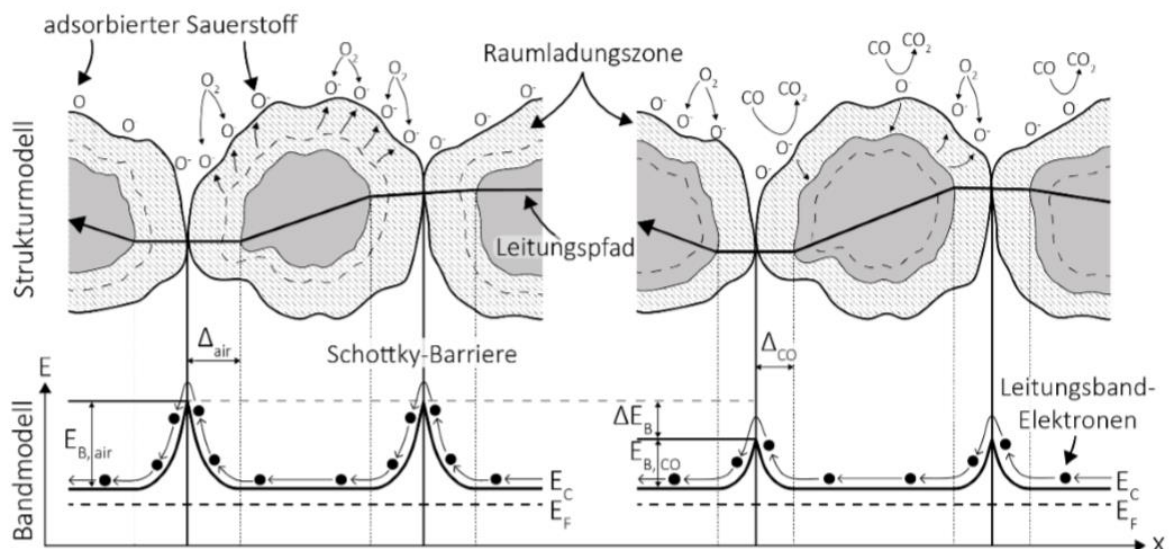


Abb. 1 Funktionsweise eines Halbleiter-Gassensors: Schematische Darstellung als Struktur- und Bändermodell einer polykristallinen Schicht eines halbleitenden Metalloxidgassensors ohne (links) und mit (rechts) Gasangebot [8] [11].

Um die Aktivierungsenergie für Chemisorption und Reaktion von Gasen an der Sensoroberfläche zu überwinden, werden Halbleiter-Gassensoren auf Temperaturen zwischen 200°C und 450°C geheizt [8]. Unterschiedliche Arten von reduzierenden Gasen besitzen auch unterschiedliche Aktivierungsenergien und Reaktionsgeschwindigkeiten mit dem Oberflächensauerstoff. Ein temperaturvariabler, zyklischer Sensorbetrieb (TCO, „temperature cycled operation“) kann so im Vergleich zum statischen Betrieb zu einer Steigerung der Selektivität und Sensitivität verwendet werden [12] [13]. Das zyklische Heizen und Abkühlen führt zu Nichtgleichgewichtszuständen der Oberflächenladung, siehe Abbildung 2. Die anschließende Relaxation in den Gleichgewichtszustand ist in der Regel langsamer als die Temperatur-

änderung des Materials und sowohl gas- als auch temperaturabhängig. Aus der Sensorreaktion auf einen Temperaturzyklus werden anschließend Merkmale wie Mittelwerte und Steigungen extrahiert, die auf der Grundlage mathematischer Modelle der Mustererkennung bzw. des maschinellen Lernens (z. B. „partial least squares regression“, PLSR; „linear discriminant analysis“, LDA; „principal component analysis“, PCA; künstliche neuronale Netze kNN) mit der Gaskonzentration in Beziehung gesetzt werden können. Im Zuge der Kalibrierung wird ein solches mathematisches Modell anhand bekannter Gasmischungen und der dazugehörigen Sensorantwortmuster (Trainingsdaten) berechnet.

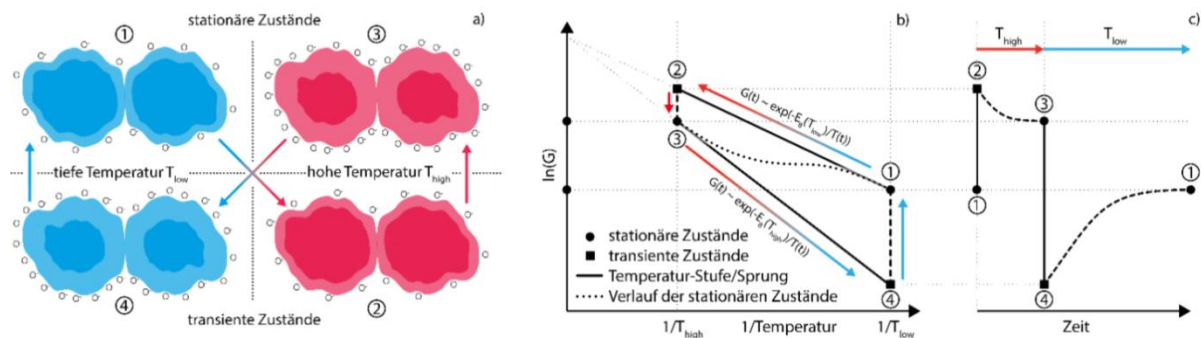


Abb. 2 Links: Stationäre und transiente Zustände eines Korn-Korn-Übergangs bei unterschiedlichen Temperaturen. Mitte: Arrhenius-Plot des Sensorsignals während eines Temperaturzyklus mit zwei Temperaturen. Rechts: Zeitlicher Verlauf des Sensorsignals im Temperaturzyklus [14].

Kohlendioxid (CO₂)

Kohlendioxid (CO₂) entsteht durch die Verbrennung organischer Verbindungen, also u. a. bei Kohlekraftwerken, Benzin- oder Dieselmotoren, aber auch durch den Stoffwechsel von Tieren und dem Menschen. In der Außenluft beträgt die Hintergrundkonzentration derzeit ca. 400 ppm, der Wert steigt seit Beginn der Industrialisierung stetig an. In der Innenluft werden durch die Anwesenheit von Personen in geschlossenen Räumen rasch höhere Konzentrationen erreicht, da die Konzentration in der Aussenluft 4% beträgt [15].

CO₂ selbst ist erst ab Konzentrationen oberhalb von 5.000 ppm gesundheitsgefährdend und verursacht dann Symptome wie Schwindel oder Konzentrationsstörungen [16]. Dennoch kann es bereits bei geringeren Konzentrationen in Innenräumen als Indikator für schlechte Luftqualität eingesetzt werden. Ist der Mensch die einzige VOC-Quelle in Innenräumen, so korrelieren CO₂- und VOC-Konzentration. Aus diesem Grund gilt in Innenräumen ein CO₂-Richtwert von 1.000 ppm, der nicht überschritten werden sollte. Dieser Wert basiert auf Studien von Pettenkofer aus dem 19. Jahrhundert [17].

CO₂ als inertes Gas lässt sich praktisch nur mittels Infrarotabsorption messen. CO₂-Moleküle können durch Licht im infraroten Wellenlängenbereich um 4,25 μm zum Schwingen angeregt werden. Dadurch wird Licht absorbiert. Die Verringerung der Lichtintensität (Absorbanz) in Abhängigkeit zur Gaskonzentration wird durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben [18].

Feinstaub (PM)

Feinstaub (Englisch „Particulate Matter“, kurz PM) bezeichnet Aerosole, die mit bloßem Auge nicht wahrnehmbar sind. Die Größe dieser Teilchen liegt im μm -Bereich und wird in der Regel in die beiden Größen PM₁₀ (Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$) und PM_{2,5} (Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser $< 2,5 \mu\text{m}$) eingeteilt. Es kann zwischen natürlichen Quellen (Vulkane, Waldbrände, Pollen, ...) und anthropogenen Quellen (PKWs, Kraftwerke, Verbrennungsanlagen) unterschieden werden. In Abhängigkeit seiner Größe kann sich PM in der Lunge oder Blutbahn des

Menschen festsetzen und Entzündungsreaktionen erzeugen. Weitere gesundheitliche Auswirkungen reichen von einer Verschlechterung der Lungenfunktion über die Entwicklung von Asthma bis hin zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen [19].

Bereits geringste Mengen an PM können zu gesundheitlichen Schäden führen, weshalb die Konzentration stets so gering wie möglich gehalten werden soll. Die EU hat im Jahr 2005 einen Grenzwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für PM_{10} festgelegt, der nicht häufiger als 35 Mal pro Jahr überschritten werden darf. Die durchschnittliche Konzentration darf $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht überschreiten. Für $\text{PM}_{2,5}$ liegt der Jahresmittelgrenzwert bei $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [20].

Die Messung von Feinstaub kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Diese basieren beispielsweise auf radiometrischen oder gravimetrischen Methoden. Die häufigste Methode in low-cost Feinstaubsensoren ist die Streulichtmessung. Dabei strahlt ein Laser durch das zu untersuchende Medium und wird gebeugt, gestreut und reflektiert. Ein Detektor nimmt das Streumuster auf. Dieses ist abhängig von Größenverteilung und Konzentration des Feinstaubes.

Umweltbildung mit Sensoren

Die zunehmende Technisierung und Globalisierung unserer Gesellschaft bringt neben vielen Vorteilen auch Risiken mit sich. Insbesondere bleiben gerade sogenannte systemische Risiken wie Luftverschmutzung u. a. auch deshalb unbemerkt, weil unsere menschlichen Sinne solche Einwirkungen oder deren absolutes Ausmaß zum Zeitpunkt der Exposition nicht wahrnehmen bzw. erfassen können. Möglichkeiten zur individuellen, zeit- und ortsunabhängigen Erfassung im Alltag auftretender Umwelteinflüsse spielen deshalb für eine Bildung für nachhaltige Entwicklung sowie zum Aufbau einer „Scientific Literacy“ im Sinne eines Weges zur gesellschaftlichen Partizipation eine bedeutende Rolle. Dazu gehört auch, die Auswirkungen von Umweltverschmutzung auf Gesundheit und Wohlbefinden in einem besser fassbaren Format zu kommunizieren, die die Menschen in ihrem eigenen Lebensumfeld abholt.

Mobile Assisted Seamless Learning

Die fehlende Verbindung zwischen individuell auftretenden Umwelteinflüssen und der zeit- und ortsunabhängigen Erfassung kann gerade in dem Themenbereich der unsichtbaren Luftschadstoffe durch den Einsatz von Smartphone und Tablet-PC hergestellt werden. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass mittlerweile gut ein Drittel der Jugendlichen in Deutschland einen Tablet-PC und mehr als 90 % ein Smartphone nutzen. Diese Geräte gehören somit zum alltäglichen Werkzeug speziell der jungen Generation und stehen also zeit- und ortsunabhängig zur Verfügung. Andererseits können Smartphone und Tablet-PC auch vielfältig als kleine, transportable, mobile Messlabore zum Experimentieren im naturwissenschaftlichen Unterricht und speziell in der Umweltbildung eingesetzt werden. Diese Allgegenwärtigkeit und Mobilität von Smartphones und Tablets macht es möglich, Lernen als einen Prozess erlebbar zu machen, der in verschiedensten Szenarien „seamless“, also „nahtlos“, stattfinden kann und nicht nur auf den Klassenraum oder Hörsaal begrenzt bleibt (Erschließung sog. „Seamless Learning Spaces“, [21]). Lernen kann jederzeit und überall, formell und informell, individuell, kooperativ und sozial, analog und digital stattfinden. Mobile Technologie fungiert dabei als Mediator eines solchen Lernprozesses im Sinne des Ansatzes von „Mobile Assisted Seamless Learning“ (MSL) [22]. Lernende werden dadurch befähigt, flexibel auf ihre Umwelt zu reagieren und mit ihr effektiv zu interagieren, wobei Smartphones oder Tablets zur Kommunikation, als Cognitive Tools, zur Dokumentation oder als Messinstrument reflektiert und autonom benutzt werden können.

Um MSL zu fördern, bedarf es eines Zusammenspiels institutionalisierter formeller und selbstregulierter informeller Lernszenarien. Nach KUKULSKA-HULME et al. muss Lernen sowohl formell als auch

informell, freiwillig und ressourcenbasiert geschehen, um MSL zu initiieren [23]. Ein etwa nur auf Freiwilligkeit und Selbstregulierung ausgerichteter Lernprozess ist insbesondere in dem MINT-Fächern undenkbar. Ohne formale, external strukturierte und initiierte Lernarrangements, die Expertise und Möglichkeiten der Reflexion bereitstellen, besteht die Gefahr, dass Fehlkonzepte entstehen und etabliert werden können. Informelles Lernen muss erst durch formelles Lernen vorbereitet und sollte wiederum in formellen Lerngelegenheiten reflektiert werden. Kompetenzentwicklung erfolgt in diesem Sinne als komplementäre Abfolge informeller und eher erfahrungsorientierter sowie formaler und eher theorieorientierter Lernprozesse.

Internet of Things (IoT) und Smartphone als Messinstrument

Damit MSL stattfinden kann, müssen Smartphone, Tablet und PC in den Unterricht integriert werden. Im Bereich der Umweltsensorik kann dies beispielsweise durch das „Internet der Dinge“ (englisch: „Internet of Things“, kurz: IoT) geschehen. IoT beschreibt die Vernetzung von Gegenständen über das Internet. Über internetfähige Mikrocontroller können Sensordaten an Online-Datenbanken geschickt werden. Anschließend können diese über Smartphone-Apps abgerufen und visualisiert werden. Weiterhin ist es möglich, Befehle über das Smartphone an den Mikrocontroller zu senden und so mit diesem zu interagieren.

Zwei Beispiele für solche App-Dienste sind „Blynk“ [24] und „ThingSpeak“ [25]. Die Grundversionen dieser Apps sind kostenlos für Android und IOS-Geräte im Playstore bzw. App-Store erhältlich. In der kostenpflichtigen Version von „Blynk“ werden weitere Features freigeschaltet, wie beispielsweise die Integration einer Landkarte. Durch die Ergänzung eines eigenen Servers kann die Geschwindigkeit des Datenexports verbessert werden. In Abbildung 3 sind Screenshots dieser Apps zu sehen.

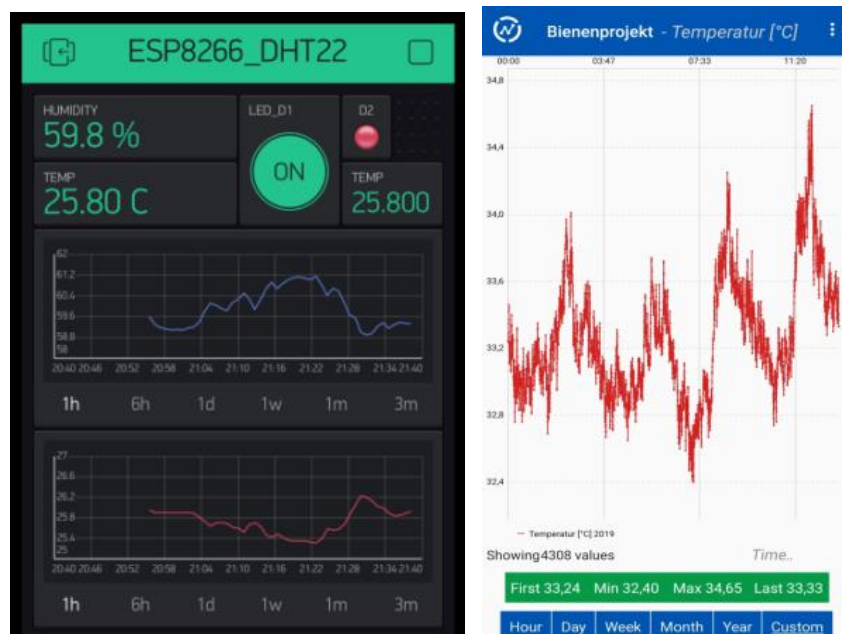


Abb. 3 Links: Kommerzielle App „Blynk“. Rechts: Kostenlose App ThingSpeak.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, die gesammelten Daten aus der Online-Datenbank abzurufen und diese auf einer Webseite darzustellen. Der Vorteil dieser Variante im Vergleich zur App-basierten Darstellungsweise ist, dass die Daten direkt heruntergeladen werden und so über die Basisfunktionalität der Smartphone-Apps hinaus analysiert werden können. Einen Eindruck der online-Lösung vermittelt Abbildung 4.

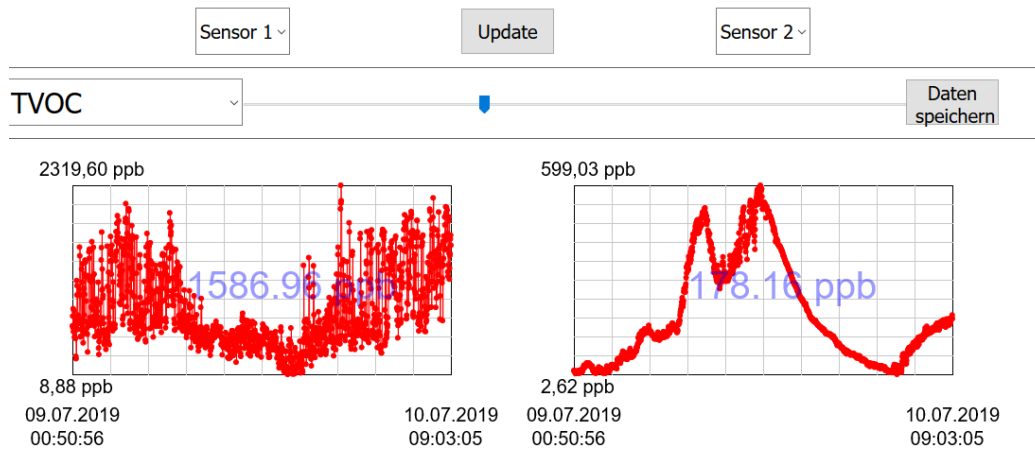


Abb. 4 Online-Darstellung der Sensordaten. Neben der Auswahl der Sensoren können auch das Zeitintervall angepasst, die Daten im .csv-Format heruntergeladen und so lokal ausgewertet werden.

Um nicht auf eine Internetverbindung angewiesen zu sein, ist es auch möglich, die Sensordaten über Kommunikationstechniken wie Bluetooth, Near Field Communication (NFC), LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) oder direkt per USB-Kabel an das Smartphone zu übermitteln, siehe Abbildung 5. Letzteres bietet auch den Vorteil, dass kein zusätzlicher Akku für den Betrieb der Sensoren benötigt wird, da die Stromversorgung direkt über das Smartphone erfolgt.

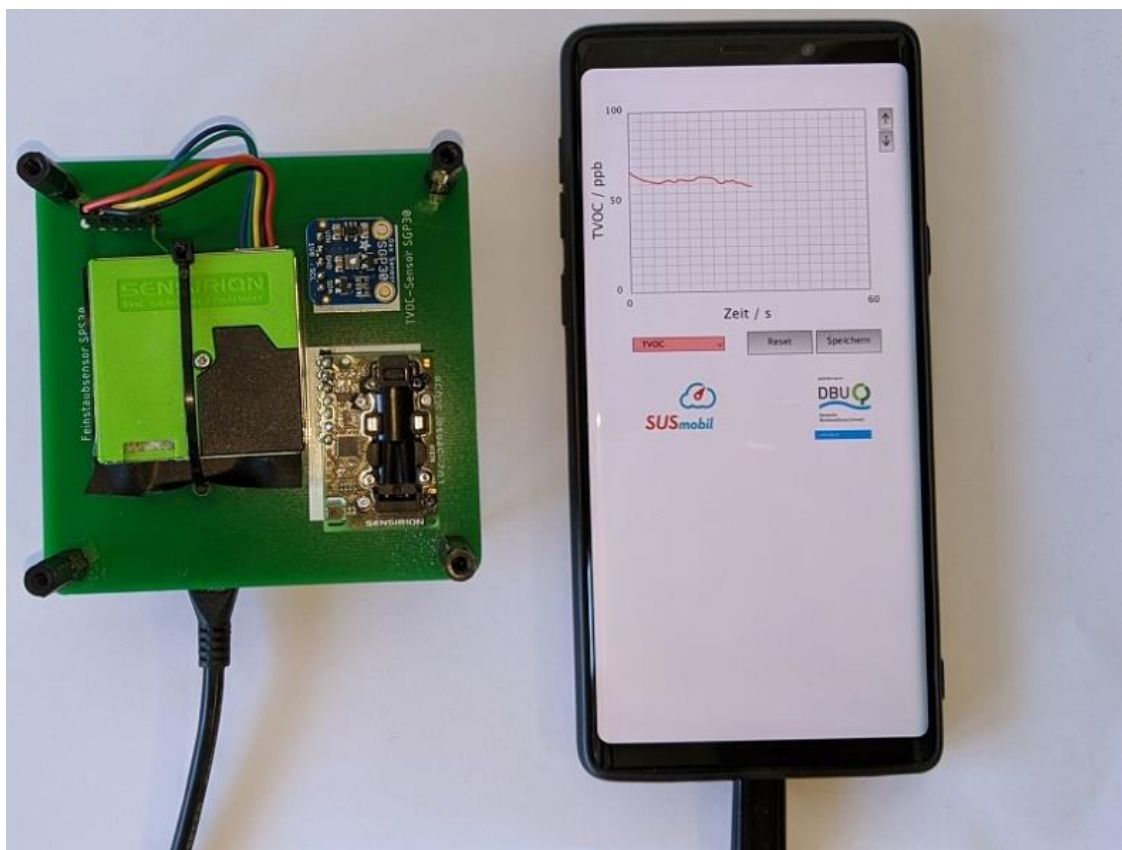


Abb. 5 „SUSmobil-App“. Sensoren können direkt an den USB-C-Ausgang des Smartphones angeschlossen werden, um Messdaten auslesen sowie darstellen zu können.

3 Schülerlabor-Experimente

Wie in Kapitel 2 beschrieben, besteht die Umweltbildung im Sinne des MSL aus formellen und informellen Lernarrangements. Um die Bildung von Fehlkonzepten zu vermeiden, muss informelles Lernen durch formelle Lernangebote vorbereitet werden. Aus diesem Grund wurden drei Schülerlabor-Experimente, sogenannte Module entwickelt, die den Schülerinnen und Schülern Wissen über verschiedene Luftschadstoffe und Sensoren zur Messung dieser Stoffe vermitteln. Die Module sind als computerbasierte Selbstlernkurse aufgebaut und befassen sich thematisch mit unterschiedlichen Aspekten der Umweltsensorik speziell mit Gassensoren. Sie haben unterschiedliche Anforderungsgrade und richten sich an Schülerinnen und Schüler der Klassenstufen 7 – 13. Der zeitliche Umfang zur Durchführung jedes Moduls beträgt erfahrungsgemäß ca. 90 – 150 Minuten.

Den Einstieg bildet das erste Modul, welches die Funktionsweise eines MOX-Halbleiter-Gassensors zur Detektion von flüchtigen organischen Verbindungen qualitativ erläutert (vgl. „Modul 1 – Funktionsweise eines MOX-Halbleiter-Gassensors“, [26]). Die Schülerinnen und Schüler nehmen die Sensorreaktion eines MOX-Halbleiter-Gassensors in Anwesenheit verschiedener Stoffe (Wasser, Apfelsaft und alkoholfreies Bier) sowie bei unterschiedlichen Sensortemperaturen auf. Es zeigt sich, dass die Sensorreaktion charakteristisch für den untersuchten Stoff ist, weshalb diese eindeutig identifiziert werden können. Die experimentellen Beobachtungen werden anschließend von einem theoretischen Teil ergänzt, in welchem schrittweise ein vereinfachtes Sensormodell entwickelt wird, das die relevanten Prozesse auf der Oberfläche des Sensors modelliert.

Nachdem sich das erste Modul mit der qualitativen Unterscheidung verschiedener Stoffe befasst hat, liegt der Fokus im zweiten Modul auf der Kalibrierung eines MOX-Halbleiter-Gassensors auf verschiedene Konzentrationen eines Stoffes (vgl. „Modul 2 – Kalibrierung eines MOX-Halbleiter-Gassensors“, [27]). Dabei wird das in Modul 1 entwickelte qualitative Modell um den Aspekt des temperaturzyklischen Betriebs zur Steigerung der Selektivität erweitert. Ausgehend von der Konzeptualisierung des Begriffs „Kalibrierung“ führen die Schülerinnen und Schüler in diesem Kurs die grundlegenden Schritte für die Kalibrierung eines MOX-Halbleiter-Gassensors, wie (a) Aufnahme von Trainingsdaten, (b) Merkmalsextraktion, (c) Modellbildung mittels Machine Learning und (d) Modellvalidierung unter Anleitung am Beispiel von Ethanol durch. Weiterhin wird der Begriff der „Konzentration eines Gases“ eingeführt und die relevanten Größenordnungen von Schadstoffkonzentrationen „parts per million“ und „parts per billion“ erläutert.

Im abschließenden dritten Modul geht es um die Messung von Luftschadstoffen, deren Grenzwerte und Auswirkungen auf die Gesundheit (vgl. „Modul 3 – Umweltmessungen“). Zu diesen gehören neben VOCs auch CO₂ als Indikator für schlechte Luftqualität sowie Feinstaub. In einer Einführungsphase erhalten die Schülerinnen und Schüler zunächst Informationen über Luftqualitätsparameter und durchlaufen dann gruppenweise insgesamt vier Lernstationen. Jede dieser Stationen widmet sich thematisch einem anderen Aspekt der Luftqualitätsbestimmung. Zudem werden weitere Sensorprinzipien wie die Lichtabsorption zur Messung von CO₂ und die Lichtstreuung zur Messung von Feinstaub in Experimenten vorgestellt. Das Lernmodul wird durch eine Broschüre begleitet, welche Arbeitsaufträge und Zusatzinformationen zu Schadstoffen enthält.

Im Folgenden werden die Module im Detail vorgestellt.

Modul 1 – Funktionsweise von MOX-Halbleiter-Gassensoren

Das erste Lernmodul befasst sich thematisch mit der prinzipiellen Funktionsweise eines MOX-Halbleiter-Gassensors und richtet sich an Schülerinnen und Schüler ab Klassenstufe 7. Der Kurs ist induktiv aufgebaut, d.h. es wird ausgehend von der Beobachtung der Sensorreaktion in Anwesenheit verschiedener Stoffe und Sensortemperaturen schrittweise ein theoretisches Modell zur Erklärung der Beobachtungen entwickelt. Die Schülerinnen und Schüler führen zunächst Messungen der Sensorreaktion in Anwesenheit einer mit Wasser, Apfelsaft und alkoholfreiem Bier gesättigten Atmosphäre durch. Diese Beobachtungen werden in anschließenden Theorieabschnitten begründet und so ein vereinfachtes Sensormodell erarbeitet. Des Weiteren wird in diesem Modul der Umgang mit einem Multimeter, die Aufnahme von Messwerten und die Darstellungsweise von Daten, speziell linear und logarithmisch, geübt. Erfahrungsgemäß dauert die Durchführung dieses Moduls ca. 90 Minuten.

Experimentelle Basis

Die Experimente zur Erklärung des Sensorprinzips werden von den Lernenden in Kleingruppen zu 2-3 Personen mittels einer Messplatine durchgeführt, an deren Unterseite ein MOX-Halbleiter-Gassensor (AS MLV P2, [28]) montiert ist, siehe Abbildung 6 oben. Zur Untersuchung der Sensorreaktion auf verschiedene Gase werden kleine Sturzgläser an einen Deckel an die Unterseite der Platine geschraubt. Dadurch können Gase bzw. Dämpfe gezielt und von störenden Einflüssen abgeschirmt an den Sensor gelangen. In Modul 1 untersuchen die Schülerinnen und Schüler die gesättigten Atmosphären („Headspace“) oberhalb der Flüssigkeiten Wasser, Apfelsaft und alkoholfreies Bier, siehe Abb. 6 unten.

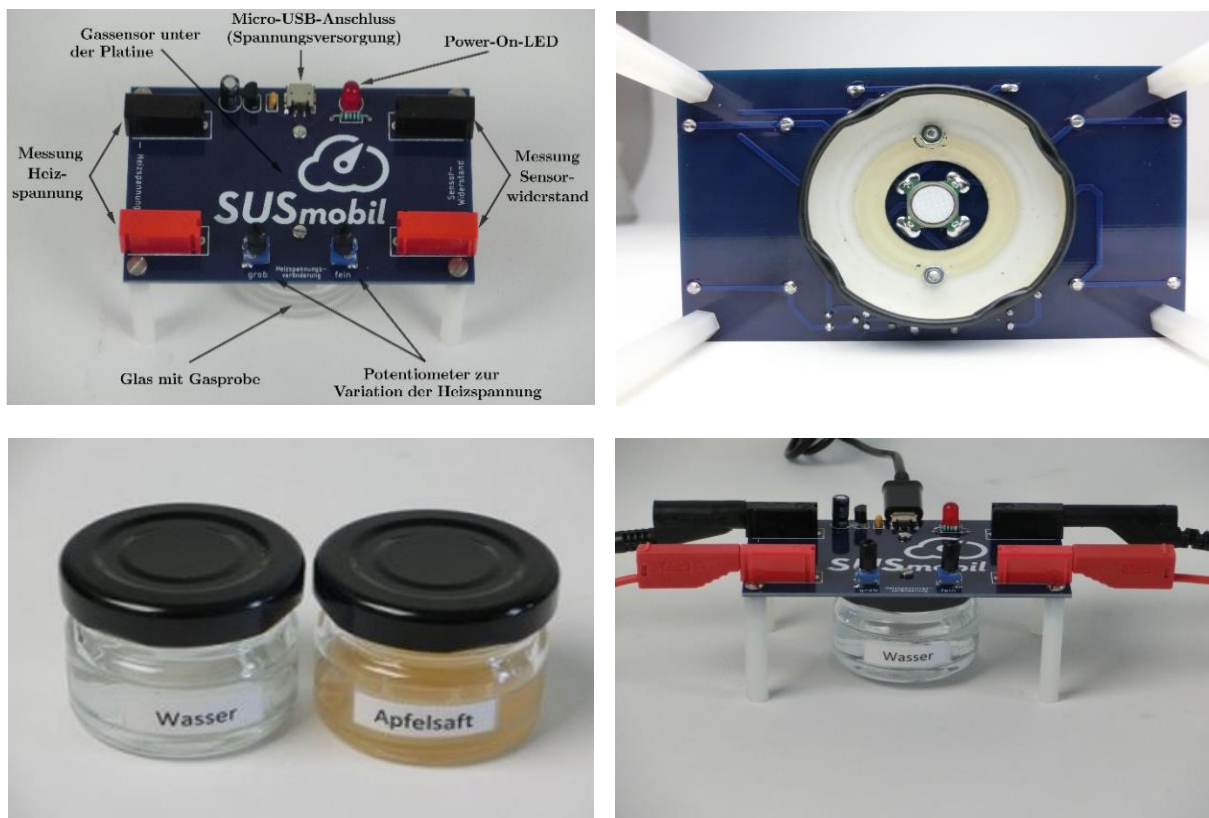


Abb. 6 Oben: Messplatine mit Probengefäß aus Glas. Dieses wird mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt und unter den Sensor geschraubt, die Reaktion des Sensors auf den sog. Headspace (Dampfraum über der Flüssigkeit) wird direkt mit einem Multimeter erfasst. Unten: Messproben und Anschluss an die Platine. Die Heizspannung für den Gassensor wird über ein USB-Netzteil bereitgestellt und kann durch Potentiometer manuell variiert und mit einem zweiten Multimeter erfasst werden.

Eine wichtige Variable im Zusammenhang mit der Sensitivität des Sensors ist dessen Temperatur. Sie kann durch zwei Potentiometer über eine regelbare Heizspannung etwa im Bereich von 60°C bis 400°C eingestellt werden. Über integrierte Leiterplattenbuchsen können ferner Multimeter angeschlossen werden, die das Auslesen der eingestellten Heizspannung und des Sensorwiderstandes ermöglichen. Die Stromversorgung erfolgt über einen Micro-USB-Anschluss.

Experimentierphase 1

In Experimentierphase 1 wird zunächst die Messplatine mit ihren einzelnen Komponenten beschrieben und das korrekte Anschließen der Multimeter behandelt. Anschließend sollen die Sensorreaktionen bei konstanten Heizspannungen (hier 1,2 V und 2,6 V) für die drei Stoffe Wasser, Apfelsaft und alkoholfreies Bier untersucht werden. Es zeigt sich, dass die Sensorreaktion sowohl für verschiedene Stoffe als auch bei verschiedenen Sensortemperaturen unterschiedlich ist, siehe Abbildung 7. Diese Beobachtungen liefern drei wichtige Erkenntnisse:

- 1) Die Sensorreaktion ist stoffabhängig
- 2) Die Sensorreaktion ist temperaturabhängig
- 3) Die Sensitivität und die Selektivität sind temperaturabhängig

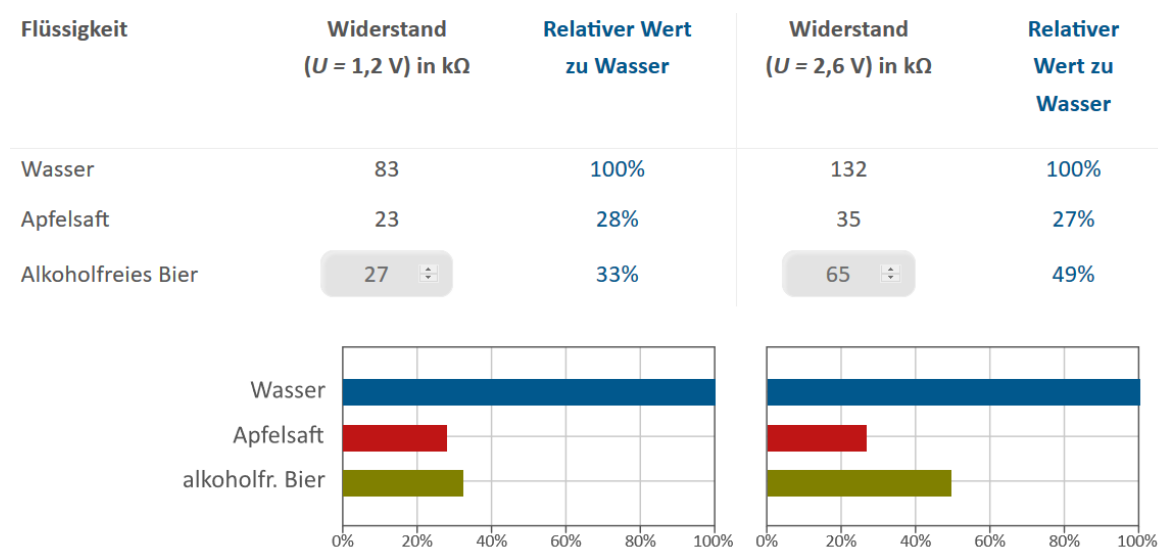


Abb. 7 Sensorreaktion und relativer Wert bezüglich Wasser bei Heizspannungen von 1,2 V (links) und 2,6 V (rechts). Bei 2,6 V Heizspannung können die drei Stoffe Wasser, Apfelsaft und alkoholfreies Bier besser voneinander getrennt werden.

Theoriephase 1

In Theoriephase 1 wird ein dem Wissensstand und Abstraktionsvermögen von Lernenden der Sekundarstufe 1 adäquates Modell eingeführt, welches ablaufende Prozesse auf der Oberfläche und von freien Elektronen im Inneren des Sensors erklärt, siehe Abbildung 8. Das entworfene Modell ist einerseits stark simplifiziert, andererseits im Rahmen seiner Anwendung dennoch tragfähig und auf den Fall einer variablen Sensortemperatur erweiterbar.

Das Modell beschreibt die Prozesse in drei Schritten

1. Sensor ohne Berücksichtigung von Einflüssen der Atmosphäre mit Sauerstoff

Liegt eine Spannung am Sensor an, so setzen sich die freien Ladungsträger (graue Punkte) in Bewegung: Es fließt ein Strom durch den Sensor.

2. Sensor in sauerstoffhaltiger Atmosphäre ohne reduzierendes Gas

Befindet sich Luft in der Umgebung, so adsorbiert Sauerstoff (blaue Punkte) an der Oberfläche des Sensors und bindet ursprünglich freie Ladungsträger. Die gebundenen Elektronen sind nicht mehr frei und tragen daher nicht mehr zum Ladungstransport bei, der Stromfluss sinkt.

3. Sensor in sauerstoffhaltiger Atmosphäre mit reduzierenden Gasen

Im Falle von reduzierenden Gasen (lila Punkte) kommt es zu Reaktionen mit dem Sauerstoff auf der Sensoroberfläche, der dadurch von der Oberfläche desorbiert. Die mit dem reduzierenden Gasen gebundenen Sauerstoffmoleküle geben die zuvor noch gebundenen Elektronen frei. Letztere stehen hierdurch wieder als freie Ladungsträger für den Ladungstransport zur Verfügung, der Stromfluss steigt.

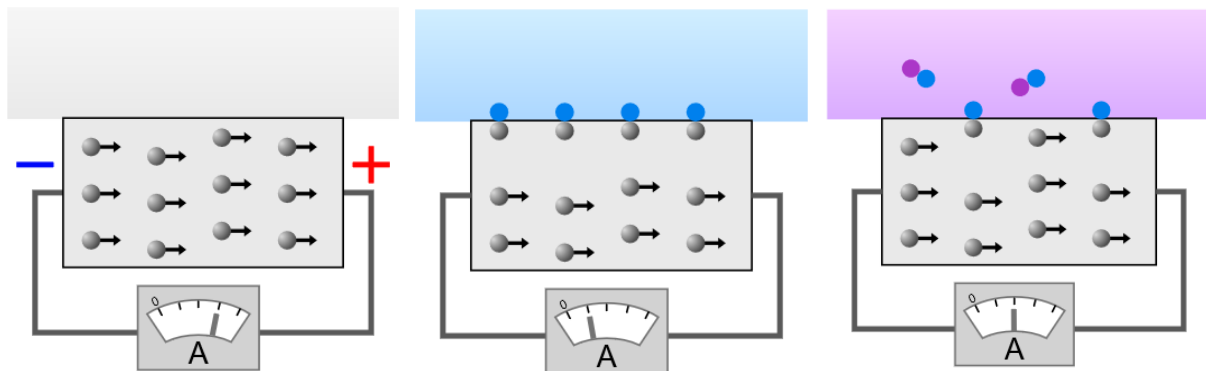


Abb. 8 Schüleradäquates Modell zur theoretischen Beschreibung der Funktion eines Halbleiter-Gassensors im thermisch statischen Zustand. Links: Sensor ohne Gasatmosphäre. Mitte: Sensor in Sauerstoffatmosphäre. Rechts: Sensor mit Sauerstoff und reduzierendem Gas.

Experimentierphase 2

Im zweiten Experimentierteil wird die Temperaturabhängigkeit der Sensorreaktion untersucht. Dazu wählen die Schülerinnen und Schüler*innen neben Wasser einen der zwei anderen Stoffe (Apfelsaft, alkoholfreies Bier) aus. Beginnend bei einer Heizspannung von 2,8 V verringern sie diese in 0,2 Volt-Schritten und nehmen jeweils den Sensorwiderstand auf. Die Messwerte können direkt in das Selbstlernprogramm eingetragen und dort in linearer oder logarithmischer Darstellungsweise grafisch dargestellt werden. Die Messdaten unterscheiden sich für die drei Stoffe sowohl in der Größenordnung als auch in der Form der Messkurve, wodurch sie eindeutig unterschieden werden können. Alle Stoffe zeigen jedoch einen prinzipiell „parabelförmigen“ Verlauf, siehe Abbildung 9.

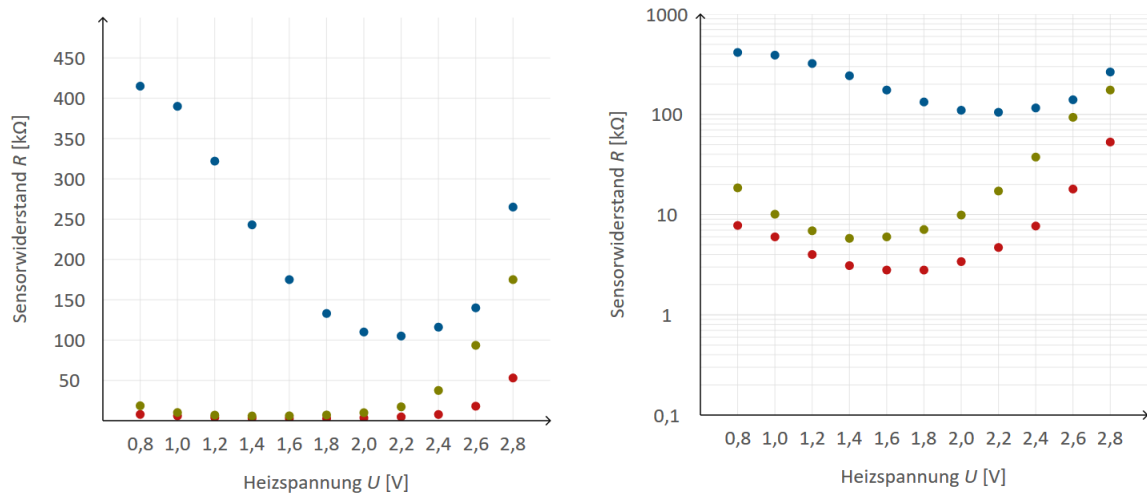


Abb. 9 Sensorwiderstand über Wasser (blau), Apfelsaft (rot) und alkoholfreiem Bier (grün) bei unterschiedlichen Heizspannungen. Links: lineare Darstellung. Rechts: logarithmische Darstellung.

Theoriephase 2

In der zweiten Theoriephase werden die Beobachtungen aus Experimentierphase 2 physikalisch und chemisch erklärt. Dazu wird das bekannte Modell aus Theoriephase 1 um die Komponente der Sensortemperatur erweitert, siehe Abbildung 10.

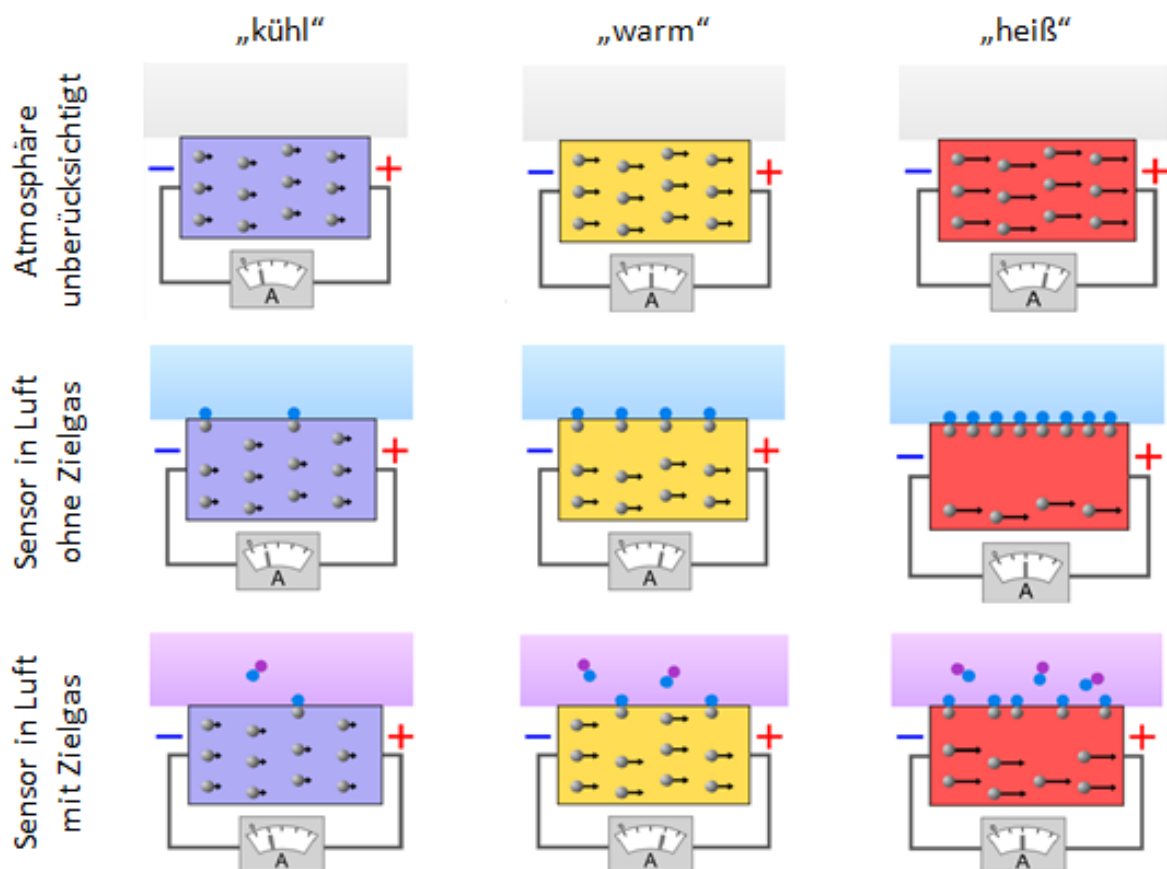


Abb. 10 Vereinfachtes theoretisches Modell zur Erklärung der Sensorreaktion bei unterschiedlichen Sensortemperaturen und Gasatmosphären.

Die Sensorreaktion wird dabei maßgeblich durch zwei entgegengesetzte Effekte bestimmt. Einerseits nimmt die Wahrscheinlichkeit der Elektronen zur Überwindung der Energiebarriere an den Korn-Korn-Grenzen mit steigender Temperatur zu; im Modell wird dies durch eine erhöhte Geschwindigkeit der Elektronen dargestellt. Andererseits steigt die Ionosorption des Sauerstoffs mit der Temperatur, sodass weniger Elektronen zum Ladungstransport beitragen. Bei niedrigen Temperaturen bestimmt die niedrige Geschwindigkeit der Elektronen das Verhalten, sodass nur ein geringer Strom und demnach ein hoher Widerstand herrscht. Bei hohen Temperaturen überwiegt dagegen der Effekt der Bindung freier Elektronen durch den Sauerstoff an der Oberfläche, was ebenfalls zu einem hohen elektrischen Widerstand führt. In einem mittleren Temperaturbereich dominiert dagegen die Reaktion des Sauerstoffs mit dem reduzierenden Gas und der Sensor erreicht eine besonders hohe Sensitivität.

Zusammenfassung

Im zweiten Experiment wird gezeigt, dass die Selektivität des Sensors, also seine Fähigkeit zur Unterscheidung verschiedener Gase, durch die Variation der Sensortemperatur maßgeblich erhöht werden kann. Dieses Konzept bildet die Grundlage zum Verständnis des „temperaturzyklischen Betriebs“ zur Steigerung der Selektivität und Sensitivität eines MOX-Halbleiter-Gassensors für die Messung von Gasen. Modul 1 bildet somit sowohl Grundlage als auch Motivation zur quantitativen Bestimmung der Konzentration von Gasen.

Modul 2 – Kalibrierung von MOX-Halbleiter-Gassensoren

Das zweite Lernmodul bietet den Schülerinnen und Schülern einen Einblick in moderne Verfahren der Kalibrierung von Sensoren am Beispiel von MOX-Halbleiter-Gassensoren. Im Gegensatz zu Modul 1, wo verschiedene Stoffe qualitativ unterschieden werden, liegt der Fokus in Modul 2 auf der quantitativen Messung verschiedener Konzentrationen eines einzelnen Stoffes, und zwar Ethanol. Das zuvor in Modul 1 erarbeitete Sensormodell wird um den temperaturzyklischen Betrieb erweitert. Durch die Behandlung der Themen Datenanalyse, Merkmalsextraktion und mathematische Modellbildung mittels neuronaler Netze wird ein umfassendes Bild der Funktionsweise preiswerter Luftqualitätssensoren vermittelt. Aufgrund des größeren und komplexeren Themenumfangs als in Modul 1 richtet sich dieses Modul an Schülerinnen und Schüler ab Klassenstufe 9. Erfahrungsgemäß dauert die Durchführung dieses Moduls ca. 150 Minuten.

Experimentelle Basis

Als experimentelle Basis für die Kalibrierung eines MOX-Halbleiter-Gassensors auf verschiedene Ethanol-Konzentrationen dienen eine Gasvorratskammer (GVK) und eine Messkammer (MK) mit integrierter Sensorplatine. Die Sensorplatine ist mit dem SnO₂-basierten MOX-Halbleiter Gassensor BME680 von Bosch [29] und dem Mikrocontroller ESP32 [30] bestückt. Über eine frei verfügbare Bibliothek von Adafruit kann der Sensor über eine I²C-Schnittstelle ausgelesen und gesteuert werden [31]. Die Stromversorgung des Mikrocontrollers erfolgt über ein USB-Kabel, das in die MK reicht.

Die Rahmen der GVK und MK sind aus Aluminiumprofilen gefertigt, siehe Abbildung 11. Weiterhin sind die Scheiben aus Acrylglas. Die GVK hat die Maße 25 cm x 50 cm x 50 cm und ein Volumen von 62,5 l. Die MK hat die Abmessung 10 cm x 10 cm x 10 cm und damit ein Volumen von 1 l. In der GVK befindet sich eine Heizplatte, auf der flüssiges Ethanol verdampft werden kann, und zwei Ventilatoren, die eine homogene Durchmischung des Gasgemischs in der Kammer sicherstellen. An der Oberseite der GVK und der MK sind wiederverschließbare Öffnungen (medizinische Septa) integriert. Mittels einer Spritze kann so ein gewisses Volumen des Ethanol-Luft-Gemischs aus der GVK entnommen werden und in die MK überführt werden. Aufgrund der Abmessungen wird die Ethanol-Konzentration bei der Überführung von 1 ml aus der GVK in die MK um den Faktor 1.000 verdünnt.

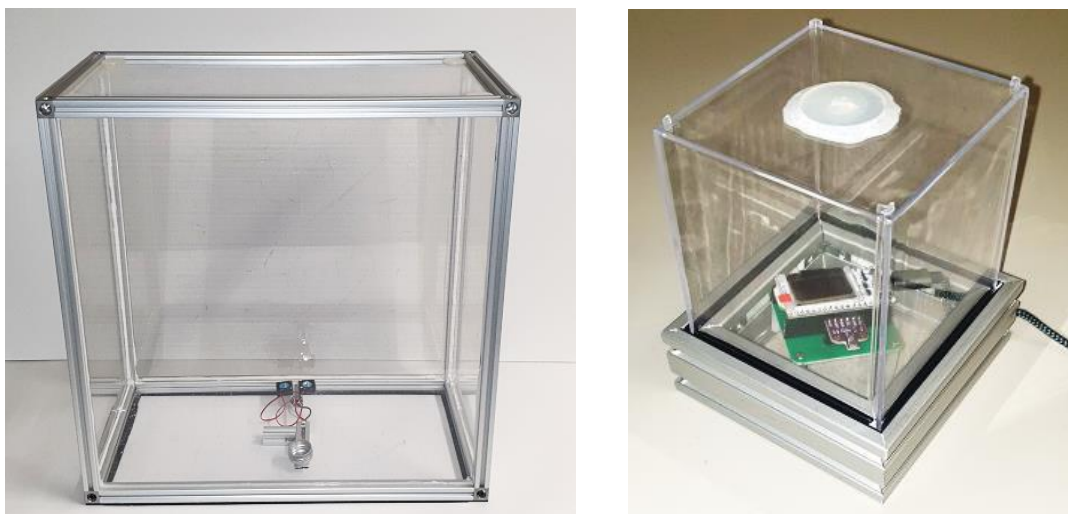


Abb. 11 Experimenteller Aufbau zur Durchführung der Kalibrierung eines MOX-Halbleiter-Gassensors. Links: Gasvorratskammer zur Erzeugung einer bekannten Ethanol-Konzentration. Rechts: Messkammer mit Sensor und Mikrocontroller.

Der Kurs ist als HTML-basierter Selbstlernkurs konzipiert. Dieser enthält Informationen, Animationen, Simulationen und Arbeitsanweisungen zum Thema Kalibrierung.

Die Datenaufnahme und -verarbeitung erfolgt über eine zusätzliche JAVA-basierte Software, siehe Abbildung 12. In dieser werden die Rohdaten des Sensors in Echtzeit visualisiert und können verarbeitet werden. Die Bauanleitungen für GVK und MK, die Platine für den Sensor sowie die Messsoftware sind frei zugänglich [32].

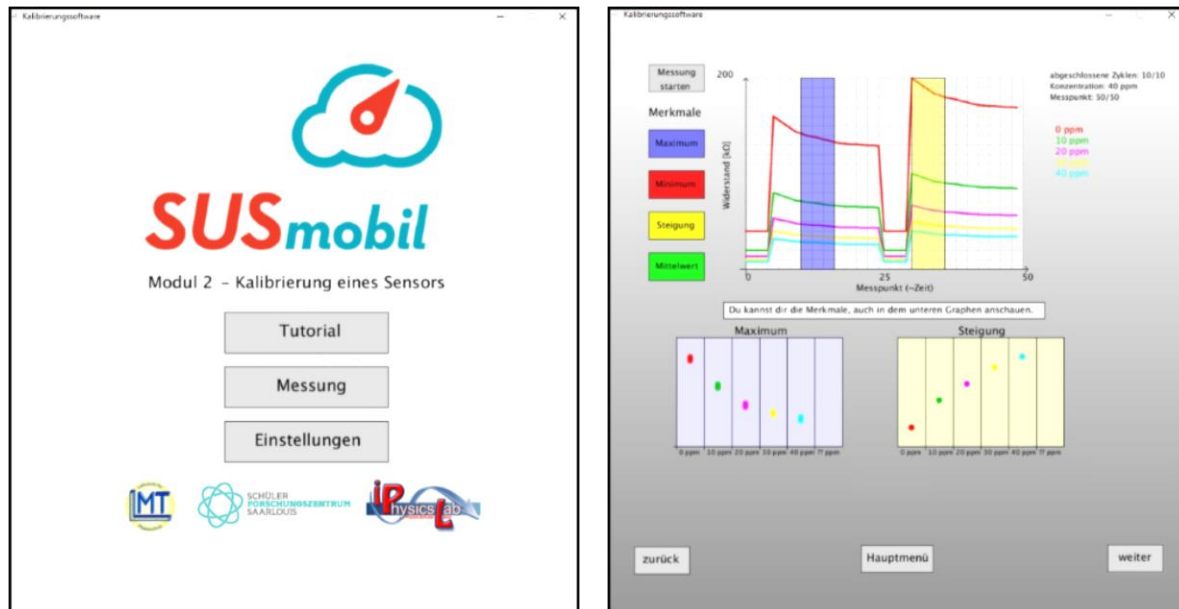


Abb. 12 Screenshot der Kalibriersoftware. Links: Hauptmenü. Rechts: Tutorial.

Die verarbeiteten Messdaten werden schließlich in den HTML-basierten Selbstlernkurs übertragen, der ein mathematisches Modell zur Verknüpfung der Sensordaten mit den Ethanol-Konzentrationen erzeugt.

Wandlung und Zuordnung

Um den Einstieg in das Thema zu erleichtern, erarbeiten die Schülerinnen und Schüler Konzepte zur Kalibrierung einleitend an einem virtuellen Flüssigkeitsthermometer und übertragen ihr Wissen anschließend auf den Halbleiter-Gassensor.

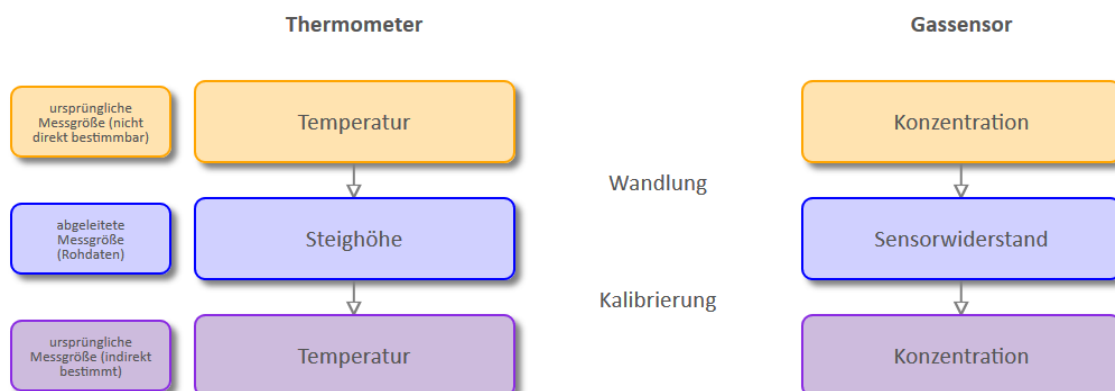


Abb. 13 Prinzip einer Kalibrierung an den Beispielen Thermometer und Gassensor.

Mit einem Flüssigkeitsthermometer wird die Temperatur indirekt über die Höhe der Flüssigkeitssäule bestimmt. Für den Übergang von der durch menschliche Sinne nicht direkt bestimmbaren Temperatur zur leicht ablesbaren Steighöhe wird der Begriff „Wandlung“ eingeführt. Die inverse Zuordnung Steighöhe → Temperatur stellt die Kalibrierung des Thermometers dar. Ihre Anwendung ist durch eine Skala am Thermometer einfach möglich.

Analog kann die Konzentration eines Gases nicht direkt bestimmt werden, sodass diese in eine (technisch) messbare Größe, den Sensorwiderstand, gewandelt werden muss. Ziel der Kalibrierung des Halbleiter-Gassensors ist das Auffinden einer reliablen Zuordnung Sensorantwortmuster → Konzentration (siehe Abbildung 13) und deren einfache Anwendung, die im Falle des technischen Sensors durch computergestützte Signalverarbeitung gelingt.

Vertiefung von Modul 1

Relaxationsprozesse auf der Oberfläche sorgen dafür, dass sich der Sensorwiderstand bei abrupter Temperaturänderung erst nach einiger Zeit einem konstanten Wert annähert. Im Modell aus Modul 1 kann dies dadurch verstanden werden, dass sich zwar die Geschwindigkeit der Elektronen bei abrupter Temperaturänderung instantan ändert, die Bedeckung der Sensoroberfläche mit Sauerstoff jedoch erst allmählich einen Gleichgewichtszustand erreicht. Der Prozess des temperaturzyklischen Betriebs ist in Abbildung 14 gezeigt.

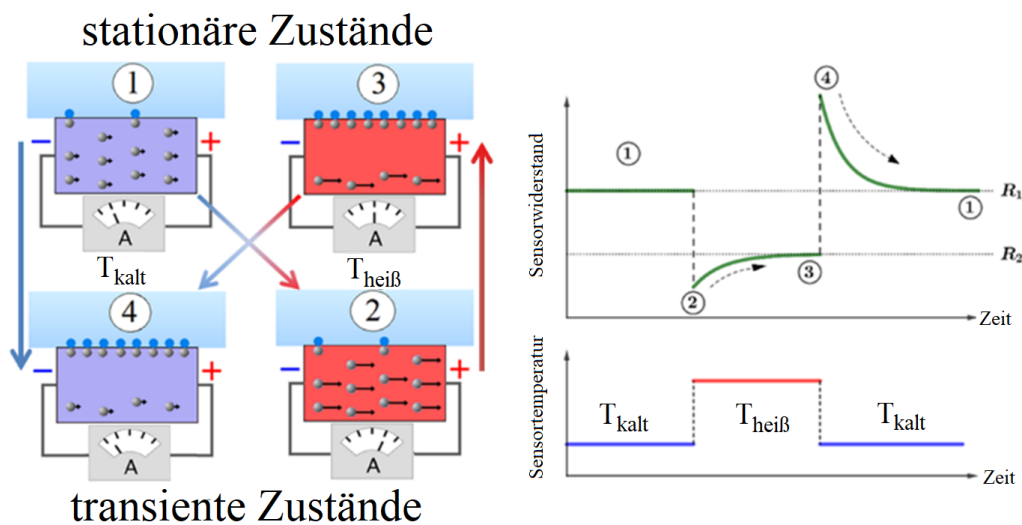


Abb. 14 Schematische Darstellung eines temperaturzyklischen Sensorbetriebs. Links: Stationäre und transiente Zustände. Rechts: Widerstandsverlauf über die Zeit, hervorgerufen durch abrupte Temperaturänderungen.

1) Zustand $T = T_{\text{kalt}}$

Der Sensor befindet sich bei niedrigen Temperaturen in einem stationären Zustand. Die Leitfähigkeit hat einen konstanten Wert.

1) → 2) Übergang $T_{\text{kalt}} \rightarrow T_{\text{heiß}}$

Der abrupte Wechsel von einer tiefen zu einer hohen Temperatur sorgt dafür, dass die Geschwindigkeit der Elektronen instantan ansteigt. Dadurch steigt der elektrische Leitwert an, der elektrische Widerstand sinkt. Der Temperaturwechsel ist dabei viel schneller als die Relaxation der Oberflächenzustände.

2) → 3) Zustand $T = T_{\text{heiß}}$

Nach einer gewissen Zeit stellt sich, abhängig von Temperatur und Gasart, ein neues Gleichgewicht zwischen ad- und desorbiertem Sauerstoff auf der Oberfläche ein. Die Zahl der freien Ladungsträger bleibt konstant, wodurch sich der elektrische Leitwert und der elektrische Widerstand nicht mehr ändern.

3) → 4) Übergang $T_{\text{heiß}} \rightarrow T_{\text{kalt}}$

Der abrupte Wechsel von hohen zu tiefen Temperaturen sorgt analog zu dem Übergang von niedrigen zu hohen Temperaturen dafür, dass die Geschwindigkeit der freien Ladungsträger instantan sinkt. Dadurch verringert sich auch der elektrische Leitwert und der elektrische Widerstand steigt. Erneut ist der Temperaturwechsel viel schneller als die Relaxation der Oberflächenzustände.

4) → 1) Zustand $T = T_{\text{kalt}}$

Nach einer gewissen Zeit stellt sich erneut ein Gleichgewicht ein und der Zyklus beginnt von vorne.

Konzeptionell wesentlich ist zudem, dass der zeitliche Verlauf des Widerstands nach einem Temperatursprung Informationen über die Gaszusammensetzung enthält und insbesondere abhängig von der Konzentration des bzw. der reduzierenden Gase ist.

Merkmalsextraktion

Aufbauend auf der Erkenntnis, dass der Widerstandsverlauf des Sensors bei Variation der Sensortemperatur weitere Informationen über Gasart und Gaskonzentration enthält, wird den Schülerinnen und Schülern das Prinzip und Ziel der Merkmalsextraktion nähergebracht. Anstelle einer globalen Betrachtung des Kurvenverlaufes werden Kurvenmerkmale in einzelnen Abschnitten oder Zeitpunkten extrahiert, mit denen ein Zusammenhang zur Konzentration hergestellt werden kann. Zur Quantifizierung der Widerstands-Zeit-Kurven werden in Modul 2 zwei der vier Merkmale „Maximum“, „Minimum“, „Mittelwert“ und „Steigung“ verwendet.

Typische Sensorreaktionen nach einem Temperatursprung zeigt Abbildung 15 schematisch einschließlich einer Andeutung der Extraktion verschiedener Kurvenmerkmale.

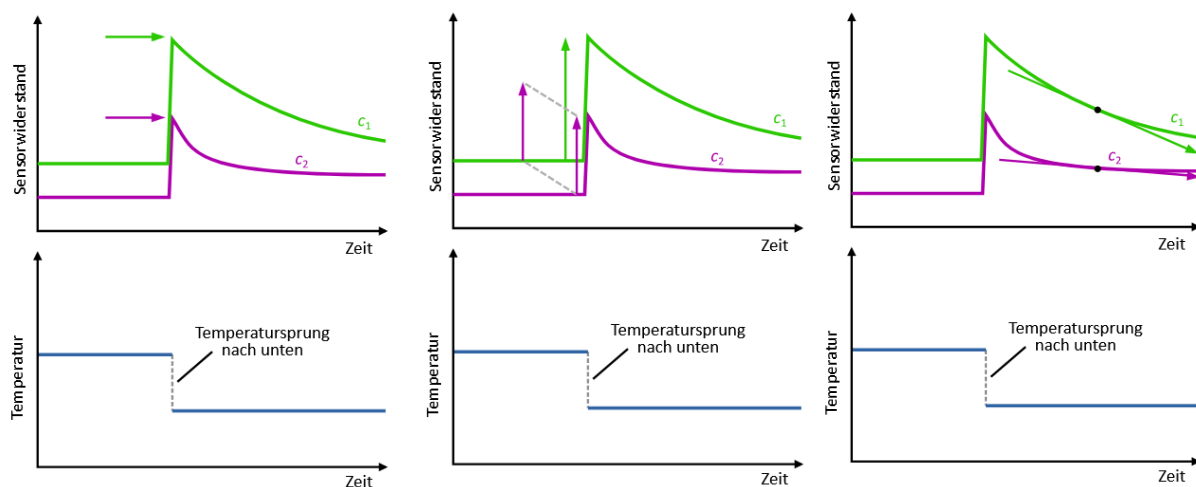


Abb. 15 Widerstandsverläufe eines Halbleiter-Gassensors bei verschiedenen Konzentrationen und einem Temperatursprung (schematisch). In den Verläufen ist die Extraktion von Kurvenmerkmalen (z. B. Maxima oder Steigungen) angedeutet.

Experimenteller Aufbau und Durchführung

Jede Gruppe, bestehend aus 2-3 Personen, erhält eine MK mit dem integrierten MOX-Halbleiter-Gassensor BME680. In der GVK wird ca. 2 ml flüssiges Ethanol verdampft und so eine definierte Ethanol-Konzentration erzeugt. Anschließend kann mit einer Spritze eine gewisse Menge des Ethanol-Luft-Gemischs entnommen und in die MK überführt werden. Dadurch erhöht sich nach und nach die Ethanol-Konzentration in der MK. Der Mikrocontroller betreibt den Sensor mit einem einfachen Temperaturzyklus und gibt die Messwerte digital an einen PC aus. Dort werden die Daten in Form von Widerstands-Zeit-Verläufen in Echtzeit grafisch dargestellt. Die Komponenten des Versuchsaufbaus sind in Abbildung 16 schematisch dargestellt.

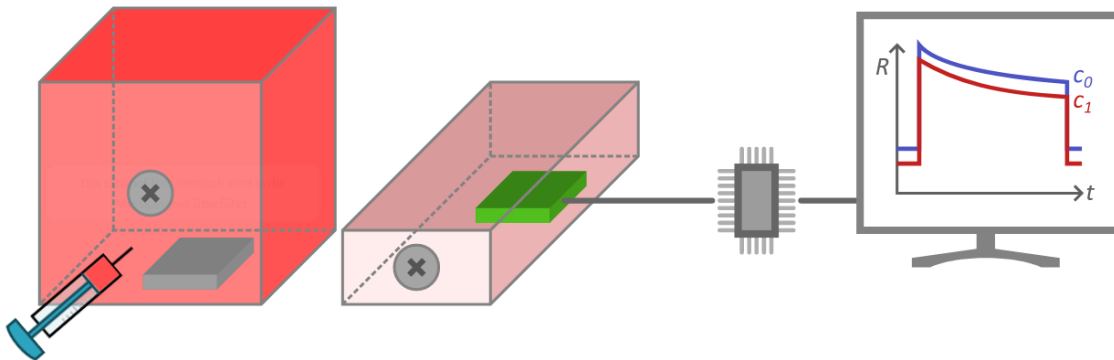


Abb. 16 Schematischer Versuchsaufbau zur Kalibrierung eines Halbleiter-Gassensors. V.l.n.r.: Gasvorratskammer, Messkammer mit Gassensor, Mikrocontroller, Mess-Software.

Für die Kalibrierung werden jeweils Rohdaten von 10 Temperaturzyklen für je 5 Konzentration im Bereich zwischen 0 und 40 ppm aufgenommen. Anschließend bestimmen die Schülerinnen und Schüler die besonderen Merkmale (Maximum, Minimum, Mittelwert und Steigung in einem definierten Messintervall) dieser Kurven in der Software, siehe Abbildung 17. Diese werden anschließend automatisch in den HTML-Kurs geladen und dienen im weiteren Verlauf für die Erstellung eines mathematischen Modells zur Vorhersage der Ethanol-Konzentration.

Das Konzept der mathematischen Modellerstellung zur Vorhersage einer unbekanntem Konzentration anhand aufgenommener Merkmale wird den Schülerinnen und Schülern anhand eines intuitiven Beispiels vermittelt: Ist es möglich das Gewicht (G) einer Person anhand der Merkmale Körpergröße (KG) und Hüftumfang (HU) vorherzusagen?

Um den Sachverhalt zu untersuchen, erhalten sie einen hypothetischen Datensatz, bestehend aus 5 Gewicht-, Körpergrößen- und Hüftumfang-Werten. Als mathematisches Modell dient das einfache lineare Modell der gewichteten Summe mit den Gewichtungsfaktoren g_1 und g_2 :

$$G = g_1 \cdot KG + g_2 \cdot HU$$

Das resultierende lineare Gleichungssystem aus 5 Gleichungen und 2 Unbekannten ist überbestimmt und besitzt im Allgemeinen keine Lösung. Dennoch ist es möglich, eine Kombination der Gewichtungsfaktoren g_1 und g_2 auszuwählen, bei denen die mittlere quadratische Abweichung minimal ist. Diese Lösung wird als „am wenigsten falsche Lösung“ bezeichnet. In dem Selbstlernkurs können die Schülerinnen und Schüler die Gewichtungsfaktoren variieren und erhalten direktes grafisches Feedback des Modells, siehe Abbildung 18. Dadurch können sie den prinzipiellen Lernprozess eines künstlichen neuronalen Netzes nachstellen.

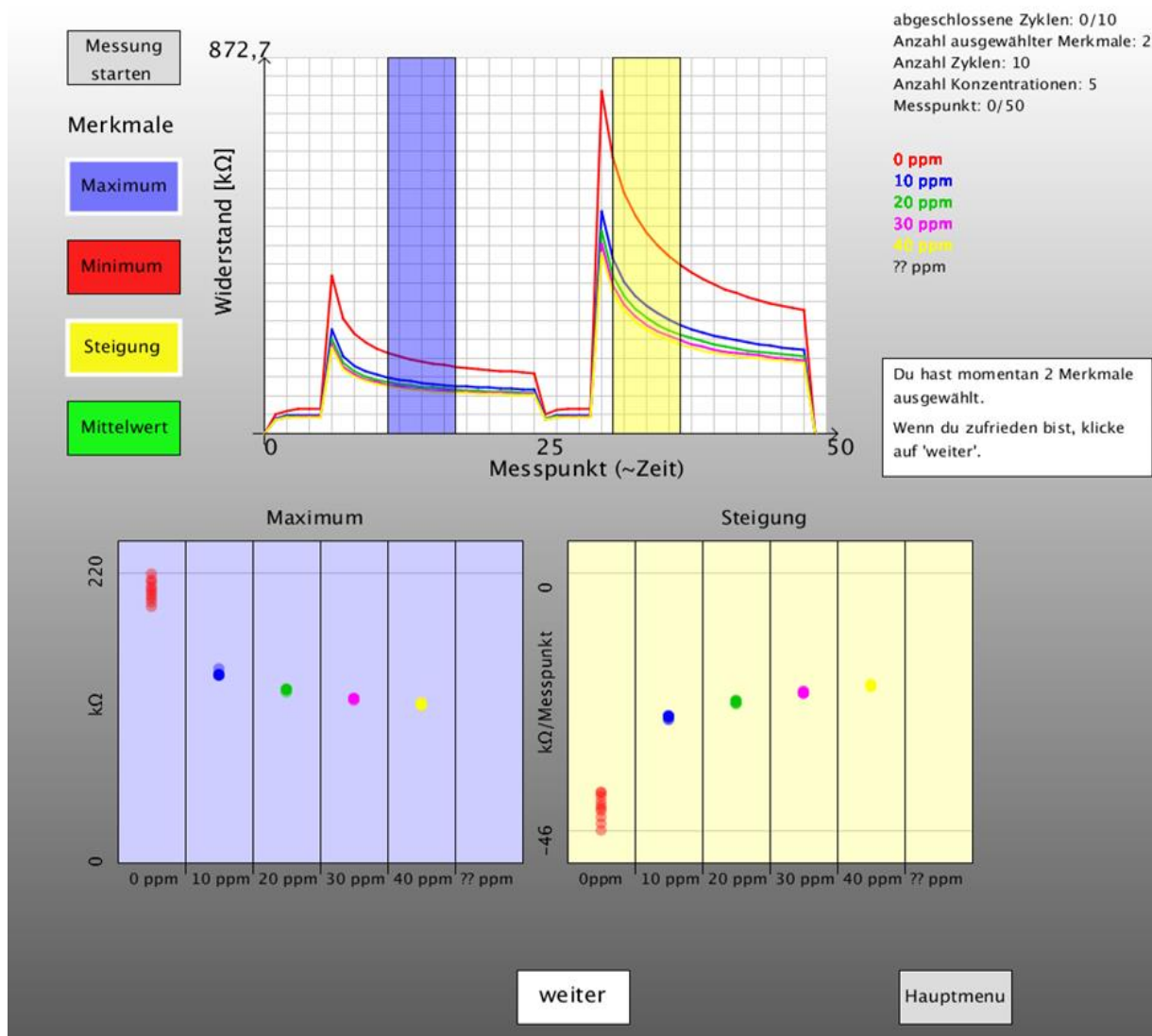


Abb. 17 Screenshot der Mess- und Kalibriersoftware.

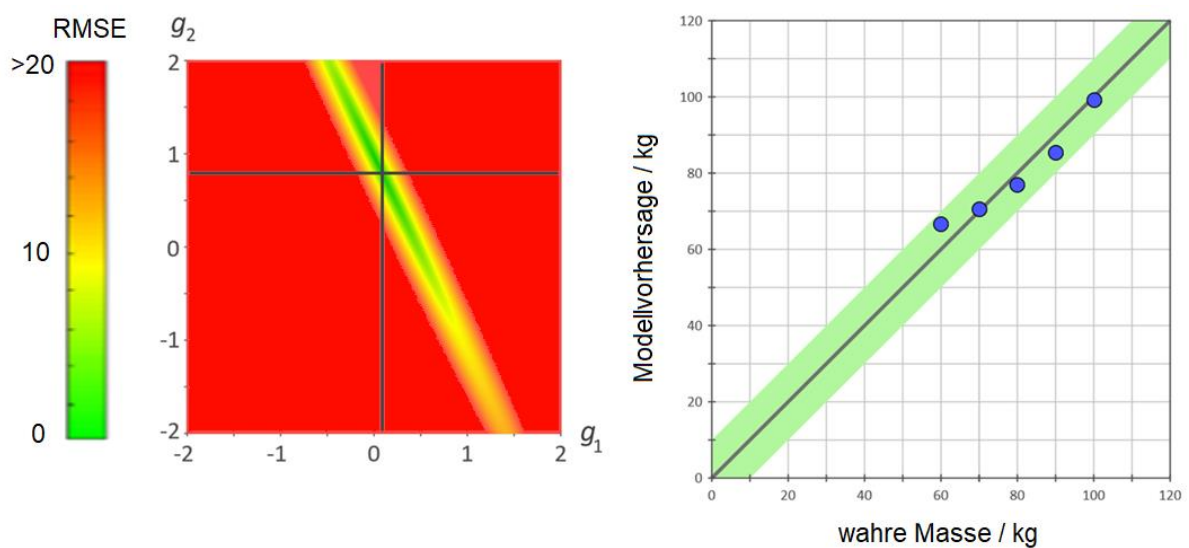


Abb. 18 Bestimmung der „am wenigsten falschen Lösung“. Links: Kombination auf den Gewichtungsfaktoren g_1 und g_2 . Der grüne Bereich zeigt eine akzeptable Kombination an. Rechts: Vorhersage des Modells auf Grundlage der gewählten Gewichtungsfaktoren.

Im nächsten Schritt widmen sie sich wieder der Modellerstellung für die Kalibrierung des Gassensors und verfolgen den Lernprozess des künstlichen neuronalen Netzes in Echtzeit auf Grundlage der von ihnen bestimmten Merkmale. Das Training, das auf dem Standard-Backpropagation-Algorithmus basiert, stoppt automatisch nach 10.000 Iterationen. In der Regel gelingt es dem neuronalen Netz aufgrund der geringen Menge an Trainingsdaten schließlich, ein nahezu optimales Modell zu finden. Bei ungeeigneten Merkmalen dauert dieser Prozess jedoch tendenziell länger, siehe Abbildung 19. Daher führen geeignetere Merkmale zu einem besseren Modell.

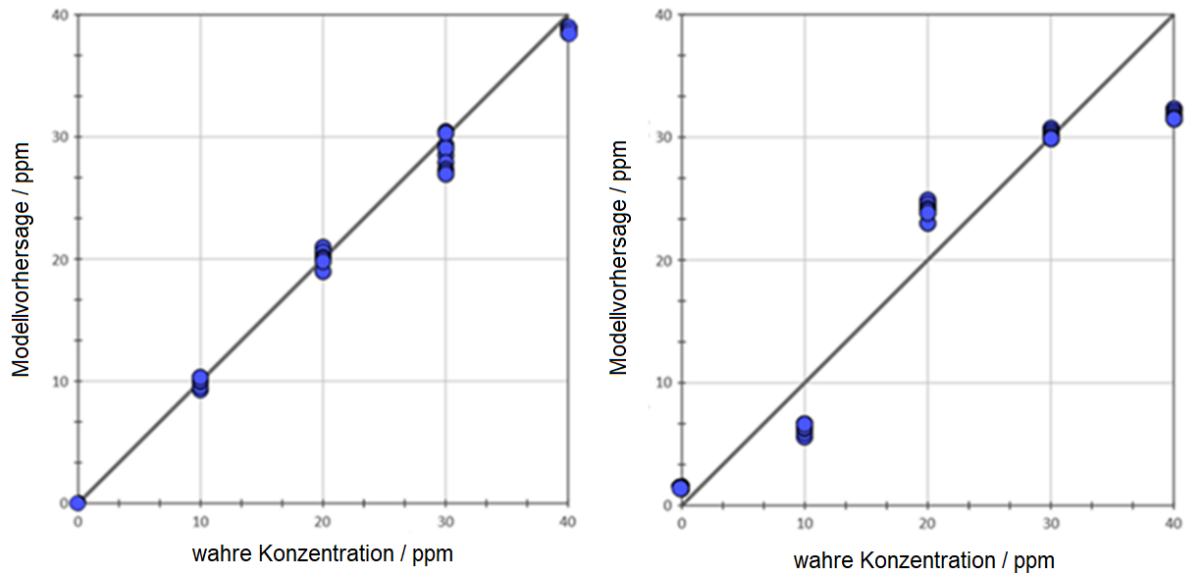


Abb. 19 Vorhersage der Gaskonzentration mit Hilfe eines künstlichen neuronalen Netzes nach 10.000 Trainingsiterationen mit mehr (links) und weniger (rechts) geeigneten Merkmalen. Die schwarze Linie zeigt das ideale Modell an.

Schließlich können die verschiedenen Schülergruppen ihre Trainingsdaten, ausgewählte Merkmale und die daraus resultierenden Modelle untereinander vergleichen und die Merkmale einer unbekannt Konzentration aufzeichnen. Diese Merkmale können in das erstellte Modell gegeben werden, um die unbekannt Konzentration vorherzusagen.

Modul 3 - Umweltmesstechnik

Nachdem sich die ersten beiden Lernmodule mit der Funktionsweise und der fachgerechten Kalibrierung eines MOX-Halbleiter-Gassensors zur Detektion von flüchtigen organischen Verbindungen befasst haben, steht im dritten Lernmodul die Messung von Luftschadstoffen mit verschiedenen Sensortypen im Vordergrund. In vier Lernstationen lernen die Schülerinnen und Schüler ab der Klassenstufe 7 die Funktionsweise von CO₂- und Feinstaubsensoren kennen. In jeder Station steht ein anderer Sensortyp im Vordergrund. Für die Durchführung dieses Moduls ist mit einer Dauer von ca. 120 Minuten zu rechnen.

Experimentelle Basis

Als experimentelle Basis dient eine Platine, die mit dem VOC-Sensor SGP30 [33], dem CO₂-Sensor SCD30 [34] und dem Feinstaubsensor SPS30 [35] von Sensirion bestückt sind, siehe Abbildung 20. Die Sensoren werden über eine I²C-Schnittstelle mit einem ESP8266 NodeMCU v3 Mikrocontroller [36] angesteuert und ausgelesen. Die Programmierung erfolgt über die Arduino IDE mit frei verfügbaren Bibliotheken von Adafruit [37], [38], [39]. Über ein Mikro-USB-Kabel werden die Daten an eine im Rahmen des Projektes entwickelte Messsoftware übertragen.

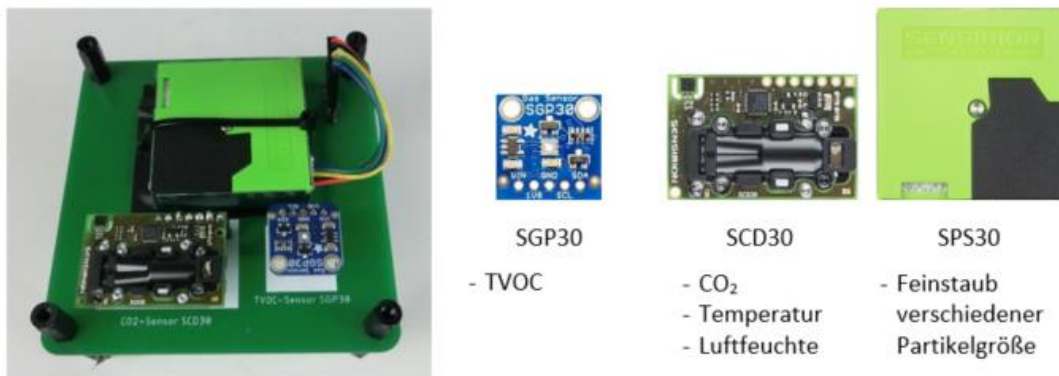


Abb. 20 Links: Platine mit TVOC-, CO₂- und Feinstaubsensoren. Rechts: Sensoren und Messgrößen.

Durch ein Stecksystem können Sensoren (z. B. bei Defekten) einfach gewechselt werden. Im Unterschied zu den Modulen 1 und 2 ist Modul 3 nicht als HTML-Selbstlernkurs konzipiert. Stattdessen wird der experimentelle Teil durch eine Broschüre begleitet, in welcher sich Arbeitsaufträge, Aufgaben und Zusatzmaterialien befinden. Weiterhin dient die Broschüre zur Dokumentation der Messergebnisse. Abbildung 21 zeigt beispielhaft eine Doppelseite der Broschüre.

Die Visualisierung der Messdaten erfolgt über eine dafür entwickelte Messsoftware. Diese enthält neben der einfachen Darstellung von Sensordaten über Zeit oder gegeneinander auch ein integriertes Tutorial und detaillierte Anleitungen zu den einzelnen Stationen.

Einführung

Zu Beginn des Lernmoduls erhalten die Schülerinnen und Schüler einen Einblick in die relevanten Messgrößen der Luftqualität (CO₂, TVOC und Feinstaub). Zu jeder Messgröße werden Quellen, gesundheitliche Gefahren, Grenzwerte und Vermeidungsstrategien erläutert. Thematisch liefert CO₂ den Einstieg, da dieses Molekül den meisten Lernenden als Treibhausgas bekannt ist, siehe Abbildung 22. Es wird darauf hingewiesen, dass CO₂ erst ab Konzentrationen im Prozent-Bereich eine gesundheitliche Gefahr darstellt. Dennoch kann es auch im Kontext der Innenraumluftqualität als **Indikator** für die gesundheitsschädlichen flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC) eingesetzt werden.

Station 2 TVOC

Hohe Konzentration
niedrige Konzentration

Riechen Versuch 1

Riechen Versuch 2

korrekte Reihenfolge

Sensor Versuch 1

Fragt den Betreuer nach der korrekten Reihenfolge und trägt auch diese in die Kästchen der mittleren Zeile ein.

Habt ihr beide Male richtig gelegen? Glückwunsch. Der Sensor kann dann immerhin noch ausgleichen. Mal sehen, wie er sich schlägt.

Navigiert in der Software Stationen → Station 2 – Mensch vs. Sensor. Platziert für die Messungen ein geöffnetes Einmachglas in den Plexiglaswürfel. Stellt anschließend das Sensorboard, wie in Abbildung 4 gezeigt, darüber.

Begründet, wieso es sinnvoll ist, Luftsensoren zu benutzen.

Station 2 TVOC

Auftrag 2 – TVOC-Duelle

Für viele Produkte des Alltags gibt es außer herkömmlichen Angeboten auch solche, die in Punkto Umwelt- und Verbraucherschutz bessere Alternativen darstellen. Ein Beispiel: Herkömmliche Farben nutzen giftige Lösungsmittel, die ungesunde flüchtige organische Verbindungen (VOC'S) ausgasen. Bei Farben auf Wasserbasis ist die Ausgasung geringer und die VOCs sind weniger gefährlich. In dieser Station lassen wir vier „herkömmliche“ gegen vier „alternative“ Produkte in TVOC-Duellen antreten. Halten die alternativen Produkte, was sie versprechen?

Zunächst die Riechprobe mit der Nase...

Navigiert in der Software auf Stationen → Station 2 – TVOC-Duelle. Bewertet die Gerüche der acht Proben mit Punkten zwischen **0 (nicht wahrnehmbar)** und **6 (extrem stark)**.

Tragt die von euch vergebenen Punkte in die Felder der Tabelle ein.

	herkömmliche Produkte		vs.	emissionsarme Vergleichsprodukte	
	Nase	Sensor		Nase	Sensor
Farben	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	vs.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Filzstifte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	vs.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kleber	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	vs.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Böden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	vs.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Und nun mal sehen, was der Sensor „riecht“...

Legt nach und nach die acht Proben in die Plexiglasbox und stellt den Sensor darüber. Wartet jeweils bis das Sensorsignal näherungsweise konstant

Tragt die vom Sensor vergebenen Punkte in die Felder der Tabelle ein.

Abb. 21 Doppelseite der unterstützenden Broschüre.

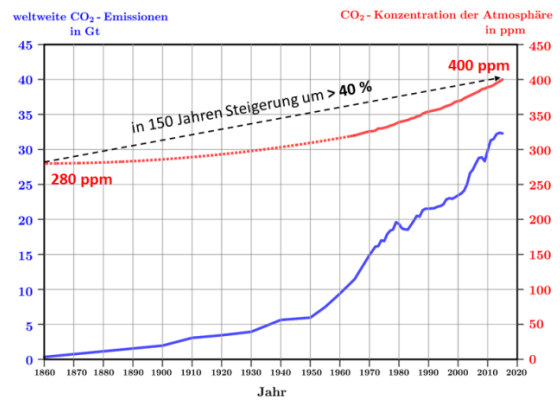
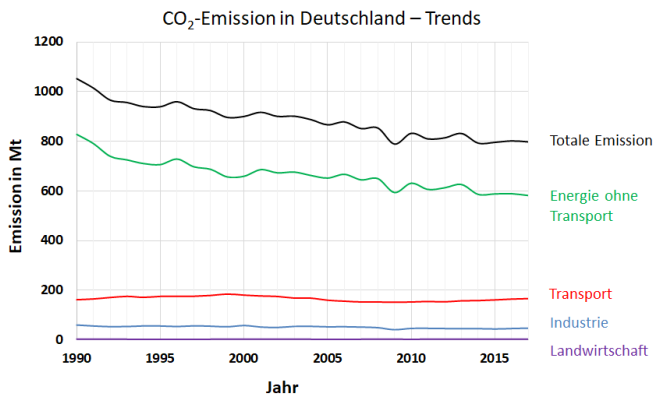


Abb. 22 CO₂-Emission der letzten 30 Jahre in Deutschland (links) und weltweit (rechts, blau) sowie Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre von 1860 bis 2015 (rechts, rot).

Ist der Mensch einzige Quelle für TVOC in einem Raum, so korrelieren die Konzentrationen von CO₂ und TVOC, siehe Abbildung 23 links, wodurch die Pettenkofer-Grenze, eine Empfehlung zum Lüften ab einer CO₂-Konzentration von 1.000 ppm, ihre Berechtigung erhält. Die Korrelation zwischen CO₂ und TVOC führt im Folgenden auf die flüchtigen organischen Verbindungen, siehe Abbildung 23 rechts. Neben den Quellen wird auf die konkreten gesundheitlichen Gefahren wie Reizungen der Schleimhäute, Entzündungen im Atemtrakt, Kopfschmerzen, Müdigkeit bis hin zur Krebserzeugung hingewiesen.

Schließlich wird auf das Thema Feinstaub eingegangen. Zunächst wird erläutert, was unter dem Begriff verstanden wird. Anschließend werden beispielhaft sowohl natürliche (Pollen, Vulkanausbrüche oder Erosion von Gestein) als auch anthropogene Quellen (Industrie, Verkehr oder Feuerwerk) aufgezählt.

Das Thema Feinstaub bietet durch Themen wie Feinstaubalarm in Stuttgart und Waldbrände in Australien einen aktuellen Kontext. Die Gefahren, die durch Feinstaub ausgehen, sind den meisten Schülerinnen und Schülern aber noch wenig bekannt. Aus diesem Grund wird auch auf die gesundheitlichen Auswirkungen von Feinstaub und aktuelle Grenzwerte eingegangen, siehe Abbildung 24.

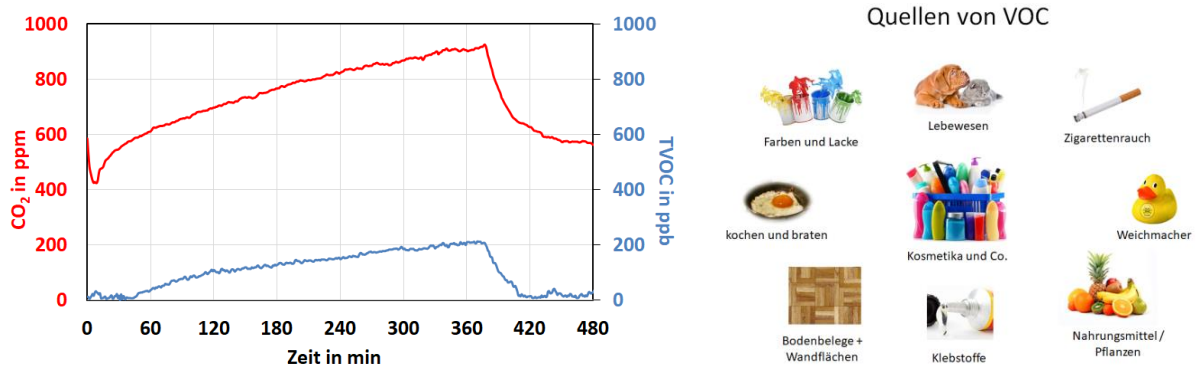


Abb. 23 Links: Korrelation von CO₂ und TVOC beim Schlafen und Lüften. Rechts: Mögliche Quellen von VOCs.

Feinstaub und Gesundheit

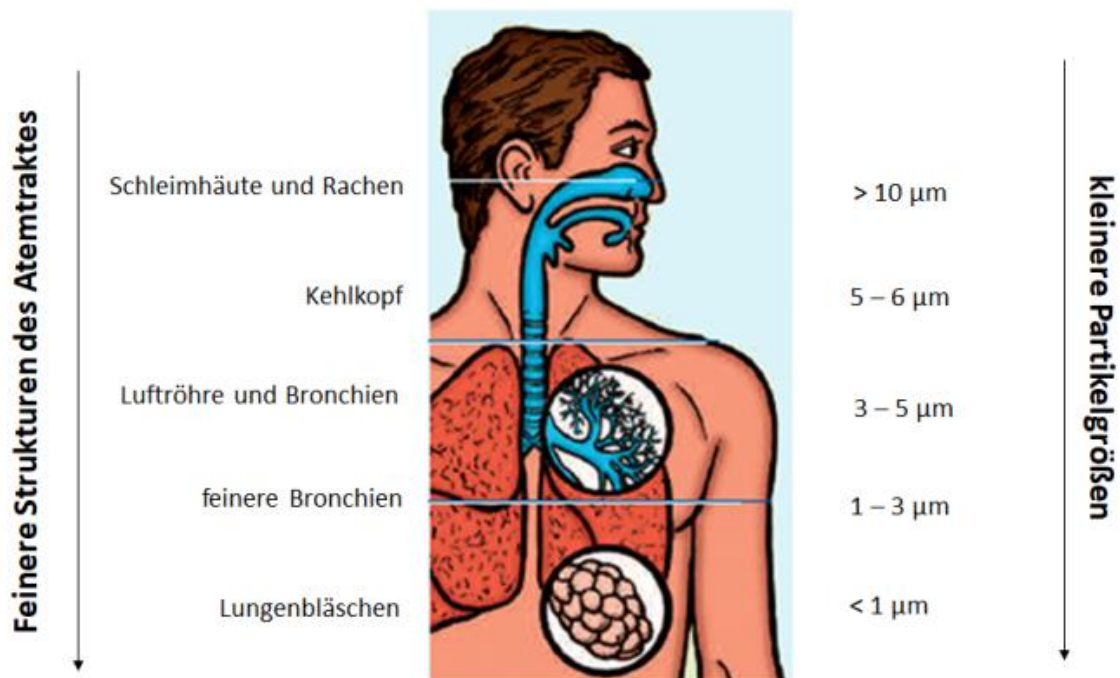


Abb. 24 Gesundheitliche Auswirkungen von Feinstaub stehen im engen Verhältnis dessen Eindringtiefe in den Atemtrakt und damit mit der Partikelgröße. Grafik entnommen aus der Broschüre „Feinstaubmessung in Kurorten – Warum es sich lohnt.“ vom Deutschen Wetterdienst. Beschriftungen wurden schüleradäquat überarbeitet [40].

Am Ende der Einführung wird kurz auf die Platine eingegangen, mit der die Schülerinnen und Schüler Messungen durchführen werden, ehe es zum experimentellen Teil - der Stationsarbeit - kommt.

Station 1 – Test der Sensoren

In der ersten Station sollen sich die Schülerinnen und Schüler mit der Software vertraut machen. Dazu durchlaufen sie zunächst ein Tutorial, das die wichtigsten Funktionen der Software erläutert. Anschließend überprüfen sie die Sensoren auf ihre Funktionsweise, indem sie sich eigene Prüfmethode zum

Testen der Sensoren überlegen und ihre Vorgehensweise in der Broschüre notieren. Beispielsweise kann durch Pusten auf das Board ein Ausschlag der CO₂- und TVOC-Konzentration live beobachtet werden. Der Feinstaubsensor kann durch Reiben eines Zellstofftaschentuchs in der Nähe des Sensors getestet werden. Abbildung 25 zeigt ein Beispiel für typische Messkurven.

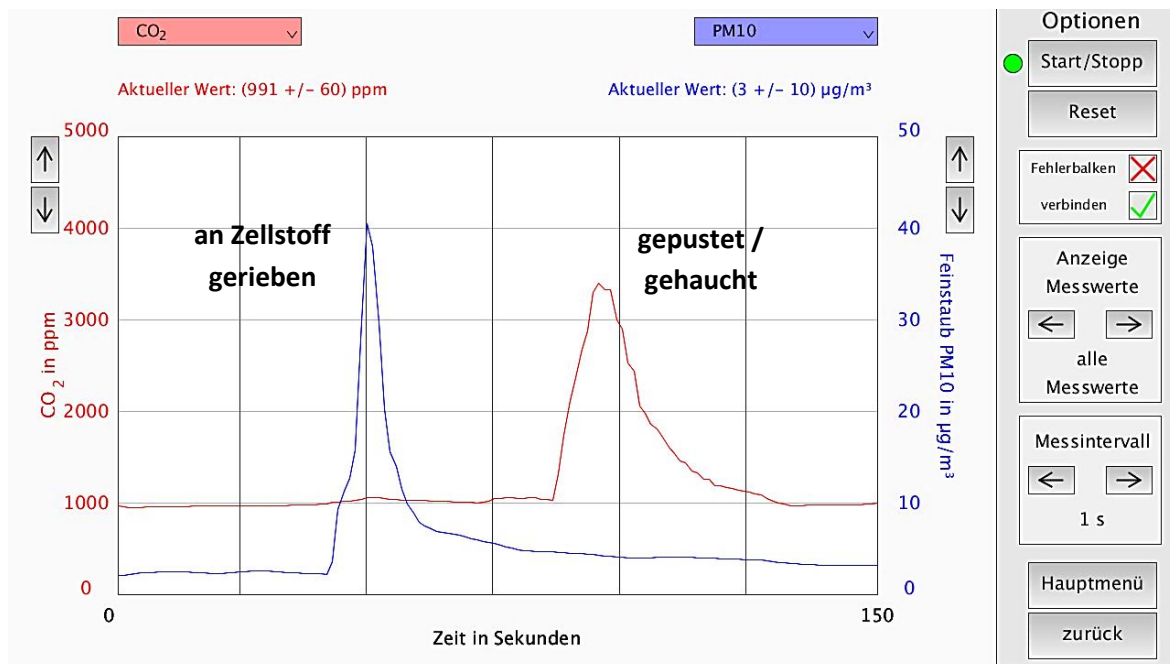


Abb. 25 Typische Messkurven für Station 1.

Station 2 – Nase vs. Sensor

Teil 1 – Ich rieche was, was du nicht riechst

Bestimmte Gase können selbst bei hohen Konzentrationen mit der Nase nur schwach oder gar nicht wahrgenommen werden. Ist man Gerüchen längere Zeit ausgesetzt, tritt zudem ein Gewöhnungseffekt auf. Beide Aspekte verdeutlichen die Grenzen einer subjektiven Erfassung und Beurteilung von Luftqualität. Diese Station schafft ein Bewusstsein für die Notwendigkeit objektiver Messungen von Luftschadstoffen.

Im ersten Teil dieser Station sollen die Schülerinnen und Schüler gegen einen Gassensor antreten. Sie erhalten zunächst fünf Gläser mit unterschiedlichen Verdünnungen von Ethanol, welche sie ihrer Konzentration nach ordnen sollen. Dabei liegen drei der fünf Konzentrationen unterhalb der menschlichen Geruchsschwelle, sodass mit bloßer Nase keine Unterscheidung mehr möglich ist. Nach der Schätzung einer Reihenfolge auf Grundlage des Riechens bestimmen die Lernenden die Reihenfolge mit Hilfe des Sensors auf der Grundlage der TVOC-Emission der Flüssigkeiten. Hierzu werden die Gläser in eine Box gestellt und der Sensor darüber positioniert, siehe Abbildung 26 links. Am Schluss wird die wahre Reihenfolge aufgedeckt und die Schülerinnen und Schüler können ihre Vorhersage mit jener des Sensors vergleichen. Typische Messkurven für die Aufnahme des verdünnten Ethanols zeigt Abbildung 26 rechts. Pro Konzentration misst der Sensor über einen Zeitraum von 60 Sekunden, um zu garantieren, dass sich das Sensorsignal stabilisiert hat.

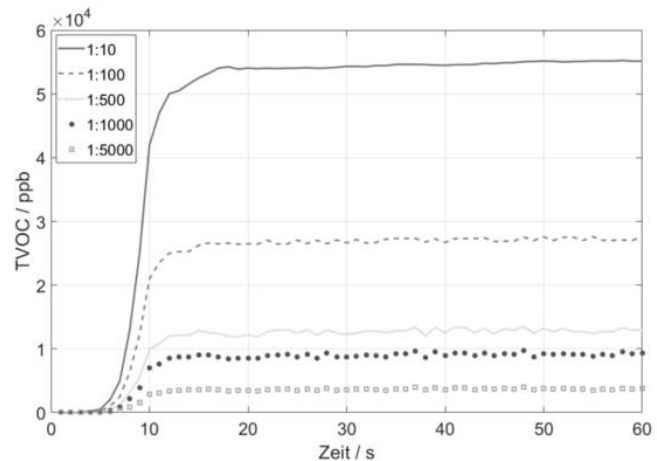


Abb. 26 Links: Versuchsaufbau zur Sensormessung in der Station „Ich rieche was, was du nicht riechst“. Rechts: Typische Messkurven über einen Zeitraum von 60 Sekunden für unterschiedliche Verdünnungen von Ethanol:Wasser. Die Sensormessung ermöglicht die zuverlässige Bestimmung der Reihenfolge. Die Nase ist nicht in der Lage, die niedrigsten drei Konzentrationen überhaupt wahrzunehmen.

Teil 2 – TVOC-Duelle

Für viele Produkte des Alltags gibt es außer herkömmlichen Angeboten auch solche, die in Punkto Umwelt- und Verbraucherschutz bessere Alternativen darstellen. Am Beispiel der unterschiedlichen Emission flüchtiger organischer Verbindungen aus Alltagsgegenständen mit gleichem Verwendungszweck sollen die Lernenden für bewussten Konsum sensibilisiert werden. Es werden insgesamt vier Produktkategorien untersucht, wobei jeweils ein Gegenstand emissionsarm und einer emissionsreich ist. Die Produkte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1 Stoffe für die TVOC-Duelle.

Produkt	emissionsarmes Produkt	konventionelles Produkt
Lacke	Acryllack mit Umweltsiegel „Blauer Engel“	Metall-Schutzlack ohne Umweltsiegel
Filzstifte	TVOC-freier Filzstift (Edding „EcoLine“)	Herkömmlicher Filzstift
Klebstoffe	Bastelkleber für Kinder ohne Lösungsmittel	Sekundenkleber mit Lösungsmittel
Böden	Emissionsarmer Kunststoffboden	PVC-Boden

Bei der Auswahl der Produkte wurde darauf geachtet, dass diese einerseits im täglichen Leben anzutreffen sind und dass andererseits zu jedem konventionellen (emissionsreichen) Produkt eine emissionsarme Alternative existiert. Die Schülerinnen und Schüler schätzen durch Riechen zunächst die Gesamt-VOC-Emission (englisch: „total VOC“, kurz TVOC) für jeden Stoff ab und vergeben Punkte zwischen 0 (nicht wahrnehmbar) und 6 (extrem stark). Nach Abgabe ihrer Einschätzung bestimmt der Sensor die TVOC-Emission und vergibt ebenfalls Punkte zwischen 0 und 6. Abbildung 27 zeigt beispielhafte Ergebnisse einer Messung.

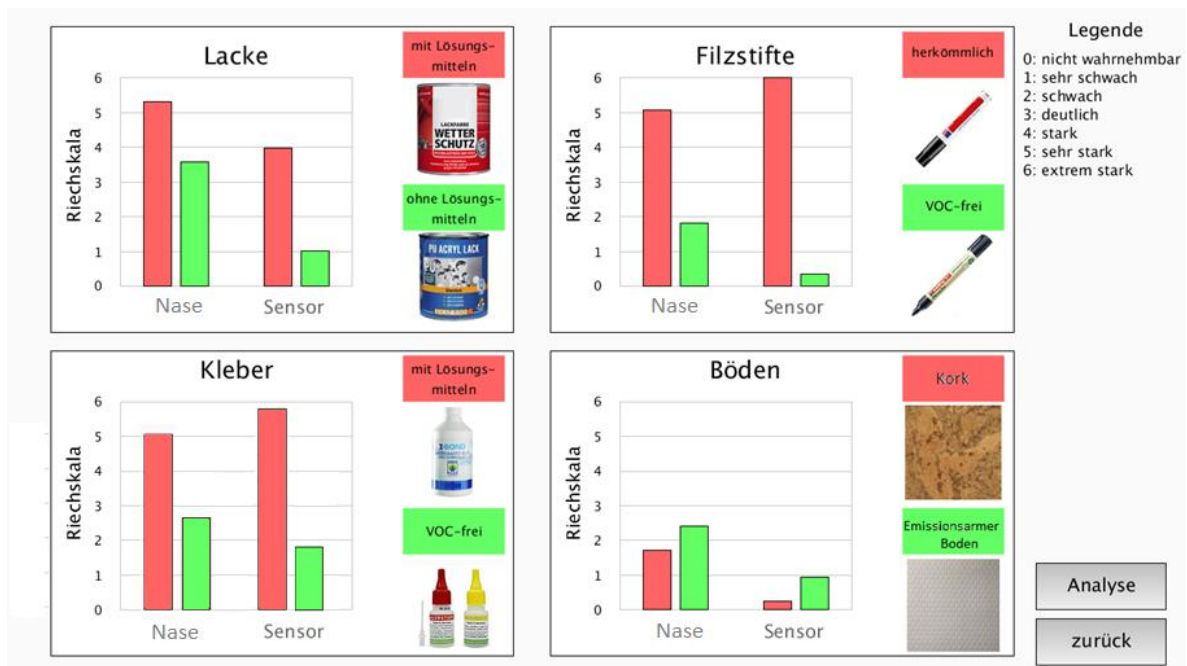


Abb. 27 Vergleich der Einschätzung der TVOC-Emission von Alltagsgegenständen durch die menschliche Nase und den Sensor (geeignete Zuordnung der TVOC-Messung zur Rietskala).

Wichtig hierbei ist, dass ein hoher Messwert des Sensors nicht unbedingt auch mit einer hohen gesundheitlichen Gefahr einhergeht. So reagiert der Sensor auch auf gesundheitlich unbedenkliche Ausdünstungen der Stoffe. Aus diesem Grund wurden die Stoffe zusätzlich mit Hilfe eines Gaschromatographie-Massenspektrometers (GC-MS) untersucht, siehe Abbildung 28. Die Schülerinnen und Schüler erfahren dadurch, welche Stoffe tatsächlich emittiert werden, und können die Messungen einordnen. Zudem erfahren sie auch, dass für genaue Untersuchungen komplexe, laboranalytische Methoden erforderlich sind, während die preiswerten Sensoren eine schnelle, erste Einschätzung ermöglichen.

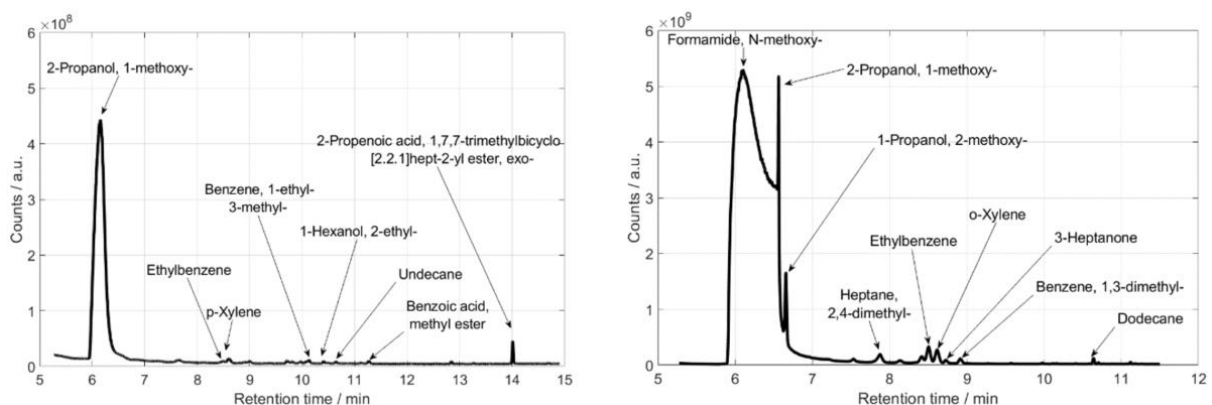


Abb. 28 GC-MS-Messungen von Filzstiften (Edding). Links: Emissionsarmer Filzstift. Rechts: Herkömmlicher Filzstift. Man beachte die um den Faktor 10 gestreckte Skalierung des linken im Vergleich zum rechten Diagramm.

Station 3 – Dicke Luft

Teil 1 – Funktionsprinzip des CO₂-Sensors

In dieser Station erarbeiten sich die Schülerinnen und Schüler in einem einführenden Experiment zunächst das Funktionsprinzip eines nicht-dispersiven CO₂-Sensors. Insbesondere soll den Lernenden die Kontrastierung der Lichtabsorption zur Lichtstreuung, die beim Feinstaubsensor ausgenutzt wird, deutlich werden.

Die Schülerinnen und Schüler erhalten drei Küvetten mit unterschiedlicher Verdünnung roter Lebensmittelfarbe sowie eine Platine mit einer roten und einer blauen LED. Das Licht der blauen LED wird beim Durchstrahlen der roten Farbe absorbiert, wohingegen das Licht der roten LED fast ungestört transmittieren kann. Die Intensität des transmittierten blauen Laserlichts nimmt mit steigender Konzentration dem Lambert-Beer'schen Gesetz folgend ab, siehe Abbildung 29. Die Moleküle der roten Lebensmittelfarbe symbolisieren hierbei CO₂-Moleküle. Dieses Experiment verdeutlicht die selektive Absorption des Infrarotlichts durch die CO₂-Moleküle.

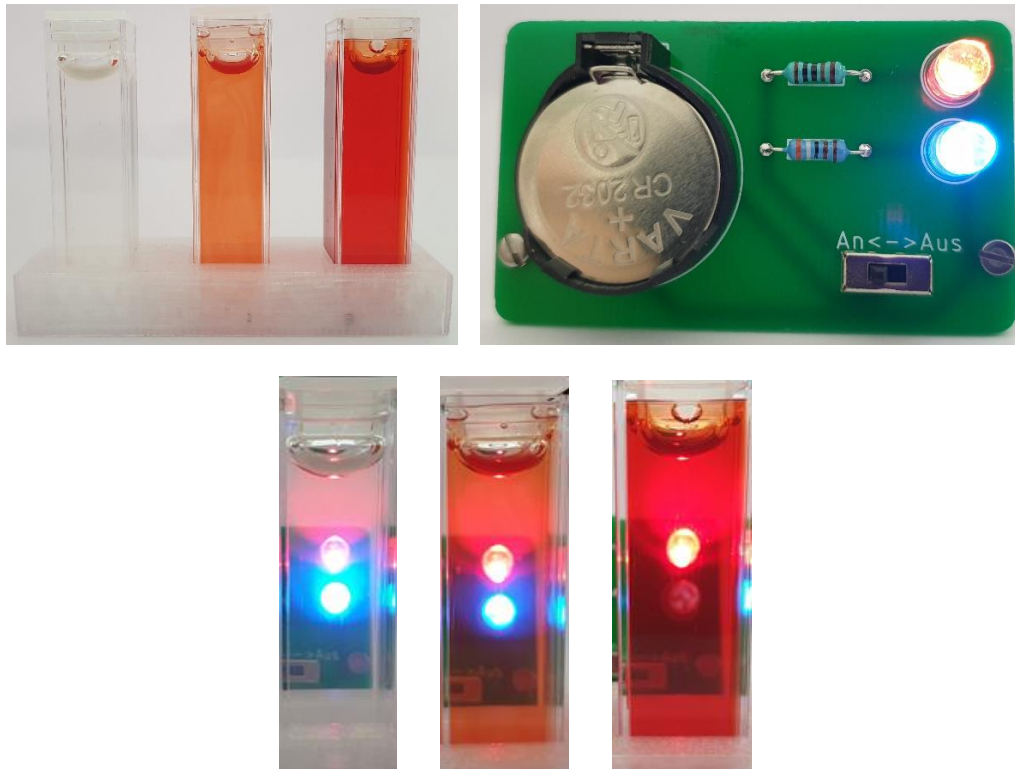


Abb. 29 Experiment zur Demonstration des Funktionsprinzips eines auf Lichtabsorption basierenden CO₂-Sensors. Oben links: 3 Küvetten mit unterschiedlich stark verdünnter roter Lebensmittelfarbe. Oben rechts: Rote und blaue LED auf einer Platine. Unten: Demonstration des Prinzips der wellenlängen-abhängigen Lichtabsorption. Je höher die Konzentration der roten Farbe ist, desto stärker wird blaues Licht absorbiert. Rotes Licht passiert die Küvette dagegen nahezu verlustfrei.

Teil 2 – Bitte lüften

In diesem Stationsteil wird ein Bewusstsein für die Bedeutung regelmäßiger Lüftung eines Innenraums zum Erhalt einer guten Innenraumluftqualität geschaffen. In geschlossenen Räumen sorgt die Anwesenheit von Menschen durch Expiration und Ausdunstung verschiedener VOCs nach und nach für eine Verschlechterung der Luftqualität. Diese Verschlechterung wird zudem durch körperliche Aktivität noch beschleunigt.

Für dieses Experiment wurde eine begehbare Messkammer mit den Maßen 80 x 80 x 190 cm³ gebaut, siehe Abbildung 31 links. In dieser können die Schülerinnen und Schüler ihre Messplatine installieren und so Luftqualitätswerte wie TVOC, CO₂, Luftfeuchte und Temperatur aufnehmen. An der Messkammer integrierte Ventilatoren können die Messkammer mit einer kontinuierlichen Luftzufuhr versorgen, was das Lüften eines Raums simuliert.

Bei zunächst fehlender Ventilation setzt sich ein Schüler oder eine Schülerin für 3 Minuten in die Messkammer. Anschließend soll 3 Minuten lang eine sportliche Betätigung, wie etwa Kniebeugen, ausgeübt werden. Zum Schluss wird die Tür 2 Minuten lang geöffnet und die Person in der Messkammer darf

sich wieder hinsetzen. Der Messvorgang wird anschließend bei vorhandener Ventilation wiederholt. Abbildung 30 rechts zeigt beispielhafte Ergebnisse der Messung von CO_2 und TVOC.

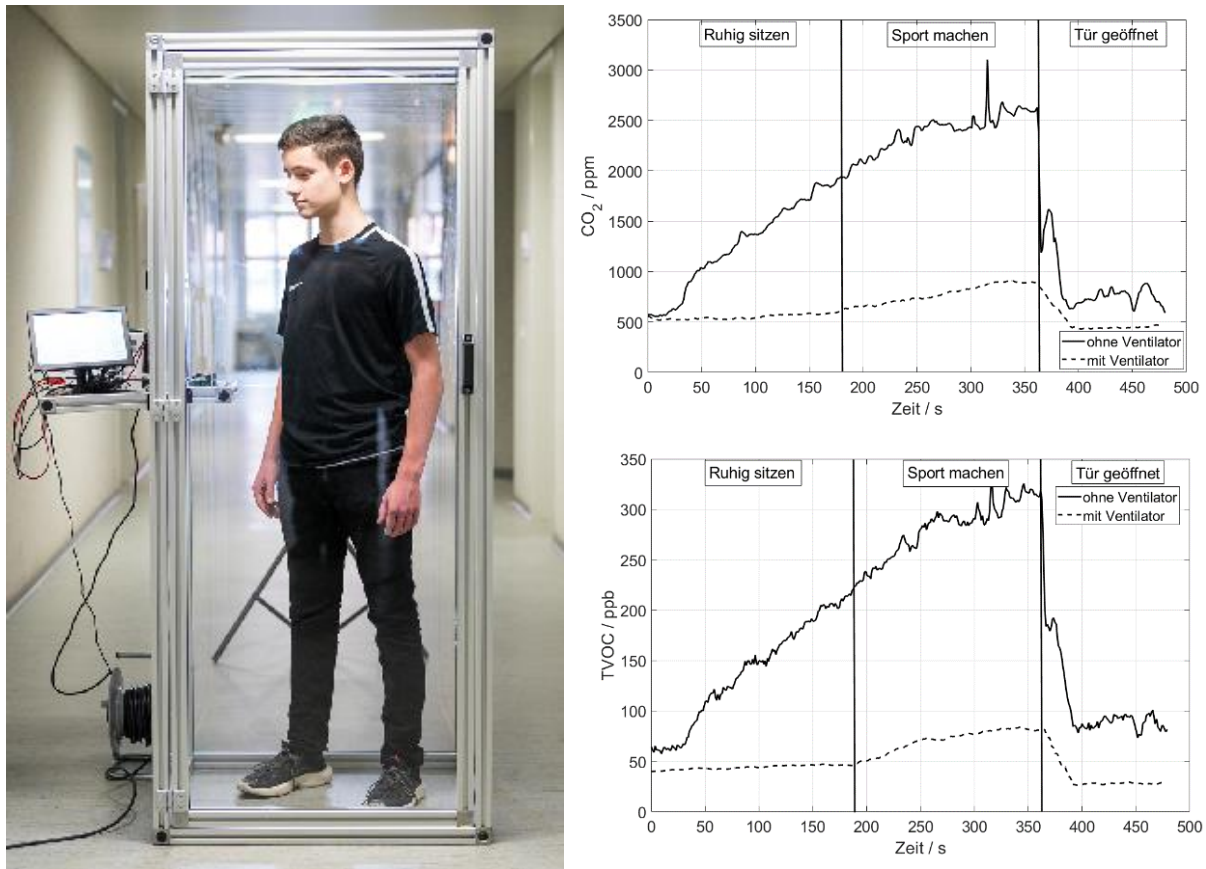


Abb. 30 Links: Schüler in begehbare Messkammer. Rechts: Verlauf der CO_2 -Konzentration und der TVOC-Konzentration (unten) ohne Lüftung (durchgezogene Linie) und mit Lüftung (gepunktete Linie).

Um Aussagen über die Belastungssituation in realen Räumen abzuleiten, wird die in der Messkammer ermittelte Konzentration auf das Volumen eines gewöhnlichen Raumes und die Anwesenheit von mehr als einer Person extrapoliert. Die hiermit intendierte Rechenaufgabe dient im Sinne des Kompetenzbereiches Kommunikation und Bewertung der Übung im Umgang mit Konzentrationseinheiten und ihrer Umrechnung.

Station 4 - Feinstaubalarm

Teil 1 – Funktionsprinzip eines Feinstaubsensoren

In dieser Station erarbeiten sich die Schülerinnen und Schüler in einem einführenden Experiment zunächst das Funktionsprinzip eines auf Lichtstreuung basierenden Feinstaubsensoren. Insbesondere wird ihnen dabei die Kontrastierung der Lichtstreuung zur Lichtabsorption, die beim CO_2 -Sensor ausgenutzt wird, verdeutlicht.

Dazu erhalten sie drei Küvetten, die unterschiedlich dichte Suspensionen von Silikat-Kügelchen enthalten, siehe Abbildung 31. Die Aufgabe besteht nun darin, die Küvetten ihrer Konzentration nach zu ordnen. Da die Proben mit bloßem Auge kaum voneinander zu unterscheiden sind, erhalten die Schülerinnen und Schüler ein Hilfsmittel in Form eines Laserpointers. Sobald ein Laser durch die Reagenzgläser scheint, ist der Verlauf des Lichts darin, aufgrund von Lichtstreuung, von der Seite her sichtbar. Die Intensität des Streulichts korreliert mit der Konzentration.

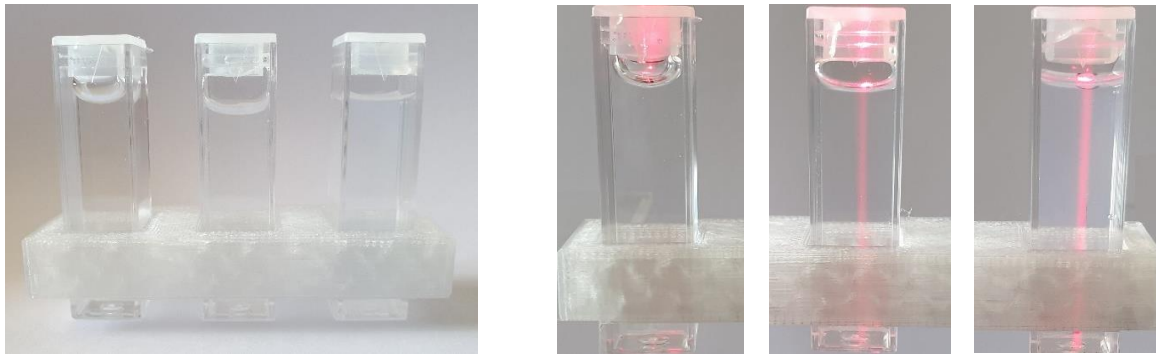


Abb. 31 Experiment zur Demonstration des Funktionsprinzips eines auf Lichtstreuung basierenden Feinstaubsensors. Links: 3 Küvetten mit unterschiedlichen Suspensionen bestehend aus Wasser und kolloidalen Silikat-Teilchen. Rechts: Demonstration des Prinzips der Lichtstreuung. Je höher die Konzentration der kolloidalen Silikat-Teilchen ist, desto stärker wird das Licht gestreut und es ist besser sichtbar.

Durch dieses Experiment wird die prinzipielle Funktionsweise eines Feinstaubsensors verdeutlicht.

Teil 2 - Kreidestaub

Viele Schülerinnen und Schüler verbringen einen Großteil des Tages in Klassenräumen, in denen nach wie vor mit Kreide und Tafeln gearbeitet wird. Jedes trockene Abwischen der Tafel erzeugt große Mengen an Feinstaub, wohingegen die Feinstaubemission bei nassem Abwischen niedrig bleibt. Durch diesen Versuch werden sie für alltägliche Feinstaubquellen sensibilisiert.

Die Schülerinnen und Schüler erhalten eine kleine Tafel, die sie an dem Sensorboard befestigen können. Zusätzlich stehen ihnen neben zwei Kreidearten (herkömmliche Schulkreide und ein Kreidestift), auch ein feuchter und ein trockener Schwamm zur Verfügung. Ein Messablauf besteht aus vier jeweils ca. 30-sekündigen Phasen:

- 1) Beschriftung der Tafel
- 2) Wischen der Tafel mit einem trockenen Schwamm
- 3) Erneute Beschriftung
- 4) Wischen der Tafel mit einem nassen Schwamm

Der Versuch wird für beide Kreidearten durchgeführt. Der Kreidestift erzeugt dabei wesentlich weniger Feinstaub als die herkömmliche Schulkreide. Versuchsaufbau und typische Messergebnisse sind in Abbildung 32 dargestellt.

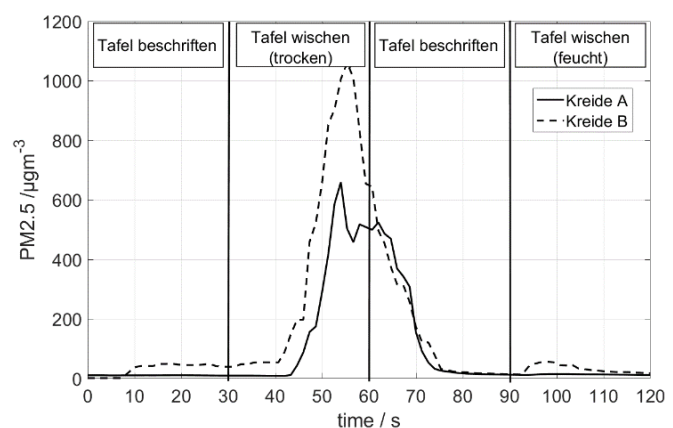


Abb. 32 Links: Versuchsaufbau zur Messung der Feinstaubemission. Rechts: Messwerte beim Beschriften einer Tafel mit unterschiedlichen Kreidesorten und anschließendem Wischen mit einem trockenen und einem feuchten Schwamm.

Dauerhafte Etablierung der Lernmodule und Durchführung von Lehrerfortbildungen

Die entwickelten Module werden mittlerweile regelmäßig im Schülerlabor SinnTec der Universität des Saarlandes und am Schülerforschungszentrum Saarlouis durchgeführt. Weiterhin wurden sie bei verschiedenen öffentlichen Veranstaltungen wie dem Tag der Technik, dem Tag der offenen Tür und als Teil des Schülerbetriebspraktikums „IngFo“ durchgeführt.

Seit dem Schuljahr 2018/2019 sind die Lernmodule Teil eines benoteten MINT-Praktikums des Max-Planck-Gymnasiums in Saarlouis. Schülerinnen und Schüler der 9. Klasse führen dabei die Experimente an insgesamt vier Terminen in einem Zeitraum von 3 Monaten durch. Zum Abschluss absolvieren sie einen theoretischen und praktischen Test, in dem die wichtigsten Erkenntnisse und Fähigkeiten in Bezug auf die Funktionsweise, die Kalibrierung und die Durchführung von Messungen mit Gassensoren abgefragt werden. Das Feedback der Schülerinnen und Schüler war sehr positiv.

Während des Projektzeitraums wurden zwei Lehrerfortbildungen durchgeführt. Diese fanden im Rahmen des „Physiker Zirkels“ an der TU Kaiserslautern und als Teil der Fortbildungsangebote des Landesinstituts für Pädagogik und Medien (LPM) Saarland am Schülerforschungszentrum Saarlouis statt. Weiterhin konnten Lehrkräfte im Rahmen von öffentlichen Veranstaltungen wie dem „Tag der Schülerlabore“ an der Universität des Saarlandes einen Einblick in den Aufbau und die Durchführung der Lernmodule erhalten. Das dort erhaltene Feedback war vor allem in Bezug auf die Vielseitigkeit und die fächerübergreifenden Aspekte der Experimente sehr positiv.

Der Aufbau der Lernmodule als HTML-basierte Selbstlernkurse erlaubt eine leichte Übertragbarkeit auf andere Bildungseinrichtungen. Schülerlabor-spezifische Anpassungen, wie die Integration von Fotos eigener Messinstrumente oder die Variation des zu messenden Stoffes, können unkompliziert vorgenommen werden. Die Quellcodes der Selbstlernkurse und der Messsoftware sind open source verfügbar und können von der Projekthomepage www.susmobil.de heruntergeladen werden. Dort ist auch eine Liste mit allen benötigten Materialien zum Nachbau der benötigten Hardware hinterlegt.

4 Schülerumweltstudien

Im Laufe des Projekts wurden insgesamt neun Schülerumweltstudien auf Basis von mobiler Messtechnik und Smartphones entwickelt. Im Folgenden werden diese kurz beschrieben.

Google Maps Schadstoffkarte

Im Rahmen des Nachwuchswettbewerbs „Jugend forscht“ haben zwei Schüler einer 12. Klasse im Schuljahr 2017/2018 am Schülerforschungszentrum in Saarlouis eine „Google Maps Schadstoffkarte“ entwickelt. Mit Hilfe einer 3D-gedruckten Messkammer, in der sich der Sensor BME680 von Bosch befindet, konnten (unkalibrierte) Luftqualitätsmessungen der Umgebungsluft gemacht werden. Die Luftqualitätsdaten wurden zusammen mit GPS-Daten an einen Server im Internet gesendet und von der App „Blynk“ ausgelesen. Diese ermöglicht es, die Daten als Heatmap über den Google-Dienst Maps darzustellen. Die Schüler erreichten mit ihrer Idee den dritten Platz beim Jugend forscht-Wettbewerb im Saarland, siehe Abbildung 33.



Abb. 33 Links: Zwei Schüler stellen eine Schadstoffkarte bei Jugend forscht vor. Mitte: Messkammer. Rechts: Heatmap zur Darstellung von Schadstoffkonzentrationen auf Landkarten.

Schadstoffkarte 2.0

Im Schuljahr 2019/2020 wurde der Prototyp der „Google Maps Schadstoffkarte“ am Schülerforschungszentrum Saarlouis weiterentwickelt, siehe Abbildung 34.

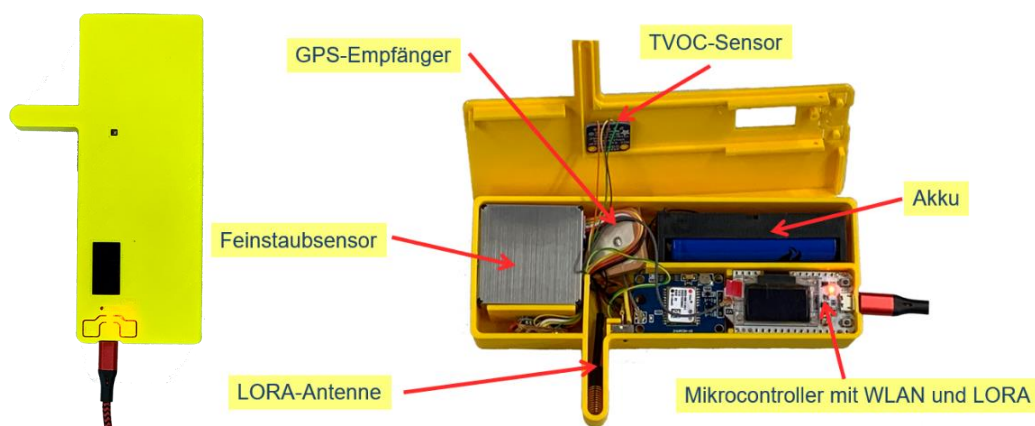


Abb. 34 Überarbeitete Messkammer zur Luftqualitätskartierung.

In der neu entwickelten Hardware befinden sich nun der Feinstaubsensor SPS30 und der VOC-Sensor SGP30 der Firma Sensirion. Weiterhin enthält die neue Messkammer einen GPS-Sensor, einen Lithium-

Ionen-Akku und einen Mikrocontroller inklusive LoRa-Antenne. Über ein LoRa-Netzwerk, das im Raum Saarlouis installiert wurde, können die Luftqualitätsdaten an einen zentralen Server übertragen werden. Weiterhin wird die App „Blynk“ zur Visualisierung der Messdaten auf dem Smartphone in Form einer Heatmap verwendet, siehe Abbildung 35.

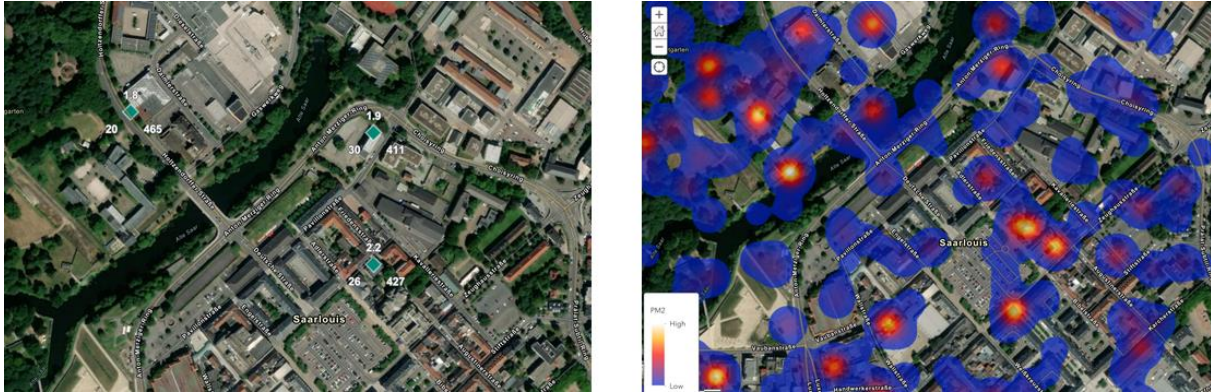


Abb. 35 Kartierung der Luftqualität am Beispiel der Aufnahme der Feinstaubkonzentration. Links: Google Maps Landkarte. Rechts: Feinstaubkonzentrationen als Heatmap in der App „Blynk“.

Diese neue Version sollte an den Projekttagen des Max-Planck-Gymnasiums in Saarlouis genutzt werden, um mit kleinen Gruppen mobil an von den Schülerinnen und Schülern gewünschten Orten die Luftqualität zu messen. Leider fanden diese Projekttag aufgrund der Pandemie nicht statt. Da die Technik jetzt vorhanden ist und das Projekt bei Schülerinnen und Schülern auf viel Begeisterung gestoßen ist, wird es bei den nächsten Projekttagen voraussichtlich stattfinden können.

Untersuchung der Luft in Bienenstöcken

In Zusammenarbeit mit Dr. Martin Wörner, einem Mitglied im Landesverband saarländischer Imker, haben zwei Schülerinnen einer 12. Klasse im Schuljahr 2018/2019 ein „Jugend forscht“-Projekt zur Untersuchung von Bienenstöcken auf meteorologische Größen sowie Gase und Feinstaub entwickelt. Die Schülerinnen wollten untersuchen, wie sich die Temperatur, Luftfeuchte, CO₂-, VOC- und Feinstaubkonzentration im Laufe der Zeit verhalten. Zu diesem Zweck platzierten sie jeweils ein Sensorsystem in einen bevölkerten und einen leeren Bienenkorb, siehe Abbildung 36. Der unbewohnte Korb diente dabei als Referenz. Die Datenaufnahme erfolgte über einen internetfähigen Mikrocontroller, der etwa alle 30 Sekunden Messwerte aufnimmt und an eine online-Datenbank überträgt. Von dort aus konnten die Daten heruntergeladen und weiterverarbeitet werden.



Abb. 36 Links: Zwei Schülerinnen präparieren einen Bienenrahmen mit Sensoren. Rechts: Verwendete Bienenstöcke.

Über die App „ThingSpeak“ konnten die Daten auf dem Smartphone visualisiert und ausgewertet werden. In Abbildung 37 sind beispielhafte Messergebnisse über einen Zeitraum von einer Woche im Juli 2019 abgebildet. Die durchschnittlich gemessene Temperatur betrug $33,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit einer Standardabweichung von $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Maximaltemperatur von $35,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sowie einer Minimaltemperatur von $31,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die mittlere relative Luftfeuchte im Korb mit Bienen betrug $50,5\%$ mit einer Standardabweichung von $4,1\%$, wobei minimal $38,6\%$ und maximal $60,2\%$ gemessen wurden. Bei der Messung der Feinstaubkonzentration konnte kein Unterschied zwischen dem Referenzkorb und dem bewohnten Korb festgestellt werden. Der Vergleich der TVOC-Konzentration mit und ohne Bienen zeigt jeweils einen periodischen Verlauf in einem 24-Stunden-Rhythmus. Die Konzentration innerhalb des Bienenstocks mit Bienen liegt um ca. $800 - 1000\text{ ppb}$ höher als im Referenzkorb. Analog zur TVOC-Konzentration zeigt auch der Verlauf der CO_2 -Konzentration in diesem Zeitraum ein periodisches Verhalten mit Maximalwerten zwischen 6.000 und 8.000 ppm . In anderen Zeiträumen wurden sogar Maximalwerte von bis zu 14.000 ppm gemessen. Der Referenzwert im leeren Korb liegt dagegen nahe dem natürlichen Hintergrundwert von 400 ppm .

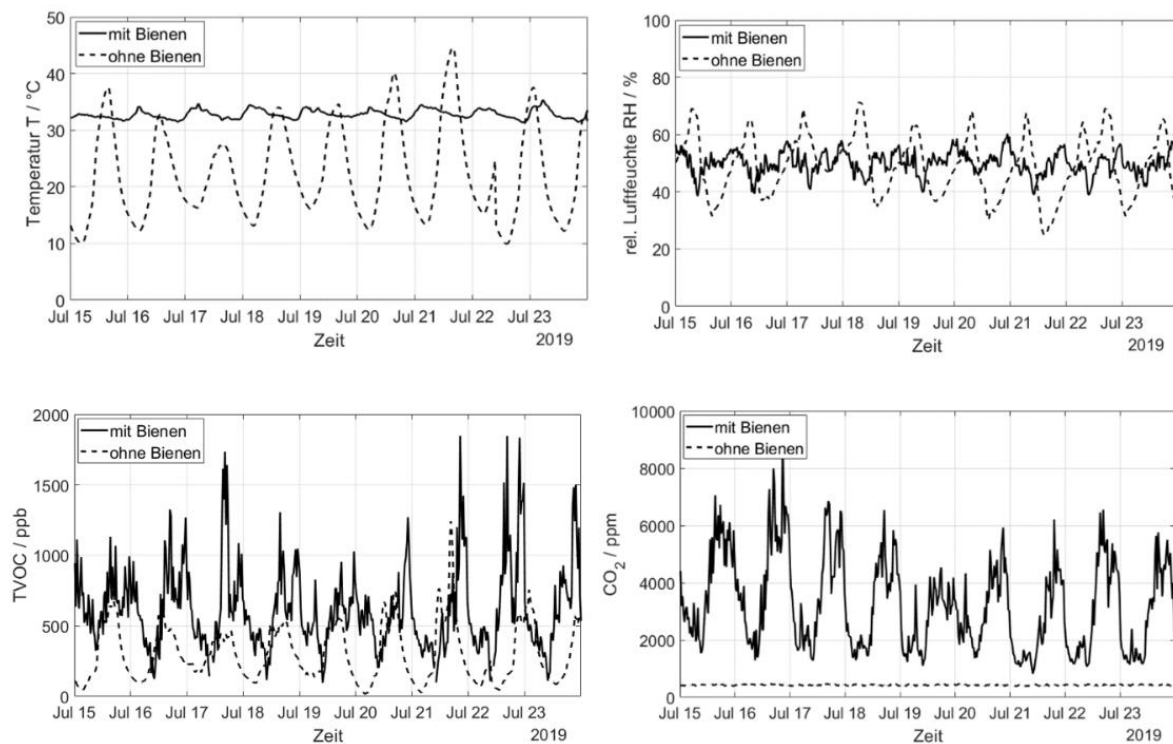


Abb. 37 Beispielhafte Messwerte verschiedener Parameter in einem bewohnten (durchgezogene Linie) und unbewohnten (gepunktete Linie) Bienenkorb. V.l.o.n.r.u.: Temperatur, relative Luftfeuchte, TVOC-Konzentration, CO_2 -Konzentration.

Aufgrund des periodischen Verhaltens der CO_2 - und TVOC-Konzentration stellten die Schülerinnen die Vermutung auf, dass Bienen diese Konzentrationen durch vermehrtes Flügelschlagen aktiv regulieren. Um ihre Hypothese zu testen, führten sie von außen aktiv CO_2 in den Bienenkorb. Es zeigte sich, dass die CO_2 -Konzentration im Bienenstock jeweils nur kurz anstieg und danach wieder auf einen Wert um 15.000 ppm abfiel. Weiterhin konnte beobachtet werden, dass sich die Bienen an den Ausgängen des Korbs versammelten und durch Flügelschlagen für eine Ventilation sorgten, die Vermutung wurde also bestätigt.

Durch die Art des Messaufbaus ist es nachfolgenden Schülergenerationen möglich, weitere Sensoren zu installieren und neue Fragestellungen zu bearbeiten, z. B. ob auch eine Einleitung anderer Gase zu einer aktiven Reaktion der Bienen führt.

Einfluss von Pflanzen auf die Luftqualität

Zwei Schülerinnen des Geschwister Scholl Gymnasiums in Lebach untersuchten, ob Pflanzen die Luftqualität im Innenraum durch Absorption bzw. Umsetzung von Schadstoffen verbessern. Dazu bauten sie im Schuljahr 2018/2019 am Schülerforschungszentrum Saarlouis zwei luftdichte Boxen, siehe Abbildung 38. Beide Boxen wurden mit dem VOC-Sensoren CCS811 von ams und SGP30 von Sensirion bestückt [41]. Weiterhin stellten sie in eine Box Pflanzen, siehe Abbildung 38. Um ihre Hypothese zu testen, dass Pflanzen VOCs aus der Luft filtern, führten sie kleine Mengen Ethanol, Aceton, Essigsäure und Ameisensäure hinzu.



Abb. 38 Versuchsaufbau zur Erfassung des Einflusses von Pflanzen auf die Luftqualität in Innenräumen. Links: Messkammer ohne Pflanzen. Rechts: Messkammer mit Pflanzen

In der Auswertung zeigte sich im Vergleich der beiden Messkammern eine deutliche Abnahme der Gaskonzentration, die jedoch abhängig von der Art des Schadstoffes verschieden lang dauerte. Als Beispiel ist in Abbildung 39 der Verlauf der Ethanol-Konzentration (links) und der Aceton-Konzentration (rechts) in den beiden Messkammern mit (gepunktete Linie) bzw. ohne (durchgezogene Linie) Pflanzen zu sehen.

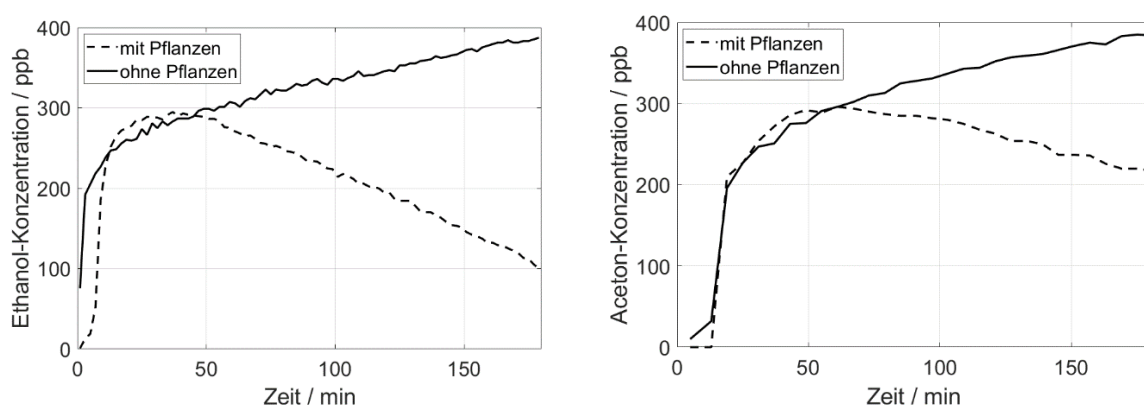


Abb. 39 Verlauf der Ethanol-Konzentration (links, gemessen mit dem SGP30) und Aceton-Konzentration (rechts, gemessen mit dem CCS811) über einen Zeitraum von drei Stunden in der Messkammer ohne (durchgezogene Linie) und mit (gepunktete Linie) Pflanzen.

Das Projekt wurde Ende März 2019 bei der Landesrunde von Jugend forscht im Themenbereich Biologie vorgestellt und hat dort den 2. Preis erhalten.

Feinstaubmessungen an Silvester und vor der Schule

In einer weiteren Schülerumweltstudie haben zwei Schülerinnen einer 12. Klasse des Robert-Schuman-Gymnasiums in Saarlouis im Schuljahr 2018/2019 Feinstaubmessungen durchgeführt, siehe Abbildung 40. Das erhöhte Verkehrsaufkommen vor der ersten und nach der sechsten Schulstunde motivierte sie zu dem Projekt „Fahrt ihr noch oder hustet ihr schon? – Feinstaub vor Schulen in Saarlouis“.

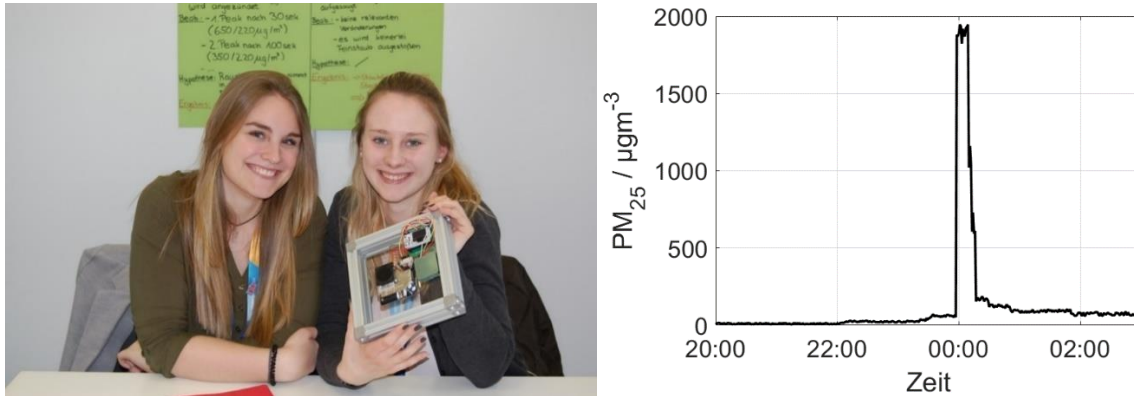


Abb. 40 Links: Zwei Schülerinnen mit einem Feinstaubsensor. Rechts: Feinstaubkonzentration an Silvester bzw. Neujahr 2018/2019.

Bei ihren Messungen vor der Schule konnten sie deutlich erhöhte Feinstaubwerte zu den Zeiten mit stärkerem Verkehrsaufkommen zeigen. Weiterhin konnten sie an Silvester eine PM_{2.5}-Feinstaubkonzentration von ca. 2.000 µg/m³ messen. Dies entspricht einer Überschreitung des Grenzwertes von 25 µg/m³ um den Faktor 80.

Das Projekt wurde Ende März 2019 bei der Landesrunde von Jugend forscht im Themenbereich Geo- und Raumwissenschaften vorgestellt und hat dort den 1. Preis erhalten.

Mobiler Kohlenmonoxid-Melder

Ein Schüler einer 9. Klasse des Max-Planck-Gymnasiums in Saarlouis hat sich in den Schuljahren 2018/2019 und 2019/2020 mit der Messung der Kohlenmonoxid-Konzentration in der Innenraumluft und mit der Aufnahme von Kohlenmonoxid (CO) verbundenen Gefahren beschäftigt. Im Rahmen seines Projekts hat er einen Miniatur-Kohlenmonoxid-Warner entwickelt, siehe Abbildung 41.

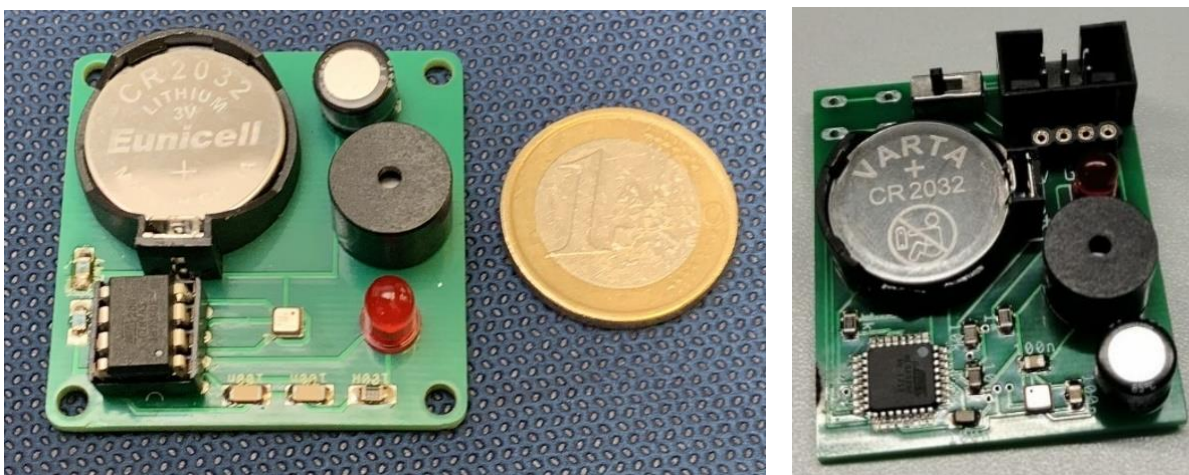


Abb. 41 Miniatur-Kohlenmonoxid-Warner. Links: Prototyp. Rechts: Überarbeitete Version mit leistungsfähigerem Mikrocontroller.

Der CO-Warner nutzt den Miniatur-Gassensor BME680, der am Lehrstuhl für Messtechnik der Universität des Saarlandes auf das Zielgas CO kalibriert wurde. In der ersten Version des CO-Melders wurde der Sensor über den Mikrocontroller ATtiny gesteuert [42]. Aufgrund der geringen Speicherkapazität und der geringen Rechenleistung wurde dieser in einer neueren Version durch den Mikrocontroller ATmega328 ersetzt [43]. Dadurch war es möglich, den Algorithmus zur Konzentrationsbestimmung in Form eines künstlichen neuronalen Netzes zu integrieren.

Der Arbeitsplatzgrenzwert von CO liegt bei 30 ppm [2]. Aus diesem Grund wird die integrierte LED ab dieser Konzentration in einen schnellen Blink-Modus versetzt. Ab 100 ppm wird über den Summer ein Warnsignal erzeugt. Während des Projekts erhielt der Schüler Einblick in moderne Kalibrierungsmethoden für MOX-Halbleiter-Gassensoren.

Das Projekt war 2020 im Saarland bei „Jugend forscht“ angemeldet. Aufgrund der Corona-Pandemie ist dieser Wettbewerb jedoch ausgefallen.

Waldbrandfrüherkennung

Im Schuljahr 2019/2020 hat sich ein Schüler einer 11. Klasse des Max-Planck-Gymnasiums Saarlouis mit der Entstehung von Waldbränden und der Problematik ihrer frühen Erkennung beschäftigt. In Deutschland werden Risikogebiete in Bezug auf die Waldbrandgefahr mit verschiedenen Methoden, z. B. Flugzeugüberwachung oder Installation von Überwachungskameras, überwacht. Diese Verfahren sind jedoch mit hohen Kosten verbunden. Dies nahm sich der Schüler zum Anlass, eine kostengünstige Hardware zu entwickeln, die mit Solarenergie betrieben wird und bei der Detektion eines Waldbrandes eine Warnmeldung über ein LoRa Netzwerk an ein Smartphone schickt, siehe Abbildung 42.

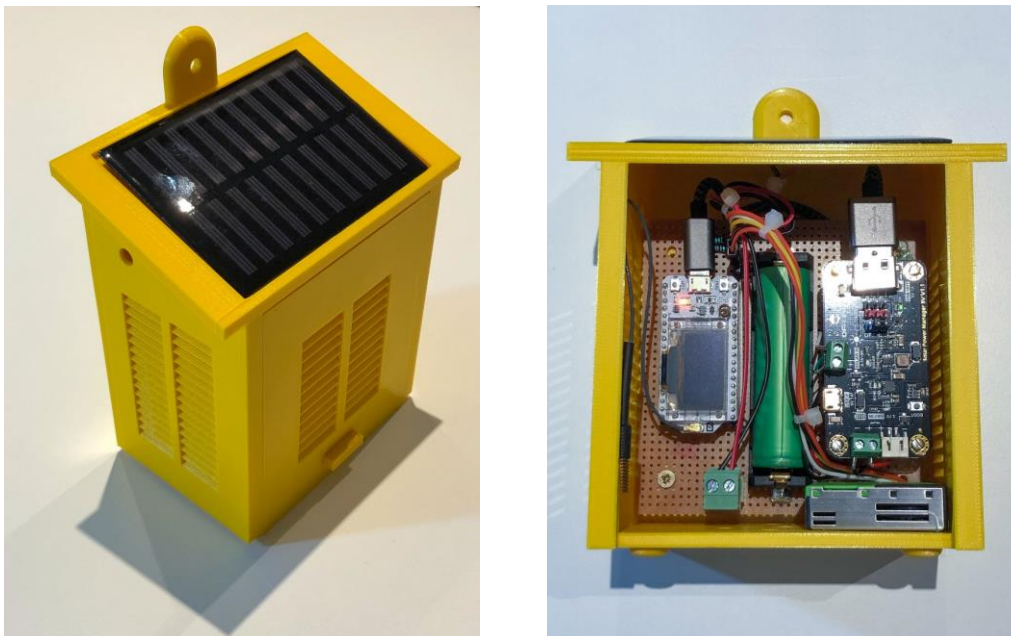


Abb. 42 Hardware zur Detektion von Waldbränden. Links: 3D-gedrucktes Gehäuse mit Solarpanels zur Energieversorgung. Rechts: Innenleben des Gehäuses mit Mikrocontroller, Lithium-Ionen-Akku, LoRa-Antenne und Feinstaubsensor SPS30.

Als messtechnische Grundlage dient dabei der Feinstaubsensor SPS30, da Versuche gezeigt haben, dass die Rauchentwicklung bei der Entstehung von Laubbränden schnell hohe Feinstaubwerte erzeugt. Die durch den Gassensor gut erkennbaren flüchtigen organischen Verbindungen erzeugen im Vergleich ein deutlich kleineres Signal. Diese Umweltstudie wird auch nach Projektende weitergeführt. Aktuell

hat der Schüler den letzten Prototypen weiterentwickelt mit dem Ziel, den Energieverbrauch erneut zu senken, um einen dauerhaften Betrieb auch bei wenig Sonneneinstrahlung zu ermöglichen.

Mobile Schadstofferkennung

Ein Schüler einer 9. Klasse entwickelte im Schuljahr 2018/2019 am Schülerforschungszentrum Saarlouis einen über das Smartphone steuerbaren Roboter im Rahmen eines MINT-Praktikums, siehe Abbildung 43. Für den Schülerforschungspreis der Dillinger Hütte erweiterte er seinen Roboter um einen TVOC-Sensor und eine Kamera, so dass er mit ihm Gebiete befahren konnte, die für den Menschen potenziell gefährlich sein könnten. Für seine Arbeit erhielt er den 3. Preis.

Emissionsarme Stahlerzeugung

Ein Schüler einer 10. Klasse hat sich im Rahmen des Schülerforschungspreises der Dillinger Hütte mit der Erzeugung von Kohlendioxid im Stahlbau beschäftigt, siehe Abbildung 44. Ergebnis seiner tiefgehenden Recherche waren viele mögliche Ansätze, die Emission von Treibhausgas bei der Stahlerzeugung zu reduzieren. Allerdings erfordern diese Ansätze vielfach hohe Investitionen, weshalb es seiner Meinung nach europäischen Fördermitteln für die Stahlindustrie bedürfe, ohne die sie in den kommenden Jahren kaum mehr wettbewerbsfähig sein würde. Für seine Arbeit erhielt er den 3. Preis.



Abb. 43 Schüler mit Forschungsprojekt „AirCoRo“ der Dillinger Hütte.



Abb. 44 Schüler mit Forschungsprojekt „Ansätze für emissionsarme Stahlerzeugung“ der Dillinger Hütte.

5 Empirische Begleitforschung

Erfassung umweltrelevanten Verhaltens

In Vorbereitung der empirischen Begleitforschung wurden eine Reihe von Studien zum Umweltbewusstsein und Umweltverhalten in Deutschland im Besonderen mit Blick auf junge Menschen (14 – 25 Jahre) gesichtet. Junge Menschen unterscheiden sich im Umgang mit Umwelt und Umweltschutz erheblich [44].

Demnach sind 15 % von ihnen nachhaltigkeitsorientiert und umweltbewusstes Denken und Handeln ist für sie eine Selbstverständlichkeit. Für mehr als die Hälfte der jungen Leute jedoch sind Umweltthemen von untergeordneter Bedeutung. Ein Teil von Ihnen (17 %, die „Wirtschaftsorientierten“) lehnt Verzicht auf Privilegien und Konsum zugunsten von Umweltschutz ab. Ich-bezogene Haltungen und die Konzentration auf individuelle Probleme zeigt sich auch bei den Umweltpassiven (37 %). Die Bewältigung konkurrierender Aufgaben wie die Entwicklung einer eigenen Identität, hoher Erwartungs- und Leistungsdruck und das Zurechtfinden in der globalisierten Welt bestimmen ihr Denken und Handeln wesentlich.

Gut ein Drittel der Jugendlichen kann als umweltbesorgt oder orientierungssuchend kategorisiert werden. Bei ihnen zeigt sich eine Umweltaffinität, doch schlägt sich dies weniger oft in expliziten, vor Allem aufwendigen Handlungen nieder. Nicht selten fehlt dieser Gruppe aber auch nur das Wissen über Handlungsalternativen. Mit Blick auf eine durch das Projekt zu initiierende Förderung von Umwelteinstellungen und -verhalten wird insbesondere in dieser Subgruppe ein Potenzial gesehen.

Im Ergebnis der Sichtung von Fragebögen zu Erfassung von Umwelteinstellungen wurde ein von Kaiser und Kollegen (2007) [45] entwickeltes und ursprünglich 40 Items umfassendes Inventar ausgewählt. Das Inventar erhebt Umwelteinstellungen über die Auskunft der Schülerinnen und Schüler von Verhaltensweisen, die in ihrer Schwierigkeit, also aufgrund des Aufwands transitiv geordnet werden können. Das Inventar ist raschskaliert und somit auf einem besonders hohen Messniveau. Ein Beispielitem lautet zum Konsumverhalten lautet: „Wenn ich einkaufe, bevorzuge ich Produkte mit Öko-Labels“.

Baseline-Erhebung

Zur Schaffung einer Vergleichsbasis und zur Pilotierung des Inventars von Kaiser und Kollegen wurde mit Beginn des Schuljahres 2018/19 das Umweltbewusstsein von insgesamt 199 Schülerinnen und Schülern der 7. bis 10. Jahrgangsstufe (nur Gymnasium) erfasst. Abgesehen von personenbezogenen Daten (Alter, Geschlecht) wurden darüber hinaus weitere Testinstrumente zur Erfassung der Neugierde als Wesenszug und des wahrgenommenen Realitätsbezuges der Themen des naturwissenschaftlichen Unterrichts eingesetzt. Ziel eines solchen Einsatzes ist zum einen die korrelativen Beziehungen von Ausprägungen dieser Skalen mit Ausprägungen des zu studieren. Zum anderen dienen insbesondere die Neugierde, aber auch Interessen zu naturwissenschaftlichen Themen als Indikatoren zur gezielteren Identifikation von Lernenden, die an der Durchführung von Schülerumweltstudien interessiert sind. Die hierfür eingesetzten Testinstrumente entstammen der Vorarbeit einer Dissertationsschrift [46]. Die technische Realisierung der Datenerfassung erfolgte über ein automatisiertes Verfahren via Java-Script unter Nutzung der Webanwendung Firebase.

Der Umweltfragebogen wurde einer Itemanalyse nach klassischer Testtheorie und einer Raschana-lyse unterzogen. Das in Folge der Analysen von 40 auf 32 Items gekürzte Inventar zeichnet sich nicht nur

durch einer erhöhte Testökonomie und Zumutbarkeit aus. Auch konnten Gütekriterien auf item- und testglobaler Ebene (Reduktion von Bodeneffekten, Diskriminationsfähigkeit, interne Konsistenz) optimiert werden, was zu einer verbesserten Reliabilität und Validität des Instrumentes beiträgt. Eine Gegenüberstellung der Testparameter im Sinne der klassischen Testtheorie für die ungekürzte und gekürzte Variante zeigt Tab. 2.

Tab. 2 Gegenüberstellung von Testparametern der Baseline-Erhebung für den ungekürzten Umweltfragebogen und nach Testkürzung um 8 Items ($N = 178$). Es sind M : Mittelwert, SD : Standardabweichung, D : Diskriminationsindex, α_c : Cronbach's Alpha als Maß der internen Konsistenz (Reliabilitätsschätzer).

# Items = 40				# Items = 32			
M	SD	D	α_c	M	SD	D	α_c
0,52	0,14	0,35	0,79	0,55	0,17	0,42	0,81

Wie ferner die Person-Item-Map (Abb. 45) infolge der raschanalytischen Schätzung von Itemschwierigkeits¹- und Personenfähigkeitsparameter² verdeutlicht, decken die verbliebenen Testitems einerseits nach wie vor ein breites Spektrum von besonders einfach hin zu besonders schwierig zu realisierenden Verhaltensweisen ab. Andererseits wird (bis auf einzelne Ausreißer) eine Passung der Personenfähigkeiten und der Schwierigkeit der Items festgestellt.

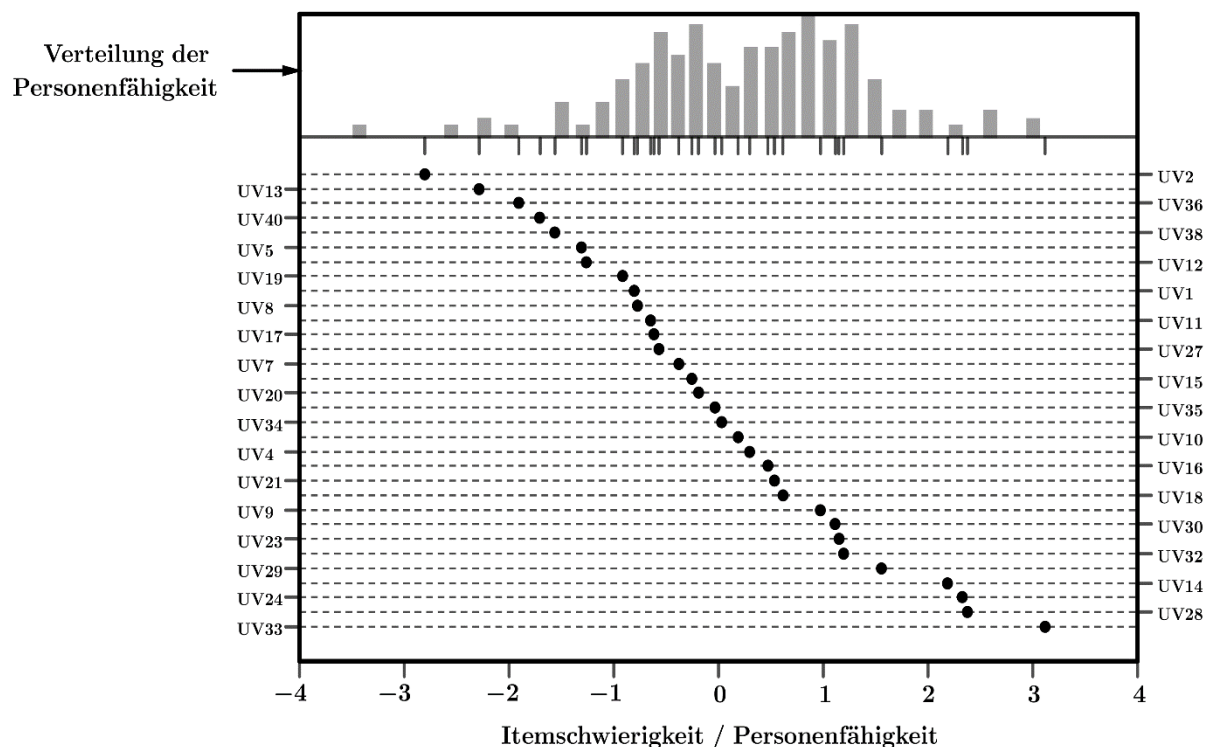


Abb. 45 Person-Item-Map des Umweltfragebogens nach Kaiser, Oerke (2007) unter Ausschluss von 8 Items (UV3, UV6, UV22, UV25, UV26, UV31, UV37, UV39)

Korrelationsanalysen decken einen besonders relevanten Zusammenhang der Umwelteinstellungen (auf Basis der umweltrelevanten Verhaltensweisen UV) mit der epistemischen, auf Drang nach Wissen

¹ Im Sinne des Umweltfragebogens kennzeichnet ein schwieriges Item eine schwierig zu realisierende bzw. nur von wenigen realisierte umweltbewusste Handlung.

² Personen mit einem hohem positiven (negativen) Wert des Personenfähigkeitsparameters sind umweltbewusst (wenig umweltbewusst). Ein Personenparameter um 0 kennzeichnet eine durchschnittliche Ausprägung.

gerichtete Neugierde auf (NP = Neugierde als Personeneigenschaft, in Abgrenzung zur situativ geweckten Neugierde). Darüber hinaus finden sich mit Ausnahme des Interesses an der Chemie, signifikante Korrelationsparameter mit den Schulnoten und den Interessen in den naturwissenschaftlichen Themen sowie in Mathematik. Mädchen sind tendenziell umweltbewusster als Jungen.

Tab. 3 Bivariate Korrelationswerte zwischen Umweltverhalten (UV) mit den Noten und dem Interesse in naturwissenschaftlich-mathematischen Fächern. NP ist die auf den Drang nach Wissen gerichtete Neugierde als Personeneigenschaft, in Abgrenzung zur situativ geweckten Neugierde. Die Skala RA misst den von den Schülerinnen und Schülern empfundenen Realitätsbezug bzw. die Authentizität des naturwissenschaftlichen Unterrichts.

	Geschl	MaNo	PhyNo	ChNo	BioNo	PhyInt	ChInt	BioInt	NP	RA
r	-0,24**	0,29**	0,29**	0,24*	0,24**	0,23*	0,10	0,27**	0,51***	0,21**
$\geq p$	0,009	0,002	0,001	0,011	0,008	0,014	0,266	0,003	0,000	0,006
N	115	115	115	115	115	115	115	115	177	176

Studienplan, Studienabbruch und Ausblick

Die erstmalige, sequenzielle Bearbeitung aller drei Lernmodule und damit die Untersuchung der Wirkung des gesamten Lernarrangements auf das Umweltbewusstsein war im 2. Halbjahr des Schuljahres 2019/20 im Rahmen des MINT-Praktikums des Max-Planck-Gymnasiums Saarlouis vorgesehen. Als Kontrollgruppe (KG) diente ein Kurs mit Lernenden gleichen Alters, die ein alternatives, parallel verlaufendes MINT-Praktikum zum Thema „Erklärvideos“ bearbeiten sollten. Das MINT-Praktikum „Erklärvideos“ vermeidet jeden Bezug zu Umweltthemen. Den Verlaufsplan der geplanten Studie zeigt Abb. 46.

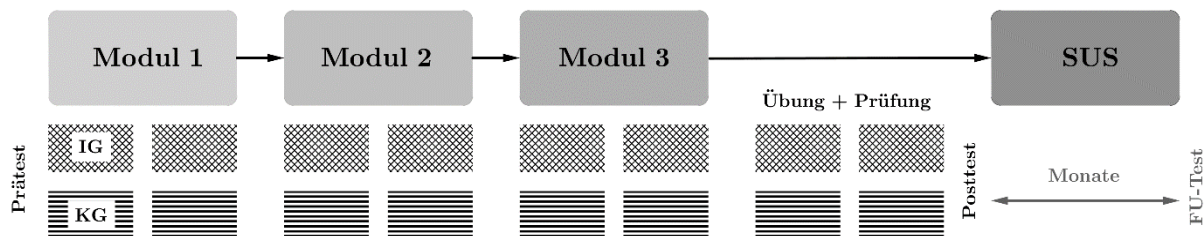


Abb. 46 Studienverlaufsplan. Die Interventionsgruppe (IG) durchläuft die Module von SUSmobil, während die Kontrollgruppe (KG) parallel an einem nicht umweltrelevanten Thema arbeitet. Zeitblöcke in der Abbildung entsprechen ca. 90 min. Die Modulbearbeitung aktiviert und qualifiziert zur Durchführung von Schülerumweltstudien (SUS). Das Umweltverhalten wird vor der Intervention (Prä), nach der Klausur (Post) und im Anschluss an die Schülerumweltstudien (Follow-Up) gemessen.

Unabhängig von der Wirkung der Module auf das Umweltbewusstsein sollte am Ende der Intervention überprüft werden, ob die Lernenden der IG Neugierde zu weiterführenden, eigenen Untersuchungen zu umweltrelevanten Gasen und Schadstoffen zeigen. In diesem Kontext sollte die Intervention einer potenziellen Akquise von Schülerinnen und Schülern zur Durchführung von Schülerumweltstudien auch über die Projektlaufzeit hinaus dienen. Zwar bereits außerhalb der Projektlaufzeit wurde eine Stabilitäts- und Entwicklungsmessung (vermöge der Schülerumweltstudien) mehrere Monate nach dem Posttest sinnvoll erachtet (FU-Test). Insbesondere jene Probanden, die Schülerumweltstudien in Angriff nehmen, könnten im FU-Test darüber hinaus in Interviews über Erfahrungen und den Einfluss ihrer Studien auf ihr Umweltbewusstsein gezielt Auskunft geben.

Infolge der Ausbreitung der Corona-Pandemie und dem mehrwöchigen Lockdown einschließlich Schulschließungen musste die Studie bereits nach der Bearbeitung von Modul 1 abgebrochen werden. Über

die Wirkung des Lernarrangements auf Umweltbewusstsein und Neugierde sowie auf dessen motivierenden Einfluss auf die Durchführung von Schülerumweltstudien kann am Ende der Projektlaufzeit leider keine Auskunft gegeben werden. Durch die Fertigstellung der Module sowie der Bereitstellung einer empirischen Basis kann die wissenschaftliche Begleitforschung eventuell in einer späteren Wiederaufnahme des Projektes oder einer Eingliederung in ein themenaffines Projekt einfach aufgenommen und fortgesetzt werden.

6 Veröffentlichungen und Außendarstellung

Im Zuge der Öffentlichkeitsarbeit und Außendarstellung wurde das Projekt in einigen Bereichen vorgestellt. Nachfolgend werden diesbezügliche Aktivitäten in den vier Kategorien *Medien*, *Tagungen*, *sonstige Veranstaltungen* und *Veröffentlichungen* zusammengefasst und kurz erläutert.

Medien

Tabelle 3 zeigt Punkte der Öffentlichkeitsarbeit in Bezug auf Medien, wie Internetpräsenzen, Radiobeiträge, TV-Beiträge und Zeitungsartikel über das Projekt.

Auf der Projektwebseite www.susmobil.de werden das Projekt sowie die Projektpartner kurz vorgestellt und aktuelle Entwicklungen veröffentlicht. Die Webseite wurde seit dem letzten Zwischenbericht um die Kategorie „Umweltstudien“ erweitert, in denen aktuelle und abgeschlossene Umweltstudien erläutert werden.

Tab. 3 Öffentlichkeitsarbeit in den Medien: Internetpräsenz, Radio- und TV-Beiträge sowie Zeitungsartikel über das Projekt

Datum	Medium	Inhalt
-	Webseite www.susmobil.de	Vorstellung des Projekts und aktuelle Informationen
16.2.2019	Kinder Wissenssendung „Neuneinhalb“	Beitrag über Schadstoffmessung von Schülerinnen und Schülern mit mobilen Messsystemen
20.03.2019	Pressemitteilung „idw“ – Informationsdienst Wissenschaft	Bericht über Umweltmessungen von Schülerinnen und Schülern
14.05.2019	SR2 KulturRadio	„Fahrt ihr noch oder hustet ihr schon?“ – Teil 1 und 2 der Audio Serie zum Bundeswettbewerb „Jugend forscht“
29.01.2020	SR Fernsehen	Filmaufnahmen von Schülerinnen und Schülern in der begehbaren Messkammer sowie Luftqualitätsmessungen mit Smartphone im Rahmen des 25. Jubiläums des Schülerbetriebspraktikums „IngFo“
10.02.2020	Saarbrücker Zeitung	Zeitungsartikel über das 25. Jubiläum des Schülerbetriebspraktikums „IngFo“ in dessen Rahmen Schülerinnen und Schüler Versuche von SUSmobil durchführten mit dem Titel „Ausflug in die Arbeitswelt der Akademiker“
05.06.2020	SR2 KulturRadio	Radio-Bericht über die Entwicklung von Schülerumweltstudien mit dem Titel „Mobiles Forschen für die Umwelt“

Mitte Januar 2019 hat ein Team des Westdeutschen Rundfunks (WDR) einen Beitrag über Schadstoffmessung von Schülerinnen und Schülern mit mobilen Messgeräten für die Kinder Wissenssendung „neuneinhalb“ gedreht. Der Beitrag wurde am 16.02.2019 um 8:15 Uhr in der ARD ausgestrahlt.

Am 14.05.2019 wurden in der zweiteiligen Audio-Serie „Fahrt ihr noch oder hustet ihr schon“ des SR2 Kulturradios über im Projekt entwickelte Schülerumweltstudien für „Jugend forscht“ berichtet (www.sr.de/sr/sr2/themen/panorama/20190514_feinstaub_vor_schulen_2_jugend_forscht100.html).

Im Rahmen des 25. Jubiläums des Schülerbetriebspraktikums „IngFo“ hat der saarländische Rundfunk (SR) am 29.01.2020 einen Beitrag für den „aktuellen Bericht“ im SR gedreht. Dabei wurden Schülerinnen und Schüler bei der Durchführung aller SUSmobil-Module gefilmt und bei der Messung der Luftqualität mit einem mobilen Sensorboard und Smartphone auf dem Campus der Universität Saarbrücken begleitet. Der Beitrag wurde am 06.02.2020 im „Aktuellen Bericht“ im SR ausgestrahlt.

Am 05.06.2020 hat das SR2 KulturRadio anlässlich des Tages der Umwelt einen Beitrag über die Entwicklung der Schülerumweltstudien unter dem Titel „Mobiles Forschen für die Umwelt“ ausgestrahlt.

Tagungen

Tabelle 4 zeigt Punkte der Öffentlichkeitsarbeit in Bezug auf Tagungen, bei denen das Projekt durch Vorträge und Posterbeiträge vorgestellt wurden.

Tab. 4 Öffentlichkeitsarbeit: Tagungen, Vorträge und Posterbeiträge über das Projekt

Datum	Tagung	Inhalt
11.-13.03.2018	LeLa-Jahrestagung in Kiel	Posterbeitrag und Kurzvortrag
15.-19.07.2018	International Meeting on Chemical Sensors (IMCS) in Wien	Vortrag
17.-19.09.2018	Didaktik Jahrestagung der GDCP in Kiel	Posterbeitrag und schriftlicher Beitrag im Tagungsband
17.-19.03.2019	LeLa-Jahrestagung in Paderborn	Posterbeitrag
25.-27.06.2019	Sensoren und Messsysteme 2019 in Nürnberg	Vortrag mit dem Titel „Citizen Science für Schüler*innen: Durchführung von Umweltstudien mit Smartphone und mobiler Messtechnik“
02.-04.12.2019	14. Dresdner Sensor-Symposium	Gewinn des Posterpreises „Best Poster Award“ für den Beitrag zu „Citizen Science für Schüler*innen am Beispiel der Untersuchung der Luft in Bienenstöcken“
08.-10.03.2020	LeLa-Jahrestagung in Dresden	Vortrag zum Thema Schülerumweltstudien nach Vorbild von Citizen Science
10.-14.05.2020	International Meeting on Chemical Sensors (IMCS) in Montreal	Geplanter Posterbeitrag – aufgrund von Corona abgesagt
11.-14.05.2020	Air Sensors International Conference (ASIC) in Los Angeles	Geplanter Posterbeitrag – aufgrund von Corona abgesagt
22.-25.06.2020	Sensor and Measurement Science International Conference, Nürnberg	Geplanter Posterbeitrag und Vortrag – aufgrund von Corona abgesagt

Das Projekt wurde bei den LeLa-Jahrestagungen 2018, 2019 und 2020 mit einem Poster und jeweils 2018 und 2020 mit einem Vortrag vorgestellt.

Beim International Meeting on Chemical Sensors (IMCS), mit über 500 Teilnehmern die bedeutendste Tagung auf dem Gebiet chemische Sensorik, wurde das Projekt SUSmobil von Prof. Schütze am 19.07.2018 in einem Vortrag vorgestellt. Die Resonanz der Teilnehmer, sowohl aus Deutschland als auch international inkl. USA und China, war sehr positiv; es wurde von mehreren Seiten Interesse an zusätzlichen Informationen sowie ggfs. der Übernahme der Experimente bekundet. Die Entwicklung des Projekts sollte ursprünglich mit einem Poster auch bei der diesjährigen IMCS im Mai in Montreal und bei der Air Sensors International Conference (ASIC) in Los Angeles vorgestellt werden. Diese wurden jedoch aufgrund der Corona-Pandemie abgesagt.

Zielstellungen, Modulaufbau und erste Ergebnisse der Erhebung zum Umweltbewusstsein wurden ferner auf der Jahrestagung der GDCP (Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik), die vom 17.-

20.09.2018 in Kiel stattfand, in Form eines Posterbeitrages vorgestellt. Ein schriftlicher Beitrag ist im Laufe desselben Jahres im GDCP-Jahresband erscheinen.

Bei der Tagung Sensoren und Messsysteme in Nürnberg wurde am 26.07.2019 eine offene Sondersession von Prof. Schütze gemeinsam mit Dr. Endres, ehemals Fraunhofer EMFT, mit dem Titel "Citizen Science mit Sensoren – Sensorik für Citizen Science" organisiert. Im Rahmen dieser Sondersession wurde das Projekt SUSmobil anhand eines Vortrags sowie mit Exponaten präsentiert.

Beim Dresdner Sensor-Symposium 2019 gewann der Beitrag mit dem Titel „Citizen Science für Schülerinnen und Schüler*innen am Beispiel der Untersuchung der Luft in Bienenstöcken“ den „Best Poster Award“. Zusätzlich wurde das Projekt in einem Vortrag vorgestellt.

Sonstige Veranstaltungen

Tabelle 5 zeigt Punkte der Öffentlichkeitsarbeit in Bezug auf sonstige Veranstaltungen, wie „Tag der offenen Tür“ oder Messen, bei denen das Projekt vorgestellt wurde.

Tab. 5 Öffentlichkeitsarbeit: sonstige Veranstaltungen über das Projekt

Datum	Veranstaltung	Inhalt
19.-20.10.2017	Citizen Science Fachdialog in Berlin	Vorstellung des Projekts als Beispiel für ein Citizen Science Projekt
26.05.2018	Tag der offenen Tür der Universität Saarbrücken	Vorstellung von Modul 1 und Teile des Modul 2
25.06.2018	Tag der Technik	Durchführung von Modul 1 von verschiedenen Schülergruppen
02.-07.09.2018	International PhD Summer School, Sandbjerg, Dänemark	Kurs: Current and future Air Pollution management, Vorstellung Projekt und Durchführung von Modul 1
26.09.2018	Fachleitertreffen der Studientseminare in Saarbrücken	Stand mit Aufbau von Modul 1 und Poster über das Projekt
18.10.2018	Physik-Zirkel in Kaiserslautern	Vorstellung von Modul 1 für Lehrerinnen und Lehrer
12.-13.11.2018	COST Action in Riga, Lettland	Vorstellung des Projekts als Beispiel für ein Citizen Science Projekt
20.11.2018	Tag der Schülerlabore	Durchführung von Modul 1
28.01.2019	Schülerbetriebspraktikum IngFo	Durchführung von Modul 1
12.-14.02.2019	COST Action in Varazdin, Kroatien	Vorstellung Modul 1/2) und CO-Atemmessgerät als Beispiel für ein Citizen Science Projekt mit open source Hardware
11.-16.03.2019	Short Term Scientific Mission (STSM) in Thessaloniki, Griechenland	Vorstellung des Projekts und Übertragung einer online Überwachung von Luftqualitätsdaten, die im Laufe des Projekts entwickelt wurde
01.-05.04.2019	Hannover Messe	Vorstellung der Module 1 und 2 am Stand
09.-10.06.2020 bzw. 2021	Woche der Umwelt im Schloss Bellevue, Berlin	Ausstellungsstand und Vorführung der begehbaren Messkammer - aufgrund von Corona auf 2021 verschoben

Im Rahmen des Citizen-Science-Fachdialogs in Berlin am 19. und 20. Oktober 2017 wurde das Projekt von einem Mitarbeiter vertreten.

Beim „Tag der Technik“ 2018, organisiert von den Ingenieurverbänden VDE und VDI in Zusammenarbeit mit den saarländischen Hochschulen und weiteren Partnern, sowie am „Tag der offenen Tür“ der Universität des Saarlandes hatten Schülerinnen und Schüler die Möglichkeit, den Versuch zur Funktionsweise von Halbleiter-Gassensoren durchzuführen. Das Feedback der Teilnehmerinnen und Teilnehmer war dabei sehr positiv. Inzwischen wurde der Versuch auch im Rahmen des zweiwöchigen Schülerbetriebspraktikums IngFo, organisiert von der Universität des Saarlandes, durchgeführt.

Der Versuch zum Funktionsprinzip von Halbleiter-Gassensoren wurde im Herbst 2018 u.a. beim Fachleitertreffen der Studienseminare am 26. September und am „Tag der Schülerlabore“ am 20. November an der Universität des Saarlandes präsentiert. Der „Tag der Schülerlabore“, organisiert von Saarlab in Kooperation mit dem LPM (Landesinstitut für Pädagogik und Medien), richtet sich in erster Linie an Lehrerinnen und Lehrer sowohl aus Geistes- als auch aus Naturwissenschaften, aber auch an Vertreter der Bildungsadministration und an die interessierte Öffentlichkeit und wird in Zusammenarbeit mit dem LPM als Lehrerfortbildung angeboten.

Während einer PhD Summer School im Jahr 2018 zum Thema „Current and future Air Pollution management“ wurden Modul 1 und Teile von Modul 2 einem internationalen Publikum von Doktoranden, aber auch Vertretern von Firmen und Stadtverwaltungen vorgestellt. Die Rückmeldungen waren durchweg positiv und es wurde angefragt, Modul 1 ins Englische zu übersetzen, um es auch außerhalb von Deutschland anbieten zu können. Die Übersetzung wurde vor kurzem abgeschlossen.

Das Projekt wurde bei der COST Action am 12. und 13.11.2018 in Riga, Lettland, mit einem Vortrag vorgestellt und war auch vom 12.-14.02.2019 bei einer COST Action in Varazdin, Kroatien, zum Thema „Portable, Affordable and Simple Analytical Platforms“ mit einem Vortrag und anschließendem Durchführen von Experimenten vertreten. COST (Abkürzung für *Coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique*; zu Deutsch *Europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Wissenschaft und Technologie*) ist ein europäischer Rahmen für die Koordination von national durchgeführten Forschungsaktivitäten in allen Bereichen der Wissenschaft und Technologie. Seit den Anfängen 1971 ist die Beteiligung auf 35 Mitgliedsländer und zahlreiche Teilnehmer weltweit angewachsen, die in unterschiedlichsten transdisziplinären Netzwerken zusammenarbeiten.

Bei der Hannover Messe 2019 wurde das Projekt und insbesondere die Module zur Funktionsweise und Kalibrierung eines Halbleiter-Gassensors vorgestellt.

Ursprünglich hätte das Projekt bei der „Woche der Umwelt“ im Juni 2020 im Garten von Schloss Bellevue in Berlin mit einem Exponat (begehbare Messkammer) sowie einem Stand vertreten sein sollen. Aufgrund der Corona-Pandemie wurde der Auftritt auf das Jahr 2021 verschoben. Neben den projektbeteiligten Mitarbeitern sollen hierbei auch Schülerinnen in die Präsentation eingebunden werden.

Veröffentlichungen

Tabelle 6 zeigt Punkte der Öffentlichkeitsarbeit in Bezug Veröffentlichungen in Zeitschriften und Tagungsbänden.

Für das „International Meeting on Chemical Sensors“ (IMCS) vom 15.-19.07.2018 in Wien wurde ein Abstract über das Projekt verfasst und angenommen. Der Abstract ist als open access Artikel erschienen [47]. In der Ausgabe 63/2018 der Zeitschrift „KON TE XIS“ wurde ein Artikel über das Projekt veröffentlicht [48].

Im Tagungsband der Konferenz „Sensoren und Messsysteme 2019“ ist ein Abstract mit dem Titel „Citizen Science für Schüler*innen: Durchführung von Umweltstudien mit Smartphone und mobiler Messtechnik“ erschienen [49].

Tab. 6 Öffentlichkeitsarbeit: Veröffentlichungen in Zeitschriften und Tagungsbänden

Datum	Veröffentlichung in	Inhalt
15.-19.07.2018	International Meeting on Chemical Sensors (IMCS)	Extended Abstract über das Projekt
Ausgabe 63/2018	„KON TE XIS“	Artikel über das Projekt
25.06.2019	Tagungsband Sensoren und Messsysteme	Citizen Science für Schüler*innen: Durchführung von Umweltstudien mit Smartphone und mobiler Messtechnik
02.-04.12. 2019	Tagungsband 14. Dresdner Sensor-Symposium 2019	Umweltstudien mit Smartphone für Schüler*innen am Beispiel der Untersuchung der Luft in Bienenstöcken
Ausgabe 27 Juli 2020	LeLa Magazin – Neues aus dem Bundesverband	Artikel über nachhaltiges Lernen und Citizen Science mit SUSmobil als Beispiel
2020 (eingereicht)	IEEE – Transactions on Learning Technologies	Veröffentlichung (Peer Review) über das vereinfachte Sensormodell und die experimentelle Realisierung von Modul 1, Titel: „Modeling the Function Principle of Semiconductor Gas Sensors for High School Students“
2020 (eingereicht)	IEEE – Transactions on Learning Technologies	Veröffentlichung (Peer Review) über die experimentelle Realisierung von Modul 2, Titel: “Calibration of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors by High School Students”.

Der Tagungsband des 14. Dresdner Sensor-Symposiums 2019 enthält einen Artikel mit dem Titel „Umweltstudien mit Smartphone für Schüler*innen am Beispiel der Untersuchung der Luft in Bienenstöcken“ [50].

Für das Journal „IEEE – Transactions on Learning Technologies“ wurden zwei Paper mit den Titeln „Modeling the Function Principle of Semiconductor Gas Sensors for High School Students“ mit dem Schwerpunkt Modul 1 und “Calibration of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors by High School Students“ mit dem Schwerpunkt Modul 2 der Schülerlabor-Experimente eingereicht. Diese durchlaufen momentan noch den Review-Prozess.

Projektbeirat

Der Projektbeirat mit Vertretern aus den Bereichen Didaktik/BNE (Prof. Dr. Steffen Schaal, Institut für Naturwissenschaften und Technik, Pädagogische Hochschule Ludwigsburg), Schülerlabore (Prof. Dr. Rolf Hempelmann, Lernort Labor e.V.), Schulen (Christian Lanyi, Schulleiter Max-Planck-Gymnasium Saarlouis) und Industrie (Dr. Richard Fix, Bosch Sensortec GmbH) war für die Durchführung des Projektes sehr wichtig, einerseits durch die zusätzlichen Impulse im Rahmen der regelmäßigen Treffen der Projektpartner mit dem Beirat, andererseits durch die ermöglichte Unterstützung bei der empirischen Begleitforschung sowie der Bereitstellung von Sensorelementen für die Schülerlaborversuche und -umweltstudien.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Sitzungstermine und die dabei schwerpunktmäßig behandelten Themen.

Tab. 7 Übersicht über Treffen mit dem Projektbeirat

Datum	Ort	Inhalt
18.10.2017	Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Messtechnik	Kick-off, Vorstellung des Projektes, der Partner und der geplanten Vorgehensweise
13.09.2018	Schülerforschungszentrum Saarlouis	Schülerlabor-Experimente: Modell und Versuch zur Funktionsweise von Halbleiter-Gassensoren, Kalibrierung mittels künstlichen neuronalen Netzes; Vorstellung Fragebogenkonzept für empirische Begleitforschung
23.08.2019	Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Messtechnik	Weiterentwicklung Schülerlabor-Experimente, Spin-off: Versuch im ing.-wiss. Praktikum, Schülerumweltstudien, Zwischenergebnisse empirische Begleitforschung
15.05.2020	Schülerforschungszentrum Saarlouis	Hands-on Vorstellung der finalen Schülerlabor-Experimente, Vorstellung Schülerumweltstudium, Ergebnisse der empirischen Begleitforschung

Literaturverzeichnis

- [1] European Environment Agency, „EEA Report No 10/2019“, 2019.
- [2] Umweltbundesamt (UBA), „Luftschadstoffe“, 2020. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/>.
- [3] World Health Organization (WHO), „Air Quality Guidelines for Europe“, 2000. [Online]. Available: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf?ua=1.
- [4] WHO, Formaldehyde. Concise International Chemical Assessment Document, Bd. 40, Genf, 2002.
- [5] US Environmental Protection Agency, „Sick Building Syndrome“, 1993.
- [6] P. Wolkoff, P. Clausen, B. Jensen, G. Nielsen und C. Wilkins, „Are We Measuring the Relevant Indoor Pollutants?“, *Indoor Air*, Bd. 7, pp. 92-106, 1997, doi: 10.1111/j.1600-0668.1997.t01-2-00003.x.
- [7] X. Chen, F. Li, C. Liu, J. Yang, J. Zhang und C. Peng, „Monitoring Human Health Risk Assessment and Optimized Management for Typical Pollutants in Indoor Air from Random Families of Universities Staff, Wuhan City, China“, *Sustainability*, Bd. 9, p. 1115, 2017, doi: 10.3390/su9071115.
- [8] M. Madou und S. Morrison, „Chemical Sensing with Solid State Devices“, Academic Press, Boston, 1989.
- [9] J. Ding, T. McAvoy, R. Cavicchi und S. Semancik, „Surface state trapping models for SnO₂-based microhotplate sensors“, *Sensors and Actuators B*, Bd. 77, pp. 597-613, 2001.
- [10] T. Baur, A. Schütze und T. Sauerwald, „Optimierung des temperaturzyklischen Betriebs von Halbleitersensoren“, *tm - Technisches Messen*, Bd. 82, pp. 187-195, 2015.
- [11] J. Kappler, „Characterization of high performance SnO₂ gas sensors for CO-detection by in situ techniques“, Shaker-Verlag, 2001.
- [12] A. Lee und B. Reedy, „Temperature modulation in semiconductor gas sensing“, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Bd. 60, pp. 35-42.
- [13] M. Leidinger, T. Sauerwald, W. Reimringer, G. Ventura und A. Schütze, „Selective detection of hazardous VOCs for indoor air quality applications using virtual gas sensor array“, *JSSS*, Bd. 3, pp. 253-263, 2014, doi: 10.5194/jsss-3-253-2014.
- [14] T. Baur, „Modell eines Halbleitersensors im temperaturzyklischen Betrieb“, Bachelor-Arbeit, Lehrstuhl für Messtechnik, Universität des Saarlandes, 2014.
- [15] H. Lang, „Beatmung für Einsteiger“, Hamburg, 2007.
- [16] H. Grams, O. Hehl und J. Dressmann, „Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumlufte“, Umweltbundesamt, 2008.
- [17] M. Pettenkofer, „Über Luftwechsel in Wohngebäuden“, Cotta, 1858.
- [18] W. Demtröder, „Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik“, Kaiserslautern, Springer-Verlag, 2012.

- [19] H. Schweisfurth, „Gesundheitsschäden durch Feinstaub“, Pulmologisches Forschungsinstitut, Cottbus, 2015.
- [20] Umweltbundesamt, „Warum ist Feinstaub schädlich für den Menschen“, Pressemitteilung 09.05. 2013. [Online]. Available: <http://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/warum-ist-feinstaub-schaedlich-fuer-den-menschen>.
- [21] T.-W. Chan, J. Roschelle, S. Hsi, K. Kinshuk, M. Sharples und et al., „One-to-one technology-enhanced learning: an opportunity for global research collaboration“, Research and Practice in Technology-Enhanced Learning, Bd. 1, Nr. 1, pp. 3-29, 2006.
- [22] L. H. Wong und C. K. Looi, „What seams do we remove in mobile-assisted seamless learning? A critical review of the literature.“, Computers & Education, Bd. 57, Nr. 4, pp. 2364-2381, 2011.
- [23] A. Kukulska-Hulme, A. Sharples, M. Milrad, I. Arnedillo-Sanchez und G. Vavoula, „Innovation in mobile learning: a European perspective“, Mobile and Blended Learning, Bd. 1, Nr. 1, pp. 13-35, 2009.
- [24] Blynk Inc., Blynk, [Online]. Available: <http://blynk.io>
- [25] „ThingSpeak“, MathWorks, [Online]. Available: <https://thingspeak.com/>.
- [26] S. Höfner, M. Hirth, B. Brück, J. Kuhn und A. Schütze, „Modeling of the Function Principle of Semiconductor Gas Sensors for High School Students“, IEEE: Transactions on Learning Technologies, 2020 (eingereicht).
- [27] S. Höfner, M. Hirth, B. Brück, J. Kuhn und A. Schütze, „Calibration of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors by High School Students“, IEEE: Transactions on Learning Technologies, 2020 (eingereicht).
- [28] ams, „Datenblatt AS-MLV-P2“, [Online]. Available: https://www.mouser.de/datasheet/2/588/AS-MLV-P2_DS000359_1-00-1513213.pdf.
- [29] Bosch Sensortec, „Datenblatt BME680“, [Online]. Available: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme680-ds001.pdf>.
- [30] Heltec, „Datenblatt ESP32“, [Online]. Available: <https://heltec.org/project/wifi-kit-32/>.
- [31] Adafruit, 2020. [Online]. Available: https://github.com/adafruit/Adafruit_BME680.
- [32] <http://www.susmobil.de/downloads>.
- [33] Sensirion, „Datenblatt SGP30“, 2020. [Online]. Available: <https://www.sensirion.com/de/umweltsensoren/gassensoren/multipixel-gassensoren/>.
- [34] Sensirion, „Datenblatt SCD30“, 2020. [Online]. Available: https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/9.5_CO2/Sensirion_CO2_Sensors_SCD30_Datasheet.pdf.
- [35] Sensirion, „Datenblatt SPS30“, 2020. [Online]. Available: https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/9.6_Particulate_Matter/Datasheets/Sensirion_PM_Sensors_SPS30_Datasheet.pdf.
- [36] „Datenblatt ESP8266 NodeMCU v3“, Lolin, [Online]. Available: <https://docs.zerynth.com/latest/official/board.zerynth.nodemcu3/docs/index.html>.

- [37] Adafruit, „Adafruit_Sensor_Master“, [Online]. Available: https://github.com/adafruit/Adafruit_Sensor.
- [38] Adafruit, „SGP30_Master“, [Online]. Available: https://github.com/adafruit/Adafruit_SGP30.
- [39] „Sensirion - SCD30_Master“, [Online]. Available: <https://github.com/Sensirion/embedded-scd/blob/master/scd30/scd30.h>.
- [40] Deutscher Wetterdienst, „Feinstaubmessung in Kurorten - Warum es sich lohnt.“, [Online]. Available: https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/medizin/broschuere_feinstaub.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- [41] ams, „Datenblatt CCS811“, [Online]. Available: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/4/3/CCS811_Datasheet-DS000459.pdf
- [42] Atmel, „Datenblatt ATtiny“, [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1698186.pdf>
- [43] Atmel, „Datenblatt ATmega38“, [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1698186.pdf>
- [44] M. Gossen, B. Holzhauser, M. Schipperges und G. Scholl, „Umweltbewusstsein in Deutschland 2014 Vertiefungsstudie: Umweltbewusstsein und Umweltverhalten junger Menschen.“, Umweltbundesamt, 2015.
- [45] F. G. Kaiser, B. Oerke und F. X. Bogner, „Behavior-based environmental attitude: Development of an instrument for adolescents.“, *Journal of Environmental Psychology*, Bd. 27, Nr. 3, pp. 242 - 251, 2007.
- [46] M. Hirth, „Akustische Untersuchungen mit dem Smartphone und Tablet-Computern: Fachliche und didaktische Aspekte.“, Dr. Hut, 2019.
- [47] S. Höfner, M. Hirth, B. Brück, J. Kuhn und A. Schütze, „Citizen Science with Smart Gas Sensors: Air Quality Assessment and Environmental Studies by Students.“, *Proceedings IMCS2018*, pp. 421 - 422, 2018.
- [48] A. Schütze und B. Brück, „SUSmobil: Befähigung und Begleitung von Schülern zur Durchführung von Umweltstudien mit Smartphone und mobiler Messtechnik - Bewertung von Luftqualität und Abgasen durch Erfassung umwelt- und gesundheitsrelevanter Schadstoffe“, *KON TE XIS*, Nr. 63, pp. 4 - 6, 2018.
- [49] S. Höfner, A. Schütze, B. Brück, M. Hirth und J. Kuhn, „Citizen Science für Schüler*innen: Durchführung von Umweltstudien mit Smartphone und mobiler Messtechnik“, *Tagungsband: 20. GMA/ITG Fachtagung Sensoren und Messsysteme*, pp. 476 - 481, 2019.
- [50] S. Höfner und A. Schütze, „Umweltstudien mit Smartphone für Schüler*innen am Beispiel der Untersuchung der Luft in Bienenstöcken“, *Tagungsband: 14. Dresdner Sensorsymposium*, pp. 148-153, 2019.

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Stoffe für die TVOC-Duelle.	32
Tab. 2 Gegenüberstellung von Testparametern der Baseline-Erhebung für den ungekürzten Umweltfragebogen und nach Testkürzung um 8 Items (N = 178). Es sind M: Mittelwert, SD: Standardabweichung, D: Diskriminationsindex, α C: Cronbach's Alpha als Maß der internen Konsistenz (Reliabilitätsschätzer).	46
Tab. 3 Bivariate Korrelationswerte zwischen Umweltverhalten (UV) mit den Noten und dem Interesse in naturwissenschaftlich-mathematischen Fächern. NP ist die auf den Drang nach Wissen gerichtete Neugierde als Personeneigenschaft, in Abgrenzung zur situativ geweckten Neugierde. Die Skala RA misst den von den Schülerinnen und Schülern empfundenen Realitätsbezug bzw. die Authentizität des naturwissenschaftlichen Unterrichts.	47

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Funktionsweise eines Halbleiter-Gassensors: Schematische Darstellung als Struktur- und Bändermodell einer polykristallinen Schicht eines halbleitenden Metalloxidgassensors ohne (links) und mit (rechts) Gasangebot [8] [11].	10
Abb. 2 Links: Stationäre und transiente Zustände eines Korn-Korn-Übergangs bei unterschiedlichen Temperaturen. Mitte: Arrhenius-Plot des Sensorsignals während eines Temperaturzyklus mit zwei Temperaturen. Rechts: Zeitlicher Verlauf des Sensorsignals im Temperaturzyklus [14].	11
Abb. 3 Links: Kommerzielle App „Blynk“. Rechts: Kostenlose App ThingSpeak.	13
Abb. 4 Online-Darstellung der Sensordaten. Neben der Auswahl der Sensoren können auch das Zeitintervall angepasst, die Daten im .csv-Format heruntergeladen und so lokal ausgewertet werden.	14
Abb. 5 „SUSmobil-App“. Sensoren können direkt an den USB-C-Ausgang des Smartphones angeschlossen werden, um Messdaten auslesen sowie darstellen zu können.	14
Abb. 6 Oben: Messplatine mit Probengefäß aus Glas. Dieses wird mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt und unter den Sensor geschraubt, die Reaktion des Sensors auf den sog. Headspace (Dampfraum über der Flüssigkeit) wird direkt mit einem Multimeter erfasst. Unten: Messproben und Anschluss an die Platine. Die Heizspannung für den Gassensor wird über ein USB-Netzteil bereitgestellt und kann durch Potentiometer manuell variiert und mit einem zweiten Multimeter erfasst werden.	16
Abb. 7 Sensorreaktion und relativer Wert bezüglich Wasser bei Heizspannungen von 1,2 V (links) und 2,6 V (rechts). Bei 2,6 V Heizspannung können die drei Stoffe Wasser, Apfelsaft und alkoholfreies Bier besser voneinander getrennt werden.	17
Abb. 8 Schüleradäquates Modell zur theoretischen Beschreibung der Funktion eines Halbleiter-Gassensors im thermisch statischen Zustand. Links: Sensor ohne Gasatmosphäre. Mitte: Sensor in Sauerstoffatmosphäre. Rechts: Sensor mit Sauerstoff und reduzierendem Gas.	18
Abb. 9 Sensorwiderstand über Wasser (blau), Apfelsaft (rot) und alkoholfreiem Bier (grün) bei unterschiedlichen Heizspannungen. Links: lineare Darstellung. Rechts: logarithmische Darstellung.	19
Abb. 10 Vereinfachtes theoretisches Modell zur Erklärung der Sensorreaktion bei unterschiedlichen Sensortemperaturen und Gasatmosphären.	19
Abb. 11 Experimenteller Aufbau zur Durchführung der Kalibrierung eines MOX-Halbleiter-Gassensors. Links: Gasvorratskammer zur Erzeugung einer bekannten Ethanol-Konzentration. Rechts: Messkammer mit Sensor und Mikrocontroller.	21

Abb. 12 Screenshot der Kalibriersoftware. Links: Hauptmenü. Rechts: Tutorial.....	22
Abb. 13 Prinzip einer Kalibrierung an den Beispielen Thermometer und Gassensor.....	22
Abb. 14 Schematische Darstellung eines temperaturzyklischen Sensorbetriebs. Links: Stationäre und transiente Zustände. Rechts: Widerstandsverlauf über die Zeit, hervorgerufen durch abrupte Temperaturänderungen.....	23
Abb. 15 Widerstandsverläufe eines Halbleiter-Gassensors bei verschiedenen Konzentrationen und einem Temperatursprung (schematisch). In den Verläufen ist die Extraktion von Kurvenmerkmalen (z. B. Maxima oder Steigungen) angedeutet.	24
Abb. 16 Schematischer Versuchsaufbau zur Kalibrierung eines Halbleiter-Gassensors. V.l.n.r.: Gasvorratskammer, Messkammer mit Gassensor, Mikrocontroller, Mess-Software.....	25
Abb. 17 Screenshot der Mess- und Kalibriersoftware.	26
Abb. 18 Bestimmung der „am wenigsten falschen Lösung“. Links: Kombination auf den Gewichtungsfaktoren g_1 und g_2 . Der grüne Bereich zeigt eine akzeptable Kombination an. Rechts: Vorhersage des Modells auf Grundlage der gewählten Gewichtungsfaktoren.	26
Abb. 19 Vorhersage der Gaskonzentration mit Hilfe eines künstlichen neuronalen Netzes nach 10.000 Trainingsiterationen mit mehr (links) und weniger (rechts) geeigneten Merkmalen. Die schwarze Linie zeigt das ideale Modell an.....	27
Abb. 20 Links: Platine mit TVOC-, CO ₂ - und Feinstaubsensoren. Rechts: Sensoren und Messgrößen.	28
Abb. 21 Doppelseite der unterstützenden Broschüre.	29
Abb. 22 CO ₂ -Emission der letzten 30 Jahre in Deutschland (links) und weltweit (rechts, blau) sowie Anstieg der CO ₂ -Konzentration in der Atmosphäre von 1860 bis 2015 (rechts, rot).	29
Abb. 23 Links: Korrelation von CO ₂ und TVOC beim Schlafen und Lüften. Rechts: Mögliche Quellen von VOCs.	30
Abb. 24 Gesundheitliche Auswirkungen von Feinstaub stehen im engen Verhältnis dessen Eindringtiefe in den Atemtrakt und damit mit der Partikelgröße. Grafik entnommen aus der Broschüre „Feinstaubmessung in Kurorten – Warum es sich lohnt.“ vom Deutschen Wetterdienst. Beschriftungen wurden schüleradäquat überarbeitet [40].....	30
Abb. 25 Typische Messkurven für Station 1.....	31
Abb. 26 Links: Versuchsaufbau zur Sensormessung in der Station „Ich rieche was, was du nicht riechst“. Rechts: Typische Messkurven über einen Zeitraum von 60 Sekunden für unterschiedliche Verdünnungen von Ethanol:Wasser. Die Sensormessung ermöglicht die zuverlässige Bestimmung der Reihenfolge. Die Nase ist nicht in der Lage, die niedrigsten drei Konzentrationen überhaupt wahrzunehmen.....	32
Abb. 27 Vergleich der Einschätzung der TVOC-Emission von Alltagsgegenständen durch die menschliche Nase und den Sensor (geeignete Zuordnung der TVOC-Messung zur Riechskala).....	33
Abb. 28 GC-MS-Messungen von Filzstiften (Edding). Links: Emissionsarmer Filzstift. Rechts: Herkömmlicher Filzstift. Man beachte die um den Faktor 10 gestreckte Skalierung des linken im Vergleich zum rechten Diagramm.....	33
Abb. 29 Experiment zur Demonstration des Funktionsprinzips eines auf Lichtabsorption basierenden CO ₂ -Sensors. Oben links: 3 Küvetten mit unterschiedlich stark verdünnter roter Lebensmittelfarbe. Oben rechts: Rote und blaue LED auf einer Platine. Unten: Demonstration des Prinzips der wellenlängen-abhängenden Lichtabsorption. Je höher die Konzentration der roten Farbe ist, desto stärker wird blaues Licht absorbiert. Rotes Licht passiert die Küvette dagegen nahezu verlustfrei. ...	34

Abb. 30 Links: Schüler in begehbare Messkammer. Rechts: Verlauf der CO ₂ -Konzentration und der TVOC-Konzentration (unten) ohne Lüftung (durchgezogene Linie) und mit Lüftung (gepunktete Linie).	35
Abb. 31 Experiment zur Demonstration des Funktionsprinzips eines auf Lichtstreuung basierenden Feinstaubsensoren. Links: 3 Küvetten mit unterschiedlichen Suspensionen bestehend aus Wasser und kolloidalen Silikat-Teilchen. Rechts: Demonstration des Prinzips der Lichtstreuung. Je höher die Konzentration der kolloidalen Silikat-Teilchen ist, desto stärker wird das Licht gestreut und es ist besser sichtbar.....	36
Abb. 32 Links: Versuchsaufbau zur Messung der Feinstaubemission. Rechts: Messwerte beim Beschriften einer Tafel mit unterschiedlichen Kreidesorten und anschließend Wischen mit einem trockenen und einem feuchten Schwamm.	36
Abb. 33 Links: Zwei Schüler stellen eine Schadstoffkarte bei Jugend forscht vor. Mitte: Messkammer. Rechts: Heatmap zur Darstellung von Schadstoffkonzentrationen auf Landkarten.....	38
Abb. 34 Überarbeitete Messkammer zur Luftqualitätskartierung.....	38
Abb. 35 Kartierung der Luftqualität am Beispiel der Aufnahme der Feinstaubkonzentration. Links: Google Maps Landkarte. Rechts: Feinstaubkonzentrationen als Heatmap in der App „Blynk“.	39
Abb. 36 Links: Zwei Schülerinnen präparieren einen Bienenrahmen mit Sensoren. Rechts: Verwendete Bienenstöcke.	39
Abb. 37 Beispielhafte Messwerte verschiedener Parameter in einem bewohnten (durchgezogene Linie) und unbewohnten (gepunktete Linie) Bienenkorb. V.l.o.n.r.u.: Temperatur, relative Luftfeuchte, TVOC-Konzentration, CO ₂ -Konzentration.....	40
Abb. 38 Versuchsaufbau zur Erfassung des Einflusses von Pflanzen auf die Luftqualität in Innenräumen. Links: Messkammer ohne Pflanzen. Rechts: Messkammer mit Pflanzen	41
Abb. 39 Verlauf der Ethanol-Konzentration (links, gemessen mit dem SGP30) und Aceton-Konzentration (rechts, gemessen mit dem CCS811) über einen Zeitraum von drei Stunden in der Messkammer ohne (durchgezogene Linie) und mit (gepunktete Linie) Pflanzen.	41
Abb. 40 Links: Zwei Schülerinnen mit einem Feinstaubsensor. Rechts: Feinstaubkonzentration an Silvester bzw. Neujahr 2018/2019.	42
Abb. 41 Miniatur-Kohlenmonoxid-Warner. Links: Prototyp. Rechts: Überarbeitete Version mit leistungsfähigerem Mikrocontroller.....	42
Abb. 42 Hardware zur Detektion von Waldbränden. Links: 3D-gedrucktes Gehäuse mit Solarpanels zur Energieversorgung. Rechts: Innenleben des Gehäuses mit Mikrocontroller, Lithium-Ionen-Akku, LoRa-Antenne und Feinstaubsensor SPS30.....	43
Abb. 43 Schüler mit Forschungsprojekt „AirCoRo“ der Dillinger Hütte.	44
Abb. 44 Schüler mit Forschungsprojekt „Ansätze für emissionsarme Stahlerzeugung“ der Dillinger Hütte.....	44
Abb. 45 Person-Item-Map des Umweltfragebogens nach Kaiser, Oerke (2007) unter Ausschluss von 8 Items (UV3, UV6, UV22, UV25, UV26, UV31, UV37, UV39)	46
Abb. 46 Studienverlaufsplan. Die Interventionsgruppe (IG) durchläuft die Module von SUSmobil, während die Kontrollgruppe (KG) parallel an einem nicht umweltrelevanten Thema arbeitet. Zeitblöcke in der Abbildung entsprechen ca. 90 min. Die Modulbearbeitung aktiviert und qualifiziert zur Durchführung von Schülerumweltstudien (SUS). Das Umweltverhalten wird vor der Intervention (Prä), nach der Klausur (Post) und im Anschluss an die Schülerumweltstudien (Follow-Up) gemessen.	47