

Umweltbildung für Schülerinnen und Schüler zum Thema Luftqualität  
und Entwicklung von Schülerumweltstudien nach dem Prinzip von  
Citizen Science

Dissertation  
zur Erlangung des Grades  
des Doktors der Ingenieurwissenschaften  
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität des Saarlandes

von

Dipl.-Phys. Sebastian Höfner

Saarbrücken

2020

Tag des Kolloquiums: 05.03.2021  
Dekan: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Jörn Walter  
Vorsitz: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Frey  
Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Rolf Pelster  
Akad. Mitarbeiter: Dr. rer. nat. Herbert Wolf





# Zusammenfassung

Das Umweltbewusstsein hat in den letzten Jahren in der Bevölkerung kontinuierlich zugenommen. Dennoch haben gerade Schülerinnen und Schüler meist nur eine abstrakte und diffuse Vorstellung von Luftverschmutzung. Dies kann dadurch begründet werden, dass die meisten Luftschadstoffe sowohl geruch- also auch farblos sind und daher mit menschlichen Sinnen nicht detektiert werden können.

Um das Umweltbewusstsein bei den Schülerinnen und Schülern bezogen auf Luftqualität zu stärken, muss nach Konzepten der Umweltbildung sowohl deklaratives, konzeptuelles und prozedurales Wissen vermittelt und authentische und kontextorientierte Lernszenarien geschaffen werden. Letzteres kann beispielsweise durch die Entwicklung von Schülerumweltstudien nach dem Vorbild von Citizen Science realisiert werden.

In dieser Arbeit werden zunächst drei Schülerlabor-Experimente (Lernmodule) zum Thema Gas- und Umweltsensorik für Schülerinnen und Schüler der Klassenstufen 7 - 13 vorgestellt. Die als computerbasierte Selbstlernkurse konzipierten Module befassen sich mit der Funktionsweise von Metalloxid-Halbleiter Gassensoren (Lernmodul 1), deren Kalibrierung mit Machine Learning Techniken (Lernmodul 2) und der Messung von Luftqualitätsparametern zur Bestimmung der Innenraumluftqualität (Lernmodul 3). Auf der Grundlage des in den Modulen erarbeiteten Wissens haben besonders interessierte Schülerinnen und Schüler eigene Umweltstudien mit Smartphone und mobiler Messtechnik entwickelt.



# Abstract

In recent years, environmental awareness has steadily increased among the general public. Nevertheless, high school students in particular usually have only an abstract and diffuse idea of air pollution. This can be explained by the fact that most air pollutants are both odourless and colourless and therefore cannot be detected with human senses.

In order to increase the environmental awareness of high school students with regard to air quality, concepts of environmental education must be used to convey declarative, conceptual and procedural knowledge as well as create authentic and context-oriented learning scenarios such as the development of environmental studies in the sense of Citizen Science.

In this thesis, three student laboratory experiments (learning modules) on the topic of gas and environmental sensor technology for students in grades 7 - 13 are presented. The modules, designed as computer-based self-learning courses, deal with the function principle of metal oxide semiconductor gas sensors (learning module 1), their calibration with machine learning techniques (learning module 2) and the measurement of air quality parameters for the determination of indoor air quality (learning module 3). Based on the knowledge acquired in the modules, interested students have developed their own environmental studies using smartphones and mobile measurement technology.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>UMWELTBEWUSSTSEIN UND UMWELTBILDUNG .....</b>	<b>5</b>
2.1	DEFINITION UND BESTIMMUNG DES UMWELTBEWUSSTSEINS .....	6
2.2	UMWELTBEWUSSTSEIN – UMWELTWISSEN – UMWELTHANDELN .....	9
2.3	UMWELTBILDUNG UND BILDUNG FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG .....	11
2.3.1	<i>Geschichtliche Entwicklung.....</i>	<i>11</i>
2.3.2	<i>Didaktische Konzepte der Umweltbildung.....</i>	<i>13</i>
2.4	ZWISCHENFAZIT .....	14
<b>3</b>	<b>CITIZEN SCIENCE .....</b>	<b>16</b>
3.1	URSPRUNG UND ENTWICKLUNG VON CITIZEN SCIENCE .....	17
3.2	FORMEN WISSENSCHAFTLICHER MITWIRKUNG IM RAHMEN VON CITIZEN SCIENCE.....	19
3.3	DATENQUALITÄT .....	21
3.4	BEDÜRFNISSE VON TEILNEHMENDEN EINES CITIZEN SCIENCE PROJEKTS .....	22
3.5	CITIZEN SCIENCE FÜR SCHÜLER.....	24
3.6	INTERNET OF THINGS .....	26
3.7	ZWISCHENFAZIT .....	29
<b>4</b>	<b>UMWELTSENSORIK.....</b>	<b>30</b>
4.1	FLÜCHTIGE ORGANISCHE VERBINDUNGEN (VOCs) .....	31
4.1.1	<i>Sensorprinzip zur Messung von VOCs .....</i>	<i>33</i>
4.1.2	<i>Aufbau von MOX-Halbleiter Gassensoren.....</i>	<i>36</i>
4.2	KOHLENSTOFFDIOXID (CO <sub>2</sub> ) .....	37
4.2.1	<i>Sensorprinzip zur Messung von CO<sub>2</sub>.....</i>	<i>39</i>
4.2.2	<i>Aufbau von CO<sub>2</sub>-Sensoren .....</i>	<i>43</i>
4.3	FEINSTAUB .....	46
4.3.1	<i>Sensorprinzip zur Messung von Feinstaub.....</i>	<i>48</i>
4.3.2	<i>Aufbau von Feinstaubsensoren .....</i>	<i>50</i>
4.4	REFERENZMETHODEN .....	51

4.4.1	<i>Referenzmethoden zur Messung von Gasen</i> .....	51
4.4.2	<i>Referenzmethoden zur Messung von Feinstaub</i> .....	58
4.5	KALIBRIERUNG VON MOX-HALBLEITER GASSENSOREN IM TEMPERATURZYKLISCHEN BETRIEB .....	59
4.5.1	<i>Aufnahme von Trainingsdaten</i> .....	59
4.5.2	<i>Signalvorverarbeitung</i> .....	60
4.5.3	<i>Dimensionalitätsreduktion und Merkmalsextraktion</i> .....	61
4.5.4	<i>Mathematische Modellerstellung</i> .....	62
4.5.5	<i>Validierung und Overfitting</i> .....	64
4.6	ZWISCHENFAZIT .....	66
<b>5</b>	<b>UMWELTSENSORIK ALS EXPERIMENTE IN SCHÜLERLABOREN .....</b>	<b>68</b>
5.1	DURCHFÜHRUNG VON EXPERIMENTEN ALS TEIL DES NATURWISSENSCHAFTLICHEN UNTERRICHTS.....	69
5.2	FORMALES, NON-FORMALES UND INFORMELLES LERNEN .....	71
5.2.1	<i>Formales Lernen</i> .....	71
5.2.2	<i>Non-formales Lernen</i> .....	72
5.2.3	<i>Informelles Lernen</i> .....	72
5.3	SCHÜLERLABORE UND SCHÜLERFORSCHUNGSZENTREN .....	73
5.4	UMWELTSENSORIK FÜR SCHÜLER .....	75
5.5	ENTWICKLUNG EINES VEREINFACHTEN SENSORMODELLS – QUALITATIVE UND QUANTITATIVE BESCHREIBUNG .....	77
5.5.1	<i>Komponenten des Sensormodells, Modellannahmen und -vorhersagen</i> .....	78
5.5.2	<i>Einfluss der Sensortemperatur, Atmosphäre unberücksichtigt</i> .....	79
5.5.3	<i>Einfluss einer Sauerstoffatmosphäre ohne reduzierendes Gas</i> .....	80
5.5.4	<i>Einfluss eines reduzierenden Gases</i> .....	83
5.5.5	<i>Dynamische Prozesse während eines Temperatursprungs</i> .....	84
5.5.6	<i>Leistungen und Grenzen des vereinfachten Sensormodells</i> .....	86
5.6	LERNMODULE .....	87
5.6.1	<i>Lernmodul 1 – Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors</i> .....	88
5.6.2	<i>Lernmodul 2 – Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors</i> .....	102
5.6.3	<i>Lernmodul 3 – Umweltmesstechnik</i> .....	116
5.7	ERPROBUNG DER LERNMODULE.....	129
5.7.1	<i>MINT-Praktikum</i> .....	129
5.7.2	<i>Bewertung durch Lehrer und Schüler</i> .....	133
5.7.3	<i>Übertragung der Lernmodule</i> .....	134
5.8	ZWISCHENFAZIT .....	135

<b>6</b>	<b>ENTWICKLUNG VON SCHÜLERUMWELTSTUDIEN NACH DEM PRINZIP VON CITIZEN SCIENCE.....</b>	<b>136</b>
6.1	KONZEPT DER SCHÜLERUMWELTSTUDIEN UND „SEAMLESS LEARNING“ .....	137
6.2	SCHÜLERUMWELTSTUDIEN .....	139
6.2.1	<i>Entwicklung und Kalibrierung eines mobilen CO-Melders</i> .....	139
6.2.2	<i>Waldbrandfrüherkennung</i> .....	152
6.2.3	<i>Untersuchung der Luft in Bienenstöcken</i> .....	161
6.2.4	<i>Weitere Schülerumweltstudien</i> .....	178
6.3	ZWISCHENFAZIT .....	185
<b>7</b>	<b>FAZIT UND AUSBLICK .....</b>	<b>187</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>193</b>
<b>I</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>I</b>
I.1	HERLEITUNG DER ANZAHL DER GEBUNDENEN LADUNGEN DES VEREINFACHTEN SENSORMODELLS .....	I
I.2	HERLEITUNG DER KONZENTRATIONEN AUS LERNMODUL 2 .....	III
I.3	BEGLEITENDE BROSCHÜRE FÜR LERNMODUL 3 .....	V
I.4	MINT-PRAKTIKUM – GROBER ALTERNATIVER LEISTUNGSNACHWEIS .....	XXIII
I.5	ERFAHRUNGSBERICHTE VON LEHRERN .....	XXVII
I.6	MATERIALLISTE DER SELBSTLERNKURSE .....	XXIX
I.7	FACHARBEIT: ENTWICKLUNG EINES MOBILEN KOHLENMONOXID-MELDERS .....	XXXV
I.8	FACHARBEIT: WALDBRANDFRÜHERKENNUNG .....	XLIX
I.9	FACHARBEIT: REGULIEREN BIENEN CO <sub>2</sub> ? .....	LXII
I.10	ABKÜRZUNGEN .....	LXXX
I.11	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	LXXXIII
I.12	TABELLENVERZEICHNIS .....	XCIII
I.13	EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE .....	XCV
I.14	DANKSAGUNG .....	XCVIII



In den folgenden Kapiteln werden die Begriffe „Bürger“, „Wissenschaftler“, „Schüler“ und „Student“ verwendet. Dabei schließen sie auch die weiblichen Formen „Bürgerin“, „Wissenschaftlerin“, „Schülerin“ und „Studentin“, sowie die entsprechende Pluralform ein. In wörtlichen Zitaten wird die jeweils verwendete Form beibehalten. Diese Maßnahme dient lediglich der besseren Lesbarkeit der Arbeit.

In Kapitel 6 werden verschiedene Umweltstudien vorgestellt, die von Schülerinnen und/oder Schülern durchgeführt wurden. Bei der Beschreibung dieser Studien wird zwischen männlicher und weiblicher Form unterschieden.



# 1 Einleitung

Der Erfolg der sozialen Bewegung „Fridays for Future“ (FFF) und auch der Erfolg der Partei „Bündnis 90/Die Grünen“, die mit 34 % bei der Europawahl im Jahr 2019 den größten Stimmenanteil in der Altersgruppe 18 - 24 Jahre erhalten haben, zeigt, dass sich immer mehr Schüler und junge Erwachsene mit den Themen Umwelt und Klimaschutz beschäftigen [1]. Die Gründe für dieses steigende Interesse sind vielfältig. So sorgen weltweite CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Verkehr und Nutzung fossiler Brennstoffe zu einem Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur und dem wahrscheinlichen Verfehlen des „2-Grad-Zieles“ des Pariser Klimaschutzübereinkommen bis zum Jahr 2100 [2]. Die Folge davon sind immer häufigere Dürreperioden, Rekord-Sommer und Naturkatastrophen, wie Überschwemmungen, Stürme und Waldbrände. Junge Menschen sind von den Folgen dieser Entwicklungen persönlich betroffen. Weiterhin konnten allein im Jahr 2019 in Deutschland ca. 70.000 und in der Europäischen Union ca. 400.000 vorzeitige Todesfälle direkt mit Luftschadstoffen, wie flüchtige organische Verbindungen (englisch: „Volatile Organic Compounds“, kurz VOCs), Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Feinstaub (englisch: „Particulate Matter“, kurz PM) in Verbindung gebracht werden [3].

Ein weiterer Grund für das zunehmende Interesse junger Menschen in Bezug auf Umweltthemen kann auf die Umweltbildung zurückgeführt werden. Diese hat ihren Ursprung in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts, wobei sich ihre didaktischen Konzepte seither kontinuierlich weiterentwickeln. Während früher hauptsächlich die Vermittlung von reinem Umweltwissen im Vordergrund stand, beinhaltet Umweltbildung heutzutage als Teil der „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (BNE) zusätzlich zu ökologischen Blickpunkten auch ökonomische und soziale Aspekte [4]. Gerade in Bezug auf die persönlichen Auswirkungen auf die Umwelt ist die Vermittlung von Kompetenzen sowie der systemischen Zusammenhänge und die Förderung von Bewusstsein eine zentrale Voraussetzung für die Gestaltung einer zukunftsfähigen Gesellschaft. Demnach ist die Vermittlung von Umweltwissen zwar eine Grundvoraussetzung für die Entwicklung eines Umweltbewusstseins, jedoch nicht ausreichend, um eine Änderung im Umweltverhalten zu erzielen [5] [6] [7] [8] [9]. Vielmehr müssen Lernszenarien authentisch und kontextorientiert sein, die Umweltprobleme aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachten und persönliche

Handlungsalternativen aufzeigen [10] [11] [12]. Lernen darf demnach nicht nur auf formale Bildungseinrichtungen wie Schule oder Universität beschränkt sein, sondern muss auch non-formale und informelle Elemente beinhalten [13] [14].

Eine Möglichkeit, diese Lernszenarien zu unterstützen, bietet das Konzept des „Mobile Assisted Seamless Learnings“ (MSL). Die Allgegenwärtigkeit und Mobilität von Smartphones und Tablets macht es möglich, Lernen als einen Prozess erlebbar zu machen, wodurch Lernen in verschiedensten Szenarien „nahtlos“ (seamless) stattfinden kann und nicht auf den Klassenraum begrenzt ist [15]. Durch das „Internet of Things“ (IoT) ist es möglich, Umweltdaten mit Hilfe von Smartphone-Apps zu visualisieren und auszuwerten. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, sich sowohl orts- als auch zeitunabhängig mit Umweltdaten auseinanderzusetzen.

Die Umsetzung und Verbindung des formalen, non-formalen und informellen Lernens erfolgt heutzutage beispielsweise in außerschulischen Bildungseinrichtungen wie Schülerlaboren oder Schülerforschungszentren [16]. Dort können Schüler sowohl naturwissenschaftliche Experimente in curricular validen Themenbereichen durchführen als auch eigene, schulunabhängige (Umwelt-) Studien nach Prinzipien von Citizen Science (CS) entwickeln [17] [18]. Letzteres beinhaltet je nach Partizipationsebene unter anderem das Aufstellen eigener Hypothesen, die Entwicklung einer Methodik zur Datenerhebung und das Auswerten bzw. die Interpretation der Daten. CS zeichnet sich dadurch aus, dass die Bevölkerung in den Prozess des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns, unabhängig von Alter, sozialer Herkunft und Bildungsgrad auf unterschiedlichen Partizipationsebenen einbezogen wird [19]. Dadurch kann Wissenschaft entmystifiziert werden und CS so eine Brückenfunktion zwischen Wissenschaft, Gesellschaft und Politik einnehmen [20]. Bürger können an Themen forschen, die sie persönlich betreffen und interessieren.

Gerade das Umweltbewusstsein in Bezug auf Luftverschmutzung und Luftschadstoffe ist in der Bevölkerung noch wenig ausgeprägt und vor allem junge Menschen haben oft nur eine diffuse und abstrakte Vorstellung von Luftschadstoffen. Dies liegt unter anderem daran, dass viele Schadstoffe sowohl geruchs- als auch farblos sind und daher mit menschlichen Sinnen nicht registriert werden können. Insbesondere in Innenräumen stellen Luftschadstoffe wie VOCs eine Gefahr dar, weil der langsame Anstieg der Konzentration riechbarer Schadstoffe mit der Nase in der Regel nicht bemerkt wird. Die Folge sind Konzentrationsstörungen [21], Kopfschmerzen, Schwindel [22] und das „Sick-Building-Syndrom“ [23]. Weiterhin herrschen oft Fehlkonzepte in Bezug auf die Luftqualität. So wird beispielsweise Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in der öffentlichen Wahrnehmung oftmals als Luftschadstoff angesehen, obwohl dieser erst ab vergleichsweise sehr hohen Konzentrationen über 5.000 ppm

gesundheitliche Auswirkungen hat [24]. Diese Größenordnungen werden jedoch im Normalfall in Innenräumen nicht erreicht. Dennoch eignet sich CO<sub>2</sub> als Indikatorwert zur Bestimmung der Luftqualität, da VOC- und CO<sub>2</sub>-Konzentration korrelieren, falls der Mensch die einzige VOC-Quelle darstellt [25]. Ein weiterer Schadstoff, welcher in den letzten Jahren vor allem in Großstädten wie Stuttgart ein Thema war, ist Feinstaub. Zu den gesundheitlichen Folgen erhöhter Feinstaubkonzentrationen gehören pulmonale und kardiovaskuläre Erkrankungen [26]. Dennoch muss auch hier angemerkt werden, dass nicht automatisch jeder Feinstaub schädlich ist. Beispielsweise gilt die salzige Meeresluft als gesundheitsfördernd [27].

Das Ziel dieser Arbeit ist es Schülern der Mittel- und Oberstufe ein umfassendes Bild über das Thema Luftqualität und Luftschadstoffe zu vermitteln, um so ihr Umweltbewusstsein zu stärken. Dabei ist es wichtig nicht nur Faktenwissen zu lehren, sondern authentische und kontextorientierte Lernszenarien zur Verfügung zu stellen, siehe Tabelle 1.1. Dies kann beispielsweise in Schülerlabor-Experimenten und in Umweltstudien realisiert werden.

<b>Umweltbildung zum Thema Luftqualität</b>			
<b>Vermittlung von Wissen über...</b>		<b>Authentische Lernszenarien in Form von ...</b>	
<b>Luftschadstoffe bzw. Indikatoren</b>	<b>Zugehöriges Sensorprinzip</b>	<b>Experimenten in Schülerlaboren und Schülerforschungs- zentren</b>	<b>Umweltstudien nach dem Prinzip von Citizen Science</b>
Flüchtige organische Verbindungen (VOCs)	Leitwertänderung von Halbleiter-Materialien	Funktionsweise von Sensoren	Entwicklung und Durchführung von Schülerumweltstudien
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	Infrarotabsorption	Kalibrierung von Sensoren	
Feinstaub (PM <sub>2.5</sub> und PM <sub>10</sub> )	Lichtstreuung	Aufnahme und Interpretation von Umweltsensordaten	

**Tab. 1.1** Umweltbildung zum Thema Luftqualität. Um ein Bewusstsein über Luftschadstoffe zu vermitteln muss einerseits Wissen über Schadstoffe und Sensorprinzipien vermittelt werden, und andererseits authentische Lernszenarien entwickelt werden.

Zunächst wird der Begriff des „Umweltbewusstseins“ definiert und Gründe für die Diskrepanz zwischen Umweltwissen und Umweltverhalten erörtert. Darauf aufbauend werden die modernen didaktischen Konzepte der Umweltbildung beschrieben und aufgeführt wie diese in Umweltbildungseinrichtungen realisiert werden können (Kapitel 2). Anschließend geht es um die Möglichkeiten der Beteiligung der allgemeinen Bevölkerung am wissenschaftlichen Forschungsprozess in Form der Mitwirkung an CS-Projekten. Dabei wird insbesondere auf Voraussetzungen und Chancen von CS im Bereich der Jugend- und Umweltbildung und die Möglichkeit Sensorsysteme mit Hilfe des „Internet of Things“ (IoT) zu vernetzen, eingegangen (Kapitel 3). Danach werden verschiedene Luftschadstoffe in Bezug auf Quellen, Grenzwerte und ihre gesundheitlichen Auswirkungen auf den Menschen sowie verschiedene Sensorprinzipien zu deren Detektion vorgestellt (Kapitel 4). Aufbauend auf diesen theoretischen Grundlagen wird ein schüleradäquates Sensormodell zur Erklärung des Funktionsprinzips eines Metalloxid-(MOX)-Halbleiter Gassensors zur Messung von VOCs entwickelt. Weiterhin werden drei Lernmodule für Schüler der Sekundarstufe I und II vorgestellt, die sich inhaltlich mit der Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors (Lernmodul 1), der Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors mit Machine Learning Techniken unter Verwendung eines temperaturzyklischen Betriebs (Lernmodul 2) und der Messung verschiedener Umweltparameter (Lernmodul 3) befassen (Kapitel 5). Anschließend wird ein Konzept zur Erstellung von Schülerumweltstudien auf der Grundlage der Konzepte von CS erarbeitet und dieses anhand verschiedener Beispiele vorgestellt (Kapitel 6). Schließlich werden die Ergebnisse und Erfahrungen diskutiert und eingeordnet (Kapitel 7).

Diese Arbeit ist im Zuge des Projekts „SUSmobil“ als Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für Messtechnik (LMT) der Universität des Saarlandes, der AG Didaktik der Physik der Technischen Universität Kaiserslautern und dem Schülerforschungszentrum Saarlouis entstanden. Das Projekt von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) im Rahmen der Förderlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) gefördert.

## 2 Umweltbewusstsein und Umweltbildung

Ein Großteil der Bevölkerung beschreibt sich selbst als umweltbewusst. Dennoch ist vielen Menschen die Definition von Umweltbewusstsein unbekannt. Nach heutigem Verständnis setzt sich dieses aus mehreren Faktoren zusammen und beinhaltet neben der Kenntnis über Umweltprobleme und deren Lösungen auch die persönliche Einstellung gegenüber der Umwelt und das eigene Umweltverhalten [28] [29] [30] [31]. Es zeigt sich, dass es eine Diskrepanz zwischen dem Umweltwissen bzw. der Einstellung und dem Umweltverhalten gibt [32] [33]. Die Gründe dafür sind vielfältig und können unter anderem auf hohe persönliche Kosten in Form des zeitlichen und monetären Mehraufwandes oder das Phänomen des „trägen Wissens“ zurückzuführen sein [12]. Um dennoch eine Verbesserung des Umweltbewusstseins in allen Facetten zu erzielen, wurde in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts erstmals ein Konzept zur Umweltbildung entwickelt [34]. Dieses ist seit den 80er Jahren fester Bestandteil der Didaktik in Bildungseinrichtungen in Deutschland und besagt, dass Lernen authentisch und kontextorientiert sein muss, um einen nachhaltigen Effekt auf das Umweltverhalten zu haben [35]. Im Laufe der 90er Jahre wurde die Kampagne zur „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ ins Leben gerufen, welches neben Umweltbildung auch ökonomische und sozio-kulturelle Aspekte im Sinne der Nachhaltigkeit beinhaltet [36].

In diesem Kapitel wird zunächst auf die ein- und mehrdimensionalen Definitionen von Umweltbewusstsein eingegangen. Anschließend wird erläutert, wie Umweltbewusstsein im Sinne des mehrdimensionalen Verständnisses anhand von Kennzahlen quantifiziert werden kann. Weiterhin werden aktuelle Kennwerte zur Erfassung des Umweltbewusstseins in Deutschland aus dem Jahr 2018 präsentiert. Daraufhin werden Gründe für die Diskrepanz zwischen Umweltbewusstsein, Umweltwissen und Umweltverhalten erörtert. Insbesondere wird dabei auf die Unterscheidung zwischen konzeptuellem, deklarativem und prozeduralem Umweltwissen eingegangen. Schließlich wird die Entwicklung verschiedener didaktischer Konzepte der Umweltbildung von den Anfängen in den 1970er Jahren bis zum heutigen Konzept der BNE beschrieben.

## 2.1 Definition und Bestimmung des Umweltbewusstseins

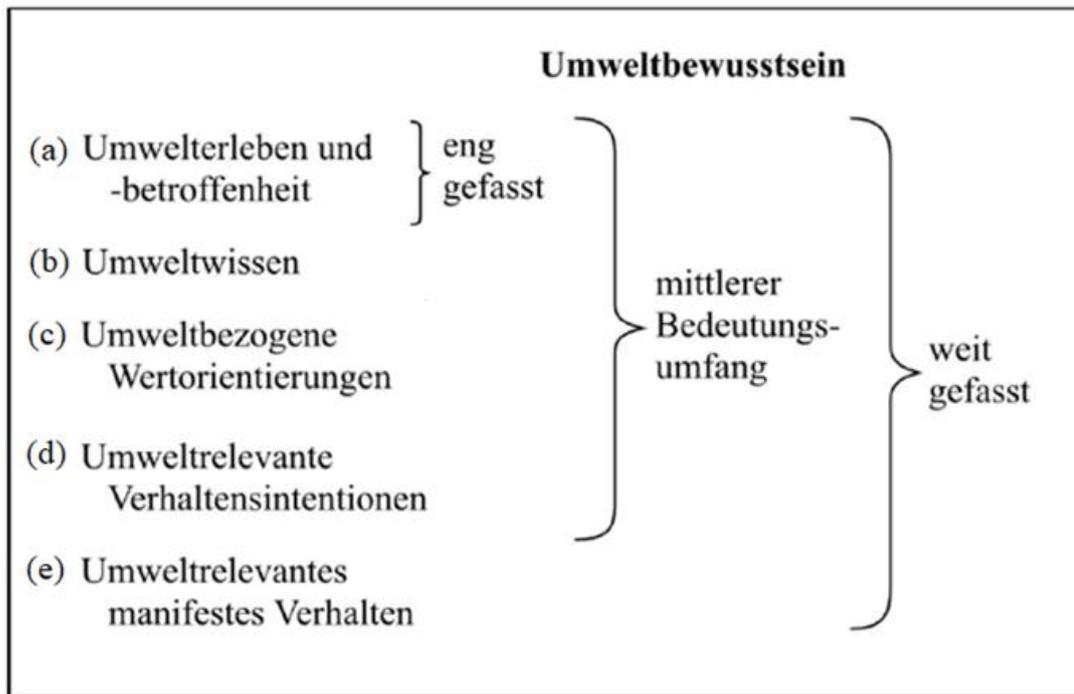
Im Laufe der Zeit wurden immer neue Definitionen des Begriffs Umweltbewusstsein entwickelt, die sich inhaltlich dahingehend unterscheiden, ob Umweltbewusstsein ein- oder mehrdimensional betrachtet wird. Bei der eindimensionalen Betrachtung wird das Umweltbewusstsein als allgemeine Einstellung interpretiert. Nach Neugebauer [29] wird Umweltbewusstsein demnach als eine affektive einheitliche Komponente und als Werthaltung gegenüber der Umwelt verstanden. In der erstmaligen Definition des Sachverständigenrates für Umweltfragen aus dem Jahr 1978 wird Umweltbewusstsein als „die Einsicht in die Gefährdung der natürlichen Lebensgrundlagen des Menschen durch diesen selbst, verbunden mit der Bereitschaft zur Abhilfe“ beschrieben [37]. Dabei beziehe sich die „Einsicht in die Gefährdung“ nach Preisendörfer [30] auf eine kognitive Einstellungskomponente, also der Akzeptanz, dass ein Umweltproblem als solches anerkannt wird. Die „Bereitschaft zur Abhilfe“ sei eine konative Einstellungskomponente, also die Handlungsbereitschaft im persönlichen Alltag. Gleichzeitig kritisiert Preisendörfer [30], dass diese Definition zu eindimensional gedacht sei und weder affektive noch emotionale Komponenten enthalte. Es sei wichtig, die Betroffenheit von Personen über Umweltzerstörung in Form von Angst, Wut, Empörung mit einzubeziehen und so ein mehrdimensionales Verständnis von Umweltbewusstsein zu haben.

Bei der mehrdimensionalen Interpretation werden je nach Autor auch emotionale, kognitive und verhaltensorientierte Aspekte einbezogen. Nach de Haan & Kuckartz beinhaltet die mehrdimensionale Betrachtung von Umweltbewusstsein vor allem die drei Hauptkomponenten:

- Umwelteinstellung – Einstellung gegenüber Umweltschutz im engeren Sinne, sowie emotionale Komponenten wie Betroffenheit und emotionale Anteilnahme, mit der Personen auf Prozesse der Umweltzerstörung reagieren [38];
- Umweltverhalten – tatsächliches persönliches Verhalten im Alltag bezogen auf die Umwelt [28];
- Umweltwissen – Informationen über Natur sowie Methoden und Denkmuster in Bezug auf Umweltfragen [28].

Nach Spada [39] kann Umweltbewusstsein in drei Klassen eingeteilt werden. Im Sinne eines eng gefassten Bedeutungsumfangs wird lediglich das Umwelterleben und die Umweltbetroffenheit (a) einbezogen. Der mittlere Bedeutungsumfang beinhaltet zusätzlich die Aspekte Umweltwissen (b), umweltbezogene Wertorientierung (c) und

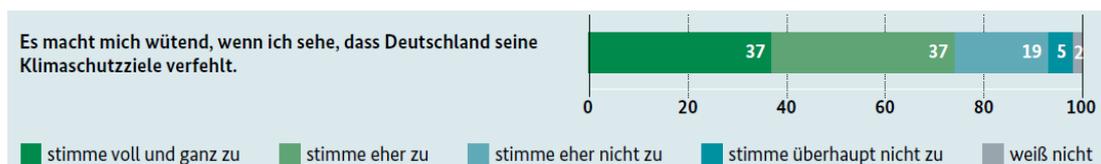
umweltbezogene Verhaltensintention (d). Im weitesten Bedeutungsumfang beinhaltet Umweltbewusstsein ein umweltrelevantes, manifestes Verhalten (e), siehe Abbildung 2.1.



**Abb. 2.1** Mehrdimensionale Betrachtung des Begriffs „Umweltbewusstsein“. Aus [40], nach [39].

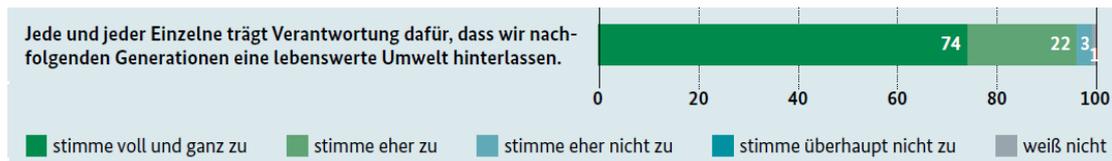
Im Rahmen der Studie „Umweltbewusstsein in Deutschland“, welche alle zwei Jahre vom Bundesumweltministerium gemeinsam mit dem Umweltbundesamt durchgeführt wird, wurde für die Erhebung des Umweltbewusstseins in Deutschland im Jahr 2018 ein neues, standardisiertes Befragungsinstrument entwickelt, um Umweltbewusstsein in Zukunft einheitlich zu erheben [31]. Dieses basiert auf einem mehrdimensionalen Verständnis von Umweltbewusstsein und umfasst die drei Teilaspekte Umweltaffekt, Umweltkognition und Umweltverhalten, die über die Abfrage von jeweils 7 bzw. 8 Items ermittelt wurden. Die Abbildungen 2.2, 2.3 und 2.4 zeigen jeweils Beispielfragen aus diesen Bereichen.

- Umweltaffekt – „Einstellungen, bei denen emotionale Reaktionen auf Umweltthemen im Vordergrund stehen“.



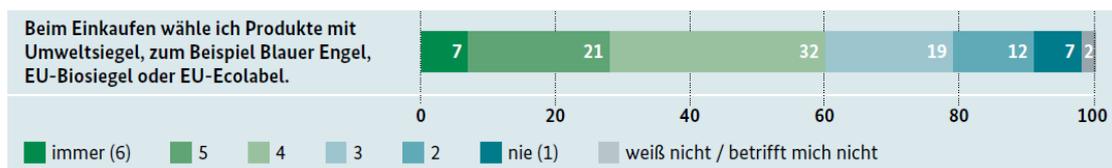
**Abb. 2.2** Beispielfrage zur Ermittlung des Umweltbewusstseins im Teilbereich des Umweltaffekts [31].

- Umweltkognition – „Einstellungen, in denen sachliche Aussagen zu Umweltthemen beurteilt werden, etwa in Bezug auf Ressourcennutzung oder Verantwortung für die Umweltsituation künftiger Generationen“.



**Abb. 2.3** Beispielfrage zur Ermittlung des Umweltbewusstseins im Teilbereich der Umweltkognition [31].

- Umweltverhalten – „Aussagen zu eigenen Verhaltensweisen in unterschiedlichen umweltrelevanten Lebensbereichen wie Ernährung, Einkauf, Alltagsmobilität; auch selbstberichtetes Engagement für Umwelt- und Klimaschutz“.



**Abb. 2.4** Beispielfrage zur Ermittlung des Umweltbewusstseins im Teilbereich des Umweltverhaltens [31].

Ergänzt werden diese Teilaspekte durch Fragen zu umweltbezogenes Fakten- und Handlungswissen sowie Fragen bezüglich der persönlichen CO<sub>2</sub>-Emission. Die Ergebnisse der Befragungen zu jedem Teilaspekt werden anschließend in kompakten Kennziffern („Zustimmungsraten“) im Bereich zwischen 0 und 10 ausgedrückt. Je höher die Kennziffer, desto größer ist auch die Zustimmung. Die Ergebnisse der repräsentativen Umfrage aus 2.017 Befragten ab 14 Jahre ist in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

	Anzahl Fragen	Mittelwert	Standardabweichung	Cronbach Alpha
<b>Umweltaffekt</b>	7	7,2	1,92	0,80
<b>Umweltkognition</b>	8	7,9	1,44	0,77
<b>Umweltverhalten</b>	8	4,6	1,74	0,62

**Tab. 2.1** Statistische Kennwerte für Umweltaffekt, Umweltkognition und Umweltverhalten. Der Wert „Cronbach Alpha“ ist ein Gütekriterium für die interne Konsistenz eines Fragebogens. Ab 0,6 gilt es als akzeptabel, ab 0,7 als befriedigend, zwischen 0,8 und 0,9 als gut [31].

Sowohl die Teilaspekte Umweltaffekt als auch Umweltkognition zeigen mit Werten von 7,2 bzw. 7,9 hohe Zustimmung in der Bevölkerung. Dahingegen fällt das Umweltverhalten mit 4,6 Punkten deutlich ab. Umweltaffekt und Umweltkognition korrelieren mit einem Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,73$ . Umweltaffekt und Umweltverhalten bzw. Umweltkognition und Umweltverhalten zeigen dagegen eine etwas geringere Korrelation ( $r = 0,51$  und  $r = 0,48$ ). Im Durchschnitt haben weibliche Befragte in allen drei Teilbereichen höhere Zustimmungswerte als männliche.

Ein Vergleich der Antworten zur persönlichen CO<sub>2</sub>-Emission mit dem Umweltbewusstsein zeigt, dass diese im Durchschnitt mit steigendem Umweltbewusstsein sinkt. Die Korrelationskoeffizienten liegen bei  $r = -0,17$  bezogen auf Umweltaffekt,  $r = -0,22$  bezogen auf Umweltkognition und  $r = -0,25$  bezogen auf das Umweltverhalten.

Des Weiteren fällt auf, dass das Umweltbewusstsein nur schwach mit dem Umweltwissen zusammenhängt. Die Korrelationskoeffizienten liegen hier bei  $r = 0,08$  bezogen auf Umweltaffekt,  $r = 0,10$  bezogen auf Umweltkognition und  $r = 0,16$  bezogen auf das Umweltverhalten. Das reine Faktenwissen hat demnach kaum einen Einfluss auf das Umweltbewusstsein. Auf die Gründe dafür wird im nächsten Abschnitt genauer eingegangen.

## 2.2 Umweltbewusstsein – Umweltwissen – Umwelthandeln

Bereits in den ersten großen Studien zum Thema Umweltbewusstsein in Deutschland von Braun [5] und Langeheine & Lehmann [6] konnte gezeigt werden, dass durch schulische Umweltbildung durchaus einen Einfluss auf das Umweltwissen, jedoch nur ein schwacher Einfluss auf die Umwelteinstellung und gar kein Einfluss auf das Umwelthandeln genommen werden kann. Diese Ergebnisse wurden auch in folgenden Studien von Szagun et al. [7], Milton et al. [8] und Rode et al. [41] bestätigt. Obwohl sich ein Großteil der Menschen als umweltbewusst bezeichnet weist das Umwelthandeln noch große Defizite auf. Preisendörfer führt drei Gründe für die Diskrepanz zwischen Umweltbewusstsein bzw. Umweltwissen und Umweltverhalten an [32]. Diese basieren auf einer Studie von Diekmann & Preisendörfer [33].

- **Vielschichtigkeit des Umweltverhaltens**

Der Begriff Umweltverhalten kann sich in vielen Facetten äußern. Beispielsweise kann eine Unterscheidung zwischen Einkaufsverhalten, Abfalltrennung, Energiesparen und Verkehrsverhalten erfolgen. Es zeigt sich, dass es bis auf vereinzelte Ausnahmen den „konsequenten Umweltschützer“ oder den „konsequenten Umweltsünder“ nicht gibt. Durch diese Vielschichtigkeit fällt es Personen leichter, sich in Bereichen hervorzuheben, in denen sie selbst positiv in Erscheinung treten. Dadurch entsteht jedoch eine verzerrte Selbstwahrnehmung in Bezug auf das eigene Umweltverhalten.

- **Umweltbewusst nur in Alibi-Bereichen**

Eine Änderung des Umweltverhaltens ist immer mit persönlichen Kosten im weiteren Sinne wie Geld, Zeit und Bequemlichkeit verbunden. Umweltbewusstsein wirke daher am ehesten verhaltenssteuernd in solchen Bereichen, die mit niedrigen persönlichen Verhaltenskosten verbunden sind, sogenannte „low-cost-Situationen“. So ist es beispielsweise einfacher, Müll zu trennen als auf das Auto zu verzichten und öffentliche Verkehrsmittel zu nutzen. Das eigene Umweltgewissen wird häufig durch Aktivität in jenen Bereichen beruhigt, die mit nicht allzu großen Verhaltenszumutungen und Unbequemlichkeiten verbunden sind. Diese „low-cost-Situationen“ haben daher einen Alibi-Charakter.

- **Kurzfristig „rationale“ Verhaltensorientierung**

In den wichtigen Bereichen ist das Umweltverhalten mit einer „Rationalitätsfalle“ verknüpft. Die Änderung des persönlichen Umweltverhaltens ist mit hohen persönlichen Verhaltenskosten verbunden, hat aber gleichzeitig nur einen geringen Nutzen für die Umwelt. Dies wird häufig als Vorwand benutzt, das eigene Verhalten nicht zu ändern. In der durchgeführten Befragung vertraten beispielsweise 48% der Teilnehmer die Ansicht, dass sie durch ihr eigenes Verhalten nur einen verschwindend geringen Beitrag zur Lösung der Umweltprobleme leisten können. Stattdessen werde die Verantwortung auf die Politik und die Wirtschaft übertragen, die zunächst geeignete Rahmenbedingungen schaffen müssen. Ein Großteil der Befragten (84%) stufen sich persönlich als überdurchschnittlich bezogen auf ihr eigenes Umweltverhalten ein. Gleichzeitig finden 60% der Befragten, dass sich der Rest der Bevölkerung als umweltschädlich verhält.

Um diese Diskrepanz zu beseitigen, empfiehlt Preisendörfer neue Anreizstrukturen in Bezug auf Preise, Zeitkosten oder Bequemlichkeitsvorteile zu schaffen. So habe beispielsweise ein Vergleich des Umweltverhaltens der Städte Bern und München im Jahr 1991 gezeigt, dass Menschen in Bern aufgrund besserer Voraussetzungen ein besseres Umweltverhalten bei gleichem Umweltwissen haben [32].

Gräsel führt die Gründe für die Diskrepanz zwischen Umweltwissen und Umwelthandeln auf das Prinzip des „trägen Wissens“ zurück. Dieses bezeichnet die „defizitäre Anwendung von Wissen auf komplexe oder alltägliche Situationen“. Es reicht nicht, den Menschen nur Wissen über Umweltprobleme in Form von Fakten zu vermitteln – vielmehr müsse es einen angemessenen und soliden Hintergrund für intentionales ökologisches Handeln darstellen und so deklaratives, konzeptuelles und prozedurales Wissen vereinen [12]. Deklaratives Wissen und konzeptuelles Wissen werden in der Literatur nicht eindeutig voneinander getrennt. Deklaratives Wissen

umfasst sowohl das reine Faktenwissen als auch das Wissen über komplexe Zusammenhänge. Nach Gräsel ist das deklarative Wissen über umweltbezogene Handlungsoptionen wichtiger als das über ökologische Systeme und Umweltprobleme. Weiterhin sei das konzeptuelle Wissen im Bereich Umweltwissen das Wissen über handlungsrelevante ökologische Zusammenhänge. Dies beinhaltet vor allem Kausalbeziehungen dazu, wie Umweltprobleme entstehen [12]. Nach Anderson zeichnet sich konzeptuelles Wissen durch die Beziehungshaltigkeit aus [42]. Damit ist gemeint, dass Wissen abstrahiert und auf ähnliche Situationen übertragen werden kann. Schneider sieht in konzeptuellem Wissen die Basis für inhaltliches Verständnis. Es wird deshalb in der Literatur auch häufig als „knowing why“ bezeichnet [43].

Das prozedurale Wissen hingegen befasst sich mit dem „knowing how“ und wird auch als Handlungswissen verstanden. Es beschreibt ein System von Handlungsregeln (Prozeduren) und ist nach Schneider „eine Menge von Regeln, deren sequentielle Anwendung die zielgerichtete Lösung von Problemen ermöglicht“ [43]. Es muss demnach auch vermittelt werden, wie das Gelernte konkret umgesetzt werden kann. Nach Gräsel geht das Umsetzen umweltbewusster Handlungsweisen oft mit dem Aufbrechen von hocheffizienten Routinen im Alltag einher. Diese sind mit wenig kognitivem Aufwand verbunden. Ein Aufbrechen dieser Routinen und die Entwicklung alternativer Handlungsroutinen hingegen sind sowohl mit der mühsamen Erweiterung des deklarativen Wissens als auch mit der Umsetzung neuer Prozeduren verbunden. Daher müssen situationale Handlungsanreize geschaffen werden, um umweltbewusste Handlungsweisen zu fördern. Das heißt, umweltschädigendes Verhalten muss teuer, unbequemer und langwieriger werden [12].

## 2.3 Umweltbildung und Bildung für nachhaltige Entwicklung

Durch die Diskrepanz zwischen Umweltbewusstsein, Umweltwissen und Umweltverhalten stand und steht die Umweltbildung vor Herausforderungen. Im Laufe der Geschichte haben sich die Konzepte der Umweltbildung hin zu BNE gewandelt. Dieser Wandel wird im Folgenden skizziert.

### 2.3.1 Geschichtliche Entwicklung

Bereits im Jahr 1953 wurde auf der Kultusministerkonferenz (KMK) erstmals beschlossen, die Themen Naturschutz, Landschaftspflege und Tierschutz in den

Lehrplan der Fächer Biologie und Geographie aufzunehmen [44]. Das frühe Konzept der Umweltbildung kam jedoch erstmals in den 1970er Jahren auf. Als entscheidender Ausgangspunkt für die Prägung des Begriffs gilt die Veröffentlichung „Grenzen des Wachstums“, welche vom *Club of Rome*<sup>1</sup> initiiert und herausgegeben wurde [45]. Die darin vorgestellten Studien und Prognosen für die Zukunft der Weltwirtschaft sowie die Rolle der Umwelt führten zu der Überzeugung, dass Umweltbildung ein entscheidender Punkt für die Erhaltung der Lebensgrundlagen der Menschheit sei. Die in der Folge von der deutschen Bundesregierung (1972), der „United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization“ (UNESCO, 1979) und der KMK (1980) entwickelten Programme zur Umweltbildung sollten „Werte, Einstellungen und Kenntnisse vermitteln, die eine Grundlage für den Umweltschutz darstellen und die Entwicklung neuer Verhaltensmuster für Einzelne, Gruppen und Gesellschaft unterstützt“ [34].

In den 1980er Jahren wurde die Umweltbildung als Teil des Lehrplans pädagogischer Institutionen in Deutschland etabliert. Im Jahr 1986 wurde auf dem Kongress „Zukunftsaufgabe Umweltbildung“ des Bundesministeriums für Bildung und Wissenschaft gefordert, dass die Umweltbildung und die Entwicklung einer ökologischen Handlungskompetenz gefördert werden solle [35].

Auf einer Konferenz der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro im Jahr 1992 mit dem Thema „Umwelt und Entwicklung“ wurde ein Aktionsprogramm unter dem Namen „Agenda21“ verabschiedet. Dieses formuliert Ziele in Bezug auf die soziale Gerechtigkeit, Ökonomie und Ökologie. So soll beispielsweise die Luftverschmutzung reduziert, das Abholzen der Wälder und weltweite Armut bekämpft, die Gleichberechtigung zwischen Mann und Frau gestärkt oder verantwortungsbewusstes Unternehmertum vermittelt werden [36]. Durch diese Verknüpfung der Themen Umweltbildung, soziale Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit stellt es den Beginn des Konzepts der BNE dar.

Im Jahr 2015 wurde die „Agenda 2030“ von allen Mitgliedstaaten der Vereinten Nationen beschlossen. Nach dem Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung beinhaltet dieser Katalog 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (englisch: „Sustainable Development Goals“, kurz SDGs). Diese SDGs „berücksichtigen erstmals alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit – Soziales, Umwelt, Wirtschaft – gleichermaßen. Die Ziele sind unteilbar und bedingen einander. Ihnen sind fünf Kernbotschaften als handlungsleitende Prinzipien vorangestellt: Mensch, Planet, Wohlstand, Frieden und Partnerschaft.“ [4].

---

<sup>1</sup> Der Club of Rome ist ein Zusammenschluss von Experten aus 30 Ländern und unterschiedlichen Disziplinen mit dem Ziel Zukunftsprobleme der Menschheit zu identifizieren und Handlungsoptionen zu entwickeln.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich das Konzept der Umweltbildung im Laufe der Geschichte immer mehr von einem eindimensionalen auf einen mehrdimensionalen Ansatz gewandelt hat. Während sich Umweltbildung in der Mitte des 20. Jahrhunderts hauptsächlich auf Themen wie Natur- und Tierschutz beschränkt hat, umfasst es heute als Teil der BNE auch ökonomische und soziale Aspekte. Dementsprechend haben sich auch die didaktischen Konzepte mit der Zeit gewandelt.

### 2.3.2 Didaktische Konzepte der Umweltbildung

Nach Rode ist das Ziel der klassischen Umweltbildung ein Bewusstsein für Umweltprobleme und somit ein Verantwortungsbewusstsein für das eigene Handeln zu schaffen [9]. Die reine Vermittlung von Wissen, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, hat nur geringen oder keinen langfristigen Einfluss auf das Umweltverhalten. Nach Rieß [11] und Gräsel [12] ist das Vermitteln von deklarativem und prozeduralem Umweltwissen dennoch der Grundbaustein zur Verbesserung des Umweltbewusstseins in Form des Umwelthandelns. Jedoch sei die Art und Weise, wie dieses Wissen vermittelt wird entscheidend. Damit Wissen nicht träge bleibt, müsse es demnach anwendungsorientiert in aktiver, problemorientierter Weise in Lernumgebungen erworben sowie situiert und alltagsbezogen vermittelt werden. Nach de Witt & Czerwionka beschreibt situiertes Lernen die Verknüpfung von Lern- und Anwendungsprozessen. Wissen wird so kontextgebunden vermittelt, wobei auch zwischenmenschliche Interaktionen eine große Rolle spielen [10]. In Bezug auf die Änderung des Umweltverhaltens bedeutet dies, dass Lernsituationen geschaffen werden müssen, die eine unmittelbare Naturerfahrung ermöglichen. Dadurch werden praktische und theoretische Konzepte miteinander verknüpft und so das Lernen erlebbar gemacht.

Nach Bolscho & Seybold [44] beruht die klassische Umweltbildung auf den drei Konzepten der Situations-, Problem- und Handlungsorientierung. Die Situationsorientierung beschreibt einen Ansatz, nach dem sich die Schüler mit Umweltthemen des heimatlichen Umfelds beschäftigen. Diese dienen dann als Einstieg in globale Umweltfragen. Die Problemorientierung ist eine Variante des „forschenden Lernens“. Durch die tiefgreifende Untersuchung eines Umweltproblems können Konzepte kritisch hinterfragt werden. Die Handlungsorientierung beschreibt ein didaktisches Konzept, das Schüler ganzheitlich, sowohl kognitiv und affektiv als auch körperlich einbezieht. Schüler sind dadurch in der Lage, die Umwelt zu erleben und Wirkungen des eigenen Handelns zu erfahren.

Im Zuge des Übergangs der klassischen Umweltbildung zu BNE wurde auch das didaktische Konzept um soziale, ökonomische und globale Aspekte erweitert. Das Ziel

ist es, ein anhaltendes umweltgerechtes Verhalten im Sinne der Nachhaltigkeit anzustreben [46]. Die klassische Umweltbildung beruht auf einem Bedrohungsszenario. Zerstörte oder geschädigte Umwelt gilt es zu schützen. Im Gegensatz dazu beruht BNE auf dem positiven Gedanken der Bewältigung von ökologischen, ökonomischen und sozialen Problemen [47].

In Deutschland sind über 1.500 Umweltbildungseinrichtungen über den Verein „Arbeitsgemeinschaft Natur- und Umweltbildung Bundesverband e.V.“ (ANU) organisiert [48]. Die Vielfalt der Themen im Bereich Umweltbildung reicht von Energie und Klimaschutz über Konsum und Lebensstil bis zu Mobilität und Verkehr. Ein Beispiel für eine solche Umweltbildungseinrichtung ist das „Spohns Haus“ im saarländischen Germersheim. Dieses bietet verschiedene Umweltbildungsmodule zu den Themen Wald, Energie und Klima, Bienen, Ernährung, Konsum und Biosphäre für Schüler der Grund- und Mittelstufe an. In diesen lernen Schüler während mehrtägigen Aufenthalten beispielsweise die Bedeutung hinter dem „Fair Trade“ Siegel, welchen Einfluss die Herstellung und Entsorgung verschiedener Konsumgüter auf den Naturhaushalt hat oder wie die Sonne als alternativer Energielieferant genutzt werden kann [49].

## 2.4 Zwischenfazit

Umweltbewusstsein kann sowohl eindimensional als auch mehrdimensional definiert werden. Bei der eindimensionalen Interpretation beschreibt Umweltbewusstsein eine affektive einheitliche Komponente bzw. eine Werthaltung gegenüber der Umwelt. In der mehrdimensionalen Interpretation setzt sich Umweltbewusstsein aus mehreren Komponenten wie der Umwelteinstellung, dem Umweltwissen und dem Umweltverhalten zusammen. Dadurch werden auch emotionale, kognitive und verhaltensorientierte Aspekte berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass es eine Diskrepanz zwischen Umweltwissen und Umweltverhalten gibt. Die Gründe dafür sind vielfältig, lassen sich aber beispielsweise auf das Prinzip des „trägen Wissens“ zurückführen. Demnach führt reines Faktenwissen über Umweltprobleme nicht zu einer Änderung des Umweltverhaltens. Vielmehr müsse deklaratives, konzeptuelles und prozedurales Wissen vereint werden. In Bezug auf das Thema Luftqualität beinhalten deklaratives und konzeptuelles Wissen demnach beispielsweise das Wissen über die Existenz von Luftschadstoffen, Grenzwerte, gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen, Quellen, Messprinzipien und die Nutzung von CO<sub>2</sub> als Indikator für Innenraumluftqualität. Als prozedurales Wissen

sind in diesem Zusammenhang Strategien zur Erhaltung einer guten Luftqualität und die Nutzung umweltfreundlicher Alternativprodukte zu nennen, siehe Tabelle 2.2.

Wissensart	Wissen über...
Deklarativ und/oder konzeptuell	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existenz von Luftschadstoffen (z.B. flüchtige organische Verbindungen, Feinstaub)</li> <li>• Grenzwerte</li> <li>• Gesundheitliche Auswirkungen</li> <li>• Quellen</li> <li>• Messprinzipien</li> <li>• CO<sub>2</sub> als Luftgüte-Indikator</li> </ul>
Prozedural	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strategien zur Erhaltung einer guten Luftqualität (z.B. regelmäßiges Lüften in Innenräumen)</li> <li>• Nutzung umweltfreundlicher Alternativprodukte</li> </ul>

**Tab. 2.2** Deklaratives und konzeptuelles bzw. prozedurales Wissen in Bezug auf das Thema Luftqualität.

Nach Konzepten der Umweltbildung muss Wissen anwendungsorientiert, aktiv, problemorientiert, situiert und alltagsbezogen vermittelt werden. Eine Möglichkeit, dies zu tun, kann beispielsweise das Durchführen von Experimenten mit Luftqualitätssensoren sein. Dadurch können direkte Erfahrungen mit Sensoren und Luftschadstoffen gesammelt werden, wodurch theoretische und praktische Konzepte miteinander verknüpft werden. Weiterhin werden Konzepte der BNE wie soziale, ökonomische und gesellschaftliche Aspekte im Rahmen von Umweltstudien nach dem Prinzip von CS erfüllt und sowohl gesellschaftliches Engagement gefördert als auch zur Kompetenzentwicklung beigetragen.

# 3 Citizen Science

Die Beteiligung von Bürgern am wissenschaftlichen Forschungsprozess hat in den letzten Jahren eine immer größere Bedeutung erlangt. Durch die Mitarbeit von Nicht-Wissenschaftlern an wissenschaftlichen Fragestellungen im Rahmen von CS kann der Prozess des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns entmystifiziert werden [20]. CS kann dabei als Brückenfunktion zwischen Gesellschaft, Politik und Wissenschaft agieren [50]. Die Bandbreite an Partizipationsmöglichkeiten ist vielfältig und reicht von der Bereitstellung von Ressourcen und Sensordaten bis hin zur Entwicklung eigener Fragestellungen, Methoden und Analytik als Teil der reinen Bürgerwissenschaft [51]. Besonders in Bezug auf Umweltbildung kann CS als Teil der BNE einen Beitrag leisten, da Wissen nicht nur zur Verfügung gestellt wird, sondern eigene Interessen und eine aktive Mitgestaltung an gesellschaftlichen Transformationsprozessen im Vordergrund stehen [52]. Somit können soziale, ökonomische und gesellschaftliche Aspekte miteinander verknüpft werden.

Ein häufiger Kritikpunkt an CS ist die Qualität der erhobenen Daten. Um diese zu sichern, sind Training der Teilnehmenden im Vorfeld sowie der allgemeine Aufbau des Projekts von entscheidender Bedeutung [53] [54]. Außerdem müssen abhängig von Alter, Bildung, Erfahrung und Wissenschaftskompetenz der Teilnehmenden, sowie der Partizipationsebene unterschiedliche Bedürfnisse befriedigt werden, um ein erfolgreiches CS-Projekt zu initiieren [55]. Nur dann, wenn sowohl Kernbedürfnisse, operative Bedürfnisse als auch individuelle Bedürfnisse befriedigt werden können die Potentiale der Teilnehmenden voll ausgeschöpft werden.

Besonders Schüler können von der Mitarbeit in CS-Projekten profitieren, indem Schlüsselkompetenzen und kritisches Denken gefördert werden [56]. So kann CS einen Beitrag dazu leisten, den Wandel hin zu einer Wissensgesellschaft zu vollziehen [57].

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über die Entwicklung von CS im Laufe der Zeit gegeben. Es werden die unterschiedlichen Partizipationsebenen innerhalb eines CS-Projekts vorgestellt, auf das Thema der Datenqualität eingegangen sowie Möglichkeiten vorgestellt, um diese zu sichern. Anschließend werden die Bedürfnisse von Bürgern vorgestellt und beschrieben, welche Rolle CS speziell in Bezug auf die

(Umwelt-)Bildung von Schülern spielen kann. Schließlich wird auf die Möglichkeiten des „Internet of Things“ (IoT) eingegangen, Sensoren über das Internet miteinander zu vernetzen sowie Datenaufnahme und –auswertung zu automatisieren. Diese Technik ermöglicht es den Fokus auf die Beantwortung der (Umwelt-)Fragestellung zu legen.

## 3.1 Ursprung und Entwicklung von Citizen Science

Das Umweltbundesamt beschreibt CS als „ehrenamtlich durchgeführte Aktivitäten, die zu wissenschaftlichem Erkenntnisgewinn und zur Forschung beitragen“ [58]. Dabei sei die Freiwilligkeit ein zentrales Element. Das Engagement im Rahmen von CS solle nicht zum Zweck der Erwerbstätigkeit, sondern als Engagement für die Wissenschaft verstanden werden. Gleichzeitig stehe bei CS die Schaffung neuen Wissens durch die Beantwortung einer Fragestellung mit wissenschaftlichen Methoden sowie der wissenschaftlichen Auswertung und Interpretation von Daten im Vordergrund [58]. Bis heute gibt es jedoch keine einheitliche Definition des Begriffes „Citizen Science“.

So beschreibt das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Gemeinschaftsprojekt „Bürger schaffen Wissen“, CS als „... einen Ansatz, bei dem wissenschaftliche Erkenntnisse von Personen, die nicht hauptberuflich in der fachzugehörigen Wissenschaft tätig sind, mit oder ohne Beteiligung von hauptamtlich Forschenden, gewonnen werden.“ [59]. Irwin, einer der Mitbegründer der modernen Form von CS, definierte es im Jahr 1995 als eine Wissenschaft, die sich im Idealfall an den Bedürfnissen und Sorgen der Bürger orientiert, sowie diese im Sinne eines bottom-up-Ansatzes bearbeitet [60]. Der Begriff bottom-up-Ansatz steht hierbei für die Grundidee, dass sich ein übergreifendes Problem durch Lösung kleinerer Teilprobleme mit der Hilfe von Bürgern lösen lässt. Dabei sind Bürger die treibende Kraft. Im Gegensatz dazu führt der top-down-Ansatz vom Allgemeinen schrittweise zum Speziellen. Die Initiative geht hierbei von der Wissenschaft aus, indem die Forschungsfrage und der wissenschaftliche Rahmen vorgegeben sind.

Nach Finke et al. [61] soll CS Probleme mit gesellschaftlicher Relevanz, wie beispielsweise Themen zum globalen Wandel oder der Umweltproblematik, bearbeiten. Haklay et al. [51] beschreiben CS als wissenschaftliche Aktivitäten, in welchen nicht-professionelle Wissenschaftler auf freiwilliger Basis dabei helfen, Daten zu sammeln, sie zu analysieren und wissenschaftliche Projekte zu verbreiten. Chandler et al. [62] definieren CS als die Teilnahme der allgemeinen Bevölkerung an

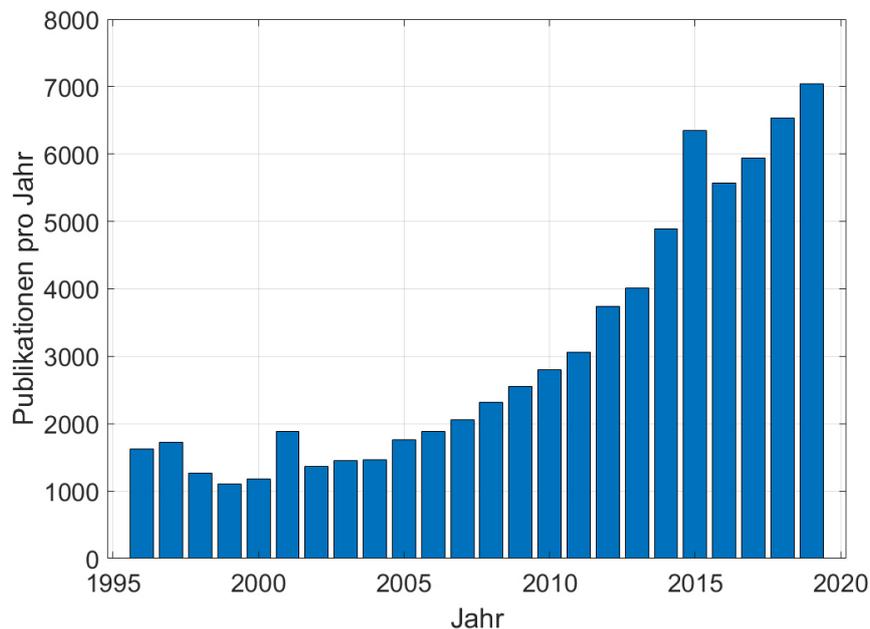
wissenschaftlicher Forschung und als einen „Mainstream-Ansatz“, um Daten im Bereich der Biodiversität zu sammeln. Zusammenfassend kann CS als ein Prozess bezeichnet werden, der vor allem auf der Freiwilligkeit und der wissenschaftlichen Mitarbeit von Bürgern zu einem gesellschaftlich relevanten Thema beruht.

Noch vor 200 Jahren gab es die Berufsbezeichnung „Wissenschaftler“ nicht [63]. Zu dieser Zeit war das wissenschaftliche Forschen meist nur den Privilegierten vorbehalten. So war beispielsweise Charles Darwin nur ein freiwilliger unabhängiger Begleiter auf dem Schiff von Kapitän Robert FitzRoy, als er ab 1831 für fast 5 Jahre mit der „HMS Beagle“ um die Welt fuhr und im Anschluss daran schließlich 1838 seine Evolutionstheorie veröffentlichte. Thomas Jefferson, einer der Gründerväter der Vereinigten Staaten von Amerika (USA), erstellte erstmals ein Netzwerk von Wetterbeobachtern in insgesamt 6 Bundesstaaten. Auf der Grundlage dieser Arbeit richtete das Smithsonian Institute 1849 ein System zum Empfang von Wetterdaten ein. Im Jahr 1990 war die Zahl der Beobachter auf 10.000 Stationen angewachsen. Dieses System existiert noch immer in Form des Kooperativen Beobachterprogramms und wird auch vom Nationalen Wetterdienst genutzt. Heute sind über 12.000 Wetterstationen im Netzwerk vertreten [64].

Erst Ende des 19. Jahrhunderts fand eine Professionalisierung des Berufs „Wissenschaftler“ im Sinne einer Bezahlung statt. Durch diesen Schritt wurde mehr Menschen die Chance geboten, sich an wissenschaftlicher Arbeit zu beteiligen. Das wohl erste CS-Projekt der neuen Zeit ist der „Christmas Bird Count“ der National Audubon Society in den USA, welche seit 1900 jährlich eine Zählung von Vogelarten organisiert. Mittlerweile beteiligen sich jedes Jahr Zehntausende Menschen an der Zählung [65]. Ein weiteres Beispiel ist die im Jahr 1932 gegründete Organisation „British Trust for Ornithology“. Sie sammelt Daten von Vogelbeobachtern in Großbritannien, welche in die Datenbank des National Biodiversity Network einfließen. Sie enthält mittlerweile über 31 Millionen Beiträge über 27.000 Pflanzen- und Tierarten [63].

Die Bandbreite an CS-Projekten hat sich seit Anfang des 19. Jahrhunderts stark vergrößert. Wurden früher häufig nur Tierarten gezählt, werden heutzutage vermehrt Themen wie Klimawandel, Wasserqualitäts-Monitoring und „ecological restoration“ behandelt. Dies spricht für eine stetige Weiterentwicklung des Begriffs CS in der gesellschaftlichen Wahrnehmung. Vor allem aufgrund moderner Technik in Form von Apps und dem IoT gab es in den letzten Jahren einen regelrechten „boom“ im Bereich von CS-Projekten. Dadurch haben Bürger immer mehr Möglichkeiten, sich an solchen Projekten zu beteiligen. Dies zeigt sich auch an der Zahl der Veröffentlichungen in

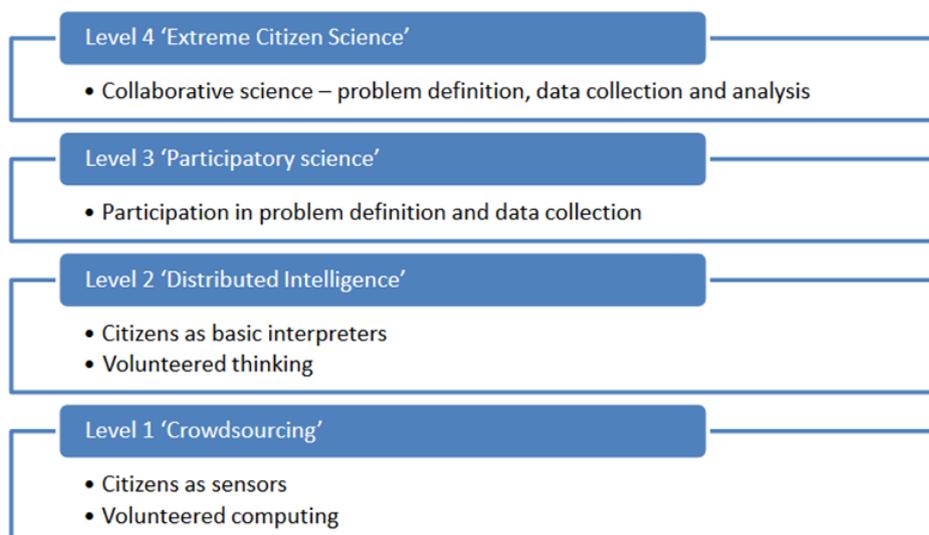
diesem Bereich, welche seit Anfang der 2000er Jahre stetig ansteigt, siehe Abbildung 3.1.



**Abb. 3.1** Entwicklung der Anzahl an Publikationen über CS auf der wissenschaftlichen Online-Datenbank „ScienceDirect“ des Verlags Elsevier [66].

## 3.2 Formen wissenschaftlicher Mitwirkung im Rahmen von Citizen Science

Die Art und Weise sowie der Umfang wissenschaftlicher Mitwirkung im Rahmen von CS lässt sich nach Haklay et al. [51] in vier Ebenen unterteilen, siehe Abbildung 3.2.



**Abb. 3.2** Unterschiedliche Ebenen der Partizipation in einem CS-Projekt [51].

Die unterste Ebene stellt das „Crowdsourcing“ dar. Sie beschränkt sich auf die Bereitstellung von Ressourcen der Teilnehmenden, wie Rechenkapazität oder die Aufnahme von (Sensor-)Daten. Ein Beispiel, wie die Bereitstellung von Rechenkapazität genutzt werden kann, ist das Projekt „Folding@Home“ der School of Medicine der Washington University. Dieses untersucht unter anderem das Virus SARS-CoV-2, welches Anfang 2020 zu einer weltweiten Pandemie geführt hat. Bürger können die Rechenleistung ihres Heim-Computers zur Verfügung stellen, um die Dynamik des COVID-19 Proteins zu untersuchen. Dadurch kann die Entwicklung eines Impfstoffes unterstützt werden [67]. Klassische CS-Projekte wie die Erstellung von Datenbanken über Tier- und Pflanzenarten lassen sich der Kategorie der Aufnahme von (Sensor-)Daten zuordnen. Der große Vorteil dieser Art der Beteiligung ist, dass die Ressourcen kontrolliert eingesetzt werden können und die Datenqualität bis zu einem gewissen Grad gesichert ist. Art und Eigenschaften von eingesetzten Instrumenten sind bekannt. Jedoch bleiben Bürger in dieser Ebene eher passiv, wodurch ihr wertvollster Beitrag, ihre kognitiven Fähigkeiten, verschwendet wird [51].

Die zweite Ebene wird als „verteilte Intelligenz“ (englisch: „distributed intelligence“) bezeichnet. Diese hat nicht nur das Ziel, eine wissenschaftliche Fragestellung zu beantworten, sondern zielt auch vermehrt darauf ab, Bürgern schon vor und während der Datenaufnahme Wissen über ein neues Themenfeld zu vermitteln. Typischerweise erhalten Teilnehmende zu Beginn eine Grundausbildung, die dazu dient, Hintergründe des Projekts zu verstehen, Daten ordnungsgemäß aufzunehmen und einfache Auswertungen selbst durchführen zu können. In der Regel umfasst diese Schulung einen Test, damit die Datenqualität besser eingeordnet werden kann. Wissenschaftler agieren als Mentoren und sollen mögliche aufkommende Fragen der Teilnehmenden beantworten können, um sie in ihrem Lernen auch über die Grundausbildung hinaus unterstützen zu können. Die ersten beiden Ebenen verfolgen den top-down-Ansatz, bei dem die Fragestellung und Methodik vorgegeben sind.

Die nächste Ebene ist die Partizipationsebene (englisch: „participatory science“). Hierbei wird sowohl die Fragestellung als auch die Methodik zur Datenerhebung von Wissenschaftlern und Bürgern gemeinsam im Sinne eines bottom-up-Ansatzes entwickelt. Durch dieses Vorgehen kann auf die Bedürfnisse der Bürger eingegangen werden. Diese a priori Involvierung führt zu einem besseren Verständnis für das jeweilige Thema. Des Weiteren können Bürger auch bei der Analyse der Daten einbezogen werden, wobei die wissenschaftliche Auswertung und Interpretation aufgrund des Wissenstandes noch den Wissenschaftlern überlassen wird.

Die oberste Ebene der kollaborativen Wissenschaft wird als reine Bürgerwissenschaft (englisch: „Extreme Citizen Science“) bezeichnet. In dieser Ebene können sich Bürger an dem gesamten wissenschaftlichen Prozess von der Entwicklung der Fragestellung über Methodik, Datenaufnahme und -auswertung bis zu der Interpretation beteiligen. Wissenschaftler können dabei weiterhin zur Seite stehen und bei Fragen und Problemen vermitteln. Bei der vollständigen Integration von Bürgern ohne wissenschaftlichen Hintergrund in wissenschaftliche Prozesse müssen Wissenschaftler zusätzlich als Moderatoren agieren. Jedoch gibt es auch reine Bürgerwissenschaften ohne professionelle Unterstützung, bei der sich die Bürger eigenständig organisieren. Ein Beispiel für ein derartiges Projekt ist das SETI-Projekt (englisch: „Search for ExtraTerrestrial Intelligence“) in der Astronomie, das sich mit der Suche nach außerirdischen Zivilisationen beschäftigt.

Die Übergänge zwischen den einzelnen Ebenen sind fließend bzw. können sich überlappen. Auch während eines Projekts kann sich das Engagement von Bürgern aufgrund der Weckung von Interesse für das jeweilige Thema verändern. Des Weiteren können Bürger auch neue Sichtweisen bei der Bearbeitung von Fragestellungen und Interpretationen von Daten eröffnen und so das Projekt in neue Richtungen lenken.

## 3.3 Datenqualität

Ein Kritikpunkt an CS ist die Qualität der erhobenen Daten. Es könne nicht immer nachvollzogen werden, unter welchen Bedingungen Daten gesammelt wurden, ob sie guter wissenschaftlicher Praxis entsprechen und ob systematische Fehler begangen wurden.

Nach Burges et al. [68] und Delaney et al. [69] ist davon auszugehen, dass die Datenqualität von Projekt zu Projekt variiert und dass deshalb keine allgemeingültige Aussage über die Qualität von Daten in einem CS-Projekt getätigt werden kann. Zudem spielen viele Faktoren, wie die Art des Projektes, die Effektivität des Trainings und die Erfahrung der Teilnehmenden im Vorfeld von Messungen, entscheidende Rollen [53] [54].

Es gibt jedoch auch Studien, die keinen signifikanten Unterschied der Qualität der aufgenommenen Daten zwischen Wissenschaftlern und Nicht-Wissenschaftlern feststellen konnten. Nach Crall et al. [19] sei die Qualität der Daten, die Freiwillige aufgenommen haben, mit denen von professionellen Wissenschaftlern vergleichbar. Es konnte kein direkter Zusammenhang zwischen der Datenqualität und den Faktoren Alter, Bildung, Erfahrung, Wissenschaftskompetenz und Haltung gegenüber dem Training gefunden werden.

Eine Studie von Lewandowski et al. [54] aus dem Jahr 2014 vergleicht insgesamt 71 wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Bereich der Biodiversität miteinander und identifiziert vier Kriterien zur Bewertung der Datenqualität:

- 1) Genauigkeit der Daten
- 2) Nutzung standardisierter Verfahren zur Datenaufnahme
- 3) Räumliche und zeitliche Auflösung der Daten
- 4) Umfang der Datensätze

Dabei stellen sie fest, dass vor allem Vorkenntnisse der Teilnehmenden einen positiven Einfluss auf die Datenqualität haben. In 29 der 71 Studien wurde die Genauigkeit der Daten, die von Freiwilligen und von professionellen Wissenschaftlern aufgenommen wurden, miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass sich der Grad der Genauigkeit beider Datensätze in 11 Fällen signifikant voneinander unterscheidet. Gründe für diese Abweichungen liegen vor allem daran, dass viele Probanden sich nicht an standardisierte Methoden zur Datenaufnahme oder an Anweisungen von Projektleitern halten. Insgesamt konnte jedoch kein eindeutiger Hinweis darauf gefunden werden, dass die Datenqualität von Freiwilligen konsistent schlechter ist als die Daten von hauptberuflichen Wissenschaftlern. Viel mehr hat sich gezeigt, dass sich die Datenqualität in CS-Projekten mit zunehmender Zeit verbessert. Das Training der Probanden spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle. Außerdem sollten ungenaue Aufgabenstellungen, wie beispielsweise Schätzungen, vermieden werden [54].

Eine weitere Möglichkeit, die Datenqualität zu verbessern, ist es, eine Selektierung der Datensätze auf Grundlage von Standardprotokollen durchzuführen. Dabei werden nur diejenigen Datensätze zur Auswertung verwendet, bei denen Standards, wie Messprotokolle und Form der Daten, nicht von den Vorgaben abweichen. Auch eine Vorauswahl von Probanden, die an dem Projekt überhaupt teilnehmen dürfen, indem sie vor Beginn einen Test zur Überprüfung ihrer Eignung absolvieren, ist ein diskutiertes Thema [70].

### 3.4 Bedürfnisse von Teilnehmenden eines Citizen Science Projekts

Für den Erfolg eines CS-Projektes spielen die Teilnehmenden eine entscheidende Rolle. Sie stellen den aktiven Part dar, indem sie Daten aufnehmen, klassifizieren und in manchen Fällen auch analysieren. Da die Teilnehmenden aus verschiedensten Alters-, Sozial- und Bildungsstrukturen kommen, haben sie unterschiedliche Fähigkeiten, Kenntnisse und Erfahrungen. Diese Heterogenität birgt auf der einen

Seite großes Potential, da sich Menschen mit unterschiedlichen Fähigkeiten ergänzen können. Auf der anderen Seite hat jede Gruppe dadurch jedoch auch unterschiedliche Bedürfnisse, um den Aufgaben innerhalb eines CS-Projektes gerecht zu werden. Es ist die Aufgabe eines Projektkoordinators, diese zu befriedigen. Eine Möglichkeit, um dies umzusetzen, sind Schulungen im Vorfeld des Projektes. Nach Lorke et al. [55] lassen sich die Bedürfnisse allgemein in drei Kategorien unterteilen, welche im Folgenden vorgestellt werden.

- **Kernbedürfnisse („Core Needs“)**

Die Kernbedürfnisse betreffen das Projekt in seiner Gesamtheit. Um den Teilnehmenden einen ersten Überblick über das Konzept von CS zu geben, sollte zunächst das Wesen von CS erläutert werden. Konkret sollte den Teilnehmenden klar gemacht werden, welches Ziel CS verfolgt, welche Vor- und Nachteile diese Art der Wissenschaft in dem speziellen Projekt mit sich bringt und welche Rolle sie persönlich dabei spielen. Die gesellschaftliche oder politische Relevanz des Vorhabens muss zum Ausdruck gebracht werden. Zusätzlich muss das Konzept einer wissenschaftlichen Arbeit erläutert werden. Dieses besteht aus Literaturrecherche, dem Aufstellen einer Hypothese bzw. der Entwicklung einer Fragestellung, der Methodik zur Datenerhebung, deren Auswertung und Interpretation sowie der möglichen Auswirkungen auf die Gesellschaft.

- **Operative Bedürfnisse („Operational Needs“)**

Die operativen Bedürfnisse betreffen organisatorische und praktische Aspekte des Projekts. Dies beinhaltet die Erklärung der Methodik zur Datenerhebung und Analysemethoden. Mit Hilfe von standardisierten Messprotokollen kann sichergestellt werden, dass Daten unter den gleichen Umständen aufgenommen wurden und so wissenschaftlichen Standards entsprechen. Dadurch kann eine Vergleichbarkeit der Daten erreicht und die Datenqualität gesteigert werden. Die beispielhafte Durchführung dieser Protokolle, die Bedienung der Messinstrumente und Datenanalyse können Teil des Trainings von Teilnehmenden im Vorfeld des Projekts sein.

- **Individuelle Bedürfnisse („Engagement Needs“)**

Die individuellen Bedürfnisse betreffen vor allem die Aufrechterhaltung der Motivation der Teilnehmenden. Es muss vermittelt werden, dass jeder Teilnehmende eine sinnvolle und wichtige Aufgabe als Teil des gesamten Projekts ausübt. Gleichzeitig sollten die Aufgaben unterhaltsam und ansprechend gestaltet sein. Dies kann durch den Einsatz moderner Technik oder durch die Arbeit mit Smartphone und PC unterstützt werden. Zudem hat sich gezeigt, dass es wichtig ist, den Beitrag jedes

einzelnen Teilnehmenden anzuerkennen. Dies kann in Form von Zertifikaten, Urkunden oder Danksagung in wissenschaftlichen Publikationen geschehen.

Jedes CS-Projekt hat zudem soziale Aspekte. Einige beliebte Formate für die Interaktion und Kommunikation innerhalb der Projektgemeinschaft sind soziale Medien, Diskussionsgruppen, Foren und Blogs. Darüber hinaus sollten Informationen über den aktuellen Stand des Projekts für die Teilnehmenden transparent und zugänglich sein. Dies beinhaltet Informationen darüber, welche wissenschaftlichen Ergebnisse erwartet werden, wie Daten verarbeitet werden und den zeitlichen Ablauf des Projekts. Dadurch kann ein Gemeinschaftsgefühl erzeugt werden, welches entscheidend für die Motivation und den Einsatz der Teilnehmenden ist.

### 3.5 Citizen Science für Schüler

Auch im Bereich der Jugend- und Umweltbildung kann CS einen Beitrag leisten. Gerade aufgrund der vielseitigen Partizipationsmöglichkeiten kann CS verschiedene Schlüsselkompetenzen fördern und so zur persönlichen und fachlich-methodischen Entwicklung von Schülern beitragen. Solche Schlüsselkompetenzen sind beispielsweise Sozialkompetenzen (Teamfähigkeit, Kommunikationsfähigkeiten), Persönlichkeitskompetenzen (Engagement, Selbstdisziplin), Fachkompetenzen (Fachkenntnisse, fächerübergreifendes Wissen) und Methodenkompetenz (analytisches und kritisches Denken). Nach Kreimeier et al. [56] wird dadurch der Einstieg in den Prozess des lebenslangen Lernens geschaffen. Bereits für Schüler der Primarstufe kann CS im Rahmen des Sachunterrichts sinnvoll sein, um „Bildung als sinnlich erlebbare Erfahrung mit Ausrichtung auf den Zugang des Sammelns“ zu erfahren [18]. Schüler der Sekundarstufe I und II können auch in höheren Partizipationsebenen ansetzen und neben Datensammlung auch deren Auswertung und Implikationen auf das eigene Verhalten erarbeiten. Im deutschen Schulsystem werden Lernziele in drei Anforderungsbereiche aufgeteilt, die unterschiedliche Eigenleistungen der Schüler erfordern und durch die Mitarbeit in CS-Projekten abgedeckt werden. Diese beinhalten beispielsweise Reproduktionsleistungen (Anforderungsbereich I), Reorganisations- und Transferleistungen (Anforderungsbereich II) sowie Reflexion und Problemlösungen (Anforderungsbereich III) [71]. CS ermöglicht es, die Konsequenzen des eigenen Handelns durch die Förderung von Wissensbildungs- und Handlungskompetenzen in einen maßstabsübergreifenden Kontext zu setzen [72] [73] [74].

Zudem zeigt CS nach Bonn et al. [50] großes Potential in der schulischen Bildung, um als Brückenfunktion zwischen Gesellschaft, Politik und Wissenschaft zu agieren. Oft

wird CS daher auch als Teil einer „lebendig gelebten Demokratie“ bezeichnet. Nach Fromme & Schäffer [75] sei die zunehmende Politikverdrossenheit junger Menschen ein alarmierendes Zeichen einer Gefährdung der Demokratie. Um eine Akzeptanz und Nachhaltigkeit von politischen Entscheidungsprozessen auf lokaler Ebene (z. B. „Stuttgart 21“) und globaler Ebene (z. B. Globalisierung und Klimawandel) zu gewährleisten, sei daher die Involvierung der Gesellschaft von entscheidender Bedeutung [76]. Im Koalitionsvertrag von CDU/CSU und SPD aus dem Jahr 2018 wird betont, dass die Teilhabe von jungen Menschen bei politischen Maßnahmen für jugendpolitische Belange auf allen Ebenen gestärkt und weitere Beteiligungsformate unterstützt werden sollen [77]. CS kann diese Vorhaben als Teil der öffentlichen Partizipation und der Wissenschaftskommunikation unterstützen.

Durch die aktive Teilnahme am Forschungsprozess kann dazu beigetragen werden, dass Wissenschaft als solche entmystifiziert und der Prozess des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns erlebbar gemacht wird [20]. Dies führe zu einer Mündigkeit des Bürgers im Bildungsprozess. Die Arbeit mit Schülern innerhalb von CS zielt nicht nur auf Eliten ab, sondern bietet die Möglichkeit, alle Schulformen sowie Sozial- und Altersstrukturen in verschiedenen Ausmaßen zu involvieren. Dadurch können Schüler motiviert und deren Selbstbewusstsein durch Erfolgserlebnisse gestärkt werden.

Besonders der Einsatz neuer Technologien kann Jugendliche motivieren. Durch die allgegenwärtige Verfügbarkeit mobiler Endgeräte, Cloud-Dienste und die Nutzung des Internets haben mittlerweile auch Laien technologische Möglichkeiten, die früher nur wenigen Experten zur Verfügung standen [76]. Gleichzeitig muss jedoch betont werden, dass Technologieaffinität kein Kontextwissen ersetzen kann. Eine reine Arbeit als Datensammelnde, ohne Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext, liefert keinen Mehrwert und kann sogar einen demotivierenden Effekt auf die Schüler haben. Das behandelte Thema muss altersgerecht aufgearbeitet werden. Das beginnt bereits bei der Vorbereitung. Es muss sichergestellt werden, dass ein Grundniveau an Vorwissen vorhanden ist, da sonst eine Gefahr der kognitiven Überforderung besteht. Schließlich müssen die aufgenommenen Daten ausgewertet und interpretiert werden, damit eine Reflexion der Schüler in Bezug auf das Gelernte stattfinden kann.

Die Bearbeitung von CS-Projekten ist nicht nur auf ganze Klassen oder Schulen begrenzt. Auch kleinere Gruppen bis hin zur Einzelperson können sich an der Untersuchung wissenschaftlicher Fragestellungen beteiligen, sei es in Form einer Projekt- oder Facharbeit, der Teilnahme im Rahmen von Wettbewerben wie „Jugend forscht“ oder lediglich aus persönlichem Interesse. Eine Kooperation zwischen Schulen und Universitäten bietet für beide Parteien Vorteile. Einerseits können Schüler eng mit erfahrenen Wissenschaftlern zusammenarbeiten und dadurch erste

Einblicke in Bereiche der wissenschaftlichen Methodik und aktueller wissenschaftlicher Fragestellungen erhalten. Andererseits können Universitäten schon früh künftige Studenten binden und wissenschaftliche Erkenntnisse publizieren [76].

## 3.6 Internet of Things

Der Begriff „Internet der Dinge“ (englisch „Internet of Things“, kurz IoT) beschreibt die Vernetzung von Gegenständen und wurde erstmals im Jahr 1999 von Kevin Ashton, dem Mitbegründer des Auto-ID Centers des Massachusetts Institute of Technology (MIT), beschrieben. Dabei sei die intelligente Interaktion zwischen Dingen der charakteristische Punkt des Internets der Dinge. Der Grundgedanke für dessen Entwicklung stammt ursprünglich aus dem Bereich der Logistik. Durch die Vernetzungsfähigkeit von Objekten können Prozesse besser nachvollzogen und Transportwege optimiert werden [78].

Mittlerweile erstreckt sich der Anwendungsbereich von IoT-Technologien auf fast alle Bereiche des täglichen Lebens. Die Vernetzung und Digitalisierung in der industriellen Produktion wird unter dem Sammelbegriff „Industrie 4.0“ zusammengefasst. Daneben sind kommerzielle Sprachassistenten wie „Alexa“ der Firma Amazon oder Apples „Siri“ für viele Menschen zum alltäglichen Begleiter geworden. Über das Konzept des „Smart Home“ können beispielsweise online Thermostate geregelt, Sicherheitssysteme überwacht oder Staubsauger-Roboter gesteuert werden. Nach Angaben der IoT-Analytics GmbH sind weltweit im Jahr 2020 rund 10 Milliarden Geräte über das Internet der Dinge miteinander vernetzt [79]. Bis zum Jahr 2025 soll sich diese Zahl mehr als verdoppeln, siehe Abbildung 3.3.

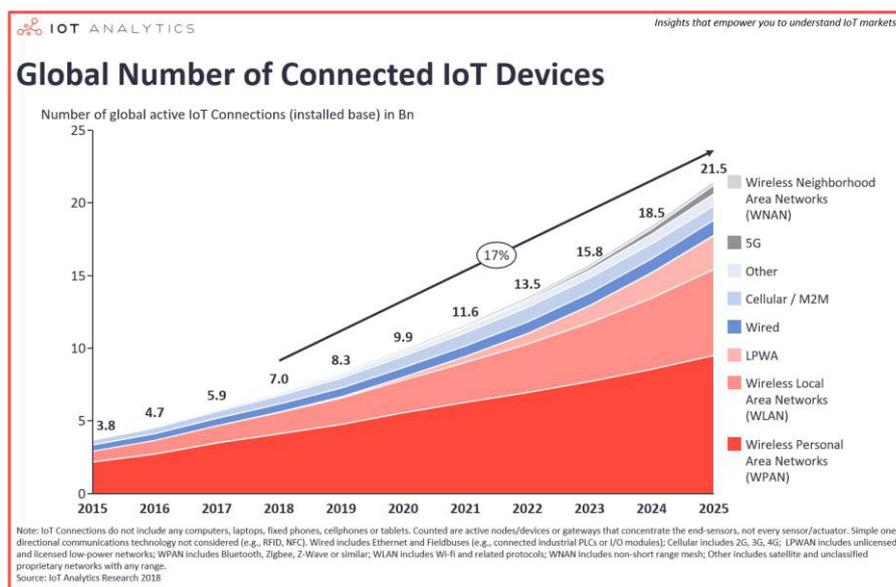


Abb. 3.3 Entwicklung der Zahl der Geräte, die über IoT miteinander vernetzt sind [79].

Im Rahmen von „Smart City“-Projekten werden beispielsweise die Echtzeit-Überwachung der Verfügbarkeit von Parkplätzen und die intelligente Beleuchtung von Straßen erforscht. Autonom fahrende Automobile stellen die Zukunft des Transportwesens dar, indem sie durch die Kommunikation mit anderen Fahrzeugen sowohl Sicherheitsaspekte als auch Effizienz durch Verringerung von Staus verbessern [80].

Jedoch gibt es auch Kritik bezüglich der Sicherheit von IoT-Systemen. Viele Geräte sammeln persönliche Daten. Über unverschlüsselte Netzwerke oder ein kompromittiertes Gerät können diese persönlichen Nutzerdaten von Hackern abgefangen werden. Besonders kritisch sind dabei Sicherheitssysteme, wie Alarmanlagen oder Daten über die Gesundheit einer Person [81].

Die Entwicklung von IoT-Systemen ist inzwischen jedoch nicht mehr nur für Unternehmen interessant. Durch kostengünstige Mikrocontroller, wie Arduino, oder Einplatinencomputer, wie den Raspberry Pi, sowie eine Vielzahl an Sensoren können IoT-Projekte auch im privaten Bereich realisiert werden. Durch anfängerfreundliche Entwicklerumgebungen, wie etwa der auf den Programmiersprachen C und C++ basierenden Arduino IDE, können auch Einsteiger schnell Erfolge erzielen. Mit Hilfe zahlreicher freier Bibliotheken und Beispiel-Codes zur Umsetzung von IoT-Projekten wird der Einstieg in die Welt der Programmierung eines Mikrocontrollers erleichtert, siehe Abbildung 3.4, rechts.



```

Alle_Sensoren_Neu | Arduino 1.8.7
Datei Bearbeiten Sketch Werkzeuge Hilfe
Alle_Sensoren_Neu
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include "Wire.h"
#define BUFFER_LENGTH 64
#define scd_debug 0
#include "paulvha_SCD30.h"
#include "Adafruit_SGP30.h"

Adafruit_SGP30 sgp;
SCD30 airSensor;

byte w1, w2, w3;
byte ND[60];
long tmp;
float measure;
int Address = 0x69;

void setup() {
  Wire.begin();
  Serial.begin(57600);
  airSensor.setDebug(scd_debug);
  if (! sgp.begin()) {
    //Serial.println("Sensor not found :(");
  }
}

```

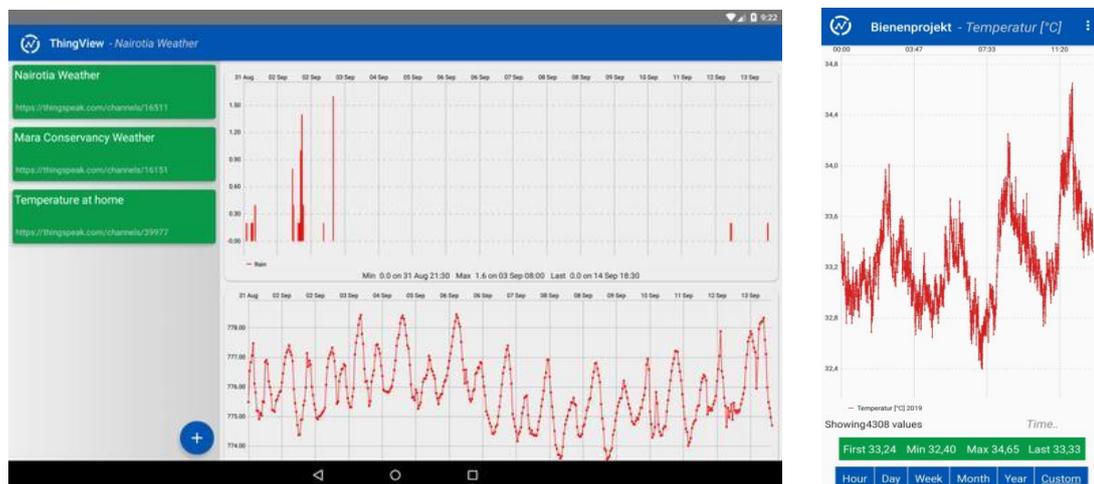
**Abb. 3.4** Links: Internetfähiger Mikrocontroller ESP8266 NodeMCU. Rechts: Arduino IDE zur Programmierung von Mikrocontrollern.

Den einfachsten Fall von IoT stellt die bloße Datenübermittlung von Sensoren dar. Mikrocontroller steuern die Sensoren, nehmen Daten auf und können sie unter anderem über Bluetooth, Near Field Communication (NFC) oder WLAN an eine Datenbank weiterleiten. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass Mikrocontroller

über ein LoRaWAN (Englisch „**Long Range Wide Area Network**“) untereinander kommunizieren, Daten austauschen oder sich synchronisieren. Moderne Mikrocontroller, wie der ESP8266 (Abbildung 3.4 links) oder ESP32 verfügen über ein integriertes WLAN-Modul, das es erlaubt, Sensordaten in Echtzeit an eine online-Datenbank zu schicken. Diese können dann per Smartphone oder Computer heruntergeladen, visualisiert und ausgewertet werden.

Gerade innerhalb von CS-Projekten bietet das Internet der Dinge ein großes Potential, da es die Datenaufnahme und -auswertung erheblich vereinfachen kann. Dadurch ist es nicht mehr nötig, die Aufnahme von Daten permanent vor Ort zu verfolgen bzw. zu überwachen. Einmal aufgebaut kann das System über Monate oder Jahre Daten sammeln und jederzeit zur Verfügung stellen. Diese Automatisierung der Datenaufnahme hat den Vorteil, dass einerseits sowohl zeitsparend als auch effizient gearbeitet werden kann und andererseits die eigentliche Fragestellung, also die Interpretation und Auswertung der aufgenommenen Daten, in den Vordergrund rückt.

Zwei Beispiele für kostenlose IoT-Analyse-Plattformen sind das System „ThingSpeak“ der Firma Mathworks [82] und die App „Blynk“ [84]. Damit können Live-Datenströme in Online-Clouds aggregiert, visualisiert und analysiert werden. Die Datenvisualisierung kann zudem auch öffentlich zugänglich in Webseiten integriert werden und so mit anderen geteilt werden. Mit der kostenlosen App „ThingView“ für Smartphones mit den Betriebssystemen iOS oder Android kann auch unterwegs auf Daten zugegriffen werden [83]. Abbildung 3.5 zeigt einen Screenshot der App.



**Abb. 3.5** App "ThingView" zur Visualisierung von Sensordaten auf einem Tablet (links, [82]) oder Smartphone (rechts, [83]).

## 3.7 Zwischenfazit

Durch die Mitwirkung von Schülern in CS-Projekten zum Thema Luftqualität eröffnen sich für sie vielfältige Möglichkeiten, sowohl deklaratives und konzeptuelles als auch prozedurales Wissen über Luftschadstoffe und Sensorprinzipien in authentischen und anwendungsbezogenen Lernumgebungen aufzubauen. Durch die unterschiedlichen Partizipationsmöglichkeiten eignet sich CS für Schüler unterschiedlichster Altersstufen und Vorkenntnisse gleichermaßen. Im Sinne der BNE werden Schüler durch CS befähigt, sich mit einem Umweltthema kritisch und ausführlich auseinander zu setzen, wodurch neben Fachkompetenzen auch Sozial-, Persönlichkeits- und Methodenkompetenzen erworben werden können. Dadurch kann erreicht werden, dass dieses Wissen nicht träge bleibt, sondern kontextbezogen Anwendung findet.

Moderne Technologie wie das Smartphone oder IoT kann unterstützend eingesetzt werden, um die operativen und individuellen Bedürfnisse der Schüler zu befriedigen. Der Fokus kann so auf die Auswertung und Interpretation der aufgenommenen Daten gelegt werden. Um die Datenqualität zu sichern, sollten Schüler vor Beginn der Umweltstudie mit Standardprotokollen, Messinstrumenten und Methoden der Datenauswertung vertraut gemacht werden. Während der Umweltstudie sollte außerdem eine Betreuungsperson mit wissenschaftlichem Hintergrund unterstützend zur Seite stehen, damit Fehlkonzepte vermieden werden.

Weiterhin ist die Motivation der Teilnehmenden eines CS-Projekts ein entscheidender Faktor für dessen Erfolg. Aus diesem Grund sollten Schüler frei über das zu untersuchende Umweltthema entscheiden können. Dadurch wird sichergestellt, dass ein hinreichendes Interesse an der zu untersuchenden Problematik herrscht. Um die Schüler zu motivieren, kann zudem beispielsweise die Teilnahme an Forschungswettbewerben oder das Erstellen einer Facharbeit sinnvoll sein.

## 4 Umweltsensorik

Allein im Jahr 2019 konnten in Deutschland rund 70.000 und in der Europäischen Union rund 400.000 vorzeitige Todesfälle, sogenannte „premature deaths“, direkt mit Luftverschmutzung in Zusammenhang gebracht werden [3]. Zu den verantwortlichen Schadstoffen zählen neben Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ), Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) vor allem flüchtige organische Verbindungen und Feinstaub. Da viele Schadstoffe sowohl unsichtbar als auch geruchlos sind, bleiben diese meist unbemerkt. Gesundheitliche Auswirkungen können sich erst nach Jahren bemerkbar machen, weshalb vor allem Schüler nur eine diffuse oder gar keine Vorstellung von Luftschadstoffen haben. Durch die objektive Bestimmung der Schadstoffkonzentrationen und die Überwachung der Luftqualität mittels Sensoren kann dazu beigetragen werden, über mögliche Gefahren aufzuklären und ein neues Bewusstsein über Luftschadstoffe zu schaffen.

Neben der direkten Messung von Luftschadstoffen kann vor allem in Innenräumen auch die Messung von Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) als Indikator für schlechte Luftqualität sinnvoll sein.  $\text{CO}_2$  selbst zählt nicht zu den Luftschadstoffen und hat erst ab Konzentrationen  $> 5.000$  ppm gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen [24]. Diese Konzentrationen werden im Normalfall nicht erreicht. Der Mensch produziert jedoch neben  $\text{CO}_2$  auch verschiedene Stoffwechselprodukte, die in die Kategorie der VOCs fallen. Für den Fall, dass der Mensch die einzige Quelle dieser Stoffe in einem Innenraum ist, korrelieren  $\text{CO}_2$ - und VOC-Konzentration. Dadurch kann bei einer  $\text{CO}_2$  Konzentration oberhalb von 1.000 ppm auch von einer erhöhten VOC-Belastung ausgegangen werden und es sollte gelüftet werden (vgl. „Pettenkofer-Grenze“, Kapitel 4.2) [25].

Mit der Hilfe von low-cost Sensoren ist es mittlerweile auch für Privatpersonen möglich, eigene Luftqualitätsmessungen durchzuführen. Mittels MOX-Halbleiter-Gassensoren können VOCs gemessen werden.  $\text{CO}_2$ -Sensoren basieren typischerweise auf optischen Prinzipien wie der nicht dispersiven Infrarot-Absorption (NDIR). Feinstaub kann mit Hilfe von Laserstreuung untersucht werden. Dabei sollte jedoch betont werden, dass low-cost Sensoren keine exakten Messungen durch zertifizierte Prüfverfahren ersetzen können. Dennoch liefern sie einen ersten Anhaltspunkt für

mögliche Schadstoffbelastung und können daher eine sinnvolle und kostengünstige Alternative darstellen.

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Schadstoffe zunächst genauer vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf gesundheitliche Auswirkungen, Grenzwerte und die Erklärung der verschiedenen Sensorprinzipien eingegangen. Anschließend werden verschiedene Referenzverfahren erläutert und das Prinzip einer Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors vorgestellt.

## 4.1 Flüchtige organische Verbindungen (VOCs)

Flüchtige organische Verbindungen beschreiben eine Gruppe von kohlenstoffhaltigen (organischen) Stoffen, die aufgrund ihres hohen Dampfdrucks bereits bei niedrigen Temperaturen verdampfen, also flüchtig sind. Gleichzeitig gelten sie als häufige Luftschadstoffe in nicht industriellen Umgebungen [85]. Bis heute gibt es jedoch noch keine einheitliche Definition. Die Weltgesundheitsorganisation (englisch: „World Health Organization“, kurz WHO) unterteilt organische Innenraumluftschadstoffe in Abhängigkeit ihres Siedepunkts in vier Kategorien, wobei deren Übergang fließend ist, siehe Tabelle 4.1 [86]. Dabei zeichnen sich VOCs durch einen Siedepunkt zwischen 50-100 °C und 240-260 °C aus. Nach der „VOC Solvents Directive“ aus den Jahren 1999 und 2004 besitzen VOCs einen Siedepunkt von weniger als 250 °C bei einem Standarddruck von 101,3 kPa [87]. Nach ISO und VDI Verordnungen werden „alle Stoffe, die im Gaschromatogramm zwischen und inklusive n-Hexan und n-Hexadecan auftreten“ als VOCs bezeichnet [88].

Den VOCs lassen sich nach Angaben der WHO bis zu 307 verschiedene Molekülverbindungen zuordnen, darunter verschiedene Kohlenwasserstoffe, Alkohole und Aldehyde. VOCs werden in der Industrie häufig als Lösemittel in Reinigungsmitteln, Farben und Klebstoffen, als Zusatzstoffe in Duftstoffen oder in Kraftstoffen verwendet. Auch in Alltagsgegenständen wie Möbeln, Farben, Lacken und als Weichmacher in Kinderspielzeug sind VOCs verarbeitet. Deshalb haben diese einen großen Einfluss auf die Innenraumluftqualität. Als natürliche Quellen sind Stoffwechselprodukte von Lebewesen, Methanquellen in Sümpfen und Emissionen von Duftstoffen einiger Pflanzenarten zu nennen [86].

Die gesundheitsschädlichen Effekte von VOCs auf den Menschen reichen von Beeinträchtigungen des Nervensystems, wie Konzentrationsstörungen und Müdigkeit, bis hin zur Bildung von Allergien, Asthma und Krebs. Zudem werden sie mit dem

Sick-Building-Syndrom in Verbindung gebracht, das u.a. Augen- und Nasenreizungen, Kopfschmerzen und Schwindel verursacht [21] [22] [23]. Für manche VOCs, wie beispielsweise das karzinogene Benzol, gibt es laut WHO keine sichere Expositionsgrenze, sodass ihre Konzentration in Innenräumen so niedrig wie möglich gehalten werden sollte. Andere Stoffe, wie die Terpene aus natürlichen Grundstoffen, beispielsweise aus Pflanzen, natürlichen Harzen, Naturfarben und -ölen (z.B.  $\alpha$ -Pinen) sind im Vergleich dazu relativ harmlos, weshalb die maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK) im parts-per-million (ppm) Bereich liegt [89].

Name	Abkürzung	Siedepunkts-Bereich in °C
Sehr flüchtige organische Verbindungen (very volatile organic compounds)	VVOC	< 0 bis 50 – 100
Flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds)	VOC	50 – 100 bis 240 – 260
Semiflüchtige organische Verbindungen (semivolatile organic compounds)	SVOC	240 – 260 bis 380 – 400
Organische Feinstaubpartikel (particulate organic matter)	POM	< 380

**Tab. 4.1** Kategorisierung von organischen Verbindungen anhand ihres Siedepunkts [86].

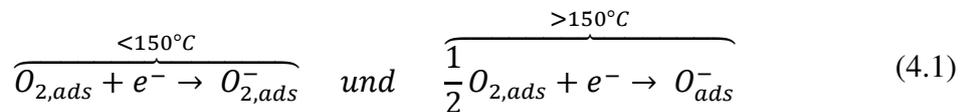
Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Stoffen wird für die Bewertung der Luftqualität häufig die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen als TVOC-Wert (englisch: „Total Volatile Organic Compounds“) angegeben. Dieser zählt neben CO<sub>2</sub> mittlerweile als Standardindikator zur Bestimmung der Innenraumluftqualität, wobei er auch immer wieder auf Kritik stößt. So werden die unterschiedlichen Gefahrenpotentiale unterschiedlicher VOCs nicht berücksichtigt, weshalb die Aussagekraft der Wirkung auf die Gesundheit begrenzt ist und lediglich als Anhaltspunkt für genauere Untersuchungen dienen sollte [90].

Nach Zhou et al. [91] verbringen Menschen bis zu ca. 90% ihres Tages in Innenräumen. Um gesundheitliche Folgen durch Exposition von Luftschadstoffen so gering wie möglich zu halten, ist daher eine Überwachung der Luftqualität von großer Bedeutung. Zwar sind viele VOCs bereits bei geringen Konzentrationen durch den Menschen wahrnehmbar, dennoch kann die menschliche Nase aufgrund von Adaption vor allem einen langsamen Anstieg ihrer Konzentrationen nicht registrieren. Dadurch wird oftmals nicht bemerkt, dass die Luftqualität in geschlossenen Räumen aufgrund

der Anwesenheit von Menschen bereits nach kurzer Zeit deutlich sinkt. Da die subjektive Messung der Luftqualität mit der Nase demnach nicht ausreicht, ist es sinnvoll auf objektive Messsysteme in Form von Luftqualitätssensoren zu setzen. Im folgenden Abschnitt wird auf die Funktionsweise eines solchen Sensors in der Form eines MOX-Halbleiter Gassensors eingegangen.

#### 4.1.1 Sensorprinzip zur Messung von VOCs

Um VOCs zu detektieren, werden häufig MOX-Halbleiter Gassensoren eingesetzt. Deren Funktionsweise basiert auf der Änderung ihrer elektrischen Leitfähigkeit in Anwesenheit eines reduzierenden (z.B. Kohlenmonoxid) oder oxidierenden (z. B. Stickstoffmonoxid) Gases. Die theoretische Beschreibung der Leitfähigkeit von MOX-Halbleiter Gassensoren auf der Basis von granularem  $\text{SnO}_2$  im thermodynamischen Gleichgewicht kann dabei häufig auf die alleinige Betrachtung von Korn-Korn-Übergängen reduziert werden, da Bereiche nahe der Oberfläche aufgrund von chemisorbiertem Sauerstoff an Elektronen verarmt sind [92] [93]. In Abhängigkeit der Sensortemperatur können zwei unterschiedliche Reaktionen basierend auf der Adsorption von Sauerstoff auf der Oberfläche stattfinden. Dabei dominieren ober- und unterhalb von  $150^\circ\text{C}$  jeweils eine der beiden möglichen Reaktionen [94]



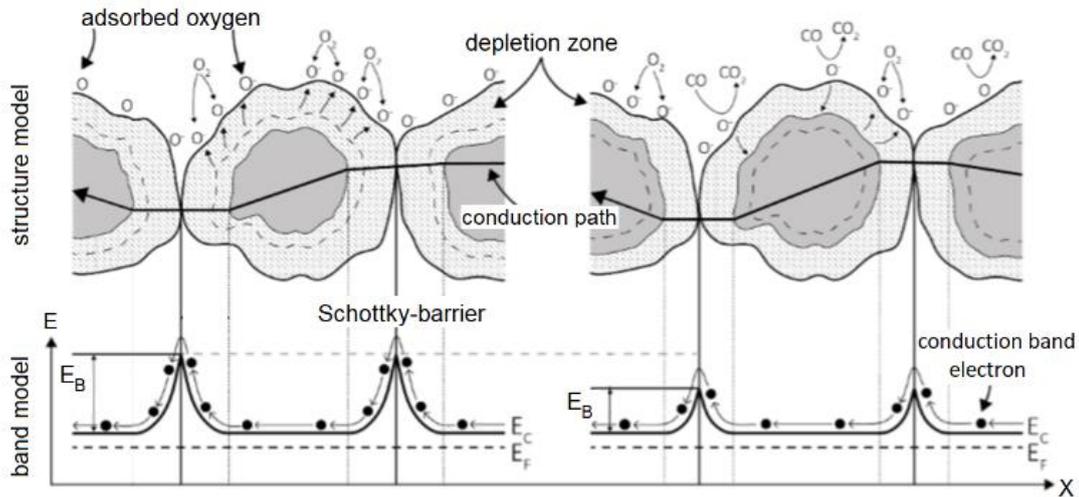
Damit Elektronen die Korn-Korn-Grenzen überwinden können, müssen sie eine Energiebarriere  $E_B$  überwinden. Abbildung 4.1 zeigt das Struktur- und Bändermodell zur Beschreibung der Leitfähigkeit durch das Korn-Korn-Grenzen-Modell. Die Höhe dieser Barriere ist abhängig von der Donatordichte  $N_D$  und der Dichte der Oberflächenzustände  $N_S$  in der Form

$$E_B = \frac{e^2 N_S^2}{2\varepsilon_r \varepsilon_0 N_D} \quad (4.2)$$

Dabei bezeichnet  $e$  die Elementarladung,  $\varepsilon_r$  die Permittivität der Sensorschicht und  $\varepsilon_0$  die Vakuum-Permittivität.

Die Donatordichte  $N_d$  in  $\text{SnO}_2$  wird durch einfach und zweifach ionisierte Sauerstofffehlstellen hervorgerufen, wobei die Energie für die erste Ionisierung bei ca. 30 meV und für die zweite Ionisierung bei etwa 150 meV liegt [95]. Bei typischen Betriebstemperaturen von  $200 - 440^\circ\text{C}$ , entsprechend einer durchschnittlichen thermischen Energie von  $40 - 60$  meV, sind die Donatorzustände der ersten Ionisierung vollständig entleert, während die Zustände der zweiten Ionisierung

vollständig besetzt bleiben. Im Arbeitsbereich des Sensors ist demnach  $N_d = \text{const.}$  [94]. Gleichzeitig ist aufgrund der Bandlücke von  $\text{SnO}_2$  von ca. 3,7 eV keine Eigenleitung zu erwarten, weshalb die Leitfähigkeit ausschließlich durch ionisierte Donatoren zustande kommt [93] [96] [97].



**Abb. 4.1** Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors. Schematische Darstellung als Struktur- bzw. Bändermodell einer polykristallinen Schicht eines halbleitenden Metalloxid-Halbleiter-Gassensors mit (rechts) und ohne (links) Gasangebot, nach [92] und [95].

Die Oberflächenladungsdichte  $N_S$  von Zuständen mit einer Energie  $E_A$  ist abhängig von der Lage der Fermi-Energie  $E_F$  und der Temperatur. Sie wird im Gleichgewicht nach Ding et al. [94] durch eine Fermi-Verteilung beschrieben.

$$N_S \sim \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_A - E_F}{k_B T}\right)} \quad (4.3)$$

Die Leitfähigkeit  $G$  im Korn-Korn-Grenzen-Modell lässt sich durch eine temperaturabhängige Funktion ausdrücken [92]:

$$G = G_0 \cdot \exp\left(\frac{E_B}{k_B T}\right) \quad (4.4)$$

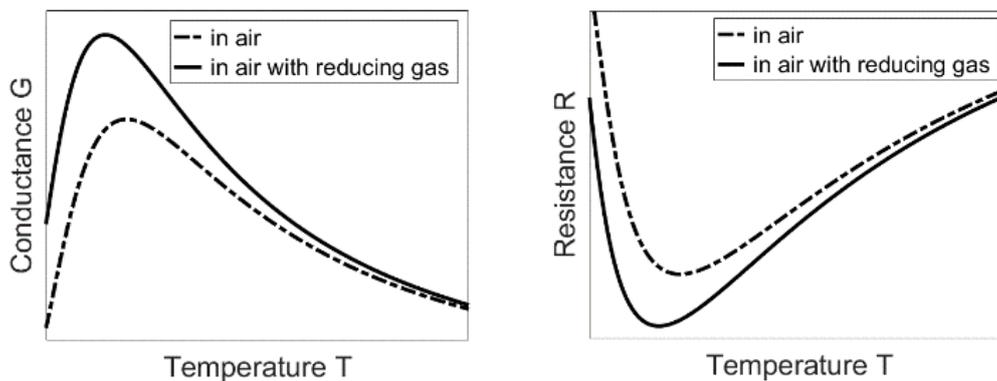
mit der Boltzmann-Konstanten  $k_B$  und dem Vorfaktor  $G_0$ , der von der Geometrie  $A_{geom}$  und der Elektronenbeweglichkeit  $\mu_S$  des Sensors abhängt. Nach Madou & Morrison [92] sinkt  $\mu_S$  in Halbleitern mit der Temperatur und kann durch die Proportionalität

$$\mu_S \sim T^{-\frac{3}{2}} \quad (4.5)$$

dargestellt werden. Insgesamt lässt sich die Leitfähigkeit so durch eine temperaturabhängige Funktion charakterisieren:

$$G \sim T^{-3/2} \cdot \exp\left(-\frac{1}{k_B T \cdot \left(1 + \exp\left(\frac{E_A - E_F}{k_B T}\right)\right)^2}\right) \quad (4.6)$$

Entsprechend lässt sich auch der elektrische Widerstand  $R$ , als reziproker Leitwert, berechnen. Durch Anwesenheit eines reduzierenden Gases verringert sich die Energiebarriere  $E_B$ , wodurch sich der Leitwert erhöht bzw. der Widerstand reduziert. In Abbildung 4.2 sind die qualitativen Verläufe von Leitwert und Widerstand, im stationären Zustand mit (durchgezogene Linie) und ohne (gepunktete Linie) reduzierendes Gas dargestellt.



**Abb. 4.2** Qualitativer theoretischer Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit  $G$  (links) und des Widerstandes  $R$  (rechts) eines MOX-Halbleiter Gassensors im Gleichgewicht in Abhängigkeit von der Sensortemperatur  $T$  in Luft (gestrichelte Linie) und in Anwesenheit eines reduzierenden Gases (durchgezogene Linie). Die Diagramme basieren auf Gleichung (4.6) mit unterschiedlichen Bindungsenergien  $E_B$  nach Gleichung (4.2).

### Temperaturzyklischer Betrieb

Durch die Tatsache, dass verschiedene Gase unterschiedliche Aktivierungsenergien und Reaktionsgeschwindigkeiten mit der Sensoroberfläche haben, kann durch eine Variation der Sensortemperatur eine Sensitivitäts- und Selektivitätssteigerung erzielt werden [98] [99] [100]. Durch die zyklische Anpassung der Sensortemperatur, welche aufgrund der geringen thermischen Masse mikrostrukturierter Sensoren innerhalb weniger Millisekunden erzielt werden kann, wird der Sensor in verschiedene Nichtgleichgewichtszustände versetzt. Abbildung 4.3 links, zeigt eine schematische Darstellung der Korn-Korn-Grenzen während eines Temperaturzyklus mit zwei Temperaturen  $T_{high}$  und  $T_{low}$ . Die Abläufe während eines Temperaturzyklus lassen sich in mehrere Bereiche unterteilen:

#### 1) Zustand $T = T_{low}$

Der Sensor befindet sich bei niedrigen Temperaturen in einem Gleichgewicht. Die Leitfähigkeit hat einen konstanten Wert und kann durch Gleichung 4.6 beschrieben werden.

### 1) → 2) Übergang $T_{low} \rightarrow T_{high}$

Der abrupte Wechsel von einer tiefen zu einer hohen Temperatur sorgt dafür, dass die Leitfähigkeit instantan ansteigt. Der Temperaturwechsel ist dabei viel schneller als die Relaxation der Oberflächenzustände.

### 2) → 3) Zustand $T = T_{high}$

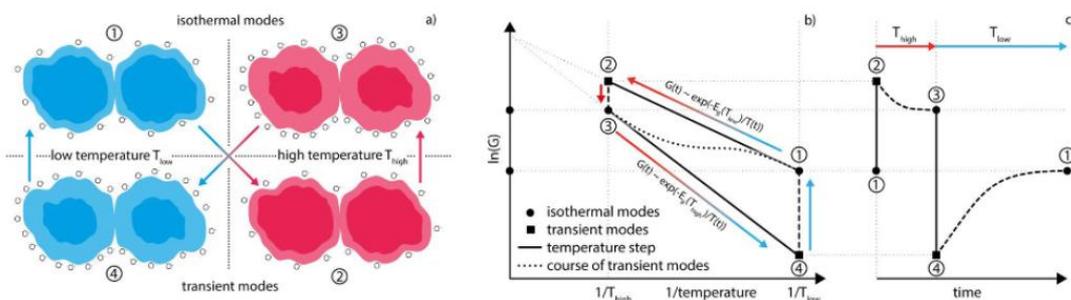
Nach einer gewissen Zeit stellt sich, abhängig von Temperatur und Gasart, ein neues Gleichgewicht zwischen ad- und desorbiertem Sauerstoff auf der Oberfläche ein [93] [94]. Dabei nimmt die Leitfähigkeit aufgrund von Relaxationsprozessen ab. Die Dauer der Relaxationszeit liegt typischerweise im Sekundenbereich [101].

### 3) → 4) Übergang $T_{high} \rightarrow T_{low}$

Der abrupte Wechsel von hohen zu tiefen Temperaturen sorgt analog zu dem Übergang von niedrigen zu hohen Temperaturen dafür, dass die Leitfähigkeit instantan sinkt. Erneut ist der Temperaturwechsel viel schneller als die Relaxation der Oberflächenzustände.

### 4) → 1) Zustand $T = T_{low}$

Abhängig von der Zeitkonstanten des Sensors, welche im Bereich von Minuten und Stunden liegen kann, stellt sich erneut ein Gleichgewicht ein.



**Abb. 4.3** 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 [102].

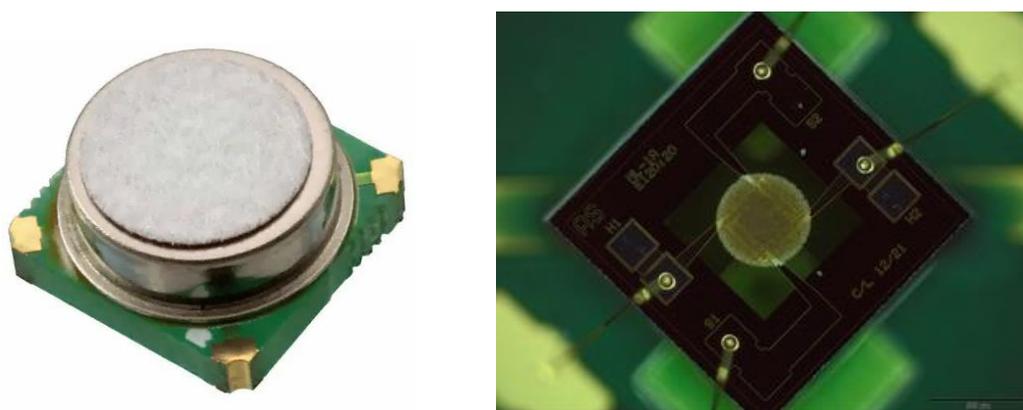
Der Verlauf des elektrischen Leitwerts des Sensors im temperaturzyklischen Betrieb lässt sich mit Hilfe eines Arrhenius-Plots verdeutlichen, siehe Abbildung 4.3 Mitte. Der exponentielle Verlauf über der Zeit ist charakteristisch für Gasart und Konzentration, siehe Abbildung 4.3 rechts.

## 4.1.2 Aufbau von MOX-Halbleiter Gassensoren

Zur Herstellung von MOX-Halbleiter Gassensoren können verschiedene Techniken verwendet werden. Die häufigste Methode zur Herstellung kommerziell erhältlicher

MOX-Halbleiter Gassensoren sind sogenannte Dünn- bzw. Dickschichtsensoren [103]. Bei den Dünnschichtverfahren wird die meist 0,01 – 5 µm dicke sensitive Schicht durch physikalische oder chemische Verfahren, wie thermisches Aufdampfen oder Gasphasenabscheidung, aufgebracht. Bei Dickschichtverfahren hat die sensitive Schicht meist eine Dicke zwischen 10 µm und 80 µm und wird mittels Siebdruckverfahrens auf ein Keramiksubstrat appliziert. Die poröse Schicht besteht meistens aus SnO<sub>2</sub> oder WO<sub>3</sub>. Durch Zugabe von Katalysatoren kann die Reaktion mit Zielgasen beschleunigt und so die Sensitivität verbessert werden. Durch die hohe Porosität der sensitiven Schicht ist dessen effektive Oberfläche vergrößert [103].

Zum Schutz vor äußeren Einflüssen wie Staub oder Flüssigkeiten haben viele Sensoren eine Schutzkappe mit einer dünnen Membran, über die weiterhin Gase an die sensitive Schicht gelangen. Abbildung 4.4 zeigt den Sensor AS-MLV-P2 der Firma „Austria Micro Systems“ (ams) mit Schutzkappe (links) und eine Mikroskop-Aufnahme des Chips und der sensitiven Schicht. Die Messung des elektrischen Leitwerts erfolgt über zwei Elektroden, die in Kontakt mit der porösen Sensorschicht stehen.



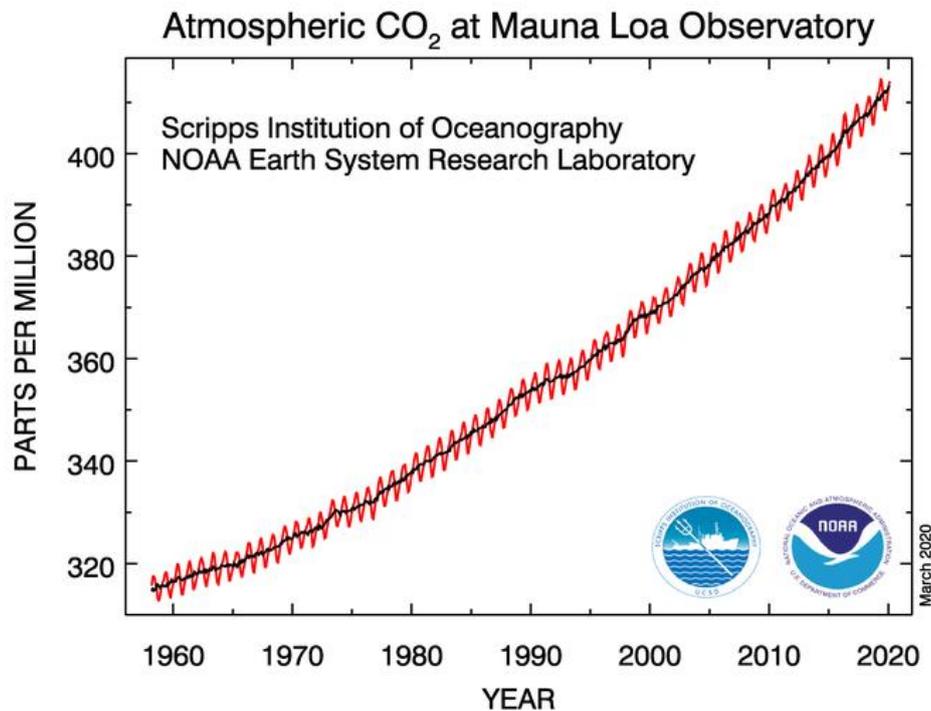
**Abb. 4.4** Halbleiter Gassensor AS-MLV-P2. Links: Sensor mit Schutzkappe. Rechts: Mikroskop-Aufnahme ohne Schutzkappe.

Die Temperatur des Sensors kann über einen integrierten Heizer unterhalb der Sensorschicht variiert werden. Durch den kompakten Aufbau sind nur geringe Leistungen (AS-MLV-P2: 34 mW bei einer Temperatur von 300 °C) für den Betrieb notwendig. Die thermische Zeitkonstante liegt durch die dünne Membran und Sensorschicht im Bereich von Millisekunden [104].

## 4.2 Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)

Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) ist ein in der Erdatmosphäre natürlich vorkommendes Molekül, das farblos und für den Menschen geruchlos ist. Neben Methan gilt es als eines der wichtigsten Treibhausgase. Seit Beginn der Industrialisierung im 18. Jahrhundert ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre aufgrund von Emissionen

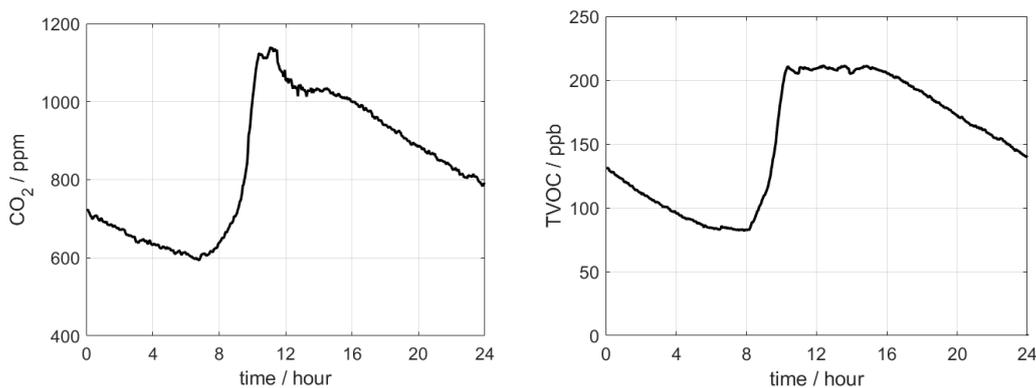
von ca. 280 ppm bis auf nun mehr als 400 ppm angestiegen. Dabei unterliegt die Konzentration halbjährlichen Schwankungen von ca. 8 ppm infolge erhöhter winterlicher CO<sub>2</sub> Emission der Industriestaaten auf der Nordhalbkugel. Abbildung 4.5 zeigt die Entwicklung der CO<sub>2</sub> Konzentration in der Atmosphäre seit 1960, gemessen am Mauna Loa Observatorium auf Hawaii [105].



**Abb. 4.5** Verlauf der atmosphärischen CO<sub>2</sub> Konzentration von 1958 bis 2014, gemessen am Mauna Loa Observatorium auf Hawaii [105].

Neben der Treibhauswirkung wird CO<sub>2</sub> oft auch als Indikator für Luftqualität in Innenräumen verwendet. Dabei ist zu beachten, dass CO<sub>2</sub> selbst erst ab einer Konzentration von 5.000 ppm zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen wie Konzentrationsstörungen oder Schwindel führt [24]. Dieser Wert stellt auch den maximalen Arbeitsplatzgrenzwert dar [106]. Eine toxische Wirkung, verbunden mit beschleunigtem Herzschlag (Tachykardie), Atemnot und Bewusstseinsverlust tritt ab einer Konzentration von etwa 80.000 ppm (8%) ein [107]. Die menschliche Ausatemluft hat eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von ca. 40.000 ppm (4%) [108]. In Innenräumen wird diese Konzentration in der Regel jedoch unter normalen Umständen nicht erreicht. Dennoch lassen sich aus der CO<sub>2</sub> Konzentration in Innenräumen Rückschlüsse auf die Luftqualität ziehen. Der menschliche Organismus produziert neben CO<sub>2</sub> als Folge des Stoffwechsels auch VOCs, wie beispielsweise Formaldehyd oder Aceton. Diese haben bereits ab geringeren Konzentrationen eine toxische Wirkung. Wenn lediglich der Mensch eine Quelle von VOCs in Innenräumen ist, korrelieren CO<sub>2</sub>- und TVOC-Konzentration. Abbildung 4.6 zeigt die Korrelation von

CO<sub>2</sub>- und TVOC-Konzentration bei geschlossenem Fenster, aufgenommen in einem Klassenraum einer Berufsschule in der Zeit zwischen 0:00 Uhr und 24:00 Uhr. Mit Beginn der 1. Schulstunde (07:40 Uhr) bis zum Ende der 6. Schulstunde (12:50 Uhr) steigen CO<sub>2</sub>-Konzentration und TVOC-Konzentration parallel an. Der Korrelationskoeffizient liegt bei  $R = 0,97$ . Dadurch ist die Verwendung von CO<sub>2</sub> als Luftgüteindikator gerechtfertigt. Bereits Pettenkofer empfahl 1858, dass eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1000 ppm in Innenräumen nicht überschritten werden solle, da dann auch von einer hinreichend großen Konzentration an gesundheitsschädlichen VOCs ausgegangen werden könne [25].



**Abb. 4.6** Korrelation zwischen CO<sub>2</sub> und TVOC. Messung in einem Klassensaal einer Berufsschule in der Zeit zwischen 0:00 Uhr und 24:00 Uhr. Links: Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Rechts: Verlauf der TVOC-Konzentration.

### 4.2.1 Sensorprinzip zur Messung von CO<sub>2</sub>

Es gibt unterschiedliche Methoden zur Detektion von CO<sub>2</sub>, die auf chemische und physikalische Prozessen basieren. Die am meisten verbreitete Methode, um die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Luft zu bestimmen, basiert auf der Infrarot-Absorption [109]. Mehratomige Moleküle können zu Schwingungen und Rotationen angeregt werden, was zu einer Änderung des elektrischen Dipolmoments führt. Elektromagnetische Strahlung im infraroten Wellenlängenbereich kann dann an dieses Dipolmoment koppeln und absorbiert werden. Die Stärke der Absorption ist abhängig von der Konzentration der Moleküle. Im folgenden Abschnitt wird die Licht-Molekül-Wechselwirkung genauer erläutert.

#### Licht-Molekül-Wechselwirkung

Die Bindung zwischen Atomen eines zweiatomigen Moleküls, wie beispielsweise Kohlenmonoxid CO, kann mit Hilfe der Theorie des anharmonischen Oszillators beschrieben werden. Diese drückt das Bindungspotential zwischen zwei Atomen in einem Molekül in Abhängigkeit zum Abstand ihrer Kerne  $r$  durch das Morse-Potential der Form

$$E_{Morse}(r) = E_{diss} \cdot [1 - \exp(-a(r_0 - r))]^2 \quad (4.7)$$

aus. Dabei ist  $E_{diss}$  die Energie, die zur Dissoziation der Atome notwendig ist,  $a$  eine molekülspezifische Konstante und  $r_0$  der Ruheabstand beider Kerne. Die Theorie beruht auf der Vorstellung, dass die Rückstellkraft nahe der Ruhelage linear verläuft und für größere Abstände abnimmt, bis das Molekül dissoziiert. Bei Stauchung des Moleküls wächst die abstoßende Kraft exponentiell an. Der Potentialverlauf ist in Abbildung 4.7 zu sehen.

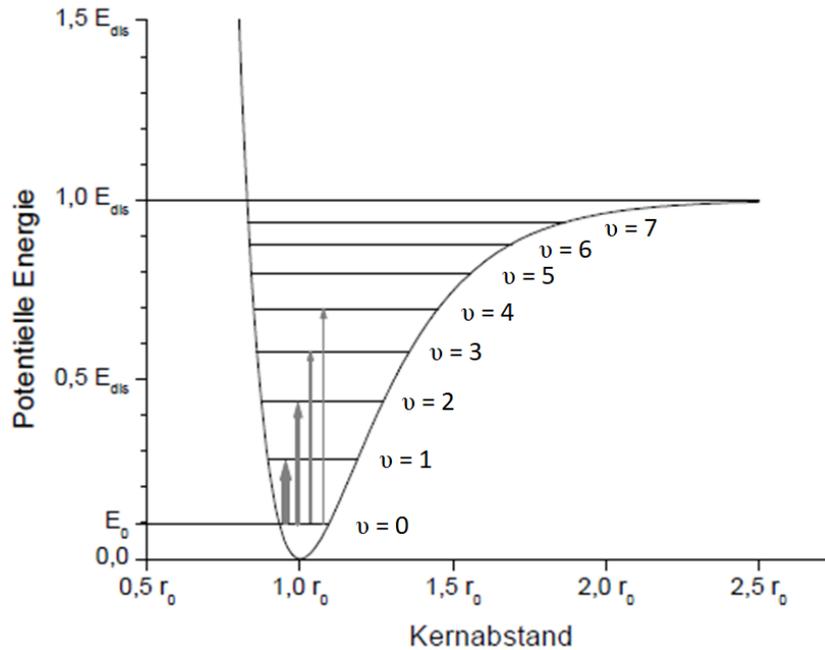


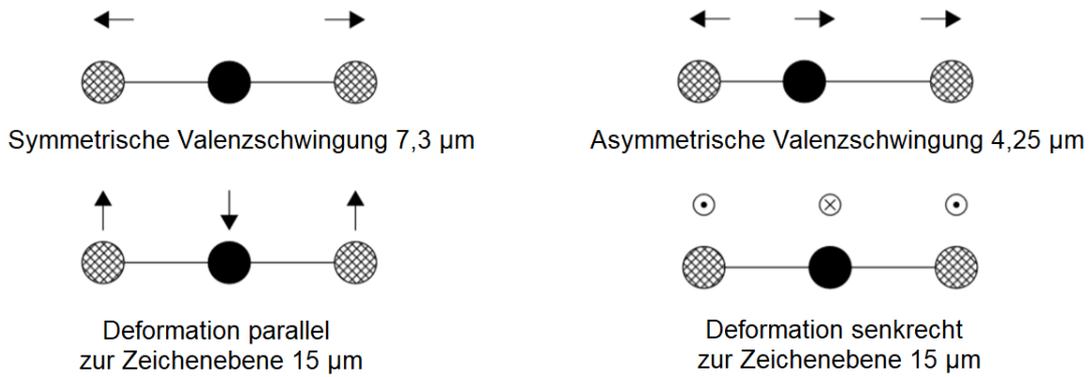
Abb. 4.7 Morse-Potential eines anharmonischen Oszillators [110].

Durch Lösen der Schrödinger Gleichung ergeben sich diskrete Schwingungsniveaus

$$E_v = h\omega_0 \cdot \left(v + \frac{1}{2}\right) - \frac{h^2\omega_0^2}{4E_{diss}} \cdot \left(v + \frac{1}{2}\right)^2 \quad (4.8)$$

mit dem Planck'schen Wirkungsquantum  $h$ , der ganzzahligen Schwingungsquantenzahl  $v$  und der Resonanzfrequenz des Moleküls  $\omega_0$  [110].

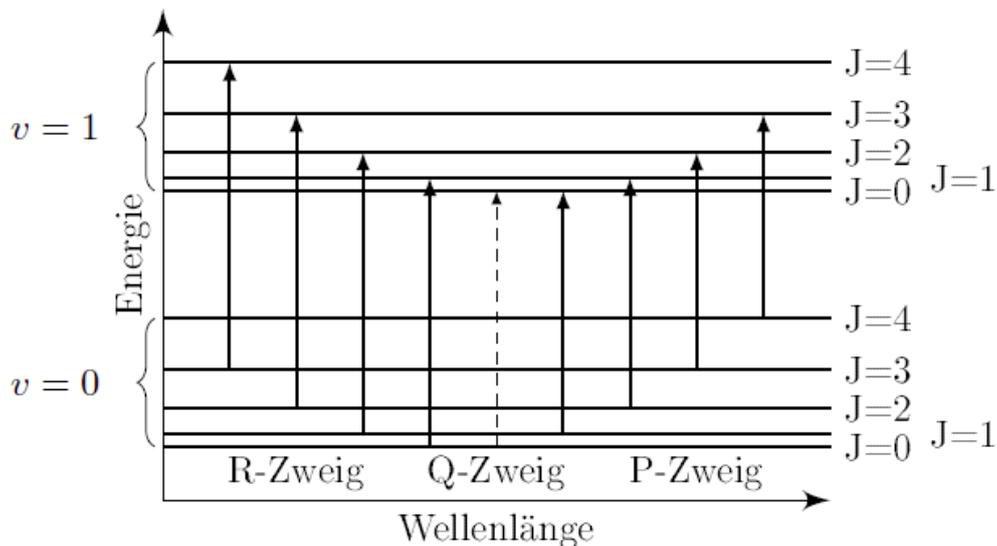
Im Fall des dreiatomigen Moleküls  $\text{CO}_2$  bilden sich so insgesamt vier Schwingungszustände aus, die sich in symmetrische und asymmetrische Valenz- bzw. parallele und senkrechte Deformationsschwingungen unterteilen lassen. Bei Valenzschwingungen erfolgt die Auslenkung der Atome entlang der Bindungsachse. Bei Deformationsschwingungen werden die Atome mit einem veränderlichen Bindungswinkel ausgelenkt. Jeder Schwingungszustand besitzt eine Resonanzfrequenz  $\omega_0$  bzw. einer Resonanzwellenlänge  $\lambda_0$ . Abbildung 4.8 zeigt die möglichen Schwingungszustände von  $\text{CO}_2$  inklusive deren Resonanzwellenlängen.



**Abb. 4.8** Mögliche Schwingungszustände eines CO<sub>2</sub>-Moleküls mit dazugehörigen Resonanz-Wellenlängen [111].

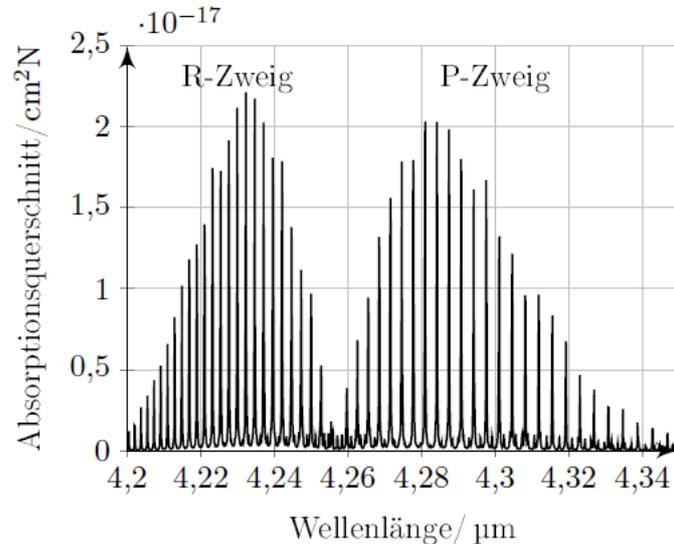
Schwingungen, bei denen sich das elektrische Dipolmoment ändert, werden als IR-aktiv bezeichnet. Elektromagnetische Strahlung kann an dieses Dipolmoment koppeln und dadurch mit den Molekülen wechselwirken. Sie wird absorbiert und hebt das Molekül so auf ein höheres Schwingungsenergieniveau. Im Fall von CO<sub>2</sub> sind die asymmetrische Valenzschwingung und beide Deformationsschwingungen IR-aktiv. Die symmetrische Valenzschwingung hat kein veränderliches Dipolmoment und ist daher IR-inaktiv. Für die Messung von CO<sub>2</sub> wird typischerweise die asymmetrische Valenzschwingung verwendet, da diese die höchste Empfindlichkeit besitzt und technisch hinreichend gut realisierbar ist [112]. Diese besitzt eine Resonanzwellenlänge von  $\lambda_0 = 4,25\mu\text{m}$ .

Zusätzlich zu den Schwingungen können Moleküle auch Rotationszustände mit der Rotationsquantenzahl  $J$  ausbilden, siehe Abbildung 4.9. Die Übergänge werden abhängig von der Änderung der Schwingungs- und Rotationsquantenzahlen als R-Zweig ( $\Delta J = +1, \Delta v = 1$ ), Q-Zweig ( $\Delta J = 0, \Delta v = 0$ ) und P-Zweig ( $\Delta J = -1, \Delta v = 1$ ) bezeichnet.



**Abb. 4.9** Rotations- und Schwingungsübergänge eines CO<sub>2</sub>-Moleküls.

Abbildung 4.10 zeigt das Absorptionsspektrum der asymmetrischen Valenzschwingung eines CO<sub>2</sub>-Moleküls inklusive des Rotationsspektrums mit R- und P-Zweig. Der Q-Zweig existiert nur bei der entarteten Deformationsschwingung und ist daher nicht zu sehen [113].



**Abb. 4.10** Schwingungs- und Rotationsspektrum eines CO<sub>2</sub>-Moleküls der asymmetrischen Valenzschwingung mit R- und P-Zweig [113].

#### *Lambert-Beer'sches Gesetz*

Beim Durchgang von elektromagnetischer Strahlung durch ein Medium werden Teile der Strahlung absorbiert, wodurch die Intensität der Strahlung  $I$  abnimmt. Die Intensitätsminderung wird durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben und ist abhängig von dem Absorptionskoeffizienten  $\alpha$ , der optischen Wegstrecke  $d$  und der Konzentration des absorbierenden Mediums  $c$  in der Form

$$I = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot d \cdot c) \quad (4.9)$$

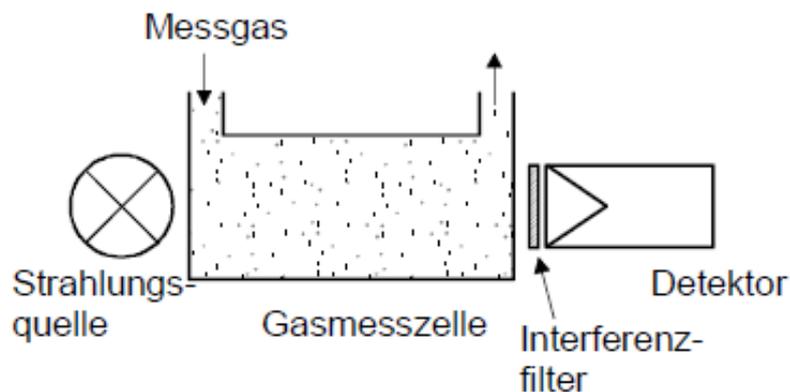
mit der Anfangsintensität  $I_0$ . Die Einführung der Extinktion  $E$  (Absorbanz) mit dem Extinktionskoeffizienten  $\varepsilon_\lambda$  führt zu einer linearen Abhängigkeit von Konzentration  $c$  und optischer Weglänge  $d$ .

$$E = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \varepsilon_\lambda \cdot c \cdot d \quad (4.10)$$

Je größer die optische Wegstrecke  $d$  ist, desto größer ist auch die Absorbanz und desto genauer lassen sich Rückschlüsse auf die Konzentration des absorbierenden Mediums ziehen [114].

### 4.2.2 Aufbau von CO<sub>2</sub>-Sensoren

Bei der Messung von CO<sub>2</sub> mittels Infrarotabsorption wird zwischen dispersiven und nicht-dispersiven Sensoren unterschieden. In dispersiven Sensoren wird dabei ein dispersives Element, wie beispielsweise ein Gitter, in den Strahlengang gebracht. Die Intensitätsmessung erfolgt dann über sogenannte Zeilensensoren, die aus vielen kleinen Infrarotsensoren zusammengesetzt sind. In Abhängigkeit des dispersiven Verhaltens in Anwesenheit von CO<sub>2</sub> kann dann auf dessen Konzentration geschlossen werden. Dieses Verfahren ist jedoch sehr komplex und mit hohen Kosten verbunden, weshalb ein Großteil der CO<sub>2</sub>-Sensoren auf nicht-dispersiver Infrarotabsorption (NDIR) basieren. Diese Sensoren bestehen im Allgemeinen aus einer Strahlungsquelle, einer Messküvette, schmalbandigen IR-Bandpassfilter als Interferenzfilter und einem oder mehreren Detektoren. Der einfachste Aufbau ist ein sogenannter Einstrahlsensor, siehe Abbildung 4.11 [115].

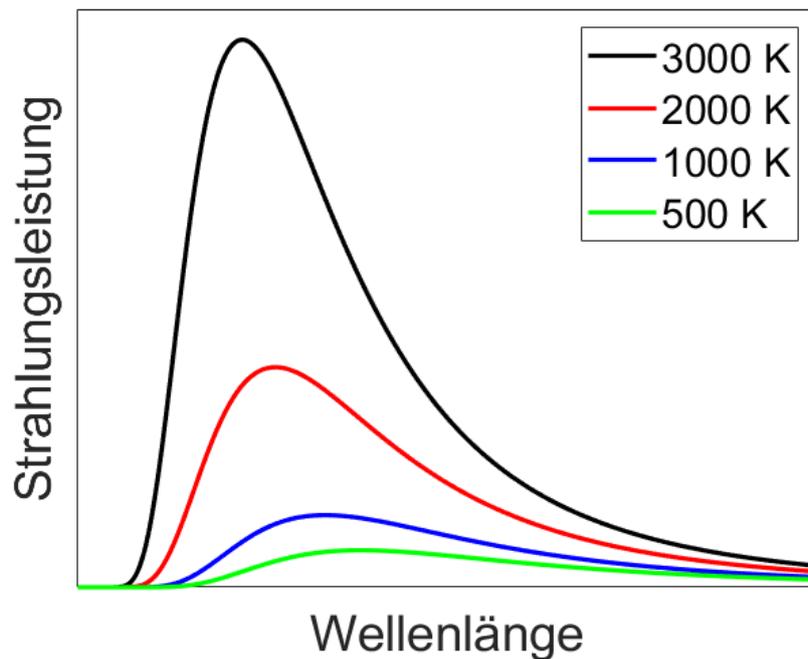


**Abb. 4.11** Schematischer Aufbau eines Einstrahlsensors [115].

Die Strahlungsquelle basiert auf dem Prinzip, dass jeder Körper in Abhängigkeit seiner Temperatur Strahlung emittiert. Die Strahlungsverteilung im Frequenzspektrum kann über das Planck'sche Strahlungsgesetz für ideale Körper ermittelt werden. Bei diesen sog. schwarzen Körpern entspricht die Emission exakt der Absorption der Strahlung – sie haben einen Emissionsgrad von 1. Bei realen Strahlern, auch als graue Körper bezeichnet, ist der Emissionsgrad jedoch kleiner als 1. Aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz folgt, dass es für jede Temperatur eine Frequenz (bzw. Wellenlänge) mit maximaler Strahlungsleistung gibt. Dieses Maximum kann durch das Wien'sche Verschiebungsgesetz berechnet werden [116].

$$\lambda_{max}[\mu m] = \frac{2898}{T [K]} \quad (4.11)$$

Der prinzipielle Verlauf der Strahlungsintensität bei verschiedenen Temperaturen ist in Abbildung 4.12 dargestellt.



**Abb. 4.12** Qualitatives Strahlungsspektrum eines schwarzen Körpers bei unterschiedlichen Temperaturen. Mit steigender Temperatur verschiebt sich das Maximum der Strahlungsleistung zu kleineren Wellenlängen.

Für die Erzeugung von Strahlung mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 4,25 \mu\text{m}$  werden demnach thermische Strahler mit einer Temperatur von ca. 680K benötigt.

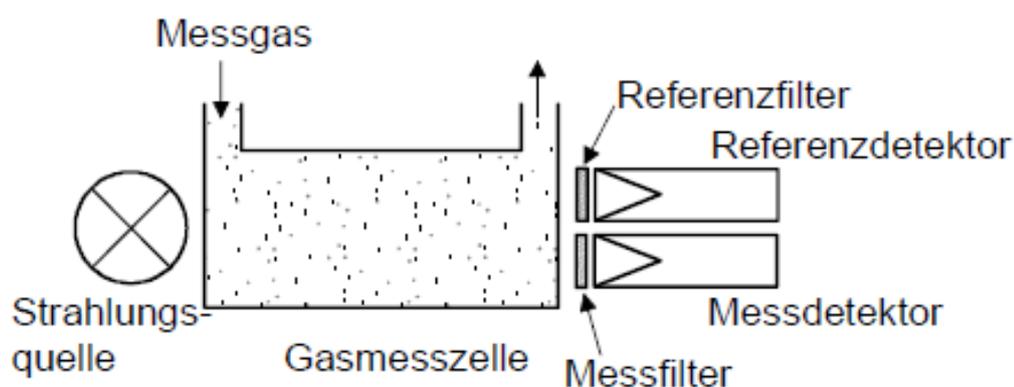
Die erzeugte Strahlung durchläuft die Messküvette, in der sie mit den  $\text{CO}_2$ -Molekülen wechselwirkt und teilweise absorbiert wird. Die restliche, nicht absorbierte, Strahlung trifft dann auf einen IR-Bandpassfilter. Dieser besteht beispielsweise aus vielen dielektrischen Schichten mit unterschiedlichen Brechungsindizes und lässt nur Wellenlängen in einem schmalen Bereich um  $4,25 \mu\text{m}$  passieren.

Schließlich gelangt die Infrarotstrahlung in einen Detektor, der deren Intensität misst. Infrarotdetektoren im relevanten Spektralbereich zwischen  $3 \mu\text{m}$  und  $5 \mu\text{m}$  basieren häufig entweder auf der Wechselwirkung zwischen Photonen und halbleitenden Materialien oder auf thermischen Effekten. Bei halbleitenden Materialien können Elektronen durch die Strahlung vom Valenz- in das Leitungsband angehoben werden und so durch einen elektrischen Strom oder eine Spannung detektiert werden. Thermische Detektoren nutzen die Erhitzung von Materialien durch die Infrarotstrahlung und die damit verbundene Änderung elektrischer Eigenschaften, wie beispielsweise eine Änderung des elektrischen Widerstands bei Bolometern oder die Änderung der Thermospannung in Thermopiles.

Die Problematik dieses Einstrahldetektors besteht darin, dass die Genauigkeit der Detektion stark von der Ausgangsleistung der Strahlungsquelle abhängt. Durch Alterungsprozesse und Verschmutzung kann sich dessen Strahlungscharakteristik

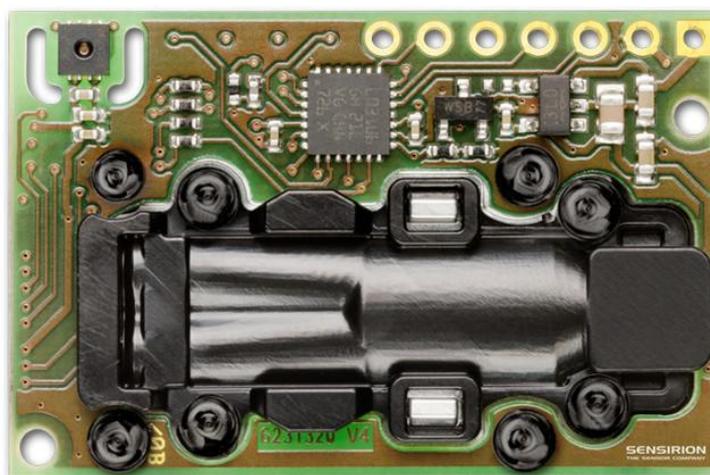
jedoch verändern. Aus diesem Grund werden häufig sogenannte Doppelstrahlsensoren eingesetzt [117].

Das Prinzip dieser Sensoren ist ähnlich dem eines Einstrahldetektors. Dieses wird jedoch um einen weiteren Strahlungsdetektor, den sogenannten Referenzdetektor, inklusive eines Referenzinterferenzfilters erweitert. Die Mittelwellenlänge des Filters ist dabei so gewählt, dass die Strahlung, die auf den Referenzdetektor fällt, durch keine im Messgas vorhandenen Substanzen (Wasser, CO<sub>2</sub>, ...) geschwächt wird. Die Leistung der im Referenzdetektor registrierten Strahlung hängt somit ausschließlich von der Intensität der Strahlungsquelle ab und kann dadurch bestimmt werden. Abbildung 4.13 zeigt den schematischen Aufbau.



**Abb. 4.13** Schematischer Aufbau eines Zweistrahlensensors [115].

Für die Messung von CO<sub>2</sub> in dieser Arbeit wurde unter anderem der low-cost-NDIR CO<sub>2</sub>-Sensor SCD30 der Firma Sensirion verwendet, siehe Abbildung 4.14. Dieser Zweistrahl-Detektor ist laut Hersteller in der Lage, CO<sub>2</sub> Konzentrationen bis 40.000 ppm bei einer Genauigkeit von  $\pm(30 \text{ ppm} + 3\%)$  zu detektieren. Zusätzlich verfügt der Sensor über einen Temperatur- und Luftfeuchtesensor [118].



**Abb. 4.14** CO<sub>2</sub> Sensor SCD30 der Firma Sensirion mit integriertem Temperatur- und Luftfeuchtesensor.

## 4.3 Feinstaub

Als Feinstaub werden feste oder flüssige Partikel in der Luft bezeichnet, die einen aerodynamischen Durchmesser kleiner als 10  $\mu\text{m}$  haben. Da diese sogenannten Aerosole normalerweise keine regelmäßige Form haben, wird der aerodynamische Durchmesser als „der Durchmesser derjenigen Kugel mit der Dichte  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ , die die gleiche Sinkgeschwindigkeit wie der Partikel hat“, definiert [103].

Aerosole mit einer Größe  $< 10 \mu\text{m}$  sind dabei „lungengängig“, d.h. sie können bei der Atmung in die Bronchien und Lungenbläschen eindringen. Abhängig von ihrer Größe werden Partikel in verschiedene Fraktionen unterteilt:

- PM<sub>10</sub>: Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser  $< 10 \mu\text{m}$
- PM<sub>2,5</sub>: Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser  $< 2,5 \mu\text{m}$
- PM<sub>1</sub>: Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser  $< 1 \mu\text{m}$

Die Konzentration an Feinstaub kann in Teilchen oder Masse pro  $\text{m}^3$  angegeben werden. Er kann sowohl aus natürlichen wie auch anthropogenen Quellen stammen. Beispiele für natürliche Quellen sind Vulkane, Waldbrände, Pollen, Bodenerosion und Mikroorganismen, wie Viren, Pilze und Bakterien. Anthropogene Quellen sind Kraftfahrzeuge, Kraftwerke, Öfen, Verbrennungsanlagen oder die Metall- und Stahlerzeugung. Abbildung 4.15 zeigt einen Größenvergleich verschiedener Feinstäube. In Städten ist der Straßenverkehr, vor allem Dieselabgase (Ruß) sowie Bremsen- und Reifenabrieb, die Hauptquelle für Feinstaub [119].

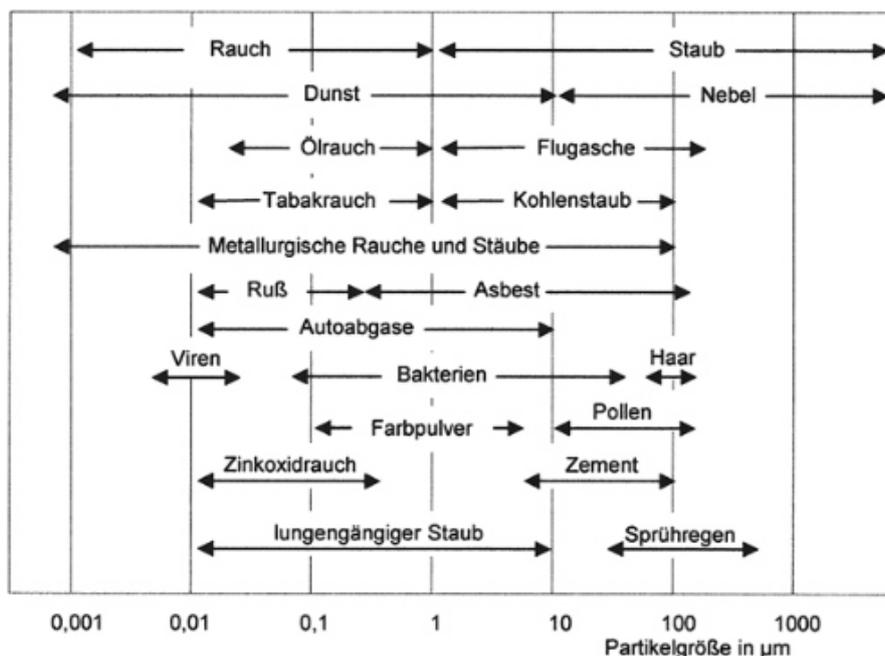


Abb. 4.15 Größenvergleich verschiedener Partikelarten [119].

Dringen Feinstaubpartikel in die Atemwege ein, können sie Schäden verursachen. Die Eindringtiefe ist abhängig von ihrer Größe.  $PM_{10}$  lagert sich hauptsächlich in der Nasenhöhle und den Bronchien ab. Ein geringer Teil zwischen  $PM_{10}$  und  $PM_{2,5}$  erreicht zudem die Bronchiolen und Alveolen.  $PM_{2,5}$  gelangt über die Alveolen in den Blutkreislauf, kann sich so über den gesamten Körper verteilen und Entzündungen verursachen [26]. Feinstaubpartikel können an ihrer Oberfläche Schwermetalle und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe anlagern, die nach WHO krebserregend sind und damit zu den Gruppe-1-Karzinogenen<sup>2</sup> gehören [120]. Zu den Krankheiten infolge erhöhter Feinstaubbelastung zählen unter anderem eine Verschlechterung der Lungenfunktion, Asthma, Exazerbationen bei der chronisch obstruktiven Lungenerkrankung COPD und Herz-Kreislaufferkrankungen [26].

Gemäß Umweltbundesamt gibt es für Feinstaub keine Schwellenkonzentration unterhalb der keine gesundheitliche Schädigung eintritt [121] [122]. Die Feinstaubbelastung sollte daher immer so niedrig wie möglich gehalten werden. Seit 2005 gelten in der EU-Grenzwerte für die verschiedenen Feinstaubfraktionen, siehe Abbildung 4.16. So darf der Tagesmittelwert der Konzentration von  $PM_{10}$  den Grenzwert von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nicht öfter als 35 Mal pro Jahr überschreiten. Zusätzlich darf der Jahresmittelwert  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nicht überschreiten. Der Grenzwert für die durchschnittliche  $PM_{2,5}$ -Konzentration über das Jahr verteilt liegt bei  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

<b>Grenzwerte für den Schadstoff Feinstaub (<math>PM_{10}</math>)</b>			
Bezeichnung	Mitteilungszeitraum	Grenzwert	Zeitpunkt, ab dem der Grenzwert einzuhalten ist
Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	24 Stunden	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{10}$ dürfen nicht öfter als 35mal im Jahr überschritten werden	seit 1.1.2005 einzuhalten
Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	Kalenderjahr	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{10}$	seit 1.1.2005 einzuhalten
<b>Grenzwerte für den Schadstoff Feinstaub (<math>PM_{2,5}</math>)</b>			
Bezeichnung	Mitteilungszeitraum	Grenzwert	Zeitpunkt, ab dem der Grenzwert einzuhalten ist
Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	Kalenderjahr	$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{2,5}$	seit 1.1.2015 einzuhalten

**Abb. 4.16** Feinstaubgrenzwerte laut Umweltbundesamt [121].

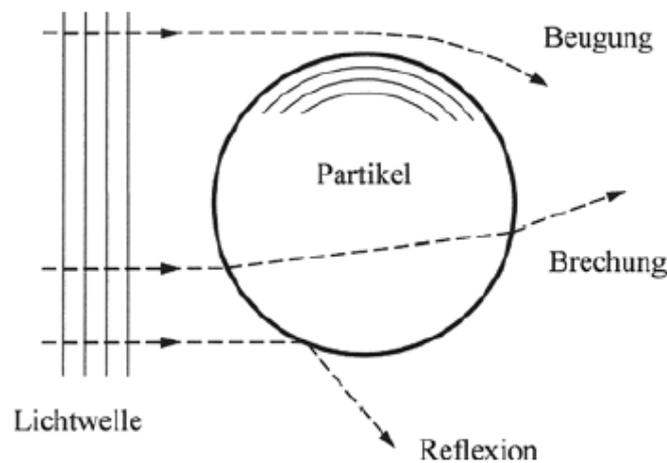
In Deutschland zählt Stuttgart zu den Städten mit den höchsten Feinstaubkonzentrationen mit einer Überschreitung des  $PM_{10}$  Grenzwertes an 64 Tagen im Jahr 2014. Der Jahresmittelwert lag dort bei  $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Zum Vergleich lag der Jahresmittelwert von  $PM_{10}$  in Saarbrücken in diesem Zeitraum bei  $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mit insgesamt 10 Tagen, an denen die Konzentration über  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  lag [123].

<sup>2</sup>Zu den Gruppe-1-Karzinogenen werden laut WHO Stoffe gezählt, zu denen es ausreichende Beweise für eine krebserzeugende Wirkung beim Menschen gibt [120].

### 4.3.1 Sensorprinzip zur Messung von Feinstaub

Es gibt verschiedene Methoden, um Feinstaub zu messen, wie radiometrische, kumulative, gravimetrische oder nichtoptische Verfahren nach dem Feldstörungsprinzip. Zusätzlich wird zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Messmethoden unterschieden, bei denen die Analyse entweder direkt vor Ort oder im Labor erfolgt. Die häufigste Partikelmessmethode in modernen low-cost Feinstaubsensoren basiert auf kontinuierlichen optischen Verfahren wie der Messung von Streulicht [119]. Dieses Prinzip soll im Folgenden vorgestellt werden.

Trifft eine ebene Lichtwelle mit der Wellenlänge  $\lambda$  auf eine Kugel mit Durchmesser  $d$  und Brechungsindex  $n$ , so kann sich die Ausbreitungsrichtung aufgrund von Brechung, Beugung und Reflexion ändern, siehe Abbildung 4.17. Zusätzlich kann sich bei polarisiertem Licht die Polarisations Ebene drehen [103].



**Abb. 4.17** Streulichtmessung an einzelnen Partikeln. Eine Lichtwelle kann auf drei Arten mit einem Partikel wechselwirken [103].

Die Intensitätsverteilung des Lichts im Raum um einen Partikel kann durch eine Funktion  $f$  beschrieben werden, die abhängig von der Intensität des einfallenden Lichts  $I_0$ , Streuwinkel  $\theta$ , Polarisationswinkel  $\Phi$ , Brechungsindex  $n$ , Wellenlänge  $\lambda$  und aerodynamischen Durchmesser  $d$  des Partikels ist [103].

$$\frac{I}{I_0} = f(\theta, \Phi, n, \lambda, d) \quad (4.12)$$

Mit Einführung des Parameters  $\alpha = \frac{\pi \cdot d}{\lambda}$  können drei verschiedene Streubereiche definiert werden, die das Verhältnis der Größe des streuenden Objekts zur Wellenlänge beschreiben, siehe Tabelle 4.2 [103].

Wenn die Wellenlänge des Lichts sehr viel größer als die Dimension des streuenden Objekts ist, handelt es sich um die sogenannte Rayleigh-Streuung. Dabei induziert die

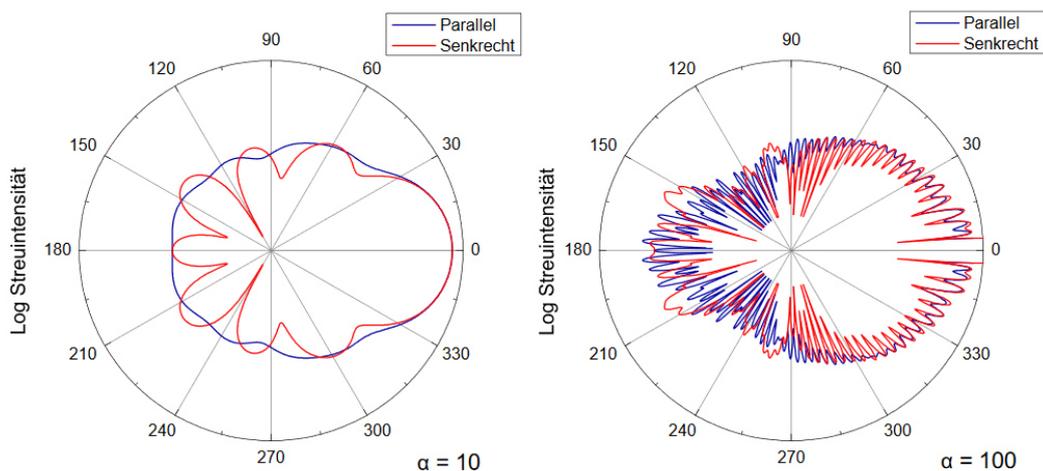
einfallende Strahlung ein schwingendes elektrisches Dipolmoment, das als Hertzscher Dipol fungiert und erneut Strahlung aussendet [116].

	Streuparameter	Partikelgröße (bei $\lambda = 500 \text{ nm}$ )
<b>Rayleigh-Bereich</b>	$\alpha < 0,1$	$< 0,02 \text{ }\mu\text{m}$
<b>Mie-Bereich</b>	$0,1 < \alpha < 10$	$\approx 0,02 - 2 \text{ }\mu\text{m}$
<b>Fraunhofer-Bereich</b>	$\alpha > 10$	$> 2 \text{ }\mu\text{m}$

**Tab. 4.2** Streubereiche in Abhängigkeit des Streuparameters  $\alpha$ , sowie die mögliche Auflösung von Partikelgrößen bei Nutzung von sichtbarem Licht mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 500 \text{ nm}$ .

Für die Messung von Feinstaub wird in der Regel sichtbares Laserlicht im Wellenlängenbereich um  $0,5 \text{ }\mu\text{m}$  ( $500 \text{ nm}$ ) verwendet. Das Streuverhalten von Licht an Feinstaubpartikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser zwischen  $0,5 \text{ }\mu\text{m}$  und  $2 \text{ }\mu\text{m}$  entspricht dann in etwa der Größenordnung der Wellenlänge und kann durch die Mie-Theorie (manchmal auch Lorenz-Mie-Theorie) beschrieben werden [124]. Bei größeren Partikeln ( $>2 \text{ }\mu\text{m}$ ) erfolgt die Beschreibung im Fraunhofer-Bereich, wobei die Mie-Theorie für große Partikel in den Fraunhofer-Bereich übergeht [103].

Abbildung 4.18 zeigt ein qualitatives Streumuster an zwei Partikel mit unterschiedlichem Streuparameter  $\alpha$  in Abhängigkeit des Streuwinkels als Funktion des Beobachtungswinkels relativ zur Richtung des einfallenden Lichtes in der Streuebene (parallel und senkrecht) [125]. Bereits die Beschreibung des Streumusters an einem einzelnen Partikel ist sehr komplex und beansprucht hohe Rechenleistungen, sodass das Streumuster an einer Vielzahl von Teilchen umso aufwändiger wird.



**Abb. 4.18** Intensitätsverteilung des Streulichts nach der Streuung an einem Partikel mit unterschiedlichen Streuparameter  $\alpha$  in Abhängigkeit des Streuwinkels als Funktion des Beobachtungswinkels relativ zur Richtung des einfallenden Lichtes in der Streuebene. Blau: Parallel zur Streuebene. Rot: Senkrecht zur Streuebene [125].

Diese hohe Rechenleistung ist in low-cost-Sensorsystemen in der Regel nicht gegeben ist, weshalb oft Mustererkennungsanalysen ihren Einsatz finden. Das aufgenommene Streumuster wird dabei mit vorher aufgenommenen Kalibrierkurven unterschiedlicher Partikelgrößen verglichen [103].

### 4.3.2 Aufbau von Feinstaubsensoren

Für die Feinstaubmessungen in dieser Arbeit wurde der low-cost-Feinstaubsensor SPS30 der Firma Sensirion verwendet. Dieser ist in der Lage, die verschiedenen Feinstäube  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  und  $PM_{10}$  in einem Messbereich zwischen 0 und  $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zu detektieren. Neben dem Messen der Konzentration kann auch die Teilchenzahl ausgegeben werden. Dabei wird angenommen, dass die Teilchenzahl mit der Masse korreliert. Der Sensor hat die Dimensionen von 41 mm x 41 mm x 12 mm [126].

Über einen Ventilator wird von außen aktiv Luft eingesogen und über einen Photodetektor geführt. Das Laserlicht des Klasse 1 Lasers mit einer Wellenlänge von 660 nm wird im  $90^\circ$  Winkel zum Luftstrom über den Detektor gestrahlt. Anhand des Streumusters und integrierten Algorithmen können dann Rückschlüsse auf die Feinstaubkonzentration verschiedener Größen gezogen werden. Bei einer Außentemperatur von  $25^\circ\text{C}$  hat der Sensor laut Herstellerangaben eine Genauigkeit von  $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Konzentrationsbereich von 0 -  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . In einem Konzentrationsbereich von 100 -  $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  wird der Fehler mit 10 % angegeben.. Unter Dauerbetrieb hat er eine Lebensdauer von mehr als 10 Jahren. Die Datenauslesung kann über UART (= „Universal Asynchronous Receiver Transmitter“) oder I<sup>2</sup>C (= „Inter-Integrated Circuit“) erfolgen. Abbildung 4.19 zeigt den Aufbau des Sensors mit und ohne Schutzkappe.



**Abb. 4.19** Low-cost-Feinstaubsensor SPS30 von Sensirion. Links: geschlossener Sensor. Rechts: geöffneter Sensor

## 4.4 Referenzmethoden

Die Kalibrierung eines Sensors erfolgt durch den Abgleich der Sensorreaktion in Anwesenheit einer bekannten Zielgröße (Referenz), wie einem Gasgemisch oder einer Feinstaubzusammensetzung.

Bei Gassensoren kann beispielsweise eine bekannte Gaszusammensetzung in einer Gasmischanlage (GMA) erzeugt und über den Sensor geführt werden. Dadurch lässt sich die Sensorreaktion unterschiedlichen Gaszusammensetzungen zuordnen [127]. Eine weitere Möglichkeit ist die Untersuchung der Zusammensetzung einer unbekannt Probe in einem Gaschromatograph-Massenspektrometer (GC-MS) oder mittels Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR). Der Abgleich erfolgt dabei über Referenzbibliotheken, die eine Zuordnung der Signalmuster zu bekannten Molekülen erlauben [128].

Bei Partikelsensoren erfolgt die Referenzierung neben optischen Methoden, die das Lichtunterbrechungsprinzip nutzen oder bei denen Teilchen direkt unter dem Mikroskop gezählt werden, vor allem durch den Einsatz gravimetrischer Methoden. Ein Beispiel für eine gravimetrische Methode ist der Kaskadenimpaktor. Bei diesem wird ausgenutzt, dass Teilchen, abhängig von Masse und Größe, eine unterschiedliche Trägheit haben. Dadurch können sie schrittweise abgeschieden werden [103].

Die möglichen Referenzmethoden werden im folgenden Abschnitt genauer beschrieben.

### 4.4.1 Referenzmethoden zur Messung von Gasen

Für die Kalibrierung von Gassensoren ist es nötig, das Sensorverhalten in Anwesenheit von Gasen verschiedener Zusammensetzung und Konzentrationen zu bestimmen. Gleichzeitig sollten auch die Temperatur und relative Luftfeuchte des Gemischs variierbar sein, da diese Parameter einen großen Einfluss auf das Signal des Sensors haben. Eine Möglichkeit zur Erzeugung eines Referenzgases ist eine Gasmischanlage (GMA) [127].

#### **Gasmischanlage**

Die Erzeugung eines bekannten Gasgemischs kann in einer GMA realisiert werden, dessen prinzipieller Aufbau in Abbildung 4.20 gezeigt ist. Über einen Nullluftgenerator wird Normalluft mittels Spezialfilter von Wasser, Öl und Partikeln befreit, welche anschließend als Trägergas dient. Über ein Leitungssystem können verschiedene Prüfgase in den Strom gegeben werden. Über Mass-Flow-Controller (MFC) kann sowohl der Fluss dieser Prüfgase als auch der Gesamtfluss

variiert werden, wodurch die Konzentrationen einzelner Prüfgase eingestellt werden können [129].

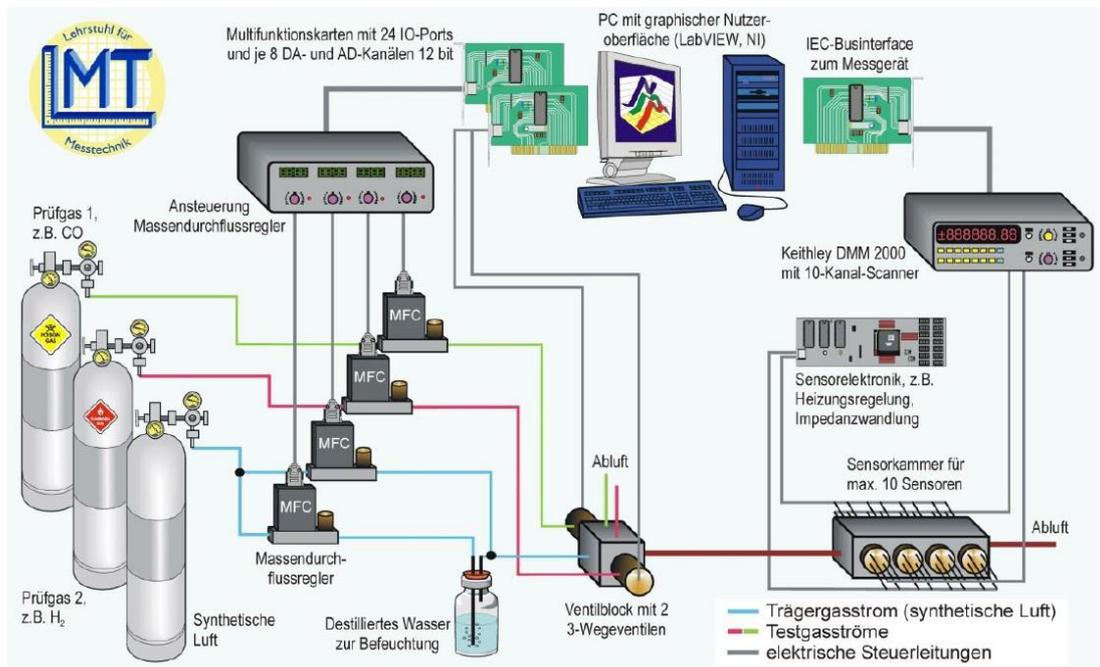


Abb. 4.20 Prinzipieller Aufbau einer Gasmischanlage [129].

Die relative Luftfeuchte kann durch die Führung des Trägergases durch eine Flasche mit destilliertem Wasser justiert werden. Schließlich gelangt das Gasgemisch in eine Sensorkammer und wird über den Sensor geführt.

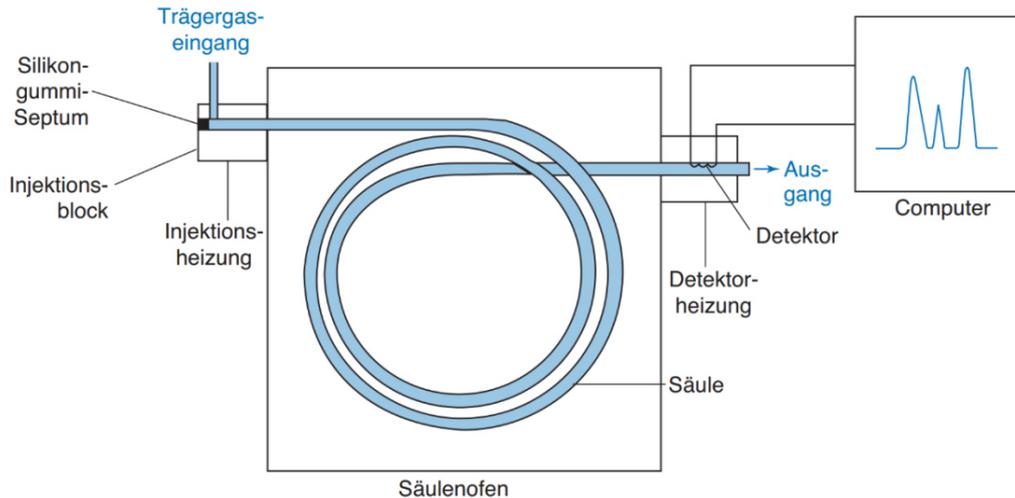
Neben der Nutzung von Prüfgasen in Gasflaschen können auch Permeationsröhrchen genutzt werden. Diese befinden sich in Permeationsöfen und dampfen, in Abhängigkeit ihrer Temperatur, eine bekannte Konzentration eines Gases aus. Dieses Gas kann dann ebenfalls in den Trägergasstrom geleitet werden.

### Gaschromatographie-Massenspektrometrie

Eine Möglichkeit zur Untersuchung eines unbekanntes Gasgemischs auf seine Zusammensetzung ist die Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS). Bei diesem Verfahren werden die Bestandteile eines Stoffgemischs getrennt und inhaltlich quantifiziert, wodurch bei kalibrierten Messungen minimale Substanzmengen ( $< 10^{-9}$  g) nachgewiesen werden können. Voraussetzung für diese Untersuchung ist, dass die Stoffe entweder gasförmig oder unzersetzt verdampfbar sind [130].

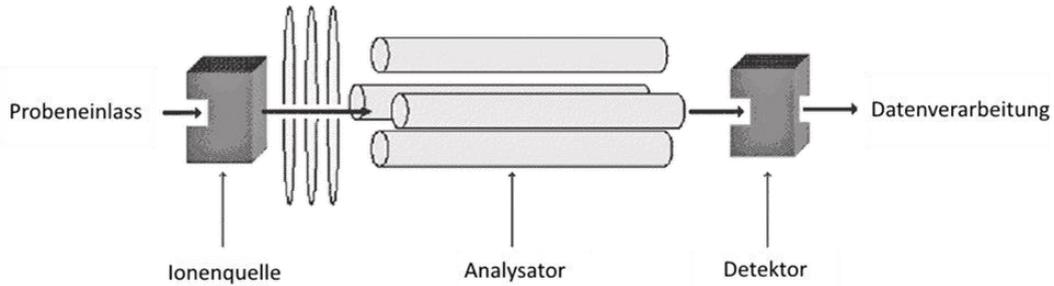
Abbildung 4.21 zeigt den schematischen Aufbau eines Gaschromatographen (GC). Der zu untersuchende gasförmige Stoff wird über einen Injektor in einen Gasstrom (Trägergas) überführt. Dieser wird als mobile Phase bezeichnet. Bei dem Trägergas handelt es sich um ein inertes Gas, meist Helium oder Stickstoff. Dieses durchströmt eine statische Phase in Form einer dünnen und von innen mit einem Organosilikat (z.B.

Polydimethylsiloxan) beschichteten Glaskapillaren mit einem Durchmesser von 3 – 6 mm [131]. Die Kapillare ist zwischen 15 und 60 m lang und wird als Säule bezeichnet. Zusätzlich befindet sie sich in einem Säulenofen, sodass ihre Temperatur variiert werden kann [130]. Am Ende der Säule befindet sich ein Detektor.



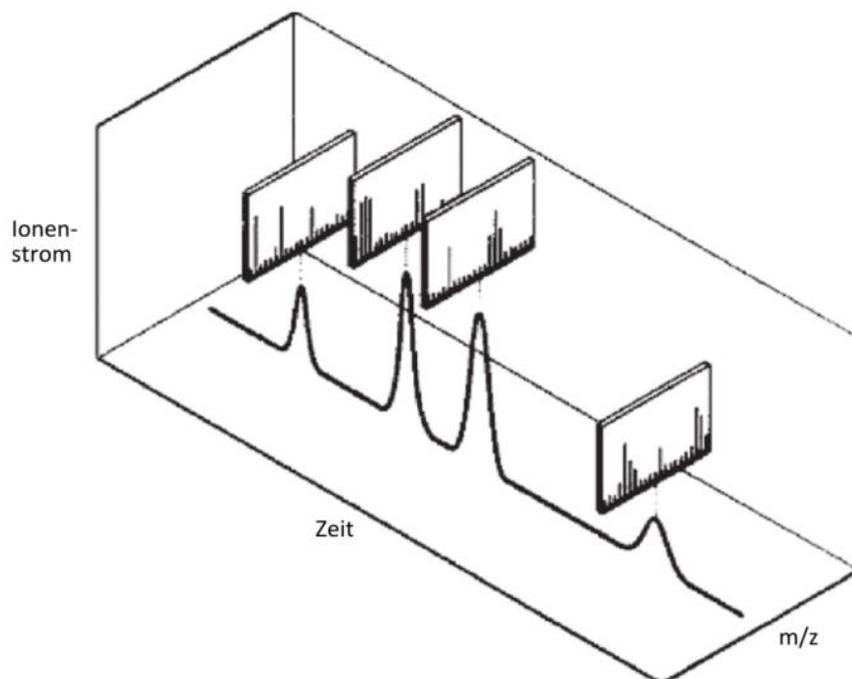
**Abb. 4.21** Schematischer Aufbau eines Gaschromatographen [128].

Innerhalb der Säule wechselwirken die unterschiedlichen Komponenten des zu untersuchenden Stoffs mit der Kapillarwand (stationäre Phase), wodurch sie gebunden werden. Bei unpolaren Stoffen basiert die Wechselwirkung hauptsächlich auf Dispersionswechselwirkungen (Van-der-Waals Bindungen). Bei polaren Stoffen (wie z.B. Alkohole) treten Wasserstoffbrückenbindungen oder Donator-Akzeptor-Bindungen auf. Abhängig von ihren chemischen und physikalischen Stoffeigenschaften (Größe, Polarität, Flüchtigkeit) verweilen die Komponenten des Stoffes unterschiedlich lange in der stationären Phase, ehe sie erneut in die mobile Phase übergehen. Dadurch erhalten sie eine charakteristische Mobilität [130]. Die gesamte Verweildauer innerhalb der Säule wird als Retentionszeit bezeichnet und ist charakteristisch für die jeweilige Komponente, jedoch nicht immer eindeutig. Aus diesem Grund wird als Detektor häufig ein Massenspektrometer verwendet. Dieser analysiert die Probe anhand ihres Masse-Ladungs-Verhältnis. Ein Beispiel für ein Massenspektrometer ist das Quadrupol-Massenspektrometer, dessen schematisches Funktionsprinzip in Abbildung 4.22 zu sehen ist. Es besteht aus einer Ionenquelle, elektrischen Linsen, einem Analysator und einem Detektor. Das System befindet sich dabei in einem Vakuum (Druck  $< 10^{-7}$  mbar), welches über eine Kombination aus konventioneller Pumpe und Turbomolekularpumpe erzeugt werden kann [130] [131].



**Abb. 4.22** Aufbau eines Massenspektrometers mit Quadrupol-Analysator, nach [130].

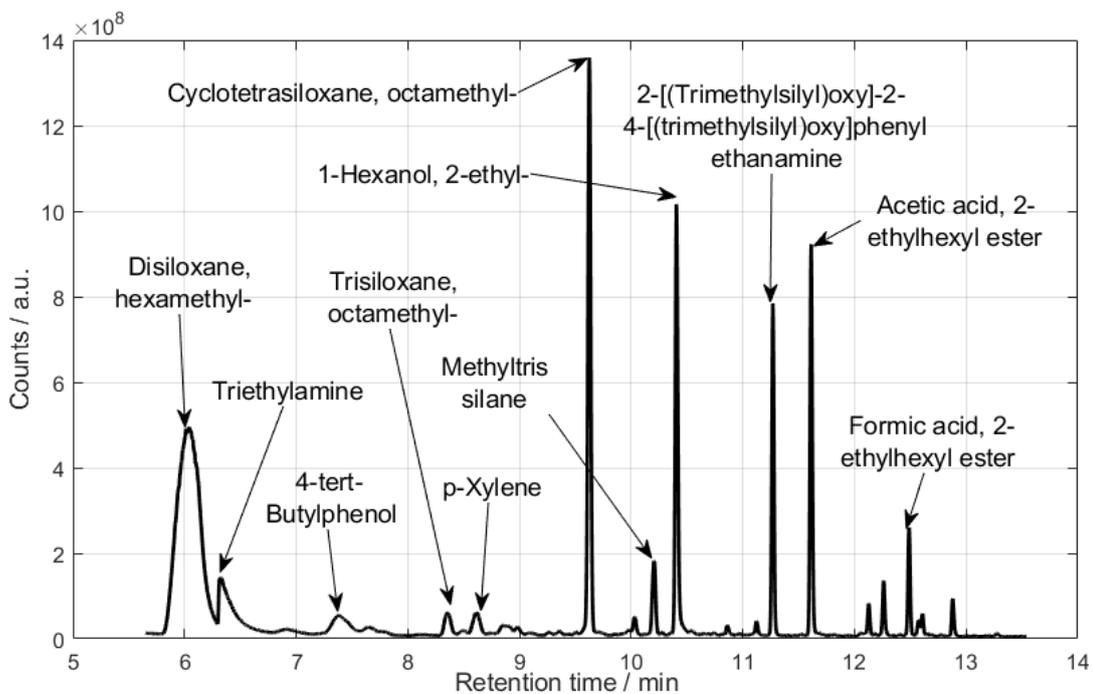
Nach dem Durchlaufen der Säule werden die Moleküle meist durch Elektronenstöße mit Energien  $\sim 70$  eV (manchmal auch chemische Ionisation oder Feldionisation) ionisiert. Teilweise werden sie dadurch zerbrochen, wodurch auch kleinere Bestandteile detektiert werden können [132]. Der Ionenstrahl wird zunächst durch ein System aus elektronischen Linsen fokussiert und gelangt in den Analysator, der aus jeweils zwei sich gegenüberliegenden Elektroden besteht. An den Elektroden ist jeweils eine konstante Spannung  $U_0$  und eine Wechselspannung  $V = V_0 \cdot \cos(\omega t)$  angelegt. Diese Superposition sorgt dafür, dass abhängig von den Spannungen  $U_0$ ,  $V_0$  und der Kreisfrequenz  $\omega$  nur gewisse stabile Flugbahnen existieren, die durch das entsprechende Masse-zu-Ladungs-Verhältnis  $\frac{m}{z}$  gekennzeichnet sind. Im Idealfall werden in der Ionenquelle nur einfache Ionen erzeugt. Gerade bei kleinen und flüchtigen Molekülen kann davon ausgegangen werden, dass diese durch die verwendeten Ionisationsenergien nur einfach ionisiert werden. Somit wird sichergestellt, dass nur Ionen mit der gleichen Masse den Quadrupol-Analysator verlassen [132].



**Abb. 4.23** Dreidimensionale Darstellung der aus einem GC – MS erhaltenen Signale [130].

Schließlich gelangen die Ladungen in einen Sekundärelektronenvervielfacher, in dem ein eintretendes Ion bis zu  $10^5$  Elektronen erzeugt, die dann als Stromfluss detektiert werden können. Die Zahl der einfallenden Ionen (Counts) ist dann proportional zum Stromfluss. Über die Retentionszeit aufgetragen kann so ein typisches Chromatogramm erstellt werden, siehe Abbildung 4.23 und 4.24. Durch Vergleichen mit bestehenden Datenbanken kann jedem Peak aus den Informationen des Massenspektrometers ein Molekül zugeordnet werden [130].

Um die Analysezeit zu minimieren und breite Peaks zu vermeiden, wird oft das Verfahren der Gradientenelution verwendet, bei dem die Temperatur der Säule langsam erhöht wird. Bei niedrigen Temperaturen werden hochsiedende Stoffe zurückgehalten. Bei hohen Temperaturen wird der Dampfdruck der Stoffe erhöht, wodurch sie flüchtiger werden und infolge dessen weniger stark auseinander diffundieren. Durch diese Verkleinerung der Peakbreite wird eine bessere Trennleistung erreicht [131].



**Abb. 4.24** Chromatogramm eines Lackes mit dem Umweltsiegel "Blauer Engel".

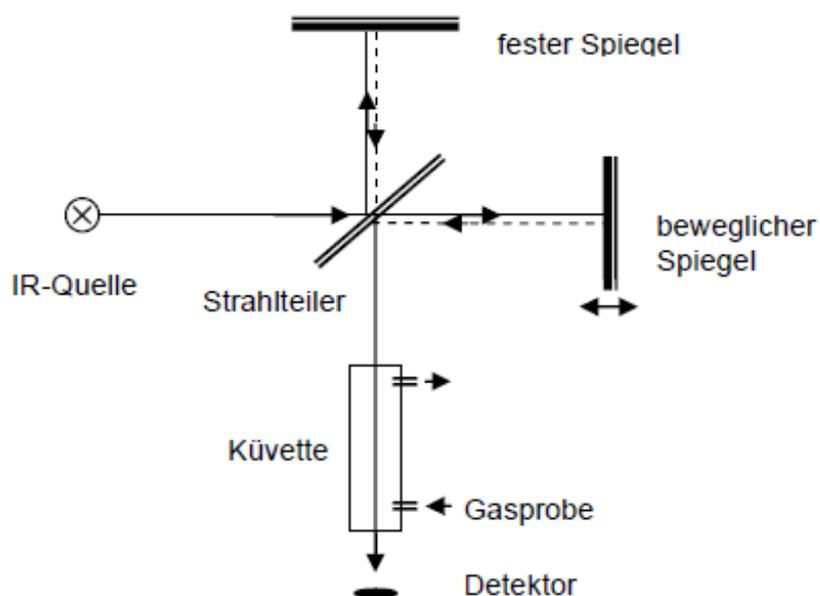
Die Fläche unterhalb der Peaks ist proportional zu dem Anteil des Stoffes. Für eine exakte Bestimmung der Stoffmenge muss das GC zunächst mit einer bekannten Probe kalibriert werden [128]. In dieser Arbeit wurden mehrere Alltagsgegenstände wie Farben, Klebstoffe und Bodenbeläge untersucht, siehe Abbildung 4.25. Da hierbei lediglich die qualitative Ermittlung der Inhaltsstoffe von Interesse war, wurden nur nicht-kalibrierte Messungen durchgeführt.



**Abb. 4.25** Verwendete Proben. V.l.n.r.: Lack mit Umweltsiegel, Lack ohne Umweltsiegel, Kork, emissionsarmer Bodenbelag, Bastelkleber, Sekundenkleber, Filzstift mit Umweltsiegel, Filzstift ohne Umweltsiegel.

### Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometrie

Ein weiteres Referenzverfahren zur Messung von Gasen stellt die Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (kurz FTIR) dar. Bei diesem Verfahren werden Michelson-Interferometer zur spektralen Aufteilung von IR-Strahlung verwendet. Abbildung 4.26 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Spektrometers. Das Licht eines thermischen IR-Strahlers trifft auf einen Strahlteiler, der die Strahlung in zwei Teilstrahlen aufspaltet. Diese treffen anschließend auf je einen festen und einen beweglichen Spiegel, wodurch sie reflektiert werden und erneut auf den Strahlteiler treffen. Der Weglängenunterschied beider Spiegel wird als Retardierung bezeichnet und kann durch die Variation der Position des beweglichen Spiegels geändert werden.



**Abb. 4.26** Prinzip der Analyse einer Probe auf der Basis der Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) [133].

Der kombinierte Strahl durchläuft anschließend eine Küvette mit der zu vermessenden Probe und wird abhängig von seiner Wellenlänge absorbiert. Die Intensität des transmittierten Lichts wird anschließend von einem Detektor gemessen und so ein Interferogramm aufgenommen. Mit Hilfe einer Fourier-Transformation kann dieses dann in ein IR-Spektrum umgerechnet werden, das die Intensität in Abhängigkeit der Wellenzahl (Reziprokwert der Wellenlänge) angibt. Durch den Vergleich der Intensitäten mit einem Referenzspektrum ohne Probe kann mit dem Lambert-Beer'schen Gesetz auf die Konzentration der absorbierenden Gase geschlossen werden [133].

Abbildung 4.27 zeigt ein Spektrum eines FTIR-Spektrometers. Im Vergleich zu dispersiven IR-Spektrometern bzw. Gitterspektrometern zeichnet sich diese Methode durch drei wesentliche Vorteile aus [111].

1) „Jacquinot Vorteil“

In diesem Aufbau werden keine Blenden oder Filter eingesetzt, wodurch die gesamte Energie der IR-Quelle auf den Detektor trifft und so ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis erreicht wird.

2) „ Fellget Vorteil“

Alle Wellenlängen werden zur gleichen Zeit gemessen, wodurch sich die Messzeit stark verringert.

3) „Connes Vorteil“

Mit Hilfe eines HeNe-Lasers kann die Position des beweglichen Spiegels und damit der Gangunterschied sehr genau bestimmt werden, wodurch sich eine hohe Genauigkeit der Wellenlänge erreichen lässt.

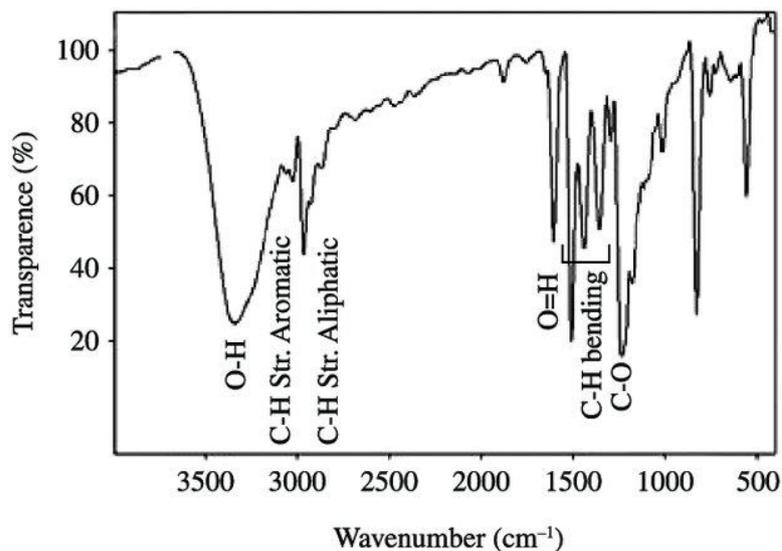
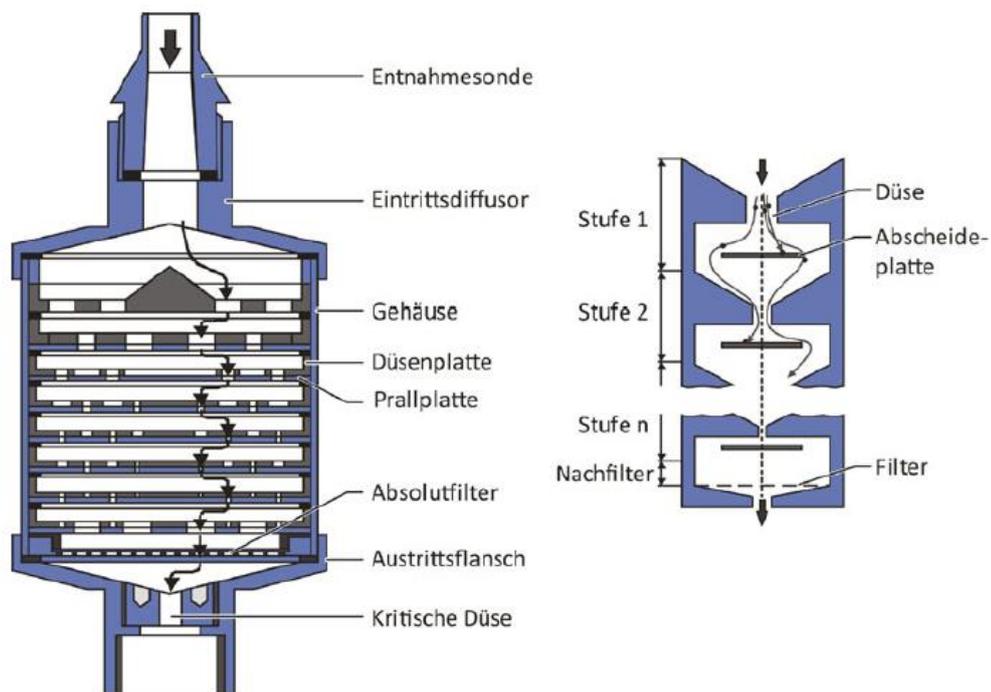


Abb. 4.27 Spektrum eines Fourier-Transformations-Infrarot Spektrometers [134].

Jedoch hat die FTIR auch Nachteile. Beispielsweise sind keine kontinuierlichen Messungen bei einer Wellenlänge möglich. Außerdem sind die Messungen bei Gemischen häufig nicht eindeutig, da sich die IR-Spektren überlappen können. Aus diesem Grund sind Referenzspektren zum Abgleich notwendig.

#### 4.4.2 Referenzmethoden zur Messung von Feinstaub

Ein Referenzverfahren zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung ist die gravimetrische Staubgehaltsbestimmung, wie beispielsweise der Kaskadenimpaktor, siehe Abbildung 4.28. Die Grundlage dieses Verfahrens bildet die isokinetische Entnahme eines staubbeladenen Teilgasvolumenstromes aus einem Hauptvolumenstrom. Dabei werden Partikel an Filtern mit unterschiedlicher Größe nacheinander abgeschieden. Sowohl die Probenentnahme als auch die Ermittlung der Korngrößenverteilung sind dabei über Normen geregelt, welche für eine standardisierte Vorgehensweise sorgen [103].



**Abb. 4.28** Links: Schematischer Aufbau eines Kaskadenimpaktors. Rechts: Detailansicht einzelner Stufen eines Kaskadenimpaktors [103].

Ein Kaskadenimpaktor besteht aus mehreren hintereinander geschalteten Düsen- und Prallplatten. Die dispergierte Lösung wird mit einem definierten Volumenstrom durch den Impaktor geleitet. Leichte Partikel können aufgrund ihrer geringen Trägheit die Prallplatte umströmen. Schwerere Teilchen werden an ihnen abgeschieden. Durch die Verkleinerung des Düsendurchmessers zwischen zwei Stufen wird die Geschwindigkeit des Volumenstroms erhöht, wodurch immer leichtere Partikel

abgeschieden werden. Die Düsen- und Prallplatten werden anschließend in jeder Stufe gewogen und darüber die Korngrößenverteilung bestimmt [103].

## 4.5 Kalibrierung von MOX-Halbleiter Gassensoren im temperaturzyklischen Betrieb

Bevor ein Sensor eingesetzt werden kann, muss er zunächst kalibriert werden. Das Ziel einer Kalibrierung ist es, das Sensorsignal den äußeren Bedingungen, also der vorhandenen Gasart- oder Gaskonzentration, zuzuordnen. Da es bezogen auf das Verhalten von MOX-Halbleiter Gassensoren keinen eindeutigen analytischen Zusammenhang zwischen Sensorsignal und Gasangebot gibt, werden in diesem Fall für diese Zuordnung Methoden der Signalverarbeitung verwendet. Das Prinzip einer Signalverarbeitung kann in fünf Schritte unterteilt werden:

- 4.5.1 Aufnahme von Trainingsdaten
- 4.5.2 Signalvorverarbeitung
- 4.5.3 Dimensionalitätsreduktion und Merkmalsextraktion
- 4.5.4 Mathematische Modellerstellung
- 4.5.5 Validierung

Die unterschiedlichen Gaskonzentrationen können dabei in einer Gasmischanlage (GMA, vgl. Kapitel 4.4) erzeugt werden.

### 4.5.1 Aufnahme von Trainingsdaten

Der erste Schritt für eine Kalibrierung stellt die Aufnahme von Trainingsdaten dar. Dabei werden unterschiedliche Konzentrationen eines Zielgases erzeugt und über den Sensor geführt. Zusätzlich können weitere Parameter, z.B. die relative Luftfeuchte, variiert werden. Um Querempfindlichkeiten durch andere Gase zu beseitigen, können zudem weitere Störgase in den Gasstrom gegeben werden. Die Gesamtheit aller Parameter wird als Gasprofil bezeichnet. Die Wahl des Konzentrationsbereichs für die Kalibrierung ist von dem jeweiligen Anwendungsfall abhängig. Ein Beispiel für ein Gasprofil ist in Abbildung 4.29 zu sehen. Dieses besteht aus einem Hintergrund (z.B. Normalluft, relative Luftfeuchte, H<sub>2</sub>, CO) sowie interferierenden und Ziel-VOCs.

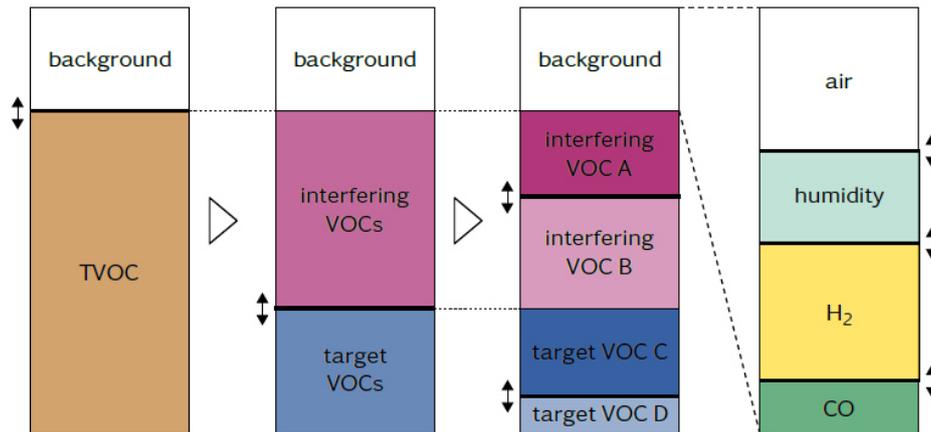


Abb. 4.29 Beispiel eines Gasprofils zur Aufnahme von Trainingsdaten [89].

Um eine ausreichende Statistik der Sensordaten zu erhalten, werden für jede Kombination aus Gaskonzentration, relativer Luftfeuchte und Störgaskombination je mehrere Zyklen aufgenommen. Dieser Datensatz wird als Trainingsdaten bezeichnet.

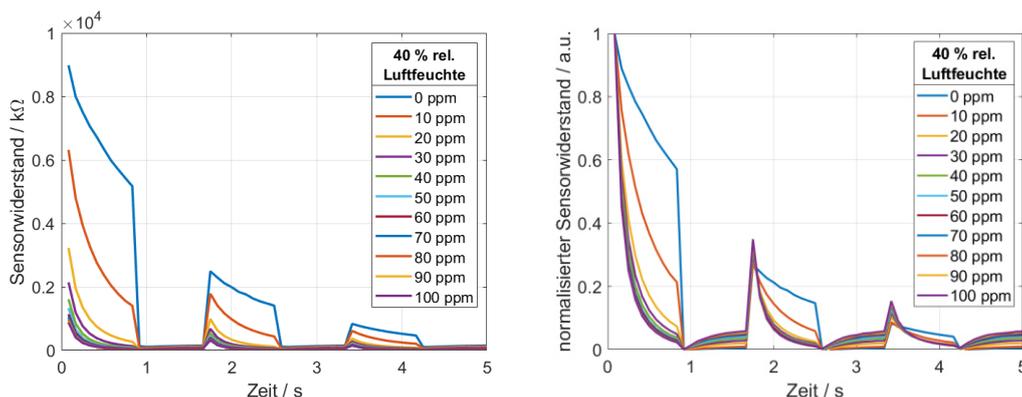
#### 4.5.2 Signalvorverarbeitung

MOX-Halbleiter Gassensoren haben die Eigenschaft, dass sich ihr Sensorsignal aufgrund von Veränderungen auf der Oberfläche infolge chemischer Reaktionen kontinuierlich ändert. Dieser Sensordrift kann sich durch eine Änderung der Grundlinie oder einer Änderung der Sensitivität widerspiegeln. Um diesem Prozess entgegenzuwirken, werden die aufgenommenen Trainingsdaten vorverarbeitet. Die Art der Vorverarbeitung ist dabei abhängig vom Anwendungsfall. Häufig werden die einzelnen Zyklen  $X_n$  normalisiert, d. h. auf Werte zwischen 0 und 1 abgebildet.

$$X_n \rightarrow \frac{X_n - \min(X_n)}{\max(X_n) - \min(X_n)} \quad (4.13)$$

Dabei wird davon ausgegangen, dass der Sensor innerhalb eines Zyklus nicht driftet, was aufgrund der kurzen Dauer eines Zyklus von wenigen Sekunden gerechtfertigt ist.

Abbildung 4.30 zeigt die durchschnittlichen Sensorsignale innerhalb eines Temperaturzyklus bei unterschiedlichen CO-Konzentrationen ohne (links) und mit Normalisierung (rechts). Zusätzlich zur Normalisierung können auch Filter zur Glättung der Daten eingesetzt werden, um so Rauschen zu unterdrücken. Diese sollten jedoch mit Bedacht eingesetzt werden, da sie möglicherweise Informationen über das Gasangebot unterdrücken.



**Abb. 4.30** Zyklusverlauf bei unterschiedlichen CO-Konzentrationen und einer relativen Luftfeuchte von 40 %. Links: Rohdaten. Rechts: Normalisiert.

### 4.5.3 Dimensionalitätsreduktion und Merkmalsextraktion

Zu viele Trainingspunkte innerhalb eines Zyklus sorgen dafür, dass Effekte des Overfittings begünstigt werden (vgl. Kapitel 4.5.4). Das bedeutet, dass das Modell Rauschen als Information fehlinterpretiert, sodass das erstellte Modell zwar sehr gute Vorhersagen für die Trainingsdaten liefert, jedoch bei unbekanntem Daten versagt. Besonders bei zyklischen Sensordaten sind benachbarte Datenpunkte stark korreliert und liefern daher nur wenig neue und relevante Informationen. Um diesen Effekt zu vermeiden, werden Methoden der Dimensionalitätsreduktion verwendet. Die Zahl der Merkmale kann als Dimensionalität des Datensatzes interpretiert werden. Um die Dimensionalität zu verkleinern, ohne dabei relevante Informationen zu verlieren, werden Methoden wie die Merkmalsextraktion eingesetzt.

Neben der Vermeidung von Overfitting haben Merkmale den Vorteil, dass sie physikalisch einfacher interpretiert werden können. So kann beispielsweise die Steigung des Leitwerts nach einem Temperatursprung direkt mit den Reaktionsraten einzelner Gase und deren Konzentration in Verbindung gebracht werden (vgl. Kapitel 4.1). Des Weiteren sind Speicher- und Rechenkapazität von low-cost Mikrocontrollern in der späteren Anwendung meist begrenzt, sodass ein Modell mit geringerer Komplexität notwendig ist.

Bei den Merkmalen handelt es sich im einfachsten Fall um Steigungen, Maxima, Minima oder Mittelwerte innerhalb von Intervallen in den jeweiligen Zyklen. Die Wahl der Lage des gewählten Intervalls ist wichtig für die Güte des späteren Modells und basiert meistens auf Erfahrungswerten. Auch anspruchsvollere Merkmale, wie Koeffizienten einer Fourier-Analyse oder Fitparameter von Funktionen, werden häufig verwendet [135]. Abbildung 4.31 zeigt beispielhaft eine Merkmalsextraktion mittels der Matlab Toolbox DAV<sup>3</sup>E [89].

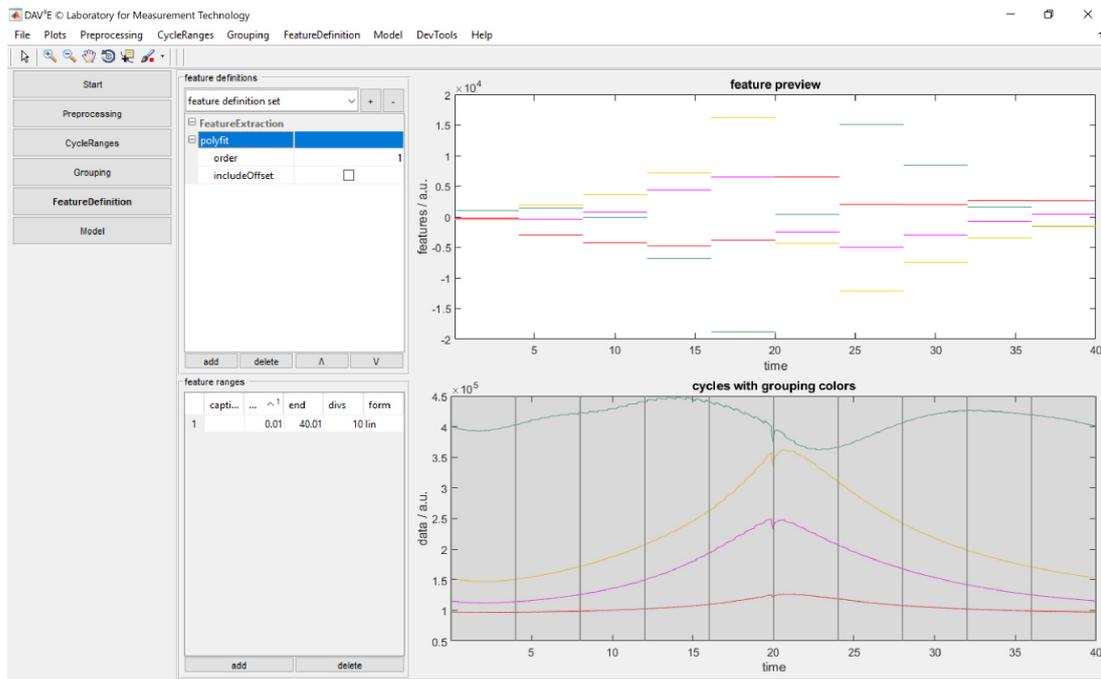
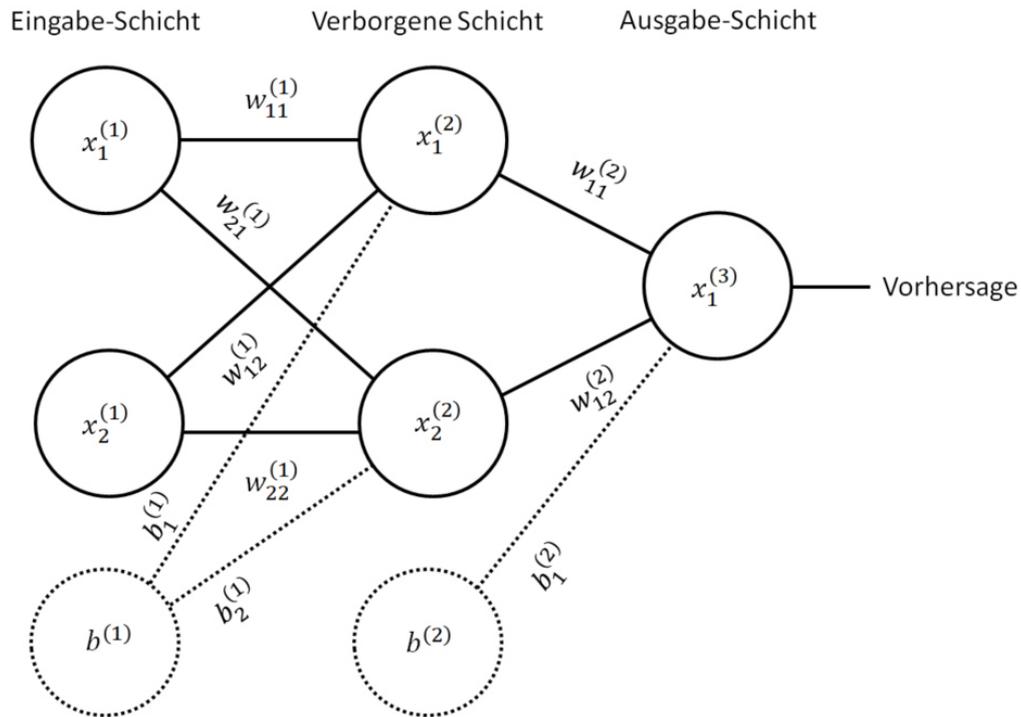


Abb. 4.31 Beispiel einer Merkmalsextraktion mittels der Matlab Toolbox DAV<sup>3</sup>E [89].

#### 4.5.4 Mathematische Modellerstellung

Es gibt verschiedene Methoden, die bestimmten Merkmale mit der jeweiligen Gaskonzentration zu verknüpfen. Die häufigsten sind Regressionsanalysen, wie die „Partial Least Square Regression“ (PLSR), Verfahren der multivariaten Statistik, wie der Diskriminanzanalyse (englisch: „Linear Discriminant Analysis“, kurz LDA) oder die Nutzung von Machine Learning Algorithmen, wie künstliche neuronale Netzen (englisch: „artificial neural network“, kurz ANN). Das Verfahren einer mathematischen Modellerstellung mithilfe von ANN soll nun vorgestellt werden.

Der Aufbau eines ANN ist einem menschlichen Gehirn nachempfunden. Es besteht aus mehreren Schichten  $i$ , in denen künstliche Neuronen angeordnet sind. Jede Schicht ist über eine Gewichtungsmatrix  $W$  und einen Biasvektor  $b$  (als Grundaktivität des Neurons) mit der folgenden Schicht verbunden. Zwischen der Ein- und Ausgabeschicht können beliebig viele verborgene Schichten angeordnet sein. Ein einfaches Beispiel bestehend aus Eingabeschicht, einer verborgenen Schicht mit zwei Neuronen und einer Ausgabeschicht ist in Abbildung 4.32 dargestellt [136].



**Abb. 4.32** Schematischer Aufbau eines ANN mit einer Eingabeschicht, einer verborgenen Schicht und einer Ausgabeschicht.

Im Falle der Kalibrierung besteht die Eingabeschicht aus den ermittelten Merkmalen und die Ausgabeschicht aus der jeweiligen Konzentration.

### Feed-Forward-Algorithmus

Im Feed-Forward Algorithmus werden Signale der Eingabeschicht mit verschiedenen Gewichtungsmatrizen  $M^{(i)}$  multipliziert, jeweils ein Biasvektor  $b^{(i)}$  addiert und das Ergebnis in eine Aktivierungsfunktion  $\sigma$  gegeben. Dabei bezeichnet der Index  $i$  die jeweilige Schichtnummer.

$$X^{(i+1)} = \sigma(M^{(i)} X^{(i)} + b^{(i)}) \quad (4.14)$$

Bei der Aktivierungsfunktion handelt es sich klassisch um eine Sigmoid-Funktion der Form

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (4.15)$$

Sie bildet Werte auf einen Bereich zwischen 0 und 1 ab. Zu Beginn werden alle Gewichtungsfaktoren und Biaswerte zufällig initialisiert [136].

### Supervised Learning – Gradient-Descent-Verfahren

Der große Vorteil von ANN ist, dass sie mit Hilfe von Algorithmen lernen können. Durch überwachte Lernverfahren (englisch: „supervised learning“) ist es möglich, die Gewichtungsfaktoren  $w^{(i)}$  und Biaswerte  $b^{(i)}$  jeder Schicht  $i$  schrittweise so anzupassen, dass sie eine gewünschte Beziehung zwischen Eingabe- und

Ausgabewerten erstellen. Eine Möglichkeit des supervised learnings ist die Backpropagation mit „gradient descent“ Verfahren. Nach Durchlaufen des Feed-Forward-Algorithmus wird die Vorhersage des mathematischen Modells  $o_j$  mit dem tatsächlichen Output  $y_j$  verglichen und die quadratische Abweichung für alle  $n$  Trainingsdaten in einer Kostenfunktion  $E$  aufsummiert.

$$E = \frac{1}{2} \sum (y_j - o_j)^2 \quad (4.16)$$

Die Kostenfunktion ist abhängig von allen Gewichtungsfaktoren  $w^{(i)}$  und den Biaswerten  $b^{(i)}$  der jeweils  $k$ -ten Schicht. Das Ziel des Gradientenverfahrens ist es, die Kostenfunktion zu minimieren, was durch Anpassung der Gewichtungsfaktoren und Biaswerten erreicht werden kann. Dazu wird berechnet, welchen Einfluss die einzelnen Gewichtungsfaktoren und Biaswerte auf die Kostenfunktion haben (Gl. 4.17) und diese auf dieser Grundlage angepasst (Gl. 4.18 und 4.19).

$$\frac{\partial E}{\partial w^{(j)}} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial E}{\partial b^{(j)}} = 0 \quad (4.17)$$

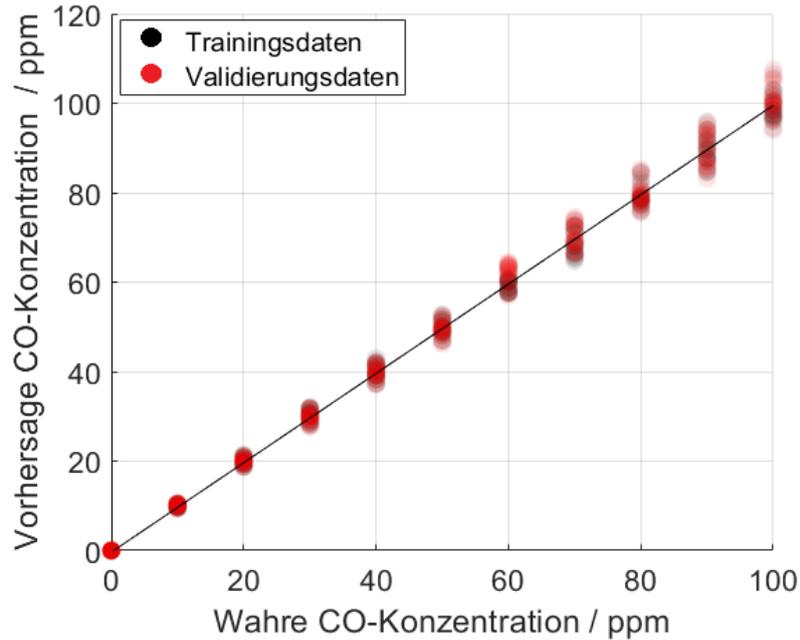
$$w^{(i)} \rightarrow w^{(i)} + l \cdot \Delta w^{(i)} \quad (4.18)$$

$$b^{(i)} \rightarrow b^{(i)} + l \cdot \Delta b^{(i)} \quad (4.19)$$

Die Anpassung erfolgt dabei schrittweise und abhängig von der Lernrate  $l$  des ANN. Nach jeder Anpassung durchläuft das System erneut den Feed-Forward-Algorithmus, berechnet eine Kostenfunktion und passt anschließend die Gewichtungsfaktoren und Biaswerte an [136].

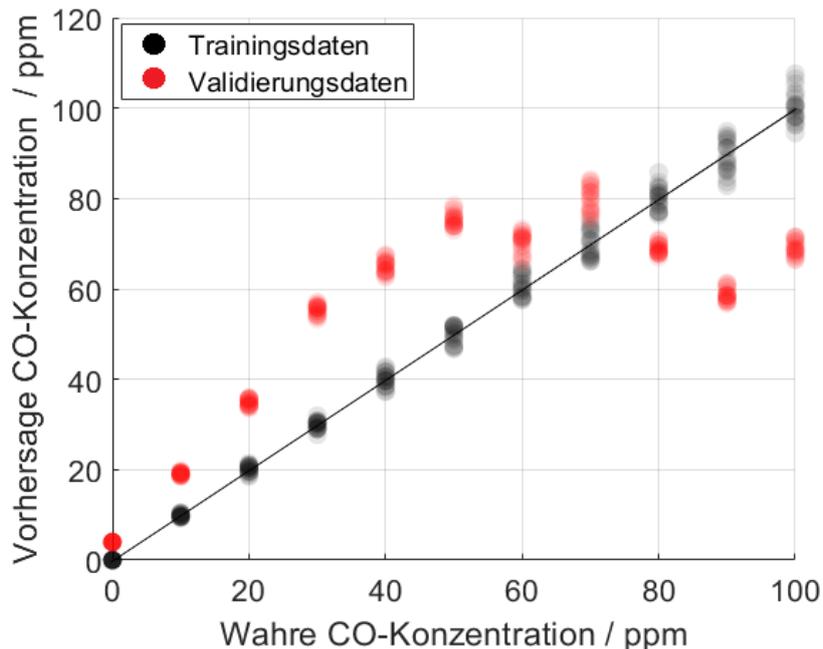
#### 4.5.5 Validierung und Overfitting

Typischerweise wird das erstellte mathematische Modell wie in Abbildung 4.33 gezeigt visualisiert. Dabei wird die Vorhersage des Modells gegen die wahre Konzentration aufgetragen. Je näher die Modellwerte auf der Winkelhalbierenden liegen, desto geringer ist die Abweichung zum wahren Wert. Datenpunkte, die Teil des Trainingsdatensatzes sind, werden schwarz und solche, die Teil des Validierungsdatensatzes sind, werden rot dargestellt.



**Abb. 4.33** Vorhersage des erstellten mathematischen Modells auf Basis eines ANN, bestehend aus zwei verborgenen Schichten mit je 10 Neuronen, gegen die wahre CO-Konzentration. Schwarze Punkte: Trainingsdaten. Rote Punkte: Validierungsdaten.

Ein häufiges Problem überwachter Lernverfahren stellt das sogenannte „Overfitting“ dar. Das Phänomen beschreibt die Überanpassung des mathematischen Modells an die vorhandenen Trainingsdaten. Dadurch werden diese zwar eindeutig abgebildet, jedoch versagt das Modell bei neuen und unbekanntem Daten. Während des Trainingsprozesses findet keine Verallgemeinerung statt, siehe Abbildung 4.34.



**Abb. 4.34** Overfitting am Beispiel der Kalibrierung eines Sensors auf verschiedene CO-Konzentrationen. Das mathematische Modell kann die Trainingsdaten gut vorhersagen, versagt jedoch bei Validierungsdaten.

Mit Hilfe von Validierungsverfahren können solche Overfitting-Effekte sichtbar gemacht werden. Eine häufige Validierungsmethode bildet die „k-fold cross-validation“. Dabei wird der vorhandene Datensatz in  $k$  zufällige, gleich große Teile unterteilt. Das Training basiert dann auf dem neuen Trainingsdatensatz mit  $k - 1$  Teilen und wird auf den letzten Teil, den Validierungsdatsatz, angewendet. Durch Bestimmung der mittleren quadratischen Abweichung (englisch: „root-mean-square error“, kurz RMSE) kann so ein Trainingsfehler und ein Validierungsfehler berechnet werden. Ist der Validierungsfehler größer als der Trainingsfehler, werden Overfitting-Effekte beobachtet. In diesem Fall müssen andere Temperaturzyklen gewählt oder andere Merkmale bestimmt werden. Typische Werte für  $k$  sind 3, 5 und 10 [137]. Eine andere Validierungsmöglichkeit ist die gruppenbasierte Validierung. Dabei werden die Daten einer Konzentration aus dem Trainingsdatensatz entfernt und als Validierungsdaten verwendet.

## 4.6 Zwischenfazit

Zu einem umfassenden Bild über Luftqualität gehört zum einen deklaratives und konzeptuelles Wissen über die Existenz verschiedener Luftschadstoffe, deren Grenzwerte, gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen, Quellen und Messprinzipien. Zum anderen ist es nach Konzepten der Umweltbildung wichtig, prozedurales Wissen über Handlungsempfehlungen zur Erhaltung einer guten Luftqualität zu vermitteln. Schüler müssen dazu befähigt werden, dieses Wissen auf ihr persönliches Umfeld zu übertragen. Dazu gehört einerseits das Bewusstsein darüber, dass von Luftschadstoffen wie VOCs oder Feinstaub auch dann eine Gefahr für die Gesundheit ausgeht, wenn diese mit menschlichen Sinnen nicht wahrgenommen werden können, und andererseits das Wissen, dass auch eine indirekte Bestimmung der Innenraumluftqualität durch die Messung von  $\text{CO}_2$  als Indikatorgas möglich ist.

Zur objektiven Bestimmung dieser Schadstoffe und Indikatorgase eignen sich Gas- und Feinstaubsensoren. Um Messergebnisse mit solchen Sensoren kritisch einordnen zu können, ist es wichtig, auch deren Messprinzipien zu erklären. Dadurch verlieren Sensoren ihren „Black-Box-Charakter“ und Schüler sind in der Lage, Kausalbeziehungen zwischen Rohsignal und Sensorreaktion herzustellen. Jedoch ist gerade das Verständnis der Funktionsweise von MOX-Halbleiter Gassensoren zur Detektion von VOCs für Schüler herausfordernd, da Konzepte der Halbleiter- und Festkörperphysik nicht oder nur in geringem Maße vorhanden sind. Um die Gefahr einer Überforderung der Schüler zu verringern, ist es daher sinnvoll, die

Sensorprinzipien auf die wesentlichen Punkte zu reduzieren. Im Falle von MOX-Halbleiter Gassensoren sollte ein Kompromiss zwischen der korrekten physikalischen Beschreibung der Prozesse auf der Sensoroberfläche auf der Grundlage des Korn-Korn-Grenzenmodells und einem anschaulichen, intuitiven Bild geschaffen werden. Zum Verständnis der Funktionsweise eines CO<sub>2</sub>-Sensors ist vor allem das Wissen über wellenlängenabhängige Lichtabsorption entscheidend. Bezogen auf die Funktionsweise eines Feinstaubensors ist es wichtig, das Konzept der Lichtstreuung an kleinen Partikeln zu vermitteln. Weiterhin sollte den Schülern gezeigt werden, wie solche Sensoren kalibriert werden können, um dadurch eine Verbindung zwischen Rohsignal und Gas- bzw. Feinstaubkonzentration herzustellen. Dieses Wissen kann dann die Grundlage für die Durchführung eigener Messungen mit Sensoren und die kritische Beurteilung der Messdaten liefern. Dabei sollten die Untersuchungen möglichst einen Alltagsbezug haben, damit daraus folgende Erkenntnisse zur Erhaltung einer guten Luftqualität auch einen direkten persönlichen Bezug haben.

Im nächsten Kapitel wird daher zunächst ein vereinfachtes Sensormodell zur Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors entwickelt sowie 3 Lernmodule für Schüler vorgestellt, die sich mit der Funktionsweise, Kalibrierung und Aufnahme von Messdaten mit verschiedenen Sensortypen befassen.

# 5 Umweltsensorik als Experimente in Schülerlaboren

Neben dem klassischen Unterricht in der Schule bieten Schülerlabore für Schulklassen die Möglichkeit Experimente aus unterschiedlichsten Themengebieten in außerschulischen Einrichtungen durchzuführen. Diese können thematisch sowohl innerhalb des Lehrplans als auch außerhalb davon – als Zusatzangebot – angesiedelt sein. Des Weiteren fördern Schülerforschungszentren besonders interessierte Schüler, indem Ressourcen für die Entwicklung und Bearbeitung eigener Forschungsfragen zur Verfügung gestellt werden, um so beispielsweise an Forschungswettbewerben wie „Jugend forscht“ teilzunehmen.

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Bedeutung des Experiments als didaktisches Mittel zur Vermittlung von Wissen im naturwissenschaftlichen Bereich und auf unterschiedliche Lernformen, wie formales, non-formales und informelles Lernen eingegangen. Anschließend wird die Rolle von Schülerlaboren und Schülerforschungszentren bei der Bildung von Schülern im Rahmen von schulischen und außerschulischen Aktivitäten erörtert. Danach wird im Speziellen das Thema Umweltsensorik für Schüler im Kontext des Lehrplans der Sekundarstufe I und II im Saarland und in Rheinland-Pfalz behandelt. Innerhalb dieses Themenkomplexes werden drei Lernmodule vorgestellt, die Schülern der Klassenstufe 7 - 13 in computergestützten Selbstlernkursen die prinzipielle Funktionsweise und Anwendung von Gas- und Feinstaubsensoren vermitteln. Das erste Lernmodul fokussiert sich dabei auf die Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors. Zu diesem Zweck wurde ein vereinfachtes Sensormodell entwickelt, welches induktiv anhand von experimentellen Beobachtungen und der qualitativen Unterscheidung verschiedener Substanzen innerhalb des Lernmoduls erläutert wird. Das zweite Lernmodul behandelt die quantitative Bestimmung von Konzentrationen eines Stoffes. Zu diesem Zweck wird das zuvor erarbeitete vereinfachte Sensormodell um den temperaturzyklischen Betrieb erweitert, um so eine Verbesserung der Sensitivität zu erreichen. Anschließend kalibrieren die Schüler einen MOX-Halbleiter Gassensor auf verschiedene Ethanol-Konzentrationen, indem sie eine Kalibrierungsroutine, bestehend aus der Aufnahme von Trainingsdaten, einer Merkmalsextraktion und der Erstellung eines

mathematischen Modells mit Hilfe von Machine Learning durchführen. Im dritten Lernmodul führen Schüler in unterschiedlichen Lernstationen praktische Messungen der Innenraumluf(-qualität) mit Hilfe von MOX-Halbleiter Gassensoren, NDIR CO<sub>2</sub>-Sensoren und auf Laserstreuung basierenden Feinstaubsensoren durch. Dabei wird unter anderem auf mögliche gesundheitliche Folgen von Luftschadstoffen und deren Quellen, sowie Strategien zur Erhaltung einer guten Innenraumlufqualität eingegangen. Zum Schluss des Kapitels wird auf die Erprobung der Lernmodule und Erfahrungen von Lehrern und Schülern eingegangen sowie beispielhaft gezeigt, wie die Lernmodule im Rahmen eines verpflichtenden MINT-Praktikums einer gymnasialen Mittelstufe eingesetzt werden können.

## 5.1 Durchführung von Experimenten als Teil des naturwissenschaftlichen Unterrichts

Die Bedeutung von Experimenten (lateinisch „experimentum“ = „das in Erfahrung Gebrachte“) im (natur-)wissenschaftlichen Erkenntnisprozess hat sich im Laufe der Geschichte verändert. Vor dem 17. Jahrhundert herrschte die Ansicht, dass der menschliche Verstand durch alleiniges Nachdenken in der Lage sei, Gesetzmäßigkeiten in der Natur nachzuvollziehen und zu untersuchen [138]. Ab dem 17. Jahrhundert, zu Zeiten von Galileo Galilei, nahm das Experiment als Mittel des wissenschaftlichen Forschungsprozesses zur Untersuchung wissenschaftlicher Theorien eine immer größere Rolle ein. Es erfüllt den Zweck, reale Problemstellungen durch Abstraktion zu idealisieren und soweit zu vereinfachen, dass diese mit experimentellen und mathematischen Mitteln untersucht werden können [139]. Experimente können sowohl dazu eingesetzt werden, eine bestehende Hypothese zu überprüfen als auch unbekannte Situationen hervorzurufen, dessen Beobachtungen neue wissenschaftliche Erkenntnisse liefern kann. Nach Lienert & Raatz [140] muss ein Experiment verschiedene Kriterien erfüllen, um aussagekräftig zu sein. Zu diesen gehören unter anderem die Objektivität und Reliabilität eines Experiments. Diese Konzepte besagen, dass die Ergebnisse unabhängig von der Person sein müssen, die das Experiment durchführt, und dass das Experiment wiederholbar sein muss.

Neben der Überprüfung theoretischer Überlegungen und dem Gewinn neuen Wissens hat das Experiment auch aus didaktischer Sicht einen hohen Stellenwert. Nach Schwab [141], Hurd [142] und Lunetta & Tamir [143] führt die direkte Auseinandersetzung mit Experimenten zu einem größeren Lernerfolg und besseren Verständnis des behandelten Themengebiets. Aus heutiger Sicht zählt das Experimentieren zu einem der wichtigsten Bestandteile des naturwissenschaftlichen

Unterrichts und hat verschiedene Funktionen und Ziele [144]. Dabei wird zwischen fachimmanenten, psychologischen und pädagogischen Zielen unterschieden [145]:

### **Fachimmanente Ziele**

- Experiment als zentrales Element der naturwissenschaftlichen Methodik zur Darstellung der Quantifizierbarkeit der Natur
- Experiment als Vermittlungsmedium für naturwissenschaftliche Fakten, Theorien und Modelle
- Experimentieren zum Aufbau von fachspezifischer Handlungskompetenz
- Experiment zur Operationalisierung von Begriffen und Größen

### **Psychologische Ziele**

Steigerung der Motivation und Lerneffektivität durch

- anschauliche Phänomene – Übertragung auf den Alltag
- „mehrkanaligen“ Zugang – theoretische Überlegungen werden durch praktische Versuche ergänzt („Lernen durch Tun“)
- Selbsttätigkeit und Verantwortung
- Individualisierung im Erkenntnisgang
- Förderung des Vertrauens in eigene Fähigkeiten

### **Pädagogische Ziele**

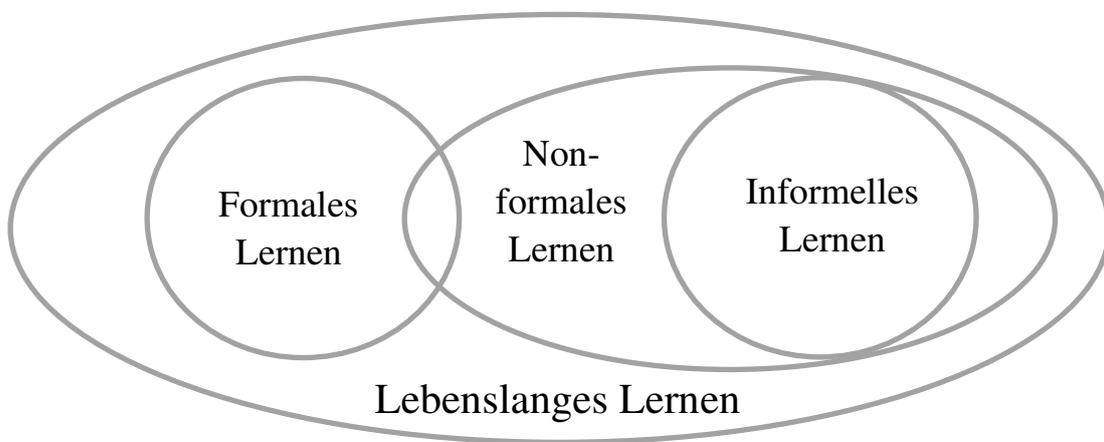
Experimentieren als Ausgangspunkt und Mittel für

- das Lernen rationaler/logischer Argumentation
- Erziehung zur Sorgfalt, Genauigkeit und Geduld
- Schulung der Beobachtungsfähigkeit
- Entwicklung sozialer Komponenten bei der Arbeit in Gruppen (Teamarbeit, Dialogfähigkeit, Arbeitsteilung, ...)
- Erziehung von Kritik- und Reflexionsfähigkeit

Zusammenfassend fördern Experimente das Verständnis für naturwissenschaftliche Phänomene und Probleme und sind als Teil des Unterrichts von großer Bedeutung für den Lernerfolg. Jedoch sind diese auch immer mit hohem zeitlichem und materiellem Aufwand für Lehrer und Schulen verbunden, weshalb die Vielfalt der naturwissenschaftlichen Experimente in der Schule begrenzt ist. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren immer mehr Schülerlabore und Schülerforschungszentren ins Leben gerufen in denen einzelne Schüler oder ganze Klassen Experimente durchführen können.

## 5.2 Formales, non-formales und informelles Lernen

Lernen ist nicht nur auf formale Bildungseinrichtungen, wie Schule oder Universität begrenzt. Im Sinne des Konzepts des „Lebenslangen Lernens“ kann es überall und jederzeit, unabhängig von Bildungsinstitutionen stattfinden. Dabei wird zwischen drei Lernformen unterschieden, deren Übergänge fließend sind, und die daher bis heute noch nicht einheitlich definiert sind, siehe Abbildung 5.1. Dazu gehören das „formale Lernen“, das „non-formale Lernen“ und das „informelle Lernen“. Diese Formen werden im Folgenden diskutiert.



**Abb. 5.1** Formales, non-formales und informelles Lernen als Teil des lebenslangen Lernens. Die Übergänge sind fließend. Non-formales Lernen ist kann Teile des formalen und informellen Lernens enthalten.

### 5.2.1 Formales Lernen

Nach der Definition der Kommission der europäischen Gemeinschaften findet formales Lernen „... in einer organisierten und strukturierten, speziell dem Lernen dienenden Umgebung statt und führt typischerweise zum Erwerb einer Qualifikation, in der Regel in Form eines Zeugnisses oder eines Befähigungsnachweises. Hierzu gehören die Systeme der allgemeinen Bildung, der beruflichen Erstausbildung und der Hochschulbildung“ [146]. Nach Dohmen [147] ist formales Lernen dadurch gekennzeichnet, dass es planmäßig strukturiert ist, in einer Bildungseinrichtung stattfindet und zu zertifizierten Ergebnissen führt. Livingstone [148] bezeichnet formales Lernen als eine organisierte Bildung, wie die formale Schulbildung und Weiterbildung. Die formale Schulbildung sei ein altersgruppenmäßig gestaffeltes und eine hierarchische Ordnung aufweisendes System. Es dient als Grundlage zur Bescheinigung der Wissenskompetenz. Ein wichtiger Aspekt des formalen Lernens ist, dass der Lernende die Lernsituation bewusst als eine auf didaktisches und

pädagogisches Handeln basierte Situation wahrnimmt. Der Lernende ist bezogen auf die Lernziele und den Lerninhalt aufgeklärt. Weiterhin beinhaltet es nach Holzapfel [149] eine Wirkungskontrolle.

### 5.2.2 Non-formales Lernen

Non-formales Lernen (manchmal auch nichtformales Lernen) beschreibt Lernprozesse, die zwar systematisch und geplant stattfinden, aber nicht mit einem Abschluss oder einem Zertifikat verbunden sind. Die Kommission der europäischen Gemeinschaften definiert non-formales Lernen als „Lernen, das weder in Einrichtungen allgemeiner oder beruflicher Bildung stattfindet noch zur Zertifizierung im Sinne einer Bildungsberechtigung führt. Non-formales Lernen ist aus der Sicht des Lernenden intentional und beinhaltet strukturierte Lernziele, Lernzeiten sowie Lernförderung.“ [146]. Nach Dohmen [147] ist es ein Sammelbegriff für alle Lernformen, die außerhalb von formalisierten pädagogischen Einrichtungen stattfinden, und beinhaltet damit auch Aspekte des informellen Lernens. Im Gegensatz zu formalem Lernen geschieht non-formales Lernen freiwillig und bezieht die Bedürfnisse der Lernenden ein. Beispiele dafür sind Nachhilfe, Förderkurse, Freizeitangebote oder strukturiertes Online-Lernen.

### 5.2.3 Informelles Lernen

Nach einer Definition von Marsick et al. [14] umfasst informelles Lernen das beiläufige Lernen, das unbewusst stattfindet, sowie ein bewusstes und absichtliches Lernen außerhalb pädagogischer Einrichtungen. Es sei ein Instrument zum Erreichen eines Zieles, welches nicht bloß das Erlangen von Wissen in den Vordergrund stellt. Vielmehr sei es die Suche nach Lösungen von Problemen, die aus dem außerschulischen Umfeld kommen.

Die Kommission der europäischen Gemeinschaft beschreibt es als „Lernen, das im Alltag, am Arbeitsplatz, im Familienkreis oder in der Freizeit stattfindet. Es ist in Bezug auf Lernziele, Lernzeit oder Lernförderung nicht strukturiert und führt üblicherweise nicht zur Zertifizierung. Informelles Lernen kann zielgerichtet sein, ist jedoch in den meisten Fällen nichtintentional, also beiläufig oder nebenher geschehend.“ [146]. Nach Dohmen [13] und Tully et al. [150] ist informelles Lernen implizit, nicht geplant und findet außerhalb von Bildungseinrichtungen statt.

## 5.3 Schülerlabore und Schülerforschungszentren

Nach einer Definition von Dähnhardt et al. [16] bezeichnen Schülerlabore „außerschulische Einrichtungen, in denen sich Schülerinnen und Schüler durch eigenes Experimentieren im Rahmen schulischer Veranstaltungen mit modernen Naturwissenschaften, Ingenieurwissenschaften, Mathematik und Informationstechnologie auseinandersetzen können. Dazu zählen Angebote in Universitäten, Fachhochschulen, Forschungseinrichtungen, Museen, Science Centren, Technologie- und Gründerzentren und der Industrie, die in geeigneten Laboren Begegnungen mit diesen Feldern ermöglichen. Die Experimentiertage finden regelmäßig, täglich oder wöchentlich, statt.“. Ein charakteristisches Merkmal von Schülerlaboren ist, dass in einer anregenden wissenschaftlichen Lernumgebung ermöglicht wird, in betreuten Kleingruppen über eine längere Zeit unabhängig vom schulischen 45-Minuten-Rhythmus selbstständig zu experimentieren [139]. Dabei bieten diese oft Rahmenbedingungen, die für Schulen nur mit hohem Aufwand zu realisieren sind. Schülerlabore werden in der Regel von ganzen Klassenverbänden besucht, die vorgegebene Experimente an einem einzelnen Termin absolvieren.

Im Gegensatz zur Arbeit in Schülerlaboren, in denen ganze Klassen experimentieren, können sich einzelne, besonders interessierte Schüler oder Schülergruppen zusätzlich in Schülerforschungszentren engagieren und dort über einen längeren Zeitraum an eigenständigen Fragestellungen forschen. Dies geschieht beispielsweise durch die Entwicklung von eigenen Studien im Rahmen des Wettbewerbs „Jugend forscht“. Unterstützt werden sie dabei von einer Aufsichtsperson, die bei der Beantwortung der Fragestellung auf Wunsch beratend zur Seite steht. Der Schwierigkeitsgrad, die Geschwindigkeit und das Thema der Forschung sind nicht vorgegeben und können frei gewählt werden [17].

Experimente in Schülerlaboren können als Teil des naturwissenschaftlichen Unterrichts je nach Aufbau sowohl Kriterien des formalen als auch des non-formalen und informellen Lernens erfüllen. Einerseits sind die Lernziele in der Regel klar definiert und die Versuche planmäßig strukturiert, was nur wenig Spielraum für eigene Ideen der Schüler zulässt. Ebenso ist es möglich, das in Schülerlaborversuchen erworbene Wissen als Teil von alternativen Leistungsnachweisen zu überprüfen und zu bescheinigen. Andererseits ist es genau so möglich, Schülerlabore auch außerhalb des Lehrplans auf freiwilliger Basis als Teil von Veranstaltungen, wie dem „Tag der offenen Tür“ oder dem „Tag der Technik“, durchzuführen.

Im Gegensatz dazu erfüllt die Entwicklung von (Umwelt-) Studien in Schülerforschungszentren hauptsächlich Kriterien des non-formalen und informellen Lernens. Durch die eigenständige Entwicklung einer Fragestellung abseits des schulischen Lehrplans existiert zunächst kein definiertes Lernziel. Dieses entwickelt sich erst im Laufe der Studie und bezieht dann auch die Bedürfnisse der Schüler ein. Die Durchführung ist dabei nicht nur auf die Bildungseinrichtung beschränkt, sondern kann vor allem durch die Nutzung von Smartphones/Tablets/PCs als Messinstrument quasi überall stattfinden. Durch die Bearbeitung der Fragestellung lernen Schüler nicht nur ein vorgegebenes Lernziel, sondern können eine Kompetenz zur Lösung von Problemen entwickeln.



**Abb. 5.2** Schülerlabor-Atlas des Verbands Lernort Labor (LeLa) [151]. Blaue Vierecke: Mitglieder im LeLa-Verband, grüne Vierecke: Organisation zur Koordination eines regionalen oder überregionalem Schülerlabor-Netzwerks. Weiße Kreise: keine Mitglieder im LeLa- Verband.

Seit den 1990er Jahren haben sich Schülerlabore als ein neuer außerschulischer Lernort etabliert [139]. Schülerlabore und Schülerforschungszentren aus Deutschland, Österreich und der Schweiz können sich im Dachverband LernortLabor (LeLa) – Bundesverband der Schülerlabore e.V. organisieren. Dieser wurde im Jahr 2010 ins Leben gerufen und zielt darauf ab, die vielfältige Schülerlabore-Szene im deutschsprachigen Raum zu koordinieren. Bis zum Jahr 2020 (Stand Juni 2020) sind bereits 405 Schülerlabore in einem Schülerlabor-Atlas gelistet, der Informationen zu

jedem registrierten Schülerlabor und Schülerforschungszentrum enthält und auf der LeLa-Homepage abgerufen werden kann, siehe Abbildung 5.2. Die Themengebiete, die diese Einrichtungen anbieten, umfassen die Bereiche Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik, Physik, Chemie, Biologie, Geowissenschaften, Ingenieurwissenschaften, Medizin, Sachunterricht, Geisteswissenschaften und Sonstige. Der Verband ist eigenfinanziert und erhält keine Bezuschussungen von Forschungsgeldern [151].

## 5.4 Umweltsensorik für Schüler

Der Erfolg der sozialen Bewegung „Fridays for Future“ (FFF) zeigt, dass sich Jugendliche mehr denn je für die Themen Klima und Umweltschutz interessieren. Dennoch werden diese Themen in Zusammenhang mit der Messung von Umweltparametern mittels Sensoren meist nur kurz oder gar nicht innerhalb des Unterrichts in Schulen bearbeitet. Im Saarland haben Schüler die Möglichkeit, das Thema Sensorik als Wahlfach im naturwissenschaftlichen Zweig der Klassenstufe 9 im Fachbereich Physik zu besuchen [152]. In diesem steht der Aufbau einfacher Sensorschaltungen im Vordergrund. In Rheinland-Pfalz beinhaltet der Lehrplan für den Fachbereich Physik, der zum Schuljahr 2014/15 in Kraft getreten ist, für Schüler der Sekundarstufe I (Klassenstufe 7 – 9/10) ein Themenfeld bezüglich Sensorik. Dieses wird als „Themenfeld 11: Sensoren im Alltag – physikalische Grundprinzipien alltäglicher Technik“ bezeichnet und schließt konzeptionell an den Lehrplan des Faches Naturwissenschaften in der Orientierungsstufe an. Der Schwerpunkt bezieht sich dabei auf die Auseinandersetzung mit Prinzipien der Signalerzeugung von Sensoren auf Basis der zu Grunde liegenden Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung. Es sollen sowohl die Funktionsweise untersucht als auch die dahinterstehenden physikalischen Grundprinzipien erläutert werden. Dabei ist es der Lehrkraft überlassen, welche Sensortypen im Speziellen untersucht werden. Weiterhin seien die Fachbegriffe „Signal“, „Wandlung“ und „Sensor“ zu verwenden und die folgenden Kompetenzen zu fördern [153]:

Die Schüler...

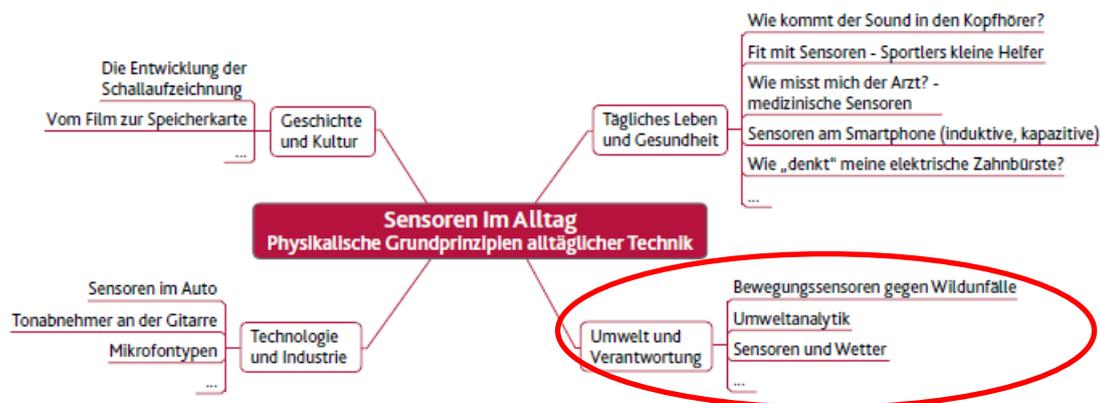
- ... nutzen Wissen über die zu Grunde liegenden Wechselwirkungen, um Prinzipien bei der Signalaufnahme/-übertragung/-ausgabe zu beschreiben.
- ... führen Experimente mit Sensoren durch und werten sie aus.
- ... erschließen die Entwicklung der Signalwandlung und an einem geeigneten Beispiel die physikalischen Hintergründe.

- ... recherchieren zur Funktionsweise von Sensoren, dokumentieren und präsentieren die Ergebnisse der Recherche adressatengerecht.

Dabei wird jedoch meist nur auf die Funktionsweise von Sensoren zur Messung der Temperatur (NTC-Sensoren oder Pt100) oder „Sensoren im oder am Auto“ wie den Regensensor eingegangen.

In Abbildung 5.3 sind beispielhaft bildungsrelevante Kontexte und konkrete Fragestellungen aus vier lebensweltlichen Bereichen, die zentralen Bedürfnisfeldern von Menschen entsprechen, als Mindmap gezeigt. Diese stellen laut rheinland-pfälzischen Lehrplan Vorschläge dar, wie das Themenfeld Sensorik kontextuell in den Unterricht angebunden werden kann.

#### Erschließung des Themenfeldes durch Kontextorientierung:



**Abb. 5.3** Erschließung des Themengebiets „Sensoren im Alltag – Physikalische Grundprinzipien alltäglicher Technik“ durch Kontextorientierung, (modifiziert) nach [153].

Um einen Zusammenhang zwischen den Themen Umwelt, Verantwortung, tägliches Leben, Gesundheit, Technologie und Sensorik im Sinne des kontextorientierten Lernens herzustellen, bietet sich das Thema Umweltsensorik an. Die im Folgenden präsentierten Lernmodule sowie die Unterstützung von Schülern bei der Erstellung von eigenen Umweltstudien mit Gas- und Feinstaubsensoren lassen sich aufgrund dessen als außerschulisches Angebot in den Unterricht integrieren, da diese die im Lehrplan gestellten Ansprüche erfüllen. Im Detail:

#### Lernmodul 1 – Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors (vgl. Kapitel 5.6.1)

- Erläuterung der Funktionsweise und des physikalischen Grundprinzips eines MOX-Halbleiter Gassensors.
- Erklärung der Prinzipien der Signalerzeugung auf Basis der zu Grunde liegenden Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung (Einfluss von Gasen auf den elektrischen Widerstand).

## **Lernmodul 2 – Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors (vgl. Kapitel 5.6.2)**

- Weiterführung des physikalischen Grundprinzips von MOX-Halbleiter Gassensoren.
- Verwendung der Fachbegriffe „Signal“, „Wandlung“ und „Sensor“.
- Erläuterung des Prinzips der Signalwandlung anhand der Durchführung einer Kalibrierungsroutine bestehend aus der Aufnahme von Trainingsdaten, Merkmalsextraktion sowie mathematische Modellerstellung und -validierung.

## **Lernmodul 3 – Umweltmesstechnik (vgl. Kapitel 5.6.3)**

- Erläuterung der Funktionsweise und des physikalischen Grundprinzips von nicht-dispersiven CO<sub>2</sub>-Sensoren und auf Lichtstreuung basierenden Feinstaubsensoren.
- Durchführung von Experimenten mit unmittelbarem Alltagsbezug.
- Kontextorientierter Bezug auf die Themengebiete Umwelt und Verantwortung

Weiterhin bietet vor allem die Entwicklung von Umweltstudien (vgl. Kapitel 6.2) einen kontextorientierten Bezug zu aktuellen Themen.

# 5.5 Entwicklung eines vereinfachten Sensormodells – qualitative und quantitative Beschreibung

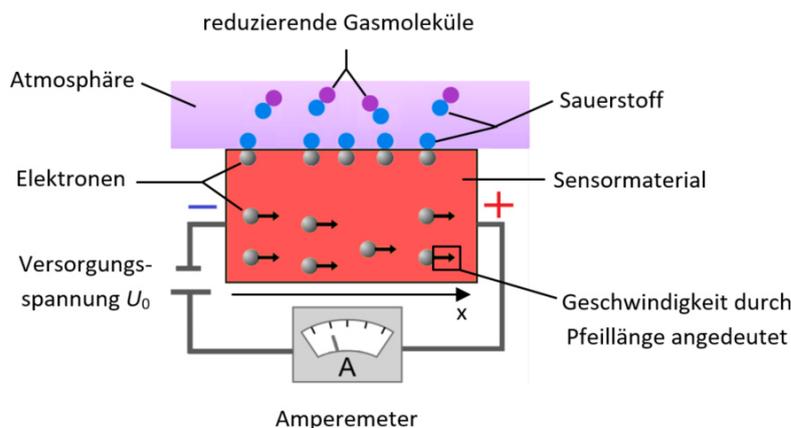
Die Behandlung von MOX-Halbleiter Gassensoren in der Mittelstufe steht vor der Herausforderung, dass Konzepte der Halbleiterphysik einschließlich des Bändermodells nicht vorhanden sind und auch nicht ohne große Anstrengungen erarbeitet werden können. Darüber hinaus wohnt der Betrachtung von Korn-Korn-Übergängen und des Zusammenhanges der Leitfähigkeit mit an Elektronen mehr oder weniger verarmten Raumladungszonen ein hohes Abstraktionsniveau inne. Um den Schülern dennoch die wichtigsten Faktoren zur Beschreibung der Funktionsweise von MOX-Halbleiter Gassensoren näherzubringen, wurde ein vereinfachtes Sensormodell entwickelt, welches als Grundlage für die im Folgenden beschriebenen Lernmodule dient [154]. Das dem Lern- und Wissensstand von Schülerinnen und Schülern der Mittelstufe angepasste Sensormodell soll (1) die ablaufenden Prozesse auf der Sensoroberfläche mit und ohne reduzierendes Gas als Kernpunkt der Sensorreaktion und (2) das Sensorverhalten bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen möglichst adäquat darstellen. Dies beinhaltet zudem die Vorhersage des qualitativen Verlaufs des elektrischen Widerstands  $R$  bzw. des elektrischen Leitwerts  $G$  in Abhängigkeit der

Temperatur des Sensormaterials. Dieses wird in Lernmodul 1 (vgl. Kapitel 5.6.1) schrittweise eingeführt, sowie in Lernmodul 2 (vgl. Kapitel 5.6.2) erneut aufgegriffen und um dynamische Prozesse während eines Temperaturwechsels erweitert [155].

Im Folgenden werden zunächst die Komponenten des vereinfachten Sensormodells beschrieben. Anschließend wird schrittweise der Einfluss der Temperatur ohne Atmosphäre (a), in Anwesenheit einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre (b), und in Anwesenheit einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre inklusive eines reduzierenden Gases (c) beschrieben. Danach wird auf dynamische Prozesse auf der Sensoroberfläche während eines Temperatursprungs eingegangen. Zum Schluss wird das vereinfachte Sensormodell mit dem physikalischen Sensormodell (vgl. Kapitel 4.1.1) verglichen sowie dessen Leistungen und Grenzen erörtert.

### 5.5.1 Komponenten des Sensormodells, Modellannahmen und -vorhersagen

In Abbildung 5.4 ist der schematische Aufbau des entwickelten Sensormodells gezeigt. Elektronen, dargestellt durch graue Punkte, bewegen sich gemäß des Drude-Modells [156] aufgrund einer konstanten elektrischen Spannung  $U_0$  als freie Ladungsträger innerhalb des Sensormaterials mit einer Querschnittsfläche  $A$ . Ihre gerichtete Bewegung in  $x$ -Richtung wird durch Pfeile angedeutet, wobei die Pfeillänge proportional zu ihrer Geschwindigkeit ist. Oberhalb des Sensors ist die umliegende Atmosphäre, in der Sauerstoff durch blaue Punkte und reduzierende Gasmoleküle durch violette Punkte angedeutet werden. Vereinfachend wird nicht zwischen atomarem (O) und molekularem ( $O_2$ ) Sauerstoff unterschieden, ebenso werden die Gasmoleküle quasi atomar (unteilbar) betrachtet. Über ein Amperemeter wird die Stromstärke angedeutet.



**Abb. 5.4** Schematischer Aufbau und Komponenten eines vereinfachten Funktionsmodells von MOX-Halbleiter Gassensoren.

Mit Einführung der Ladungsdichte  $\rho = \frac{Q}{V}$ , wobei  $Q$  die Gesamtladung und  $V = A \cdot x$  das Volumen des Halbleiters bezeichnen, ergibt sich für den elektrischen Strom  $I$  bzw. für den elektrischen Leitwert  $G$  der Zusammenhang

$$G \sim I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(\rho \cdot A \cdot x)}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot A \cdot v = \frac{Q}{x} \cdot v \quad (5.1)$$

Unter Annahme einer homogenen Ladungsverteilung  $\frac{Q}{x} = \text{const.}$  ist der elektrische Leitwert  $G$  proportional zum Produkt aus Ladung  $Q$  und Elektronengeschwindigkeit  $v$

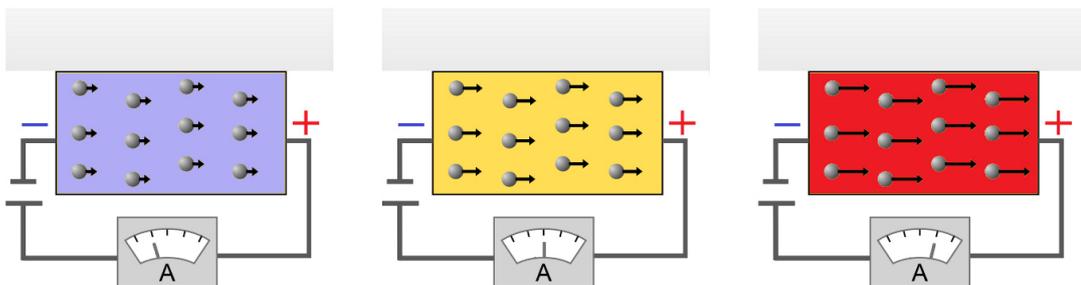
$$G \sim Q \cdot v \quad (5.2)$$

Variable Sensortemperaturen werden durch die Farben blau = „kühl“, gelb = „warm“ und rot = „heiß“ symbolisiert.

### 5.5.2 Einfluss der Sensortemperatur, Atmosphäre unberücksichtigt

#### Qualitative Beschreibung

Das vereinfachte Sensormodell geht davon aus, dass die Geschwindigkeit der Elektronen monoton mit der Temperatur steigt. Gleichzeitig bleibt die Gesamtladung innerhalb des Halbleiters ohne äußere Atmosphäre konstant. Durch die Zunahme der Elektronengeschwindigkeit erhöht sich auch der elektrische Leitwert mit steigender Temperatur. Abbildung 5.5 zeigt den Einfluss der Temperatur auf das vereinfachte Sensormodell.



**Abb. 5.5** Schematische Darstellung des Sensorverhaltens ohne äußere Atmosphäre bei niedrigen (links), mittleren (Mitte) und hohen (rechts) Temperaturen. Die Geschwindigkeit der Elektronen steigt mit der Temperatur. Die Gesamtladung bleibt konstant. Dadurch steigt der elektrische Leitwert mit der Temperatur.

Diese für Schüler verständliche Modellvorstellung ersetzt den Temperatureinfluss der Korngrenzen des physikalischen Modells qualitativ. Die Annahme eines Elektronengases impliziert zudem eine von der Temperatur unabhängige Elektronenanzahl.

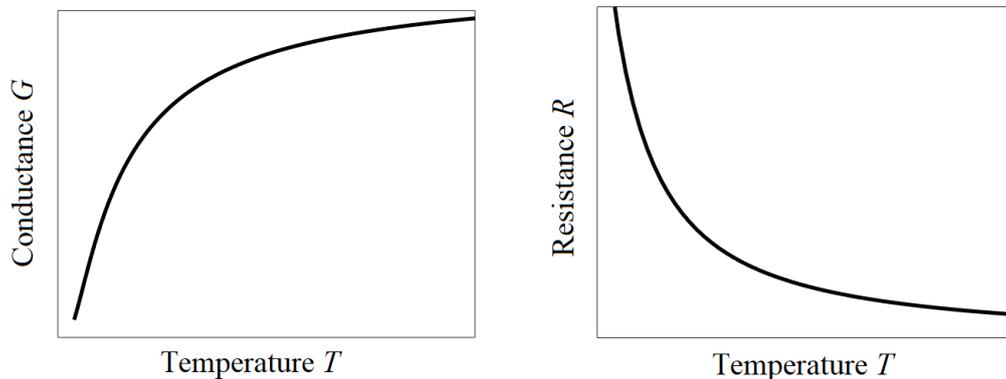
### Quantitative Beschreibung

Theoretisch wird der Verlauf des elektrischen Leitwerts  $G$  durch das Bild eines Thermistors mit negativem Temperaturkoeffizienten (NTC) interpretiert [157], welches ebenfalls einen MOX-Halbleiter Gassensor beschreibt [101]. Diese halbleitenden Materialien werden als Heißleiter bezeichnet und haben die Eigenschaft, dass ihr elektrischer Leitwert  $G$  mit steigender Temperatur  $T$  ansteigt:

$$G(T) \sim \exp\left(-\frac{E_A^{Th}}{k_B T}\right) \quad (5.3)$$

Hierbei ist  $E_A^{Th}$  die Aktivierungsenergie zur Überwindung der Bandlücke und  $k_B$  die Boltzmann-Konstante. Abbildung 5.6 zeigt den qualitativen Verlauf des elektrischen Leitwerts  $G$  eines NTC-Heißleiters, sowie des elektrischen Widerstands  $R$  als reziproker elektrischer Leitwert.

Da ohne äußere Atmosphäre keine Ladungen gebunden werden, bleibt die Gesamtladung  $Q$  konstant, sodass der Anstieg des elektrischen Leitwerts  $G$  nach Gl. (5.3) als eine Erhöhung der Driftgeschwindigkeit der Elektronen interpretiert werden kann.



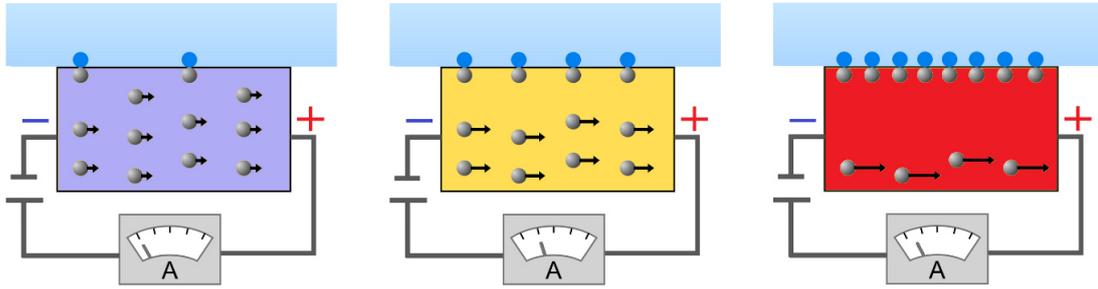
**Abb. 5.6** Links: Qualitativer Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit eines NTC-Heißleiters. Rechts: Qualitativer Verlauf des elektrischen Widerstands eines NTC-Heißleiters.

### 5.5.3 Einfluss einer Sauerstoffatmosphäre ohne reduzierendes Gas

#### Qualitative Beschreibung

In Anwesenheit einer Sauerstoff-haltigen Atmosphäre adsorbiert dieser an der Sensoroberfläche, wodurch freie Elektronen gebunden werden, die nicht mehr für den Ladungstransport zur Verfügung stehen. Je höher die Sensortemperatur ist, desto häufiger finden Adsorptionsprozesse statt, da diese eine Aktivierungsenergie benötigen. Dadurch verringert sich die Anzahl freier Elektronen im Sensormaterial. In

Kombination der Effekte von Elektronengeschwindigkeit und Sauerstoffadsorption werden abhängig von der Sensortemperatur drei Fälle betrachtet, siehe Abbildung 5.7.



**Abb. 5.7** Schematische Darstellung des Sensorverhaltens in einer Sauerstoff-Atmosphäre bei niedrigen (links), mittleren (Mitte) und hohen (rechts) Temperaturen. Die Geschwindigkeit der Elektronen steigt mit der Temperatur. Gleichzeitig reduziert sich die Zahl der freien Elektronen aufgrund der Bindung von Sauerstoff mit der Oberfläche.

Bei niedrigen Temperaturen impliziert die geringe Elektronengeschwindigkeit trotz einer großen Anzahl an Elektronen einen geringen Stromfluss. Bei hohen Temperaturen und hohen Geschwindigkeiten gibt es nur noch wenige freie Elektronen, was ebenso zu einer geringen Stromstärke führt. Bei mittleren Temperaturen erreicht der elektrische Leitwert ein Maximum, der elektrische Widerstand ein Minimum. Die beiden gegenläufigen Effekte gleichen sich in diesem Bereich aus.

### Quantitative Beschreibung

Durch die Adsorption von Sauerstoff an der Sensoroberfläche werden freie Elektronen  $Q_{frei}$  gebunden. Dadurch reduziert sich Menge der Ladungen, die für den Ladungstransport zur Verfügung stehen, was zu einer Reduzierung der Gesamtladung  $Q$  um die Menge der gebundenen Ladungen  $Q_{geb}$  führt.

$$Q_{frei} = Q - Q_{geb} \quad (5.4)$$

Die Reaktion von Sauerstoff mit der Oberfläche kann nach Arrhenius [158] durch eine temperaturabhängige Reaktionsrate  $k$  ausgedrückt werden, siehe Gl. (5.5).

$$k = \exp\left(-\frac{E_A}{k_B T}\right) \quad (5.5)$$

Dadurch lässt sich die Menge an gebundenen Ladungen nach Gl. (5.6) berechnen.

$$Q_{geb} = Q \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{k_B T}\right) \quad (5.6)$$

Dabei beschreibt  $E_A$  die nötige Aktivierungsenergie zur Bindung des Sauerstoffs auf der Oberfläche. Mit zunehmender Oberflächenbedeckung des negativ geladenen Sauerstoffs nimmt das Oberflächenpotential und damit auch die erforderliche Aktivierungsenergie  $E_A$  zu. Dieser Effekt ist als "Weisz-Limit" bekannt [157]. In erster

Näherung kann eine lineare Abhängigkeit mit einem Vorfaktor  $\alpha$  zur Oberflächenbedeckung angenommen werden.

$$E_A(Q_{geb}) = E_A^0 + \alpha \cdot Q_{geb} \quad (5.7)$$

$E_A^0$  beschreibt die Grund-Aktivierungsenergie zur Bindung von Sauerstoff auf der Oberfläche. Im Laufe der Zeit bildet sich so ein Gleichgewicht der Oberflächenbedeckung in Abhängigkeit von der Temperatur aus (Gl. 5.8).

$$Q_{geb} = Q \cdot \exp\left(-\frac{E_A^0 + \alpha \cdot Q_{geb}}{k_B T}\right) \quad (5.8)$$

Die Lösung dieser Gleichung nach  $Q_{geb}$  ist die analytische Fortsetzung der Lambert'schen  $W$  – Funktion [159].

$$Q_{geb} = \frac{k_B T}{\alpha} \cdot W\left(\frac{\alpha \cdot Q \cdot \exp\left(-\frac{E_A^0}{k_B T}\right)}{k_B T}\right) \quad (5.9)$$

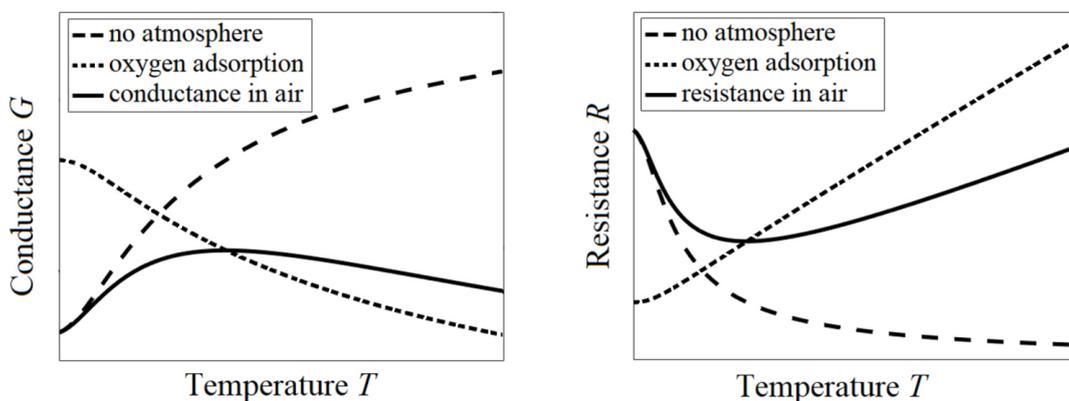
Für eine Schritt-für-Schritt Herleitung der Berechnung von  $Q_{geb}$  sei auf den Anhang verwiesen (vgl. I.1). Mit Gl. (5.4) kann die Zahl der freien Ladungen bestimmt werden,

$$Q_{frei} = Q \left(1 - \exp\left(-\frac{E_A^0 + \alpha \cdot Q_{geb}}{k_B T}\right)\right) \quad (5.10)$$

und mit Gl. (5.2) ergibt sich so eine Leitfähigkeit der Form

$$G(T) \sim Q \left(1 - \exp\left(-\frac{E_A^0 + \alpha \cdot Q_{geb}}{k_B T}\right)\right) \exp\left(-\frac{E_A^{Th}}{k_B T}\right) \quad (5.11)$$

Abbildung 5.8 zeigt den qualitativen Verlauf des elektrischen Leitwerts (links) und des elektrischen Widerstands (rechts) in Abhängigkeit der Sensortemperatur, als Superposition der beiden gegenläufigen Effekte.



**Abb. 5.8** Verlauf des Leitwerts  $G$  (links) und des elektrischen Widerstands  $R$  (rechts) als Überlagerung zweier gegenläufiger Effekte nach Gl. (5.3), (5.10) und (5.11). Die Geschwindigkeit der Elektronen steigt mit der Temperatur. Gleichzeitig reduziert sich die Zahl der freien Elektronen aufgrund der Bindung von Sauerstoff mit der Oberfläche.

### 5.5.4 Einfluss eines reduzierenden Gases

#### Qualitative Beschreibung

Reduzierende Gasmoleküle in der Atmosphäre (z.B. CO oder Ethanol) können eine Bindung mit dem an der Oberfläche adsorbierten Sauerstoff eingehen, wodurch dieser von der Oberfläche desorbiert. Die zuvor durch den Sauerstoff gebundenen Elektronen werden wieder frei und stehen wieder für den Ladungstransport zur Verfügung. Dies führt zu einer Erhöhung des elektrischen Leitwerts. Die Reaktionsrate des reduzierenden Gases mit dem Sauerstoff ist abhängig von der Konzentration des Zielgases in der Atmosphäre, die zunächst als konstant angenommen wird, sowie von der Sauerstoffbedeckung und der Sensortemperatur. Je höher die Temperatur und je mehr Sauerstoff gebunden ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass das reduzierende Gas mit dem gebundenen Sauerstoff reagiert, siehe Abbildung 5.9. Gleichzeitig ist die Oberflächenbedeckung mit Sauerstoff begrenzt. Dadurch bleibt die Oberflächenbedeckung bei sehr hohen Temperaturen nahezu konstant und der Effekt eines reduzierenden Gases verringert sich.

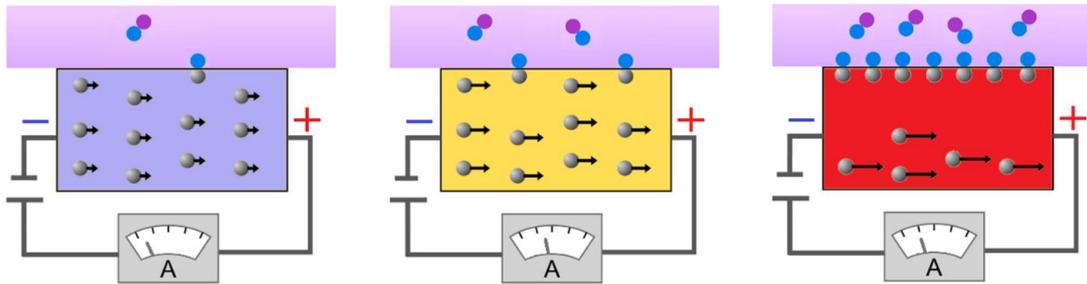


Abb. 5.9 Schematische Darstellung des Sensorverhaltens in einer Sauerstoff Atmosphäre mit reduziertem Gas bei niedrigen (links), mittleren (Mitte) und hohen (rechts) Temperaturen.

#### Quantitative Beschreibung

Durch die Reaktion von reduzierenden Gasen können effektiv weniger Sauerstoffmoleküle eine Bindung mit der Oberfläche eingehen. Dieses Phänomen kann durch eine effektive Bindungsenergie  $E_A^{eff}$  beschrieben werden

$$E_A^0 \rightarrow E_A^{eff} = E_A^0 + E'_A \quad (5.12)$$

$E'_A$  ist die sowohl stoff- als auch konzentrationsabhängige Aktivierungsenergie zur Bindung eines reduzierenden Gases mit dem adsorbierten Sauerstoff auf der Oberfläche. Mit Gl. (5.8) folgt für die Zahl der gebundenen Ladungen

$$Q_{geb} = Q \cdot \exp\left(-\frac{E_A^0 + E'_A + \alpha \cdot Q_{geb}}{k_B T}\right) \quad (5.13)$$

und mit Gl. (5.4) für die freien Ladungen:

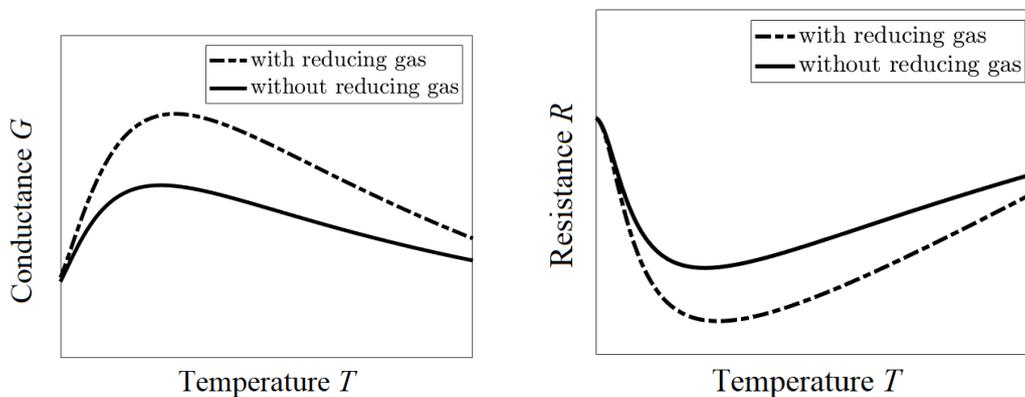
$$Q_{frei} = Q \left( 1 - \exp \left( - \frac{E_A^0 + E_A' + \alpha \cdot Q_{geb}}{k_B T} \right) \right) \quad (5.14)$$

Schließlich mit Gl. (5.2):

$$G(T) \sim Q \left( 1 - \exp \left( - \frac{E_A^0 + E_A' + \alpha \cdot Q_{geb}}{k_B T} \right) \right) \exp \left( - \frac{E_A^{Th}}{k_B T} \right) \quad (5.15)$$

Abbildung 5.10 zeigt den qualitativen Verlauf des elektrischen Leitwerts (links) und des elektrischen Widerstands (rechts) in Abhängigkeit von der Sensortemperatur.

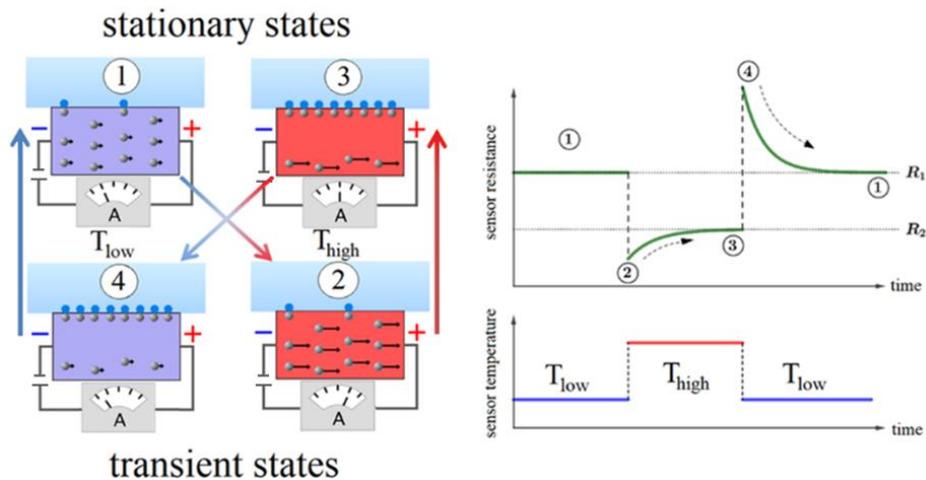
Durch die Reaktion von reduzierenden Gasen mit der Sensoroberfläche erhöht sich der elektrische Leitwert im Vergleich zu dem Fall ohne reduzierende Gase. Für hohe Temperaturen nähern sich diese Verläufe aufgrund des steigenden Oberflächenpotentials wieder einander an.



**Abb. 5.10** Einfluss eines reduzierenden Gases auf den Leitwert  $G$  (links) und den elektrischen Widerstand  $R$  (rechts) in Abhängigkeit der Temperatur nach Gl. (5.11) und (5.15).

### 5.5.5 Dynamische Prozesse während eines Temperatursprungs

Eine abrupte Änderung der Sensortemperatur sorgt für einen Übergang von stationären zu transienten Zuständen. Die Geschwindigkeit der Elektronen ändert sich nahezu instantan, wohingegen der Sauerstoff aus der Atmosphäre erst nach und nach auf der Oberfläche ad- oder desorbiert. Die Abläufe während eines Temperaturzyklus lassen sich in mehrere Bereiche unterteilen, siehe Abbildung 5.11.



**Abb. 5.11** 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 und kann durch Gleichung (5.15) beschrieben werden.

### 1) $\rightarrow$ 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) $\rightarrow$ 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) $\rightarrow$ 4) Übergang $T_{\text{heiß}} \rightarrow T_{\text{kalt}}$

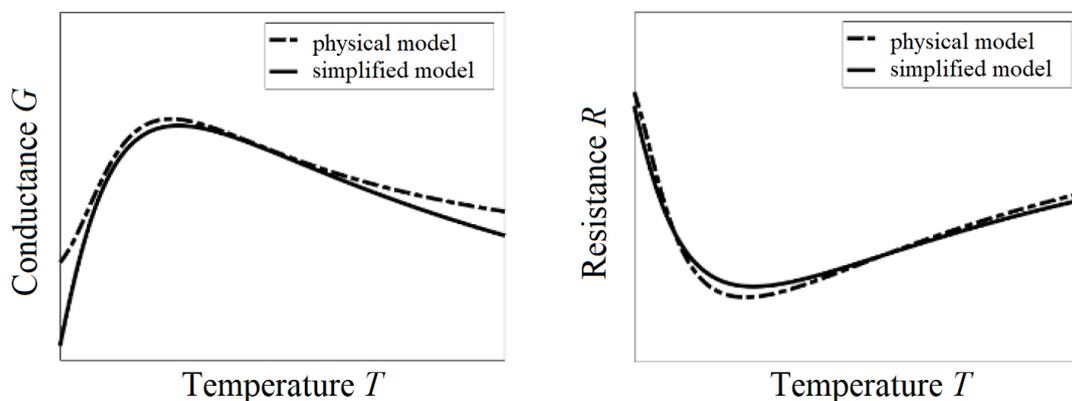
Der abrupte Wechsel von hohen zu tiefen Temperaturen sorgt analog zu dem Übergang von niedrigen zu hohen Temperaturen dafür, dass die Geschwindigkeit der freien Ladungsträger instantan sinkt. Dadurch verringert sich auch der elektrische Leitwert und der elektrische Widerstand steigt. Erneut ist der Temperaturwechsel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

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

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

### 5.5.6 Leistungen und Grenzen des vereinfachten Sensormodells

Das vereinfachte Sensormodell ist in der Lage, die relevanten Faktoren für die Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors sowohl qualitativ als auch semi-quantitativ in Form von Proportionalitäten auf einem für Schüler geeigneten Bildungsniveau zu beschreiben. Dies beinhaltet die Adsorption von Sauerstoff an der Sensoroberfläche sowie die Reaktion mit einem reduzierenden Gas als wesentliche Komponenten zum Verständnis der Sensorreaktion. Der prinzipielle Verlauf des elektrischen Leitwertes bzw. des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Sensortemperatur stimmt sowohl mit der Vorhersage des physikalischen Sensormodells (vgl. Kapitel 4.1.1) auf der Basis des Korn-Korn-Grenzenmodells als auch mit den experimentellen Beobachtungen überein (vgl. Kapitel 5.6.1). Dazu gehört insbesondere ein Maximum der elektrischen Leitfähigkeit bzw. ein Minimum des elektrischen Widerstandes bei "mittleren" Temperaturen. Abbildung 5.12 zeigt einen Vergleich der qualitativen Vorhersagen der elektrischen Leitfähigkeit und des Widerstandes in Abhängigkeit von der Temperatur nach dem Korn-Korn-Grenzenmodell und dem vereinfachten Sensormodell. Die Kurven des vereinfachten Sensormodells basieren auf der quantitativen Beschreibung nach Gleichung (5.15), die Kurven des physikalischen Sensormodells basieren auf Gleichung (4.6). Prinzipiell ist es möglich, das vereinfachte Modell auch auf die Reaktion mit oxidierenden Gasen zu erweitern.



**Abb. 5.12** Vergleich der qualitativen Vorhersagen der elektrischen Leitfähigkeit  $G$  (links) und des elektrischen Widerstandes  $R$  (rechts) nach dem physikalischen Sensormodell auf der Basis von Korn-Korn-Grenzen (gepunktete Linie) und dem vereinfachten Sensormodell (durchgezogene Linie) auf der Basis von G. (5.15) und (4.6).

Das vereinfachte Sensormodell ist in der Lage, die Verschiebung dieser Kurven in Gegenwart eines reduzierenden Gases hin zu höheren elektrischen Leitwerten bzw. niedrigeren elektrischen Widerständen adäquat zu beschreiben. Des Weiteren kann der Effekt, dass die Werte mit und ohne reduzierendes Gas bei sehr hohen Temperaturen konvergieren, durch das steigende Oberflächenpotential erklärt werden. Durch die

Beschreibung von transienten und stationären Zuständen auf der Sensoroberfläche ist es möglich, das dynamische Verhalten eines MOX-Halbleiter Gassensors unter Anwendung eines temperaturzyklischen Betriebs qualitativ zu beschreiben.

Zwar kann das vereinfachte Sensormodell die wesentlichen Punkte zur Beschreibung der Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors adäquat darzustellen, dennoch ist seine Aussagekraft begrenzt. Aufgrund der semi-quantitativen Beschreibung in Form von Proportionalitäten sind keine Aussagen über zu erwartende Größenordnungen der Sensorreaktion möglich. Außerdem vernachlässigt es Konzepte der Festkörperphysik, wie diskrete Energieniveaus oder das Bändermodell in Halbleitern. Das Bild einer steigenden Geschwindigkeit der Ladungen mit steigender Temperatur ist kritisch zu sehen, da es zu einer Verwechslung mit dem Begriff der Beweglichkeit von Ladungen in Festkörpern kommen kann. Dennoch hat sich gezeigt, dass Schüler einen intuitiven Zugang zu diesem Bild haben, da sie es mit der Verringerung der Viskosität von Honig bei steigenden Temperaturen in Verbindung bringen. Weiterhin kann daher die Notwendigkeit eines Halbleitermaterials nicht erklärt werden. Schließlich geht das vereinfachte Sensormodell davon aus, dass die zum Stromfluss beitragende Gesamtladung einer kontinuierlichen Funktion folgt. Diese kann jedoch nur ein Vielfaches der Elementarladung sein. Obwohl diese Aspekte für ein wissenschaftliches Verständnis von MOX-Halbleiter Gassensoren unerlässlich sind, sind sie für die Erläuterung der Ergebnisse der Experimente, die die Schüler durchführen, nicht erforderlich. Das vereinfachte Sensormodell stellt somit einen Kompromiss zwischen der komplexen theoretischen Beschreibung von MOX-Halbleiter Gassensoren und dem Wissenstand der Schüler in der Mittelstufe dar.

## 5.6 Lernmodule

In drei Lernmodulen lernen die Schüler die Funktionsweise von MOX-Halbleiter Gassensoren kennen (vgl. Lernmodul 1, Kapitel 5.6.1), kalibrieren diesen (vgl. Lernmodul 2, Kapitel 5.6.2) und führen eigene Umweltmessungen mit verschiedenen Sensortypen durch (vgl. Lernmodul 3, Kapitel 5.6.3). Der modulare Aufbau erlaubt es, dass die Versuche unabhängig voneinander durchgeführt werden können. Jedoch empfiehlt es sich Lernmodule 1 und 2 nacheinander durchzuführen, da diese grundsätzlich aufeinander aufbauen. Der software-technische Aufbau der Module variiert je nach Anforderung. So sind Lernmodule 1 und 2 auf Basis von HTML (englisch: „HyperText Markup Language“), CSS (englisch: „Cascading Style Sheet“) und JavaScript konzipiert. Zusätzlich erfolgt die computergestützte

Datenaufnahme in Lernmodul 2 und 3 über jeweils ein Java-basiertes Applet. Die Führung von Lernmodul 3 erfolgt über eine Broschüre, siehe Tabelle 5.1.

	<b>Lernmodul</b>	<b>HTML, CSS, JavaScript</b>	<b>Java</b>	<b>Broschüre</b>
1	Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors			
2	Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors			
3	Umweltmesstechnik			

**Tab. 5.1** Verwendete Lernmedien. Je nach Anforderung werden basieren die Module auf HTML, CSS, JavaScript, Java oder einer Broschüre.

Bezüglich des fachlichen Niveaus richten sich Module 1 und 3 an Schüler ab Klassenstufe 7/8 der gymnasialen Mittelstufe. Modul 2 ist aufgrund der höheren Anforderungen, sowie der Menge an neuen Informationen für Schüler ab den Klassenstufen 9/10 geeignet. Die Lernmodule beanspruchen abhängig von Alter und Schulform erfahrungsgemäß zwischen 1,5 und 3 Zeitstunden. Im Folgenden werden die technische Realisation (Hardware und Software) sowie der Inhalt der Module detailliert beschrieben.

### 5.6.1 Lernmodul 1 – Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors

Das erste Lernmodul befasst sich thematisch mit der prinzipiellen Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors. Der Kurs ist induktiv aufgebaut, d.h. ausgehend von der Beobachtung der Sensorreaktion in Anwesenheit verschiedener Stoffe und Sensortemperaturen wird schrittweise ein theoretisches Sensormodell zur Erklärung der Beobachtungen entwickelt. Die 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 (vgl. Kapitel 5.5). Des Weiteren wird in diesem Modul der Umgang mit einem Multimeter, die Aufnahme von Messwerten und die Darstellungsweise von Daten, linear und logarithmisch, geübt.

#### **Lernziele**

Das erste Lernmodul stellt den Einstieg in das Thema Gassensorik mit MOX-Halbleiter-Gassensoren dar. Die Schüler erhalten darin einen ersten Einblick, wie diese

Art von Gassensoren aufgebaut ist, welches die entscheidende Messgröße zur Messung von reduzierenden Gasen ist und von welchen Parametern das Sensorverhalten abhängig ist. Dieses Wissen wird anschließend dafür verwendet, verschiedene Stoffe qualitativ anhand der Sensorreaktion zu unterscheiden. Es lassen sich die folgenden Lernziele formulieren:

#### *Alltagsbezogene Lernziele*

- Manche Luftschadstoffe können nicht mit der menschlichen Nase wahrgenommen werden.
- Gassensoren eignen sich als objektive Mittel, um schlechte Luftqualität zu detektieren.

#### *Sensorbezogene Lernziele*

Die Sensorreaktion ist abhängig von

- **Gasart:** es gibt reduzierende und oxidierende Gase, die den Sensorwiderstand verringern oder erhöhen.
- **Gaskonzentration:** je höher die Gaskonzentration, desto größer Widerstandsänderung.
- **Sensortemperatur:** abhängig von der Sensortemperatur ändert sich die Reaktionsgeschwindigkeit des jeweiligen Gases mit der Sensoroberfläche. Dies kann zur Erhöhung der Empfindlichkeit und Selektivität verwendet werden, indem die Sensortemperatur jeweils für das zu messende Gas (Zielgas) optimiert wird.

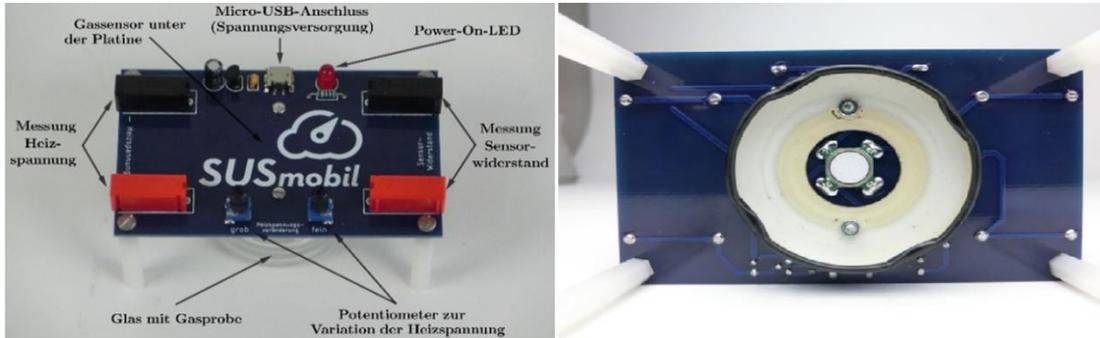
#### *Weiterhin lernen die Schüler*

- Es gibt eine "Wärmewirkung des elektrischen Stroms" – die Sensortemperatur kann über eine Heizspannung variiert werden.
- Es ist möglich, mit Hilfe von MOX-Halbleiter Gassensoren verschiedene Stoffe qualitativ zu unterscheiden.
- Es gibt Sensortemperaturen, die besser dazu geeignet sind, Stoffe zu unterscheiden.

### **Hardware**

Als messtechnische Basis des Lernsettings wurde eine Platine entwickelt, siehe Abbildungen 5.13, 5.14 und 5.15. Auf ihrer Unterseite ist der MOX-Halbleiter Gassensor AS-MLV-P2 der Firma „ams“ [160] montiert, der über einen integrierten Heizer unterhalb der sensitiven Schicht auf bekannte Temperaturen erwärmt werden kann. Die Heizspannung wird über zwei Potentiometer (grob und fein) im Spannungsintervall 0,7 – 3 Volt reguliert, was einer Sensortemperatur im Bereich

zwischen 50°C und 400°C entspricht. Das Spannungssignal wird über einen Kondensator (10  $\mu$ F) geglättet. Über an die Platine angeschlossene Multimeter können die Heizspannung und der elektrische Widerstand der sensitiven Schicht ausgelesen werden. Die Spannungsversorgung der Schaltungselektronik erfolgt über einen Mikro-USB-Anschluss, was durch eine LED signalisiert wird.



**Abb. 5.13** 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.

Die zu messenden Proben befinden sich in flüssiger Phase in kleinen Einmachgläsern (30 ml). Durch Verdunstung reichert sich der Headspace (Dampfraum über der Flüssigkeit) mit gasförmigen Komponenten der Flüssigkeit an.



**Abb. 5.14** 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.

Die Einmachgläser können unterhalb der Platine angeschraubt werden, wodurch sich der Sensor in einem abgeschlossenen Volumen mit der Gasphase der Flüssigkeiten befindet, siehe Abbildung 5.14. Da der Headspace gesättigt ist, bleibt die Konzentration der einzelnen Stoffe darin konstant.

Abbildung 5.15 zeigt den Schaltplan der Platine. Über einen Mikro-USB Anschluss wird die Platine mit einer Spannung versorgt. Über einen Schalter kann der Stromkreis geschlossen werden, was durch eine aufleuchtende LED signalisiert wird. Die angelegte Spannung wird über zwei Potentiometer ( $R1^+$  und  $R3^+$ ) reguliert und über zwei Leiterplattenbuchsen abgegriffen. Der Sensorwiderstand kann über zwei weitere Leiterplattenbuchsen mit einem Multimeter ausgelesen werden.

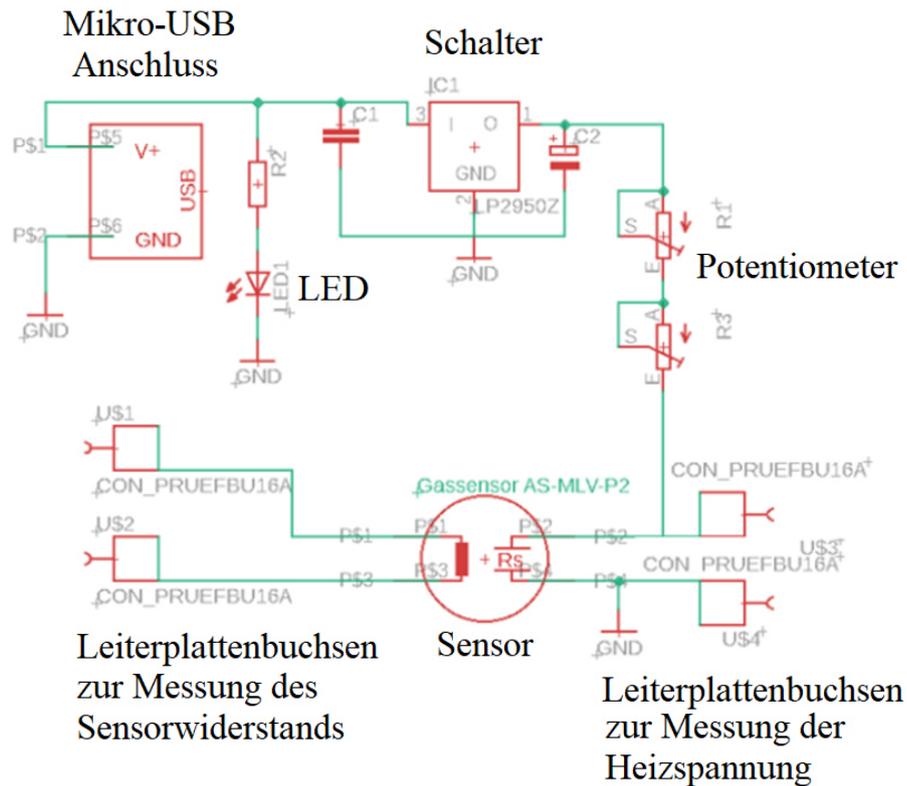


Abb. 5.15 Schaltplan der Messplatine aus Lernmodul 1.

### Software

Für die Durchführung des Experiments wurde ein HTML-basierter Selbstlernkurs entwickelt. Ein Vorteil von HTML liegt in der Übertragbarkeit, da keine aufwändige Software zur Darstellung des Inhalts notwendig ist. Es wird lediglich ein kostenloser Browser, wie z.B. Mozilla Firefox, Google Chrome oder Microsoft Edge, benötigt. Ebenso ist keine Internetverbindung erforderlich, da die Dateien lokal auf den PCs gespeichert und abgerufen werden können. Mit Hilfe von CSS lassen sich Animationen und interaktive Elemente einbinden. Dadurch können komplexe Abläufe visuell dargestellt und so besser verinnerlicht werden. Zusätzlich wird die Anzahl der benötigten Betreuer auf 1-2 Personen pro Schulklasse (ca. 25 Schüler) beschränkt, die jedoch nur bei Fragen der Schüler zur Seite stehen sollen.

Ein weiterer Vorteil ist, dass die Schüler den Kurs in ihrem individuellen Tempo absolvieren können. Die wichtigsten Lernelemente werden durch Multiple-Choice Fragen geprüft, wobei ein Voranschreiten im Kurs erst nach erfolgreicher Beantwortung dieser möglich ist. Dadurch soll sichergestellt werden, dass sich die Schüler mit den zu vermittelnden Inhalten hinreichend auseinandersetzen. Ein Beispiel für solch eine Multiple-Choice Aufgabe ist in Abbildung 5.16 dargestellt. Zusätzlich besteht im Kurs die Möglichkeit, Hinweise oder Hilfestellungen bei der Beantwortung der Fragen einblenden zu lassen. Dadurch wird den Schüler geholfen, neue Denkansätze und Blickwinkel zur Bearbeitung der Aufgaben zu finden.

**Fragen zur Wirkung des Zielgases**

Wähle aus, was die Zufuhr des Zielgases in die Umgebung bewirkt.

Die Anzahl freier Ladungsträger

Die Geschwindigkeit der freien Ladungsträger

Die Stromstärke durch den Sensor

Der Sensorwiderstand

Vorher: Luft in der Umgebung.

Nachher: Luft und Zielgas in der Umgebung.

**Abb. 5.16** Screenshot des Selbstlernkurses mit Multiple Choice Fragen. Ein Voranschreiten im Kurs ist erst nach erfolgreicher Beantwortung der Fragen möglich.

Messwerte können direkt in die Software eingetragen und graphisch dargestellt werden. Es besteht die Möglichkeit, verschiedene Darstellungsweisen der Daten (linear oder logarithmisch) auszuprobieren, um den Verlauf der Messwerte besser unterscheiden zu können. Zusätzlich ist es bei der linearen Darstellung möglich, die Skalierung frei zu wählen. Durch Führung der Maus in den Graphen werden einzelne Wertepaare angezeigt. Abbildung 5.17 zeigt die logarithmische Darstellung des Sensorwiderstands in Anwesenheit von Wasser (blau), alkoholfreiem Bier (rot) und Apfelsaft (grün) bei unterschiedlichen Heizspannungen.

**Darstellung der Daten 1**

Benenne stichpunktartig jeweils mindestens einen Vor- und Nachteil der linearen und logarithmischen Darstellung:

Vorteile lineare Darstellung:  Nachteile lineare Darstellung:

Vorteile logarithmische Darstellung:  Nachteile logarithmische Darstellung:

**Abb. 5.17** Logarithmische Darstellung des Sensorwiderstands in Anwesenheit von Wasser (blau), alkoholfreiem Bier (rot) und Apfelsaft (grün) bei unterschiedlichen Heizspannungen.

Der Selbstlernkurs ist in je zwei Experimentier- und Theoriephasen unterteilt, die verschiedene Aspekte zur Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors behandeln. Zunächst wird die Sensorreaktion bei einer konstanten Temperatur in Anwesenheit eines Zielstoffes untersucht. Anschließend wird genauer auf den Einfluss der Sensortemperatur eingegangen.

### Einführung und Motivation

Zu Beginn des Selbstlernkurses wird den Schülern aufgezeigt, in welchen Bereichen des alltäglichen Lebens Sensoren jeglicher Art verwendet werden. Als Beispiel dient dabei das ihnen bestens bekannte Smartphone. In diesen sind unter anderem Berührungssensoren, Beschleunigungssensoren und Lichtsensoren verbaut. Aber auch im Alltag, wie bei der Messung der Geschwindigkeit in Radarkontrollen oder bei der Messung der Luftqualität in Städten werden Sensoren verwendet, siehe Abbildung 5.18.

#### Blitzer und Radarkontrolle

Zur Sicherheit der Verkehrsteilnehmer, aber auch zum Schutz vor Lärm werden Geschwindigkeitskontrollen durchgeführt. Dies geschieht zum Beispiel mit Sensoren, die die Laufzeit von Radarwellen analysieren.



#### Luftqualitätsmessung

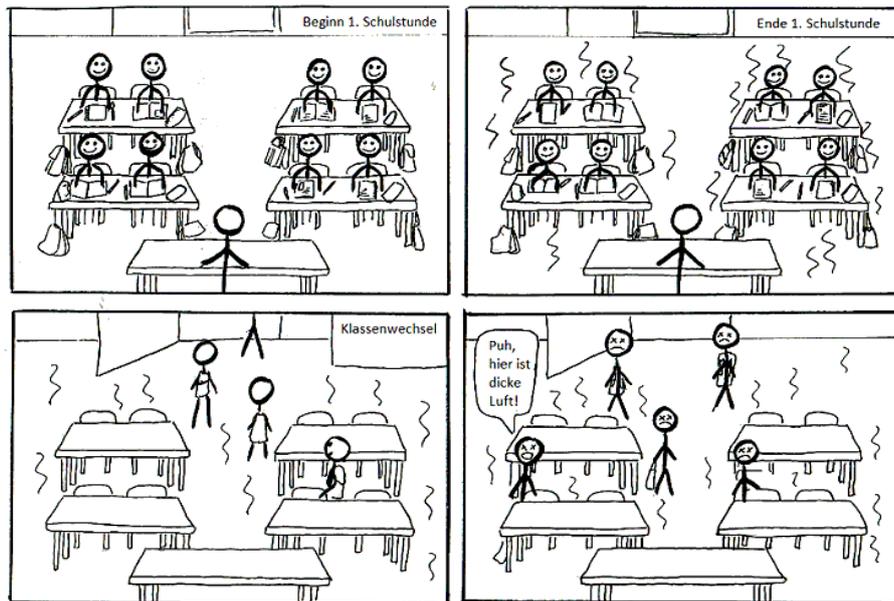
Verschmutzte Luft macht krank. Zur Überprüfung der Luftqualität wird die Konzentration verschiedener Luftschadstoffe an vielen (und doch viel zu wenigen) Messstationen ermittelt.



Abb. 5.18 Screenshot aus dem Selbstlernkurs: Sensoren im Alltag.

Dabei wird betont, dass es oft nicht ausreicht, physikalische oder chemische Daten nur grob oder „nach Gefühl“ zu erfassen. Vielmehr ist eine quantitative, möglichst exakte Bestimmung der jeweiligen Werte von Interesse. Weiterhin wird gezeigt, dass sich die menschliche Nase nur bedingt zur Bestimmung der Luftqualität in Innenräumen eignet. In Abbildung 5.19 ist eine Situation aus dem Schulalltag in Form eines Comics zu sehen. In einem Klassenraum verschlechtert sich die Luftqualität aufgrund fehlender Lüftung. Zu Beginn der 1. Schulstunde ist die Luftqualität gut (Abbildung 5.19, links oben). Am Ende der 1. Schulstunde hat sich die Luftqualität bereits deutlich verschlechtert (Abbildung 5.19, rechts oben). Diese langsame Verschlechterung der Luftqualität kann jedoch von der menschlichen Nase oft nicht wahrgenommen werden, sodass die Schüler im Klassenraum diese nicht bemerken. Nach der ersten Schulstunde findet ein Klassenwechsel statt (Abbildung 5.19, links unten). Eine neue Klasse, die zuvor in einem gut gelüfteten Raum war, betritt nun den

Klassensaal und bemerkt sofort die schlechte Luftqualität (Abbildung 5.19, rechts unten).

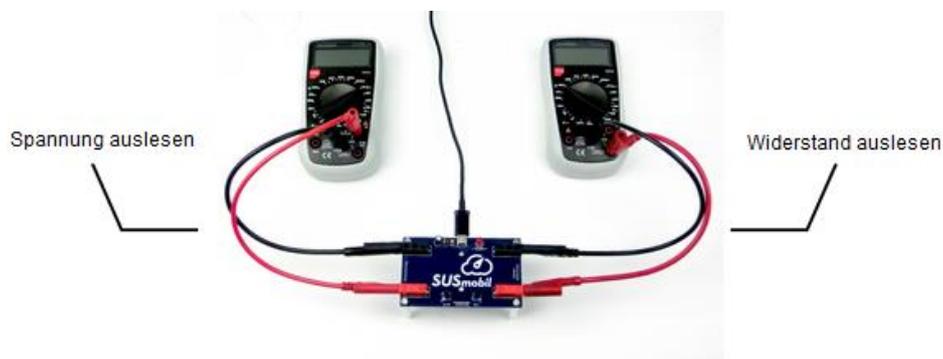


**Abb. 5.19** Comic zur Verdeutlichung der Verschlechterung der Luftqualität im Laufe eines Schultages, sowie der Unfähigkeit der Nase, langsame Verschlechterungen der Luftqualität zu registrieren.

Dieses Beispiel hat direkten Alltagsbezug und soll aufzeigen, dass die Nase kein objektiver Sensor zur Messung der Luftqualität ist. Um diese subjektive Wahrnehmung von Gerüchen und Luftqualität zu objektivieren, können jedoch Gassensoren verwendet werden, deren Funktionsweise im Folgenden untersucht wird.

### Experimentierphase I

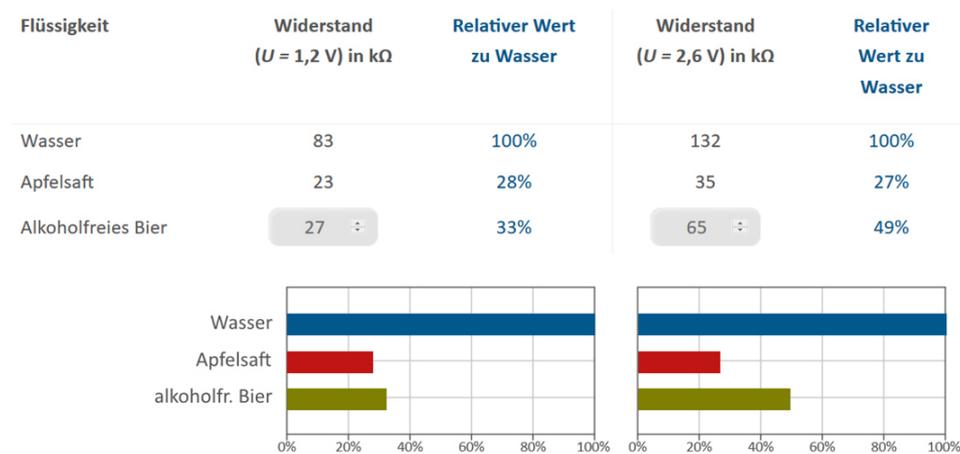
Zu Beginn der ersten Experimentierphase haben die Schüler die Aufgabe, den Versuch nach Anleitung aufzubauen, indem sie die Multimeter entsprechend an das Sensorboard anschließen und eine Stromversorgung über ein Mikro-USB-Kabel herstellen, siehe Abbildung 5.20. Danach untersuchen sie den Bereich, in dem die Heizspannung variiert werden kann. Dabei wird zunächst nicht genauer auf die Bedeutung der Heizspannung eingegangen.



**Abb. 5.20** Versuchsaufbau für Lernmodul 1. Über Multimeter können eingestellte Heizspannung (links) und Sensorwiderstand (rechts) ausgelesen werden.

Nachdem sie sich mit dem Versuchsaufbau vertraut gemacht haben, untersuchen die Schüler die Sensorreaktion in Gegenwart von Wasser, Apfelsaft und alkoholfreiem Bier bei zwei verschiedenen Heizspannungen (1,2 V und 2,6 V) entsprechend Sensortemperaturen von ca. 125°C und 340°C.

Nach einer Temperaturänderung stellt sich erst nach einer gewissen Zeit ein stationärer Zustand auf der Sensoroberfläche ein. Diese Zeit kann mehrere Minuten bis Stunden dauern [101]. Um dennoch eine ausreichende Anzahl an Messungen in der begrenzten Zeit des Moduls durchzuführen, werden diese in transienten Zuständen durchgeführt. Eine Vergleichbarkeit der Messwerte ist dadurch gewährleistet, dass alle Messungen nach der gleichen Zeit nach einem Temperatursprung durchgeführt werden, in diesem Fall 60 Sekunden danach. Beispielhafte Ergebnisse sind in Abbildung 5.21 dargestellt.



**Abb. 5.21** Absolute Sensorwiderstände (schwarz) im Headspace für drei Testsubstanzen (Wasser, Apfelsaft, alkoholfreies Bier) und Werte relativ zu Wasser (blau) bei Heizspannungen von 1,2 V (125°C, links) und 2,6 V (340°C, rechts), aufgezeichnet 60 Sekunden nach einer Temperaturänderung. Eine Heizspannung von 2,6 V ermöglicht eine bessere Unterscheidung der drei Testsubstanzen.

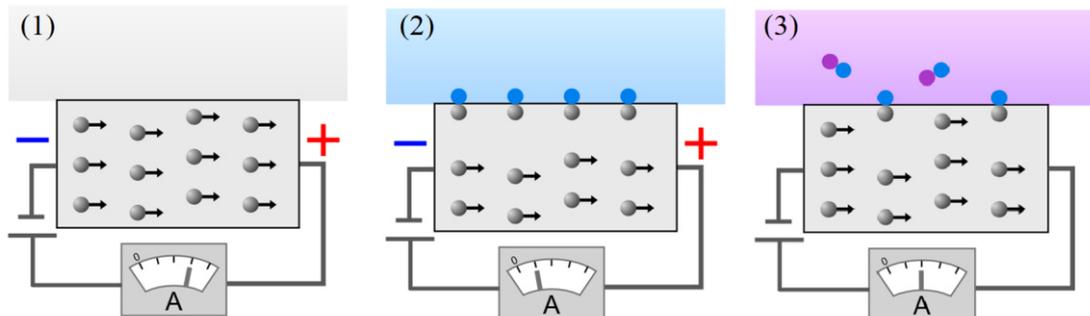
Die Messergebnisse zeigen den Schülern, dass die Sensorreaktion sowohl von der Substanz als auch von der Temperatur abhängig ist. Bei beiden Sensortemperaturen zeigt sich, dass der elektrische Widerstand des Sensors in Anwesenheit von Wasser am höchsten ist. Die Atmosphären über Apfelsaft und alkoholfreiem Bier enthalten verhältnismäßig große Mengen an VOCs, vor allem reduzierende Gase wie Ethanol, die in beiden Fällen für die im Vergleich zu Wasser reduzierten Widerstände verantwortlich sind.

Bei einer Heizspannung von 1,2 V sind die aufgenommenen Messwerte in der Anwesenheit von Apfelsaft und alkoholfreiem Bier, sowohl absolut als auch relativ zum Sensorsignal für Wasser, sehr ähnlich. Dadurch lassen sich Apfelsaft und alkoholfreies Bier nicht zuverlässig unterscheiden. Im Gegensatz dazu lassen sich bei einer Heizspannung von 2,6 V alle drei Testsubstanzen eindeutig differenzieren. Diese

Beobachtung dient als Motivation, die Temperaturabhängigkeit der Sensorreaktion in Experimentierphase II detailliert zu untersuchen.

### Theoriephase I

Um zu verstehen, warum sich der Sensorwiderstand in Gegenwart eines reduzierenden Gases verringert, wird das vereinfachte Sensormodell in einem ersten theoretischen Teil des Kurses vorgestellt. Dabei wird auf die Komponenten des Sensormodells sowie die ablaufenden Prozesse auf der Oberfläche des Sensors bei einer konstanten Sensortemperatur eingegangen. Die Temperatur des Sensormaterials wird zunächst noch vernachlässigt, siehe Abbildung 5.22.



**Abb. 5.22** Schematische Darstellung des vereinfachten Sensormodells. Links: ohne Betrachtung der Atmosphäre. Mitte: Sauerstoffhaltige Atmosphäre. Rechts: Sauerstoffhaltige Atmosphäre mit reduzierendem Gas.

Nachdem die Komponenten des Sensormodells vorgestellt wurden, erhalten die Schüler die Aufgabe zu beschreiben, was sich zwischen den Szenarien (1) ohne äußere Atmosphäre, (2) sauerstoffhaltige Atmosphäre und (3) sauerstoffhaltige Atmosphäre mit reduzierenden Gasen ändert. Dazu sollen jeweils 4 Multiple Choice Fragen zu den Parametern (a) Anzahl der freien Ladungsträger, (b) Geschwindigkeit der freien Ladungsträger, (c) Stromstärke und (d) elektrischer Widerstand beantwortet werden.

Zu jedem Parameter stehen die drei Antwortmöglichkeiten „nimmt ab“, „nimmt zu“ und „bleibt gleich“ zur Verfügung, siehe Tabelle 5.2. Dabei kann die Änderung des elektrischen Widerstands nicht direkt am schematischen Sensormodell abgelesen werden, sondern muss mit Hilfe des Ohm'schen Gesetz  $U = R \cdot I$  erschlossen werden.

Nach Absolvierung des ersten theoretischen Teils sind die Schüler in der Lage zu erklären, warum der Sensorwiderstand in Anwesenheit eines reduzierenden Gases sinkt. Weiterhin erklärt die Einführung des Begriffs „Reaktionsrate“ das Maß dieser Verringerung. Die Reaktionsrate ist dabei abhängig von der

- Konzentration des reduzierenden Gases
- Sauerstoffbedeckung auf der Oberfläche
- Art des reduzierenden Gases
- Temperatur des Sensormaterials

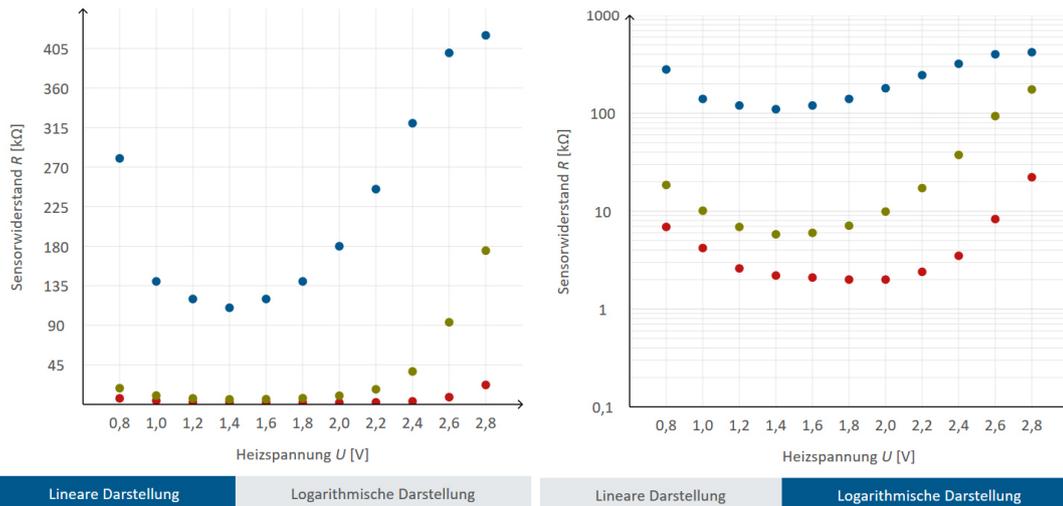
Erst jetzt erfahren die Schüler, dass sie durch die Variation der anliegenden Spannung an den Potentiometern die Temperatur des Sensors beeinflusst haben. Diese Wärmewirkung des elektrischen Stroms wird anhand eines Applets verdeutlicht, in dem die Heizspannung an einem schematischen Sensormodell variiert werden kann. Anschließend erhalten die Schüler die Aufgabe, die Temperatur des Sensors bei den beiden zuvor verwendeten Heizspannung 1,2 V und 2,6 V an einem Graphen abzulesen. Die unterschiedliche Sensorreaktion in Abhängigkeit der Temperatur bildet die Motivation für eine genauere Untersuchung der Temperaturabhängigkeit in der Experimentierphase II.

Parameter	Änderung zwischen Szenario (1) und (2)	Änderung zwischen Szenario (2) und (3)
Anzahl der freien Ladungsträger...	... nimmt ab.	... nimmt zu.
Geschwindigkeit der freien Ladungsträger...	... bleibt gleich.	... bleibt gleich.
Stromstärke...	... nimmt zu.	... nimmt ab.
elektrischer Widerstand...	... nimmt ab.	... nimmt zu.

**Tab. 5.2** Multiple Choice Fragen, wie sich Anzahl und Geschwindigkeit der freien Ladungsträger, sowie Stromstärke und elektrischer Widerstand beim Übergang der Szenarien (1) ohne äußere Atmosphäre, (2) mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre und (3) mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre inklusive reduzierendem Gas ändern.

## Experimentierphase II

Im zweiten experimentellen Teil untersuchen die Schüler die Temperaturabhängigkeit der Sensorreaktion genauer. Zu diesem Zweck reduzieren sie, beginnend mit einer Heizspannung von 2,8 V, die Sensortemperatur in Schritten von 0,2 V und messen den Sensorwiderstand in Gegenwart von Wasser und einer weiteren Substanz ihrer Wahl. Die Messungen werden jeweils 10 Sekunden nach einer Temperaturänderung durchgeführt. Das Sensorsignal für Wasser stellt die Referenzkurve dar, da es nur sehr wenige reduzierende Substanzen enthält. Beispielhafte Messergebnisse sind in Abbildung 5.23 dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass zwar prinzipielle Verläufe der Sensorreaktion unterschiedlicher Sensoren ähnlich sind, jedoch die Absolutwerte von Sensor zu Sensor aufgrund von äußeren Bedingungen und Oberflächenbeschaffenheiten variieren (vgl. Abb. 5.17 und Abb. 5.23). Dies zeigt noch einmal die Wichtigkeit einer fachgerechten Kalibrierung jedes einzelnen Sensors.

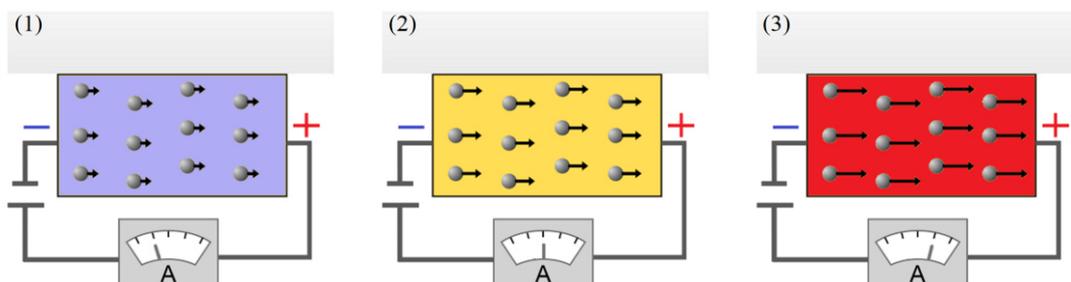


**Abb. 5.23** Charakteristische Verläufe der Sensorreaktion in Anwesenheit von Wasser (blau), alkoholfreies Bier (grün) und Apfelsaft (rot) in Abhängigkeit von der Heizspannung. Links: lineare Darstellung. Rechts: halblogarithmische Darstellung.

Nach der Aufnahme der Daten haben die Schüler die Möglichkeit, die Darstellungsweise der Daten anzupassen. Typischerweise ist die Nutzung einer halblogarithmischen Darstellung besser geeignet, um die charakteristischen Verläufe der Sensorreaktion auf unterschiedliche Stoffe differenziert darzustellen. In der folgenden Theoriephase II erfahren die Schüler, welchen Einfluss die Sensortemperatur auf den Verlauf der Sensorreaktion hat. Dies beinhaltet auch die Ausbildung eines Minimums des elektrischen Widerstands bei mittleren Temperaturen.

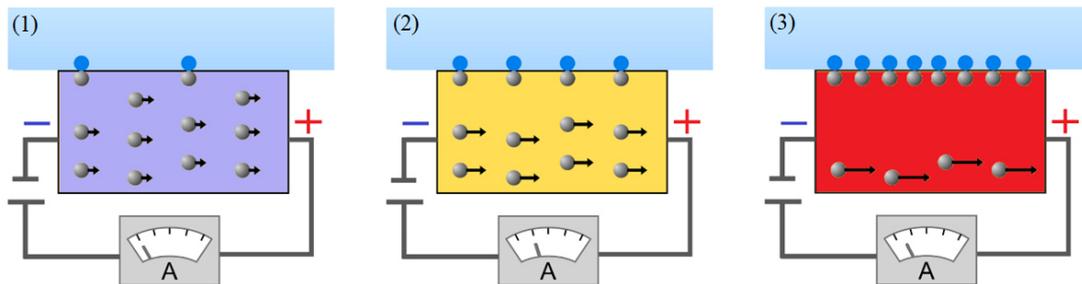
## Theoriephase II

Das vereinfachte Sensormodell wird nun durch den Parameter einer variablen Sensortemperatur erweitert. Analog zu Theoriephase I wird zunächst das Sensormodell ohne äußere Atmosphäre betrachtet. Die Sensortemperatur hat direkten Einfluss auf die effektive Geschwindigkeit der freien Ladungsträger. Dies sorgt für eine größere Stromstärke mit steigender Temperatur, siehe Abbildung 5.24.



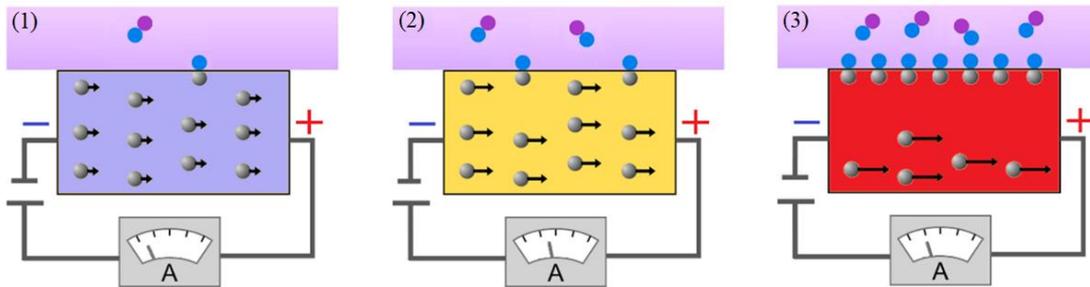
**Abb. 5.24** Schematische Darstellung des vereinfachten Sensormodells bei variablen Sensortemperaturen. Die Geschwindigkeit der freien Ladungsträger steigt monoton mit der Temperatur. Entsprechend steigt die Stromstärke und sinkt der Sensorwiderstand.

Im nächsten Schritt wird der Fall mit einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre betrachtet. Neben der Erhöhung der Geschwindigkeit der freien Ladungsträger sorgt die Adsorption von Sauerstoff dafür, dass weniger Ladungsträger für den Stromtransport zur Verfügung stehen. Dieser Effekt dominiert jedoch erst bei hohen Sensortemperaturen, siehe Abbildung 5.25. Das Zusammenspiel beider Effekte sorgt für den charakteristischen Verlauf des elektrischen Widerstands mit einem Minimum bei mittleren Temperaturen.



**Abb. 5.25** Schematische Darstellung des vereinfachten Sensormodells in Anwesenheit einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre und variablen Sensortemperaturen. Bei niedrigen Sensortemperaturen (links) dominiert der Effekt der Erhöhung der Geschwindigkeit der freien Ladungsträger. Bei hohen Temperaturen (rechts) dominiert die Adsorption von Sauerstoff auf der Oberfläche. Bei mittleren Temperaturen (Mitte) gleichen sich diese Effekte aus.

In Anwesenheit eines reduzierenden Gases reagieren diese mit dem gebundenen Sauerstoff, wodurch vermehrt Ladungsträger befreit werden. Dessen Reaktionsrate steigt mit steigender Temperatur. Insgesamt erhöht sich so der Strom und der elektrische Widerstand sinkt, siehe Abbildung 5.26.



**Abb. 5.26** Schematische Darstellung des Sensorverhaltens in einer Sauerstoff Atmosphäre mit reduzierendem Gas bei niedrigen (links), mittleren (Mitte) und hohen (rechts) Temperaturen.

Die Schüler beschreiben analog zu Theoriephase I in Multiple Choice Fragen was sich zwischen den Fällen (1) niedriger Sensortemperatur, (2) mittlerer Sensortemperatur und (3) hoher Sensortemperatur sowie den Szenarien (a) ohne Atmosphäre, (b) mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre und (c) mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre inklusive reduzierendem Gas ändert. Eine detaillierte Darstellung ist in Tabelle 5.3 zu sehen.

**Fazit**

Das erste Lernmodul liefert einen ersten Einblick in die Messung von Gasen mittels eines MOX-Halbleiter Gassensors. Der Fokus liegt auf der qualitativen Unterscheidung verschiedener Stoffe anhand der Sensorreaktion. Dabei zeigt sich, dass der Sensor abhängig von untersuchtem Stoff und Sensortemperatur unterschiedlich reagiert. Es werden charakteristische Messkurven aufgenommen, anhand derer drei Stoffe eindeutig voneinander unterschieden werden können. Die experimentellen Beobachtungen werden schrittweise anhand eines vereinfachten Sensormodells verständlich gemacht.

Parameter	Ohne äußere Atmosphäre (1)		Mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre (2)		Mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre inklusive reduzierendem Gas (3)	
	Änderung zwischen Fall (a) und (b)	Änderung zwischen Fall (b) und (c)	Änderung zwischen Fall (a) und (b)	Änderung zwischen Fall (b) und (c)	Änderung zwischen Fall (a) und (b)	Änderung zwischen Fall (b) und (c)
Die Temperatur des Sensors...	... nimmt zu.	... nimmt zu.	... nimmt zu.	... nimmt zu.	... nimmt zu.	... nimmt zu.
Anzahl der freien Ladungsträger...	... bleibt gleich.	... bleibt gleich.	... nimmt ab.	... nimmt ab.	... nimmt ab.	... nimmt ab.
Geschwindigkeit der freien Ladungsträger...	... nimmt zu.	... nimmt zu.	... nimmt zu.	... nimmt zu.	... nimmt zu.	... nimmt zu.
Stromstärke...	... nimmt zu.	... nimmt zu.	... nimmt zu.	... nimmt ab.	... nimmt zu.	... nimmt ab.
elektrischer Widerstand...	... nimmt ab.	... nimmt ab.	... nimmt ab.	... nimmt zu.	... nimmt ab.	... nimmt zu.

**Tab. 5.3** Multiple Choice Fragen, wie sich die Temperatur des Sensors, die Anzahl und Geschwindigkeit der freien Ladungsträger, die Stromstärke und der elektrische Widerstand beim Übergang der Fälle (a) „niedrige Sensortemperatur“, (b) „mittlere Sensortemperatur“ und (c) „hohe Sensortemperatur“, in den Szenarien (1) ohne äußere Atmosphäre, (2) mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre und (3) mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre inklusive reduzierendem Gas ändern.

## 5.6.2 Lernmodul 2 – Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors

Das zweite Lernmodul befasst sich thematisch mit der Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors. Im Gegensatz zu Lernmodul 1, bei dem der Fokus auf einer qualitativen Unterscheidung verschiedener Stoffe liegt, liegt der Schwerpunkt in diesem Modul auf der quantitativen Bestimmung von Konzentrationen eines Stoffes. Ausgehend von einer Konzeptualisierung des Begriffs "Kalibrierung" werden in dem HTML-basierten Selbstlernkurs Aspekte wie die Erfassung von Trainingsdaten, die Merkmalsextraktion und die mathematische Modellbildung mittels eines ANN behandelt. Darüber hinaus wird der Begriff „Konzentration“ erläutert.

### Lernziele

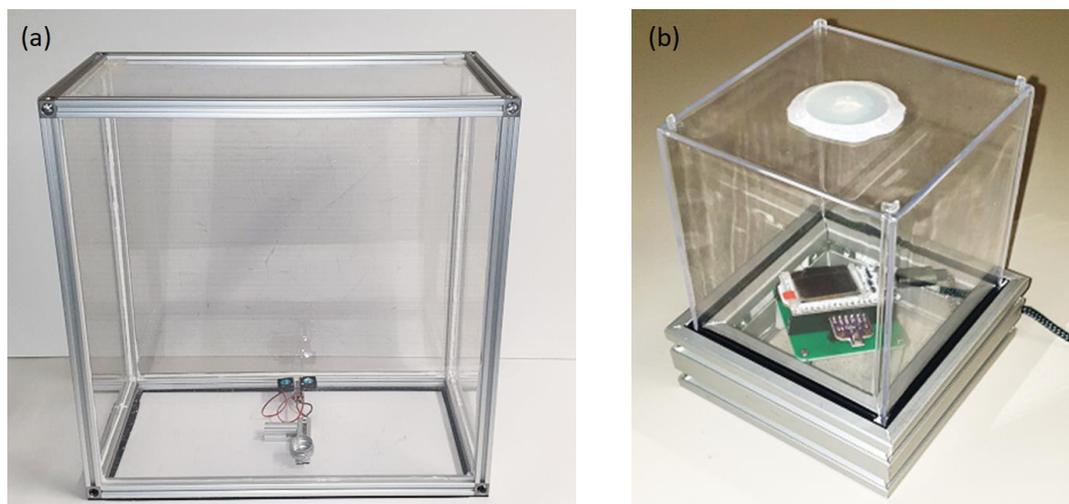
Das zweite Lernmodul erweitert das in Lernmodul 1 erarbeitete vereinfachte Sensormodell um die Komponente einer sich zyklisch ändernden Sensortemperatur. Die daraus resultierende Erzeugung von transienten Zuständen auf der Oberfläche des Sensors sorgt für eine Verbesserung der Sensitivität und Selektivität. Die Schüler erhalten in diesem Lernmodul einen Einblick in die Art und Weise einer fachgerechten Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors. Dabei wird besonderer Wert auf die Vermittlung von Wissen über das Prinzip der Aufnahme von Trainingsdaten, der anschließenden Merkmalsextraktion und der Erstellung eines mathematischen Modells mit Machine Learning inklusive Validierung des trainierten Datenmodells gelegt. Die Schüler erfahren:

- Definition des Begriffs „Kalibrierung“.
- Erklärung des Sensorverhaltens im temperaturzyklischen Betrieb durch Erweiterung des vereinfachten Sensormodells
- Prinzip der Aufnahme von Trainingsdaten und Merkmalsextraktion
- Typische Größenordnungen von Gaskonzentrationen, wie ppm und ppb
- Mathematische Modellerstellung am Beispiel der gewichteten Summe und eines ANN

### Hardware

Die für dieses Lernmodul entwickelte Hardware setzt sich aus einer (a) Gasvorratskammer und einer (b) Messkammer mit integrierter Sensorplatte zusammen, siehe Abbildung 5.27. Bei dem verwendeten Sensor handelt es sich um den SnO<sub>2</sub>-basierten MOX-Halbleiter Gassensor BME680 von Bosch Sensortec [161]. Dieser ist auf einer Adafruit-Sensorplatte integriert und kann über die Arduino-IDE mit frei verfügbaren Bibliotheken programmiert werden. In diesem Lernmodul wird

der Sensor über eine I<sup>2</sup>C-Schnittstelle mit einem ESP32 Mikrocontroller [162] angesteuert und ausgelesen.



**Abb. 5.27** Entwickelte Hardware zur Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors. Links: Gasvorratskammer mit integrierter Heizplatte und zwei Ventilatoren. Rechts: Messkammer mit integriertem Sensorboard. Der Sensor (BME680) wird über einen ESP32 Mikrocontroller über ein I<sup>2</sup>C Interface gesteuert und ausgelesen.

Der Rahmen der Gasvorratskammer sowie der Boden der Messkammer sind aus Aluminiumprofilen gefertigt. Die Scheiben bestehen aus Acrylglas. Die Gasvorratskammer und die Messkammer haben die Abmessungen 25 cm x 50 cm x 50 cm bzw. 10 cm x 10 cm x 10 cm. Zusätzlich befinden sich in der Gasvorratskammer eine Heizplatte und zwei Ventilatoren, die für eine homogene Durchmischung der Luft im Inneren sorgen. Durch Verdampfen von flüssigem Ethanol auf der Heizplatte kann eine bekannte Ethanol-Konzentration innerhalb der Gasvorratskammer erzeugt werden. An der Oberseite befinden sich wiederverschließbare Öffnungen (medizinische Septa), durch die ein definiertes Volumen des Ethanol-Luftgemisches abgesaugt und mittels einer Spritze, ebenfalls durch ein Septum an der Oberseite, in die Messkammer überführt werden kann. Dadurch wird die Konzentration weiter verdünnt. Bei einer Überführung von 1 ml verdünnt sich die Konzentration aufgrund der Abmessung der Messkammer um den Faktor 1.000. Die Sensordaten werden über ein Mikro-USB-Kabel übertragen, das bis in die Messkammer reicht und mit dem Mikrocontroller verbunden ist.

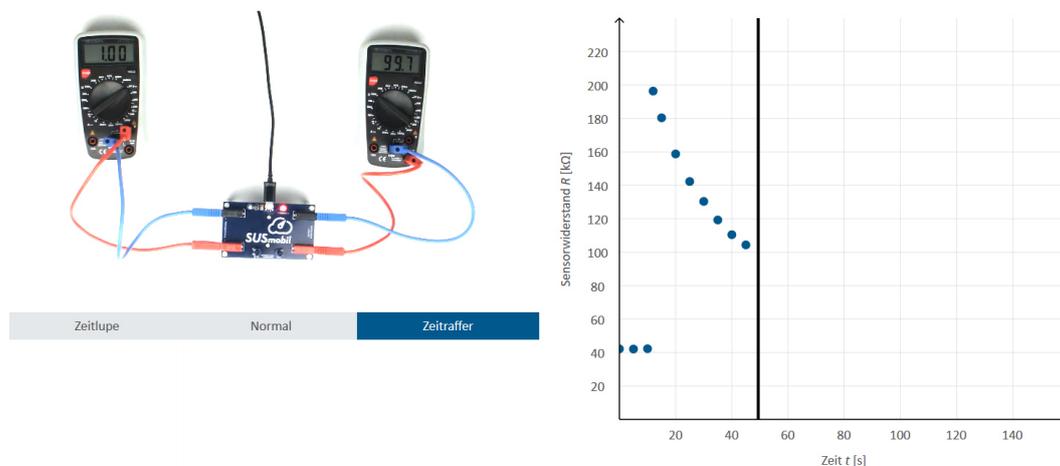
### Software

Für die Durchführung des Experiments wurde analog zu Lernmodul 1 ein HTML-basierter Selbstlernkurs entwickelt. Dieser enthält Informationen, Arbeitsaufträge, Animationen und Simulationen, wodurch die Schüler ein besseres Verständnis erhalten. Abbildung 5.28 zeigt einen beispielhaften Screenshot des Selbstlernkurses.

## Ausgleichsvorgang 2/2

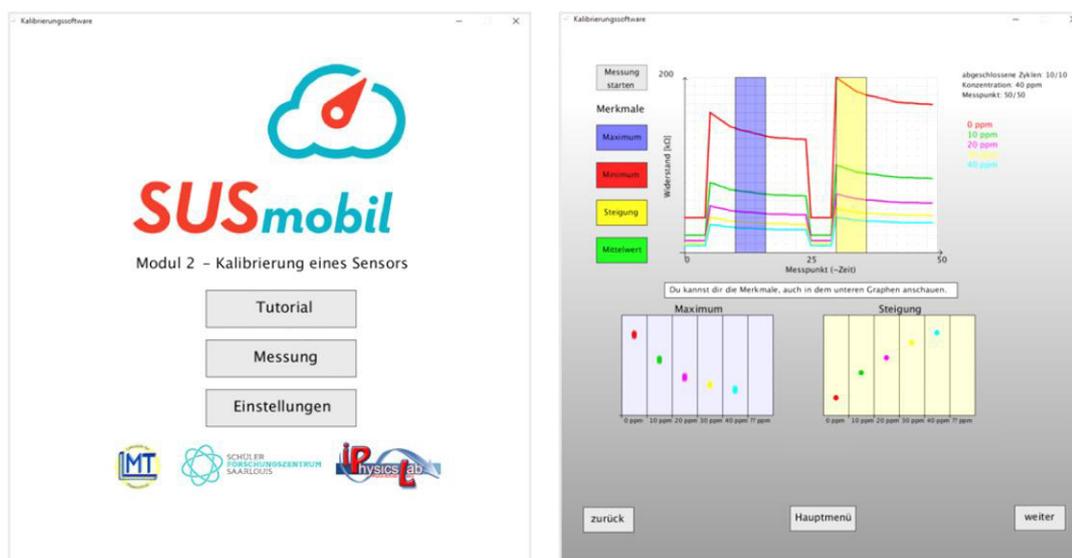
Das nächste Video knüpft an das Ende des vorherigen an. Nach 10 s wird die Heizspannung von 1,5 V zurück auf 1,0 V reduziert ( $\Delta$  Temperatursprung von ca. 175 °C auf 100 °C)

Seht euch das Video an und verfolgt den Verlauf im Diagramm.



**Abb. 5.28** Screenshot des Selbstlernkurses. Das Bild zeigt den Effekt eines abrupten Temperatursprungs auf das Sensorsignal als Video mit gleichzeitiger Visualisierung der Messdaten.

Ergänzend zum Selbstlernkurs wurde eine Kalibriersoftware entwickelt, die in der Lage ist, Trainingsdaten zu erfassen, in Echtzeit zu visualisieren und zu verarbeiten, siehe Abbildung 5.29.



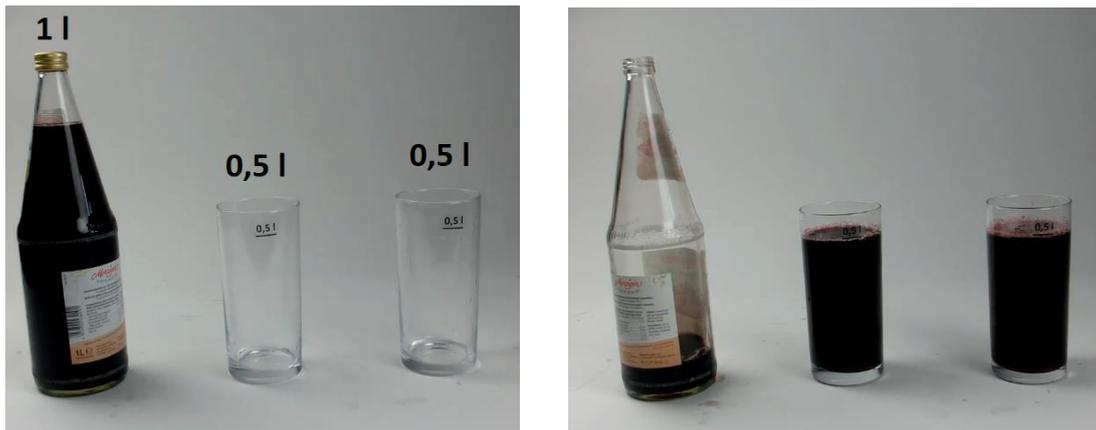
**Abb. 5.29** Screenshot der Kalibrierungssoftware. Links: Hauptmenü. Rechts: Tutorial.

Dies fördert ein besseres Verständnis dafür, welche Prozesse auf der Oberfläche des Sensors ablaufen. Die Auswirkungen unterschiedlicher Konzentrationen auf die Sensorreaktion können direkt visuell wahrgenommen werden. Neben der eigentlichen Mess-Software vermittelt ein integriertes Tutorial den Schülern die wichtigsten Funktionen der Software, die speziell auf die Bedürfnisse von Schülern abgestimmt und bewusst übersichtlich und klar gestaltet ist, um sie nicht zu überfordern. Sowohl die Mess-Software als auch der Selbstlernkurs sind Open Source und frei

verfügbar [163]. Zur Steuerung und zum Auslesen des Sensors wird eine Open-Source-Bibliothek von Adafruit verwendet [164].

### Einführung und Motivation

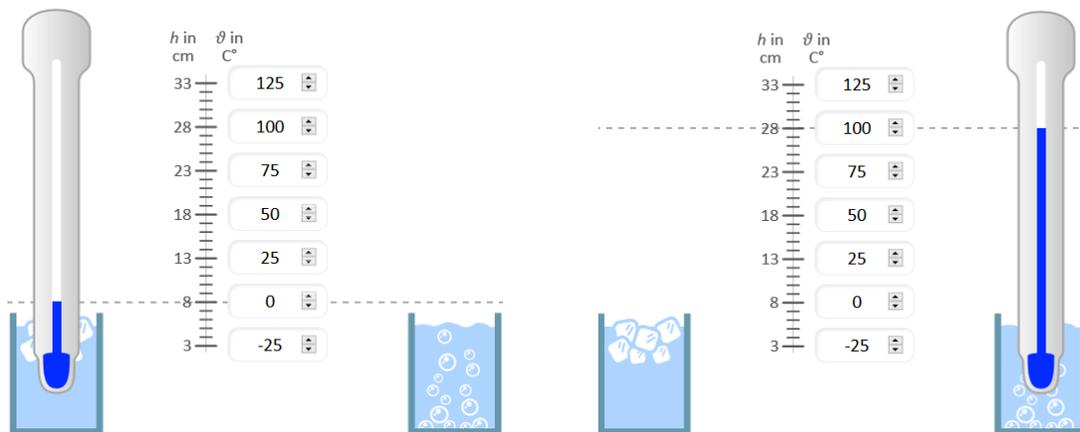
Das Lernmodul beginnt mit einem Motivationsvideo, das die Bedeutung einer Kalibrierung verdeutlicht. Dazu wird ein Video gezeigt, in welchem der Inhalt einer 1-Liter-Flasche in zwei vermeintlich 0,5 Liter fassende Gläser eingeschenkt wird, siehe Abbildung 5.30.



**Abb. 5.30** Verdeutlichung der Wichtigkeit einer Kalibrierung. Obwohl die Eichstriche an den Gläsern „0,5 l“ zeigen befindet sich nach dem Füllen der Gläser mit einer „1 l“-Falsche in dieser noch Restflüssigkeit. Die Gläser wurden falsch geeicht bzw. falsch „kalibriert“.

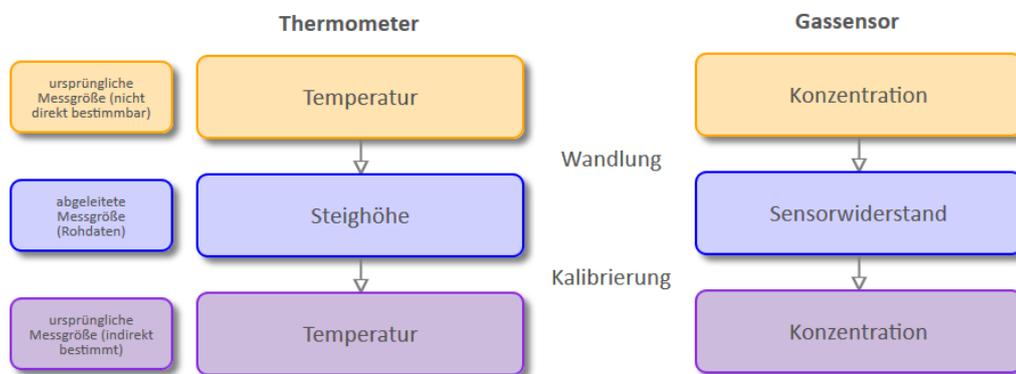
Nachdem beide Gläser bis zum Eichstrich gefüllt sind befindet sich jedoch immer noch eine Restmenge in der 1-Liter-Flasche. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich in der Flasche tatsächlich 1 Liter befindet. Daher müssen die Eichstriche an den Gläsern falsch gesetzt sein – die Gläser wurden falsch kalibriert. Dieses Beispiel zeigt, dass auch im alltäglichen Leben eine fachgemäße Kalibrierung von großer Bedeutung ist.

Um einen intuitiven Zugang zum Thema Kalibrierung zu bekommen, sollen die Schüler anschließend selbst eine Kalibrierung am Beispiel eines virtuellen Füllstandsthermometers vornehmen, siehe Abbildung 5.31. Dazu bewegen sie das virtuelle Thermometer nacheinander in zwei Gefäße, die jeweils mit Eiswasser und siedenden Wasser gefüllt sind und per Definition die Temperaturen  $0^{\circ}\text{C}$  und  $100^{\circ}\text{C}$  haben. Die Flüssigkeitssäule innerhalb des Thermometers passt daraufhin seine Höhe an die Temperatur an, wodurch eine Zuordnung zwischen Höhe  $h$  und Temperatur  $\vartheta$  möglich ist. Da die Ausdehnung der Flüssigkeitssäule proportional zu dessen Temperatur ist, können weitere Temperaturen linear interpoliert und als Markierung auf das Thermometer im Selbstlernkurs ergänzt werden.



**Abb. 5.31** Kalibrierung eines virtuellen Füllstandthermometers. Links: Thermometer in Eiswasser. Rechts: Thermometer in siedendem Wasser.

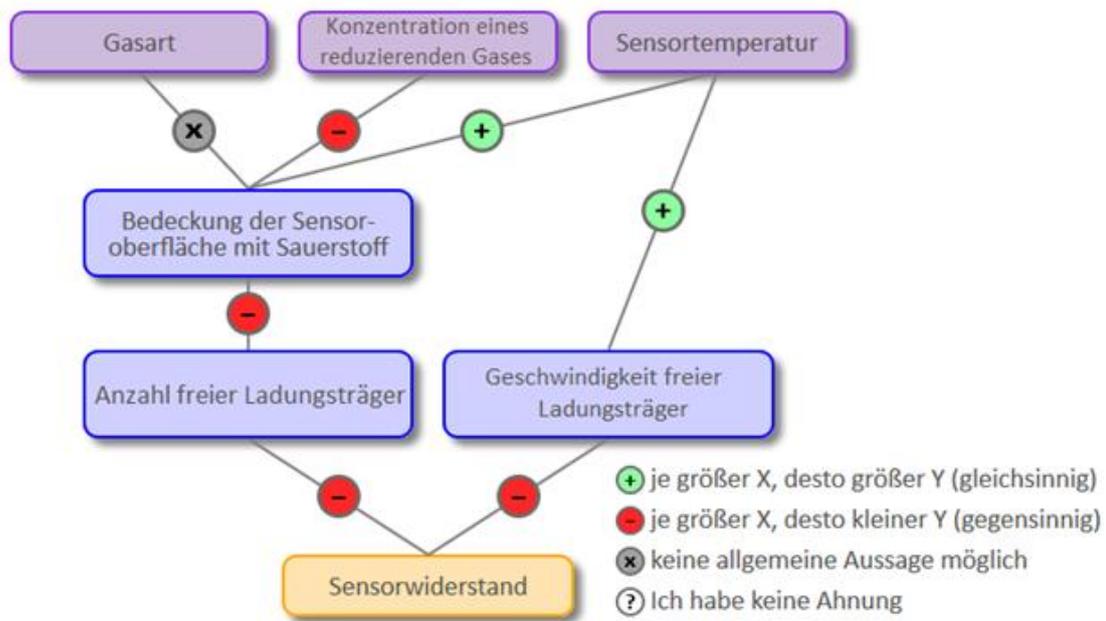
Anhand dieses Beispiels wird das Prinzip einer Kalibrierung verdeutlicht. Eine nicht direkt bestimmbare Größe, wie die Temperatur  $\vartheta$  oder eine Gaskonzentration  $c$ , muss zunächst in eine messbare Größe gewandelt werden. Im Falle eines Füllstandthermometers ist dies die Wandlung in die Größe „Steighöhe“  $h$ , bei MOX-Halbleiter Gassensoren geschieht dies über die Messung des Sensorwiderstands  $R$ . Die anschließende Zuordnung der messbaren Größe (Steighöhe, Sensorwiderstand) zu der ursprünglich nicht messbaren Größe (Temperatur, Gaskonzentration) wird dann als „Kalibrierung“ bezeichnet, siehe Abbildung 5.32.



**Abb. 5.32** Analogie zwischen der Kalibrierung eines Thermometers und eines MOX-Halbleiter Gassensors. Die ursprüngliche, nicht direkt bestimmbare Messgröße (Temperatur, Gaskonzentration) wird in eine messbare Größe gewandelt. Die anschließende Rücktransformation wird als Kalibrierung bezeichnet.

### Wiederholung und Erweiterung des vereinfachten Sensormodells

Im nächsten Kapitel des Selbstlernkurses werden die Komponenten und Hauptaussagen des vereinfachten Sensormodells wiederholt und um die Effekte einer abrupten Temperaturänderung erweitert. Die Wiederholung des vereinfachten Sensormodells erfolgt in einer Zuordnungsaufgabe. In dieser sollen die Schüler entscheiden, welchen Einfluss bestimmte Modellgrößen aufeinander haben, siehe Abbildung 5.33.



**Abb. 5.33** Wiederholung des vereinfachten Sensormodells. Die Schüler müssen entscheiden, ob der Einfluss einer Größe X auf eine andere Größe Y gleichsinnig, gegensinnig oder ob keine allgemeine Aussage möglich ist.

Dazu haben sie die Aufgabe, Sätze in der Form „je größer X, desto größer/kleiner Y“ zu formulieren, um so zu entscheiden ob zwei Größen sich gleichsinnig oder gegensinnig ändern, oder ob keine allgemeine Aussage möglich ist. Die richtigen Lösungen sowie deren Begründungen sind in Tabelle 5.4 aufgeführt.

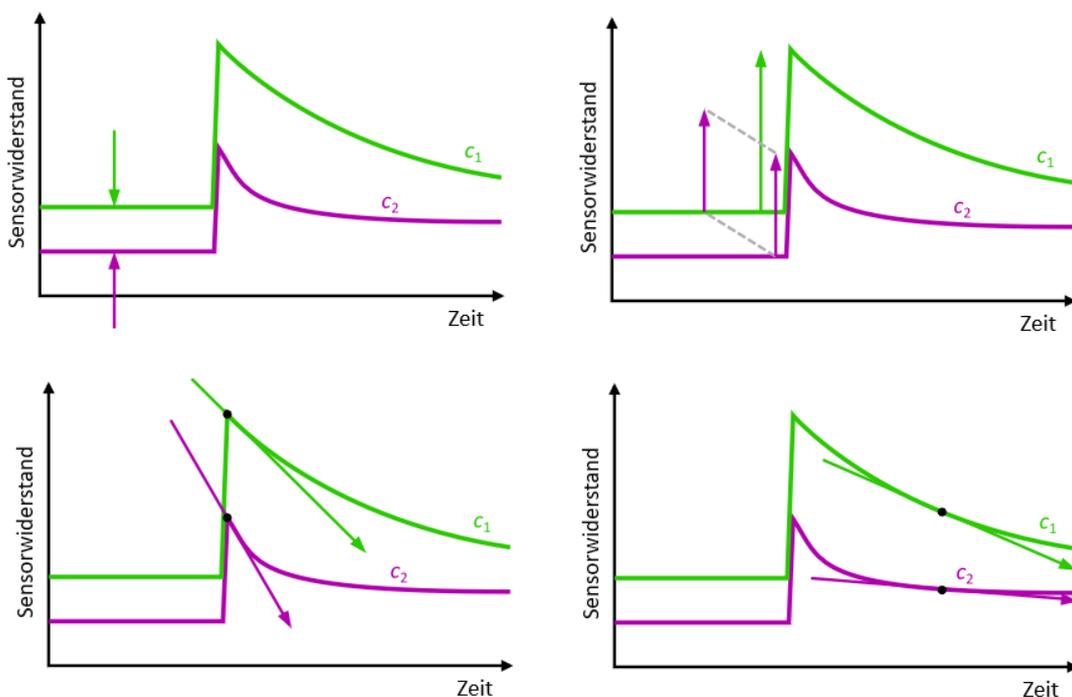
Im Anschluss an diese Aufgabe beobachten und beschreiben die Schüler das Sensorverhalten nach einer abrupten Änderung der Sensortemperatur von ca. 175°C auf ca. 100°C und vice versa, welches in einem Video demonstriert wird. Bereits im ersten Lernmodul haben die Schüler gelernt, dass die Sensortemperatur ein entscheidender Faktor für der Sensorreaktion ist. Dieses Prinzip wird nun aufgegriffen und um eine zyklische Änderung der Sensortemperatur erweitert. Diese Variation sorgt für transiente Zustände auf der Sensoroberfläche und bildet die Grundlage des temperaturzyklischen Betriebs, durch den die Sensitivität und Selektivität um ein Vielfaches gesteigert werden kann [102].

Zuordnung	Zusammenhang	Begründung
Gasart – Bedeckung der Sensoroberfläche mit Sauerstoff		Reduzierende und oxidierende Gase haben einen anderen Einfluss auf die Oberflächenbedeckung mit Sauerstoff.
Konzentration eines reduzierenden Gases - Bedeckung der Sensoroberfläche mit Sauerstoff		Durch eine erhöhte Gaskonzentration ist es wahrscheinlicher, dass reduzierende Gasmoleküle eine Bindung mit dem Sauerstoff eingehen und diesen dadurch von der Sensoroberfläche lösen.
Sensortemperatur - Bedeckung der Sensoroberfläche mit Sauerstoff		Eine erhöhte Sensortemperatur sorgt für eine höhere Reaktionswahrscheinlichkeit des Sauerstoffs mit der Sensoroberfläche.
Bedeckung der Sensoroberfläche mit Sauerstoff – Anzahl freier Ladungsträger		Sauerstoffmoleküle binden freie Ladungsträger.
Sensortemperatur – Geschwindigkeit der freien Ladungsträger		Die Geschwindigkeit der freien Ladungsträger steigt monoton mit der Sensortemperatur.
Anzahl freier Ladungsträger - Sensorwiderstand		Je mehr freie Ladungsträger vorhanden, desto größer ist der Stromfluss. Dieser ist invers proportional zum Sensorwiderstand.
Geschwindigkeit der freien Ladungsträger - Sensorwiderstand		Je höher die Geschwindigkeit der freien Ladungsträger ist, desto größer ist der Stromfluss. Dieser ist invers proportional zum Sensorwiderstand.

**Tab. 5.4** Musterlösung der Aufgabe zur Wiederholung der Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors. Legende:  = „keine allgemeine Aussage möglich“,  = „je größer X, desto größer Y“,  = „je größer X, desto kleiner Y“.

### Bestimmung besonderer Merkmale

Um die unterschiedlichen Widerstandskurven in Anwesenheit unterschiedlicher Konzentrationen eines reduzierenden Gases zu quantifizieren wird das Konzept der Merkmalsextraktion präsentiert. Abbildung 5.34 zeigt einen prinzipiellen Widerstandsverlauf in Anwesenheit eines reduzierenden Gases mit zwei unterschiedlichen Konzentrationen  $c_1$  und  $c_2$  und die beispielhafte Bestimmung besonderer Merkmale, um die Kurven zu unterscheiden. Diese können beispielsweise der Widerstand kurz vor einem Temperatursprung, die Änderung des Widerstands kurz nach einem Temperatursprung, die Steigung der Kurven direkt nach einem Temperatursprung oder die Steigung der Kurven eine gewisse Zeit nach einem Temperatursprung sein.



**Abb. 5.34** Bestimmung besonderer Merkmale zur Quantifizierung der Kurvenverläufe in Anwesenheit unterschiedlicher Gaskonzentrationen  $c_1$  und  $c_2$ . V.l.o.n.r.u.: Widerstand kurz vor einem Temperatursprung, Änderung des Widerstands kurz nach einem Temperatursprung, Steigung der Kurven kurze Zeit nach einem Temperatursprung.

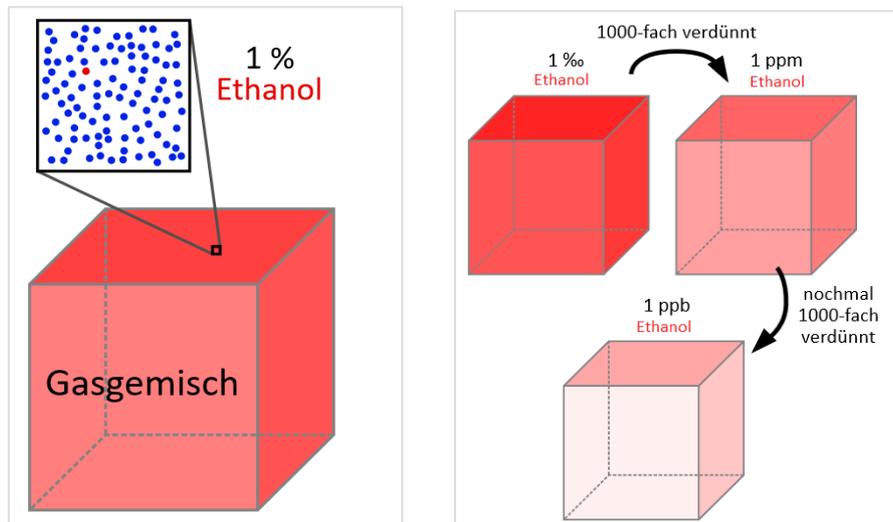
Um die Schüler nicht zu überfordern, werden im weiteren Verlauf des Moduls lediglich die vier Merkmale Maximum, Minimum, Mittelwert und Steigung innerhalb eines definierten Messintervalls berücksichtigt. Anhand einer beispielhaften Messkurve sollen die Schüler diese Merkmale nun manuell in einem vorgegebenen Messintervall bestimmen.

### Konzentration – was ist das?

In dem folgenden Experiment wird der Sensor auf Ethanol im Konzentrationsbereich zwischen 0 und 40 ppm kalibriert. Typischerweise kennen die Schüler nur Konzentrationswertebereiche wie Prozent, z.B. von alkoholischen Getränken in der flüssigen Phase, oder Promille bei der Atemalkoholkonzentration in der Gasphase. Um eine Vorstellung von noch kleineren Konzentrationswertebereichen zu vermitteln, wird der Begriff "Konzentration" als Teilchenanteil am Beispiel eines Ethanol-Luft-Gemischs eingeführt, siehe Abbildung 5.35, links. Die Ethanol-Konzentration  $c$  in einem Volumen  $V$  ist dann definiert als

$$c = \frac{\text{Teilchenzahl des Ethanols im Volumen } V}{\text{Gesamtteilchenzahl im Volumen } V} \quad (5.16)$$

Ein wichtiger Punkt hierbei ist die Vermittlung, dass die Konzentration  $c$  eines Gasgemischs unabhängig vom betrachteten Volumen ist.



**Abb. 5.35** Links: Konzentration als Teilchenanteil. Rechts: „Promille“ (‰), „parts per million“ (ppm) und „parts per billion“ (ppb) als Konzentrationseinheiten.

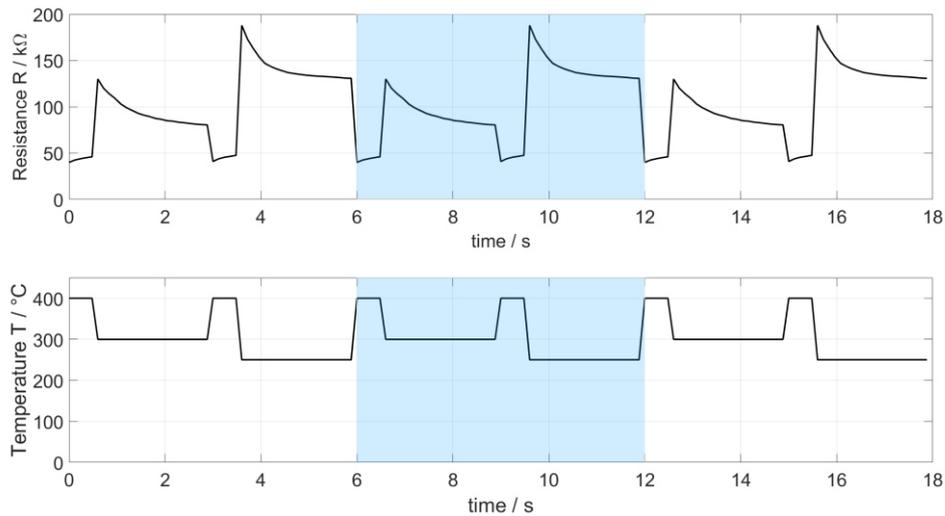
Unterstützt durch angeleitete Berechnungen und Abbildungen werden den Schülern die weiteren relevanten Konzentrationseinheiten "ppm" (parts per million,  $10^{-6}$ ) und "ppb" (parts per billion,  $10^{-9}$ ) vorgestellt, in denen häufig Schadstoff- und Treibhausgaskonzentrationen angegeben werden, siehe Abbildung 5.35, rechts.

Als vorbereitende Aufgabe sollen die Schüler nun berechnen, wie hoch die Ethanol-Konzentration in der Gasvorratskammer ist, wenn 2 ml flüssiges Ethanol zum Verdampfen gebracht werden. Außerdem sollen sie berechnen, um wieviel ppm sich die Konzentration in der Messkammer erhöht, sobald 1 ml des Ethanol-Luft-Gemischs aus der Gasvorratskammer in die Messkammer überführt wird. Als Lösung erhalten die Schüler, dass sich die Konzentration in der Messkammer jedes Mal um ca. 10 ppm erhöht, sobald 1 ml des Ethanol-Luft-Gemischs aus der Gasvorratskammer in die

Messkammer überführt wird. Die genauen Berechnungen befinden sich im Anhang dieser Arbeit (vgl. I.2).

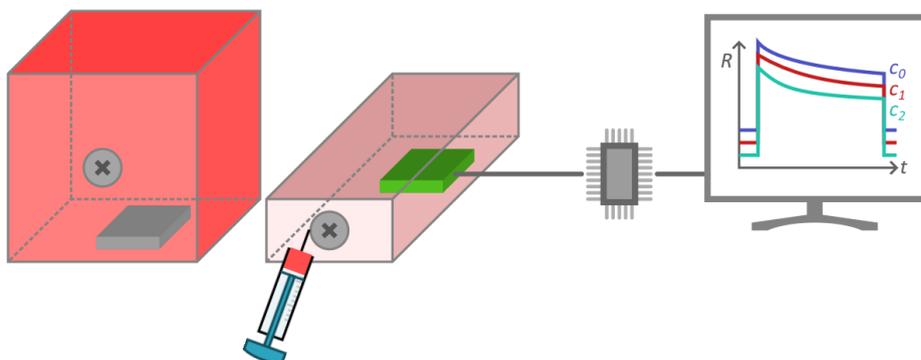
### Versuchsdurchführung

Im Anschluss an den theoretischen Teil nehmen die Schüler Trainingsdaten für fünf unterschiedliche Ethanol-Konzentrationen im Bereich 0 – 40 ppm auf. Dazu wird ein einfacher Temperaturzyklus bestehend aus jeweils zwei hohen (400 °C) und zwei niedrigen Temperaturen (250 °C und 300 °C) verwendet, siehe Abbildung 5.36.



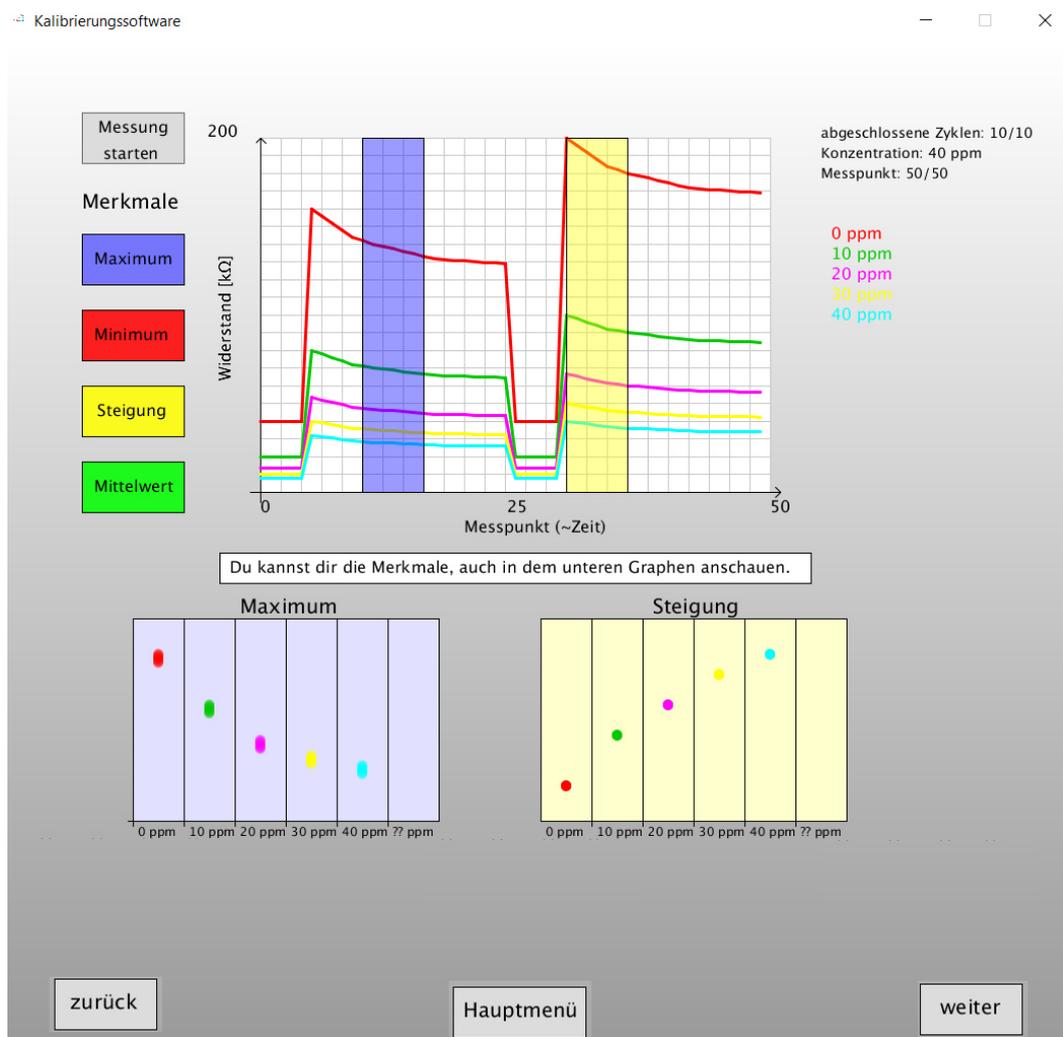
**Abb. 5.36** Temperaturzyklischer Betrieb. Der blaue Bereich markiert einen Zyklus. Oben: Typische Sensorreaktion in Luft. Unten: Temperaturzyklus mit zwei Hochtemperatur-Plateaus bei 400°C und zwei verschiedenen Tieftemperatur-Plateaus bei 300 °C bzw. 250 °C.

Der Ablauf der Versuchsdurchführung ist in Abbildung 5.37 dargestellt. Flüssiges Ethanol wird in der Gasvorratskammer verdampft und erzeugt eine bekannte Ethanol-Konzentration. Durch die Entnahme von 1 ml des Ethanol-Luft-Gemischs aus der Gasvorratskammer und Überführung in die Messkammer wird diese Konzentration verdünnt, sodass die Konzentration in der Messkammer schrittweise um ca.10 ppm erhöht werden kann.



**Abb. 5.37** Schematischer Versuchsaufbau für die Kalibrierung eines MOX-Halbeliter Gassensors auf verschiedene Ethanol-Konzentrationen. V.l.n.r.: Gasvorratskammer, Messkammer mit Spritze, Mikrocontroller, Kalibriersoftware.

Die Aufnahme der Trainingsdaten erfolgt mit Hilfe einer Kalibrierungssoftware. Für jede Konzentration innerhalb der Messkammer werden 10 Zyklen aufgenommen. Nachdem alle Zyklen einer Konzentration gemessen wurden, wird der durchschnittliche Zyklus in der Software angezeigt. Nach der Erfassung aller Trainingsdaten wählen die Schüler zwei charakteristische Merkmale aus, die es ermöglichen, die unterschiedlichen Gaskonzentrationen anhand der Zyklen zu unterscheiden. Dazu können sie zwei Bereiche bestimmen, in denen jeweils eines der Merkmale „Maximum“, „Minimum“, „Mittelwert“ und „Steigung“ berechnet wird. Eine Vorschau der berechneten Merkmale in Abhängigkeit von den Konzentrationen ist in Diagrammen unterhalb der Rohdaten dargestellt, siehe Abbildung 5.38.

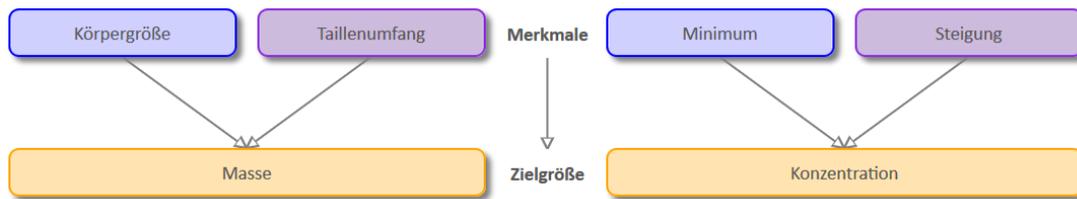


**Abb. 5.38** Aufnahme von Trainingsdaten und Bestimmung besonderer Merkmale. Oben: Mittlere Muster der Sensorantwort bei bestimmten Konzentrationen. Unten: Vorschau von zwei ausgewählten Merkmalen aus verschiedenen Bereichen des Zyklus.

Sobald die Schüler mit ihrer Wahl zufrieden sind, können sie die Merkmale und die Informationen zu den jeweiligen Konzentration in einer JavaScript-Datei speichern, die dann innerhalb des HTML-Kurses zum Training eines einfachen ANN verwendet wird.

### Modellerstellung und -validierung

Die berechneten Merkmale werden automatisch in den HTML-Kurs geladen und graphisch dargestellt. Das Ziel der Erstellung eines Datenmodells ist es nun, einen mathematischen Zusammenhang zwischen den Merkmalen und der dazugehörigen Gaskonzentration zu finden. Das Prinzip dieser Modellerstellung wird den Schülern anhand eines intuitiven Beispiels erläutert: Ist es möglich die Masse ( $M$ ) einer Person anhand der Körpergröße ( $K$ ) und des Taillenumfangs ( $T$ ) zu bestimmen? Abbildung 5.39 illustriert die Analogie der Modellbildung anhand des Alltagsbeispiels und der Kalibrierung eines Gassensors.



**Abb. 5.39** Zuordnung besonderer Merkmale zu einer Zielgröße und Erstellung eines mathematischen Modells. Analogie der mathematischen Modellerstellung für ein Alltagsbeispiel (links) und für die Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors (rechts).

Eine der einfachsten Möglichkeiten, einen mathematischen Zusammenhang zwischen Merkmalen und Zielgröße auszudrücken, ist die gewichtete Summe mit zwei Gewichtungsfaktoren  $g_1$  und  $g_2$ :

$$M = g_1 \cdot K + g_2 \cdot T \tag{5.17}$$

Die Schüler erhalten einen imaginären Datensatz bestehend aus fünf Masse-, Körpergrößen- und Taillenumfang-Werten. Die Gewichtungsfaktoren der linearen Modellgleichung müssen nun auf diesen Trainingsdatensatz angepasst werden, siehe Abbildung 5.40.

Masse [kg]	Körpergröße [cm]	Taille [cm]	
60	159	66	I
70	168	70	II
80	178	77	III
90	184	87	IV
100	187	104	V

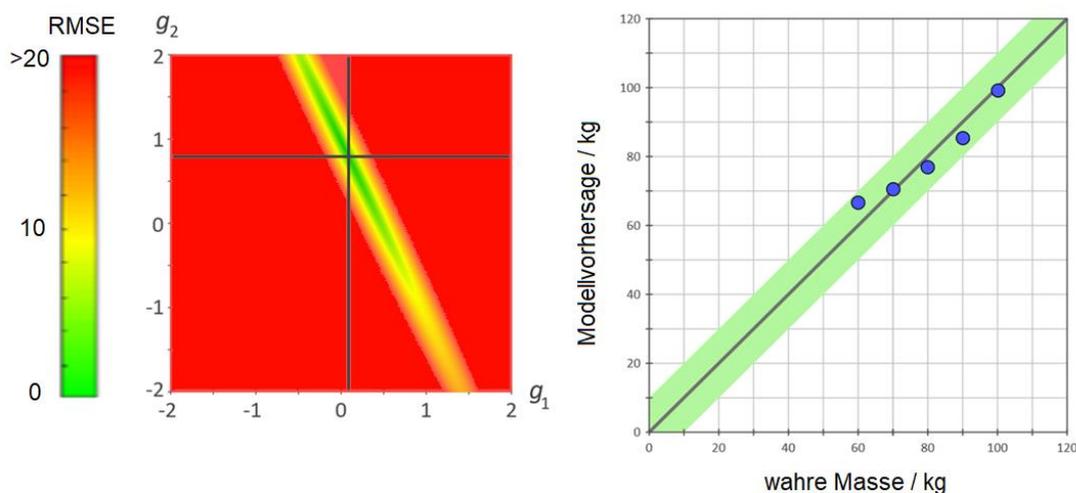
Daten in Modell -	60 = $g_1 \cdot 159 + g_2 \cdot 66$
→	70 = $g_1 \cdot 168 + g_2 \cdot 70$
gleichung einsetzen	80 = $g_1 \cdot 178 + g_2 \cdot 77$
	90 = $g_1 \cdot 184 + g_2 \cdot 87$
	100 = $g_1 \cdot 187 + g_2 \cdot 104$

Löse das Gleichungssystem

**Abb. 5.40** Links: Trainingsdatensatz bestehend aus fünf Masse-, Körpergrößen- und Taillenumfang-Werten. Rechts: Resultierendes lineares Gleichungssystem mit zwei unbekanntem Gewichtungsfaktoren. Dieses ist überbestimmt und besitzt im Allgemeinen keine Lösung.

Dazu erstellen die Schüler ein lineares Gleichungssystem bestehend aus fünf Gleichungen und zwei Unbekannten. Dieses System ist überbestimmt und besitzt daher im Allgemeinen keine Lösung. Jedoch ist es möglich, die Gewichtungsfaktoren so anzupassen, dass die mittlere quadratische Abweichung minimiert wird. Diese

Lösung wird als „am wenigsten falsche Lösung“ bezeichnet. In einem in den Selbstlernkurs integrierten Applet können die Schüler durch Variation der Gewichtungsfaktoren nach dieser Lösung suchen. Sie erhalten ein direktes grafisches Feedback für die Vorhersage des Datenmodells mit den entsprechenden Faktoren, siehe Abbildung 5.41. Jede Kombination von Gewichtungsfaktoren, die zu einem RMSE von weniger als 5 kg führt, wird akzeptiert und erlaubt es den Schülern, mit dem Selbstlernkurs fortzufahren.



**Abb. 5.41** Links: Ermittlung der optimalen Kombination von Gewichtungsfaktoren. Rechts: Vorhersage des Datenmodells als Vorschau.

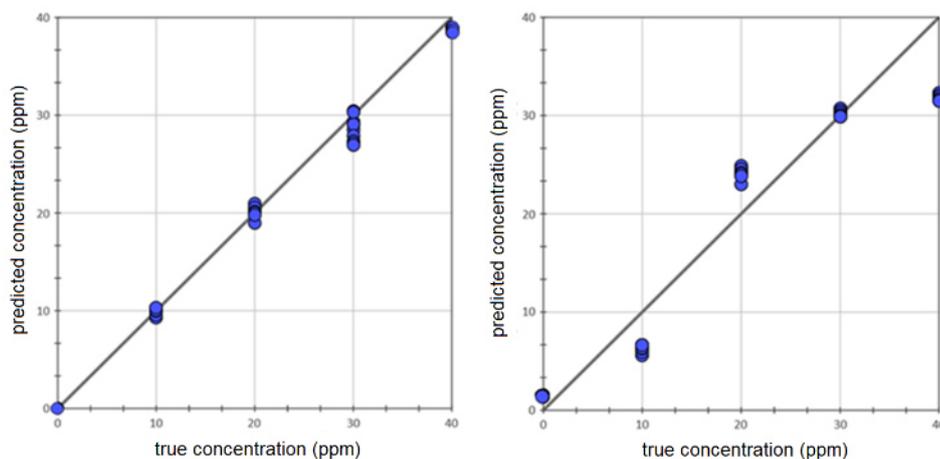
Abschließend werden die Schüler gebeten, das resultierende Datenmodell zu „validieren“, indem sie ihren Taillenumfang und ihre Körpergröße mit einem Maßband messen und diese Werte in das Datenmodell geben. Dieses liefert in der Regel nur unbefriedigende Vorhersagen, weshalb die Schüler gebeten werden, Vorschläge zur Optimierung des mathematischen Modells zu machen. Mögliche Antworten sind beispielsweise:

- Vergrößerung des Trainingsdatensatzes
- Sammeln von repräsentativeren Trainingsdaten
- Verwenden anderer, möglicherweise repräsentativerer Merkmale
- Verwenden eines komplexeren und/oder theoriebasierten mathematischen Modells

Ein Beispiel für ein komplexeres mathematisches Modell ist ein ANN, welches beispielsweise durch „k-fold cross validation“ validiert werden kann. Ein solches wird im Folgenden für die Erstellung des Kalibrierungsmodells des Gassensors auf Ethanol verwendet. Aufgrund der Komplexität des Funktionsprinzips eines ANN wird diese Theorie im Kurs nicht genauer behandelt. Es werden jedoch Analogien zwischen dem Trainingsprozess eines ANN und der Bestimmung der optimalen Kombination von Gewichtungsfaktoren am Beispiel zur Gewichtsvorhersage diskutiert. In beiden Fällen

werden die Gewichtungsfaktoren angepasst und variiert, bis eine nahezu optimale Kombination gefunden ist.

Die Schüler können den Lernprozess des ANN auf der Grundlage ihrer Merkmale in Echtzeit verfolgen. Das Training, das auf dem Standard-Backpropagation-Algorithmus basiert, stoppt automatisch nach 10.000 Iterationen. In der Regel gelingt es dem ANN aufgrund der geringen Menge an Trainingsdaten schließlich, ein nahezu optimales mathematisches Modell zu finden. Bei ungeeigneten Merkmalen dauert dieser Prozess jedoch tendenziell länger, was zu größeren Abweichungen in der Vorhersage führt, siehe Abbildung 5.42. Dadurch erhalten die Schüler, die zuvor geeignetere Merkmale bestimmt haben eine bessere Modellvorhersage. Nach Ablauf des Trainingsprozesses können die Schüler ihre mathematischen Modelle, Merkmale und Trainingsdaten miteinander vergleichen.



**Abb. 5.42** Vorhersage der Gaskonzentration mit Hilfe eines ANN nach 10.000 Trainingsiterationen mit mehr (links) und weniger (rechts) geeigneten Merkmalen. Die schwarze Linie zeigt das ideale mathematische Modell an.

Den Abschluss dieses Lernmoduls bildet die Bestimmung einer unbekannt Konzentration mit Hilfe des erstellten mathematischen Modells. Dazu wird eine unbekannt Konzentration in die Messkammer gegeben und erneut ein Temperaturzyklus in der Kalibrierungssoftware aufgenommen. Dieses berechnet dann automatisch die entsprechenden Merkmale in den gewählten Bereichen des Zyklus. Die Merkmale können nun in das mathematische Modell gegeben und so die unbekannt Konzentration bestimmt werden.

### Fazit

Das zweite Lernmodul zeigt den Schülern die Wichtigkeit einer fachgemäßen Kalibrierung auf. Die Schüler kalibrieren einen MOX-Halbleiter Gassensor auf unterschiedliche Ethanol-Konzentrationen und führen eine Kalibrierungsroutine selbstständig durch. Das in Lernmodul 1 eingeführte vereinfachte Sensormodell wird um den Faktor einer variablen Temperatur erweitert und bildet somit die Grundlage

für einen temperaturzyklischen Betrieb zur Steigerung der Sensitivität des Sensors. Die Schüler erstellen ihr eigenes Kalibrierungsmodell auf Basis eines ANN und bestimmen damit eine unbekannte Ethanol-Konzentration.

### 5.6.3 Lernmodul 3 – Umweltmesstechnik

Nachdem in Lernmodul 1 und 2 die Funktionsweise und die Kalibrierung von MOX-Halbleiter Gassensoren zur Messung von VOCs behandelt wurde, liegt das Hauptaugenmerk in Lernmodul 3 auf der Messung von Luftqualitätsparametern und der Interpretation von Messergebnissen. Dazu gehören neben VOCs auch CO<sub>2</sub> als Indikatorgas für schlechte Luftqualität sowie Feinstaub. Neben der Messung dieser Stoffe erlangen die Schüler in dem Lernmodul auch Wissen über deren gesundheitsschädlicher Auswirkungen sowie Grenzwerte. Das Lernmodul ist nach einer Einführungsphase, in der allgemeine Informationen über Schadstoffe vermittelt werden, in vier Stationen aufgeteilt. Jede Station enthält zwei Aufgabenteile. Diese befassen sich thematisch mit jeweils einem Sensorprinzip, wie der Absorption von Licht zur Messung von CO<sub>2</sub> oder dem Prinzip der Lichtstreuung zur Messung von Feinstaub. Begleitet wird das Lernmodul durch eine Broschüre, in der Arbeitsaufträge und zusätzliche Informationen zu den Stationen zu finden sind, sowie eine interaktive Mess-Software, die unter anderem Messdaten visualisieren kann und Zusatzinformationen zu Schadstoffen enthält.

#### **Lernziele**

Das dritte Lernmodul legt den Fokus auf den Messprozess und die Interpretation von Messwerten am Beispiel der Luftqualität in Innenräumen. Die Schüler führen eigene Messungen durch, die direkten Bezug zu ihrem Alltag haben, und lernen Strategien zur Vermeidung schlechter Luftqualität kennen.

Die Schüler erfahren:

- Arten von Luftschadstoffen, wie Feinstaub, VOCs und CO<sub>2</sub> als Indikator für Luftqualität
- Grenzwerte und Quellen von Luftschadstoffen
- Auswirkungen von Luftschadstoffen auf die Gesundheit
- Strategien zur Vermeidung schlechter Luftqualität
- Funktionsprinzip von NDIR CO<sub>2</sub> Sensoren
- Funktionsprinzip von auf Lichtstreuung basierenden Feinstaubsensoren
- Vergleich zwischen herkömmlichen und emissionsarmen Alltagsprodukten, die beispielsweise mit dem Label „Blauer Engel“ gekennzeichnet sind

### Hardware

Zur Durchführung dieses Lernmoduls wurde eine Messplatine entwickelt, die mit VOC-, CO<sub>2</sub>, Feinstaub-, Temperatur-, und Luftfeuchte-Sensoren bestückt ist, siehe Abbildung 5.43. Bei diesen handelt es sich um die SGP30 (TVOC, [165]), SCD30 (CO<sub>2</sub>, Temperatur Luftfeuchte, [118]) und SPS30 (Feinstaub PM<sub>2.5</sub> und PM<sub>10</sub>, [126]) der Firma Sensirion . Die Sensoren wird über eine I<sup>2</sup>C-Schnittstelle mit einem ESP8266 NodeMCU v3 Mikrocontroller [166] angesteuert und ausgelesen. Die Programmierung erfolgt über die Arduino IDE mit frei verfügbaren Bibliotheken von Adafruit [167] [168] [169]. Über ein Mikro-USB Kabel werden die Daten an eine entwickelte Messsoftware gesendet.



Abb. 5.43 Links: Entwickelte Messplatine, bestückt mit dem TVOC Sensor SGP30, dem CO<sub>2</sub> Sensor SCD30 und dem Feinstaubsensor SPS30. Rechts: Sensoren und Messgrößen.

Zusätzlich zur Platine wird das Lernmodul durch eine Broschüre unterstützt, die Arbeitsaufträge und Zusatzinformationen enthält, siehe Abbildung 5.44, (vgl. I.3).

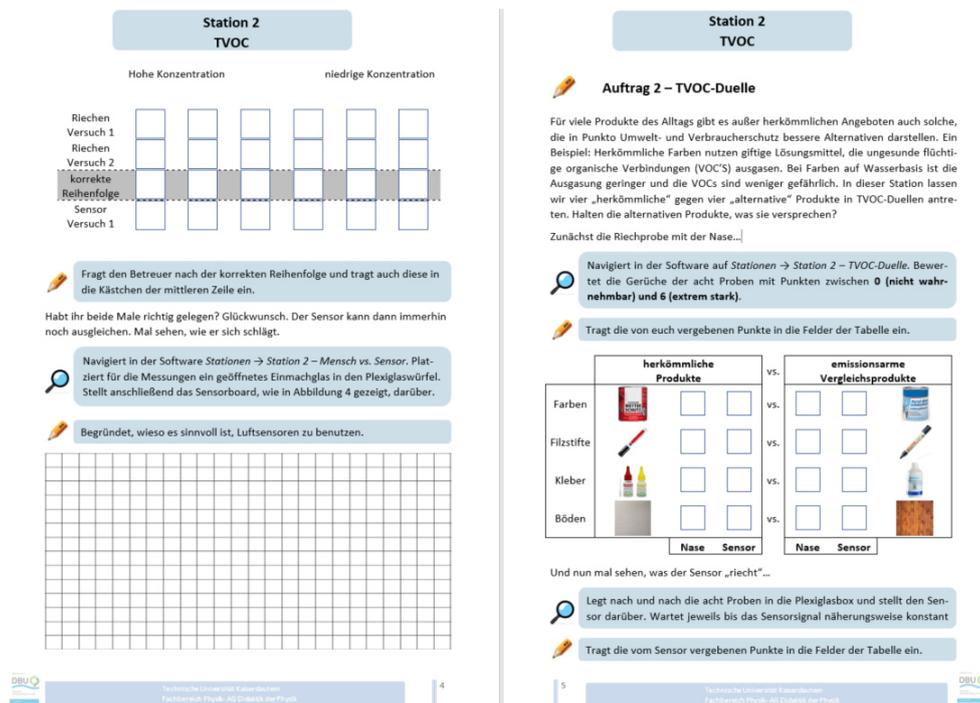


Abb. 5.44 Doppelseite der unterstützenden Broschüre.

## Software

Die Visualisierung der Messdaten erfolgt über eine dafür entwickelte Mess-Software. Diese enthält neben der einfachen Darstellung von Sensordaten über Zeit oder gegeneinander auch ein integriertes Tutorial und detaillierte Anleitungen zu den einzelnen Stationen. Der Aufbau dieser Software ist in Abbildung 5.45 dargestellt.

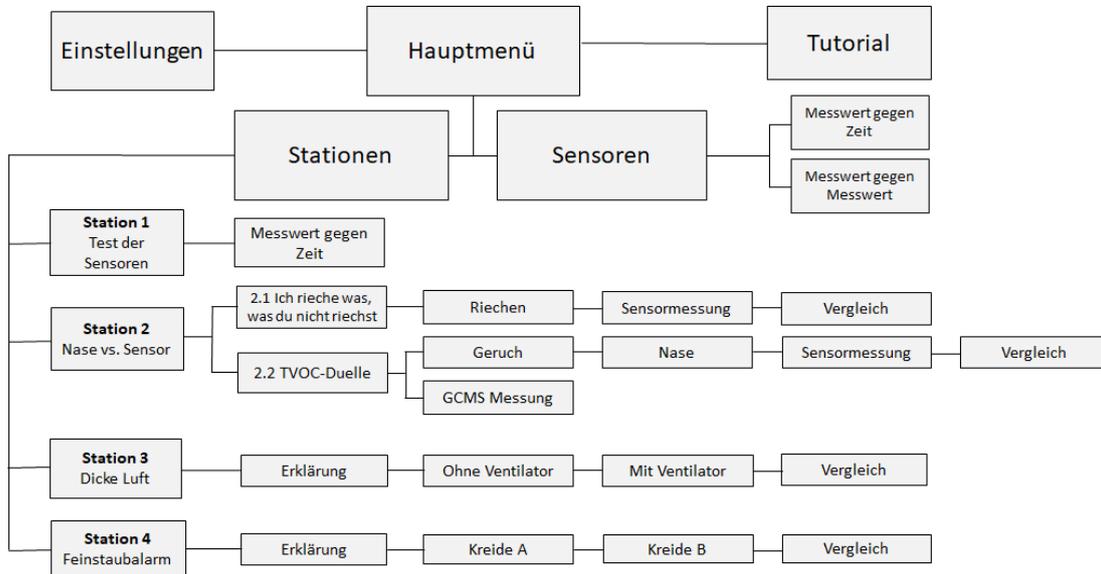


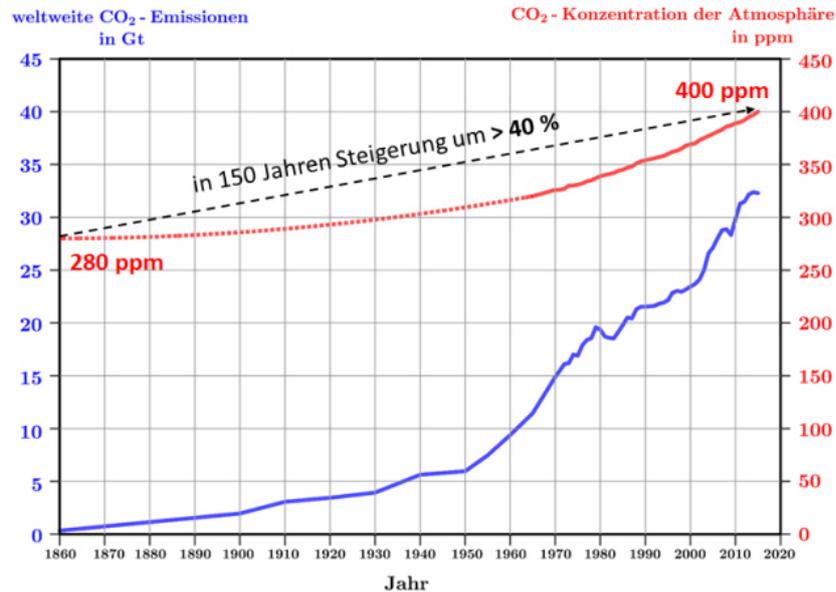
Abb. 5.45 Aufbau der Mess-Software.

Programmiert wurde die Software mit der an Java angelehnten, objektorientierten Programmiersprache Processing [170]. Über eine serielle Schnittstelle werden die Sensordaten ausgelesen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit Befehle an den Mikrocontroller zu senden, um beispielsweise die Baseline des SGP30 und des SCD30 festzulegen oder das Messintervall zu variieren. Aufgenommene Sensordaten werden beim Beenden des Programms automatisch wahlweise als .csv- oder .txt-Datei abgespeichert. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Daten automatisch jede Minute, Stunde oder jeden Tag zu speichern, wodurch auch ein Dauerbetrieb möglich ist.

## Einführung und Motivation

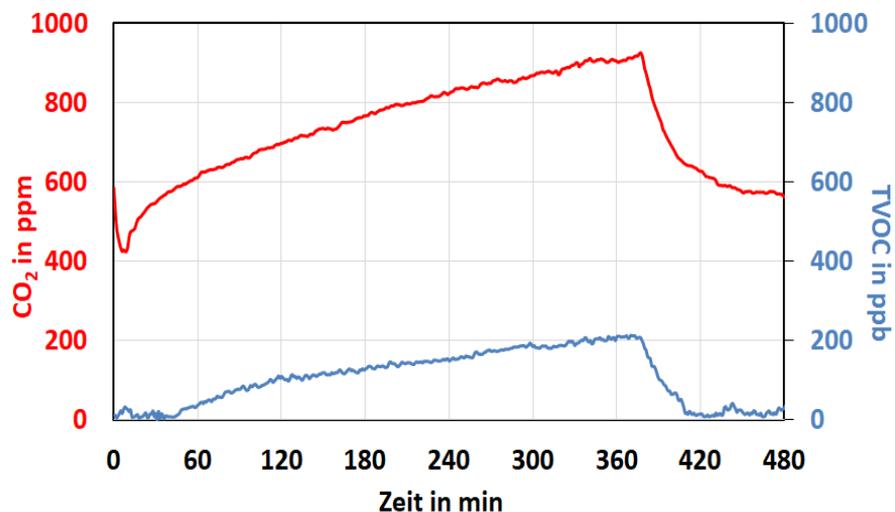
Zunächst erhalten die Schüler in einem Video einen Einblick in die relevanten Messgrößen der Luftqualität (CO<sub>2</sub>, TVOC und Feinstaub). Zu jeder Messgröße werden Quellen, gesundheitliche Gefahren, Grenzwerte und Vermeidungsstrategien erläutert. Thematisch liefert CO<sub>2</sub> den Einstieg, da dieses Molekül den meisten Lernenden als Treibhausgas bekannt ist, siehe Abbildung 5.46. Es wird darauf hingewiesen, dass CO<sub>2</sub> 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.



**Abb. 5.46** Weltweite CO<sub>2</sub>-Emission (blau, [171]) sowie Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre von 1860 bis 2015 (rot, [105]).

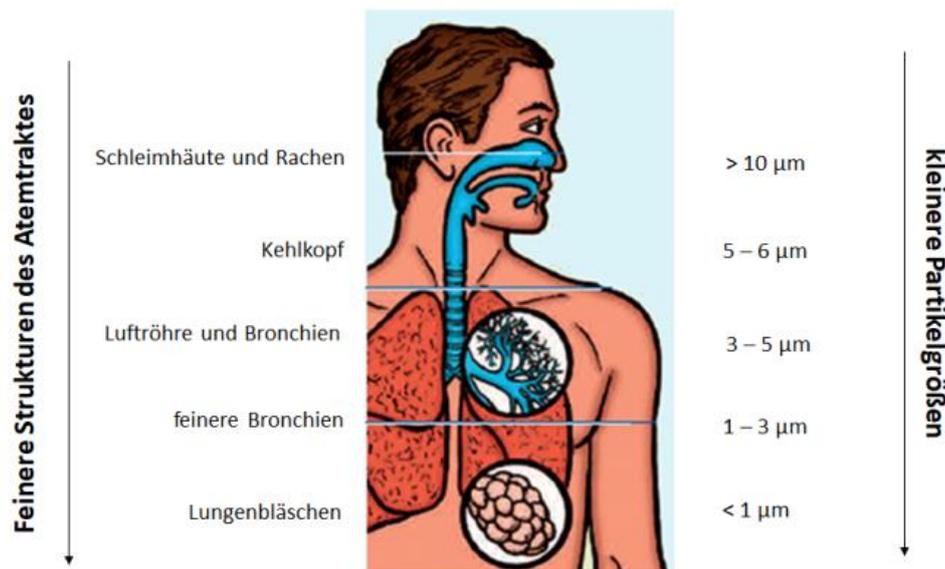
Ist der Mensch einzige Quelle für TVOC in einem Raum, so korrelieren die Konzentrationen von CO<sub>2</sub> und TVOC, wodurch die Pettenkofer-Grenze, eine Empfehlung zum Lüften ab einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1.000 ppm, ihre Berechtigung erhält. Abbildung 5.47 zeigt eine Messung der CO<sub>2</sub>- und TVOC Konzentration in einem geschlossenen Raum über einen Zeitraum von 8 Stunden. Die Korrelation zwischen CO<sub>2</sub> und TVOC führt im Folgenden auf die flüchtigen organischen Verbindungen. Neben den Quellen wird auf die konkreten gesundheitlichen Gefahren wie Reizungen der Schleimhäute, Entzündungen im Atemtrakt, Kopfschmerzen, Müdigkeit bis hin zur Krebserzeugung hingewiesen.



**Abb. 5.47** Verdeutlichung der Korrelation von CO<sub>2</sub> (rot) und TVOC (blau) im Schlafzimmer bei geschlossenem (10 – 380 Minuten) und geöffnetem (> 380 Minuten) Fenster.

Schließlich wird auf das Thema Feinstaub eingegangen. Zunächst wird erläutert, was unter dem Begriff verstanden wird, und ein Größenvergleich verschiedener Feinstäube gezeigt, damit die Schüler eine genauere Vorstellung des Begriffs erhalten. 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 und Kalifornien (USA) im Jahr 2020 einen aktuellen Kontext. Die Gefahren, die von Feinstaub ausgehen, sind den meisten Schülern noch wenig bekannt. Aus diesem Grund wird auch auf die gesundheitlichen Auswirkungen von Feinstaub und aktuelle Grenzwerte eingegangen, siehe Abbildung 5.48.

## Feinstaub und Gesundheit



**Abb. 5.48** 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 [172].

Am Ende der Einführung wird kurz auf die Messplatine eingegangen, mit der die Schüler Messungen durchführen werden, ehe es zum experimentellen Teil kommen.

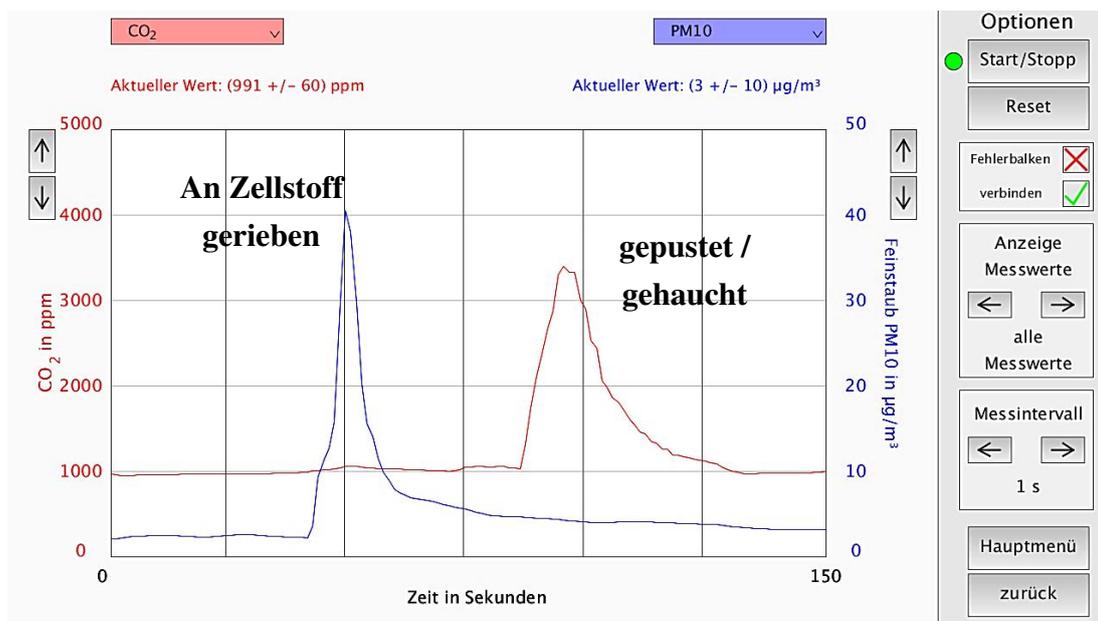
### Station 1 – Test der Sensoren

In der ersten Station machen sich die Schüler mit der Software vertraut. Dazu durchlaufen sie zunächst ein Tutorial, in welchem die grundlegenden Funktionen erläutert werden. Anschließend haben sie die Aufgabe, die Sensoren auf ihre Funktionalität zu überprüfen. Dazu sollen sie sich eigene Prüfmethode zum Testen der Sensoren überlegen und ihre Vorgehensweise in der Broschüre notieren, siehe Tabelle 5.5.

Parameter	Test	Methode der Prüfung
TVOC		...
Temperatur		...
Luftfeuchte		...
CO <sub>2</sub>	✓	An Sensor gepustet. Anstieg CO <sub>2</sub> registriert. Danach Abfall.
Feinstaub	✓	An Zellstoff gerieben. Anstieg aller PM-Komponenten registriert.

**Tab. 5.5** Testen der Funktionalität der verwendeten Sensoren. Die Schüler überlegen sich selbstständig Prüfmethoden, um die Sensoren zu testen und notieren diese in der Broschüre.

Beispielsweise kann durch Pusten auf das Board ein Ausschlag der CO<sub>2</sub>- und TVOC-Konzentration in Echtzeit beobachtet werden. Durch Hauchen auf das Board erhöht sich die Temperatur und Luftfeuchte merklich. Der Feinstaubsensor kann durch Reiben eines Zellstofftaschentuchs in der Nähe des Sensors getestet werden. Abbildung 5.49 zeigt ein Beispiel für typische Messkurven.



**Abb. 5.49** Screenshot der Mess-Software. Station 1 - Test der Sensoren.

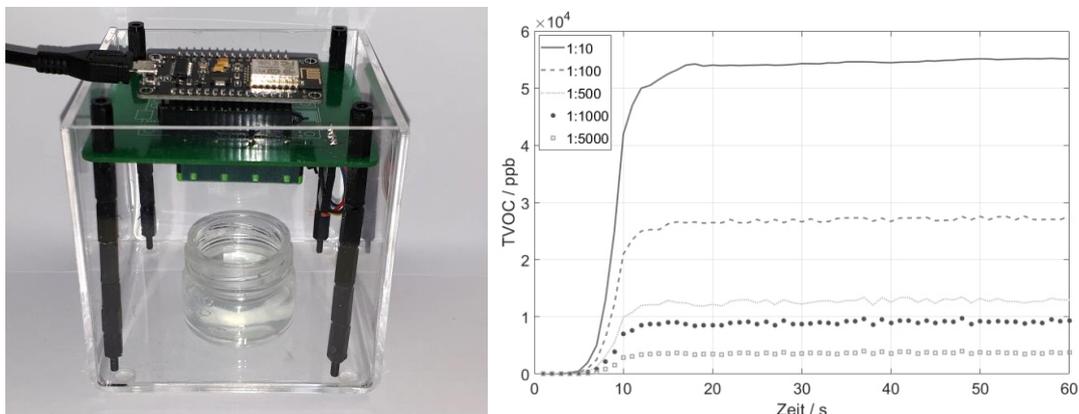
### Station 2 – Nase vs. Sensor

Die zweite Station befasst sich inhaltlich mit der Messung von VOCs. Im ersten Versuchsteil („Ich rieche was, was du nicht riechst“) treten die Schüler gegen einen Gassensor an. Sie erhalten zunächst fünf Gläser mit unterschiedlichen Verdünnungen von Ethanol, welche sie ihrer Konzentration nach ordnen sollen. Dabei liegen drei der fünf Konzentrationen nahe oder unterhalb der menschlichen Geruchsschwelle<sup>3</sup>, sodass mit bloßer Nase keine Unterscheidung mehr möglich ist. Nach der Schätzung einer

<sup>3</sup> Angaben zur menschlichen Geruchsschwelle von Ethanol variieren. Nach [203] liegt sie im Bereich 20 – 5.000 ppm.

Reihenfolge auf Grundlage des Riechens bestimmen die Schüler die Reihenfolge mit Hilfe des Sensors auf der Grundlage der VOC-Emission der Flüssigkeiten. Hierzu werden die Gläser in eine Box gestellt und der Sensor darüber positioniert, siehe Abbildung 5.50, links. Nachdem die Schüler ihren Tipp in die Software eingetragen haben, wird die wahre Reihenfolge aufgedeckt und sie können ihre Vorhersage mit jener des Sensors vergleichen. Dieser Versuch schafft ein Bewusstsein für die Notwendigkeit objektiver Messungen von Luftschadstoffen, da bestimmte Gase selbst bei hohen Konzentrationen mit der Nase nur schwach oder gar nicht wahrgenommen werden können.

Typische Messkurven für die Aufnahme des verdünnten Ethanol zeigt Abbildung 5.50, rechts. Pro Konzentration misst der Sensor über einen Zeitraum von 60 Sekunden, um zu garantieren, dass sich das Sensorsignal stabilisiert hat.



**Abb. 5.50** Links: Versuchsaufbau zur Sensormessung in der Station „Ich rieche was, was du nicht reichst“. Rechts: Typische Messkurven der Sensormessung über einen Zeitraum von 60 Sekunden für unterschiedliche Verdünnungen von Ethanol zu Wasser. Die Sensormessung ermöglicht die zuverlässige Bestimmung der Reihenfolge. Die Nase ist nicht in der Lage, die niedrigsten drei Konzentrationen überhaupt wahrzunehmen.

Im zweiten Versuchsteil („TVOC-Duelle“) untersuchen die Schüler verschiedene Alltagsgegenstände wie Lacke, Filzstifte, Klebstoffe und Bodenbeläge auf ihre VOC-Emissionen. Dabei vergleichen sie jeweils ein konventionelles mit einem als explizit „emissionsarm“ gekennzeichneten Produkt, das beispielsweise mit einem Umweltsiegel („Blauer Engel“) versehen ist. Die zu untersuchenden Stoffe sind in Tabelle 5.6 aufgeführt.

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

Tab. 5.6 Emissionsarme und konventionelle Produkte für die Station „TVOC-Duelle“.

Die Schüler schätzen zunächst die TVOC-Emission für jeden Stoff ab, indem sie daran riechen. Der Richtlinie „VDI 3882 Blatt 1: Olfaktometrie Bestimmung der Geruchsintensität (1992)“ [173] folgend vergeben sie Punkte für die Geruchsintensität zwischen 0 („nicht wahrnehmbar“) bis 6 („extrem stark“). Nach Abgabe ihrer Einschätzung bestimmt der Sensor die TVOC-Emission und vergibt ebenfalls Punkte zwischen 0 und 6. Abbildung 5.51 zeigt beispielhafte Messungen, deren Ergebnisse in der Software visualisiert werden.

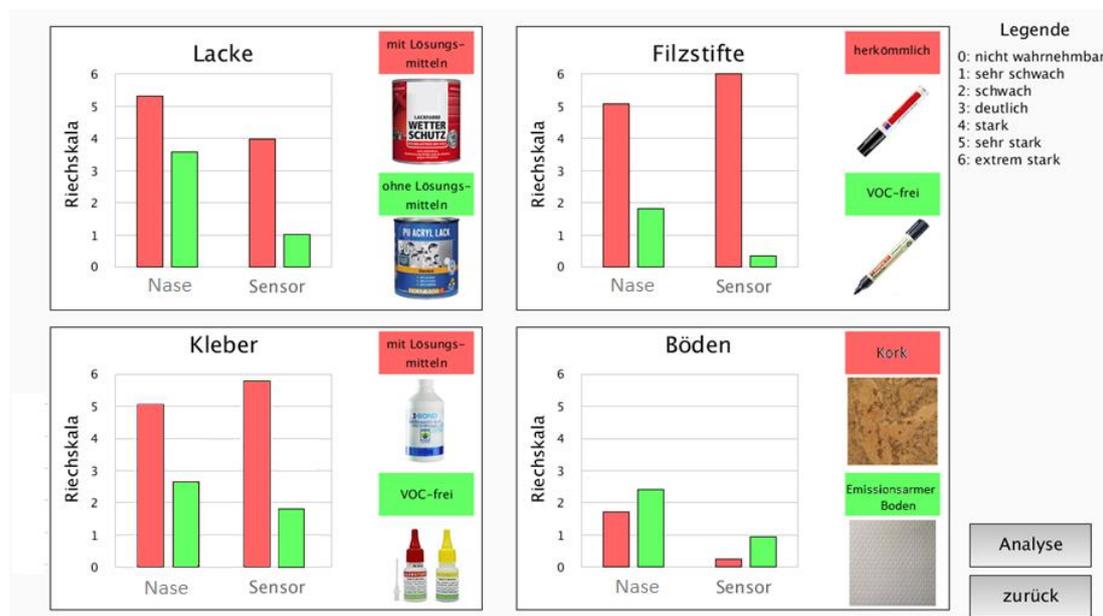
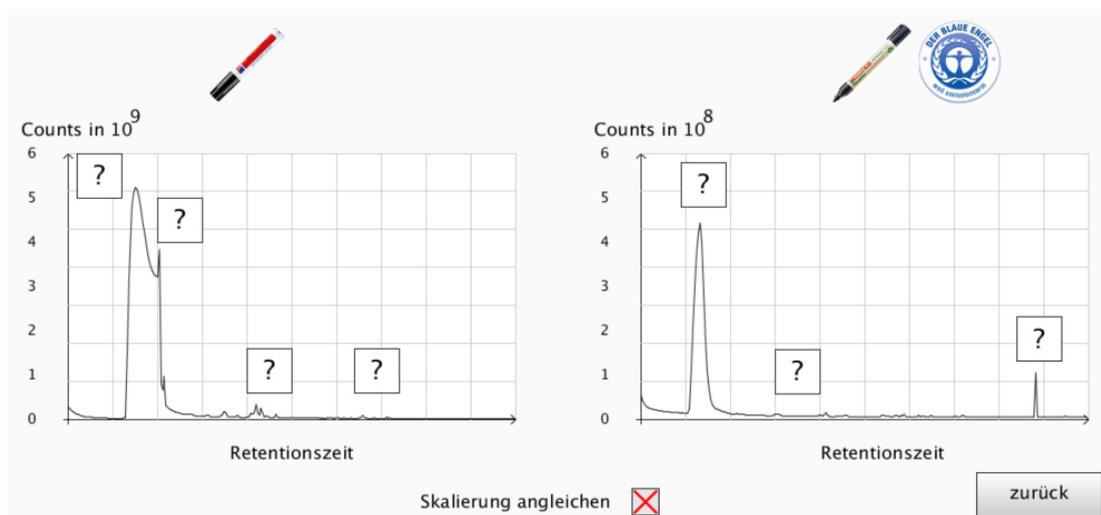


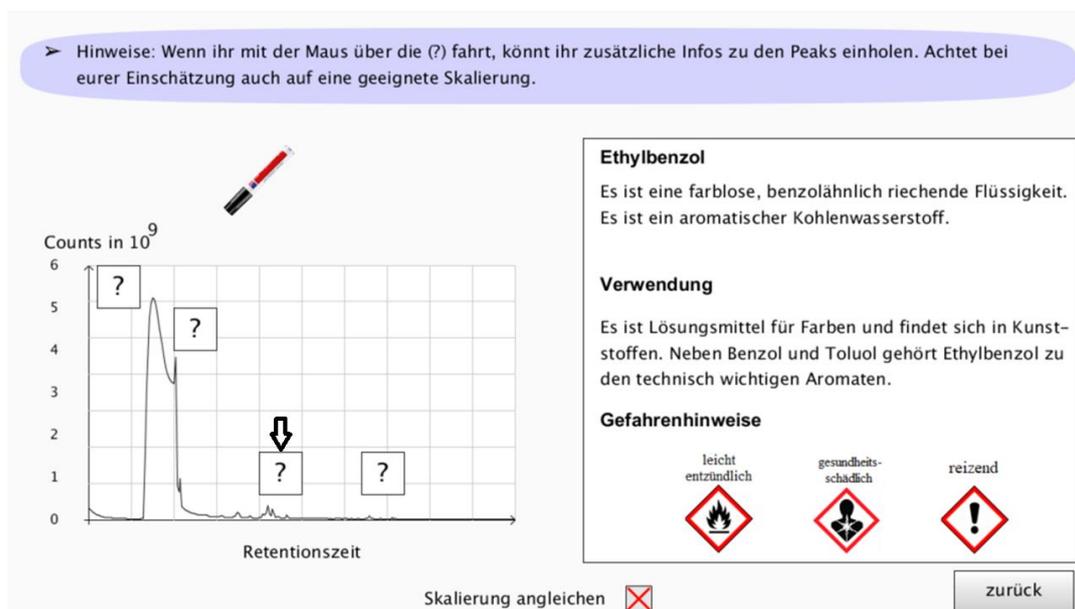
Abb. 5.51 Vergleich der Einschätzung der TVOC-Emission von Alltagsgegenständen durch die menschliche Nase und den Sensor (geeignete Zuordnung der TVOC-Messung zur Riechskala).

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 GC-MS untersucht, siehe Abbildung 5.52.



**Abb. 5.52** GC-MS-Messungen von Filzstiften. Links: Herkömmlicher Filzstift. Rechts: Emissionsarmer Filzstift mit Umweltsiegel. Zu beachten ist die um den Faktor 10 gestreckte Skalierung des linken im Vergleich zum rechten Diagramm.

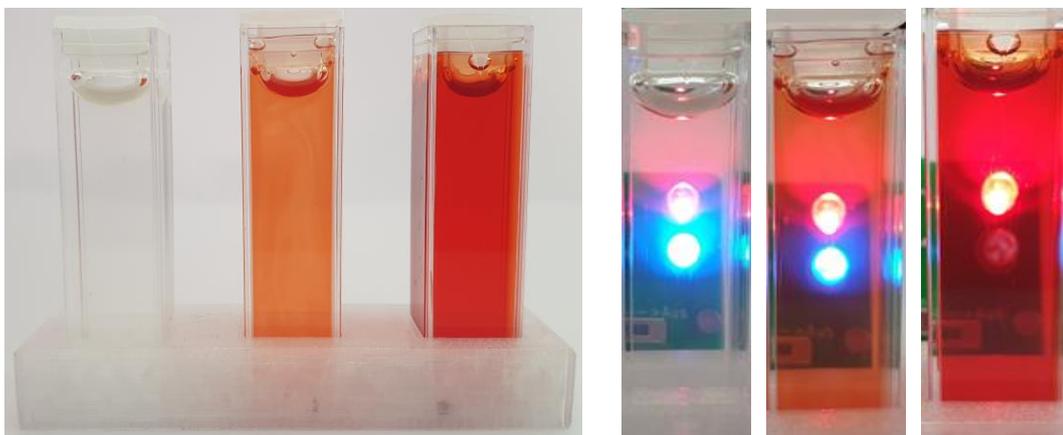
Die GC-MS Messungen der verschiedenen Produkttypen (emissionsarm und konventionell) werden in der Software gegenübergestellt, siehe Abbildung 5.53. Zusätzlich werden Informationen bezüglich Verwendung und Gefahrenhinweisen bereitgestellt. Die Schüler erfahren dadurch, welche Stoffe tatsächlich emittiert werden. Des Weiteren kann die relative Stärke der Emission anhand der Fläche unterhalb der Stoffpeaks abgeschätzt werden, wodurch Messungen in Bezug auf die Gesundheitsgefährdung eingeordnet werden können.



**Abb. 5.53** GC-MS Messung eines Filzstifts in der Mess-Software. Zu ausgewählten Inhaltsstoffen werden allgemeine Informationen, typische Verwendungsfälle und Gefahrenhinweise angezeigt.

### Station 3 – Dicke Luft

Die dritte Station befasst sich mit dem Thema Innenraumlufthqualität. Insbesondere wird dabei auf die Rolle von  $\text{CO}_2$  als Indikator für Luftqualität eingegangen. Im ersten Versuchsteil wird das Funktionsprinzip eines auf nicht-dispersiver Infrarotabsorption basierenden  $\text{CO}_2$ -Sensor anhand eines Experiments qualitativ erläutert. Dazu stehen den Schülern drei Küvetten mit unterschiedlichen Verdünnungen roter Lebensmittelfarbe zur Verfügung. Außerdem erhalten sie eine Platine mit einer roten und einer blauen LED. Diese wird hinter den Küvetten platziert. Dabei stellen die Schüler fest, dass die Intensität des blauen Lichts umso stärker abnimmt, je höher die Konzentration der Lebensmittelfarbe ist. Gleichzeitig bleibt die Intensität des roten Lichts nahezu konstant, siehe Abbildung 5.54. Aufbauend auf diesen Beobachtungen sollen sie eine Vermutung aufstellen wie dieser Effekt mit der Messung von  $\text{CO}_2$  zusammenhängt.



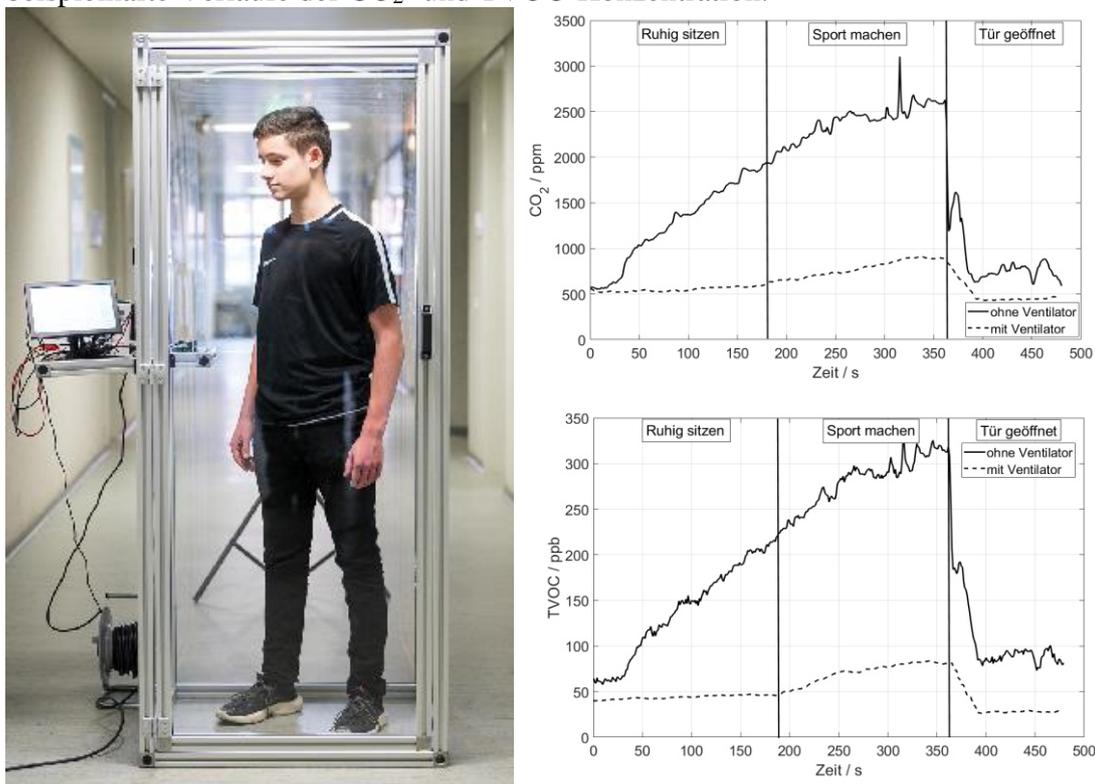
**Abb. 5.54** Experiment zur Demonstration des Funktionsprinzips eines auf Lichtabsorption basierenden  $\text{CO}_2$ -Sensors. Links: Drei Küvetten mit unterschiedlich stark verdünnter roter Lebensmittelfarbe. Rechts: Demonstration des Prinzips der wellenlängen-abhängenden Lichtabsorption. Je höher die Konzentration der roten Farbe ist, desto stärker wird blaues Licht absorbiert. Rotes Licht passiert die Küvette nahezu verlustfrei.

Die rote Lebensmittelfarbe modelliert dabei die  $\text{CO}_2$ -Moleküle. Das blaue Licht modelliert die Infrarotstrahlung, die von den  $\text{CO}_2$ -Molekülen in Abhängigkeit ihrer Konzentration absorbiert wird. Aus der Transmission kann so auf die Konzentration geschlossen werden. Mit Hilfe dieses Experiments wird die wellenlängenabhängige Absorption von Licht an Molekülen, wie sie in optischen  $\text{CO}_2$ -Sensoren verwendet wird, demonstriert.

Nachdem das Funktionsprinzip optischer  $\text{CO}_2$ -Sensoren in einem Modellexperiment qualitativ erarbeitet wurde, soll der zweite Versuchsteil ein Bewusstsein für die Bedeutung regelmäßigen Lüftens für den Erhalt einer guten Innenraumlufthqualität schaffen. Für dieses Experiment wurde eine begehbare Messkammer mit den Maßen 80 cm x 80 cm x 190 cm gebaut, siehe Abbildung 5.55, links. In diese können die

Schüler Luftqualitätsparameter wie TVOC, CO<sub>2</sub>, Luftfeuchte und Temperatur aufnehmen. An der Messkammer integrierte Ventilatoren können die Messkammer mit einer kontinuierlichen Luftzufuhr versorgen, was das Lüften der Messkammer simuliert.

Bei zunächst fehlender Ventilation setzt sich ein Schüler 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 5.55, rechts zeigt beispielhafte Verläufe der CO<sub>2</sub>- und TVOC-Konzentration.



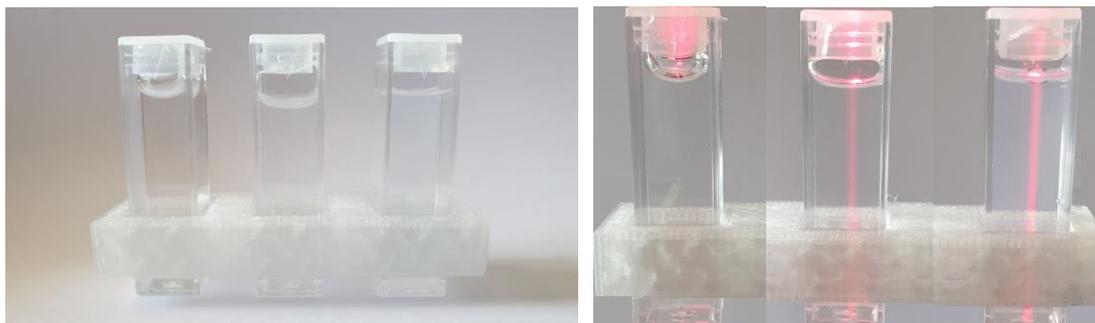
**Abb. 5.55** Links: Schüler in begehbarer Messkammer. Rechts: Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration und der TVOC-Konzentration (unten) ohne Lüftung (durchgezogene Linie) und mit Lüftung (gepunktete Linie).

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.

#### Station 4 – Feinstaubalarm

Die vierte Station befasst sich mit dem Thema Feinstaub. Viele 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. In dieser Station werden sie für alltägliche Feinstaubquellen sensibilisiert.

Im ersten Versuchsteil wird die prinzipielle Funktionsweise eines auf Lichtstreuung basierenden Feinstaubsensor qualitativ erläutert. Die Schüler erhalten drei Küvetten, in denen sich unterschiedlich dichte Suspensionen von Silikat-Kügelchen in Wasser befinden. Mit bloßem Auge ist kein Unterschied zwischen den drei Proben erkennbar. Erst beim Durchleuchten der Küvetten mit einem Laserpointer werden die unterschiedlich starken Suspensionen anhand des sichtbar werdenden Laserstrahls deutlich, siehe Abbildung 5.56. Insbesondere soll den Schülern in diesem Versuch die Kontrastierung der Lichtstreuung zur Lichtabsorption, die beim CO<sub>2</sub>-Sensor ausgenutzt wird, deutlich werden.



**Abb. 5.56** Experiment zur Demonstration des Funktionsprinzips eines auf Lichtstreuung basierenden Feinstaubsensors. Links: Drei 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 umso besser ist es sichtbar.

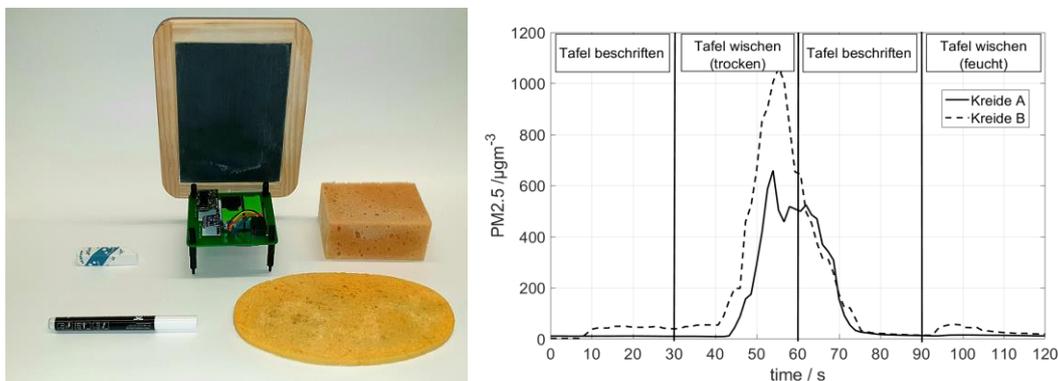
Im zweiten Versuchsteil erhalten die Schüler eine kleine Tafel, die sie an dem Sensorboard befestigen können. Weiterhin erhalten sie zwei unterschiedliche Kreidearten. Bei diesen handelt es sich um emissionsarme Kreidestifte (Kreide A) und handelsübliche Schulkreide (Kreide B). Zusätzlich stehen den Schülern ein feuchter und ein trockener Schwamm zur Verfügung, siehe Abbildung 5.57 links.

Ein Messablauf besteht aus vier, jeweils 30-sekündigen Phasen:

- Beschriftung der Tafel
- Wischen der Tafel mit einem trockenen Schwamm
- Erneute Beschriftung der Tafel
- Wischen der Tafel mit einem nassen Schwamm

Der Versuch wird für beide Kreidearten durchgeführt. Beide Schwämme werden nach einem Durchgang gereinigt. Der Kreidestift erzeugt dabei wesentlich weniger Feinstaub als die herkömmliche Schulkreide. Versuchsaufbau und typische Messergebnisse sind in Abbildung 5.57 rechts, zu sehen. Bereits kurz nach Beginn der Beschriftung der Tafel mit der herkömmlichen Kreide steigt die Feinstaubbelastung von PM<sub>2,5</sub> nahe der Tafel auf ca. 50 µg/m<sup>3</sup> an, was bereits eine Überschreitung des zulässigen Grenzwertes von 25 µg/m<sup>3</sup> darstellt. Hingegen ändert sich die Feinstaubkonzentration beim Beschriften mit dem Kreidestift nicht. Sobald die Tafel

mit einem trockenen Schwamm gewischt wird, werden große Mengen an Feinstaub freigesetzt, was an den erhöhten Messwerten deutlich wird. In der zweiten Beschriftungsphase senkt sich die Feinstaubkonzentration wieder auf ein Normalniveau. In der letzten Wischphase mit einem feuchten Schwamm steigt die Feinstaubkonzentration bei Kreide A nur minimal an. Bei Kreide B ist keine Erhöhung feststellbar.



**Abb. 5.57** 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.

Um die zu erwartende Feinstaubbelastung in einem Klassenzimmer realistisch einzuschätzen, sollen die Schüler die Messwerte in einer abschließenden Aufgabe kritisch hinterfragen und interpretieren. So ist zwar die Feinstaubbelastung nahe der Tafel für kurze Zeit erhöht, dennoch kann davon ausgegangen werden, dass sich nur ein geringer Teil davon in der Raumluft verteilt. Durch regelmäßiges Lüften kann so die Feinstaubkonzentration insgesamt unterhalb des Grenzwerts gehalten werden. Des Weiteren soll auch die Nutzung eines Kreidestifts als Kreide-Alternative eingeordnet werden.

### Fazit

Das dritte Lernmodul behandelt das Thema Luftqualität. Im Gegensatz zu Lernmodul 1 und 2 steht hierbei das Durchführen von Messungen und die Einordnung der Ergebnisse im Vordergrund. Die Schüler lernen verschiedene Schadstoffe, Grenzwerte, gesundheitliche Auswirkungen, Quellen und Strategien zur Erhaltung einer guten Luftqualität kennen. In vier Stationen erfahren die Schüler zudem zwei weitere Sensorprinzipien zur Messung von  $\text{CO}_2$  und Feinstaub. Die Stationen befassen sich jeweils mit einer anderen Komponente und bieten so einen breiten Überblick zum Thema Luftqualität. Das Lernmodul vereint somit deklaratives, konzeptuelles und prozedurales Wissen gleichermaßen und vereint somit die drei Hauptkonzepte der Umweltbildung.

## 5.7 Erprobung der Lernmodule

Die Lernmodule wurden im Laufe der Zeit mehrfach an Schülern unterschiedlicher Klassenstufen und Schulformen erprobt und auf Grundlage des Feedbacks von Lehrkräften und Schülern stetig optimiert. Mittlerweile sind die Lernmodule fester Bestandteil des Versuchsangebots des Schülerlabors SinnTec des LMT an der Universität des Saarlandes und des Schülerforschungszentrums Saarlouis. Des Weiteren wurden die Lernmodule bei unterschiedlichen Veranstaltungen wie dem „Tag der Technik Saar“<sup>4</sup>, dem „Tag der offenen Tür“ des Schülerforschungszentrums Saarlouis, der Lehrerfortbildung „Physikerzirkel“<sup>5</sup> der TU Kaiserslautern, als Teil des Schülerbetriebspraktikums „IngFo“<sup>6</sup> oder als Teil eines benoteten MINT-Praktikums des Max-Planck-Gymnasiums in Saarlouis vorgestellt und sowohl von Lehrkräften als auch Schülern durchgeführt. Außerdem waren die Lernmodule 1 und 2 Teil des Fortbildungsangebots des Landesinstituts für Pädagogik und Medien (LPM) Saarland. Es hat sich gezeigt, dass sich die Lernmodule 1 und 3 bereits für Schüler der gymnasialen Klassenstufe 7/8 eignen. Lernmodul 2 wird aufgrund des höheren fachlichen Niveaus und der Menge an neuen Informationen, die zur Durchführung einer Kalibrierung notwendig sind, erst für Schüler der gymnasialen Klassenstufe 9/10 empfohlen. Im Folgenden wird beispielhaft der Ablauf des MINT-Praktikums vorgestellt und die Erfahrungen der Lehrer und Schüler beschrieben. Anschließend wird genauer auf Übertragungsmöglichkeiten der Lernmodule auf andere Schülerlabore bzw. Schülerforschungszentren eingegangen.

### 5.7.1 MINT-Praktikum

Im Rahmen eines verpflichtenden MINT-Praktikums am Max-Planck-Gymnasium in Saarlouis führen Schüler der 9. Klasse jedes Schuljahr über einen Zeitraum von ca. 3 Monaten Experimente aus naturwissenschaftlich-technischen Themengebieten ihrer Wahl durch. Zur Auswahl stehen dabei in der Regel 5 verschiedene Themengebiete. Tabelle 5.7 zeigt die möglichen Themen der Schuljahre 2018/2019 und 2019/2020. Zu diesen gehörten in dieser Zeit auch die entwickelten Lernmodule zum Thema Gassensorik (Lernmodule 1+2) und Luftqualitätsbewertung (Lernmodule 1-3). Im

---

<sup>4</sup> Der „Tag der Technik“ ist eine jährlich stattfindende Veranstaltung der Ingenieurverbände VDE und VDI in Zusammenarbeit mit saarländischen Hochschulen bei der Schüler ab Klassenstufe 7 für technische Berufsfelder begeistert werden sollen.

<sup>5</sup> Der „Physikerzirkel“ ist eine zweimal jährlich stattfindende Veranstaltung des Fachbereichs Physik der TU Kaiserslautern, bei der Lehrer aktuelle physikdidaktisch-unterrichtspraktische und fachwissenschaftliche Themen vorgestellt werden.

<sup>6</sup> Das Schülerbetriebspraktikum „IngFo“ der Universität des Saarlandes bietet Schülern die Möglichkeit verschiedene Facetten des Ingenieurberufs kennenzulernen. Innerhalb von zwei Wochen durchlaufen sie unterschiedliche Fachbereiche und führen Experimente in Schülerlaboren durch.

Folgendes wird der Ablauf des MINT-Praktikums sowie die abschließende Leistungsüberprüfung vorgestellt.

Schuljahr 2018/2019	Schuljahr 2019/2020
Elektronik	Elektronik
Arduino	Photometrie
Gassensorik (Lernmodule 1 + 2)	Stratosphärenballon
Erklärvideos	Erklärvideos
Photometrie	Luftqualitätsbewertung (Lernmodule 1 – 3)

**Tab. 5.7** Auswahlthemen im Rahmen des MINT-Praktikums der 9. Klassen des Max-Planck-Gymnasiums in Saarlouis.

### Organisatorischer Ablauf

Im Schuljahr 2018/2019 nahmen insgesamt 17 Schüler in zwei Gruppen am MINT-Praktikum zum Thema Gassensorik teil. Abbildung 5.58 zeigt die Kurzbeschreibung des Praktikums in diesem Jahr.

#### **Kurzbeschreibung:**

*Gassensoren machen aus Informationen des sie umgebenden Gases ein elektrisches Signal, um Rückschlüsse auf Bestandteile des Gases / Gasmisches zu ziehen.*

*Angewendet wird dies zum Beispiel für Schadstoffmessungen. So könnte man die Raumluft analysieren oder auch die Ausdünstung von Flüssigkeiten oder Feststoffen auf Schadstoffe untersuchen.*

*Damit tragen verschiedene Gassensoren in unserem Alltag zur Sicherheit bei, zum Beispiel als Warnsysteme bei Erdgasaustritt, Brandmelder, Atemalkoholtest, ....*

*Durch das Schülerforschungszentrum Saarlouis bekommt ihr die Möglichkeit mal selbst an der Schnittstelle zwischen Theorie und Anwendung in der Praxis mit Gassensoren zu arbeiten.*

*Die Teilnehmer des Praktikums...*

*... lernen den prinzipiellen Aufbau und die grundlegende Funktionsweise eines Halbleiter-Gassensors kennen.*

*... führen eigene Messungen mit einem Gassensor durch.*

*... werten ihre Messungen zum Teil am Computer aus und ziehen Rückschlüsse auf die Materialien.*

**Abb. 5.58** Kurzbeschreibung des MINT-Praktikums zum Thema Gassensorik des Schuljahres 2018/2019 des Max-Planck-Gymnasiums Saarlouis.

Das Praktikum bestand pro Gruppe aus 3 Übungsterminen á 3 Zeitstunden sowie einem Termin zur Überprüfung des Gelernten. An den ersten beiden Terminen führten die Schüler die Lernmodule 1 und 2 durch. Der dritte Übungstermin diente als Frage- und Wiederholungsstunde. Im Anschluss wurden sie mündlich über die Experimente geprüft und erhielten eine schriftliche Zusammenfassung der theoretischen Grundlagen.

Im Schuljahr 2019/2020 nahmen insgesamt 16 Schüler in 2 Gruppen am MINT-Praktikum zum Thema Luftqualitätsbewertung teil. Aufgrund der Corona-Pandemie und den damit verbundenen Schulschließungen konnten jedoch nur 2 der insgesamt 8 Termine stattfinden und lediglich das erste Lernmodul durchgeführt werden.

### **Großer alternativer Leistungsnachweis**

Das Gelernte wurde in einem abschließenden „großen alternativen Leistungsnachweis“ (GLN) geprüft. Dieser bestand aus einem 30-minütigen theoretischen und zwei jeweils 30-minütigen praktischen Teilen. Die genauen Aufgabenstellungen befinden sich im Anhang dieser Arbeit (vgl. I.4). Die praktischen Aufgaben wurden als 2er-Gruppe durchgeführt.

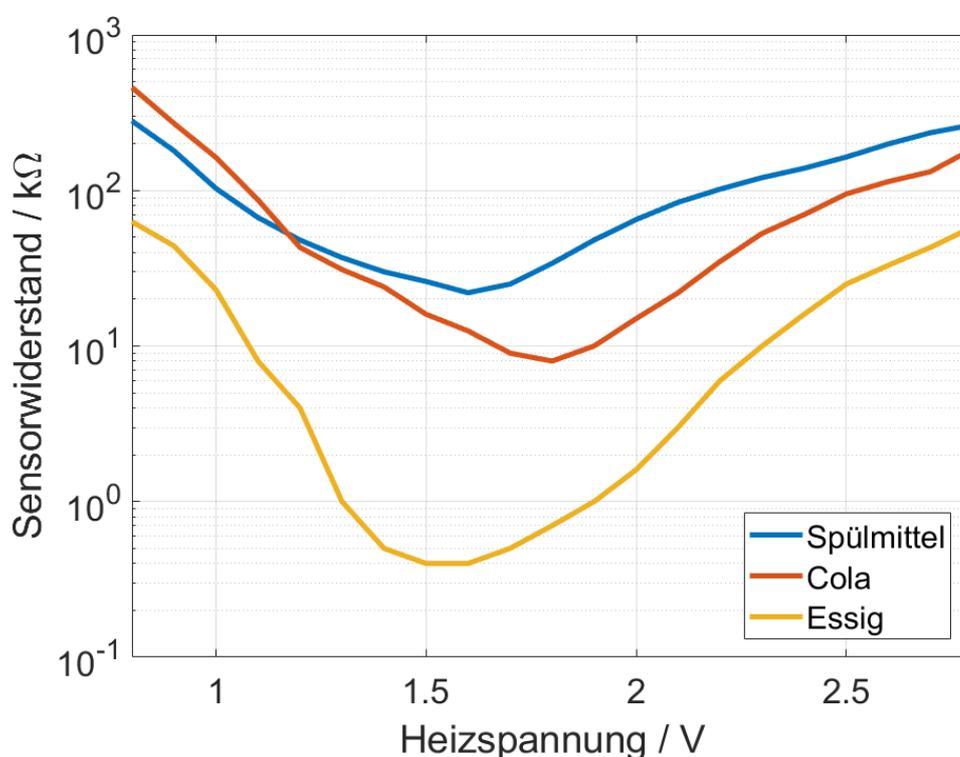
Im theoretischen Teil wurden die theoretischen Grundlagen zur Funktionsweise und Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors geprüft sowie eine Rechenaufgabe zur Konzentrationsberechnung gestellt. Letztere war angelehnt an eine Aufgabe innerhalb des 2. Lernmoduls.

Der erste praktische Teil legte den Fokus auf die korrekte Aufnahme von Messdaten, die Übertragung der Daten in einen Graphen und die Interpretation des Kurvenverlaufs. Die Schüler hatten die Aufgabe, die Reaktion des Sensors in Anwesenheit einer unbekannt Probe bei unterschiedlichen Sensortemperaturen mit der Platine aus Lernmodul 1 zu vermessen. Bei den unbekannt Proben handelte es sich um verschiedene, in Wasser gelösten Stoffe wie Spülmittel, Cola oder Essig. Diese wurden mit Lebensmittelfarbe gefärbt, sodass sie optisch nicht mehr zuzuordnen waren, siehe Abbildung 5.59.



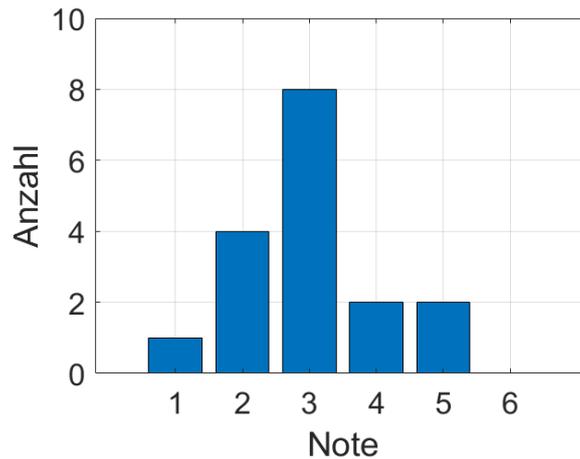
**Abb. 5.59** Unbekannte, mit Lebensmittelfarbe gefärbte Proben.

Die Schüler wählten einen Stoff aus, den sie genauer untersuchen wollten. Dazu variierten sie die Sensortemperatur in 0,2 V-Schritten, warteten jeweils 10 Sekunden, nahmen Messwerte auf und legten eine Messtabelle an. Bei der Aufnahme der Daten wurde für die Bewertung darauf geachtet, dass der zeitliche Abstand zwischen zwei Messungen konstant war, damit die Messwerte vergleichbar sind. Anschließend sollten die Schüler ihre Messwerte in einen halblogarithmischen Graphen übertragen. Schließlich erhielten die Schüler vorher angefertigte Graphen der Stoffe und konnten durch einen Vergleich mit ihren Messwerten auf den unbekanntem Stoff schließen. Abbildung 5.60 zeigt beispielhaft die charakteristischen Messkurven für in Wasser gelöstes Spülmittel, Cola und Essig.



**Abb. 5.60** Beispielhafte halblogarithmische Darstellung charakteristischer Kurven der Sensorreaktion in Abhängigkeit der Sensortemperatur von Spülmittel (blau), Cola (rot) und Essig (gelb)

Im zweiten praktischen Teil des GLN kalibrierten die Schüler einen MOX-Halbleiter Gassensor auf verschiedene Aceton-Konzentrationen. Dazu verwendeten sie die Hard- und Software aus Lernmodul 2, wobei der verwendete Temperaturzyklus leicht variiert wurde. Die Kalibrierungsaufgabe bestand aus der Aufnahme von Trainingsdaten, einer Merkmalsextraktion und des Trainings eines ANN. Anschließend wurden mit dem mathematischen Modell insgesamt drei unbekannte Konzentrationen bestimmt. Abhängig von dem mittleren quadratischen Fehler des Modells nach Durchlaufen von 10.000 Trainingsiterationen und dem absoluten Fehler bei der Bestimmung der unbekanntem Konzentrationen erhielten die Schüler eine Punktbewertung.



**Abb. 5.61** Notenverteilung des „großen alternativen Leistungsnachweises“ im MINT-Praktikum des Max-Planck-Gymnasium in Saarlouis zum Thema Gassensorik im Schuljahr 2018/2019.

Sowohl der schriftliche als auch der praktische Teil des Tests gingen jeweils zu 50 % in die Gesamtnote ein. In Abbildung 5.61 ist die Notenverteilung mit einer Durchschnittsnote von 3,0 abgebildet.

### 5.7.2 Bewertung durch Lehrer und Schüler

Die Lernmodule wurden von verschiedenen Schulklassen unterschiedlicher Altersgruppen sowie Lehrern durchgeführt. Dabei fiel die Bewertung zum überwiegenden Teil sehr positiv aus (vgl. I.5). Die Lehrer loben die Vielseitigkeit an realen und virtuellen Experimenten innerhalb eines Kurses. Der Aufbau als HTML-basierter Selbstlernkurs am PC mit integrierter Datenaufnahme und -darstellung ermöglicht es den Lehrern und Betreuern, sich ausschließlich mit Kernproblemen der Schüler wie Verständnisfragen auseinander zu setzen. Dadurch werden Randprobleme wie die fehlerhafte Mitschrift von Messergebnissen oder Probleme der grafischen Darstellung der Messdaten ausgeschlossen. Weiterhin seien Experimente und Konzepte der Gassensorik eine willkommene Abwechslung zum Regelunterricht und bieten auch für Lehrer neue Erkenntnisse, da Gassensorik kein Bestandteil des Lehramtsstudium ist. Neben dem Kernthema Gassensorik bieten die Lernmodule auch Einblicke in moderne wissenschaftliche Konzepte wie beispielsweise die mathematische Modellerstellung mittels ANN. Die Lernmodule seien so nicht nur auf die Fächer Physik/Chemie begrenzt, sondern verknüpfen interdisziplinäre Disziplinen der Naturwissenschaften, Mathematik und Umweltbildung im Sinne der BNE.

Schüler loben vor allem die vielseitige Arbeit am PC und die Verknüpfung von realen und virtuellen Experimenten. Im Laufe mehrerer Durchführungen von Lernmodul 1 hat sich gezeigt, dass Schüler ohne explizite Aufforderung Messwerte untereinander

vergleichen, mögliche Abweichungen diskutieren und nach Gründen dafür suchen. Dies kann als Hinweis für ein gesteigertes Interesse am Thema Gassensorik interpretiert werden. In Lernmodul 2 führte vor allem das Training eines ANN zur mathematischen Modellerstellung dazu, dass viele Schüler Fragen zu Konzepten des Machine Learnings stellten: "Es ist sehr interessant dem neuronalen Netz beim Lernen zuzusehen.". Außerdem lobten sie den praktischen und persönlichen Bezug der Lernstationen aus Lernmodul 3. Dies wurde vor allem an der begehbaren Messkammer aus Station 3 (vgl. Kapitel 5.6.3) deutlich, bei der Schüler die Entwicklung der Luftqualität mit und ohne Lüftung untersuchen: „Mir macht es Spaß, selbst Teil eines Experiments zu sein. Außerdem gefällt mir, dass die Experimente direkten persönlichen Bezug haben.“.

Die vergleichsweise lange Aufnahme von Messdaten des Experimentierteils II aus Lernmodul 1 (vgl. Kapitel 5.6.1) bekam von den Schülern gemischtes Feedback. Manche Schüler kritisierten, dass dieser Teil zu lang sei – andere wiederum lobten genau diesen Teil des Kurses. Weiterhin zeigte sich, dass Lernmodul 2 vor allem für Schüler der Klassenstufe 7/8 aufgrund der höheren Komplexität und Fülle an neuen Informationen eher ungeeignet zu sein scheint.

### 5.7.3 Übertragung der Lernmodule

Zur Durchführung der Lernmodule sind sowohl Hard- als auch Softwarekomponenten nötig. Zum Nachbau der benötigten Hardware wie Messplatinen, Messkammern und Gasvorratskammer wurde eine Materialliste inklusive Platinenlayouts einschließlich Preisorientierung aller Komponenten bereitgestellt; diese befinden sich im Anhang dieser Arbeit (vgl. I.6). Die Beschaffung der eingesetzten Sensoren kann durch das Schülerlabor SinnTec bei Bedarf unterstützt werden. Die Lernmodule wurden zum großen Teil als HTML-basierte Selbstlernkurse konzipiert, für deren Ausführung lediglich ein Internetbrowser benötigt wird. Zusätzlich erfolgt die automatisierte Datenaufnahme über eine Java-basierte Kalibrierungs- bzw. Mess-Software. Alle Quellcodes dieser Programme sind Open-Source und können über die Homepage des LMT heruntergeladen werden [174]. Weiterhin werden dort auch alle benötigten Bibliotheken und Codes zur Programmierung der Mikrocontroller (Lernmodul 2 + 3) zur Verfügung gestellt.

Trotz dieser vergleichsweise einfachen Übertragungsmöglichkeit auf weitere Standorte zeigte sich, dass bisher nur ein recht geringes Interesse von anderen Schülerlaboren und Schülerforschungszentren besteht, die Lernmodule zu übernehmen. Zwar herrschte auf Veranstaltungen und Tagungen, bei denen die Lernmodule präsentiert wurden, großes Interesse am Konzept der Selbstlernkurse,

jedoch konnten diese bisher nicht auf weitere Standorte übertragen werden. Dies scheint jedoch ein grundsätzliches Problem zu sein, da viele Schülerlabore und Schülerforschungszentren hauptsächlich selbst entwickelte Kurse anbieten möchten. Unter anderem aus diesem Grund hat der LeLa-Verband im Jahr 2020 zum ersten Mal einen Preis für besonders innovative und leicht zu übertragende Schülerlabor-Versuche vergeben. Dieser soll dazu dienen, Schülerlabore im LeLa-Verband zu motivieren, bereits entwickelte und erfolgreich erprobte Experimente auf andere Standorte zu übertragen.

## 5.8 Zwischenfazit

In drei Lernmodulen wird Schülern ab Klassenstufe 7/8 der gymnasialen Mittelstufe das Thema Gassensorik nähergebracht. Neben der Vermittlung von Faktenwissen in Form von Wissen über Schadstoffe, Grenzwerte und gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen erhalten die Schüler auch einen Einblick in verschiedene Sensorprinzipien zur Detektion von Gasen und Feinstaub sowie dem Prinzip und der Wichtigkeit einer fachgerechten Kalibrierung. Außerdem werden persönliche Handlungsoptionen zur Erhaltung einer guten Luftqualität aufgezeigt. Dadurch wird deklaratives, konzeptuelles und prozedurales Wissen miteinander vereint. Damit Messergebnisse von Sensoren kritisch bewertet werden können, ist ein grundlegendes Verständnis zu dessen Funktionsweise sinnvoll. Da Schüler der Mittelstufe jedoch in der Regel nicht mit Konzepten der Halbleiter- und Festkörperphysik vertraut sind, wurde ein vereinfachtes Modell zur Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors entwickelt, welches die wichtigsten Komponenten zur Erklärung des Sensorverhaltens auf einem schülergerechten Bildungsniveau beschreibt. Durch den Aufbau der Lernmodule als HTML-basierter Selbstlernkurs inklusive Kalibrierungs- und Mess-Software können die Module prinzipiell leicht auf andere Standorte übertragen werden. Außerdem bieten sie den Vorteil, dass komplexe Zusammenhänge intuitiv und verständlich in Form von Simulationen und Animationen dargestellt werden können. Erfahrungen von Lehrern und Schülern, die die Lernmodule durchgeführt haben, sind insgesamt sehr positiv.

## 6 Entwicklung von Schülerumweltstudien nach dem Prinzip von Citizen Science

Abseits des alltäglichen Schulunterrichts haben Schüler in Schülerforschungszentren die Gelegenheit, eigenen (Umwelt-)Fragestellungen nachzugehen und Studien nach dem Vorbild von CS zu entwickeln. Dadurch werden anwendungsorientierte und authentische Lernszenarien geschaffen. Begleitet und unterstützt werden sie dabei durch Lehrkräfte oder Wissenschaftler, die bei Bedarf Anregungen und Hilfestellungen geben können. Je nach Motivation und Engagement lassen sich die Studien der Schüler einer der beiden obersten Partizipationsebenen von CS zuordnen.

Im Schülerforschungszentrum Saarlouis liegt ein besonderer Fokus auf der Entwicklung von Studien zum Thema Umwelt und Sensorik und gleichzeitiger Nutzung moderner Technik, wie Smartphones oder Tablets zur Aufnahme von Messdaten. Aufgrund der Allgegenwärtigkeit und Mobilität von Smartphone und Tablet sind diese prädestiniert, um Schüler bei der Beantwortung wissenschaftlicher Fragestellungen zu unterstützen. Lernen ist somit nicht mehr auf feste Orte wie Klassenraum oder Schule im Allgemeinen begrenzt, sondern kann „seamless“, also nahtlos, stattfinden. Schüler können sich durch die Absolvierung der Lernmodule im Bereich Umweltsensorik (vgl. Kapitel 5) die nötigen theoretischen und praktischen Grundlagen zur Arbeit mit Gas- und Feinstaubsensoren erarbeiten. Dadurch sammeln sie erste Erfahrungen mit Luftqualitätssensoren und erhalten einen Eindruck davon, welche Größen untersucht werden können.

Weiterhin werden Konzepte der BNE, wie soziale, ökonomische und gesellschaftliche Aspekte im Rahmen von Umweltstudien nach dem Prinzip von CS erfüllt und sowohl gesellschaftliches Engagement gefördert als auch zur Kompetenzentwicklung beigetragen. Erkenntnisse aus diesen authentischen Lernszenarien können dafür sorgen, dass Wissen nicht träge bleibt und die Diskrepanz zwischen Umweltwissen und Umweltverhalten verringern. Außerdem sorgt die Freiheit in der Konzeption der Umweltstudien für eine Aufrechterhaltung der Motivation der Schüler.

In diesem Kapitel wird zunächst das Konzept der entwickelten Schülerumweltstudien und das Prinzip des „mobile assisted seamless learning“ mit der Hilfe von modernen Medien vorgestellt. Anschließend werden beispielhaft drei Schülerumweltstudien detailliert vorgestellt, die thematisch jeweils andere Schwerpunkte setzen und von Schülern unterschiedlichen Alters entwickelt wurden. Zum Schluss werden weitere Schülerumweltstudien, die im Laufe dieser Arbeit untersucht wurden, kurz beschrieben.

## 6.1 Konzept der Schülerumweltstudien und „Seamless Learning“

Zusätzlich zu den in Kapitel 5 vorgestellten Lernmodulen, die sich mit der Funktionsweise und der Kalibrierung von MOX-Halbleiter Gassensoren sowie der Messung von Luftqualität mittels Gas- und Feinstaubsensoren in vorgegebenen Experimenten befassen, haben Schüler der Klassenstufen 7 - 13 die Möglichkeit, eigene Fragestellungen bezüglich Sensorik und Umwelt nach dem Vorbild von CS zu entwickeln. Diese können dabei sowohl im Rahmen von Schüler-Forschungswettbewerben wie „Jugend forscht“ oder aus rein persönlichem Interesse durchgeführt werden. Dabei werden ihnen große Freiheiten dahingehend überlassen, welchen Fokus die Studie haben soll. Dies kann beispielsweise gesundheitliche Aspekte betreffen, wie die Detektion von schädlichen Gasen zur Raumluftüberwachung (vgl. Kapitel 6.2.1 „Entwicklung und Kalibrierung eines mobilen CO-Melders“), eine technische Fragestellung mit Aspekten der persönlichen und gesellschaftlichen Sicherheit sein, wie die Vernetzung von Sensorsystemen zur Überwachung von Waldgebieten (vgl. Kapitel 6.2.2 „Waldbrandfrüherkennung“), oder auch interdisziplinäre Interessen berücksichtigen, wie beispielsweise die Untersuchung der Luft in Bienenstöcken mit Hinblick auf Fragestellungen aus der Biologie (vgl. Kapitel 6.2.3 „Untersuchung der Luft in Bienenstöcken“). Begleitet werden sie dabei von einem Betreuer und/oder einem Wissenschaftler, der sie hinsichtlich Fragen über technische Aspekte, Datenaufnahme, Auswertung der Daten und Interpretation unterstützt. Durch dieses Zusammenspiel kann die Datenqualität gesichert werden.

Der Ablauf bei der Entwicklung einer Schülerumweltstudie ist abhängig von dem gewählten Thema, kann aber prinzipiell in die folgenden Schritte unterteilt werden:

- Finden eines Themenfeldes
- Durchführung einer Literaturrecherche

- Aufstellen einer Hypothese bzw. Entwicklung einer Fragestellung und/oder Konzeption einer Hardware
- Entwicklung einer Methodik zur Datenerhebung
- Datenaufnahme
- Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Durch diesen strukturierten Aufbau lässt sich das Konzept der obersten Partizipationsebene im Rahmen von CS - der reinen Bürgerwissenschaft - zuordnen (vgl. Kapitel 3.2). Das Vorgehen ermöglicht es, sowohl Kernbedürfnisse, operative Bedürfnisse als auch individuelle Bedürfnisse der Schüler zu befriedigen, indem sie sowohl Thema, Ziel und Vorgehensweise der Studie selbst entwickeln (vgl. Kapitel 3.4). Vor allem der Aspekt der Motivation spielt dabei eine entscheidende Rolle. Durch die Freiheiten der Schüler bezogen auf Themenwahl und Vorgehensweise kann davon ausgegangen werden, dass ein persönliches Interesse an der Untersuchung der eigenen Fragestellung besteht. Weiterhin wird die Durchführung der Studien durch die Verwendung von moderner Technik, wie Smartphone, Tablet und der Nutzung von PCs erleichtert. Gerade die Mobilität und Allgegenwärtigkeit von Smartphones und Tablets macht es dabei möglich, Lernen als einen Prozess erlebbar zu machen [175].

Das Konzept des „seamless learning“ (SL, deutsch: „nahtloses Lernen“) beschreibt nach Wong & Looi [15] die Grundidee, dass Lernende die in der Schule gesammelten Erfahrungen mit jenen außerhalb der Schule vernetzen, was zu einer besseren Verinnerlichung des Lerninhalts führt. Nach Chan et al. [176] impliziert nahtloses Lernen, dass Schüler in einer Vielzahl von Lernszenarien in der Lage sind lernen zu können, wann immer sie neugierig sind. Diese Szenarien beinhalten individuelles Lernen, das Lernen in Gruppen unterschiedlicher Größe, Lernen zuhause, im Klassenzimmer oder an anderen Orten wie dem Zoo oder der Natur. Die Verknüpfung von SL mit mobilen Endgeräten wie Smartphone wird als „mobile assisted seamless learning“ (MSL, deutsch: „mobil unterstütztes nahtloses Lernen“) bezeichnet. Nach Wong & Looi [15] fungiert mobile Technologie dabei als Mediator des Lernprozesses, wodurch Schüler dazu befähigt werden, flexibel auf ihre Umwelt zu reagieren. Die Darstellung von Messdaten oder deren Auswertung auf dem Smartphone, Tablet oder PC jederzeit von zuhause oder unterwegs ermutigt Schüler dazu, sich unabhängig von möglichem Druck oder Angst vor der Beurteilung durch einen Lehrkörper mit dem gewählten Thema auseinanderzusetzen. Weiterhin bewirkt die automatisierte Datenaufnahme eine zeitliche und örtliche Unabhängigkeit, was weitere Lernhürden abbaut.

Das Ziel der Umweltstudien ist es, die Schüler in die Lage zu versetzen, ihre Neugierde zum Thema Umwelt und Messtechnik nach eigenen Interessen und in Eigenverantwortung zu befriedigen. Durch die Auseinandersetzung mit Umweltfragestellungen und der Schaffung von authentischen Lernszenarien kann das Interesse und das Bewusstsein bezüglich Umwelt verbessert werden (vgl. Kapitel 2). Das mobile Kommunikationsmedium unterstützt bei diesem Lernen, da es die Hard- und Software bereithält, um Messungen durchzuführen und ihre Durchführung zu dokumentieren. Die Durchführung der Studien kann räumlich und zeitlich wesentlich unabhängiger erfolgen als in Schülerlaboren. Es steht den Schülern frei, individuell zu arbeiten oder Mitschüler, Freunde oder auch Geschwister und Eltern mit einzubeziehen. Durch dieses Konzept werden non-formale und informelle Lernszenarien kombiniert (vgl. Kapitel 5.2).

## 6.2 Schülerumweltstudien

Im Laufe der Projektlaufzeit von September 2017 bis Juni 2020 wurden insgesamt neun Schülerumweltstudien zum Thema Umweltsensorik erstellt. Im Folgenden werden beispielhaft drei ausgewählte Schülerumweltstudien präsentiert, die jeweils einen anderen thematischen Schwerpunkt setzen und von Schülern unterschiedlicher Altersstufen entwickelt wurden. Während der Entwicklung und Durchführung der Umweltstudien wurden die Schüler durch eine oder mehrere Betreuungspersonen mit wissenschaftlichem bzw. didaktischen Hintergrund begleitet. Zunächst wird zu jeder Studie eine Übersicht des Ablaufs präsentiert, in der auch auf die Eigenleistungen der Schüler während der Studie eingegangen wird. Anschließend erfolgt jeweils eine detaillierte Beschreibung der Studien. Die Ergebnisse der Studien wurden durch die Schüler in Facharbeiten zusammengefasst, welche im Anhang dieser Arbeit zu finden sind (vgl. I.7, I.8 und I.9).

### 6.2.1 Entwicklung und Kalibrierung eines mobilen CO-Melders

Kohlenmonoxid (CO) ist ein sowohl farb- als auch geruchsloses Gas mit potentiell gesundheitsschädlicher Wirkung. Erhöhte Konzentrationen bleiben daher oft unbemerkt. Motiviert aufgrund von Nachrichten über Todesfälle durch CO-Vergiftungen durch Grillfeuer, in Shisha-Bars oder bei der Stahlerzeugung entschied sich ein Schüler einer 9. Klasse des Max-Planck-Gymnasiums Saarlouis dazu, sich intensiver mit CO zu beschäftigen („Finden eines Themenfeldes“).

In einer Literaturrecherche informierte sich der Schüler über die gesundheitlichen Auswirkungen von CO, Grenzwerte und mögliche Quellen, wie beispielsweise bei der Stahlerzeugung. Ergänzend wurden dem Schüler Informationen über die Entstehung von CO bei Verbrennungsprozessen sowie statistische Kennzahlen wie Zahl der Todesfälle und Krankenhausaufenthalte aufgrund von CO-Vergiftungen in Deutschland zur Verfügung gestellt („Literaturrecherche“).

Darauf aufbauend entschied sich der Schüler dazu einen mobilen CO-Melder zu entwerfen. Dieser sollte nach seinen Vorstellungen sowohl mobil, um auch unterwegs vor erhöhten CO-Konzentrationen in Form eines optischen und akustischen Signals zu warnen, als auch kostengünstig sein. Bei der Auswahl des Sensors (MOX-Halbleiter Gassensor) und bei der Bedienung der Software zur Erstellung der Platine nach seinen Vorstellungen wurde er von einem Wissenschaftler unterstützt („Konzeption einer Hardware“).

Um die Prinzipien einer fachgemäßen Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors zu verinnerlichen, führte er anschließend unter Anleitung Lernmodul 2 durch und wählte auf der Grundlage von zuvor durchgeführten Messungen einen geeigneten Temperaturzyklus bestehend aus mehreren hohen und tiefen Sensortemperaturen aus. Schließlich entschied er sich selbstständig für einen relevanten CO-Konzentrationsbereich, in dem der Sensor im Folgenden kalibriert werden sollte („Entwicklung einer Methodik zur Datenerhebung“).

Nachdem insgesamt drei Platinen durch einen Betreuer bestückt wurden besuchte der Schüler den Lehrstuhl für Messtechnik (LMT) der Universität des Saarlandes. Dort wurde ihm die GMA zur Erzeugung verschiedener CO-Konzentrationen und relativen Luftfeuchten gezeigt, welche er auch unter Anleitung bediente und ein geeignetes Gas- und Feuchteprofil erstellte. Anschließend konnten Trainingsdaten aufgenommen werden („Datenaufnahme“).

Um eine Merkmalsextraktion durchzuführen und ein mathematisches Modell mittels ANN zu erstellen, wurde dem Schüler eine Software in Anlehnung an die Kalibrierungssoftware aus Lernmodul 2 zur Verfügung gestellt. Nach einer kurzen Einarbeitungszeit in die Software war der Schüler nun in der Lage, selbstständig besondere Merkmale des Trainingsdatensatzes zu bestimmen und ein mathematisches Modell zu erstellen. Dieses wurde anschließend auf den Mikrocontroller geladen. Schließlich führte der Schüler einen Plausibilitätstest durch, indem er den Sensor in eine Messkammer mit brennenden Kerzen legte. Nach einer kurzen Zeit schlug der CO-Melder Alarm und konnte so eine erhöhte CO-Konzentration feststellen („Auswertung und Interpretation der Ergebnisse“).

Diese Schülerumweltstudie legt den Fokus vorrangig auf die Aspekte Sicherheit/Gesundheit, Entwicklung einer Sensorhardware und Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors in Anlehnung an die in Kapitel 4.5 beschriebene Vorgehensweise. Die Beschreibung der Durchführung und der Ergebnisse wurden durch den Schüler in einer Facharbeit festgehalten und bei den Jugend-Forschungswettbewerben des Unternehmens Dillinger und „Jugend forscht“ eingereicht (vgl. I.7). Aufgrund der Corona-Pandemie kam es zu keiner Bewertung dieser Umweltstudie. In Abbildung 6.1 sind die verschiedenen Schritte dieser Umweltstudie stichpunktartig zusammengefasst.

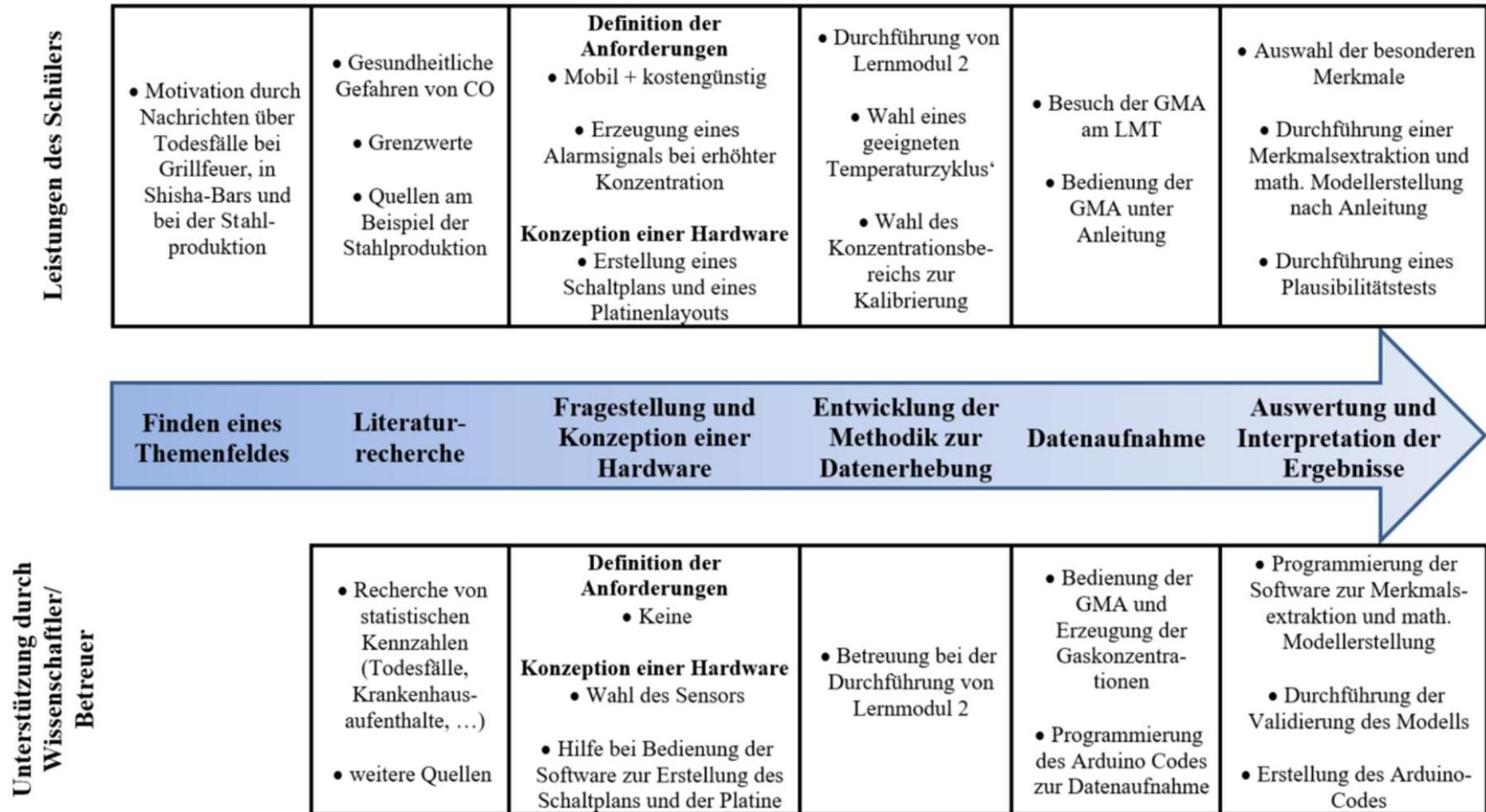


Abb. 6.1 Leistungen des Schülers und Hilfestellung durch einen Wissenschaftler/Betreuer bei der Entwicklung eines mobilen CO-Melders.

## Literaturrecherche

Kohlenmonoxid (CO) entsteht bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Materialien bei hohen Temperaturen und niedriger Sauerstoffzufuhr [177]. Vor allem die Nutzung von Kohlegrills in Innenräumen ohne ausreichende Lüftung sorgt für einen Anstieg der CO-Konzentration. Jährlich sind in Deutschland rund 75.000 Klinikbehandlungen bei 3.000 Todesfällen aufgrund einer CO-Vergiftung notwendig [178]. Seit 2008 steigt die Zahl der Vergiftungsfälle durch CO stark an, weshalb das Bundesinstitut für Risikobewertung immer wieder neue Warnmeldungen veröffentlicht [179]. Bei der Stahlerzeugung entstehen durch Verbrennungsprozesse im Hochofen und der damit verbundenen Reaktion von Kohlenstoff mit zugeführtem Sauerstoff die Gase CO und CO<sub>2</sub> [180]. Die Symptome einer CO-Vergiftung reichen von Kurzatmigkeit, Müdigkeit, Übelkeit und Schwindel bei geringen Konzentrationen bis zu Koma, Krampfanfällen und Atem-Kreislaufversagen bei hohen Konzentrationen, siehe Tabelle 6.1.

Schweregrad	Symptome	CO-Hb-Anteil <sup>7</sup>
Leicht	Kurzatmigkeit bei Belastung, Kopfschmerzen	> 10%
	Schwindel, Übelkeit, Erbrechen	> 20%
Mittelschwer	Müdigkeit, Sehstörungen	> 30%
	Tachykardie, Bewusstseinsverlust, Herzrhythmusstörungen	> 40%
Schwer	Koma, Tachypnoe, Krampfanfälle	> 50%
	Krampfanfälle	> 60%
	Atem- und Kreislaufversagen	60 - 80%

**Tab. 6.1** Symptome einer CO-Vergiftung [178].

Eine Exposition mit CO hat drei Effekte auf den Menschen:

- Verringerung der Sauerstofftransportkapazität des Blutes
- Verminderung der Abgabe von Sauerstoff in das Gewebe
- Auftreten einer zytotoxischen Hypoxie (Verringerung des Sauerstoff-Partialdrucks SpO<sub>2</sub>)

<sup>7</sup> Der CO-Hb-Anteil gibt an wieviel Hämoglobin (Hb) mit CO beladen ist. Hb ist ein Protein der roten Blutkörperchen. CO hat im Vergleich zu Sauerstoff eine 240-fach erhöhte Affinität zu Hämoglobin, was zu einem geringeren O<sub>2</sub>-Transport führt [205].

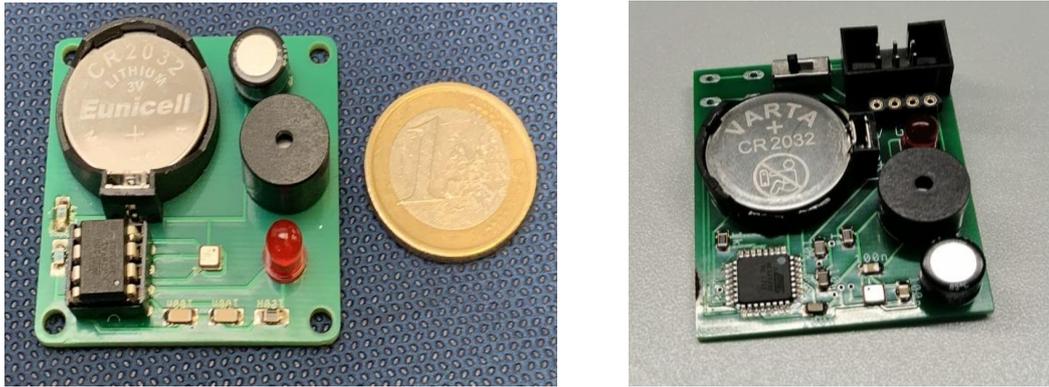
Der Arbeitsplatzgrenzwert für CO liegt bei 30 ppm über einen Zeitraum von 8 Stunden [106]. Bei höheren Konzentrationen gelten entsprechend kürzere Zeitintervalle, siehe Tabelle 6.2 [178].

<b>CO-Konzentration / ppm</b>	<b>Klinisch-toxische Risikobewertung</b>
< 30	Keine Gefährdung, Arbeitsplatzgrenzwert
30 - 60	Keine Gefährdung bei kurzzeitiger Exposition (<1 h), (Kurzzeitgrenzwert)
60 - 200	Nach 30 min Exposition leichte Vergiftungssymptome möglich
200 - 500	Nach 10 min Exposition leichte, nach 30 min mittelschwere Vergiftungssymptome möglich
500 - 1.000	Nach wenigen Minuten mittelschwere Vergiftungssymptome möglich. Potentiell tödlich nach Stunden
1.000 - 3.000	Nach wenigen Minuten schwere Vergiftungssymptome. Potentiell tödlich nach ca. 30 min
3.000 - 10.000	Potentiell tödlich innerhalb weniger Minuten

**Tab. 6.2** Klinisch-toxische Risikobewertung in Abhängigkeit der CO-Konzentration [177].

### **Fragestellung und Konzeption einer Hardware**

Ein wichtiger Punkt bei der Entwicklung des CO-Melders war der Aspekt der Mobilität. Es soll möglich sein, diesen jederzeit und überall bei sich zu tragen. Aus diesem Grund sind Größe und Lebensdauer der Batterie zur Energieversorgung entscheidende Punkte. Daher entwickelte der Schüler eine Platine mit den Maßen 4 cm x 4 cm und integrierte den MOX-Halbleiter Gassensor BME680 der Firma Bosch Sensortec [161], einen Mikrocontroller, einen Buzzer zur Erzeugung eines akustischen Warnsignals, eine rote LED zur Erzeugung eines optischen Warnsignals und eine Knopfzelle zur Energieversorgung, siehe Abbildung 6.2.



**Abb. 6.2** Hardware des mobilen CO-Melders mit zwei verschiedenen Mikrocontrollern. Dieser hat die Maße 4 cm x 4 cm und ist mit dem MOX-Halbleiter Gassensors BME680, einem Buzzer, einer LED und eine Knopfzelle zur Energieversorgung bestückt. Links: Erste Version mit dem Mikrocontroller ATtiny. Rechts: Überarbeitete Version mit dem Mikrocontroller ATmega328.

Auf dem ersten Prototyp des CO-Melders wurde der Mikrocontroller ATtiny verwendet [181]. Aufgrund der Rechenleistung und des zu geringen Flash-Speichers von 16 kB wurde in der zweiten Version der Mikrocontroller ATmega328 integriert [182]. Dieser besitzt einen 32 kB großen Flash-Speicher und ist so in der Lage, das im Folgenden erstellte mathematische Modell zu speichern. Durch die Nutzung des energiesparenden MOX-Halbleiter Gassensors und eines energieeffizienten Mikrocontrollers erreicht der CO-Melder Betriebszeiten von mehreren Tagen im Dauerbetrieb.

### Entwicklung der Methodik zur Datenerhebung

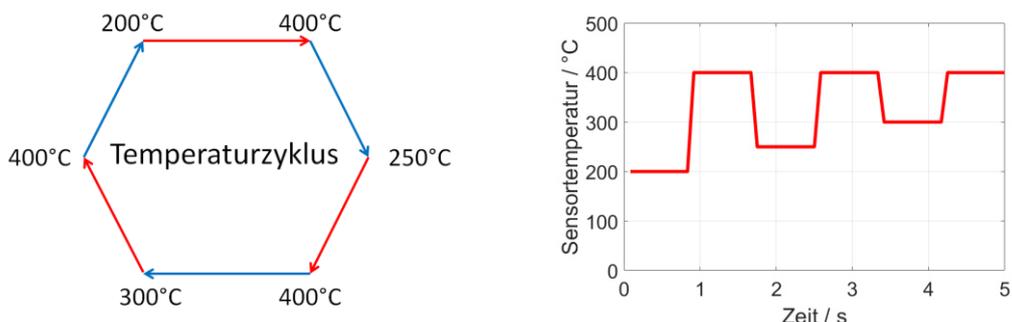
Für die Kalibrierung ist es zunächst nötig, Trainingsdaten zu erheben. Dazu wurde die folgende Kalibrierungsroutine, die auf den in Kapitel 4.5 vorgestellten Methoden basiert, verwendet. Die Kalibrierung wurde am LMT der Universität des Saarlandes und der dortigen GMA (vgl. Kapitel 4.4.1) durchgeführt. Sie ist in die fünf Abschnitte

- Aufnahme von Trainingsdaten
- Signalvorverarbeitung
- Dimensionalitätsreduktion und Merkmalsextraktion
- Mathematische Modellerstellung
- Validierung

unterteilt. Auf der Grundlage von zuvor durchgeführten Messungen der Sensorresponse bei unterschiedlichen Sensortemperaturen entschied sich der Schüler einen Temperaturzyklus zu verwenden, der in Abbildung 6.3 gezeigt ist, und aus der folgenden Temperaturabfolge besteht

... → 200°C → 400°C → 250°C → 400°C → 300°C → 400°C → ...

Dabei wird jede Temperatur ca. 0,8 Sekunden gehalten, was zu einer Gesamtdauer des Zyklus‘ von 5 Sekunden führt. Die Abtastrate beträgt 10 Hz.

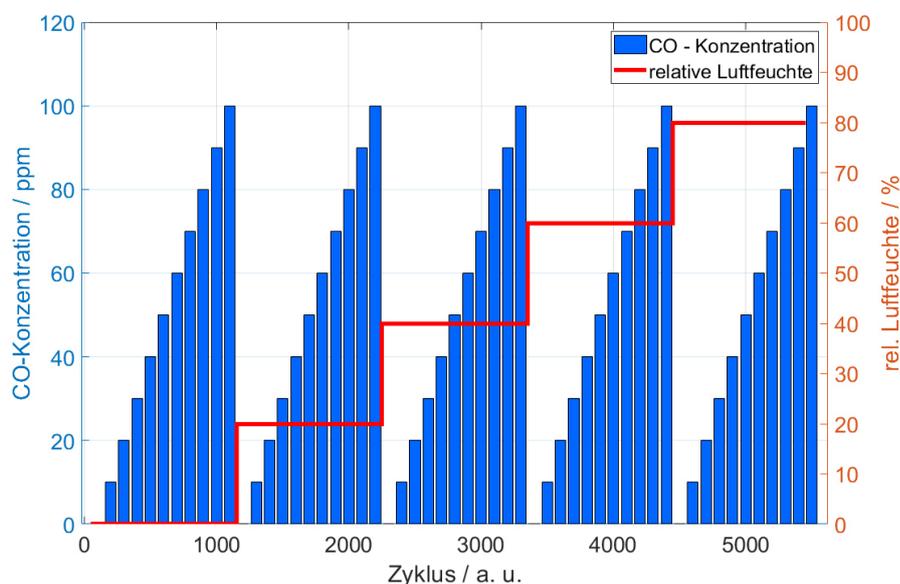


**Abb. 6.3** Verwendeter Temperaturzyklus für die Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors auf CO.

### Datenaufnahme – Aufnahme von Trainingsdaten

Für die Aufnahme der Trainingsdaten wurden unterschiedliche CO-Konzentrationen in der GMA erzeugt und über den Sensor geführt. Da der Sensor sehr empfindlich auf relative Luftfeuchte reagiert, wurde diese variiert. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei der Umweltstudie nur um ein Proof-of-Concept gehandelt hat, wurde bei der Kalibrierung auf die Verwendung von Störgasen zur Beseitigung von Querempfindlichkeiten verzichtet.

Die Wahl des Konzentrationsbereichs für die Kalibrierung ist von dem jeweiligen Anwendungsfall abhängig. Der MAK-Wert von CO bei einer Expositionszeit von 8 Stunden liegt bei 30 ppm, der Kurzzeitgrenzwert bei einer Expositionszeit von 1 Stunde liegt bei 60 ppm [106]. Aus diesem Grund entschied sich der Schüler dazu den Sensor auf Konzentrationen im Bereich zwischen 0 und 100 ppm zu kalibrieren. Dazu wurde ein Gasprofil erstellt, siehe Abbildung 6.4. Die Konzentration an CO wird schrittweise in 10 ppm-Schritten von 0 auf 100 ppm erhöht. Gleichzeitig erfolgt eine Variation der relativen Luftfeuchte in 20% - Schritten von 0% bis 80%.

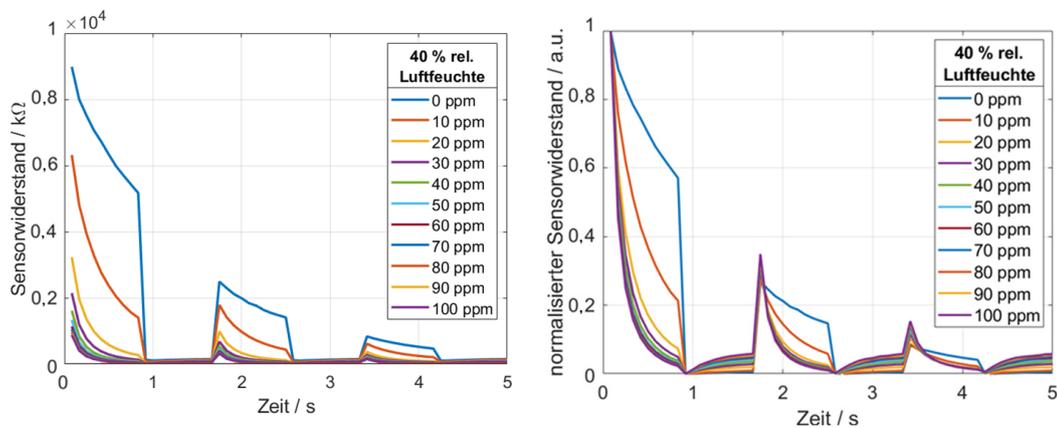


**Abb. 6.4** Gas- und Feuchteprofil zur Aufnahme von Trainingsdaten.

Um eine ausreichende Statistik der Sensordaten zu erhalten, werden für jede Kombination aus CO-Konzentration und relativer Luftfeuchte je 100 Zyklen aufgenommen. Da der verwendete Sensor zudem über einen integrierten Luftfeuchtesensor verfügt, kann die relative Luftfeuchte im weiteren Verlauf gemessen und als Merkmal verwendet werden.

### Signalvorverarbeitung

Um einem möglichen Sensordrift entgegenzuwirken, wurden die aufgenommenen Trainingsdaten zyklensweise nach Gl. (4.13) normalisiert. Abbildung 6.5 zeigt die durchschnittlichen Sensorsignale innerhalb eines Temperaturzyklus‘ bei unterschiedlichen CO-Konzentrationen ohne (links) und mit Normalisierung (rechts).



**Abb. 6.5** Zyklusverlauf bei unterschiedlichen CO-Konzentrationen und einer relativen Luftfeuchte von 40 %. Links: Rohdaten. Rechts: Normalisiert.

In Abbildung 6.6 sind die normalisierten Trainingsdaten für unterschiedliche relative Luftfeuchten abgebildet. Der Messbereich des Sensors liegt zwischen 0 und 12,8 M $\Omega$ . Bei einer relativen Luftfeuchte von 0% und einer CO-Konzentration von 0 ppm, sowie einer Sensortemperatur von 200°C ist das Sensorsignal außerhalb des Messbereichs, weshalb der normalisierte Wert konstant bei 1 liegt. Bei einer relativen Luftfeuchte von 80% ist der Einfluss der unterschiedlichen CO-Konzentrationen in den normalisierten Daten sehr gering, weshalb die Messkurven kaum Unterschiede aufweisen. Dieser Effekt ist nicht typisch für das Verhalten von MOX-Halbleiter Gassensoren, jedoch zeigte der BME680 auch schon bei früheren Messungen solche Ergebnisse.

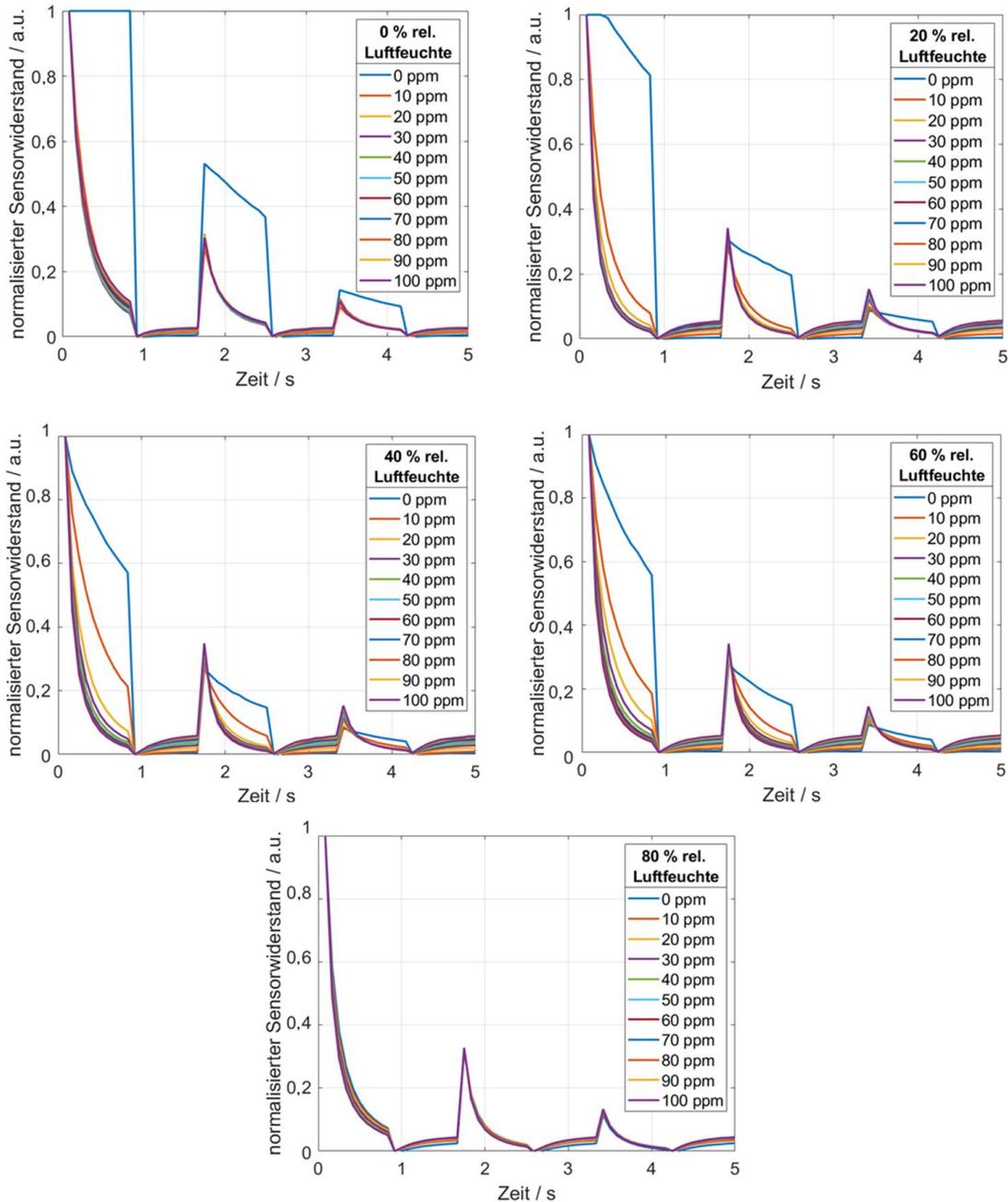
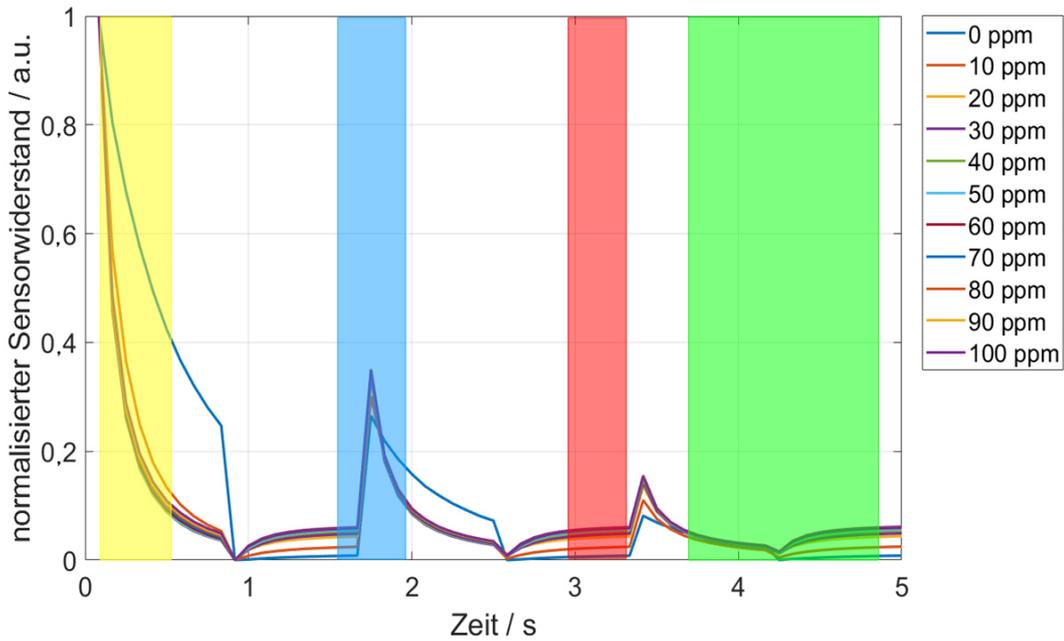


Abb. 6.6 Normalisierte Zyklen bei unterschiedlichen CO-Konzentrationen und relativen Luftfeuchten.

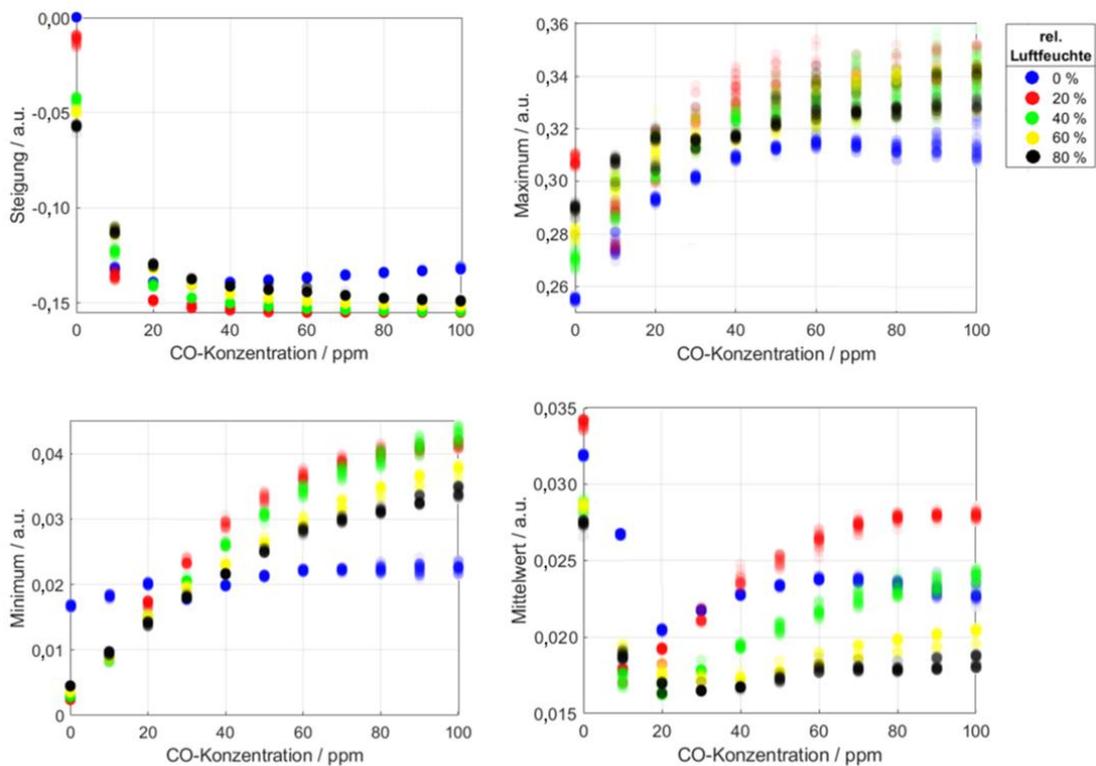
### Dimensionalitätsreduktion und Merkmalsextraktion

Um den Datensatz für die mathematische Modellbildung ausreichend zu minimieren, und dennoch die wichtigen Informationen zu extrahieren hat der Schüler nun besondere Merkmale bestimmt, die seiner Meinung nach für eine Unterscheidung der Kurven geeignet sind. Dabei wurden für den Schüler anschauliche, und leicht verständliche Merkmale, wie Steigung, Maximum, Minimum und Mittelwert in definierten Zeitintervallen innerhalb eines Zyklus verwendet, siehe Abbildung 6.7. Diese wurden bereits in Lernmodul 2 – Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors – vorgestellt.



**Abb. 6.7** Durchschnittliche normalisierte Zyklen bei unterschiedlichen CO-Konzentrationen und Bestimmung der Merkmale in (durch den Schüler) definierten Zyklusintervallen. Steigung (gelb), Maximum (blau), Minimum (rot) und Mittelwert (grün).

Abbildung 6.8 zeigt die bestimmten Merkmale bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten.



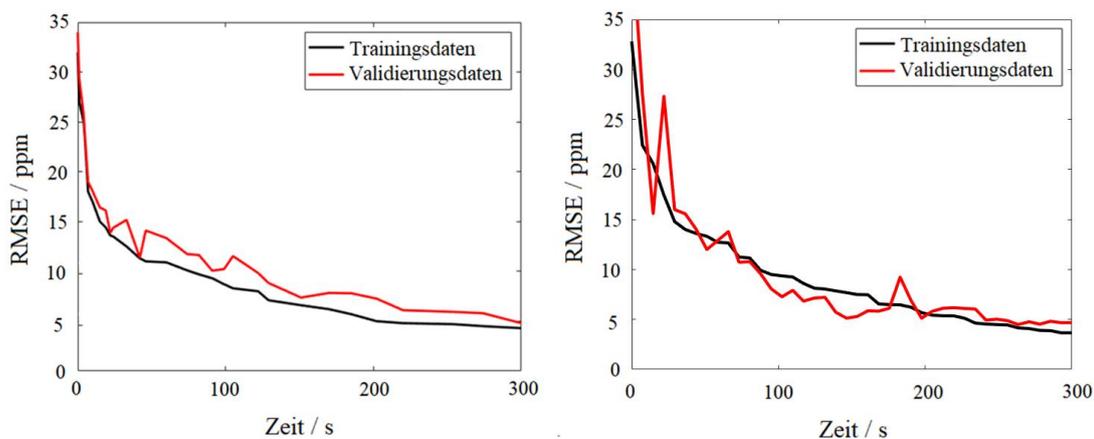
**Abb. 6.8** Ermittelte Merkmale bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten und CO-Konzentrationen. V.l.o.n.r.u.: Steigung, Maximum, Minimum und Mittelwert in zuvor definierten Zyklusintervallen.

Auffällig ist, dass die Sensorreaktion bei niedrigen Konzentrationen vergleichsweise stark ist und die Änderung der Merkmale für hohe Konzentrationen abnimmt. Die Streuung des Merkmals „Steigung“ ist am geringsten, wohingegen das Minimum in dem ausgewählten Bereich die größte Streuung aufweist. Das Merkmal „Mittelwert“ nimmt bei allen relativen Luftfeuchten und CO-Konzentrationen bis 20 ppm zunächst ab, ehe es bei höheren Konzentrationen wieder ansteigt. Dieser Verlauf zeigt deutlich das nicht-lineare und komplexe Verhalten eines MOX-Halbleiter Gassensors.

### Auswertung und Interpretation der Ergebnisse – Mathematische Modellerstellung und Validierung

Für die mathematische Modellerstellung mittels ANN testete der Schüler verschiedene Kombinationen aus Anzahl verborgener Schichten und Anzahl der Neuronen in jeder Schicht. Schließlich entschied er sich dazu ein ANN mit zwei verborgenen Schichten und jeweils 10 Neuronen zu verwenden. Die Validierung des mathematischen Modells zum Ausschluss von Overfitting-Effekten erfolgt über die zufällige Aufteilung in Trainingsdaten (90% der Daten) und Validierungsdaten (10% der Daten). Weiterhin konnte durch die Nicht-Nutzung einer ganzen Datengruppe für das Training des mathematischen Modells (z. B. 20 ppm) ein Rückschluss auf die Generalisierbarkeit des Modells gezogen werden.

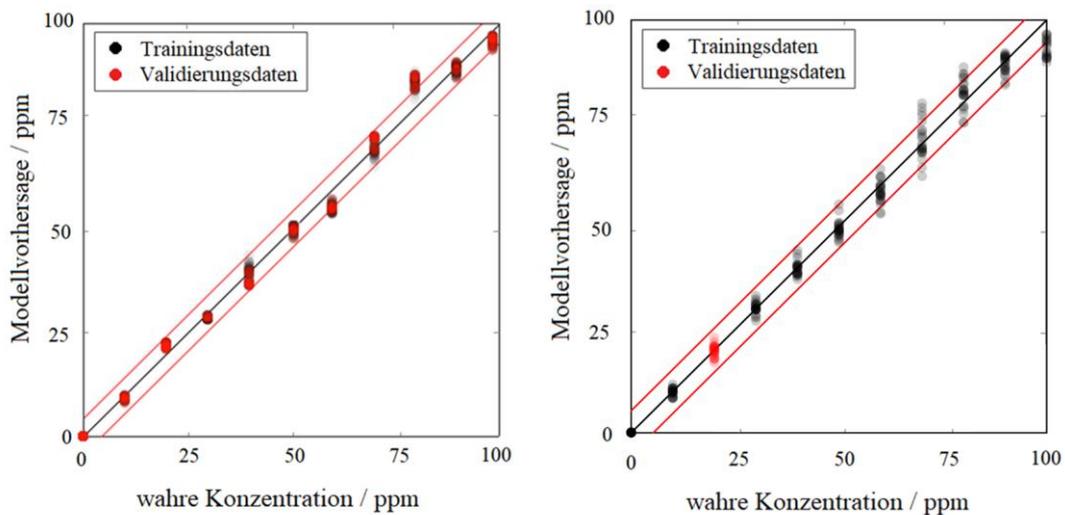
Nach einer Trainingszeit von 300 Sekunden ergibt sich ein mittlerer quadratischer Fehler (RMSE) von 4,3 ppm (zufällige Aufteilung) bzw. 4,1 ppm (gruppenbasierte Aufteilung) für die Trainingsdaten und 4,8 ppm (zufällige Aufteilung) bzw. 4,9 ppm (gruppenbasierte Aufteilung) für die Validierungsdaten. Diese Genauigkeit ist für die gestellten Anforderungen bereits ausreichend, weshalb auf eine längere Trainingszeit verzichtet wird. Der Verlauf der mittleren quadratischen Fehler für Trainings- und Validierungsdaten in Abhängigkeit der Trainingszeit ist in Abbildung 6.9 zu sehen.



**Abb. 6.9** Verlauf des mittleren quadratischen Fehlers für Trainingsdaten (schwarz) und Validierungsdaten (rot) innerhalb der ersten 300 Sekunden des Trainingsprozesses. Links: Validierungsdatensatz bestehend aus zufälligen 10 % des Trainingsdatensatzes. Rechts: Validierungsdatensatz bestehend aus der Gruppe „20 ppm“.

Bei der zufälligen Auswahl von Trainingsdaten liegt der Validierungsfehler während des gesamten Trainingsprozesses nur geringfügig oberhalb des Trainingsfehlers. Bei der gruppenbasierten Aufteilung der Daten zeigt der Validierungsfehler größere Schwankungen. Insgesamt kann anhand dieser Verläufe davon ausgegangen werden, dass kein Overfitting stattgefunden hat und das Modell generalisierbar ist.

In Abbildung 6.10 ist die Vorhersage des mathematischen Modells gegen die wahre CO-Konzentration aufgetragen. Bei einer perfekten Vorhersage liegen die Punkte auf der Winkelhalbierenden. Die roten Punkte symbolisieren die Validierungsdaten, schwarze Punkte die Trainingsdaten. Die rote Linie visualisiert den RMSE.



**Abb. 6.10** Vorhersage des erstellten mathematischen Modells auf Basis eines ANN, bestehend aus zwei verborgenen Schichten mit je 10 Neuronen, gegen die wahre CO-Konzentration. Schwarze Punkte: Trainingsdaten. Rote Punkte: Validierungsdaten. Links: Validierungsdatensatz bestehend aus zufälligen 10 % des Trainingsdatensatzes. Rechts: Validierungsdatensatz bestehend aus der Gruppe „20 ppm“.

Die Modellbildung und Validierung erfolgte analog zu Lernmodul 2 über einen JavaScript Algorithmus. Nach Beendigung des Trainingsprozesses wurde weiterhin automatisch ein Arduino-Code erstellt, welcher direkt auf den Mikrocontroller hochgeladen werden konnte. Dieser enthält den Temperaturzyklus, das mathematische Modell, die Merkmalsbestimmung nach Durchlaufen des Temperaturzyklus und den Feed-Forward Algorithmus zur Berechnung der Konzentration.

Um das Modell auf Plausibilität zu testen legte der Schüler die Platine in eine Messkammer, in der sich brennende Kerzen befanden, wodurch unter anderem CO freigesetzt wurde. Nach wenigen Sekunden wurde dieses durch den mobilen CO-Melder detektiert, woraufhin zunächst ein optisches und kurz darauf ein akustisches Warnsignal ausgesendet wurde.

## Fazit und Ausblick

In dieser Schülerumweltstudie konnte ein Schüler einer 9. Klasse einen mobiler CO-Melder entwickeln, der oberhalb einer CO-Konzentration von 30 ppm ein optisches und oberhalb von 60 ppm ein akustisches Warnsignal erzeugt. Dazu wurden insgesamt drei Exemplare einer kompakten Hardware basierend auf einem MOX-Halbleiter Gassensor konzipiert und dieser auf verschiedene CO-Konzentrationen und bei variabler relativer Luftfeuchte kalibriert. Die mathematische Modellerstellung erfolgte mit Hilfe von Machine Learning in Form von ANN. Der Schüler setzte sich während der Studie mit dem Thema Luftqualität, Luftschadstoffe, Entwicklung und Kalibrierung von Gassensoren auseinander. Durch den Besuch am LMT der Universität des Saarlandes konnte er zudem Einblicke in Prinzipien wissenschaftlicher Arbeit gewinnen. Im Laufe der Arbeit zeigte sich der Schüler sehr interessiert an der Thematik und brachte immer wieder eigene Vorschläge in das Projekt ein. Jedoch zeigte sich auch, dass der Schüler Probleme mit eigenständiger Arbeit hatte, sodass die Betreuung während der Studie von großer Bedeutung war. Dies kann jedoch mit dem jungen Alter des Schülers und der gleichzeitigen Komplexität der Studie begründet werden.

Aufbauend auf diesem ersten Proof-of-Concept könnte in einer zukünftigen Umweltstudie der Fokus weniger auf die Entwicklung einer geeigneten Hardware, sondern mehr auf die Kalibrierung gelegt werden. Dies beinhaltet die Verwendung von Störgasen zum Ausschluss von Querempfindlichkeiten oder die Verwendung von weiteren Methoden der mathematischen Modellerstellung wie PLSR und LDA.

## 6.2.2 Waldbrandfrüherkennung

Als Folge des Klimawandels und den damit verbundenen häufigeren Trockenperioden steigt die Gefahr für großflächige Waldbrände wie beispielsweise den Buschfeuern in Australien Anfang des Jahres 2020 oder den immer wieder auftretenden Waldbränden in Kalifornien, USA. Neben den wirtschaftlichen Folgen von nicht mehr nutzbaren Flächen hat zudem die Freisetzung von Schadstoffen gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen. Aus diesem Grund hat sich ein Schüler einer 11. Klasse des Max-Planck-Gymnasiums Saarlouis dazu entschieden, ein System zur Waldbrandfrüherkennung zu entwickeln. Dieses soll ermöglichen, Waldbrände bereits kurz nach deren Ausbruch zu detektieren, sodass rechtzeitig Maßnahmen zur Eindämmung des Brandes getroffen werden können, um so die Ausbreitung von großflächigen Waldbränden zu unterbinden („Finden eines Themenfeldes“).

Nach dem Finden eines Themenfeldes sammelte der Schüler in einer Literaturrecherche Informationen über Kennzahlen von biologischen und

wirtschaftlichen Schäden, die mit Waldbränden einhergehen. Außerdem recherchierte er über die Prinzipien und Kosten herkömmlicher Waldbrand-Warnsysteme. Daneben wurden dem Schüler Informationen über gesundheitliche Auswirkungen von Feinstaub und beispielhaft der Aufbau von Warnsystemen in Deutschland zur Verfügung gestellt („Literaturrecherche“).

Auf dieser Grundlage stellte sich heraus, dass herkömmliche Warnsysteme in Deutschland meist auf optischen Methoden zur Detektion von Bränden basieren und der Betrieb in der Regel mit sehr hohen Kosten verbunden ist. Daher definierte der Schüler die Anforderungen, dass das neu entwickelte System vor allem kostengünstig zu realisieren sein muss sowie unabhängig von externen Energiequellen funktionieren sollte. Dafür konzipierte er ein 3D-gedrucktes Messgehäuse, welches er mit einem Solarpanel ausstattete. Weiterhin testete er sowohl Gas- als auch Feinstaubsensoren auf ihre Eignung zur Detektion eines Brandes. Dazu sammelte er Laub, entzündete dieses, um einen Waldbrand zu simulieren, und nahm die Sensorreaktion auf. Bei der Programmierung des Mikrocontrollers zur Steuerung der Sensoren wurde er von einem Betreuer unterstützt. Auf der Basis dieser Messungen entschied er sich für die Verwendung eines Feinstaubensors („Fragestellung und Konzeption einer Hardware“).

Um den Einfluss von Wind auf die Detektion eines Brandes zu minimieren, entschied sich der Schüler dazu, mehrere Messsysteme, sog. „Sensor-Nodes“, an unterschiedlichen Standorten um den Wald herum aufzustellen. Um die Datenaufnahme zu automatisieren, nutzte er ein LoRa-Netzwerk, wodurch die Sensor-Nodes in der Lage sind, Daten untereinander auszutauschen und an eine Online-Datenbank zu senden. Dadurch sollte es ermöglicht werden, den Ort des Brandherdes einzugrenzen. Außerdem wurde ihm der Software-Code zum Versenden einer automatisierten Warn-E-Mail beim Überschreiten eines definierten Grenzwertes zur Verfügung gestellt („Entwicklung einer Methodik zur Datenerhebung“).

Um diesen Grenzwert zu definieren, untersuchte der Schüler zunächst eigenständig die natürliche Feinstaubkonzentration in einem Wald. Anschließend entzündete er ein Grillfeuer auf einem Grillplatz und untersuchte die Feinstaubemission in einem Abstand von 50 m („Datenaufnahme“).

Auf Grundlage dieser Daten definierte er einen Grenzwert, ab dem das System einen Alarm aussenden soll. Erste Tests des Warnsystems zeigten positive Ergebnisse. Dennoch besteht weiterhin Optimierungsbedarf bezüglich der Energieversorgung, da die verwendeten Solarpanels nicht ausreichend Energie für einen Dauerbetrieb zur Verfügung stellen konnten („Auswertung und Interpretation der Ergebnisse“).

Diese Schülerumweltstudie legt den Fokus vorrangig auf die Aspekte Sicherheit und die Konstruktion sowie Vernetzung einer Hardware mittels LoRa-Technologie. Die Beschreibung der Durchführung und der Ergebnisse wurden durch den Schüler in einer Facharbeit festgehalten (vgl. I.8). In Abbildung 6.11 sind stichpunktartig die verschiedenen Schritte dieser Umweltstudie zu sehen. Im Folgenden werden diese detailliert beschrieben.

### **Literaturrecherche**

Waldbrände haben sowohl wirtschaftliche als auch gesundheitliche Auswirkungen auf das Leben von Menschen und Tieren. Nach Angaben des WWF haben weltweit jedoch nur etwa 4% aller Waldbrände (bezogen auf die Anzahl) natürliche Ursachen wie Blitzeinschläge. In der überwiegenden Anzahl der Fälle ist der Mensch durch fahrlässiges oder vorsätzliches Verhalten für die Entstehung von Waldbränden verantwortlich [183].

Nach Angaben des „California Department of Forestry and Fire Protection“ haben die Brände im US-Bundesstaat Kalifornien im Jahr 2018 knapp 8.000 km<sup>2</sup> Waldfläche vernichtet und 100 Menschenleben gekostet [184]. Die Waldbrände im Jahr 2020 in Kalifornien haben bis zum September eine Fläche von über 9.200 km<sup>2</sup> vernichtet [185]. Nach Angaben der Universität Sydney starben bei dem Buschfeuer in Australien im Jahr 2020 ca. eine Milliarde Tiere und mehr als 20 % der Waldgebiete brannten nieder [186] [187].

Neben der direkten Bedrohung durch das Feuer gibt es aber auch langfristige Auswirkungen auf die Gesundheit. Besonders die Luftqualität verringert sich durch die Freisetzung von Feinstaub und anderen Luftschadstoffen. Einer Studie von Fann et al. aus dem Jahr 2018 zufolge führte die erhöhte Luftverschmutzung in den USA aufgrund von Waldbränden in den Jahren 2008-2012 zu einem Anstieg der „premature deaths“. In diesem Zeitraum konnten pro Jahr zwischen 5.200 und 8.500 Krankenhausaufenthalte sowie zwischen 1.500 und 2.500 Tode direkt auf Feinstaub zurückgeführt werden. Weiterhin entstand bis zum Jahr 2016 langfristig ein wirtschaftlicher Schaden für das Gesundheitssystem von ca. 513 Milliarden US-Dollar [188].

Um Waldbrände frühzeitig zu detektieren und so rechtzeitig Maßnahmen zur Bekämpfung und Eindämmung der Feuer einleiten zu können, werden verschiedene Verfahren verwendet. Diese reichen von der Nutzung von Satellitenbildern, die jedoch nur eine geringe örtliche und zeitliche Auflösung haben, über den Einsatz von Überwachungsflügen und Beobachtern in Wachtürmen in Risikogebieten bis hin zur Rauchererkennung mittels Überwachungskameras, wie in Abbildung 6.12 dargestellt.

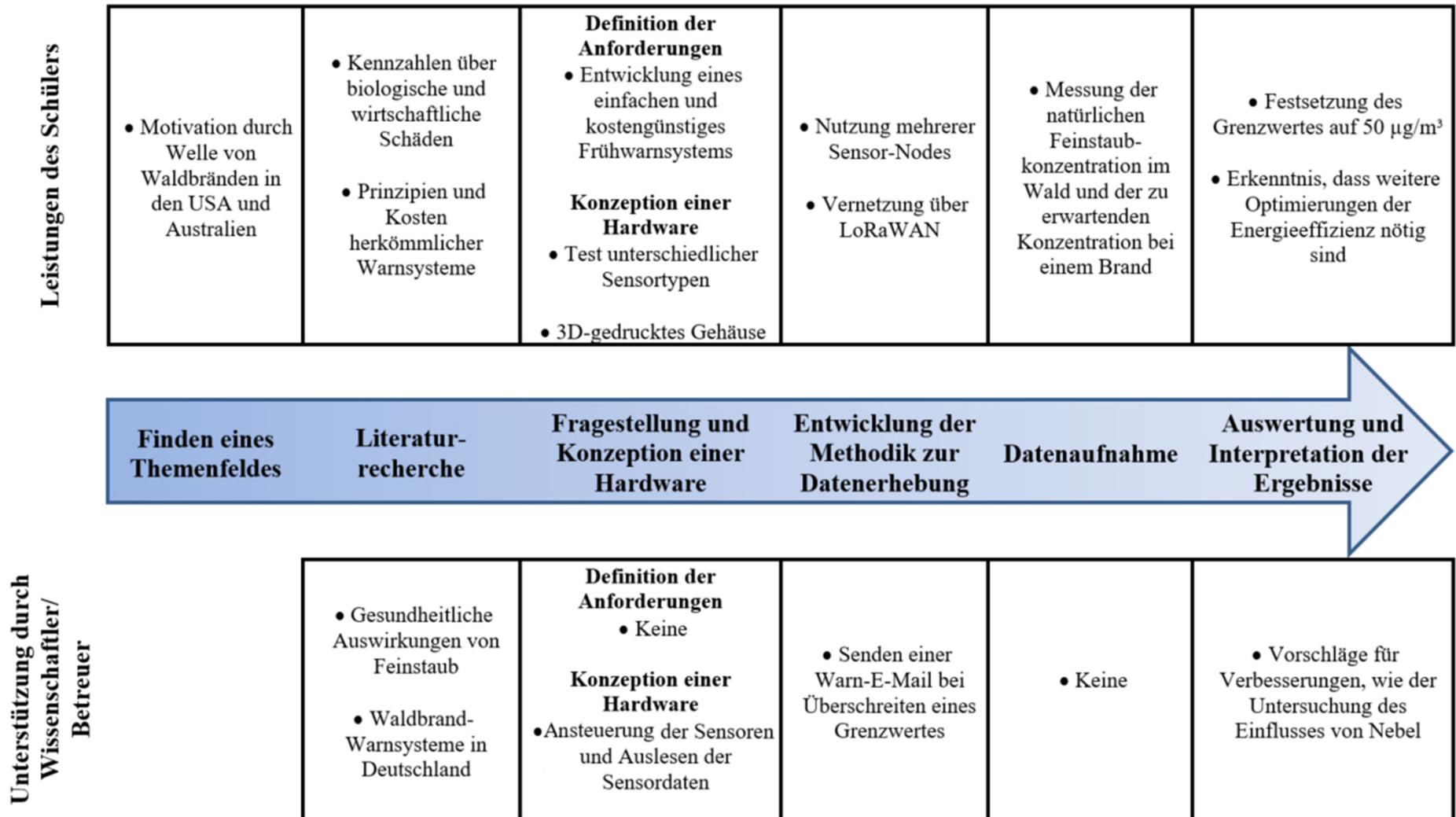
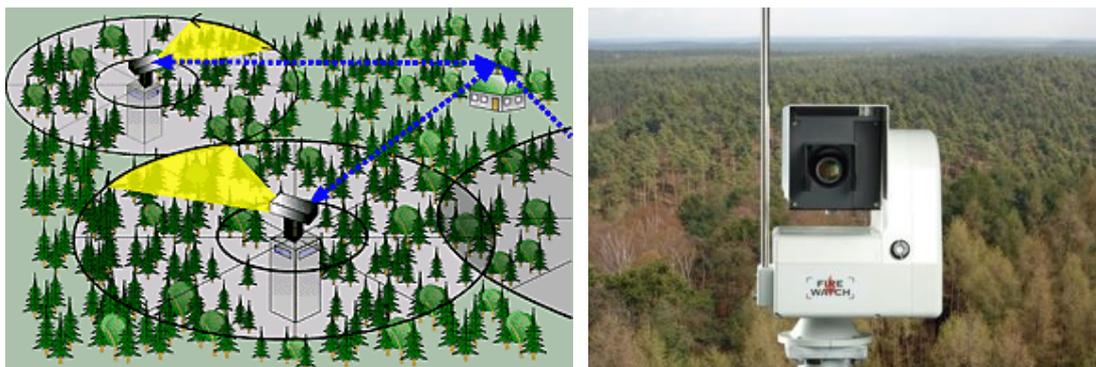


Abb. 6.11 Leistungen des Schülers und Unterstützung durch einen Wissenschaftler/Betreuer bei der Entwicklung eines Waldbrandfrühwarnsystems.



**Abb. 6.12** Links: Prinzip des automatischen Waldbrandüberwachungssystems „FireWatch“, welches zusammen vom deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und dem Unternehmen IQ wireless GmbH entwickelt wurde. Rechts: Kamera zur Detektion von Rauchwolken [189].

Bei diesem Verfahren, welches vom deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der Firma IQ wireless GmbH entwickelt wurde, werden im Abstand von ca. 15 km Masten mit Kameras aufgestellt, die automatisiert die Umgebung auf eine Rauchentwicklung scannen [189]. Pro Kamera wird so ein Gebiet von ca. 700 km<sup>2</sup> überwacht. Mögliche Warnmeldungen werden an eine Zentrale gesendet und dort von einem Mitarbeiter bewertet. Bis heute existieren jedoch noch keine kostengünstigen, kommerziellen Lösungen zur frühzeitigen Detektion von Waldbränden, die auch von Privatpersonen verwendet werden können.

### **Entwicklung einer Fragestellung und Aufstellen einer Hypothese**

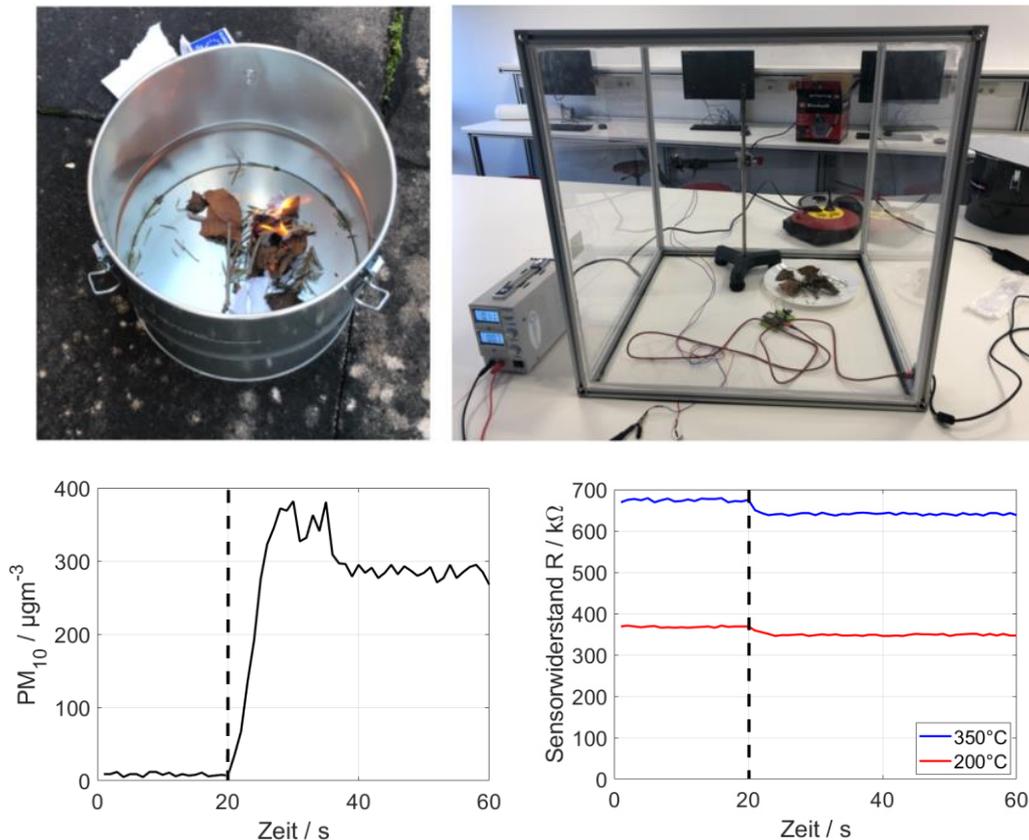
Auf der Grundlage der Literaturrecherche entwickelte der Schüler die folgenden Fragestellungen:

- Ist es möglich ein kostengünstiges Waldbrand-Früherkennungssystem zu entwickeln?
- Welcher Sensortyp eignet sich am besten zur Detektion eines Waldbrands?
- Wann und in wie soll das System bei der Detektion eines Brandes Alarm schlagen?
- Wie kann das System mit Energie versorgt werden?

### **Konzeption der Hardware**

Für die Entwicklung der Hardware evaluierte der Schüler zunächst, welche Art von Sensor für die Detektion von Waldbränden geeignet ist. Da in Rauch nachweislich sowohl eine hohe Konzentration an Feinstaub als auch an flüchtigen organischen Verbindungen als Folge von Verbrennungsprozessen enthalten sind, wurden der Feinstaubsensor SPS30 und der MOX-Halbleiter Gassensor BME680 näher untersucht. Für den Test sammelte der Schüler eine Auswahl aus Blättern und Ästen häufiger Baumarten in Deutschland, wie Ahorn, Birke und Buche, und verbrannte sie in einem Metalleimer. Über eine Spritze wurde 3 ml Rauch von dem verbrannten

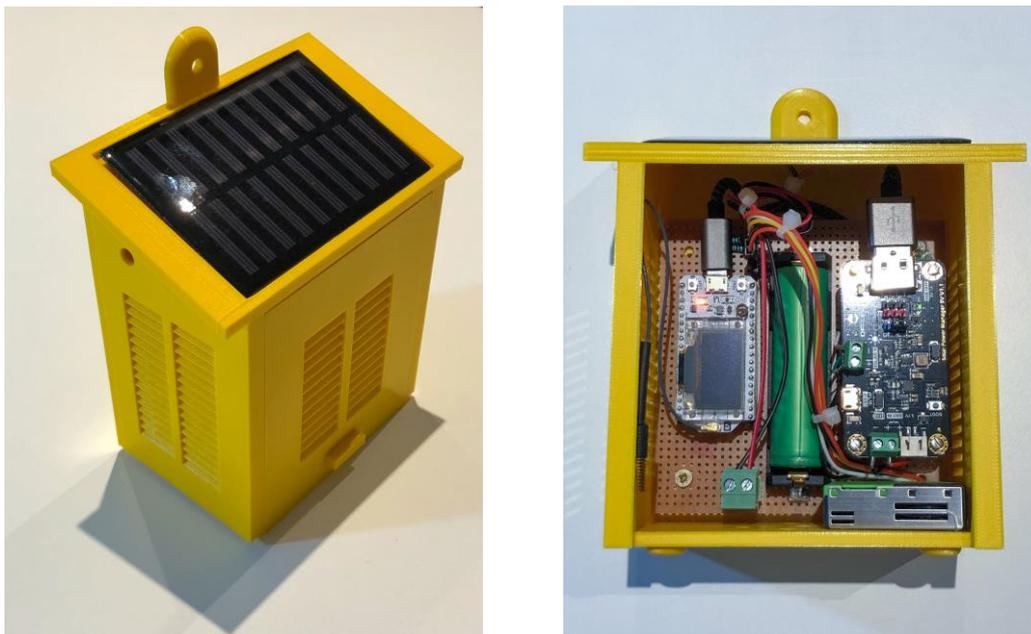
Material entnommen und in eine 1m x 1m x 1m große Messkammer, in der sich die Sensoren befinden überführt, siehe Abbildung 6.13 oben. Über einen Ventilator wurde eine uniforme Verteilung des Rauchs sichergestellt.



**Abb. 6.13** Oben: Verbrennung von Blättern und Ästen zur Simulation eines Waldbrandes und Test der Reaktion des Feinstaubsensors und des MOX-Halbleiter Gassensors in einer Messkammer. Unten: Reaktion des Feinstaubsensors und des MOX-Halbleiter Gassensors bei zwei unterschiedlichen Sensortemperaturen von 350°C und 200°C. Der Rauch wurde nach 20 Sekunden injiziert.

Bereits bei sehr geringen Mengen Rauch reagierte der Feinstaubsensor mit einem Ausschlag von bis zu 400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , wohingegen der MOX-Halbleiter Gassensor bei Temperaturen von 200°C und 350°C nur eine geringe Reaktion zeigte, siehe Abbildung 6.13 unten. Aus diesem Grund entschied sich der Schüler für den weiteren Verlauf für die Arbeit für die Nutzung eines Feinstaubsensors.

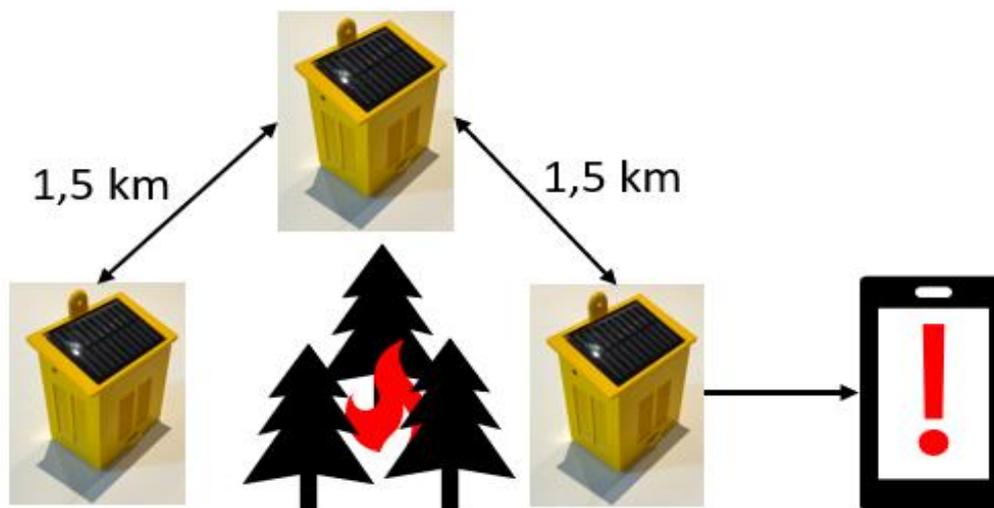
Um das System vor äußeren Einflüssen wie Witterung und Tieren zu schützen, wurde es in ein 3D-gedrucktes Gehäuse in Form eines Vogelhäuschens platziert, siehe Abbildung 6.14. Dieses besitzt an den Seiten Öffnungen, was einen Luftaustausch mit der Umgebung ermöglicht. Die Stromversorgung wird durch die Verwendung eines Lithium-Ionen-Akkus und eines Solarpanels gewährleistet, welches an der Oberseite des Gehäuses befestigt ist. Die Steuerung des Sensors und die Datenübertragung erfolgt über den Mikrocontroller ESP32 LoRa SX1276 [190]. Die Kosten der Hardware belaufen sich insgesamt auf ca. 120 € pro Node und sind somit auch für Privatpersonen bezahlbar.



**Abb. 6.14** Entwickelte 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.

### Entwicklung der Methodik zur Datenerhebung

Rauchpartikel werden überwiegend durch Luftströmungen verteilt. Daher kann es bei ungünstiger Windrichtung dazu kommen, dass der Brand nicht detektiert werden kann. Um dieses Problem zu beheben entschied sich der Schüler dazu mehrere Sensorstationen (Nodes) zu verwenden, die an verschiedenen Stellen am Waldrand platziert werden. Dadurch kann sichergestellt werden, dass ein Brand auch windunabhängig detektiert wird. Durch das Anbringen der Nodes in erhöhter Position (~ 2,5 m) kann zudem die Wahrscheinlichkeit verringert werden, dass Tiere diese beschädigen. Abbildung 6.15 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Systems.



**Abb. 6.15** Prinzip des Waldbrand-Früherkennungssystems. Mehrere Sensor-Nodes werden am Waldrand platziert und können die gemessenen Daten über ein LoRa-Netzwerk weiterleiten. Das Warnsignal wird dann per E-Mail auf einem Smartphone angezeigt.

Um die Messdaten des Sensors zu verarbeiten programmierte der Schüler einen Mikrokontroller so, dass die Messdaten mit Hilfe eines Senders über das Frequenzband um 868 - 915 MHz zu einem Servermodul geschickt werden. Dazu nutzte der Schüler ein, auf der LoRaWAN-Technologie basiertes, Netzwerksystem (vgl. Kapitel 3.6). Dieses Netzwerkprotokoll wurde speziell für Geräte mit niedrigem Stromverbrauch entwickelt. Es ermöglicht Kommunikationsreichweiten von bis zu wenigen Kilometern. Ein Test der Kommunikation zwischen einzelnen Nodes, die am Waldrand platziert wurden, ergab eine problemlose Datenübertragung über eine Entfernung von 1,5 km.

### Datenaufnahme

Um die minimale Konzentration des Feinstaubs zu bestimmen, bei denen das Sensormodul eine Warnung senden soll, führte der Schüler zunächst eine Messung der natürlichen Feinstaubkonzentration in einem Wald durch. Um den Einfluss von spezifischen lokalen Faktoren zu minimieren, wurden drei unterschiedliche Messorte im Abstand von 1 km ausgewählt. An jedem Ort wurde der Messvorgang über einen Zeitraum von 5 Minuten und einem Messintervall von 1 Sekunde durchgeführt. Anschließend bildete der Schüler Durchschnittswerte für jeden Ort, siehe Tabelle 6.3.

Teilchengröße / $\mu\text{gm}^{-3}$	Messort 1	Messort 2	Messort 3
PM <sub>0.5</sub>	4,5	4,1	4,7
PM <sub>1</sub>	4,6	4,2	4,7
PM <sub>2.5</sub>	5,0	4,6	4,9
PM <sub>4</sub>	5,1	4,7	5,1
PM <sub>10</sub>	5,2	5,0	5,2

**Tab. 6.3** Durchschnittliche Feinstaubkonzentration in einem Wald an drei verschiedenen Messorten mit einem Abstand von jeweils 1,5 km.

Im nächsten Schritt untersuchte der Schüler, welche Größenordnung der Feinstaubkonzentrationen bei einem Brand zu erwarten sind. Aufgrund von Sicherheitsbestimmungen ist es nicht möglich, diesen Test unter Realbedingungen durchzuführen. Um dennoch zumindest einen groben Anhaltspunkt zu erhalten, entzündete der Schüler ein Feuer auf einem gesicherten Grillplatz und nahm die Feinstaubkonzentration an drei unterschiedlichen Plätzen in einem Abstand von jeweils 50 m über einen Zeitraum von 5 Minuten und einem Messintervall von 1 Sekunde auf. Die durchschnittlichen Messwerte dieser Untersuchung sind in Tabelle 6.4 abgebildet. Es zeigt sich, dass die Feinstaubkonzentration an verschiedenen Orten unterschiedlich groß ist. Dies ist durch die Windrichtung zu erklären, wodurch sich

eine erhöhte Konzentration an Messort 1 ergibt. Es ist anzumerken, dass es sich hierbei um eine subjektive Messung handelt, da zu viele Parameter wie Rauchentwicklung und Windrichtung nicht kontrollierbar sind.

Teilchengröße / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Messort 1	Messort 2	Messort 3
PM <sub>0.5</sub>	31,3	5,3	9,3
PM <sub>1</sub>	32,3	5,5	9,7
PM <sub>2.5</sub>	34,1	6,6	9,8
PM <sub>4</sub>	35,6	6,7	10,3
PM <sub>10</sub>	45,6	7,4	13,4

**Tab. 6.4** Durchschnittliche Feinstaubkonzentration an drei Messorten in 50 m Entfernung von einem Grillplatz.

### Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Bei einem realen Waldbrand sind höhere Feinstaubkonzentrationen als bei einem Grillfeuer zu erwarten. Daher entschied sich der Schüler den Grenzwert der PM<sub>10</sub> – Konzentration, oberhalb der ein Alarmsignal in Form einer E-Mail an das Smartphone gesendet wird, auf 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  festzulegen. Abbildung 6.16 zeigt einen Screenshot der Benachrichtigung auf einem Smartphone. Diese enthält zudem Informationen über die aktuelle Feinstaubkonzentration.



**Abb. 6.16** Screenshot des Alarms in Form einer E-Mail auf dem Smartphone bei der Detektion einer erhöhten Feinstaubkonzentration.

Es zeigte sich, dass das System bei einem Dauerbetrieb mehr Energie benötigt als durch das Solarpanel zur Verfügung gestellt werden kann. Aus diesem Grund sollte es gepulst betrieben werden. Dabei schaltet sich das Sensormodul automatisch alle 30 Minuten über einen Zeitraum von 5 Minuten an und nimmt Sensordaten auf, ehe es sich wieder in einen Standby Zustand versetzt.

### **Fazit und Ausblick**

In dieser Schülerumweltstudie wurde der erste Prototyp eines vergleichsweise kostengünstigen Waldbrandfrüherkennungssystems entwickelt. Die Detektion eines Waldbrandes erfolgt durch Messung der Feinstaubkonzentration, welche sich im Falle einer Rauchentwicklung stark erhöht. Die aufgenommenen Sensordaten werden über ein LoRa-Netzwerk an ein Servermodul übermittelt und gespeichert. Bei der Detektion eines Brandes kann eine Warnmeldung über ein Smartphone angezeigt werden.

Aufgrund des hohen Energiebedarfs des Systems sind noch weitere Optimierungen im Bereich der Energieeffizienz notwendig. Weiterhin sollte der Einfluss von Staub oder Nebel auf den Feinstaubsensor untersucht werden, um die Wahrscheinlichkeit eines Fehlalarms zu minimieren. Außerdem ist die Festlegung des Grenzwertes, oberhalb dessen ein Alarmsignal ausgegeben wird, bisher noch subjektiv. Ein erster Ansatz, um dieses Problem zu beheben, ist die Durchführung von Messungen der Feinstaubemission von Bränden unterschiedlicher Größe und mit unterschiedlichen Laubarten über einen längeren Zeitraum. Auch der Einfluss des Wetters sollte untersucht werden. Diese Probleme sollen in einer folgenden Umweltstudie adressiert werden, in der die Aufnahme von realen Messdaten im Vordergrund stehen soll.

Der Schüler war während der gesamten Umweltstudie sehr interessiert, brachte immer wieder eigene Lösungsvorschläge ein und führte eigenständig verschiedene Messungen durch. Dabei reizte ihn vor allem die Bearbeitung von technischen Fragestellungen. Es wurde aber auch deutlich, dass der Schüler bei der Aufnahme von Messdaten nur wenig Geduld zeigte. Gerade bei der Bearbeitung einer komplexen Fragestellung wie der Detektion von Waldbränden sind längere Messreihen jedoch essentiell, um belastbare und objektive Aussagen treffen zu können.

### **6.2.3 Untersuchung der Luft in Bienenstöcken**

Die westliche Honigbiene (lateinisch: „apis mellifera“) hat einen wichtigen ökologischen Nutzen, da sie nach Angaben des Deutschen Imkerbunds e.V. beispielsweise für die Bestäubung von ca. 80% aller Wildpflanzen verantwortlich ist [191]. Motiviert durch die Möglichkeit der Zusammenarbeit mit einem lokalen Imker des Landesverbands saarländischer Imker haben sich zwei Schülerinnen einer 12.

Klasse des Geschwister-Scholl-Gymnasiums in Lebach dazu entschlossen, mehr über Bienen zu lernen und ein „Jugend forscht“-Projekt zu dem Thema „Luft in Bienenstöcken“ zu entwickeln („Finden eines Themenfeldes“).

Bei der Durchführung einer Literaturrecherche sammelten die Schülerinnen zunächst Informationen über die Temperatur, relative Luftfeuchte und Zusammensetzung der Luft in Bienenstöcken. Dabei stellten sie fest, dass es einerseits bereits eine Vielzahl an Veröffentlichungen bezüglich Temperatur und relativer Luftfeuchte in Bienenstöcken gibt, andererseits jedoch nur wenige Studien über Gase und Feinstaub in Bienenstöcken existieren. Bei der Recherche wurden sie bei der Suche passender Veröffentlichungen durch einen Betreuer unterstützt. Außerdem führten sie die Lernmodule 1 und 2 durch, um ein prinzipielles Verständnis zur Funktionsweise von MOX-Halbleiter Gassensoren zu erhalten („Literaturrecherche“).

Darauf aufbauend entschlossen sich die Schülerinnen, bei ihrer Studie zum einen bereits bekannte Ergebnisse bezogen auf Temperatur und relative Luftfeuchte in Bienenstöcken zu reproduzieren und zum anderen auch Messungen von CO<sub>2</sub>, TVOC und Feinstaub durchzuführen. Um den Einfluss des Korbmaterials auf die Messergebnisse bestimmen zu können, entschieden sich die Schülerinnen dazu, neben einem bewohnten auch einen unbewohnten Bienenkorb als Referenz mit Sensoren auszustatten. Weiterhin sollte die Datenaufnahme über mehrere Monate erfolgen, um auch mögliche Änderungen der Messwerte im Frühjahr und Sommer untersuchen zu können. Beim Aufbau des Sensorsystems wurden sie durch einen Betreuer und einen Imker unterstützt („Fragestellung und Konzeption einer Hardware – Teil 1“).

Um die Datenaufnahme zu automatisieren und MSL zu initiieren, wurde den Schülerinnen ein IoT-System basierend auf der IoT-Plattform „ThingSpeak“ zur Verfügung gestellt („Entwicklung einer Methodik zur Datenaufnahme – Teil 1“).

Weiterhin wurde ihnen das Abrufen der Messdaten über eine App und über Matlab ermöglicht, was die Schülerinnen auch regelmäßig – 1 Mal pro Woche – nutzten („Datenaufnahme – Teil 1“).

Bei der Auswertung der Messdaten stellten die Schülerinnen fest, dass während der gesamten Messdauer ein klarer Tag-Nacht-Rhythmus zu erkennen ist. Weiterhin verglichen sie die Ergebnisse der Temperatur- und relativen Luftfeuchte-Messung mit den Daten aus der Literatur und berechneten statistische Kennzahlen wie Mittelwert und Standardabweichung. Bei der Messung der Feinstaubkonzentration konnten sie keine Unterschiede zwischen bewohntem und unbewohntem Korb feststellen. Bei der Auswertung der CO<sub>2</sub>- und TVOC-Daten bemerkten die Schülerinnen, dass die gemessenen Konzentrationen einen gewissen Schwellwert nie überschreiten („Auswertung und Interpretation der Ergebnisse – Teil 1“).

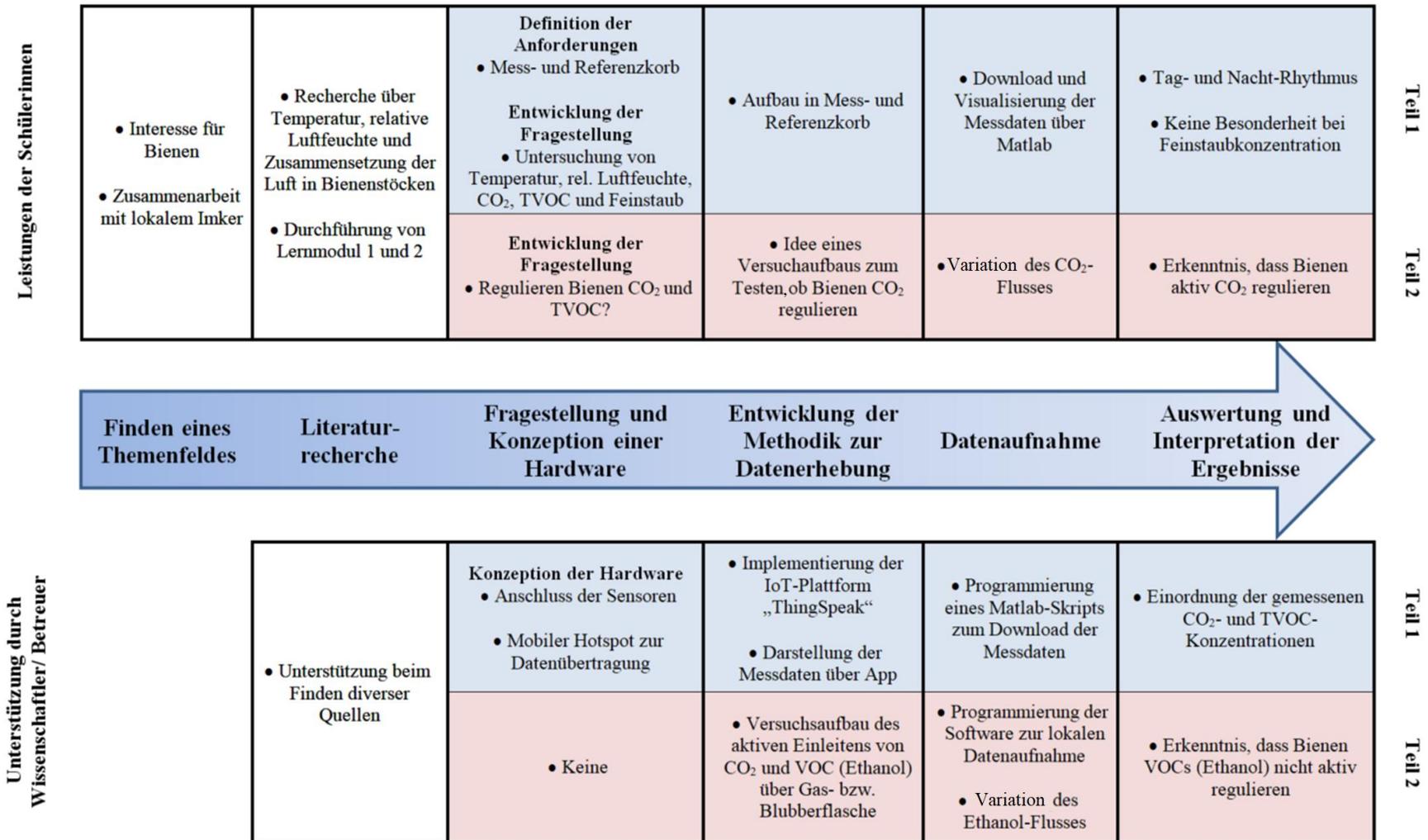
Aus diesem Grund entstand die neue Fragestellung: „Regulieren Bienen CO<sub>2</sub> und/oder TVOC?“ („Fragestellung und Konzeption einer Hardware – Teil 2“).

Zur Überprüfung dieser Fragestellung entwarfen die Schülerinnen in Zusammenarbeit mit dem Betreuer und dem Imker eine neue Methodik. Um unabhängig von äußeren Bedingungen wie Temperatur oder Tageszeit zu sein, wurde zunächst die CO<sub>2</sub>-Konzentration in dem Bienenstock über einen kurzen Zeitraum künstlich erhöht. Dazu wurde CO<sub>2</sub> aus einer Gasflasche mit definierten Flussraten in den Korb geleitet. Die Untersuchung des Einflusses von VOCs in Form von Ethanol auf Bienen wurde im Anschluss an die Umweltstudie zur Vervollständigung von einem Wissenschaftler untersucht. Dazu wurde mittels einer Pumpe Luft durch flüssiges Ethanol geleitet und diese anschließend in den Bienenkorb geführt („Entwicklung einer Methodik zur Datenaufnahme – Teil 2“).

Die Datenaufnahme erfolgte lokal, um eine höhere Abtastrate zu erhalten. Die Schülerinnen variierten den CO<sub>2</sub>-Fluss schrittweise und nahmen Messwerte auf. Zur Variierung der VOC-Konzentration im Bienenstock im Anschluss an die Studie wurde der Luftfluss durch das flüssige Ethanol variiert („Datenaufnahme – Teil 2“).

Bei der Auswertung der Daten folgerten die Schülerinnen, dass Bienen die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration innerhalb des Korbes wahrnehmen können und durch aktives Fächern regulieren. Bei der Untersuchung der Reaktion der Bienen auf Ethanol konnte im Anschluss an die Studie jedoch keine aktive Regulierung festgestellt werden („Auswertung und Interpretation der Ergebnisse – Teil 2“).

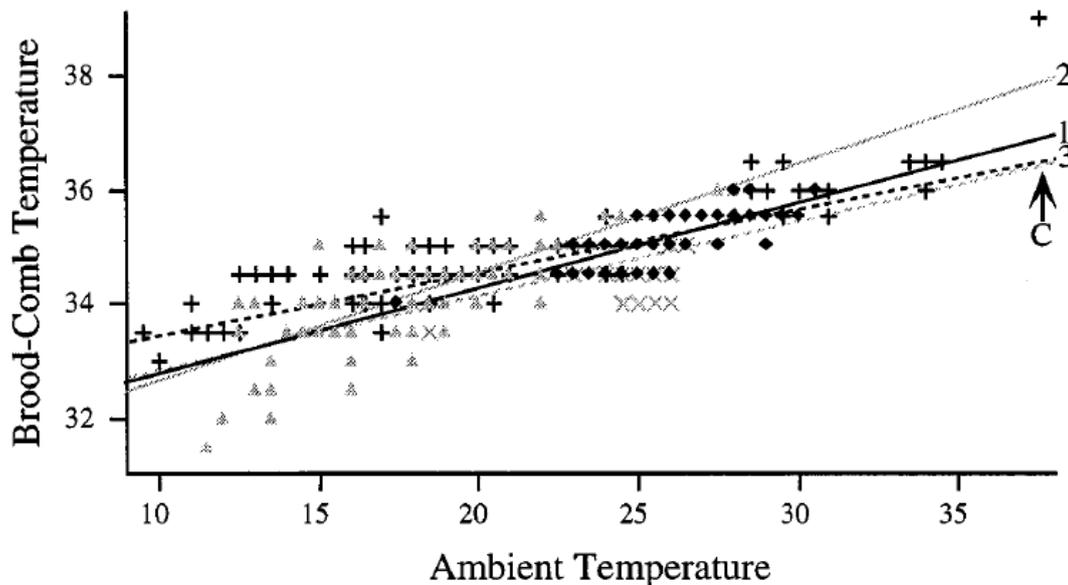
Die Vorgehensweise und die Ergebnisse dieser Studie wurden in einer Facharbeit festgehalten (vgl. I.9) und weiterhin im Rahmen des „Dresdner Sensorsymposium 2019“ veröffentlicht [192]. Der Fokus dieser Umweltstudie lag dabei vor allem auf der Anwendung von Sensorik sowie der Interpretation von Messergebnissen in Zusammenhang mit dem Schulfach Biologie. Der Versuchsaufbau ist auf einen Dauereinsatz ausgelegt und hat im Zeitraum vom 14.04.2019 bis zum 08.07.2020 mit kurzen Unterbrechungen Messdaten aufgenommen. Durch die Art des Aufbaus ist es möglich, jederzeit weitere Sensoren zu integrieren und dadurch weitere Fragestellungen für künftige Schülerumweltstudien zu entwickeln. Abbildung 6.17 zeigt stichpunktartig die verschiedenen Schritte dieser Umweltstudie. Dabei wurde zunächst der Pfad mit der Bezeichnung „Teil 1“ durchgeführt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde der Pfad mit der Bezeichnung „Teil 2“ durchgeführt. Im Folgenden werden diese Schritte detailliert beschrieben.



**Abb. 6.17** Leistungen der Schülerinnen und Unterstützung durch Wissenschaftlicher/Betreuer bei der Untersuchung der Luft in Bienenstöcken. Bei der Durchführung der Umweltstudie wurden zunächst die blau markierten Arbeitsschritte („Teil 1“) durchgeführt. Darauf aufbauend wurden die rot markieren Arbeitsschritte durchgeführt („Teil 2“).

## Literaturrecherche

Nach Seeley liegt die normale Temperatur in einem Bienenstock zwischen 33°C und 36°C [193]. Untersuchungen von Starks et al. zeigen, dass die Temperatur im Brutkern eines Bienenstocks im Mittel zwischen 34,3°C und 35,0°C beträgt, wobei diese nur leicht positiv mit der Umgebungstemperatur korreliert ist, siehe Abbildung 6.18 [194]. Dieser Temperaturbereich sei für die Entwicklung von Bienenlarven notwendig.



**Abb. 6.18** Korrelation zwischen der Temperatur innerhalb des Brutkerns in drei Bienenstöcken und der Außentemperatur [194].

Die relative Luftfeuchte liegt nach Messungen von Sachs et al. zwischen 45% und 55% [195]. Diese hängt dabei nicht von den Außenbedingungen ab, was für eine aktive Regulierung seitens der Bienen spricht. Nach Doull ist eine relative Luftfeuchte von mindestens 50% notwendig, damit Bienenlarven schlüpfen können [196].

Negri et al. konnten zeigen, dass sich anhand der Feinstaubmenge, die sich in den feinen Haaren der Bienen festsetzen, Rückschlüsse auf die Feinstaubkonzentration in der Umgebung ziehen lassen [197]. Jedoch gibt es bisher keine Daten über die Feinstaubkonzentrationen in Bienenstöcken.

Nach Seeley sind Bienen in der Lage, CO<sub>2</sub> mittels Rezeptoren wahrzunehmen [198]. CO<sub>2</sub> diene einerseits als Indikator für die Abwesenheit von Sauerstoff und ist andererseits verantwortlich, um den Enzymkomplex Succinat-Dehydrogenase des Citratzyklus zu hemmen. Weiterhin ist die Aufrechterhaltung eines optimalen pH-Wertes und der Wasserretention mit steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration schwieriger, wodurch eine Regulierung notwendig sei.

### Entwicklung einer Fragestellung und Aufstellen einer Hypothese

Auf der Grundlage dieser Literaturrecherche entwickelten die Schülerinnen folgende Fragestellungen:

- Welche Temperaturen herrschen in einem Bienenstock und wie korreliert diese mit den Außenbedingungen?
- Welche relative Luftfeuchte herrscht in einem Bienenstock und wie korrelieren diese mit den Außenbedingungen?
- Ist die Feinstaubkonzentration in einem Bienenstock aufgrund von Blütenstaub erhöht?
- Wie hoch ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem Bienenstock?
- Wie hoch ist die TVOC-Konzentration in einem Bienenstock?

### Entwicklung der Methodik zur Datenerhebung

Zur Untersuchung der Fragestellungen entschieden sich die Schülerinnen dazu einem bewohnten und einen leeren Bienenkorb zu verwenden, siehe Abbildung 6.19. Der leere Bienenkorb dient dabei als Referenzkorb, um den Einfluss des Korbmaterials auf die Messwerte zu bestimmen.



**Abb. 6.19** Experimenteller Aufbau. Links: Leerer Bienenkorb als Referenz. Rechts: Bewohnter Bienenkorb.

Für die Messung der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und CO<sub>2</sub> wurde der nicht-dispersive CO<sub>2</sub>-Sensor SCD30 verwendet. Die Feinstaubkonzentration wurde mittels SPS30 bestimmt. Die Messung der VOCs erfolgte durch den MOX-Halbleiter

Gassensor SGP30. Alle Sensoren wurden über den internetfähigen Mikrocontroller ESP8266 gesteuert, welcher durch den Betreuer programmiert wurde. Dieser nimmt alle 2 Sekunden Messwerte auf. Aufgrund der verwendeten Software konnte nur ca. alle 90 Sekunden ein Messwert über ein WLAN-Modul an eine Online-Datenbank gesendet werden. Daher wurde ein Mittelwert über diesen Zeitraum gebildet und dieser gesendet. Vorherige Messungen mit dem Temperatursensor des SCD30 zeigten, dass dieser tendenziell eine zu hohe Temperatur anzeigt, weshalb dieser durch einen Vergleich mit einem Pt100-Temperatursensor nachkalibriert wurde. Der komplette Messaufbau wurde in einen Bienenrahmen befestigt und in der Mitte des Bienenkorbs platziert. Damit die Bienen nicht in Kontakt mit der Elektronik kommen wurde der Aufbau durch ein luftdurchlässiges Drahtgeflecht geschützt, siehe Abbildung 6.20.



**Abb. 6.20** Befestigung der verwendeten Sensoren an einem Bienenrahmen. Der Messaufbau ist durch ein luftdurchlässiges Drahtgeflecht geschützt.

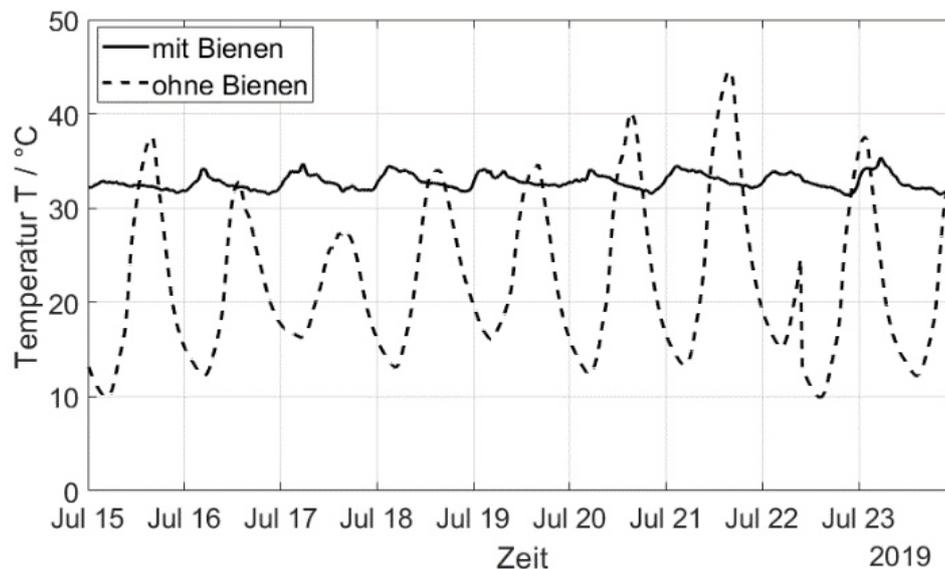
### **Datenaufnahme, Auswertung und Interpretation der Ergebnisse**

Durch die automatisierte Datenaufnahme konnten die Schülerinnen den Verlauf der Messwerte jederzeit mittels Smartphone, Tablet oder PC überprüfen. Die prinzipiellen Verläufe der Messwerte waren über den gesamten Messzeitraum von April bis September 2019 ähnlich. Die Auswertung erfolgt daher nun beispielhaft für das Zeitintervall vom 15.07.2019 bis einschließlich 23.07.2019.

#### *Temperatur*

In Abbildung 6.21 ist der Verlauf der Temperatur in dem bewohnten (durchgezogene Linie) und leeren (gepunktete Linie) Bienenkorb im Laufe der Zeit zu sehen. Die

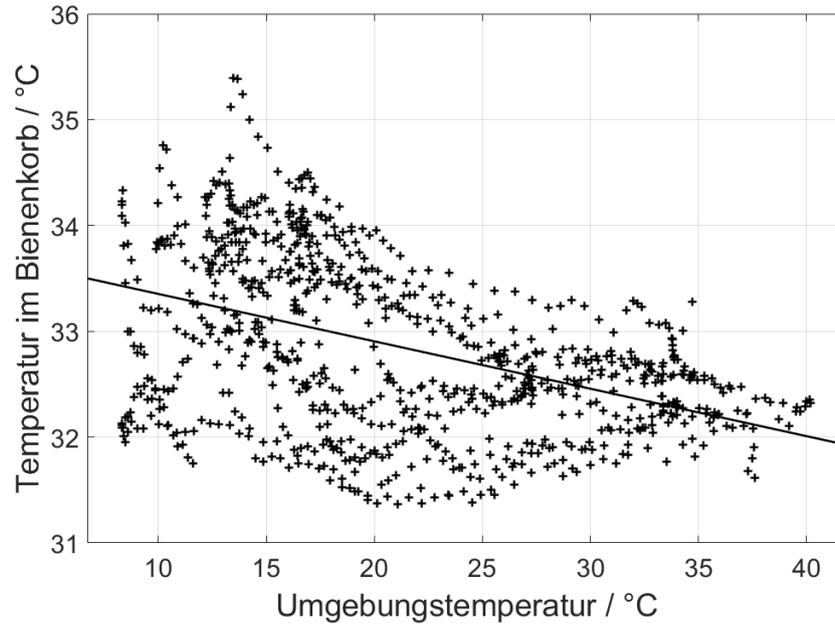
Temperatur in dem Referenzkorb folgt einem klaren Tag-Nacht-Rhythmus. Auch im bewohnten Korb ist ein Rhythmus zu erkennen, der jedoch weniger stark ausgeprägt ist und gegenläufig zur Umgebungstemperatur verläuft. Die durchschnittliche gemessene Temperatur in diesem Zeitintervall beträgt  $33,0\text{ °C}$  mit einer Standardabweichung von  $0,8\text{ °C}$  in einem Intervall zwischen  $31,0\text{ °C}$  und  $35,5\text{ °C}$ .



**Abb. 6.21** Verlauf der Temperatur in einem bewohnten (durchgezogene Linie) und einem leeren (gepunktete Linie) Bienenkorb.

Im Vergleich zu den Ergebnissen von Seeley und Starks et al. ist die Temperatur damit im Durchschnitt etwa  $2\text{ °C}$  niedriger. Dies kann dadurch erklärt werden, dass sich die Sensoren bei dieser Messung nicht exakt im Brutkern befanden.

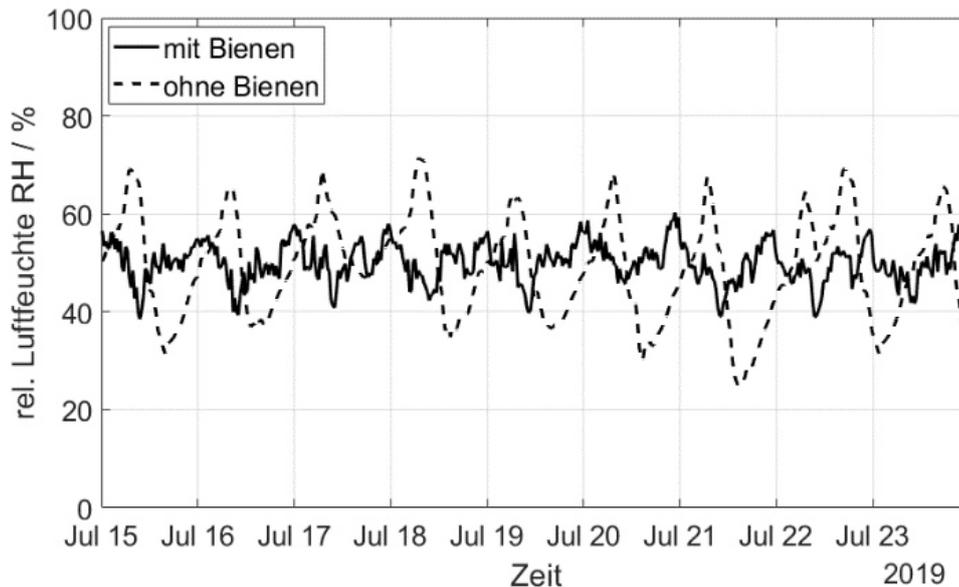
Weiterhin zeigt sich im Gegensatz zu den Messungen von Starks et al. eine negative Korrelation zwischen der Temperatur innerhalb des Bienenkorbs und der Umgebungstemperatur (Korrelationskoeffizient:  $-0,45$ ), siehe Abbildung 6.22. Dieser Effekt deutet auf eine aktive Regulierung der Temperatur im Bienenkorb durch verstärkte Ventilation bei höheren Umgebungstemperaturen hin. Gleichzeitig zeigt sich bei niedrigen Außentemperaturen eine größere Streuung der Temperatur im Bienenkorb, was auf eine aktive Heizung der Bienen hindeuten kann. Jedoch können diese Beobachtungen auch darauf zurückzuführen sein, dass sich die Sensoren nicht exakt im Brutkern befunden haben.



**Abb. 6.221** Korrelation zwischen Temperatur innerhalb des bewohnten Bienenkorbs mit der Umgebungstemperatur. Es zeigt sich eine negative lineare Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von  $-0,45$ .

#### *Relative Luftfeuchte*

In Abbildung 6.23 ist der Verlauf der relativen Luftfeuchte in dem bewohnten (durchgezogene Linie) und leeren (gepunktete Linie) Bienenkorb im Laufe der Zeit dargestellt.

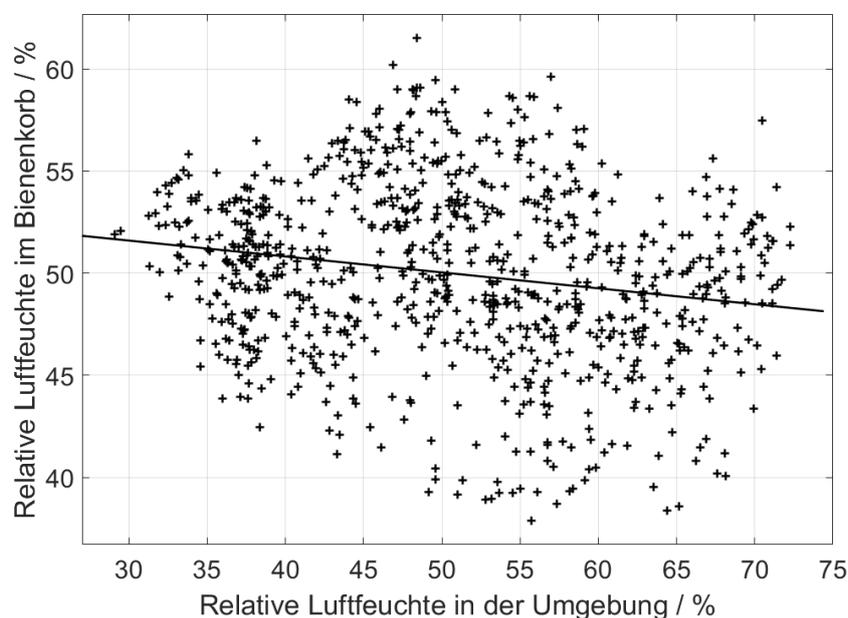


**Abb. 6.23** Verlauf der relativen Luftfeuchte in einem bewohnten (durchgezogene Linie) und einem leeren (gepunktete Linie) Bienenkorb.

Über den gemessenen Zeitraum ergibt sich im bewohnten Bienenkorb eine durchschnittliche relative Luftfeuchte von  $50,5\%$  mit einer Standardabweichung von  $4,1\%$ . Das Minimum liegt bei  $38,6\%$  und das Maximum liegt bei  $60,2\%$ . Die

täglichen Minimalwerte werden typischerweise gegen 12 Uhr mittags und die täglichen Maximalwerte werden gegen 0 Uhr erreicht. Die Messung im Referenzkorb zeigt mit einer durchschnittlichen relativen Luftfeuchte von 49 % ähnliche Werte, wobei stärkere Schwankungen auftreten. Die Standardabweichung liegt dort bei 10,4 % mit einem Minimum von 30,4 % und einem Maximum von 71,7 %.

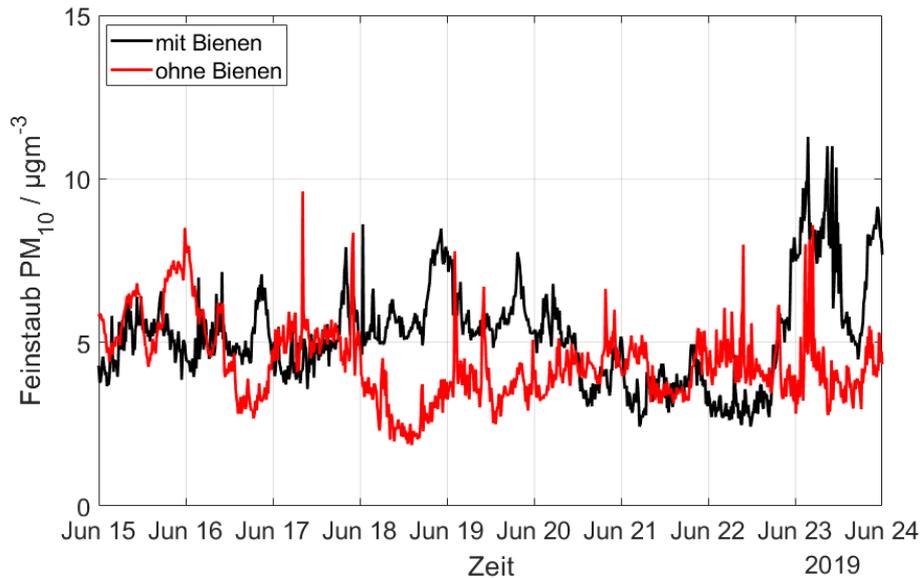
Die Ergebnisse stimmen mit den Beobachtungen von Starks et al. überein, die eine durchschnittliche relative Luftfeuchte zwischen 45 und 55 % gemessen haben. Es zeigt sich, wenn überhaupt, eine leichte negative Korrelation zwischen der relativen Luftfeuchte innerhalb und außerhalb des Bienenkorbs mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,19, siehe Abbildung 6.24.



**Abb. 6.242** Korrelation zwischen der relativen Luftfeuchte innerhalb des bewohnten Bienenkorbs mit der Umgebung. Es zeigt sich eine leicht negative lineare Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von - 0,19.

### *Feinstaub*

In Abbildung 6.25 ist der Verlauf der Feinstaubkonzentration  $PM_{10}$  in dem bewohnten und unbewohnten Bienenkorb im Laufe der Zeit dargestellt. Aufgrund von technischen Problemen mit dem Feinstaubsensor im Kontrollkorb stehen im Zeitraum vom 15.07.2019 - 24.07.2019 keine Referenzdaten zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde für die Auswertung der Zeitraum vom 15.06.2019 - 24.06.2019 verwendet. Da die Messwerte in beiden Körben sehr ähnlich sind wurde zur besseren Unterscheidung eine farbliche Darstellung gewählt.

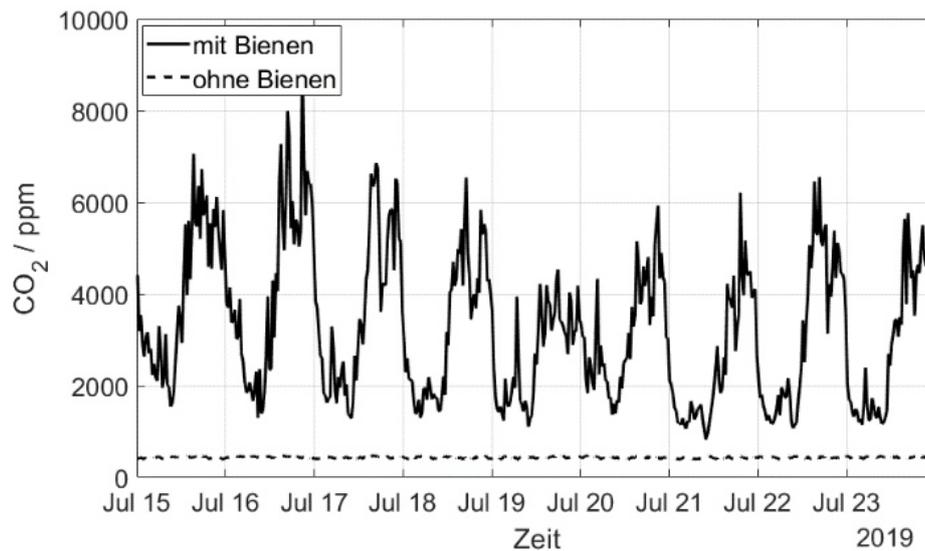


**Abb. 6.25** Verlauf der Feinstaubkonzentration  $PM_{10}$  in einem bewohnten (schwarz) und unbewohnten (rot) Bienenkorb.

Im Gegensatz zu Temperatur und relativer Luftfeuchte zeigt sich kein eindeutiger periodischer Zusammenhang. Die durchschnittliche Feinstaubkonzentration in dem bewohnten Bienenkorb beträgt  $6,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mit einer Standardabweichung von  $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Im unbewohnten Bienenkorb liegt die durchschnittliche Feinstaubkonzentration im gleichen Zeitraum bei  $5,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mit einer Standardabweichung von  $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Insgesamt sind die Messwerte in beiden Fällen sehr ähnlich, was sich auch in anderen Zeiträumen zeigte. Daher kann die Hypothese, dass Blütenstaub zu einer erhöhten Feinstaubkonzentration in Bienenkörben führt, nicht bestätigt werden. Viel mehr liegt die Vermutung nahe, dass der Blütenstaub an den Bienen oder an den Waben gebunden ist, weshalb die Menge an Feinstaub im Fell der Bienen nach Negri et al. auch mit der Feinstaubkonzentration in der Umgebung korreliert.

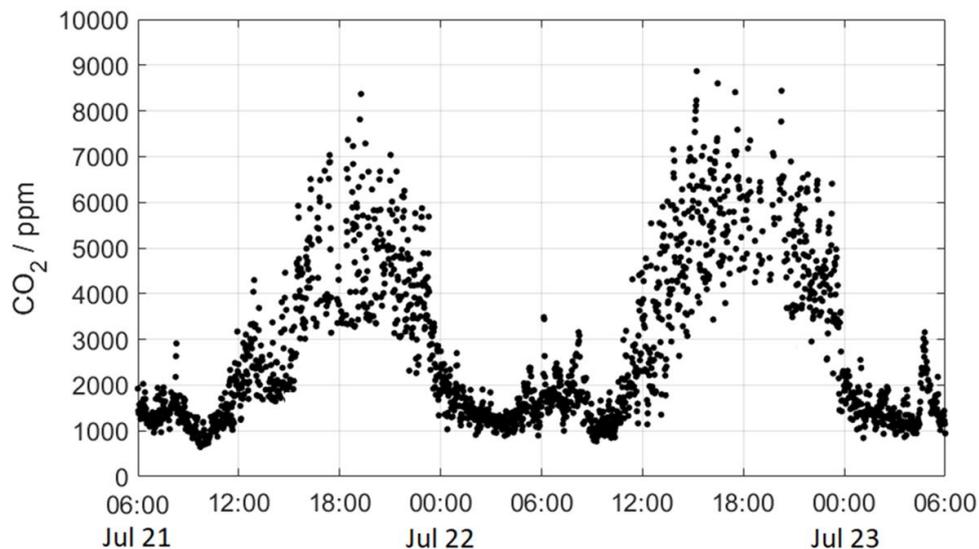
### $CO_2$

In Abbildung 6.26 ist der Verlauf der  $CO_2$  Konzentration in dem bewohnten (durchgezogene Linie) und leeren (gepunktete Linie) Bienenkorb im Laufe der Zeit dargestellt. Es zeigt sich ein periodisches Verhalten der  $CO_2$ -Konzentration mit einem 24-Stunden-Rhythmus. Das Maximum der  $CO_2$ -Konzentration liegt zwischen 6.000 ppm und 8.000 ppm. Vereinzelt konnte in anderen Zeiträumen ein Maximalwert von über 14.000 ppm nachgewiesen werden. Die Minimalwerte liegen täglich zwischen 1.200 ppm und 1.800 ppm. Im Vergleich dazu liegt die  $CO_2$ -Konzentration der Außenluft sowie des Referenzkorbs bei durchschnittlich 430 ppm.



**Abb. 6.26** Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Bienenkörben mit (durchgezogene) und ohne Bienen (gepunktete Linie).

In Abbildung 6.27 ist ein detaillierter Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration über einen Zeitraum von 48 Stunden abgebildet. Auffällig ist, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Zeitraum zwischen 12 Uhr mittags und 20 Uhr abends stark ansteigt, zwischen 20 Uhr und 23 Uhr in etwa konstant bleibt und anschließend abfällt.



**Abb. 6.27** Detaillierter Verlauf der CO<sub>2</sub> Konzentration innerhalb eines bewohnten Bienenstocks in einem Zeitraum von 48 Stunden.

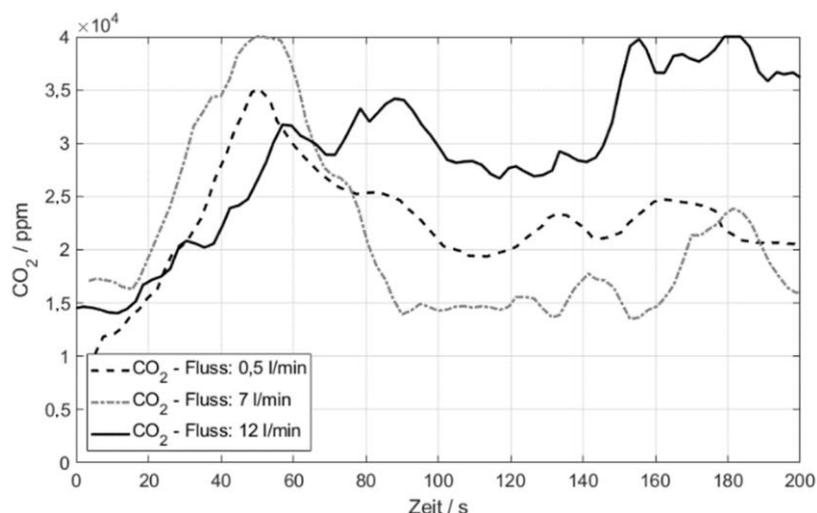
Dieses periodische Verhalten kann durch zwei Effekte erklärt werden. Einerseits korreliert die CO<sub>2</sub>-Konzentration mit der Anzahl der aktiven Bienen, die sich im Bienenkorb befinden. Vormittags verlassen mehr Bienen den Korb, weshalb die CO<sub>2</sub>-Konzentration nur geringfügig ansteigt. Gegen Nachmittag/Abend kehren mehr Bienen wieder zurück, weshalb die Konzentration wieder ansteigt. Nach 23 Uhr könnte es sein, dass die Aktivität der Bienen im Korb nachlässt, weshalb auch die CO<sub>2</sub>-

Produktion gedrosselt wird. Andererseits könnte es auch sein, dass die Aktivität der Bienen nicht nachlässt, sondern, dass die  $\text{CO}_2$ -Konzentration aufgrund von vermehrtem Flügelschlagen der Bienen und der damit verbundenen aktiven Ventilation reguliert wird, sobald die  $\text{CO}_2$ -Konzentration einen gewissen Schwellwert überschreitet.



**Abb. 6.28** Experimenteller Aufbau zum Testen, ob Bienen  $\text{CO}_2$  aktiv regulieren. Links:  $\text{CO}_2$ -Flasche. Rechts:  $\text{CO}_2$  wird über einen Schlauch in den Bienenkorb geführt.

Um die neue Hypothese der aktiven Ventilation aufgrund des  $\text{CO}_2$  zu testen und gleichzeitig den Einfluss der Temperatur auf das Fächerverhalten auszuschließen, wurde die  $\text{CO}_2$ -Konzentration künstlich durch Einleiten von  $\text{CO}_2$  aus einer Gasflasche erhöht. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6.28 zu sehen. Um die Bienen nicht zu gefährden, wurde darauf geachtet, dass die  $\text{CO}_2$ -Konzentration 40.000 ppm (4%) nicht überschreitet. Der Versuch wurde mit den Flussraten 0,5 l/min, 7 l/min und 12 l/min und über einen Zeitraum von jeweils 200 Sekunden und einem Messintervall von einer Sekunde durchgeführt. Die Messwerte sind in Abbildung 6.29 dargestellt.



**Abb. 6.29** Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Konzentration nach Einlass von  $\text{CO}_2$  mit den Flussraten 0,5 l/min, 7 l/min und 12 l/min.

Nach einem anfänglichen Anstieg sinkt die CO<sub>2</sub>-Konzentration bei den niedrigen und mittleren Flussraten von 0,5 l/min und 7 l/min auf einen Wert zwischen 15.000 und 20.000 ppm ab und bleibt konstant. Dieser Bereich kann als Schwellwert interpretiert werden. Erst bei sehr hohen Flussraten ab 12 l/min scheint die aktive Regulierung nachzulassen.

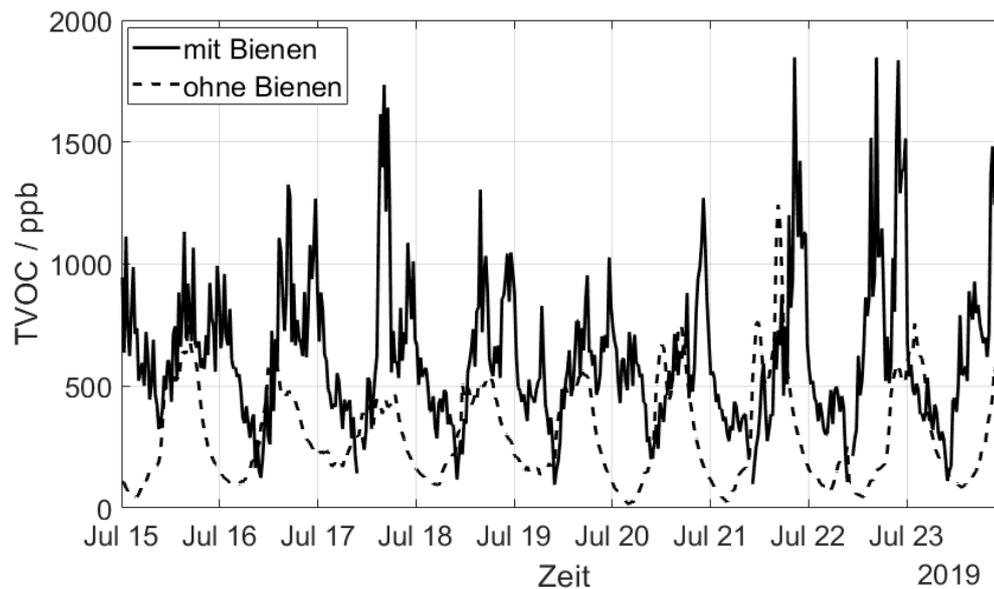
Die Lüftung wird dadurch erreicht, dass sich die Bienen am Ausgang des Bienenkorbs versammeln und einen Luftstrom durch vermehrtes Flügelschlagen erzeugen. Abbildung 6.30 zeigt, dass sich abhängig vom CO<sub>2</sub>-Fluss mehr Bienen mit den Flügeln nach außen an einem Ausgang des Bienenkorbs sammeln, um eine Ventilation des Korbs zu erreichen. Weiterhin war eine Erhöhung der Lautstärke zu vernehmen.



**Abb. 6.30** Reaktion der Bienen auf aktives Einlassen von CO<sub>2</sub>; Flussraten 5 l/min (links) und 12 l/min (rechts).

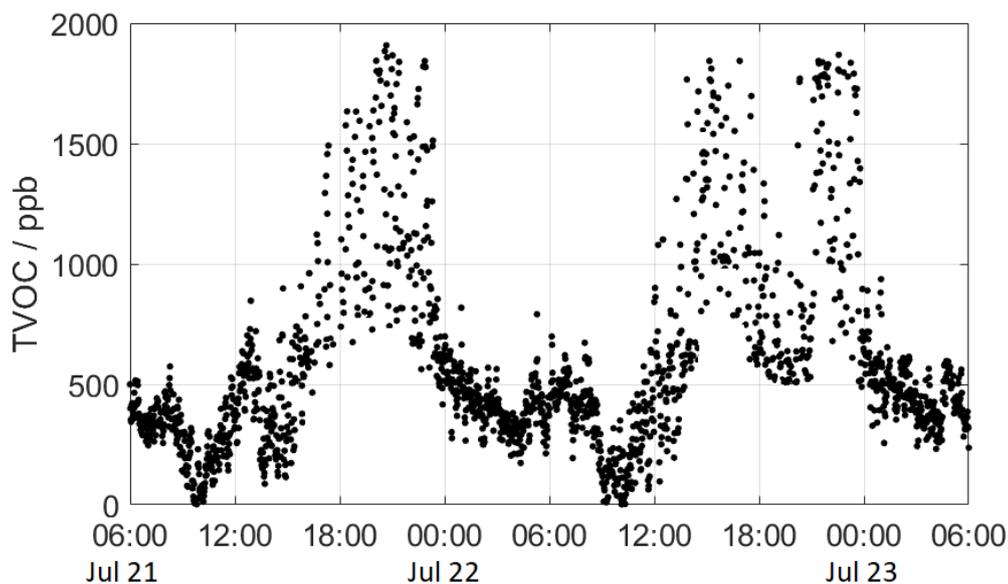
### TVOC

In Abbildung 6.31 ist der Verlauf der TVOC-Konzentration in dem bewohnten (durchgezogene Linie) und leeren (gepunktete Linie) Bienenkorb im Laufe der Zeit dargestellt.



**Abb. 6.31** Verlauf der TVOC-Konzentration in Körben mit (durchgezogene) und ohne Bienen (gepunktete Linie)

Analog zum Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Konzentration zeigt sich auch bei der TVOC-Konzentration ein 24-Stunden-Rhythmus. Dieser ist in diesem Fall auch in dem Referenzkorb zu beobachten, was auf Ausdünstungen des Holzes mit steigender Außentemperatur zurückzuführen ist. Dennoch ist die TVOC-Konzentration in dem bewohnten Korb im Durchschnitt um 800 - 1.000 ppb erhöht. In Abbildung 6.32 ist ein detaillierter Verlauf der TVOC-Konzentration über einen Zeitraum von 48 Stunden abgebildet. Analog zum Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Konzentration erreicht auch die TVOC-Konzentration abends gegen 23 Uhr ein Maximum und fällt anschließend ab.

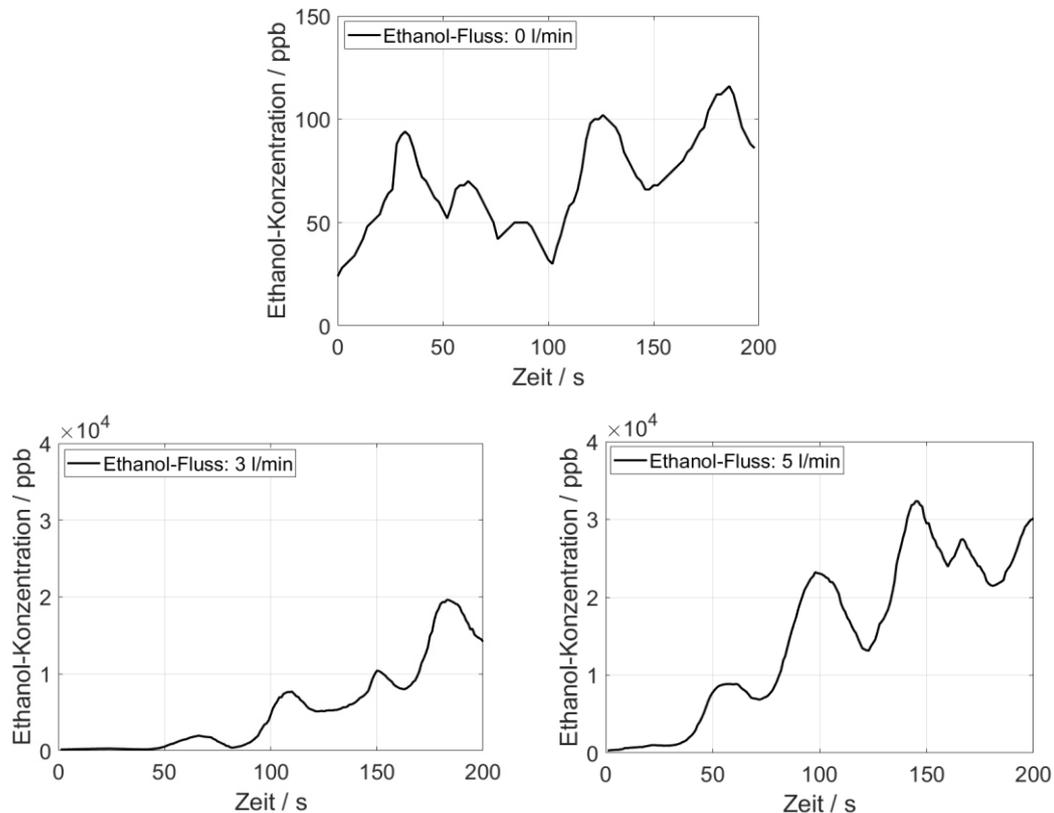


**Abb. 6.32** Detaillierter Verlauf der TVOC-Konzentration innerhalb des bewohnten Bienenstocks über einen Zeitraum von 48 Stunden.

Um die Hypothese zu testen, dass Bienen auch auf eine erhöhte VOC-Konzentration reagieren, wurde diese ähnlich wie bei der Untersuchung von  $\text{CO}_2$  im Anschluss an die Studie durch künstliches Einlassen eines VOCs über einen Zeitraum von 200 Sekunden erhöht. Das Messintervall beträgt bei dieser Messung eine Sekunde. Als Beispiel für ein VOC wurde Ethanol gewählt, da es einerseits vergleichsweise ungiftig ist und andererseits da Bienen in der freien Natur mit Ethanol als Folge von gärendem Honig in Kontakt kommen können.

Um den Ethanol-Fluss zu erzeugen, wurde flüssiges Ethanol in eine Blubber-Flasche gefüllt. Anschließend wurde Luft mit Hilfe einer Pumpe durch das Ethanol geführt. Der mit Ethanol gesättigte Luftstrom konnte dann wie beim Versuch zuvor mit unterschiedlichen Flussraten von 3 l/min und 5 l/min in den Bienenkorb geleitet werden. Um die Bienen nicht zu gefährden, wurde darauf geachtet, dass die Ethanol-Konzentration einen Wert von ca. 35.000 ppb nicht übersteigt. Weiterhin wurde nach jedem Versuch mit einer Flussrate gewartet, bis die Ethanol-Konzentration wieder

einen Normalwert erreicht hat. Abbildung 6.33 zeigt den Verlauf der Ethanol-Konzentration bei unterschiedlichen Flussraten.



**Abb. 6.33** Verlauf der VOC-Konzentration nach Einlass von mit Ethanol gesättigter Luft mit den Flussraten 0 l/min (oben), 3 l/min (links unten) und 5 l/min (rechts unten). Es ist die unterschiedliche Skalierung der Graphen zu beachten.

Bei der Reduktion des Messintervalls auf eine Sekunde und ohne aktives Einlassen von Ethanol kann ein periodisches Verhalten der VOC-Konzentration innerhalb des Bienenkorbs festgestellt werden, das zuvor bei einem Messintervall von 30 Sekunden nicht zu beobachten war. Im zeitlichen Abstand von ca. 40 Sekunden erreicht diese jeweils ein Maximum. Untersuchungen von Southwick & Moritz [199] zeigten einen periodischen Verlauf der Sauerstoff- und  $\text{CO}_2$ -Konzentration in einem ca. 20-sekündigen Rhythmus, welche als kollektives Atmen interpretiert wurde.

Es konnte dieses Mal nicht beobachtet werden, dass die Bienen durch Fächern am Ausgang des Korbs aktiv Lüften. Dennoch war eine geringe Erhöhung der Lautstärke zu vernehmen. Weiterhin haben bei Flussraten ab 3 l/min immer mehr Bienen den Korb verlassen. Einige Bienen haben sich außerhalb des Korbs auf den Boden gesetzt. Insgesamt wurde das Volk unruhiger, was sich durch vermehrtes Herumschwirren um den Korb geäußert hat. Diese Beobachtungen legen die Vermutung nahe, dass Bienen die erhöhte Ethanol-Konzentration zwar wahrnehmen können, jedoch nicht oder nur geringfügig aktiv lüften, um diese zu verringern.

## **Fazit und Ausblick**

Die Untersuchung der Luft in Bienenstöcken ergab, dass sowohl die Temperatur als auch die relative Luftfeuchte eine leicht negative Korrelation mit den äußeren Bedingungen zeigt. Die durchschnittliche Temperatur lag mit ca. 33°C etwas unter dem Wert aus früheren Studien. Die relative Luftfeuchte lag mit durchschnittlich 50,5% im zu erwartenden Bereich. Messungen der Feinstaubkonzentration zeigten keine auffälligen Werte. Sowohl die CO<sub>2</sub> Konzentration als auch die TVOC-Konzentration folgten einem periodischen Verlauf in einem 24-Stunden Rhythmus. Durch aktives Einlassen von CO<sub>2</sub> konnte gezeigt werden, dass Bienen darauf reagieren und durch vermehrtes Fächern versuchen, die Konzentration unter 20.000 ppm zu regulieren. Durch aktives Einlassen von Ethanol wurde eine erhöhte VOC-Konzentration simuliert. Es zeigt sich, dass Bienen die erhöhte Ethanol-Konzentration zwar wahrnehmen können, jedoch keine aktive Ventilation betreiben, um die Konzentration zu verringern. Bei Ethanol-Flussraten ab 3 l/min erhöhte sich die Lautstärke etwas und einige Bienen verließen den Korb. Insgesamt wurde das Bienenvolk unruhiger. Zusammenfassend konnten in dieser Umweltstudie sowohl bisherige wissenschaftliche Ergebnisse bestätigt werden, als auch neue Erkenntnisse gewonnen werden, wodurch die Bedeutung von CS für die Wissenschaft bestätigt wird.

Die Schülerinnen waren während der Umweltstudie sehr interessiert und fasziniert an der Arbeit mit Bienen. Neben den beschriebenen Erkenntnissen erhielten die Schülerinnen außerdem einen Einblick in Methoden der Datenauswertung mit Matlab. Sie lobten vor allem die Möglichkeit, die Messdaten auf dem Smartphone zu visualisieren und jederzeit auf die Daten zugreifen zu können. Vor allem bei einem Langzeit-Projekt wie diesem führte dies zu einer Aufrechterhaltung der Motivation. Außerdem konnten sie so ihren Familien und Freunden jederzeit über ihre Arbeit berichten. Bei der Datenauswertung zeigten sich jedoch auch Schwächen im Umgang mit statistischen Kenngrößen. Gerade in diesem Bereich war die enge Zusammenarbeit zwischen Betreuer und Schülerinnen sehr wichtig. Aufgrund der Corona-Pandemie fiel der „Jugend forscht“-Wettbewerb im Frühjahr 2020 aus, weshalb die Arbeit dort nicht bewertet wurde.

Der Messaufbau erlaubt es, in Zukunft noch weitere Untersuchungen mit anderen Gassensoren durchzuführen, weitere Fragestellungen zu entwickeln und zu bearbeiten. Beispielsweise könnte versucht werden, einzelne VOCs gezielt zu detektieren.

## 6.2.4 Weitere Schülerumweltstudien

Neben den drei ausführlich beschriebenen Schülerumweltstudien wurden noch weitere umgesetzt. Diese sollen nun kurz beschrieben werden.

### Untersuchung des Einflusses von Pflanzen auf die Luftqualität

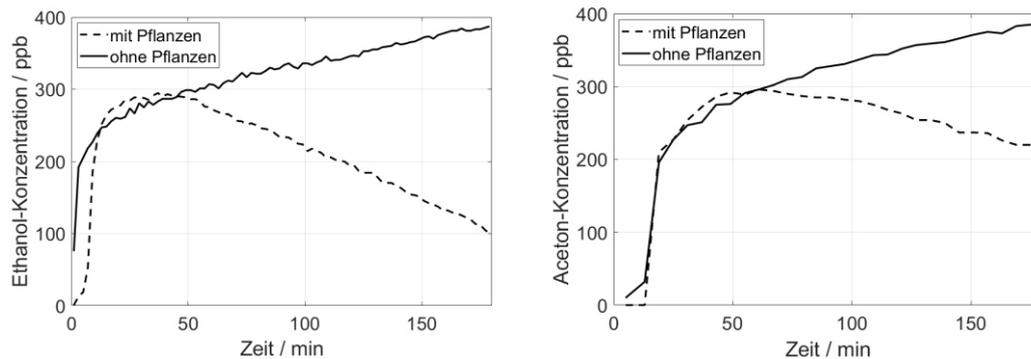
Zwei Schülerinnen des Geschwister Scholl Gymnasiums in Lebach haben die Auswirkungen von Pflanzen auf die Luftqualität untersucht. Zu diesem Zweck wurde eine Messkammer und eine Kontrollkammer aus Aluminiumprofilen und Acrylglas mit den Maßen 1m x 1m x 1m konstruiert, siehe Abbildung 6.34.



**Abb. 6.34** Versuchsaufbau zur Messung des Einflusses von Pflanzen auf die Luftqualität. Links: Leere Kontrollkammer. Rechts: Messkammer mit verschiedenen Pflanzenarten.

In die Messkammer wurden Pflanzen gestellt, die Kontrollkammer blieb leer. Beide Kammern wurden mit den MOX-Halbleiter Gassensoren SGP30 von „Sensirion“ und CCS811 [200] der Firma „ams“ zur Messung der VOC-Konzentration ausgestattet. In einer weiteren Kammer mit einem Volumen von 1 Liter wurden jeweils 0,5 ml von verschiedenen flüchtigen Stoffen, wie Ethanol und Aceton verdampft. Durch Entnahme von 3 ml des Gasgemischs mittels Spritze und Überführen in die Messkammern wird die VOC-Konzentration erhöht. Anschließend wurde der Verlauf der VOC-Konzentration als Funktion der Zeit gemessen.

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 6.35 der Verlauf der Aceton-Konzentration und der Ethanol-Konzentration in den beiden Messkammern, mit (gepunktete Linie) bzw. ohne (durchgezogene Linie) Pflanzen, zu sehen.



**Abb. 6.35** 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.

Der Grund für die Verringerung der VOC-Konzentration kann sowohl auf die luftreinigende Wirkung von Pflanzen als auch auf eine Ablagerung der Stoffe auf der Oberfläche der Pflanzen zurückzuführen sein. Das Projekt wurde Ende März 2019 bei der Landesrunde von „Jugend forscht“ im Themenbereich Biologie vorgestellt und hat dort den 2. Preis erhalten.

### Schadstoffkarte

Zwei Schüler einer 12. Klasse des Max-Planck-Gymnasiums in Saarlouis haben als Teil eines „Jugend forscht“-Projekts eine Online-Schadstoffkarte entwickelt [201]. Das Ziel ist es, Luftqualitätsmessungen innerhalb und außerhalb der Stadt durchzuführen und die Daten sowohl auf dem Smartphone als auch auf einer frei zugänglichen Webseite zu visualisieren. Dafür wurde eine 3D-gedruckte, tragbare Messkammer entwickelt, die den MOX-Halbleiter Gassensor BME680 von Bosch Sensortec, einen Lithium-Ionen-Akku, den internetfähigen Mikrocontroller ESP32 und ein Display enthält, siehe Abbildung 6.36 links.



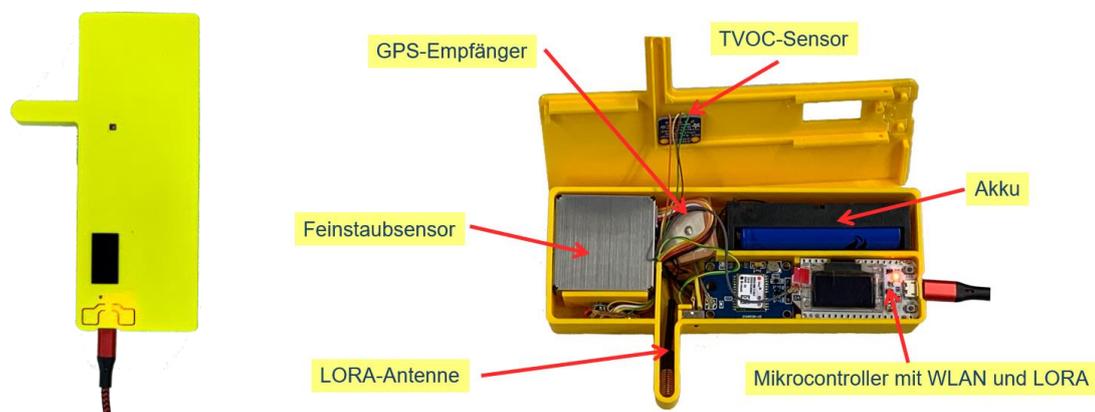
**Abb. 6.36** Links: 3D-gedruckte Messkammer mit Display und integriertem Luftqualitätssensor. Mitte: Visualisierung der Messdaten auf der Smartphone App „Blynk“. Rechts: Visualisierung der Luftqualitätsdaten als Heatmap.

Über einen Internet-Hotspot, der von einem Smartphone zur Verfügung gestellt wird, werden die gesammelten Daten, einschließlich der GPS-Informationen des Smartphones, an die Online-Datenbank der frei nutzbaren IoT-Plattform "Blynk"

gesendet. Die entsprechende Smartphone-App ermöglicht die Visualisierung der Daten in Echtzeit, siehe Abbildung 6.36 Mitte. Darüber hinaus entwickelten die Schüler eine Website, welche die Daten vom Online-Server abrufen und die Werte auf einer "Google Maps"-basierten Heatmap anzeigt, siehe Abbildung 6.36 rechts. Die Bestimmung der Luftqualität erfolgt über die Ermittlung eines „Air Quality Index“ (AQI). Dieser wird über einen Algorithmus der Firma Bosch Sensortec berechnet, welcher das Rohsignal des Sensors sowie die Luftfeuchte berücksichtigt [161]. Der Index ordnet der Luftqualität Werte von 0 („Good“) bis 300 („Hazardous“) zu. Dabei ist zu beachten, dass es sich dabei um keinen offiziellen Index handelt und der Sensor nicht kalibriert wurde. Dennoch gibt dieser Wert einen ersten Anhaltspunkt für die Luftqualität.

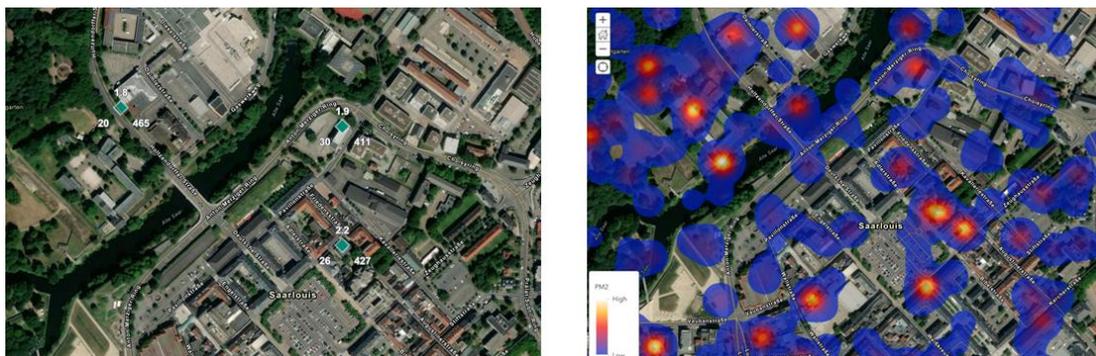
### Schadstoffkarte 2.0: Luftqualitätskartierung

Das zuvor beschriebene Projektidee einer Schadstoffkarte wurde von einer neuen Schülergeneration aufgegriffen und weiterentwickelt. Dazu wurde ein neues mobiles Sensorsystem entwickelt, das den Feinstaubsensor SPS30, den TVOC-Sensor SGP30, einen GPS-Empfänger und einen neuen Lithium-Ionen-Akku enthält, siehe Abbildung 6.37. Im Gegensatz zum alten Messaufbau erfolgt die Datenübertragung im Raum Saarlouis nun über ein LoRa-Netzwerk, welches über den Einplatinencomputer „Raspberry Pi 4“ erzeugt wird. Dadurch ist keine Internetverbindung mehr notwendig. Außerdem ist durch den Einsatz eines GPS-Empfängers keine GPS-Informationen über das Smartphone mehr erforderlich.



**Abb. 6.37** Überarbeitete Messkammer zur Luftqualitätskartierung.

Das Messgerät kann sowohl stationär als auch mobil betrieben werden. Die Visualisierung der Messdaten als Heatmap erfolgt über die App „Blynk“, siehe Abbildung 6.38.



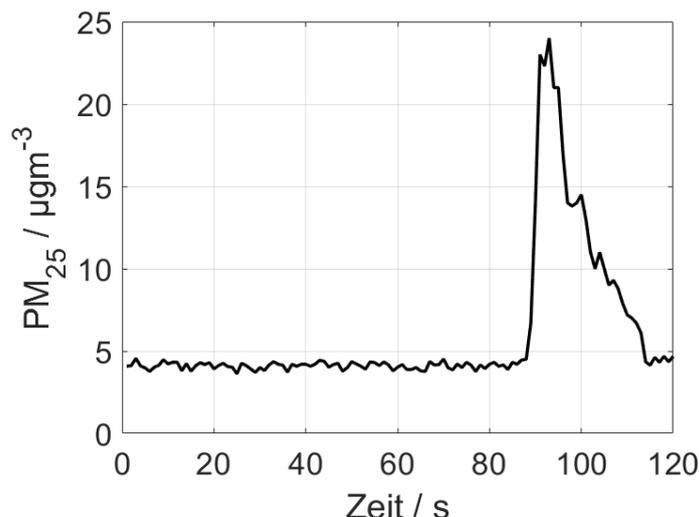
**Abb. 6.38** Kartierung der Luftqualität am Beispiel der Aufnahme der Feinstaubkonzentration. Links: Google Maps Landkarte. Rechts: Feinstaubkonzentrationen als Heatmap in der App „Blynk“.

### Feinstaubmessungen vor der Schule, im Alltag und an Silvester

Das erhöhte Verkehrsaufkommen vor der ersten und nach der sechsten Schulstunde und der VW-Abgasskandal im Jahr 2015 motivierte zwei Schülerinnen einer 12. Klasse des Robert-Schuman-Gymnasiums in Saarlouis dazu, sich mit dem Thema Feinstaub auseinander zu setzen. Dazu entwickelten sie eine Studie, in der sie die Feinstaubbelastung an Straßen vor der Schule untersuchten. Zusätzlich haben sie selbstständig zusätzliche Messungen der Feinstaubkonzentration in Alltagssituationen wie dem Grillen im Garten, bei der Benutzung eines Staubsaugers im Haushalt oder während eines Feuerwerks an Silvester durchgeführt. Im Folgenden werden beispielhafte Ergebnisse vorgestellt, die mit dem Feinstaubsensor SPS30 aufgenommen wurden.

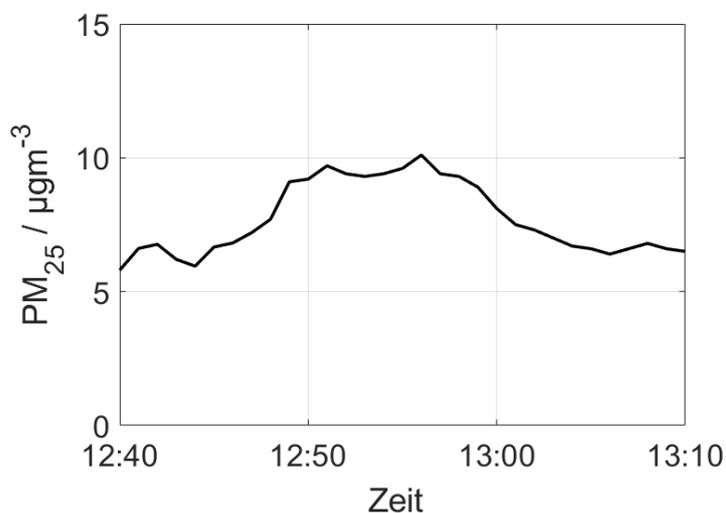
#### *Messung an PKW*

Zunächst untersuchten die Schülerinnen die Feinstaubemission in unmittelbarer Nähe zu einem Auspuff eines Benziners mit laufendem Motor über einen Zeitraum von 120 Sekunden. Dazu wurde der Sensor laut Angaben in ca. 1 m Entfernung zu einem Auspuff platziert. Nach 75 Sekunden wurde der Motor ausgeschaltet. Die Messergebnisse sind in Abbildung 6.39 dargestellt. Nach ca. 90 Sekunden steigt die Feinstaubkonzentration von  $PM_{2.5}$  rapide auf einen Wert von  $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$  an und fällt danach wieder ab bis der Ausgangswert von ca.  $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  erreicht ist. Die Verzögerung des Anstiegs der Feinstaubkonzentration kann durch eine fehlerhafte Ausrichtung des Feinstaubsensors bedingt sein. Da die Schülerinnen die Messungen selbstständig, ohne Hilfe eines Betreuers durchgeführt haben konnte die Korrektheit der Versuchsdurchführung nicht nachvollzogen werden. Diese Ergebnisse zeigen die Wichtigkeit einer Betreuung von einer Person mit wissenschaftlichem Hintergrund.



**Abb. 6.39** Feinstaubemission PM<sub>2.5</sub> eines Benziners in einem Abstand von 1 m zum Auspuff. Nach Angaben der Schülerinnen wurde der Motor nach 75 Sekunden ausgeschaltet.

Im nächsten Schritt wurde die Feinstaubkonzentration am Ende der 6. Schulstunde auf einem Parkplatz vor der Schule untersucht. Die Messungen zeigen, dass die Feinstaubkonzentration in der Zeit zwischen 12:45 Uhr und 13:00 Uhr leicht angestiegen ist, siehe Abbildung 6.40. Dies kann durch ein erhöhtes Verkehrsaufkommen zu dieser Zeit begründet werden. Die Grenzwerte wurden dabei nicht überschritten.

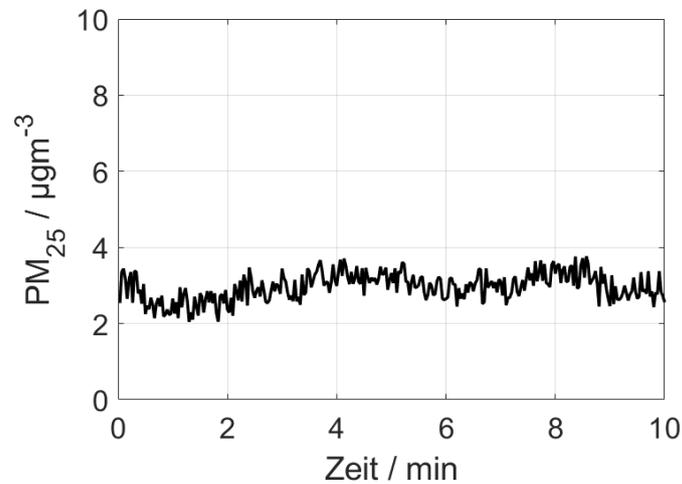


**Abb. 6.40** Feinstaubkonzentration am Ende der 6. Schulstunde (12:50 Uhr). In der Stoßzeit zwischen 12:45 Uhr und 13:00 Uhr ist ein leichter Anstieg der Konzentration zu erkennen.

#### *Messungen während des Staubsaugens*

Es wurde die Hypothese untersucht, ob während des Saugens Staub aufgewirbelt wird oder dabei kleinste Partikel aus dem Staubsaugerbeutel entweichen. Für die Messung der Feinstaubemission während des Staubsaugens wurde der Feinstaubsensor laut Angaben der Schülerinnen über einen Zeitraum von 10 Minuten in ca. 1 m Entfernung

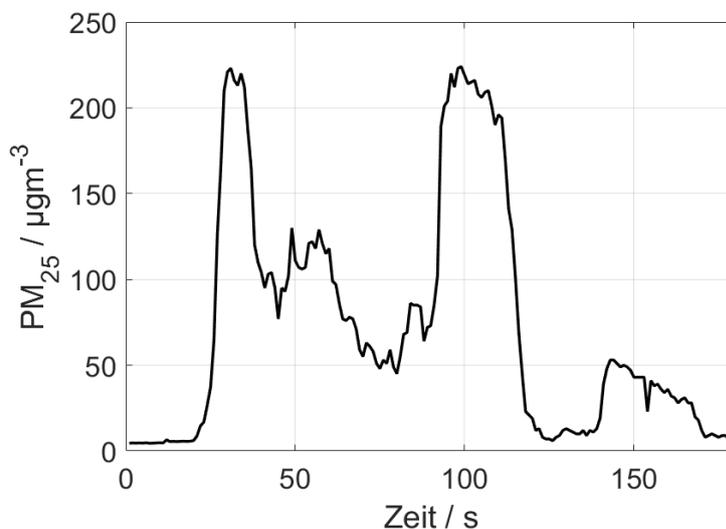
des Staubsaugers platziert. Es konnten jedoch keine erhöhten Feinstaubwerte gemessen werden, was durch den integrierten Staubfilter im Sauger erklärt werden kann. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.41 dargestellt.



**Abb. 6.41** Messung der Feinstaubkonzentration während des Staubsaugens in einer Entfernung von ca. 1 m zum Staubsauger über einen Zeitraum von 10 Minuten.

#### *Messungen während des Grillens*

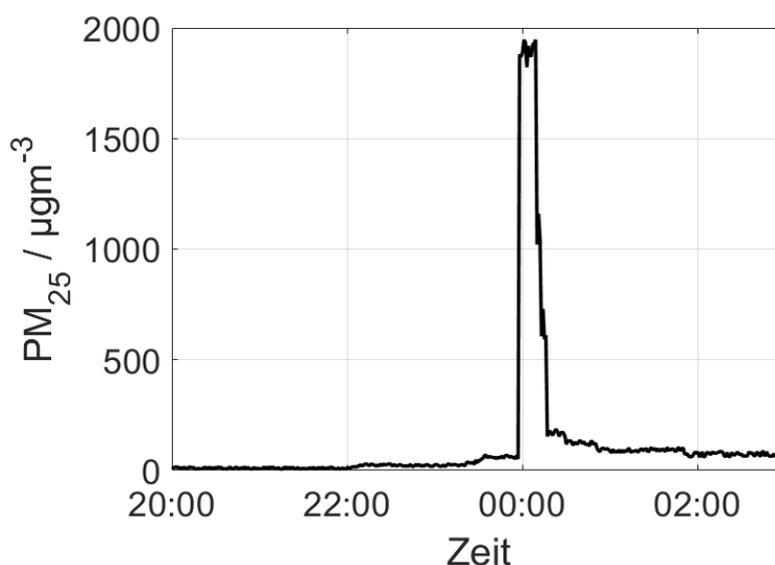
Für die Untersuchung der Feinstaubemission beim Grillen wurde ein Einweggrill verwendet. Der Sensor wurde nach Angaben der Schülerinnen in einem Abstand von 1 m zum Grill platziert und über einen Zeitraum von 3 Minuten Messwerte aufgenommen. Nach ca. 30 und 100 Sekunden erreicht die Feinstaubkonzentration mit ca. 230 µg/m<sup>3</sup> jeweils ein Maximum. Während des Versuchs unterliegt die gemessene Konzentration Schwankungen, die durch wechselnde Windrichtungen und unterschiedlich starke Rauchentwicklung erklärt werden können, siehe Abbildung 6.42. Außerdem könnte der erste Peak nach ca. 30 Sekunden durch das schnelle Abbrennen des Anzünders begründet sein.



**Abb. 6.42** Messung der Feinstaubkonzentration beim Grillen mit einem Einweggrill.

### Messungen an Silvester

Bei dieser Messung haben die Schülerinnen untersucht, wie sich die Feinstaubkonzentration an Silvester entwickelt. Dazu wurde der Sensor in einem Garten platziert und im Zeitraum zwischen dem 31.12.2019, 20:00 Uhr und dem 01.01.2020 um 03:00 Uhr Messwerte aufgenommen, siehe Abbildung 6.43. Es zeigt sich, dass bereits vor Mitternacht erhöhte Feinstaubwerte gemessen werden können. Dies liegt an einem vorzeitigen Abbrennen von Feuerwerk. In der Zeit von 0:00 Uhr bis 0:20 Uhr erreicht die Konzentration ein Maximum mit nahezu  $2.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Der zulässige Grenzwert von  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  wird zu dieser Zeit um den Faktor 70 überschritten. Auch danach bleibt die Feinstaubkonzentration mit Werten um  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  stark erhöht.



**Abb. 6.43** Messung der Feinstaubkonzentration an Silvester. Um Mitternacht wird der zulässige Grenzwert von  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  um den Faktor 70 überschritten. Auch im weiteren Verlauf der Nacht bleibt die Konzentration mit ca.  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  stark erhöht.

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.

Insgesamt zeigten diese Ergebnisse die Wichtigkeit einer Betreuungsperson mit wissenschaftlichem Hintergrund auf. Nur bei ausreichender Dokumentation können eventuelle systematische Fehler in der Methodik nachvollzogen werden. Dennoch zeigt die zunächst nicht geplante Messung von Alltagssituationen ein hohes Maß an Eigenmotivation.

## 6.3 Zwischenfazit

Im Verlauf dieser Arbeit konnten diverse Umweltstudien von Schülern der Klassenstufen 9 - 13 zu unterschiedlichen Themen auf der Basis von Luftqualitätssensoren realisiert werden. Nachdem sich die Schüler für ein Themenfeld entschieden hatten, führten sie eine Literaturrecherche durch, auf deren Grundlage sie eine Hypothese bzw. eine Fragestellung entwickelt und/oder eine Hardware konzipiert haben. Mit der Unterstützung eines Betreuers bzw. eines Wissenschaftlers wurden dann eine Methodik zur Datenerhebung entwickelt und relevante Messdaten mit der Hilfe von moderner Technik aufgenommen. Nach der Datenaufnahme wurden diese ausgewertet und interpretiert.

Die Themengebiete reichten von rein technischen Fragestellungen wie der Entwicklung und Kalibrierung eines Sensors auf CO oder der Vernetzung von Sensorsystemen über interdisziplinäre Themen wie die Untersuchung der Luft in Bienenstöcken mit Bezug auf den Fachbereich Biologie bis hin zur Rolle von Pflanzen in Bezug auf die Luftqualität oder der Messung von Schadstoffen wie Feinstaub vor der Schule oder an Silvester. Durch diese Themenvielfalt erhielten die Schüler abseits der formalen Schulbildung in non-formalen und informellen Lernszenarien Einblicke in die Umweltsensorik und Luftqualität.

Die Schüler zeigten sich während der Entwicklung und Bearbeitung der Umweltstudien sehr interessiert und motiviert, was auf die Authentizität und den direkten Bezug zur eigenen Umwelt zurückgeführt werden kann. Es wurde deutlich, dass die Qualität und Komplexität der Studien mit dem Alter ansteigen, was so auch aufgrund der längeren Schulausbildung zu erwarten war. Insgesamt zeigte sich, dass Schüler zu kurzen Messungen und schnellen, manchmal nicht komplett durchdachten Interpretationen ihrer Messergebnisse neigen. Jedoch werden manche Kausalzusammenhänge erst nach längeren Messungen über Wochen und Monate sichtbar (z.B. Kapitel 6.2.3). Gerade deswegen spielt die Betreuung während der Studien durch Personen mit wissenschaftlichem Hintergrund eine entscheidende Rolle. Dadurch lernen Schüler Prinzipien einer guten wissenschaftlichen Praxis kennen und sammeln so erste Erfahrungen in der Methodenentwicklung, Datenauswertung und Interpretation.

Während der Realisierung der Umweltstudien ermöglichte die Nutzung von IoT es, einerseits längere Messreihen automatisiert durchzuführen und andererseits die Motivation der Schüler aufrecht zu erhalten, da sie im Sinne des MSL jederzeit die Möglichkeit haben, auf Messdaten zuzugreifen, diese auszuwerten und Familie und Freunden davon berichten zu können.



# 7 Fazit und Ausblick

Aufgrund der direkt erlebbaren Folgen von Umweltverschmutzung, wie beispielsweise der Klimawandel und erhöhte Schadstoffkonzentrationen in der Luft interessieren sich Schüler heutzutage immer mehr für Umweltthemen. Dennoch sind die oftmals farb- und geruchlosen Luftschadstoffe für Schüler noch wenig greifbar, auch da direktes Feedback über Schadstoffbelastungen fehlt. Weiterhin ist es nach modernen Konzepten der Umweltbildung entscheidend neben der Vermittlung von deklarativen, konzeptuellen und prozeduralen Umweltwissen auch authentische Lernszenarien zu schaffen und sowohl fachliche, gesellschaftliche als auch soziale Aspekte im Sinne der BNE zu berücksichtigen. Im Bereich der Umweltbildung bezogen auf das Thema Luftqualität beinhaltet deklaratives und konzeptuelles Umweltwissen sowohl Kenntnisse über Luftschadstoffe bzw. Indikatoren als auch Wissen über Sensorprinzipien und deren Kalibrierungsmethoden. Prozedurales Umweltwissen beinhaltet die Kenntnisse von Strategien zur Erhaltung einer guten Luftqualität (z.B. regelmäßiges Lüften in Innenräumen) oder das Wissen über umweltfreundliche Alternativprodukte. Authentische Lernszenarien können durch direktes Anwenden des Gelernten in Experimenten oder bei der Entwicklung und Beantwortung eigener Fragestellungen nach Prinzipien von CS erreicht werden. Aus diesen Gründen lag der Fokus dieser Arbeit einerseits auf der Entwicklung von computerbasierten Selbstlernkursen zum Thema Gasesstechnik für Schüler der gymnasialen Klassenstufen 7 - 13 und andererseits auf der Entwicklung von Schülerumweltstudien für besonders interessierte Schüler zum Thema Luftqualität im Sinne des CS Ansatzes.

In den drei entwickelten Lernmodulen erfahren Schüler die Grundlagen der Gasesstechnik und erhalten Informationen zu verschiedenen Luftschadstoffen. Den Einstieg bildet das Modul „Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors“. Darin lernen die Schüler die grundlegende Funktionsweise eines solchen Sensors zur Detektion von flüchtigen organischen Verbindungen kennen. Die Schüler nehmen die Sensorreaktion eines MOX-Halbleiter Gassensors in Anwesenheit verschiedener Stoffe, wie Wasser, Apfelsaft und alkoholfreiem Bier, sowie bei unterschiedlichen Sensortemperaturen auf. Es zeigt sich, dass die Sensorreaktion charakteristisch für den untersuchten Stoff ist, weshalb diese eindeutig zugeordnet 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 Lernmodul auf der „Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors“ auf verschiedene Konzentrationen von Ethanol. Dieses beinhaltet eine Erweiterung des in Lernmodul 1 entwickelten qualitativen Modells um den Aspekt eines temperaturzyklischen Betriebs zur Steigerung der Sensitivität und Selektivität. Ausgehend von der Konzeptualisierung des Begriffs „Kalibrierung“ führen die Schüler in diesem Kurs die grundlegenden Schritte für die Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors, wie (a) Aufnahme von Trainingsdaten, (b) Merkmalsextraktion, (c) mathematische Modellbildung mittels Machine Learning und (d) Modellvalidierung unter Anleitung 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 Lernmodul geht es um „Umweltmessungen“ mit unterschiedlichen Sensortypen. Dies beinhaltet die Messung von Luftschadstoffen im Innenraum sowie die Vermittlung von Wissen über deren Grenzwerte und Auswirkungen auf die Gesundheit. Zu diesen gehören neben VOCs auch CO<sub>2</sub> als Indikator für schlechte Luftqualität sowie Feinstaub. In einer Einführungsphase erhalten die 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 CO<sub>2</sub> und die Lichtstreuung zur Messung von Feinstaub in Experimenten vorgestellt. Das Lernmodul wird durch eine Broschüre begleitet, welche Arbeitsaufträge und Zusatzinformationen zu Schadstoffen enthält. Die einzelnen Experimente in den Stationen haben einen direkten Alltagsbezug, wodurch authentische Lernszenarien geschaffen werden. So werden verschiedene Alltagsprodukte mit und ohne Umweltsiegel auf ihre Schadstoffemission verglichen was zu einer Sensibilisierung für emissionsarme Produkte führt. Weiterhin wird die Bedeutung einer regelmäßigen Lüftung in Innenräumen hervorgehoben, indem das zuvor wenig greifbare Gefühl einer „dicken Luft“ mit Sensoren quantifiziert wird. Aber auch die Messung von Feinstaub wird in Bezug auf einer Alltagssituation – dem Beschriften und Wischen einer Schultafel mit Kreide – genauer untersucht.

Die Lernmodule sind mittlerweile fester Bestandteil des Angebots des Schülerforschungszentrums Saarlouis und des Schülerlabors SinnTec der Universität des Saarlandes. Dort werden sie regelmäßig von Gruppen oder ganzen Schulklassen

gebucht. Zudem wurden die Lernmodule bei verschiedenen Veranstaltungen („Tag der Technik Saar“, Schülerbetriebspraktikum „IngFo“) erfolgreich erprobt. Im Jahr 2019 wurden die Kurse zudem als benoteter „alternativer großer Leistungsnachweis“ im Rahmen eines verpflichtenden MINT-Praktikums in einer 9. Klasse des Max-Planck-Gymnasiums Saarlouis über einen Zeitraum von 3 Monaten eingesetzt. Im Jahr 2020 konnte dieses aufgrund der Corona-Pandemie nur teilweise durchgeführt werden. Das Feedback der Schüler war trotz der komplexen Versuche sehr positiv.

Lehrkräfte konnten im Rahmen von Lehrerfortbildungen an der TU Kaiserslautern („Physikerzirkel“) und am Schülerforschungszentrum Saarlouis (Saarland) sowie bei weiteren öffentlichen Veranstaltungen wie dem „Tag der Schülerlabore“ und „Tag der offenen Tür“ einen Einblick in den Aufbau und die Durchführung der Module erhalten. Hier erhaltenes Feedback stellt die Vielseitigkeit und fächerübergreifende Aspekte einerseits, die technisch gelungene Umsetzung andererseits als sehr positiv heraus. Gleichzeitig konnten Anregungen aufgegriffen und Verbesserungsvorschläge integriert werden.

Im Sinne einer Nachhaltigkeit und Übertragbarkeit erleichtert das Lernarrangement mittels Selbstlernkursen die Verbreitung der entwickelten Lernmaterialien aktiv. Schülerlabor-spezifische Anpassungen der Kurse (z. B. eigene Fotos der Messinstrumente, Variation der zu messenden Stoffe) können nach eigenen Vorstellungen vorgenommen werden. Alle Quellcodes der HTML-Kurse und der entwickelten Kalibrier- bzw. Mess-Software sind Open-Source und können online heruntergeladen werden [163]. Zum Nachbau der benötigten Hardware (Messplatinen, Messkammern, Gasvorratskammer) wurde eine Materialliste inklusive Platinenlayouts einschließlich einer Preisorientierung aller Komponenten erstellt, die sich im Anhang dieser Arbeit befindet (vgl. I.6).

Die entwickelten Lernmodule bilden die theoretischen und praktischen Grundlagen für die Entwicklung von Schülerumweltstudien zum Thema Luftqualität nach dem Prinzip von CS mit Hilfe des „mobile assisted seamless learnings“. Moderne Technik zur Aufnahme von Messdaten und deren Auswertung über das Smartphone, das Tablet oder den PC dient dabei als Mediator für den Lernprozess. Schüler werden ermutigt, sich auch außerhalb des Lernarrangements mit einem Thema auseinanderzusetzen. Durch diese zeitliche und örtliche Unabhängigkeit kann Lernen jederzeit und überall stattfinden. Gleichzeitig kann so Druck oder Angst vor einer Beurteilung abgebaut werden. Im Laufe dieser Arbeit konnten verschiedene Schülerumweltstudien mit unterschiedlichen Schwerpunkten realisiert werden. Diese reichten von der Fokussierung auf die Messtechnik, wie die Vernetzung von Sensorsystemen mit Hilfe des IoTs, über gesundheitliche und sicherheitstechnische Fragestellungen, bis hin zu

interdisziplinären Untersuchungen, wie biologische Prozesse am Beispiel der Untersuchung der Luft in Bienenstöcken. Die Schülerumweltstudien sind dabei immer nach dem gleichen Prinzip entstanden wodurch verschiedene Bedürfnisse der Schüler befriedigt wurden. Nach der Themenfindung führten die Schüler eine Literaturrecherche durch und entwickelten darauf aufbauend eigene Fragestellungen bzw. Hypothesen. Zusammen mit Wissenschaftlern wurde dann eine Methodik entwickelt, um die benötigten Daten für die Untersuchung der Fragestellungen und Hypothesen aufzunehmen. Durch diese standardisierte Vorgehensweise zur Durchführung der Umweltstudien war es möglich die konzipierten Hard- und Softwarekomponenten in unterschiedlichen Studien einzusetzen und weiterzuentwickeln. Dadurch konnten sich die Schüler vermehrt auf die Beantwortung der eigentlichen Fragestellung konzentrieren, was zu weniger Frustration und mehr Begeisterung für ihre Projekte führte.

Durch die Entwicklung von eigenen Studien haben die Schüler einen Einblick in wissenschaftliche Arbeit erhalten und konnten mit Erfolg an verschiedenen Schüler-Forschungs-Wettbewerben teilnehmen.

In weiterführenden Arbeiten können die Selbstlernkurse um weitere Sensorprinzipien inklusive vereinfachter Schülermodelle zur Erklärung der Funktionsmechanismen erweitert werden. Als Beispiel seien hier Feldeffekttransistoren auf Siliziumkarbidbasis (sog. SiC-FETs) oder elektrochemische Sensoren genannt. Weiterhin könnte die mathematische Modellerstellung aus Lernmodul 2 um weitere Prinzipien wie die lineare Regression erweitert werden. Außerdem bietet sich für Lernmodul 3 die Möglichkeit, sowohl neue Stationen zu entwickeln als auch weitere Sensortypen zu implementieren.

Als Teil von neuen Schülerumweltstudien können sowohl neue Fragestellungen entwickelt als auch versucht werden, bisherige Ergebnisse mit neuen Methodiken zu reproduzieren. Durch die bereits erfolgreiche Implementierung der Datenerhebung mit Hilfe des IoT wurden technische Schwierigkeiten behoben. Dadurch kann der Fokus in weiterführenden Studien verstärkt auf das Studiendesign sowie die Auswertung und Interpretation der Messdaten gelegt werden.

Gerade in Bezug auf die Corona-Pandemie können weitere Fragestellungen als Teil der Schülerumweltstudien entwickelt werden. Beispielsweise können verschiedene Typen von Atemmasken wie Stoffmaske, medizinische Atemmaske oder FFP2-Maske auf ihre Fähigkeit untersucht werden, vor Aerosolen zu schützen. Erste einfache Experimente mit einem CO<sub>2</sub>-Sensor zeigten beispielsweise, dass Stoffbedeckungen wie Schals oder T-Shirts nahezu vollständig durchlässig für CO<sub>2</sub> aus der Atemluft sind. Beim Tragen von medizinischen Masken hingegen konnte kein Ausschlag der

---

CO<sub>2</sub>-Konzentration festgestellt werden, da die Luft zu den Seiten abgeleitet wurde. Diese Ergebnisse können indirekt erste Hinweise auf die Verteilung von virusbelasteten Aerosolen aus der Atemluft liefern.

Zudem kann die Möglichkeit untersucht werden, Aerosole mit Hilfe von Partikelsensoren nachzuweisen. Als experimenteller Aufbau eignet sich dazu beispielsweise die begehbare Messkammer aus Lernmodul 3. In ersten Messungen mit dem low-cost Feinstaubsensor SPS30 konnten bisher zwar keine Aerosole aus der Atemluft nachgewiesen werden, dennoch könnte dies bei komplexeren und teureren Feinstaubsensoren der Fall sein.



# Literaturverzeichnis

- [1] ARD Tagesschau: „Europawahl 2019 - Deutschland“, <https://wahl.tagesschau.de/wahlen/2019-05-26-EP-DE/umfrage-alter.shtml>, Aufruf am 18.10.2020
- [2] Europäische Kommission: „Übereinkommen von Paris“, [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de), Aufruf am 18.10.2020
- [3] European Environment Agency: „EEA Report No 10/2019“, 2019, ISBN: 978-92-9480-088-6, doi:10.2800/822355
- [4] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ): „Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung“, [http://www.bmz.de/de/themen/2030\\_agenda/](http://www.bmz.de/de/themen/2030_agenda/), Aufruf am 22.07.2020
- [5] Axel Braun: "Umwelterziehung zwischen Anspruch und Wirklichkeit", Haag und Herchen Verlag, Frankfurt 1983, ISBN: 978-38-8129-662-5.
- [6] Rolf Langeheine, Jürgen Lehmann: "Die Bedeutung der Erziehung für das Umweltbewußtsein", IPN-Schriftenreihe 101, Kiel 1986, ISBN: 389-08-8005-3.
- [7] Gisela Szagun, Elke Mesenholl, Martina Jelen: "Umweltbewusstsein bei Jugendlichen. Emotionale, handlungsbezogene und ethische Aspekte", Lang Verlag, Frankfurt 1994, ISBN: 978-36-3146-234-8.
- [8] Barbara Milton, Eliza Cleveland, Dianne Bennet-Gates: „Changing perceptions of nature, self, and others: a report on a Park/School Program“, Journal of Environmental Education, Vol. 26, No. 3, pp. 32-39, 1995.

- [9] Horst Rode: "Umwelterziehung in der Schule. Zwischen Anspruch und Wirklichkeit", Edited by H. Rode, D. Bolscho, R. Dempsey and J. Rost, Leske-Budrich Verlag, Budrich 2001, ISBN 978-3-663-11677-6.
- [10] Claudia de Witt, Thomas Czerwionka: "Mediendidaktik", W. Bertelsmann Verlag, Bielefeld 2012. doi: 10.3278/42/0037w.
- [11] Werner Rieß: „Die Kluft zwischen Umweltwissen und Umwelthandeln als pädagogische Herausforderung – Entwicklung und Erprobung eines Prozessmodells zum 'Umwelthandeln in alltäglichen Anforderungssituationen' ", Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften Vol. 9, pp. 147-159, 2003.
- [12] Cornelia Gräsel: „Die Rolle des Wissens beim Umwelthandeln – oder: Warum Umweltwissen träge ist“, Unterrichtswissenschaft – Zeitschrift für Lernforschung, Vol. 27, Not. 3, pp. 196-212, 1999.
- [13] Günther Dohmen: „Das informelle Lernen - Die Erschließung einer bisher vernachlässigten Grundform menschlichen Lernens für das lebenslange Lernen aller“, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn, 2001.
- [14] Victoria J. Marsick, Karen E. Watkins, Mary W. Callaha, Marie Volpe: „Reviewing Theory and Research on Informal and Incidental Learning“, Academy of Human Resource Development International Conference (AHRD), pp. 794-800, 2006.
- [15] Lung-Hsiang Wong, Chee K. Looi: „What seams do we remove in mobile-assisted seamless learning? A critical review of the literature“, Computers & Education, Elsevier Verlag, Vol. 57, No. 4, pp. 2364-2381, 2011.
- [16] Dorothee Dähnhardt, Olaf J. Haupt, Christoph Pawek: "Kursbuch 2010: Schülerlabore in Deutschland", Tecum Verlag, Marburg 2009, ISBN: 978-3-828-82120-0.
- [17] Tim Plasa: "Die Wahrnehmung von Schülerlaboren und Schülerforschungszentren (Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 152)", Logos Verlag, Berlin 2013, ISBN: 978-3-832-53483-7
- [18] Svantje Schumann, Pascal Favre: „Das Konzept Citizen Science - ein Ansatz für die Sachunterrichtsdidaktik“, Schulpädagogik heute: Außerschulische Lernorte, Vol. 11, No. 6, 2015.

- [19] Alycia Crall, Greg Newman, Thomas J. Stohlgren, K. Holfelder, Jim Graham, Donald Waller: „Assessing citizen science data quality: an invasive species case study“, *Conservation Letters*, Vol. 4, No. 6, pp. 433-442, 2011, doi: 10.1111/j.1755-263X.2011.00196.x.
- [20] Vincent Devictor, Robert Whittaker, Coralie Beltrame: „Beyond scarcity: citizen science programmes as useful tools for conservation biogeography“, *Diversity and Distributions*, Vol. 16, No. 3, pp. 354-362, 2010, doi: 10.1111/j.1472-4642.2009.00615.x.
- [21] Xiyao Chen, Fel Li, Chaoyang Liu, Jun Yang, Jingdong Zhang, Chunlin 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*, Vol. 9, No. 7, p. 1115, 2017, doi: 10.3390/su9071115.
- [22] Peder Wolkoff, Per A. Clausen, B. Jensen, Gamgard Nielsen, C. Wilkins, „Are We Measuring the Relevant Indoor Pollutants?“, *Indoor Air*, Vol. 7, No. 2, pp. 92-106, 2004, doi: 10.1111/j.1600-0668.1997.t01-2-00003.x.
- [23] US Environmental Protection Agency (EPA): „Sick Building Syndrome“, *Indoor Air Facts* No. 4, 1991, [https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/sick\\_building\\_factsheet.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/sick_building_factsheet.pdf), Aufruf am 05.06.2020
- [24] Thomas Larz, Wolfgang Bischof, Hemlut Sakunski, Christoph Baudisch, Hermann Fromme, Herbert Grams, Thomas Gabrio, Birger Heinzow, Ludwig Müller: „Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluf“, *Bekanntmachung des Umweltbundesamtes, Springer Medizin Verlag, Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz*, Vol. 51, pp. 1358-1369, 2008.
- [25] Max von Pettenkofer: „Über Luftwechsel in Wohngebäuden,“ München J.G. Cotta Verlag, 1858.
- [26] Hans Schweisfurth: „Gesundheitsschäden durch Feinstaub“, *Pulmologisches Forschungsinstitut, Cottbus*, 2015.
- [27] Angela Schuh, Dennis Nowak: „Klimatherapie im Hochgebirge und im Meeresklima,“ *Deutsche Medizinische Wochenschrift*, Vol. 136, No. 4, pp. 135-139, 2011, doi: 10.1055/s-0031-1272496.

- [28] Gerhard de Haan, Udo Kuckartz: "Umweltbewußtsein: Denken und Handeln in Umweltkrisen", VS Verlag für Sozialwissenschaften, Opladen 1996, ISBN: 978-3-322-83265-8, doi: 10.1007/978-3-322-83265-8.
- [29] Birgit Neugebauer: „Die Erfassung von Umwektbewusstsein und Umweltverhalten“, ZUMA-Methodenbericht No. 2004/07, 2004, ISSN: 1610-9953.
- [30] Peter Preisendörfer: „Themenfelder von Befragungsstudien zu Umwelteinstellungen und zum Umweltverhalten in der Bevölkerung“, Edited by J. Schupp and G. Wagner, Umwelt und empirische Sozial- und Wirtschaftsforschung, Dunker und Humblot Verlag, pp. 27-43, Berlin 1998.
- [31] Frieder Rubik, Ria Müller, Richard Harnisch, Brigitte Holzhauer, Michael Schipperges, Sonja Geiger: "Umweltbewusstsein in Deutschland 2018 - Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage", Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Umweltbundesamt, 2019.
- [32] Peter Preisendörfer: „Der Bequemlichkeit erlegen: Die Diskrepanz zwischen Umweltbewusstsein und Umweltverhalten“, Politische Ökologie, Vol. 33, Lebensstil oder Stilleben. Lebenswandel durch Wertewandel, 1993.
- [33] Andreas Diekmann, Peter Preisendörfer: „Umweltbewusstsein, ökonomische Anreize und Umweltverhalten“, Schweizerische Zeitschrift für Soziologie, Vol. 17, No. 2, pp. 207-231, 1991, ISSN: 0379-3664
- [34] Cornelia Gräsel: „Umweltbildung“, in Handbuch Bildungsforschung, Edited by Rudolf Tippelt Bernhardt Schmidt (Hrsg.), VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden 2010, pp. 845-859, ISBN: 978-3-531-17138-8.
- [35] Mathias Bahr: „Umweltbildung“, Schriftenreihen / Potsdamer Geographische Praxis, Universität Potsdam, Potsdam 2013, pp. 71-78, ISSN: 2194-1599.
- [36] Vereinte Nationen: „AGENDA21“, Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung, Rio de Janeiro 1992, [https://www.un.org/Depts/german/conf/agenda21/agenda\\_21.pdf](https://www.un.org/Depts/german/conf/agenda21/agenda_21.pdf), Aufruf am 18.10.2020.
- [37] Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU): „Umweltgutachten 1978“, Deutscher Bundestag, Verlag Dr. Hans Heger, Bonn 1978.

- [38] Heiko Grunenberg, Udo Kuckartz: "Umweltbewusstsein im Wandel: Ergebnisse der UBA-Studie Umweltbewusstsein in Deutschland 2002", Leske + Budrich Verlag, Opladen 2003, ISBN 978-3-322-97605-5.
- [39] Hans Spada: „Umweltbewusstsein: Einstellung und Verhalten“, Ökologische Psychologie. Ein Handbuch in Schlüsselbegriffen, Edited by L. Kruse, L. C. Graumann, E. Lantermann (Hrsg.), Psychologie Verlags Union, München 1990, pp. 624-631.
- [40] Maike Gossen, Brigitte Holzhauer, Michael Schipperges, Gerd Scholl: „Umweltbewusstsein in Deutschland 2014 Vertiefungsstudie: Umweltbewusstsein und Umweltverhalten junger Menschen“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2015, ISSN 1862-4804.
- [41] Horst Rode, Dietmar Bolscho, Rachael Dempsey, Jürgen Rost: "Umwelterziehung in der Schule. Zwischen Anspruch und Wirksamkeit", Leske + Budrich Verlag, Opladen 2001, ISBN: 978-3-8100-3219-5.
- [42] John R. Anderson: "Kognitive Psychologie" Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford 1996, ISBN: 978-3-8602-5354-0.
- [43] Michael Schneider: "Konzeptuelles und prozedurales Wissen als latente Variablen: Ihre Interaktion beim Lernen mit Dezimalbrüchen", Dissertation, Technische Universität Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Machinensysteme, Berlin 2006.
- [44] Dietmar Bolscho, Hansjoerg Seybold: "Umweltbildung und ökologisches Lernen. Ein Studien-und Praxisbuch", Cornelsen Verlag, Berlin 1996, ISBN: 978-3-5892-1072-5.
- [45] Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, William W. Behrens III: "The Limits to Growth", Universe Books Verlag, New York 1972, ISBN: 978-0-8766-3901-6.
- [46] Gundula Zubke: "Umwelthandeln und jugendtypische Lebensstile: Perspektiven für die schulische Umweltbildung", Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Biologiedidaktik, Gießen 2006, ISBN: 3-89334-463-2.
- [47] Hartmut Bölts: "Umweltbildung - Eine kritische Bilanz", Wissenschaftliche Buchgesellschaft (WGB), Darmstadt 2014, ISBN: 978-3-5342-4088-3.

- [48] Arbeitsgemeinschaft Natur- und Umweltbildung Bundesverband e.V. (ANU): „Umweltbildung“, <https://www.umweltbildung.de/>, Aufruf am 22.07.2020.
- [49] „Spohns Haus“, <https://www.spohnshaus.de/>. Aufruf am 12.07.2020.
- [50] A. Bonn, A. Richter, K. Vohland, L. Pettibone, M. Brandt, R. Feldmann, C. Goebel, C. Grefe, S. Hecker, L. Hennen, H. Hofer, S. Kiefer, S. Klotz, T. Kluttig, J. Krause, K. Küsel, C. Liedtke, A. Mahla, V. Neumeier, R. M. Premke Kraus, M. Rillig, O. Röller, L. Schäffler, B. Schmalzbauer, U. Schneidewind, A. Schumann, J. Settele, K. Tochtermann, K. Tockner, J. Vogel, W. Volkmann, J. von Unger, D. Walter, M. Weisskopf, C. Wirth, T. Witt, D. Wolst, D. Ziegler: „Grünbuch Citizen Science Strategie 2020 für Deutschland“, Bürger schaffen Wissen - Die Citizen Science Plattform, Berlin 2016.
- [51] Muki Haklay: „Citizen Science and Volunteered Geographic Information - overview and typology of participation in SUI“, *Crowdsourcing Geographic Knowledge: Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice*, Springer-Verlag, Berlin 2013, pp. 105-122, doi: 10.1007/978-94-007-4587-2\_7.
- [52] Anett Richter, Mandy Singer-Brodowski, Susanne Hecker, Matthias Trénel, Britta Letz, Aletta Bonn: „Positionspapier: Handlungsbedarfe und Maßnahmen für die Förderung von Citizen Science in der Umweltbildung und Umweltkommunikation“, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leipzig 2018, ISSN: 1436-140X.
- [53] Ross K. Meentmeyer, Monica A. Dorning, John B. Vogler, Douglas Schmidt, Matteo Garbelotto: „Citizen science helps predict risk of emerging infectious disease“, *Front Ecol Environ*, Vol. 13, No. 4, pp. 189-194, 2015, doi: 10.1890/140299.
- [54] Eva Lewandowski, Hannah Specht: „Influence of volunteer and project characteristics on data quality of biological surveys“, *Conservation Biology*, Vol. 29, No. 3, pp. 713-723, 2014., doi: 10.1111/cobi.12481.
- [55] Julia Lorke, Yaela Golumbic, Claire Ramjan, Osnat Atias: „Training needs and recommendations for Citizen Science participants, facilitators and designers“, COST Action 15212 report, 2019.
- [56] Julia Kreimeyer: „Lernprozesse im freiwilligen Engagement von jungen Erwachsenen – Zur Fragestellung einer empirischen Untersuchung“,

- Literatur- und Forschungsreport Weiterbildung 2003(1): Erwachsenenbildung und Demokratie, pp. 255-265, 2003.
- [57] Peter Finke: „Der schwierige Weg zur Wissensgesellschaft. Ein Plädoyer für Citizen Science“, *Forschung und Lehre*, Vol. 19, No. 11, pp. 914-916, 2012, ISSN: 0945-5604.
- [58] Jana Rückert-John, René John, Melanie Jeager-Erben, Magdalena Wiatr, Kathrin Vohland, David Ziegler, Claudia Göbel, Larissa Talmon-Gros, Thomas Teichler, Nicolas Bach, Christine v. Blanckenberg, Hans-Liudger Dienel: „Konzept zur Anwendbarkeit von Citizen Science in der Ressortforschung des Umweltbundesamtes“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2017, ISSN: 1862-4359
- [59] Bürger schaffen Wissen, „Bürger schaffen Wissen - Die Citizen Science Plattform“, <https://www.buergerschaffenwissen.de/>, Aufruf am 20.04.2020.
- [60] Alan Irwin: "Citizen Science - A study of people, expertise and sustainable development", Routledge-Verlag, London 1995, ISBN: 978-0-4151-3010-3.
- [61] Peter Finke: "Citizen Science - Das unterschätzte Wissen der Laien", oekom-Verlag, München 2014, ISBN: 978-3-86581-466-1.
- [62] Mark Chandler, Linda See, Kyle Copas, Astrid M. Bonde, Bernat Claramunt López, Finn Danielsen, Jan K. Legind, Siro Masinde, Abraham Miller-Rushing, Greg Newman, Alyssa Rosemartin, Eren Turak: „Contribution of citizen science towards international biodiversity monitoring“, *Biological Conservation*, Vol. 213 (B), pp. 280-294, 2017, doi: 10.1016/j.biocon.2016.09.004
- [63] Jonathan Silvertown: „A new dawn for citizen science“, *Trends in Ecology and Evolution*, Vol. 24, No. 9, pp. 467-471, 2009, doi: 10.1016/j.tree.2009.03.017
- [64] National Weather Service: „National Weather Service - National Oceanic And Atmospheric Administration“, <https://www.weather.gov/coop/>, Aufruf am 21.04.2020.
- [65] Audubon Society: „Christmas Bird Count“, <https://www.audubon.org/conservation/join-christmas-bird-count>, Aufruf am 21.04.2020.

- [66] Elsevier: „Online Datenbank ScienceDirect“, <https://www.sciencedirect.com/>, Aufruf am 21.04.2020.
- [67] Folding@Home: „Folding@Home“, <https://foldingathome.org/>, Aufruf am 20.04.2020.
- [68] Hillary K. Burges, Lauren DeBey, Halley Froehlich, N. Schmidt, E. Theobald, A. Ettinger, J. HilleRisLambers, J. Tewksbury, J. Parrish: „The science of citizen science: Exploring barriers to use as a primary research tool“, *Biological Conservation*, Vol. 208, pp. 113-120, 2016, doi: 10.1016/j.biocon.2016.05.014
- [69] David G. Delaney, Corinne D. Sperling, Christian S. Adams, Brian Leung: „Marine invasive species: Validation of citizen science and implications for national monitoring networks“, *Biological Invasions*, Vol 10, No.1, pp. 117-128, 2007, doi: 10.1007/s10530-007-9114-0
- [70] Jami J. Belt, Paul R. Krausmann: „Evaluating population estimates of mountain goats based on citizen science“, *Wildlife Society Bulletin*, Vol. 36, No. 2, pp. 264-276, 2012, doi: 10.1002/wsb.139
- [71] Uwe Maier: "Lehr-Lernprozesse in der Schule: Studium", Julius Klinkhardt Verlag, Bad Heilbrunn 2017, ISBN 978-3-8252-3767-7.
- [72] Steven A. Gray, Kristina Nicosia, Rebecca Jordan: „Lessons Learned from Citizen Science in the Classroom. A Response to 'The Future of Citizen Science'“, *Democracy & Education*, Vol.. 20, No. 2. Article 14, 2012.
- [73] Suzanne E. Hiller, Anastasia Kitsantas: „Fostering Student Metacognition and Motivation in STEM through Citizen Science Programs“, Springer International Publishing Verlag, *Metacognition. Fundamentals, applications and trends: a profile of the current state-of-the art*, pp. 193-222, 2014, ISBN: 978-3-319-11061-5.
- [74] Michael Mueller, Deborah Tippins, Lynn A. Bryan: „The Future of Citizen Science“, *Democracy and Education*, Vol. 20, No. 1, Article 2, Los Angeles 2011.
- [75] Johannes Fromme, Burkhard Schäffer: "Medien - Macht - Gesellschaft", VS-Verlag für Sozialwissenschaften, Medienbildung und Gesellschaft, Vol. 4, Wiesbaden 2007, ISBN: 978-3-531-90513-6.

- [76] David Burger: „Citizen Science, Partizipation und geographische Schulbildung“, *GW-Unterricht* Vol. 1, pp. 18-27, 2016. doi: 10.1553/gw-unterricht142/143s18.
- [77] Koalitionsvertrag: „Ein neuer Aufbruch für Europa. Eine neue Dynamik für Deutschland. Ein Neuer Zusammenhalt für unser Land. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 19. Legislaturperiode.“, [https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag\\_2018-2021\\_Bund\\_final.pdf](https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2018-2021_Bund_final.pdf)., Aufruf am 21.04.2020.
- [78] Leif Brand, Tim Hülser, Vera Grimm, Axel Zweck: "Internet der Dinge - Perspektiven für die Logistik", *Zukünftige Technologien Consulting*, Vol. 80, Düsseldorf 2009,
- [79] IoT Analytics GmbH: „IoT-Analytics“, <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/>, Aufruf am 10.04.2020.
- [80] Patan Rizwan, K. Suresh, M. Babu: „Real-time smart traffic management system for smart cities by using Internet of Things and big data“, 2016 International Conference on Emerging Technologies Trends (ICETT), Kollam 2016, doi: 10.1109/ICETT.2016.7873660.
- [81] Mahmud M. Hossain, M. Fotouhi, R. Hasan: „Towards an Analysis of Security Issues, Challenges, and Open Problems in the Internet of Things“, *IEEE World Congress on Services*, pp. 21-28, 2015.
- [82] MathWorks: "ThingSpeak", <https://thingspeak.com/>, Aufruf am 04.06.2020.
- [83] Cineta: „ThingView - ThingSpeak viewer“, [https://play.google.com/store/apps/details?id=com.cinetica\\_tech.thingview&hl=de](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.cinetica_tech.thingview&hl=de), Aufruf am 04.06.2020.
- [84] Blynk Inc.: "Blynk". <https://www.blynk.io>, Aufruf am 04.06.2020.
- [85] Lars Mølhave: „Volatile organic compounds, indoor air quality and health“, *Indoor Air*, Vol. 1, No. 4, pp. 357-376, 1991, doi: 10.1111/j.1600-0688.1991.00001.x.
- [86] World Health Organization: "Occupational and Environmental Health Team, „Guidelines for air quality“, Geneva 2000.

- [87] European Commission:  
[https://ec.europa.eu/environment/archives/air/stationary/solvents/faq\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/archives/air/stationary/solvents/faq_en.htm),  
Aufruf am 05.04.2020.
- [88] DIN EN ISO 16000-6, DIN EN ISO 13999-2, VDI 4300-6, AgBB  
Bewertungsschema, DIBt-Zulassungsgrundsätze, GEV-Prüfmethode für den  
EMICODE.
- [89] Manuel Bastuck: "Improving the Performance of Gas Sensor Systems with  
Advanced Data Evaluation, Operation, and Calibration Methods",  
Dissertation, Universität des Saarlandes, Naturwissenschaftlich-Technische  
Fakultät II, Shaker-Verlag, Saarbrücken 2019, doi: 10.22028/D291-29811.
- [90] Helmut Sagunski, B Heinzow: "Bundesgesundheitsblatt -  
Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz", Umweltbundesamt, Vol. 46,  
pp. 346-352, 2003, doi: 10.1007/s00103-003-0584-7.
- [91] Jian Zhou, Yan You, Zhipeng Bai, Yandi Hu, Jiefeng Zhang, Nan Zhang:  
„Health risk assessment of personal inhalation exposure to volatile organic  
compounds in Tianjin, China“, Science of The Total Environment, Vol. 409,  
No. 3, pp. 452-459, 2011, doi: /10.1016/j.scitotenv.2010.10.022.
- [92] Marc J. Madou, S. Roy Morrison: „Chemical Sensing with Solid State  
Devices“, Academic Press, Boston 1989, ISBN: 978-0-3231-3985-4.
- [93] Tuomo Rantala, Vilho Lantto, Tapio Rantala: „Effects of mobile donors on  
potential distribution in grain contacts of sintered ceramic semiconductors“,  
Journal of Applied Physics, Vol. 79, No. 12, p. 9206, 1998, doi:  
10.1063/1.362593.
- [94] Junhua Ding, Thomas McAvoy, Richard Cavicchi, Steve Semancik: „Surface  
state trapping models for SnO<sub>2</sub>-based microhotplate sensors“, Sensors and  
Actuators B, Vol. 77, No. 3, pp. 597-613, 2001, doi:  
10.1016/S0925-4005(01)00765-1.
- [95] Jürgen Kappler: "Characterization of high performance SnO<sub>2</sub> gas sensors for  
CO-detection by in situ techniques", Shaker-Verlag, 2001,  
ISBN: 978-3-8265-9040-5.
- [96] Bernhard Kamp, Rotraut Merkle, Joachim Maier: „Chemical diffusion of  
oxygen in tin dioxide“, Sensors and Actuators B; Chemical, Vol. 77, No. 1-2,  
pp. 534-542, 2001, doi: 10.1016/j.jssc.2005.07.019.

- [97] Bernhard Kamp, Rotraut Merkle, Rudolf Lauck, Joachim Maier: „Chemical diffusion of oxygen in tin dioxide: Effects of dopants and oxygen partial pressure“, *Journal of Solid State Chemistry*, Vol. 178, No. 10, pp. 3027-3029, 2015, doi: 10.1016/j.jssc.2005.07.019.
- [98] Andrew Lee, Brian Reedy: „Temperature modulation in semiconductor gas sensing“, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 60, No. 1, pp. 35-42, 1999, doi: 10.1016/S0925-4005(99)00241-5.
- [99] Marco Schüler, Nikolai Helwig, Andreas Schütze, Tilman Sauerwald, Gabriela Ventura: „Detecting trace-level concentrations of volatile organic compounds with metal oxide gas sensors“, *SENSORS*, 2013 IEEE, Baltimore MD 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICSENS.2013.6688276.
- [100] Martin Leidinger, Tilman Sauerwald, Wolfhard Reimringer, Gabriela Ventura, Andreas Schütze: „Selective detection of hazardous VOCs for indoor air quality applications using virtual gas sensor array“, *Journal of Sensors and Sensor Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 253-263, 2014, doi: 10.5194/jsss-3-253-2014.
- [101] Caroline Schultealbert, Tobias Baur, Andreas Schütze, Stefan Böttcher, Tilman Sauerwald: „A novel approach towards calibrated measurement of trace gases using metal oxide semiconductor sensors“, *Sensors and Actuators B*, Vol. 239, pp. 390-396, 2017, doi: 10.1016/j.snb.2016.08.002.
- [102] Tobias Baur, Andreas Schütze, Tilman Sauerwald: „Optimierung des temperaturzyklischen Betriebs von Halbleitergassensoren“, *tm - Technisches Messen*, Vol. 82, No. 4, pp. 187-195, 2015, doi: 10.1515/teme-2014-0007.
- [103] Gerhard Wiegleb: "Gasmestechnik in Theorie und Praxis", Springer Verlag, Wiesbaden 2016, ISBN: 978-3-658-10687-4, doi: 10.1007/978-3-658-10687-4.
- [104] ams AS-MLV-P2, "Datasheet", [https://www.mouser.de/datasheet/2/588/AS-MLV-P2\\_DS000359\\_1-00-1513213.pdf](https://www.mouser.de/datasheet/2/588/AS-MLV-P2_DS000359_1-00-1513213.pdf), Aufruf am 14.04.2020.
- [105] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): „Atmospheric CO<sub>2</sub> at Mauna Loa Observatory“, <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>, Aufruf am 05.04.2020.

- [106] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BMAS): "Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900)", Bekanntmachung des BMAS, GMBI 55:1094, 2006.
- [107] M. Frisk, A. Rautkas-Kivioja, H. Andersson, H.-M. Loit, M. Meren, G. Stridh: „Are there any differences in indoor environment of asthmatics and non-asthmatics persons? A case/control study performed in Sweden and Estonia“, Proceedings: Indoor Air 2002, pp. 97-102, 2002.
- [108] Hartmut Lang: "Beatmung für Einsteiger. Theorie und Praxis für die Gesundheits- und Krankenpflege", Springer-Verlag, Hamburg 2016, ISBN: 978-3-662-45989-8, doi: 10.1007/978-3-662-45989-8.
- [109] Xiao Liu, Sitian Cheng, Sha Hu, Daqiang Zhang, Huansheng Ning: „A survey on gas sensing technology“, Sensors (Basel), Vol. 12, No. 7, pp. 9635-9665, 2012, doi: 10.3390/s120709635.
- [110] Colin N. Banwell: "Molekülspektroskopie", Oldenbourg-Verlag, München 1999, ISBN: 978-3-4862-4507-3.
- [111] Helmut Günzler, Hans-Ulrich Gremlich: "IR-Spektroskopie: eine Einführung. 4. vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage", Wiley-VHC, Weinheim 2003, ISBN: 978-3-527-30801-9.
- [112] Helmut Budzier, Gerald Gerlach: "Thermische Infrarotsensoren", Wiley-VCH, Weinheim 2010, ISBN: 978-3-5274-0960-0.
- [113] Helmut Günzler, H. Michael Heise: "IR-Spektroskopie", Wiley-VCH, Weinheim 1996, ISBN: 3-527-28759-0.
- [114] Wolfgang Demtröder: "Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik", Springer-Verlag, Kaiserslautern 2012, ISBN: 978-3-642-29944-5.
- [115] Uwe Schmale: "Entwicklung eines langzeitstabilen Niedrigenergie-IR-Gassensors", Dissertation, Rheinisch-Westfälische Hochschule Aachen, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Rheine in Westfalen, 2000.
- [116] Wolfgang Demtröder: "Experimentalphysik 3 - Atome, Moleküle und Festkörper", Springer-Lehrbuch, Kaiserslautern 2016, ISBN: 978-3-662-49093-8.
- [117] Dirk Rossberg: „Silicon micromachined infrared sensor with tunable wavelength selectivity for application in infrared spectroscopy“, Sensors and

- Actuators A: Physical, Vol. 47, No. 1-3, pp. 414-416, 1995, doi: 10.1016/0924-4247(94)00932-8.
- [118] Sensirion: „Datasheet SCD30“  
[https://www.sensirion.com/fileadmin/user\\_upload/customers/sensirion/Dokumente/9.5\\_CO2/Sensirion\\_CO2\\_Sensors\\_SCD30\\_Datasheet.pdf](https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/9.5_CO2/Sensirion_CO2_Sensors_SCD30_Datasheet.pdf), Aufruf am 14.04.2020.
- [119] Mathias Stieß: "Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2009, ISBN: 978-3-540-32551-2.
- [120] World Health Organization (WHO): „Press Release 221, 2013“, Available: [http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2013/pdfs/pr221\\_E.pdf](http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2013/pdfs/pr221_E.pdf), Aufruf am 10.05.2020.
- [121] Umweltbundesamt: „Feinstaubbelastung in Deutschland, 2009“, <http://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/warum-ist-feinstaub-schaedlich-fuer-den-menschen>, Aufruf am 05.04.2020.
- [122] Umweltbundesamt: „Warum ist Feinstaub schädlich für den Menschen?“ <http://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/warum-ist-feinstaub-schaedlich-fuer-den-menschen>, Aufruf am 09.05.2020.
- [123] Landtag des Saarlandes: "Antwort zu der Anfrage des Abgeordneten Hubert Ulrich (B90/Grüne)", Drucksache 15/2070, [https://www.landtag-saar.de/file.ashx?FileName=Aw15\\_2070.pdf](https://www.landtag-saar.de/file.ashx?FileName=Aw15_2070.pdf), Aufruf am 05.04.2020.
- [124] Craig Bohren, Donald Huffman: "Absorption and Scattering of Light by Small Particles", WILEY-VCH Verlag, 1998, ISBN: 978-0-4712-9340-8.
- [125] Denis Duft: "Laborexperimente zur Mikrophysik der Wolken", Dissertation, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, Ilmenau 2010.
- [126] Sensirion: „Datasheet SPS30“, [https://www.sensirion.com/fileadmin/user\\_upload/customers/sensirion/Dokumente/9.6\\_Part particulate\\_Matter/Datasheets/Sensirion\\_PM\\_Sensors\\_SPS30\\_Datasheet.pdf](https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/9.6_Part particulate_Matter/Datasheets/Sensirion_PM_Sensors_SPS30_Datasheet.pdf), Aufruf am 14.04.2020.
- [127] Nikolai Helwig, Marco Schüler, Christian Bur, Andreas Schütze, Tilman Sauerwald: „Gas mixing apparatus for automated gas sensor characterization“, Measurement Science and Technology, Vol. 25, No. 5, pp. 55903-55912, 2014, doi: 10.1088/0957-0233/25/5/055903.

- [128] Daniel C. Harris, Gerhard Werner, Tobias Werner: "Lehrbuch der Quantitativen Analyse", Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2014, ISBN 978-3-642-37788-4.
- [129] Thomas Kammerer: "Entwurf und Realisierung von Messplattformen zur effizienten Entwicklung intelligenter Gasmesssysteme", Universität des Saarlandes, Shaker-Verlag, Vol. 1, Saarbrücken 2005, ISBN: 978-3-8322-5000-3.
- [130] Stéphane Bouchonnet: "Introduction to GC-MS Coupling", CRC Press, 2013, ISBN: 978-1-4665-7251-5, doi: 10.1007/s00216-013-7246-x.
- [131] Peter J. Baugh, Werner Engewald, Hans G. Struppe: "Gaschromatographie: eine anwenderorientierte Darstellung", Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1997, ISBN: 978-3-642-63862-6.
- [132] Hans-Joachim Hübschmann: "Handbook of GC/MS", Wiley-VHC Verlag, Weinheim 2009, ISBN: 978-3-527-33474-2.
- [133] Peter R. Griffiths, James A. de Haseth, James D. Winefordner: "Fourier Transform Infrared Spectroscopy", John Wiley & Sons Verlag, 2007, ISBN: 978-0-471-19404-0.
- [134] Mir M. A. Nikje, Mohammad Askarzadeh: „Green and Inexpensive Method to Recover Bisphenol-A from Polycarbonate Wastes“, *Polímeros*, Vol. 23, 2013, doi: 10.1590/S0104-14282013005000019.
- [135] Andreas Gramm, Andreas Schütze: „High performance solvent vapor identification with a two sensor array using temperature cycling and pattern classification“, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 95, No. 1-3, pp. 58-65, 2003, doi: 10.1016/S0925-4005(03)00404-0.
- [136] Andreas Zell: "Simulation neuronaler Netze", De Gruyter-Verlag, Oldenburg 1995, ISBN: 978-3-4862-4350-5.
- [137] Ron Kohavi: „A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model“, *Proceedings 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 2, pp. 1137-1143, 1995.
- [138] Károly Simonyi: "Kulturgeschichte der Physik", Harri Deutsch Verlag, Frankfurt am Main 1990, ISBN: 978-3-8171-1651-5.
- [139] Christoph Pawek: "Schülerlabore als interessefördernde außerschulische Lernumgebungen für Schülerinnen und Schüler aus der Mittel- und Oberstufe",

- Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Kiel 2009.
- [140] Gustav Lienert, Ulrich Raatz: "Testaufbau und Testanalyse", Beltz Verlag, Weinheim, Basel 2011, ISBN: 978-3-6212-7424-1.
- [141] Joseph J. Schwab, Paul F. Brandwein: „The teaching of science as inquiry“, The teaching of science, Harvard University, Press, Cambridge, MA 1962, ISBN: 978-0-6748-7046-8.
- [142] Paul D. Hurd: „New Directions in Teaching Secondary School Science. New Trends in Curriculum and Instruction“, Journal of Teacher Education, Vol. 20, No. 4, p. 239, 1969, doi: 10.1177/002248716902000419.
- [143] Vincent N. Lunetta, Pinchas Tamir: „Matching lab activities with teaching goals“, The Science Teacher, Vol. 46, pp. 22-24, 1979.
- [144] A. Hofstein und V. N. Lunetta, „The Laboratory in Science Education: Foundations for the Twenty-First Century,“ International Journal of Science Education, Bd. 88, Nr. 1, pp. 28-54, 2004.
- [145] Heinz Muckenfuß: "Lernen im sinnstiftenden Kontext", Cornelsen Verlag, Berlin 1995, ISBN: 3-464-03339-2.
- [146] Kommission der europäischen Gemeinschaften: „Memorandum über Lebenslanges Lernen“, Brüssel 2000, [https://www.hrk.de/uploads/tx\\_szconvention/memode.pdf](https://www.hrk.de/uploads/tx_szconvention/memmode.pdf), Aufruf am 06.05.2020.
- [147] Günther Dohmen: "Das lebenslange Lernen, Leitlinie einer modernen Bildungspolitik", Bundesministerium für Bildung, Wirtschaft, Forschung und Technologie, Bonn, 1996.
- [148] David W. Livingstone: „Informelles Lernen in der Wissensgesellschaft“, Kompetenz für Europa - Wandel durch Lernen - Lernen im Wandel. Referate auf dem internationalen Fachkongress, Berlin 1999, pp. 65-91.
- [149] Günther Holzapfel: "Erfahrungsorientiertes Lernen mit Erwachsenen : didakt. Handeln am Beispiel Bildungsurlaub", Urban und Schwarzenberg Verlag, München, Wien 1982, ISBN: 978-3-5414-1531-1

- [150] Claus Tully, Peter Wahler, Chistine Preiß: „Selbstorganisierte Bildung jenseits institutioneller Qualifizierung“, Jugendliche in neuen Lernwelten, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden 2008, ISBN 978-3-531-91983-6.
- [151] LernortLabor e.V.: <https://www.lernortlabor.de/>, Aufruf am 24.06.2020.
- [152] Ministerium für Bildung Kultur Saarland: "Lehrplan Physik 2015", [www.bildungsserver.saarland.de](http://www.bildungsserver.saarland.de), Aufruf am 15.06.2020.
- [153] Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur Rheinland-Pfalz: "Lehrpläne für die naturwissenschaftlichen Fächer für die weiterführenden Schule in Rheinland-Pfalz", Mainz 2014.
- [154] Sebastian Höfner, Michael Hirth, Benjamin Brück, Jochen Kuhn, Andreas Schütze: „Modeling of the Function Principle of Semiconductor Gas Sensors for High School Students“, Journal of Outdoor and Environmental Education (eingereicht), 2020.
- [155] Sebastian Höfner, Michael Hirth, Benjamin Brück, Jochen Kuhn, Andreas Schütze: „Calibration of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors by High School Students,“ Journal of Outdoor and Environmental Education (eingereicht), 2020.
- [156] Paul Drude: „Zur Elektronentheorie der Metalle“, Annalen der Physik, Vol. 306, pp. 566-613, 1900.
- [157] Antonia Feteira: „Negative Temperature Coefficient Resistance (NTCR) Ceramic Thermistors: An Industrial Perspective“, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 92, pp. 967-983, 2009, doi: 10.1111/j.1551-2916.2009.02990.x,
- [158] Svante Arrhenius: „Über die Reaktionsgeschwindigkeiten bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren“, International Journal of Research in Physical Chemistry and Chemical Physics, Vol. 4, pp. 226-248, 1889, doi: 10.1515/zpch-1889-0416.
- [159] R. M. Corless, G. H. Gonnet, E. G. Hare, D. J. Jeffrey, D. E. Knuth: „On the Lambert W Function“, Advances in Computational Mathematics, Vol. 5, pp. 329-359, 1996.
- [160] ams: „Datasheet AS-MLV-P2“, [https://www.mouser.de/datasheet/2/588/AS-MLV-P2\\_DS000359\\_1-00-1513213.pdf](https://www.mouser.de/datasheet/2/588/AS-MLV-P2_DS000359_1-00-1513213.pdf), Aufruf am 14.04.2020.

- [161] Bosch Sensortec: „Datasheet BME680“, <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme680-ds001.pdf>, Aufruf am 14.04.2020.
- [162] Heltec: „Datasheet ESP32 WiFi-Kit“, <https://heltec.org/project/wifi-kit-32/> Aufruf am 14.04.2020.
- [163] Lehrstuhl für Messtechnik, Universität des Saarlandes: "SUSmobil“, <http://www.susmobil.lmt-uni-saarland.de>, Aufruf am 15.10.2020.
- [164] Adafruit: "BME680", [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_BME680](https://github.com/adafruit/Adafruit_BME680), Aufruf am 14.04.2020.
- [165] Sensirion: „Datasheet SGP30“, <https://www.sensirion.com/de/umweltsensoren/gassensoren/multipixel-gassensoren/>, Aufruf am 14.04.2020.
- [166] Lolin: „ESP8266 NodeMCU v3“, <https://docs.zerynth.com/latest/official/board.zerynth.nodemcu3/docs/index.html>, Aufruf am 14.04.2020.
- [167] Adafruit: „Adafruit\_Sensor\_Master Library“, [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_Sensor](https://github.com/adafruit/Adafruit_Sensor), Aufruf am 18.08.2020.
- [168] Adafruit: „SGP30\_Master“, [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_SGP30](https://github.com/adafruit/Adafruit_SGP30). Aufruf am 18.10.2020.
- [169] Sensirion: „SCD30\_Master“, <https://github.com/Sensirion/embedded-scd/blob/master/scd30/scd30.h>, Aufruf am 18.10.2020.
- [170] Processing Foundation, <http://www.processing.org>, Aufruf am 18.10.2020.
- [171] World Resources Institute (WRI): „4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors“, Available: <https://www.wri.org/blog/2020/02/greenhouse-gas-emissions-by-country-sector>, Aufruf am 25. 06. 2020.
- [172] Deutscher Wetterdienst: „Feinstaubmessung in Kurorten - Warum es sich lohnt“, [https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/medizin/broschuere\\_feinstaub.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/medizin/broschuere_feinstaub.pdf?__blob=publicationFile&v=2), Aufruf am 24.06.2020.
- [173] VDI: "Olfactometry; determination of odour intensity", VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss , 1992.

- [174] Lehrstuhl für Messtechnik, Universität des Saarlandes: "SUSmobil", <http://www.susmobil.lmt-uni-saarland.de/downloads>, Aufruf am 15.10.2020.
- [175] Michael Hirth, Jochen Kuhn, Andreas Müller, Matthias Rohs, Pascal Klein: „iMobile Physics: Seamless Learning durch Experimente mit Smartphones & Tablets in Physik“, *Seamless Learning: Lernen überall und jederzeit*, pp. 17-37, 2016, doi: 10.3217/zfhe-11-04/02.
- [176] Tak-Wai Chan, Jeremy Roschelle, Sherry Hsi, Kinshuk, Mike Sharples, Tom Brown, Chales Patton, John Cherniavsky, Roy Pea, Cathlie Norris, Elliot Soloway, Nicolas Balacheff, Marlene Scardamalia, Pierre Dillenbourg, Chee-Kit Looi, Marcelo Milrad, Ulrich Hoppe: „One-to-one technology-enhanced learning: An opportunity for global research collaboration. *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*“, *Research and Practice in Technology-Enhanced Learning*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-29, 2006, doi: 10.1142/S1793206806000032.
- [177] G. Kaiser, D. Müller: „Einsatz von Kohlenmonoxid-Warngeräten im Rettungsdienst - Hinweise und Empfehlungen zur Handhabung und Festlegung von Warnschwellen“, *Notfall Rettungsmedizin*, Vol. 17, pp. 141-146, 2014, doi: 10.1007/s10049-013-1829-0.
- [178] G. Kaiser, A. Schaper: „Akute Kohlenmonoxid-Vergiftung - Ein alter Hut in neuen Schachteln“, *Notfall Rettungsmedizin*, Vol. 5, pp. 429-435, 2012.
- [179] Bundesinstitut für Risikobewertung: "Presseinformation des BfR 18/2009, 03/2010, 19/2011, 23/2017", 2009, 2010, 2011, 2017.
- [180] Wolfgang Weißbach: „Stahlerzeugung“, in *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*, Viewegs Fachbücher der Technik. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 1994, pp. 76 - 103, ISBN: 978-3-528-94019-5.
- [181] Atmel: "Datasheet ATtiny", [https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2586-AVR-8-bit-Microcontroller-ATtiny25-ATtiny45-ATtiny85\\_Datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2586-AVR-8-bit-Microcontroller-ATtiny25-ATtiny45-ATtiny85_Datasheet.pdf), Aufruf am 18.10.2020.
- [182] Sparkfun: "Datasheet ATmega38", <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/ATMega328.pdf>, Aufruf am 18.10.2020.

- [183] Peter Hirschberger: "Wälder in Flammen - Ursachen und Folgen der weltweiten Waldbrände", WWF Deutschland, Berlin, 2016.
- [184] California Department of Forestry and Fire Protection: „A summary of all 2018 incidents, including those managed by CAL FIRE and other partner agencies“, <https://www.fire.ca.gov/incidents/2018/>, Aufruf am 03.08.2020.
- [185] California Department of Forestry and Fire Protection: „A summary of all 2020 incidents, including those managed by CAL FIRE and other partner agencies“, <https://www.fire.ca.gov/incidents/2020/> Aufruf am 15.09.2020.
- [186] University of Sydney: "More than one billion animals killed in Australian bushfires", <https://www.sydney.edu.au/news-opinion/news/2020/01/08/australian-bushfires-more-than-one-billion-animals-impacted.html>, Aufruf am 18.10.2020.
- [187] Lisa Cox: „'Unprecedented' globally: more than 20% of Australia's forests burnt in bushfires“, Newspaper Article, 24.02.2020, *The Guardian*.
- [188] Neil Fann, Breanna Alman, Richard A. Broome, Geoffrey G. Morgan, Fay H. Johnston, George Pouliot, Ana G. Rappold: „The health impacts and economic value of wildlandfire episodes in the U.S.: 2008–2012“, *Science of the Total Environment*, Vol. 610 - 611, pp. 802-809, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.024.
- [189] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), IQ wireless GmbH: „Waldbrandwarnsystem "FireWatch"“, [https://www.dlr.de/tm/desktopdefault.aspx/tabid-2990/4570\\_read-18249/gallery-1/gallery\\_read-Image.43.10039/](https://www.dlr.de/tm/desktopdefault.aspx/tabid-2990/4570_read-18249/gallery-1/gallery_read-Image.43.10039/), Aufruf am 01.07.2020.
- [190] Semtec: "Datasheet ESP32 LoRa SX1276", <https://www.mouser.com/datasheet/2/761/sx1276-1278113.pdf>, Aufruf am 18.10.2020.
- [191] Deutscher Imkerbund e.V.: „Bienen als Bestäuber“, [https://deutscherimkerbund.de/163-Bienen\\_Bestaebung\\_Zahlen\\_die\\_zahlen](https://deutscherimkerbund.de/163-Bienen_Bestaebung_Zahlen_die_zahlen), Aufruf am 07.10.2020.
- [192] Sebastian Höfner, Andreas Schütze: "Umweltstudien mit Smartphone für Schüler\*innen am Beispiel der Untersuchung der Luft in Bienenstöcken", 14. Dresdner Sensorsymposium 2019, AMA, pp. 148-153, Dresden 2019, doi: 10.5162/14dss2019/P1.12

- [193] Thomas D. Seeley: "Honeybee Ecology. A Study of Adaptation in Social Life", Princeton University Press, 1985, ISBN: 978-0691611341.
- [194] P. T. Starks, Caroline. A. Blackie, Thomas D. Seeley: „Fever in honeybee colonies“, *The Science of Nature*, Vol. 87, No. 5, pp. 229-231, 2000, doi: 10.1007/s001140050709.
- [195] Roland Sachs, Juergen Tautz: „How Bees (*Apis Mellifera*) Reduce Humidity in the Beehive by Means of Active Ventilation“, 2017.
- [196] Keith M. Doull: „The Effects of Different Humidities on the Hatching of Eggs of Honeybees“, *Apidologie*, Vol. 7, No. 1, pp. 61-66, 1976.
- [197] Ilaria Negri, Christian Marvis, Gennaro Di Prisco, E. Caprio, M. Pellicchia: „Honey Bees (*Apis mellifera*, L.) as Active Samplers of Airborne Particulate Matter“, *PLoS One*, Vol. 10, No. 7: e0132491, 2015.
- [198] Thomas D. Seeley: „Measurement of nest cavity volume by the honey bee (*Apis mellifera* L.)“, *Behav. Ecol. Sociobiol.*, Vol. 2, pp. 201-227, 1977.
- [199] Edward E. Southwick, Robin F. A. Moritz: „Social Control of Air Ventilation in Colonies of Honey Bees, *Apis Mellifera*“, *J. Insect Physiol.*, Vol. 33, No. 9, pp. 623-626, 1987.
- [200] ams: "Datasheet CCS811", [https://cdn.sparkfun.com/assets/learn\\_tutorials/1/4/3/CCS811\\_Datasheet-DS000459.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/4/3/CCS811_Datasheet-DS000459.pdf), Aufruf am 18.10.2020.
- [201] Sebastian Höfner, Michael Hirth, Benjamin Brück, Jochen Kuhn, Andreas Schütze: "Citizen Science for Students: Fundamentals of gas sensing and realization of environmental studies", International Meeting on Chemical Sensors (IMCS 2020), Montreal, 2020.
- [202] Pei Yu, Rongbin Xu, Michael J. Abramson, Shanhan Li, Yuming Guo: „Bushfires in Australia: a serious health emergency under climate change“, Australian Bureau of Meteorology, 2020, doi: 10.1016/S2542-5196(19)30267-0.
- [203] GisChem: „Datenblatt Ethanol (CAS-Nr.: 64-17-5) Branche: Metall“, [https://www.gischem.de/download/01\\_0-000064-17-5-000000\\_7\\_1\\_2536.PDF](https://www.gischem.de/download/01_0-000064-17-5-000000_7_1_2536.PDF), Aufruf am am 24.06.2020.

- 
- [204] Willehad Boemke: „Pulsoxymetrie“, Anästhesievorbereitung und perioperatives Monitoring, Edited by E. Kochs and K. Zacharowski, Thieme-Verlag, München, Frankfurt 2014, pp. 113 - 119, ISBN: 978-3-13-174031-1



# I Anhang

## I.1 Herleitung der Anzahl der gebundenen Ladungen des vereinfachten Sensormodells

Die folgende Herleitung bezieht sich auf den Übergang von Gleichung (5.8) auf Gleichung (5.9) aus Kapitel 5. Zur Lösung dieser Gleichung muss die analytische Fortsetzung der Lambert'schen W-Funktion verwendet werden [159]. Diese ist die Umkehrfunktion von  $f(u) = u \cdot \exp(u)$ , sodass gilt:

$$W(f(u)) = u = W(u \cdot \exp(u))$$

Um diese Funktion anwenden zu können muss die Ausgangsgleichung zunächst durch Äquivalenzumformungen auf eine geeignete Form gebracht werden:

$$Q_{geb} = Q \cdot \exp\left(-\frac{E_A^0 + \alpha \cdot Q_{geb}}{k_B T}\right)$$

$$Q_{geb} = Q \cdot \exp\left(-\frac{E_A^0 + \alpha \cdot Q_{geb}}{k_B T}\right) \quad \left| \cdot \exp\left(\frac{E_A^0 + \alpha \cdot Q_{geb}}{k_B T}\right)\right.$$

$$\Leftrightarrow Q_{geb} \cdot \exp\left(\frac{E_A^0 + \alpha \cdot Q_{geb}}{k_B T}\right) = Q$$

Sei nun  $u = \frac{\alpha \cdot Q_{geb}}{k_B T}$  und damit  $Q_{geb} = \frac{u \cdot k_B T}{\alpha}$

$$\Leftrightarrow \frac{u \cdot k_B T}{\alpha} \cdot \exp\left(\frac{E_A^0 + \alpha \cdot \frac{u \cdot k_B T}{\alpha}}{k_B T}\right) = Q$$

$$\Leftrightarrow \frac{u \cdot k_B T}{\alpha} \cdot \exp\left(\frac{E_A^0 + u \cdot k_B T}{k_B T}\right) = Q$$

$$\Leftrightarrow u \cdot k_B T \cdot \exp\left(\frac{E_A^0 + u \cdot k_B T}{k_B T}\right) = Q \cdot \alpha$$

$$\Leftrightarrow u \cdot \exp\left(\frac{u \cdot k_B T}{k_B T}\right) = \frac{Q \cdot \alpha}{\exp\left(\frac{E_A^0}{k_B T}\right) \cdot k_B T}$$

$$\Leftrightarrow u \cdot \exp(u) = \frac{Q \cdot \alpha \cdot \exp\left(-\frac{E_A^0}{k_B T}\right)}{k_B T}$$

$$\Leftrightarrow W(u \cdot \exp(u)) = W\left(\frac{Q \cdot \alpha \cdot \exp\left(-\frac{E_A^0}{k_B T}\right)}{k_B T}\right)$$

$$\left. \begin{array}{l} \cdot \alpha \\ \frac{1}{\exp\left(\frac{E_A^0}{k_B T}\right) \cdot k_B T} \end{array} \right|$$

Lambert'sche W-Funktion

$$u = W \left( \frac{Q \cdot \alpha \cdot \exp\left(-\frac{E_A^0}{k_B T}\right)}{k_B T} \right)$$

Rücksubstitution:  $u = \frac{\alpha \cdot Q_{geb}}{k_B T}$

$$\frac{\alpha \cdot Q_{geb}}{k_B T} = W \left( \frac{Q \cdot \alpha \cdot \exp\left(-\frac{E_A^0}{k_B T}\right)}{k_B T} \right) \quad \left| \cdot \frac{k_B T}{\alpha} \right.$$

$$\Leftrightarrow Q_{geb} = \frac{k_B T}{\alpha} W \left( \frac{Q \cdot \alpha \cdot \exp\left(-\frac{E_A^0}{k_B T}\right)}{k_B T} \right)$$

## I.2 Herleitung der Konzentrationen aus Lernmodul 2

Für die Berechnung der Ethanol-Konzentration in der Gasvorratskammer (GVK) und der Messkammer (MK) müssen die molare Masse und die Dichte, sowie die Volumina der Kammern bekannt sein. Diese sind bei Normalbedingungen ( $T = 20^\circ\text{C}$  und  $p = 1013 \text{ hPa}$ ):

$$\rho_{Luft} = 0,0012 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \rho_{Ethanol} = 0,789 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$
$$M_{Luft} = 28,949 \frac{\text{g}}{\text{mol}}; M_{Ethanol} = 46,07 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Weiterhin wird die Avogadro Konstante  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$  benötigt. Die Teilchendichte ist über den Zusammenhang

$$n = \frac{\rho}{M}$$

mit der Dichte und der molaren Masse verknüpft. Daraus ergeben sich die Teilchendichten für Luft und Ethanol in der Form:

$$n_{Luft} = \frac{\rho_{Luft}}{M_{Luft}} = 4,16 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3} = 2,50 \cdot 10^{19} \frac{\text{Teilchen}}{\text{cm}^3}$$
$$n_{Ethanol} = \frac{\rho_{Ethanol}}{M_{Ethanol}} = 1,72 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3} = 1,03 \cdot 10^{22} \frac{\text{Teilchen}}{\text{cm}^3}$$

Die Gasvorratskammer GVK hat die Maße  $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$  und damit ein Volumen von  $V_{GVK} = 62.500 \text{ cm}^3$ . Zu Beginn des Experiments ist die GVK mit  $62.498 \text{ cm}^3$  Luft und  $2 \text{ cm}^3$  Ethanol gefüllt. Das bedeutet es befinden sich

$$N_{Luft,GVK} = 2,50 \cdot 10^{19} \frac{\text{Teilchen}}{\text{cm}^3} \cdot 62.498 \text{ cm}^3 = 1,56 \cdot 10^{24} \text{ Teilchen}$$

und

$$N_{Ethanol,GVK} = 1,03 \cdot 10^{22} \frac{\text{Teilchen}}{\text{cm}^3} \cdot 2 \text{ cm}^3 = 2,06 \cdot 10^{22} \text{ Teilchen}$$

in der GVK. Die Ethanol-Konzentration  $c$  ist dann:

$$c_{Ethanol,GVK} = \frac{N_{Ethanol}}{N_{Luft} + N_{Ethanol}} = 0,013$$

Die Messkammer MK hat die Maße  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 12,5 \text{ cm}$  und damit ein Volumen von  $V_{MK} = 1.250 \text{ cm}^3$ . Wird nun mit einer Spritze das Volumen  $V_{Spritze} = 1 \text{ cm}^3$  aus der GVK entnommen und in die MK überführt kann näherungsweise davon ausgegangen werden, dass keine Luftteilchen die MK verlassen. Somit ergibt sich für die Ethanol-Konzentration:

$$c_{Ethanol,MK} = c_{Ethanol,GVK} \cdot \frac{V_{Spritze}}{V_{MK} + V_{Spritze}}$$

$$= 0,013 \frac{1 \text{ cm}^3}{1.250 \text{ cm}^3 + 1 \text{ cm}^3} \approx 10^{-5} = 10 \text{ ppm}$$

Das bedeutet, dass sich die Ethanol-Konzentration in erster Näherung um 10 ppm erhöht, wenn 1 cm<sup>3</sup> aus der GVK in die MK übertragen wird. Dabei ist zu beachten, dass diese Näherung nur für den relevanten Konzentrationsbereich von 0 – 40 ppm gerechtfertigt ist.

## I.3 Begleitende Broschüre für Lernmodul 3



## Modul 3 – Umweltmesstechnik



UNIVERSITÄT  
DES  
SAARLANDES



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
KAISERSLAUTERN



SCHÜLER  
FORSCHUNGSZENTRUM  
SAARLOUIS

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

# Station 1 Die Messsoftware



## Auftrag 1 – Tutorial

Das Modul ermöglicht die Messung verschiedener umweltrelevanter Größen durch drei auf einer Platine verbaute Sensormodule (Abb. 1 links). Doch erst dank einer Software, in denen die Daten grafisch aufbereitet angezeigt werden, könnt Ihr die Messungen auch begutachten und interpretieren (Abb. 1 rechts).



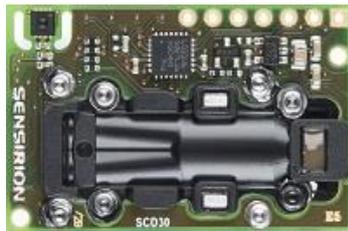
**Abb. 1** Links: Messplatine mit drei Sensormodulen. Rechts: Hauptmenü der Messsoftware.



Öffnet im Hauptmenü der Software das Tutorial und macht euch über die Bedienelemente vertraut. Informiert euch darin auch, welche Messgrößen von den drei Sensormodulen erfasst werden und tragt diese unten ein.



SGP30



SCD30



SPS30




# Station 1

## Die Messsoftware



### Auftrag 2 – Die Sensoren testen

Sind die Sensoren korrekt angeschlossen und funktionieren sie auch?



Schließt die Messplatine mit dem USB-Kabel an. Navigiert im Hauptmenü auf „Sensoren“ und prüft, ob die drei Sensormodule SGP30, SCD30 und SPS30 verbunden sind. Wenn nötig: Wechselt den COM-Port, bis es klappt.

Die Abb. 2 zeigt eine Messung, bei der über der Platine zunächst ein Taschentuch aus Zellstoff („Tempo“) gerieben und anschließend gepustet bzw. gehaucht wurde.

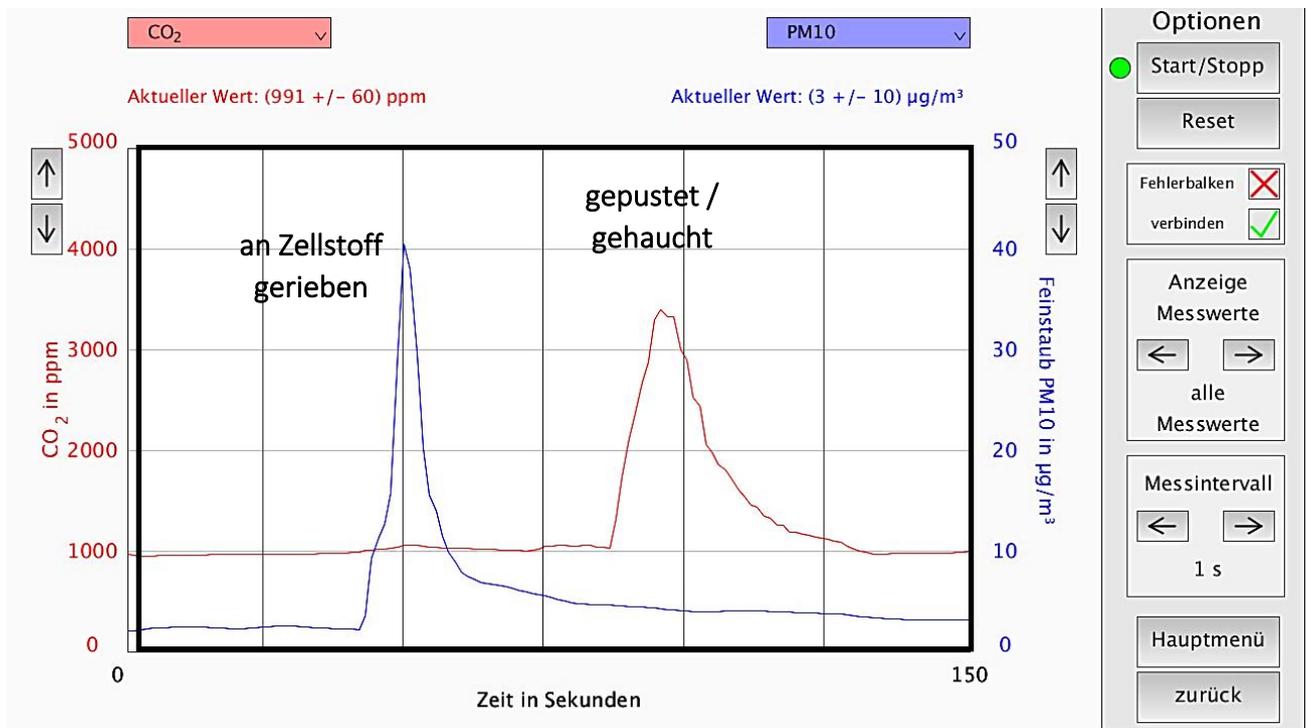


Abb. 2 Test der Sensoren auf ihre Funktionalität.



Reproduziert die in Abb. 2 gezeigte Messung. Prüft so die Funktionstüchtigkeit des Feinstaub- und des CO<sub>2</sub>-Sensors.



Prüft abschließend die Funktionstüchtigkeit der anderen Sensoren. Gebt kurz an, wie Ihr vorgegangen seid.

# Station 1

## Die Messsoftware

	Funktion	Methode der Prüfung
TVOC		
Temperatur		
Luftfeuchte		
CO <sub>2</sub>	✓	An Sensor gepustet. Anstieg CO <sub>2</sub> registriert. Danach Abfall.
Feinstaub	✓	Mit Zellstoff gerieben. Anstieg aller PM-Komponenten registriert.

## Station 2

### Nase vs. Sensor



#### Auftrag 1 – Nase vs. Sensor

Kennt ihr das? Ihr betretet einen Raum, in dem vorher eine Klasse Unterricht hatte. Boah, wie das mieft ... Fenster auf!!! Die Schüler im Raum hingegen haben den Mief als gar nicht so schlimm wahrgenommen. Wieso ist das so? Nun, die Nase beurteilt Gerüche relativ: Plötzliche *Unterschiede* kann sie gut riechen. Bei längerem Aufenthalt in schlechter Luft, oder in Luft, die langsam schlechter wird, gewöhnt sich die Nase an den Geruch und nimmt ihn nur schwach wahr. Und weiter: Sind Gerüche nur wenig verschieden, fällt es schwer, diese allein durch Riechen im Sinne „von Probe A riecht stärker als Probe B“ zu ordnen. Schneiden technische Sensoren hier besser ab?

In diesem Versuch gilt es, sechs Gläser mit unterschiedlichen Konzentrationen an Ethanol zu ordnen (Abb. 3). Könnt ihr das Duell Nase vs. Sensor für euch entscheiden?



**Abb. 3** Versuchsaufbau zur Messung der Ethanol-Konzentration von 5 Lösungen.



Riecht an den Proben und ordnet die Gläser nach absteigender Reihenfolge der Ethanol-Konzentration.



Tragt die Buchstaben rechts in die Zeile „Riechen Versuch 1“ ein.



Bringt die Gläser wieder in Unordnung und wiederholt den Versuch. Tragt die Buchstaben links in die Zeile „Riechen Versuch 2“ ein.



# 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 VOC's 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.

	<b>herkömmliche Produkte</b>	<b>vs.</b>	<b>emissionsarme Vergleichsprodukte</b>
Farben		vs.	
Filzstifte		vs.	
Kleber		vs.	
Böden		vs.	
	<b>Nase</b> <b>Sensor</b>		<b>Nase</b> <b>Sensor</b>

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 ist.



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









## Station 3 Dicke Luft



### Auftrag 2 – Dicke Luft

Übersteigt der Gehalt an CO<sub>2</sub> in der Raumluft 1.000 ppm (= 1 ‰), ist es ein Anzeichen für „dicke Luft“ und es sollte gelüftet werden. Die noch heute akzeptierte Empfehlung formulierte der Chemiker Max von Pettenkofer bereits 1858:

*„Ich bin auf das lebendigste überzeugt, dass wir die Gesundheit unserer Jugend wesentlich stärken würden, wenn wir in den Schulhäusern [...] die Luft stets so gut und rein erhalten würden, dass ihr **Kohlensäuregehalt nie über 1 pro mille** anwachsen könnte.“*

CO<sub>2</sub> ist aber nur ein „Indikator“ für schlechte Luft: Schon Pettenkofer war klar, dass es neben dem CO<sub>2</sub> der Ausatemluft noch andere Ausgasungen des menschlichen Körpers gibt (viele VOC's), die Müdigkeit und Konzentrationschwierigkeiten begünstigen. Aber auch Temperatur und Luftfeuchte haben einen Einfluss auf das Raumklima. Untersucht den Einfluss des Menschen auf die Innenraumluftqualität (Abb. 5).



Navigiert in der Software in das Menü *Stationen* → *Station 3 – Dicke Luft* und überprüft Eure CO<sub>2</sub>- und TVOC-Ausgasungen sowie die Änderungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte in der begehbaren Messkammer. Der genaue Messablauf wird in der Software erläutert.



**Abb. 5** Begehbare Messkammer zur Untersuchung von CO<sub>2</sub>- und TVOC-Ausgasungen des Menschen.



## Station 4 Feinstaub



### Auftrag 1 – Funktionsprinzip des Feinstaubsensors

Für den Vorversuch benötigen wir 3 Küvetten (Abb. 6 links). Diese enthalten neben Wasser unterschiedliche Konzentrationen an winzigen Kügelchen aus Siliciumdioxid (kurz Silica, Abb. 6 rechts). In Wasser bilden die Kügelchen eine *Suspension*, das heißt die Partikel sind nicht gelöst, sondern die Feststoffe „schweben“ in der Flüssigkeit – ähnlich wie bei Feinstaub in Luft. Die Silica-Partikel modellieren also Feinstaub.



**Abb. 6** Links: 3 Küvetten mit Wasser und unterschiedlichen Konzentrationen an Silikat-Kügelchen. Rechts: Elektronenmikroskop-Aufnahme von Silikat-Kügelchen.

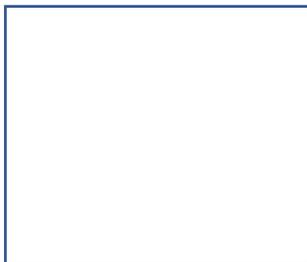


Ordnet die Flüssigkeiten der Reagenzgläser nach absteigender Konzentration an Silikat-Kügelchen. Als Hilfsmittel steht euch ein **Laserpointer** zur Verfügung.



Tragt die Buchstaben in die unteren Kästchen ein.

hohe Konzentration



niedrige Konzentration





## Station 4 Feinstaub



### Auftrag 2 – Kreidestaub

Obwohl einige Schulen nur noch interaktive Whiteboards bzw. Smartboards nutzen, gehört das Schreiben mit Kreide auf Tafeln vielerorts bis heute zum Alltag im Unterricht. Beim Schreiben, vor Allem aber beim *trockenen* Abwischen wird feiner Staub verwirbelt, der als eine Art „Wolke“ bereits mit bloßen Augen zu sehen ist. Die Wolke enthält Partikel sehr verschiedener Größe. Enthält sie auch Feinstaub? Untersucht die Emission von Feinstaub verschiedener Kreidearten während des Beschriftens und des trockenen und nassen Abwischens mit einem Schwamm (Abb. 7).



**Abb. 7** Versuchsaufbau zur Untersuchung von Feinstaub in Kreide. Die Messplatine ist am unteren Rand der Tafel eingerastet.



Öffnet in der Software das Menü *Stationen* → *Station 4 – Kreidestaub* und überprüft die Feinstaubbelastung beim Schreiben mit Kreide und anschließendem Wischen. Der genaue Messablauf wird in der Software erläutert.



Notiert anhand eurer Messungen die Maximalwerte der Feinstaubemission bei allen Versuchsbedingungen in die untere Tabelle.





## I.4 MINT-Praktikum – Großer alternativer Leistungsnachweis

GLN Gassensorik – Theorieteil

MINT-Praktikum 9

14.05.2019



Name:

Erlaubte Hilfsmittel: Taschenrechner

**Achte auf deine Schrift und äußere Form. Runde stets auf drei Dezimalstellen!**

**Viel Erfolg!**

### Aufgabe 1 – Theoretische Grundlagen des Gassensors (Lernmodul 1)

- a) Fülle eines der Wörter „mehr“ oder „weniger“ in die Lücke, damit die Aussage korrekt ist. Mache einen Strich, wenn der Zusammenhang nicht so einfach ist. Ist der Gassensor bei konstanter Sensortemperatur von einem reduzierenden Gas umgeben, so gilt:
- Je weniger reduzierendes Gas vorhanden ist, desto ..... Reaktionen finden mit dem gebundenen Sauerstoff auf der Oberfläche statt.
  - Je stärker die Oberfläche mit Sauerstoff bedeckt ist, desto ..... Reaktionen mit dem reduzierenden Gas können stattfinden.
  - Je reaktionsfreudiger das reduzierende Gas ist, desto ..... Reaktionen finden mit dem gebundenen Sauerstoff auf der Oberfläche statt.
  - Je höher die Temperatur des Sensors ist, desto ..... Strom fließt.
- b) Fülle eines der Wörter „kleiner“ oder „größer“ in die Lücke, damit die Aussage korrekt ist. Mache einen Strich, wenn der Zusammenhang nicht so einfach ist. Ist der Gassensor bei veränderlichen Sensortemperaturen **nicht** von einem reduzierenden Gas umgeben, so gilt:
- Je höher die Sensortemperatur ist, desto ..... ist die Stromstärke  $I$ .
  - Je höher die Sensortemperatur ist, desto ..... ist der Widerstand  $R$ .

## Aufgabe 2 – Theoretische Grundlagen des Gassensors (Lernmodul 2)

Ordne den Bauteilen von Lernmodul 2 (Gasvorratskammer, Messkammer, Mikrocontroller, und Kalibriersoftware) ihre Aufgaben zu. Notiere jeweils das richtige Bauteil hinter der Aussage:

- a) In dieses Bauteil wird mehrfach ein Luft-Gas-Gemisch eingespritzt:  
.....
- b) Dieses Bauteil berechnet die Merkmale der Kurven:  
.....
- c) Dieses Bauteil versorgt den Sensor mit einer Heizspannung:  
.....
- d) Dieses Bauteil stellt die Widerstands-Zeit-Kurven graphisch dar:  
.....
- e) In diesem Bauteil wird eine Flüssigkeit verdampft und möglichst gleichmäßig verteilt: .....
- f) In diesem Bauteil befindet sich der Gassensor: .....

## Aufgabe 3 – Stoffmengenberechnung

In der Gasvorratskammer mit dem Volumen  $V_{GVK} = 64.000 \text{ ml}$  wird ein Tropfen Ethanol  $V_{Ethanol} = 1 \text{ ml}$  verdampft. Anschließend wird mit einer Spritze ein Volumen von  $V_{Spritze} = 1 \text{ ml}$  aus der Gasvorratskammer entnommen und in die Messkammer mit dem Volumen  $V_{MK} = 3.200 \text{ ml}$  überführt.

Hinweise: Die Teilchendichten betragen:  $n_{Luft} = 2,55 \cdot 10^{19} \frac{\text{Teilchen}}{\text{ml}}$ ;  $n_{Ethanol} = 1,3 \cdot 10^{22} \frac{\text{Teilchen}}{\text{ml}}$ .

- a) Berechne die Teilchenzahl  $N_{Luft,GVK}$  der Luftteilchen in der Gasvorratskammer.
- b) Berechne die Teilchenzahl  $N_{Ethanol,Tropfen}$  der Ethanol-Teilchen in einem Tropfen Ethanol.
- c) In der Gasvorratskammer ist nun Luft und Ethanol. Berechne die Konzentration  $c$  des verdampften Ethanols in der Gasvorratskammer und gib die sie in den Einheiten % und ppm an.
- d) Ein Milliliter aus der Gasvorratskammer wird nun in die Messkammer überführt. Berechne die Konzentration  $c$  des verdampften Ethanols in der Messkammer und gib die Konzentration in den Einheiten % und ppm an.

**GLN Gassensorik – Praxis 1**  
**MINT-Praktikum 9**  
14.05.2019



**Name:** \_\_\_\_\_

**Teampartner:** \_\_\_\_\_

**Achte auf deine Schrift und äußere Form.**

**Viel Erfolg!**

**Praxisteil 1 – Der Sensorwiderstand in Abhängigkeit von der Temperatur**

a) Nimm zu einer bereitgestellten, unbekannt Probe einen Kurvenverlauf des Sensorwiderstandes in Abhängigkeit zur Heizspannung auf. Dazu:

- Notiere den Buchstaben deiner Probe: \_\_\_\_\_
- Fertige eine vollständige Messtabelle an (mit deinem Partner zusammen). Verwende bei der Heizspannung Schritte von 0,2 V.

- Miss am Gassensor die benötigten Werte (mit deinem Partner zusammen).
- Fertige ein zugehöriges und vollständig beschriftetes Diagramm auf geeignetem Papier an (alleine).

b) Vergleiche euer Diagramm mit den drei zur Verfügung gestellten Diagramme. Um welchen Stoff handelt es sich bei eurem Stoff?

**GLN Gassensorik – Praxis 2**  
**MINT-Praktikum 9**  
14.05.2019



Name: \_\_\_\_\_

Teampartner: \_\_\_\_\_

**Achte auf deine Schrift und äußere Form.**

**Viel Erfolg!**

**Praxisteil 2 – Kalibrierung des Gassensors auf Aceton**

c) Nimm Trainingsdaten für fünf unterschiedliche Konzentrationen Aceton (0 bis 20 ppm) auf. Dazu:

- Notiere deine 5 gewünschten Konzentrationen: \_\_\_\_\_

- Führe den Versuch (mit deinem Partner zusammen) sinnvoll durch.

d) Erstelle mithilfe des Computers ein passendes Modell.

e) Bestimme nun die Konzentrationen der unbekannt Proben, dazu:

- Lasse dir drei verschiedene Kunststoffspritzen aushändigen.
- Notiere die Farbcodes deiner Proben:

Probe 1: \_\_\_\_\_

Probe 2: \_\_\_\_\_

Probe 3: \_\_\_\_\_

- Miss nun Spritze für Spritze die Konzentration dieser Probe mithilfe des Gassensors und dem Computermodell.

- Gib die bestimmten Konzentrationen deiner Proben an:

Probe 1: \_\_\_\_\_

Probe 2: \_\_\_\_\_

Probe 3: \_\_\_\_\_

- Ordne nun deine Proben gemäß der drei Konzentrationen von groß nach klein an: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **I.5 Erfahrungsberichte von Lehrern**

Herr Benjamin Brück (Leiter Schülerforschungszentrum Saarlouis)

**Haben Sie selbst die Module von SUSmobil durchgeführt? Wenn ja, in welchem Rahmen?**

*Bei der Entwicklung der Module, aber auch bei der Vorbereitung von Schülerpraktika und Lehrerfortbildungen habe ich die einzelnen Module mehrfach durchgeführt. Dabei konnte ich vor allem die enorme Steigerung der Qualität der Module nach verschiedenen Anpassungen und Veränderungen erfahren.*

**Welche Aspekte der Module haben Ihnen besonders gut gefallen? Gab es Teile, die Sie kritisieren?**

*Besonders gut gefiel mir, dass die Kurse eine Vielzahl von Experimenten enthielten, die alle durch einen HTML-Kurs am PC unterstützt wurden. Das erlaubte es, sich auf die Kernprobleme zu konzentrieren und nahm einem die Auseinandersetzung mit nicht im Zentrum des Kurses stehenden Randbaustellen wie dem Zeichnen von Graphen oder der Mitschrift von Ergebnissen ab, da der HTML-Kurs dies für einen übernahm.*

**Würden Sie anderen Kolleginnen und Kollegen empfehlen, diese Module selbst durchzuführen?**

*Das Thema Gassensorik gehört bei keinem Lehramtsstudium zu einem der Kerngebiete. Daher liefern die Module von SUSmobil einen spannenden Einblick in die Gassensorik für jede Kollegin/jeden Kollegen, weswegen ich diese Kurse unbedingt weiterempfehlen würde und auch schon Lehrerfortbildungen dazu angeboten habe.*

**Haben Ihre Schüler diese Module durchgeführt? Wenn ja, in welchem Rahmen?**

*Im Rahmen des MINT-Praktikums am Max-Planck-Gymnasium haben zwei Schülergruppen die Module von SUSmobil durchgeführt, eine davon wegen der Pandemie leider nur bis zu Modul 1.*

**Welche Aspekte sind Ihrer Meinung nach förderlich für die Schülerinnen und Schüler gewesen?**

*Die Module liefern einen sonst nicht möglichen Einblick in das Thema Luftqualitätsbewertung auf einem sehr schülernahen Niveau. Das Zusammenspiel aus neuem Lernstoff, der aber durch die technischen Möglichkeiten der HTML-Kurse sehr*

*eingehend dargestellt wird, und den spannenden Experimenten lieferte eine große Abwechslung zum Regelunterricht.*

**Würden Sie die Module in den kommenden Jahren wieder mit Ihren Schülern besuchen?**

*Am Schülerforschungszentrum Saarlouis haben wir Klassensätze der für die Module notwendigen Versuchsaufbauten angeschafft, so dass wir in den folgenden Jahren weiterhin das Thema Luftqualitätsbewertung in MINT-Praktika anbieten wollen.*

Herr Björn Leinenbach (Lehrer für Mathematik und Physik am Max-Planck-Gymnasium Saarlouis)

**Haben Sie selbst die Module von SUSmobil durchgeführt? Wenn ja, in welchem Rahmen?**

*Ja, im Rahmen der Vorbereitung des MINT-Praktikums.*

**Welche Aspekte der Module haben Ihnen besonders gut gefallen? Gab es Teile, die Sie kritisieren?**

*Am besten gefiel mir der Aspekt der Messung durch Trainieren der Sensoren und die Modellbildung.*

**Würden Sie anderen Kolleginnen und Kollegen empfehlen, diese Module selbst durchzuführen?**

*Auf jeden Fall.*

**Haben Ihre Schüler diese Module durchgeführt? Wenn ja, in welchem Rahmen?**

*im Rahmen des MINT-Praktikums (9. Klasse) haben die Schüler diese Module verpflichtend durchgeführt.*

**Welche Aspekte sind Ihrer Meinung nach förderlich für die Schülerinnen und Schüler gewesen?**

*Am meisten bringen den Schülern diese Module, um Sensoren besser verstehen zu können, denn Sensoren (egal welcher Art) kommen in sämtlichen Alltagsgeräten vor. Weiterhin konnten so gezielt selbstständig Messungen durchgeführt werden.*

**Würden Sie die Module in den kommenden Jahren wieder mit Ihren Schülern besuchen?**

*Wenn ich mal wieder ein Praktikum dazu anbiete, könnte ich es mir schon vorstellen. Im Regelunterricht leider nicht, da das Thema nicht lehrplanrelevant ist und wenig Zeit für zusätzliche Aspekte bleibt.*

## I.6 Materialliste der Selbstlernkurse

### Platine Modul 1

Materialbezeichnung	Anzahl	Ungefährer Preis pro Stück in €
Unbestückte Platine	1	1,00
Micro USB Typ B Buchse 4 Vertikale Beine	1	0,10
PB 4 RT Leiterplattenbuchse 4 mm, rot	2	1,45
PB 4 RT Leiterplattenbuchse 4 mm, schwarz	2	1,45
Potentiometer CA6V 250 Ohm	1	0,14
Potentiometer CA6V 100 Ohm	1	0,14
Drehknöpfe ACP CA6 6022B	2	0,09
Spannungsregler LP2950 3V TO92	1	1,33
EIKo Kondensator 10 $\mu$ F	1	0,03
KerKo Kondensator 100 nF	1	0,14
Rote LED 5 mm	1	0,11
Widerstand THT 1k	1	0,02
Gassensor AS MLV-P2	1	12,00
Distanzmuffe 40 mm M3	4	0,19
Deckel für Sturzglas 30 ml mit 25 mm-Bohrung, mittig +2 x Bohrung für M2 Schraube	1	0,05
Sturzgläser 30 ml	3	0,35
Maschinenschraube M2 x 6	2	0,03
Micro-USB an USB-A male	1	1,99
Gesamtpreis pro Platine in €		<b>24,90</b>

### Zusätzliche Materialien

- 2 x Multimeter inclusive Bananenstecker
- Messproben, beispielsweise: Wasser, Apfelsaft und alkoholfreies Bier, jeweils 5ml

## Platine Modul 2

Materialbezeichnung	Anzahl	Ungefährer Preis pro Stück in €
Unbestückte Platine	1	0,50
Heltec ESP32 (ohne LoRa)	1	17,99
BME 680 Breakout CJMCU	1	10,00
Buchsenleiste 18 x 1	2	2,00
Buchsenleiste 6 x 1	1	0,50
Distanzmuffe 20mm M3	4	0,19
Micro-USB an USB-A male	1	1,99
Einweg-Spritze 1 ml	1	0,05
Ethanol (2 ml)	1	0,01
<b>Gesamtpreis pro Platine in €</b>		
		<b>35,80</b>

## Kleine Messkammer Modul 2

Materialbezeichnung	Anzahl	Ungefährer Preis pro Stück in €
Aluprofil 20 x 40 45° Gehrung, Länge: 11,8 cm	4	5,00
Dichtprofil Nut 6, Länge: 10 cm	4	0,50
Innenwinkel Nut 6 B-Typ	4	1,50
Plexiglasplatte 6 mm: 89 mm x 89 mm	1	5,00
Acryl Display Box 10 cm x 10 cm x 10 cm, einseitig offen	1	8,50
medizinisches Septum 30 mm	1	0,05
<b>Gesamtpreis pro Messkammer in €</b>		
		<b>41,55</b>

## Große Messkammer (Gasvorratskammer) Modul 2

Materialbezeichnung	Anzahl	Ungefährer Preis pro Stück in €
Plexiglasplatten 2 mm: 50 cm x 50 cm	2	11,50
Plexiglasplatten 2 mm: 25 cm x 50 cm	4	8,50
Aluprofil 20 x 20: 490 mm	8	1,90
Aluprofil 20 x 20: 240 mm	4	0,95
Eckverbinderwürfel 3D 20x20	8	4,00
medizinisches Septum 30 mm	4	0,05
Keramik-Heizelement	1	12,00
DC-Buchse 5,5 x 2,1 mit Anschlussleitung an Heizelement	1	1,50
Aluprofil 20 x 20: 100 mm	2	0,40
Netzteil 9 V 5,5 x 2,1	1	6,50
Miniaturventilatoren	2	1,00
Gesamtpreis pro Gasvorratskammer in €		<b>131,00</b>

### Platine Modul 3

<b>Materialbezeichnung</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Ungefährer Preis pro Stück in €</b>
Unbestückte Platine	1	1,00
Feinstaubsensor SPS30 inkl. Kabel	1	26,00
CO <sub>2</sub> -Sensor SCD30	1	50,00
TVOC-Sensor SGP30 Breakout Board	1	21,00
Mikrocontroller ESP8266 NodeMCU Lolin	1	4,00
Buchsenleiste 1 x 7	1	1,00
Buchsenleiste 1 x 5	2	0,50
Distanzmuffe 100 mm M3	4	0,50
Micro-USB an USB-A male	1	1,99
<b>Gesamtpreis pro Platine in €</b>		
		<b>107,99</b>

### Station 1 – “Feinstaubmessung”

<b>Materialbezeichnung</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Ungefährer Preis pro Stück in €</b>
Schiefertafel 19 x 14,5cm	1	5,50
Tafelschwamm	2	3,00
Kreide	1	0,10
Laserpointer Rot	1	5,00
Küvetten	3	0,33
Ludox AS 40 Collodial Silica 1 ml	1	0,03
<b>Gesamtpreis pro Versuchsaufbau</b>		
		<b>18,61</b>

**Station 2 – “Mensch vs. Sensor”**

<b>Materialbezeichnung</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Ungefährer Preis pro Stück in €</b>
Sturzgläser 30 ml	5	0,35
Ethanol (2 ml)	1	0,01
Lebensmittelfarbe, 5 Sorten	1	5,00
Acrylbox 10 cm x 10 cm x 10 cm	1	8,51
<b>Gesamtpreis pro Versuchsaufbau</b>		
		<b>15,27</b>

**Station 3 – “TVOC-Duelle”**

<b>Materialbezeichnung</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Ungefährer Preis pro Stück in €</b>
Acrylbox 10 cm x 10 cm x 10 cm	1	8,51
Auf Lösungsmittel basierter Lack	5 ml	0,05
Wasserbasierter Lack	5 ml	0,05
Edding	1	1
Edding “Ecoline”	1	1
Herkömmlicher Klebstoff	5 ml	0,05
Wasserbasierter Klebstoff	5 ml	0,05
Parkettprobe (10 cm x 10 cm)	1	1
PVC-Probe (10 cm x 10 cm)	1	0,50
<b>Gesamtpreis pro Versuchsaufbau</b>		
		<b>12,21</b>

**Station 4 – “Dicke Luft”**

<b>Materialbezeichnung</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Ungefährer Preis pro Stück in €</b>
Aluprofil 40 x 40: 1900 mm	4	19,99
Aluprofil 40 x 40: 720 mm	8	7,56
Aluprofil 40 x 40: 1815 mm	2	19,04
Aluprofil 40 x 40: 635 mm	2	6,64
Profilbearbeitung	20	1,98
Schnellspanverbinder Nut 10; 0 Grad	20	1,49
Einfassprofil Nut 10 SWStab (1 m)	12	2,62
Bügelgriff 160 Kunststoff m. BS	1	2,99
Aluminium-Scharnier 40 x 40 Alu m. Bef	3	4,49
Fallenschloss gleiche Schließung	1	31,99
<b>Gesamtpreis pro Versuchsaufbau</b>		<b>341,29</b>

## **I.7 Facharbeit: Entwicklung eines mobilen Kohlenmonoxid-Melders**

# **Entwicklung eines mobilen Kohlenmonoxid-Melders**

Erarbeitungsort: Schülerforschungszentrum Saarlouis

Projektbetreuer: Benjamin Brück

Thema des Projekts: Entwicklung eines Miniatur-Kohlenmonoxid-Warners

Fachgebiet: Technik

Wettbewerbssparte: Jugend forscht

Bundesland: Saarland

Wettbewerbsjahr: 2020

## **Kurzfassung**

Um die Gefahr von Kohlenstoffmonoxid in der Atemluft frühzeitig zu erkennen und somit Klinikbehandlungen oder sogar Todesfälle vorzubeugen, habe ich einen Miniatur-Kohlenmonoxid-Warner entwickelt. Zunächst habe ich eine Platine erstellt und alle Einzelteile, unter anderem den Gassensor BME680 auf die Platine gelötet/“gebacken“. Anschließend war ich an der Universität des Saarlandes in der Gasmischanlage, wo der Sensor auf Kohlenstoffmonoxid kalibriert wurde. Zuletzt habe ich zum Vorführen einen weiteren Sensor auf Ethanol kalibriert, da ich allein nicht mit Kohlenstoffmonoxid arbeiten darf.

## **Inhaltsverzeichnis:**

### 1) Einleitung

- Die Idee
- Kohlenstoffmonoxid in der Stahlproduktion

### 2) Vorgehensweise, Materialien und Methoden

- Die Platine
- Der Gassensor
- Die Kalibrierung
- Das Programm

### 3) Ergebnis/Ausblick

### 4) Quellen- und Literaturverzeichnis

### 5) Unterstützungsleistungen

# 1) Einleitung

## Die Idee

Man hört doch immer wieder, dass es zu schlimmen Todesfällen durch das Gas Kohlenstoffmonoxid (CO) gibt (siehe Abbildung 1). Das auch „der schleichende Killer“ genannte Gas spielt in der Stahlproduktion eine große Rolle, aber auch bei Grillfeuern zuhause oder in Shisha-Bars. Deswegen habe ich einen kleinen, tragbaren Kohlenstoffmonoxid-Warner entworfen, den jeder tragen könnte. Hierbei muss auch darauf geachtet werden den Preis so niedrig wie möglich zu halten, damit der Warner für jeden erschwinglich ist. Der derzeitige Kostenpunkt liegt bei 9,43€.



US-BUNDESSTAAT MARYLAND

**Achtköpfige Familie stirbt  
an Kohlenmonoxid-  
Vergiftung**



Familiendrama in Spiesen-  
Elversberg

**Vater und Sohn sterben in  
Wohnhaus durch Gasvergiftung >**

**Abb. 1:** Verschiedene Nachrichtermeldungen zu CO-Vergiftungen.

## Kohlenstoffmonoxid in der Stahlproduktion

Im Hochofen verbrennt der Kohlenstoff aus dem Koks mit zugeführtem Sauerstoff zu Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid. Dabei entsteht Hitze für die Schmelzung. Das Kohlenstoffmonoxid durchströmt den Möller (Eisenerz, Koks, weitere Bestandteile) und reduziert das Eisenerz. Es entsteht Roheisen und Schlacke. Außerdem kommt am oberen Schachtende des Hochofens giftiges Gichtgas heraus, welches einen Kohlenstoffmonoxid-Anteil von 20% - 30% hat und gefährlich für Arbeiter werden kann.

## 2) Vorgehensweise, Materialien und Methoden

### Die Platine

Um den CO-Warner zu bauen habe ich zunächst eine Platine mit dem Programm Eagle entworfen. Ich habe überlegt welche Bauteile ein Kohlenstoffmonoxid-Warner benötigt. Letztendlich ist auf der Platine der Platz für einen Gassensor, einen Mikrocontroller, ein Batteriesockel, ein Lautsprecher, eine LED und einige Widerstände und Kondensatoren. Die Platine sollte auch nicht zu groß werden, da sie ja möglichst immer dabei sein soll. Deswegen ist sie nun 4 x 4 cm<sup>2</sup> groß.

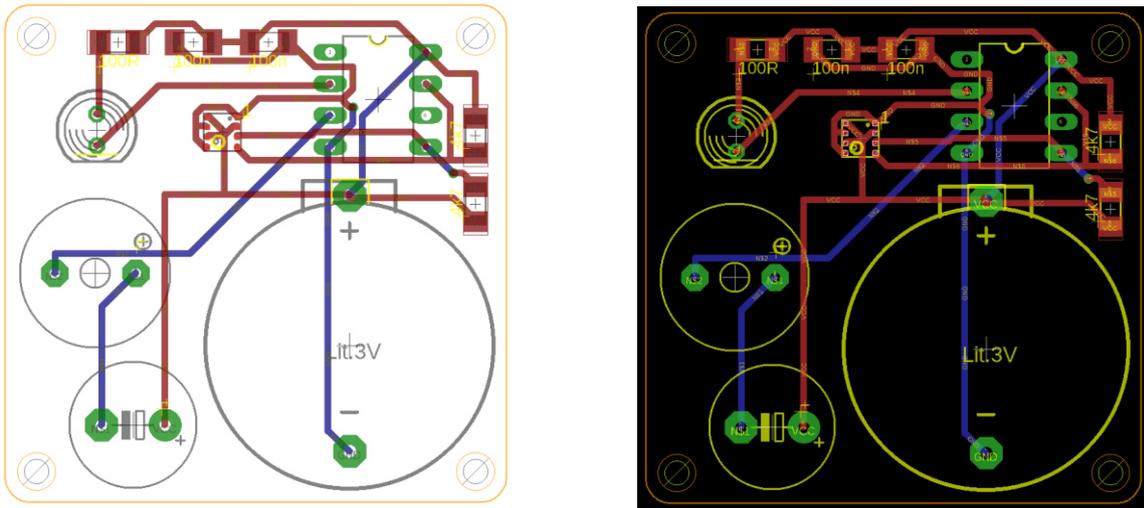


Abb. 2: Von mir entworfene Abbildung der Platine mit allen Elementen und verbindungen

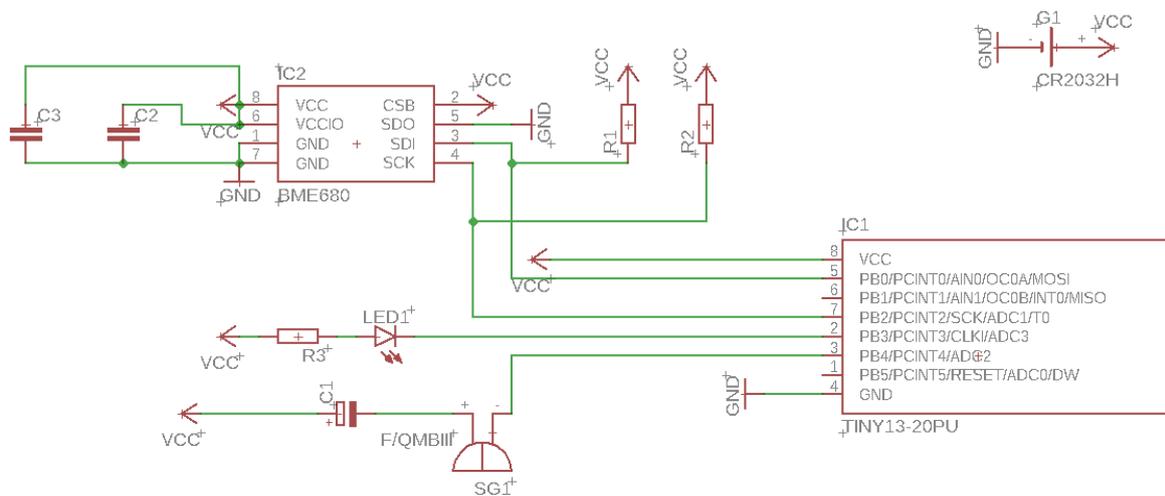
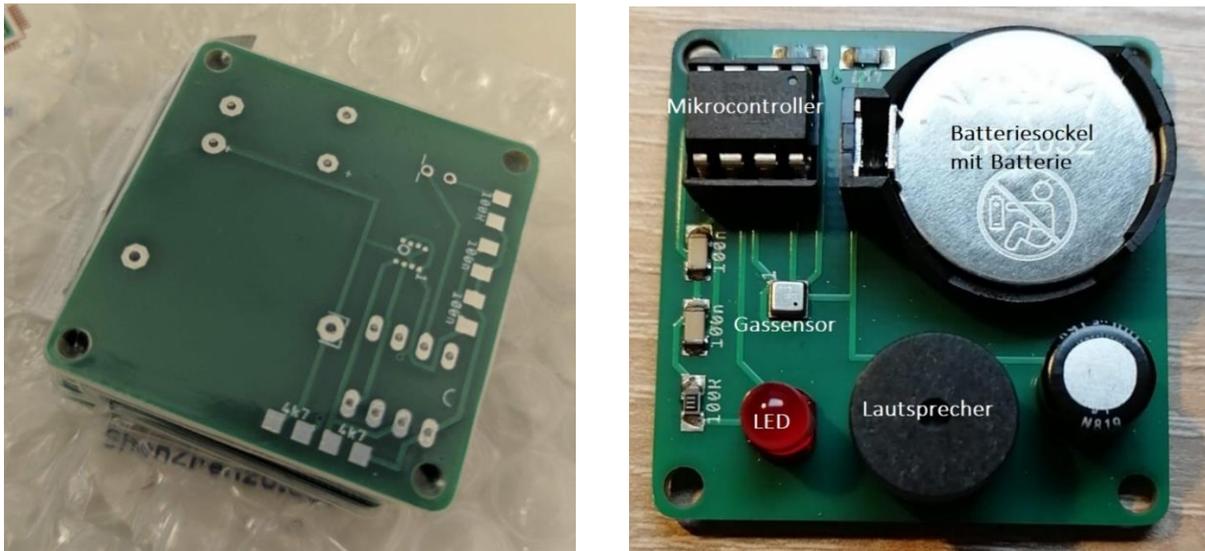


Abb. 3: Schaltplan der Platine

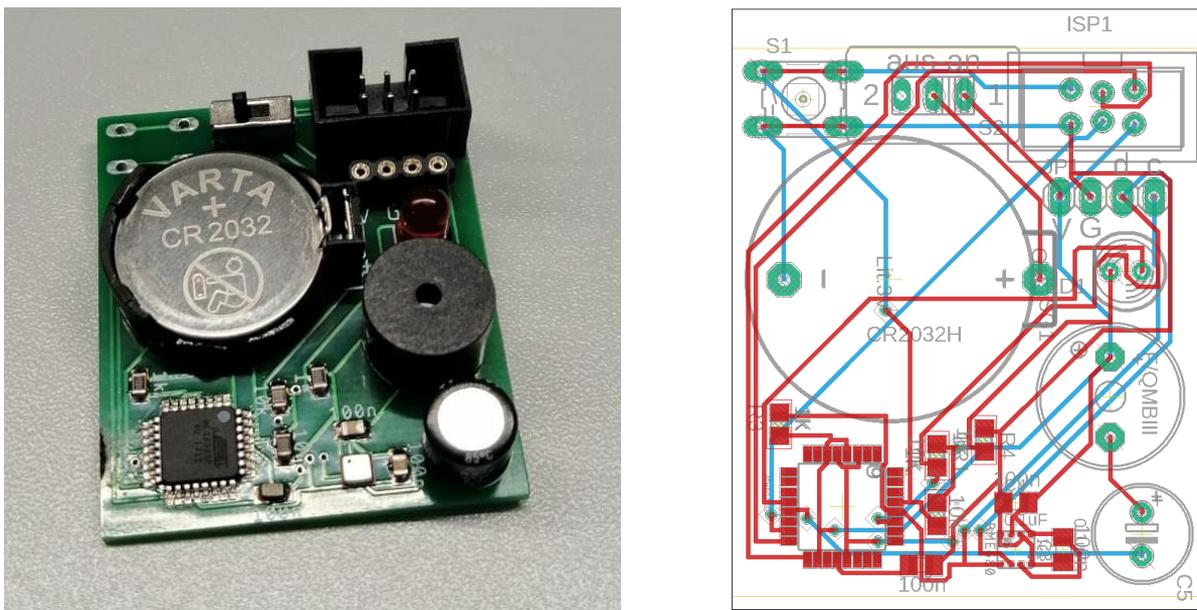
Nach dem Erstellen wurde die Platine geätzt und ist angekommen:



**Abb. 4:** Links: Die fertige unbestückte Platine. Rechts: Anschließend erfolgte die Bestückung der Platine mit den Bauteilen.

Das Problem mit dem genutzten ATtiny85 war der geringe Speicherplatz. Ich habe deshalb den ATtiny durch einen ATmega328 ersetzt, wie er z.B. beim Arduino eingesetzt wird.

Die neue Platine:



**Abb. 5:** Aktualisierte Platine.

## Schaltplan:

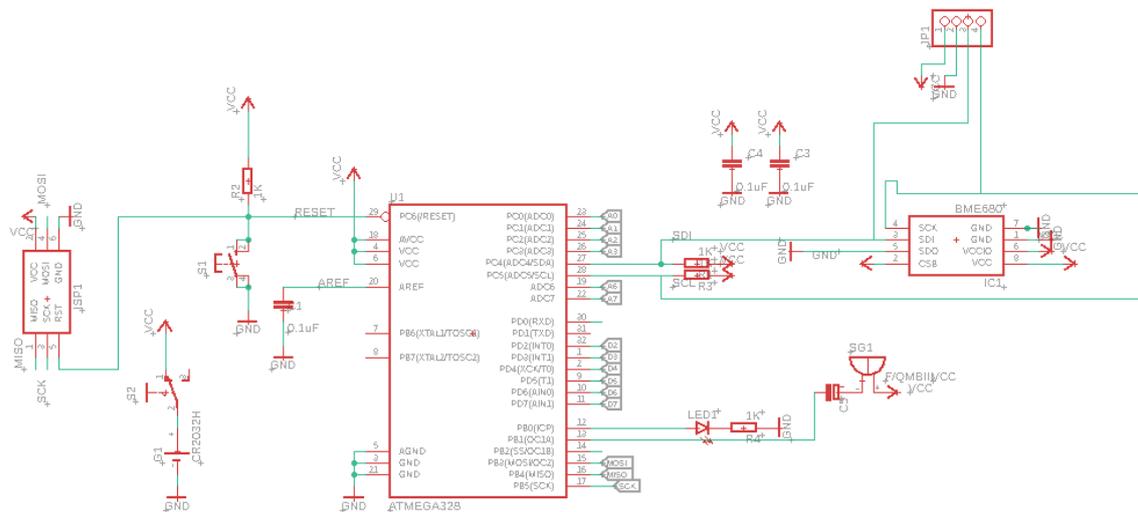


Abb. 6: Schaltplan der aktualisierten Platine.

## Der Gassensor

Als Gassensor ist der BME680 von Bosch verbaut.

Um Gase in Konzentration und Art zu messen, können Metalloxid-Halbleiter Gassensoren verwendet werden. Ihr Prinzip basiert auf der Änderung ihres elektrischen Widerstands bzw. ihrer Leitfähigkeit in Anwesenheit eines reduzierenden (z.B. Kohlenmonoxid) oder oxidierenden (z.B. Stickoxide) Gases. Diese Änderung des elektrischen Widerstands ist von mehreren Faktoren abhängig:

- Gasart und -konzentration
- Temperatur des Sensors
- Äußere Einflüsse, wie: Luftfeuchtigkeit, Umgebungstemperatur...

Dabei haben diese MOX-Sensoren im Vergleich zu aufwendigen chemischen Analyse Methoden einige Vorteile:

- billig
- sehr schnell und liefern Ergebnisse fast in Echtzeit
- langlebig

Sie haben aber auch Nachteile, z.B.:

- nicht selektiv, reagieren auf viele Gase ähnlich
- müssen oft nachkalibriert werden

## Die Kalibrierung

### 1) Steuerung und Auslesen des Sensors über einen Mikrocontroller

Die Platine hat den BME680 Sensor von Bosch und einen Mikrocontroller. Dieser wird über eine I<sup>2</sup>C-Schnittstelle gesteuert und ausgelesen.

### 2) Das Finden des optimalen Temperaturzyklus

Abhängig von der Sensortemperatur reagiert der Sensor anders auf verschiedene Gase. Durch Temperatursprünge können die optimalen Sensortemperaturen benutzt werden, um die Sensitivität des Sensors zu steigern.

### 3) Auswählen der Gasmenge

Damit der Sensor optimale Vorhersagen trifft, muss die Gasmenge zur Aufnahme der Trainingsdaten sinnvoll gewählt sein. Interessiert einen beispielsweise der CO-Gehalt in der Atemluft, so reichen CO-Konzentrationen von 0 – 30 ppm. Soll jedoch ein CO-Warngerät kalibriert werden, so sollten die Konzentrationen im Bereich zwischen 0 und 100 ppm liegen (siehe Abbildung 7), da bei Überschreitung dieser Konzentration große Gefahr droht und unbedingt früher gewarnt werden soll.

Wert in ppm	Wert in %	Zeitraum und Vergiftungsverlauf
30ppm	0,003%	MAK-Wert in Deutschland (max. zulässige Arbeitsplatzkonzentration)
200ppm	0,02 %	Leichte Kopfschmerzen innerhalb 2-3 Stunden
400ppm	0,04%	Kopfschmerzen im Bereich der Stirn innerhalb 1–2 Stunden
800ppm	0,08%	Schwindel, Übelkeit und Gliederzuckungen innerhalb 45 Minuten
1600ppm	0,16 %	Kopfschmerzen, Schwindel und Übelkeit innerhalb von 20 Minuten
3200ppm	0,32%	Schwindel, Übelkeit und Kopfschmerzen innerhalb 5–10 Minuten
6400ppm	0,64%	Schwindel und Kopfschmerzen innerhalb von 1-2 Minuten
12800ppm	1,28%	Bewusstlosigkeit und Tod innerhalb von 1-3 Minuten

**Abb. 7:** Vergiftungsverlauf bei Aussetzung verschiedener CO-Konzentrationen (<https://www.kohlenmonoxidmelder.com/kohlenmonoxid-vergiftung/>)

Dadurch, dass Kohlenmonoxid ein gefährliches Gas ist musste der Sensor im Lehrstuhl für Messtechnik an der Universität des Saarlandes kalibriert werden:

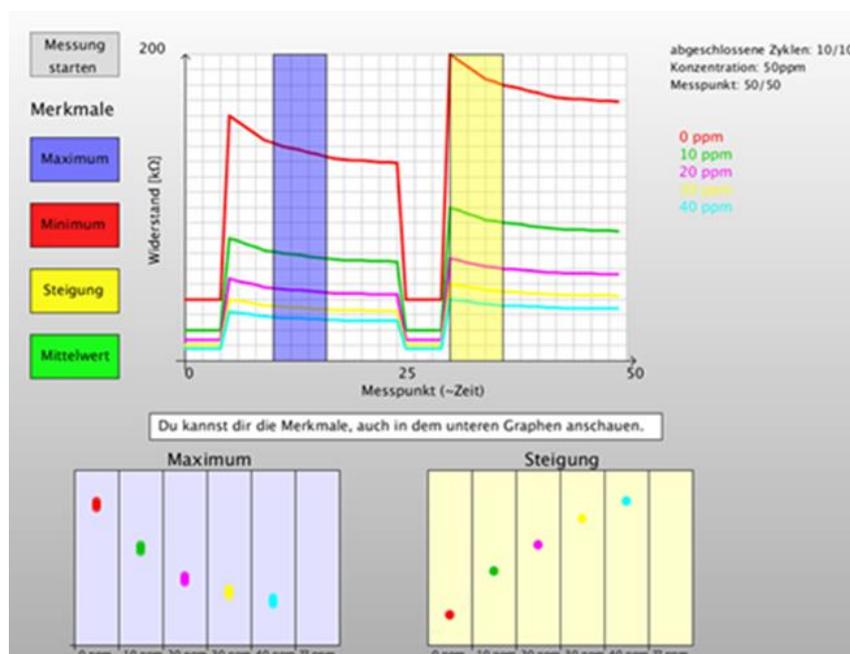


**Abb. 8:** Gasmischanlage zur Kalibrierung des mobilen CO-Melders.

Dort gibt es eine Gasmischanlage, die es ermöglicht bekannte Konzentrationen des Zielgases (CO) zu erzeugen und über einen Luftstrom über den Sensor zu leiten.

#### 4) Aufnahme der Trainingsdaten

Man gibt verschiedene Konzentrationen auf den Sensor und nimmt das Rohsignal auf (siehe Abb. unten). Jede Farbe entspricht dem Rohsignal einer anderen Konzentration. In meinem Fall wurden die Temperaturen 400 °C, 250 °C, 400 °C und 200 °C benutzt. Je größer die Gaskonzentration ist, desto stärker fällt das absolute Signal ab.



**Abb. 9:** Aufnahme der Trainingsdaten und Merkmalsextraktion.

Nach Aufnahme aller Daten, müssen die Rohsignale noch verarbeitet werden. Typischerweise werden die Daten auf Werte zwischen 0 und 1 gebracht, und besondere Merkmale, wie Steigung oder Maximum innerhalb eines Intervalls bestimmt.

### *5) Modellerstellung*

Um eine Verbindung zwischen Rohsignal und Konzentration zu erhalten, wurde ein neuronales Netz benutzt (Netz aus künstlichen Neuronen).

### *6) Validierung des Modells*

Das Problem bei manchen Modellen ist, dass sie zwar sehr gut die vorhandenen Trainingsdaten mit der Konzentration in Verbindung bringen können, jedoch für unbekannte Daten, komplett falsche Vorhersagen treffen. Dieses Phänomen nennt man „Overfitting“. Das heißt das Modell erkennt keine allgemeinen Zusammenhänge, sondern passt sich nur auf Spezialfälle an.

Um dieses zu vermeiden muss man eine Validierung durchführen. Das bedeutet, es werden für die Modellerstellung nicht 100%, sondern beispielsweise nur 80% aller Trainingsdaten verwendet. Parallel wird das Modell an den restlichen 20% getestet. Liefert das Modell für die 80% der Trainingsdaten richtige Vorhersagen, aber für die restlichen 20% nicht, so muss die Kalibrierung wiederholt werden (beispielsweise durch ein anderes mathematisches Modell oder andere Temperaturzyklen).

### *7) Exportieren des Modells*

Nach Abschluss der Kalibrierung kann das Modell dann auf den Mikrocontroller hochgeladen werden. Nach jedem Durchlauf des gleichen Temperaturzyklus wie bei der Kalibrierung, werden Rohdaten gleich vorverarbeitet und in das Modell gegeben, sodass Kohlenmonoxid erkannt wird.

## **Das Programm:**

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include "Adafruit_BME680.h"
Adafruit_BME680 bme;
float in[61]; float in2[5]; int tem; int t = 0; float w0[8][5]; float w1[5][8]; float w2[1][5]; float ZM0[8]; float
ZM1[5]; float ZM2[1]; float b0[8]; float b1[5]; float b2[1];
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  if (!bme.begin(118)) {
    while (1);
  }
};
```

```

}
void loop() {
  if (t < 10) {
    tem = 200;
  } else if (t < 20) {
    tem = 400;
  } else if (t < 30) {
    tem = 250;
  } else if (t < 40) {
    tem = 400;
  } else if (t < 50) {
    tem = 300;
  } else if (t < 60) {
    tem = 400;
  } bme.setGasHeater(tem, 30);
  if (! bme.performReading()) {
    return;
  };
  in[t] = bme.readGas();
  if (t == 60) {
    float ma = 0;
    float mi = 9999999999;
    for (int i = 0; i < 60; i++) {
      if (in[i] > ma) {
        ma = in[i];
      } if (in[i] < mi) {
        mi = in[i];
      }
    }
    for (int i = 0; i < 60; i++) {
      in[i] = (in[i] - mi) / (ma - mi);
    } in2[0] = (in[5] - in[0]) / 6;
    in2[1] = in[21];
    in2[2] = in[35];
    in2[3] = 0;
    for (int i = 44; i < 55; i++) {
      in2[3] = in2[3] + in[i];
    } in2[3] = in2[3] / 11;
    in2[4] = bme.readHumidity() / 100;
    for (int i = 0; i < sizeof(b0) / sizeof(*b0) ; i++) {
      for (int j = 0; j < 5; j++) {
        ZM0[i] = 0;
      }
    }
    for (int i = 0; i < sizeof(b1) / sizeof(*b1) ; i++) {
      for (int j = 0; j < sizeof(ZM0) / sizeof(*ZM0); j++) {
        ZM1[i] = 0;
      }
    }
    for (int i = 0; i < sizeof(b2) / sizeof(*b2) ; i++) {
      for (int j = 0; j < sizeof(ZM1) / sizeof(*ZM1); j++) {
        ZM2[i] = 0;
      }
    }
  }
  Me();
  Serial.print("CO-Konzentration = ");
  Serial.print(100 * ZM2[0]);
  Serial.println(" ppm");
  Serial.print("Steigung = ");
  Serial.println(in2[0], 4);
  Serial.print("Maximum = ");

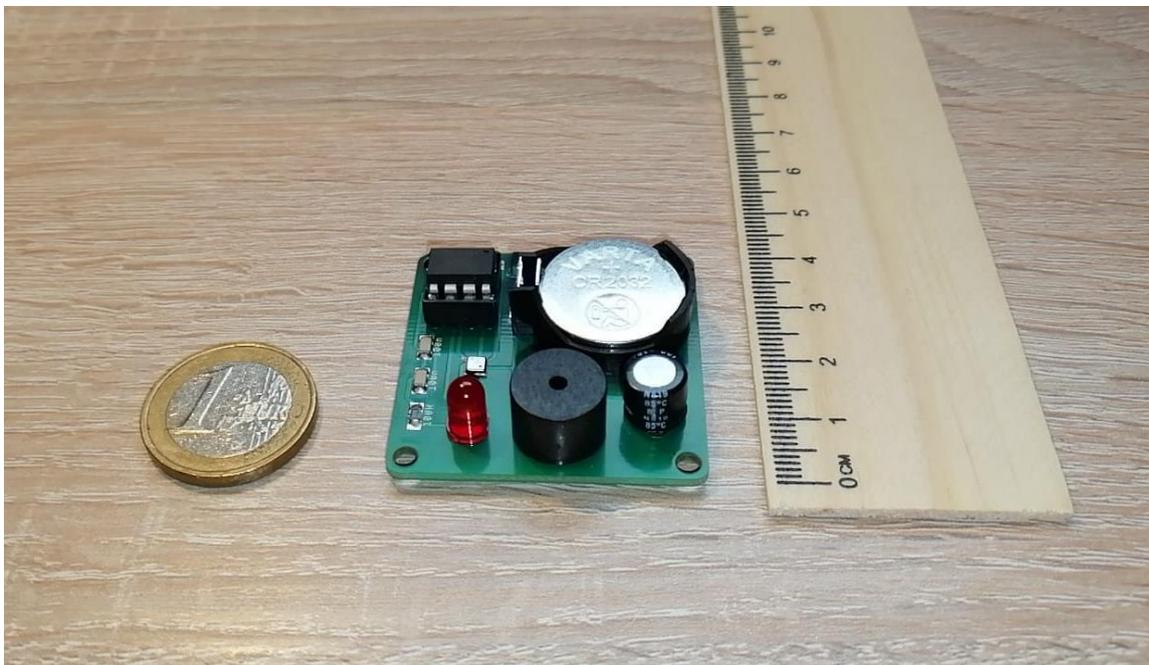
```

```

Serial.println(in2[1], 4);
Serial.print("Minimum = ");
Serial.println(in2[2], 4);
Serial.print("Mittelwert = ");
Serial.println(in2[3], 4);
Serial.print("rel. Luftfeuchte = ");
Serial.println(in2[4], 4);
Serial.println("_____");
t = -1;
} t += 1;
}
void Me() {
for (int i = 0; i < sizeof(b0) / sizeof(*b0) ; i++) {
for (int j = 0; j < 5; j++) {
ZM0[i] += w0[i][j] * in2[j];
} ZM0[i] = ZM0[i] + b0[i];
} for (int i = 0; i < sizeof(b0) / sizeof(*b0) ; i++) {
ZM0[i] = 1 / (1 + pow(2.7182, -ZM0[i]));
} for (int i = 0; i < sizeof(b1) / sizeof(*b1) ; i++) {
for (int j = 0; j < sizeof(ZM0) / sizeof(*ZM0); j++) {
ZM1[i] += w1[i][j] * ZM0[j];
} ZM1[i] = ZM1[i] + b1[i];
} for (int i = 0; i < sizeof(b1) / sizeof(*b1); i++) {
ZM1[i] = 1 / (1 + pow(2.7182, -ZM1[i]));
} for (int i = 0; i < sizeof(b2) / sizeof(*b2) ; i++) {
for (int j = 0; j < sizeof(ZM1) / sizeof(*ZM1); j++) {
ZM2[i] += w2[i][j] * ZM1[j];
} ZM2[i] = ZM2[i] + b2[i];
} for (int i = 0; i < sizeof(b2) / sizeof(*b2); i++) {
ZM2[i] = 1 / (1 + pow(2.7182, -ZM2[i]));
}
}
}

```

#### 4) Ergebnis/Ausblick



**Abb. 10:** Die 4x4cm große Platine neben einem 1€ Stück.



**Abb. 11:** Mein Portabler Warner neben einem stationären CO-Warner.

**Tabelle 1:** Preisliste für den mobilen CO-Melder.

Name	Funktion	Anzahl pro Board	Stückpreis	Gesamtpreis
Platine	Aufbau	1	0,50 €	0,50 €
BME680	Gassensor	1	6,27 €	6,27 €
ATmega328	Steuerung	1	1,31 €	1,31 €
SMD-Kondensatoren		3	0,05 €	0,15 €
SMD-Widerstände		3	0,03 €	0,09 €
Elektrolyt-Kond.		1	0,13 €	0,13 €
Lautsprecher	Schallerzeugung	1	0,18 €	0,18 €
LED	Signallicht	1	0,05 €	0,05 €
Batteriehalter		1	0,12 €	0,12 €
Batterie		1	0,19 €	0,19 €
Schalter		1	0,15 €	0,15 €
Pinleiste	Gassensor-Kalibrierung	1	0,05 €	0,05 €
ISP-Stecker	Programmierschnittstelle	1	0,24 €	0,24 €
				<b>9,43 €</b>

Der Preis eines Sensors beläuft sich zurzeit auf ca. 9,43€. Dabei ist noch keine Hülle für die Platine dabei falls diese benötigt wird. Dies ist jedoch sehr günstig, wenn man bedenkt, dass sich die Preise für portable Kohlenmonoxid Messer auf 100€ und aufwärts belaufen.

## 5) Quellen- und Literaturverzeichnis

- Abb. 1: <https://www.stern.de/panorama/kohlenmonoxidvergiftung--polizei-findet-im-us-bundesstaat-maryland-leichen-von-vater-und-sieben-kindern-5934956.html> und [https://www.saarbruecker-zeitung.de/saarland/vater-und-sohn-sterben-in-wohnhaus-durch-gasvergiftung\\_aid-35151437](https://www.saarbruecker-zeitung.de/saarland/vater-und-sohn-sterben-in-wohnhaus-durch-gasvergiftung_aid-35151437)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Stahlerzeugung>
- <https://www.stahl-online.de/index.php/themen/stahltechnologie/stahlerzeugung/>
- TOTAL PHÄNOMENAL Vom Erz zum Stahl, Ein Film von Tilman Büttner, BR
- <https://www.youtube.com/watch?v=GwOxFDul9vQ>

## 6) Unterstützer:

- Benjamin Brück, Lehrer, Max-Planck-Gymnasium Saarlouis, hat mich bei meinem Projekt unterstützt. Er hat mir das Schülerforschungszentrum mit all seinen Geräten zur Verfügung gestellt und mich betreut.
- Sebastian Höfner, Dipl.-Phys., Lehrstuhl für Messtechnik, Universität des Saarlandes, hat mir bei der Kalibrierung des Sensors mit Kohlenmonoxid geholfen

## **I.8 Facharbeit: Waldbrandfrüherkennung**

# Waldbrandfrüherkennung

Gleb Ryabtsev, Max-Planck-Gymnasium Saarlouis

31. Januar 2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Vorgehensweise, Materialien und Methoden</b>	<b>5</b>
2.1	Aufbau eines Sensormoduls . . . . .	5
2.2	Sensoren . . . . .	5
2.2.1	MOX-Gassensoren . . . . .	7
2.2.2	Feinstaubsensoren . . . . .	7
2.2.3	Wahl des Sensors und Kalibrierung . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>9</b>
3.1	Wahl des Sensors . . . . .	9
3.1.1	MOX-Sensor . . . . .	9
3.1.2	Feinstaubsensor . . . . .	9
3.2	Bestimmung der Grenzwerte . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Ergebnisdiskussion</b>	<b>10</b>
4.1	Erklärung der Ergebnissen von MOX- und Feinstaubsensor . .	10
4.2	Detektionsweite . . . . .	10
4.2.1	Wind . . . . .	11
4.2.2	Installationshöhe des Sensors . . . . .	11
4.3	Messungen der Kommunikationsweite . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>12</b>

# 1 Einleitung

Die Waldbrände sind in den letzten Jahren zu einem der wichtigsten Umweltprobleme geworden. Eine Reihe von zerstörerischen Waldbränden in der vergangenen Jahre hat Schlagzeilen gemacht und die Bereitschaft der Menschen, der Regierungen, und der Technik mit derartigen Katastrophen umzugehen infrage gestellt. Die Waldbrände bringen mit sich enorme wirtschaftliche und ökologische Schäden. So haben die Waldbrände im US-Bundesstaat Kalifornien in 2018 über 80 Menschenleben und 24 Mrd. Dollar (21 Mrd. Euro) gekostet. Darüber hinaus mussten für die Beseitigung weitere 3,5 Mrd. Dollar ausgegeben werden. Die Brandfläche betrug über 7600 km<sup>2</sup> und der Rauch wurde vom Wind über mehrere Hunderte Kilometer getragen (Abb. 1). Somit verursachen die Waldbrände neben immensen kurzfristigen finanziellen Schäden auch langfristige Gesundheitsprobleme aufgrund der Beeinträchtigung der Luftqualität. In Abbildung 2 ist die Luftqualität (AQI - Air Quality Index) an der Ostküste der Vereinigten Staaten zum Höhepunkt der Waldbrände in 2018 dargestellt. Die roten Bereiche entsprechen der gesundheitsgefährlichen Luftqualität[2]. Neben der Auswirkung auf den Menschen, sind auch die Konsequenzen der Waldbrände für die Umwelt nicht zu vernachlässigen. Die destruktiven Effekte auf Flora und Fauna sind durch Unterbrechungen von Nahrungsketten verstärkt und bedrohen oftmals auch endemische Arten. Als ein ausdrucksstarkes Beispiel bieten sich die sogenannten Bush Fires in Australien im Winter 2020. Laut Einschätzungen wurden bis zum 4. Januar 2020 über 480 Millionen Tieren zu Opfern der Brände. Der Klimawandel macht das Problem der Waldbrände noch akuter und komplexer. Obwohl die Existenz der Verbindung zwischen Klimawärmung



Abbildung 1: Waldbrände in Kalifornien, 01.08.2018, Satellitenaufnahme, NASA

Die roten Bereiche entsprechen



Abbildung 2: Waldbrände in Kalifornien, 01.08.2018, Luftqualität[1]

und heutigen Waldbränden sehr umstritten bleibt, besteht der wissenschaftliche Konsensus darin, dass die Häufigkeit der Waldbrände in der Zukunft durch die weitergehende Klimawärmung steigen wird[4].

Obwohl die Waldbrände äußerst schwierig zu beseitigen sind, ist es offensichtlich, dass Schäden durch eine rechtzeitige Vorwarnung minimiert werden können, insbesondere wenn das Privateigentum betroffen ist. Bisher wurden viele Methoden der Waldbranderkennung entwickelt, aber es existieren keine kostengünstige, kommerzielle erhältliche Lösungen, die einer Privatperson es ermöglichen würden, eine frühzeitige Warnung bei der Annäherung eines Waldbrandes zu ihrem Privatgrundstück zu erhalten. Die heutzutage existierenden Systeme wie z. B. Satelliten sind für derartige Anwendung nicht geeignet: die Auflösung und die Messrate sind zu gering, um eine rechtzeitige Warnung zu gewährleisten[5]. Darüber hinaus verursachen manche Methoden, wie z. B. Beobachtung mit Hilfe von Hubschrauber, die auch in Deutschland eingesetzt wird, erhebliche Kosten.

Das Ziel dieses Projekts besteht darin, eine Lösung zu entwickeln, mit der jeder, der in einer betroffenen Region wohnt, ein einfaches und günstiges Frühwarnsystem für Waldbrände installieren kann. Das System muss mehrere autonome Sensormodulen beinhalten, die selbständig im Wald im bestimmten Abstand vom eigenen Grundstück installiert werden können. Die Sensoren sollen anhand der beim Brand in die Luft freigesetzten Stoffe den Waldbrand detektieren können und die Warnung dem Servermodul senden (Stern-Topologie). Der Servermodul ist dabei mit dem Internet verbunden und kann somit die Warnung sofort an den Benutzer und evtl. auch an die zuständigen Dienste weiterleiten.

## 2 Vorgehensweise, Materialien und Methoden

### 2.1 Aufbau eines Sensormoduls

Der Sensormodul muss, wie oben bereits beschrieben, mehrere Anforderungen erfüllen. Vor allem muss das Gerät autonom, d. h. ohne externer Energieversorgung funktionieren. Um dies zu gewährleisten, wird der Strom durch eine Solarzelle erzeugt (s. Abb. 3) und in einem Lithium-Ionen-Akkumulator gespeichert. Die Aufladung der Batterie erfolgt mit Hilfe eines Steuermoduls (s. Abb. 4). Die Messdaten vom Sensor werden von einem Mikrokontroller (Espressif ESP32) bearbeitet und mit Hilfe eines in die Mikrokontrollerplatine integrierten Senders zum Servermodul geschickt. Der Sender basiert auf der LoRaWAN Technologie, einem Netzwerkprotokoll, das speziell für Niedrigenergiegeräte entwickelt wurde. Das Protokoll ermöglicht Kommunikationsreichweite von bis zu wenigen Kilometern, auch im Wald, was später unter realen Bedingungen getestet wurde. Das Gehäuse des ersten Prototyps wurde mit einem 3D-Drucker angefertigt und besitzt seitliche Öffnungen, die den Luftaustausch mit der Umgebung ermöglichen.



Abbildung 3: Gehäuse und Solarzelle

### 2.2 Sensoren

Ein Brand kann mit vielen verschiedenen Sensoren erkannt werden. Allgemein lassen sie sich in zwei Kategorien unterteilen. Auf der einen Seite sind Messgeräte, die die durch den Feuer erzeugte Temperaturerhöhung registrieren. Dazu gehören z. B. die Geräte, die Lufttemperatur oder Wärmestrahlung messen. Die grundsätzliche Beschränkung von solchen Messmethoden im Hinblick auf die Anforderungen des Frühwarnsystems besteht darin, dass sie nur einen Brand in unmittelbarer Nähe vom Sensor detektieren können. Dahingegen erlaubt die Messung der in die Luft freigesetzten Stoffe Branderkennung in deutlich größeren Abständen. Aus der vorläufigen Recherche ergaben sich zwei Arten von Sensoren, die für die Anwendung im Rahmen dieses Projekts besonders gut geeignet sein können.

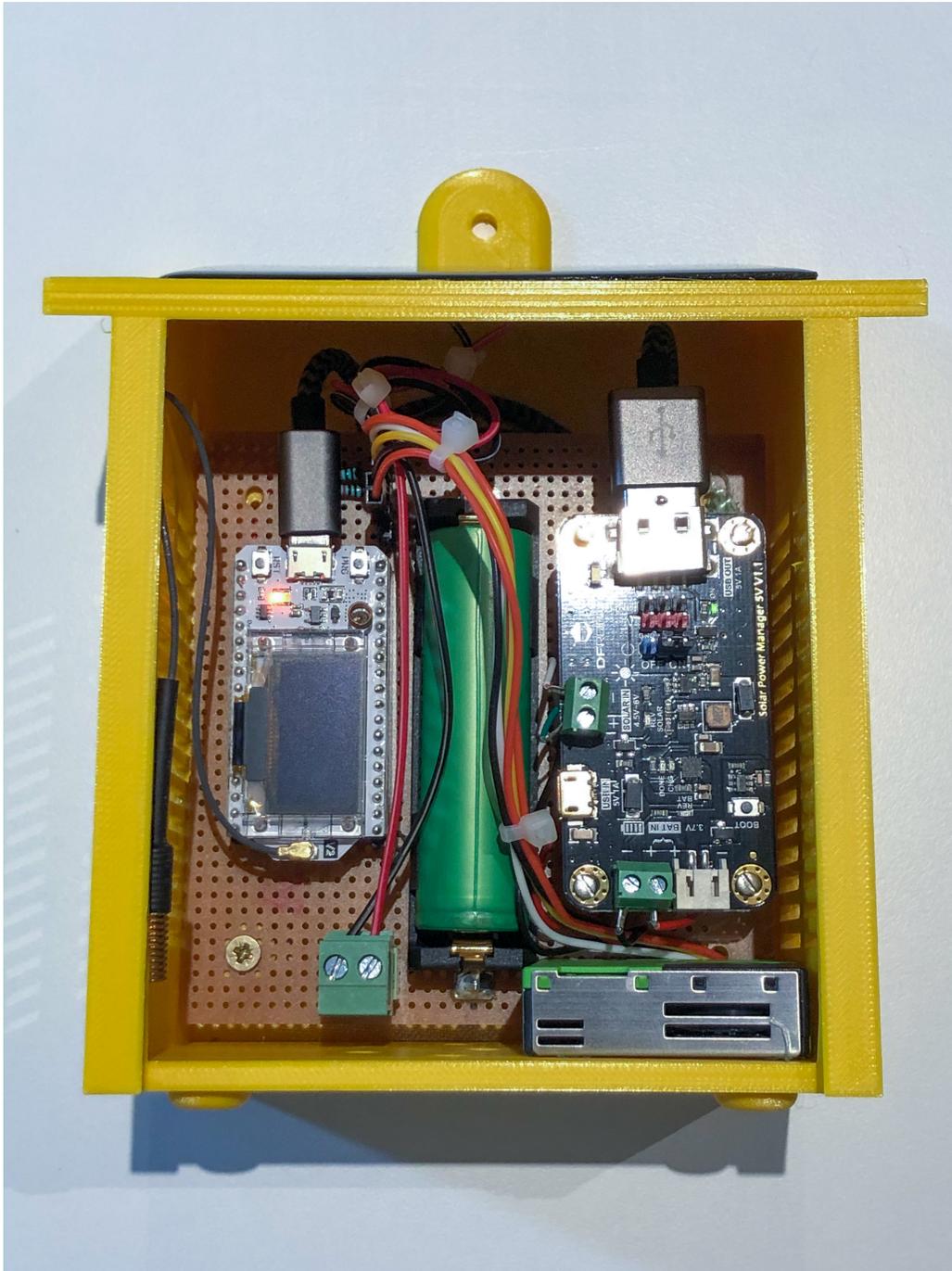


Abbildung 4: Offenes Gehäuse

### 2.2.1 MOX-Gassensoren

Die Metalloxid-Halbleiter-Sensoren (MOX) ermöglichen die Detektion von chemisch reaktiven Substanzen in der Luft. Vor allem gehört dazu das bei jeder Verbrennung freigesetzte Kohlenstoffmonoxid, aber auch andere organische Moleküle.<sup>1</sup> Das Funktionsprinzip des Sensors beruht darauf, dass Moleküle aus der Luft auf sich der Oberfläche des porösen Halbleiters lagern und beeinflussen somit den elektrischen Widerstand des Letzteren. Des Weiteren ändern verschiedene Substanzen bei unterschiedlichen Temperaturen den Widerstand unterschiedlich. Damit können bestimmte Stoffe oder Stoffkombinationen erkannt werden, wobei die Temperatur des Halbleiters zyklisch variiert und die Messdaten mit Hilfe eines Machine Learning Algorithmus ausgewertet werden.

Die Untersuchung der Einsatzmöglichkeit eines MOX-Gassensors wurde in diesem Projekt anhand des Modells Bosch BME680 durchgeführt.

### 2.2.2 Feinstaubsensoren

Eine grundsätzlich verschiedene Kategorie von Sensoren sind die Feinstaubsensoren. Diese Sensoren sind in der Lage die Konzentration von Staubpartikeln in verschiedenen Größenbereichen zu bestimmen. Der in diesem Projekt eingesetzte Sensor, Sensirion SPS30, benutzt den Phänomen der Lichtstreuung durch kleine Partikel. Die Luft in einem eingeschränkten räumlichen Bereich wird mit einem Laser bestrahlt und das gestreute Licht wird mit einer Matrix von photoelektrischen Detektoren eingefangen. Anhand des Verteilungsmusters des dissipierten und refraktierten Lichts auf der Matrix, kann die in das Sensormodul eingebaute Elektronik auf entsprechende Konzentrationen der Partikeln in mehreren Größenbereichen schließen. Der Sensor bestimmt die Konzentrationswerte

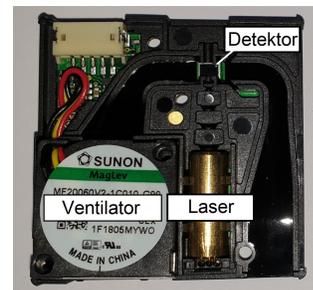


Abbildung 5: Sensirion SPS30 [7]

---

<sup>1</sup>Wichtig ist zu bemerken, dass MOX-Sensoren auf das in viel größeren Mengen produzierte Kohlenstoffdioxid nicht reagieren können, da dieses chemisch inert ist. Allerdings erfüllt der Einsatz eines geeigneten CO<sub>2</sub>-Sensors ebenfalls nicht die Anforderungen des Frühwarnsystems, da das freigesetzte CO<sub>2</sub> nicht von Fluktuationen der natürlichen Konzentration unterscheidet werden kann.

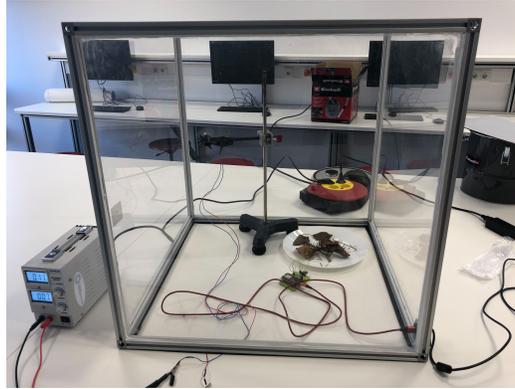


Abbildung 7: Kalibrierung der Gassensoren

der Teilchen in Größenbereichen  $PM_{0.5}$ ,  $PM_{1.0}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_4$  und  $PM_{10}^2$ . Der Bei einem Waldbrand ist eine Erhöhung der normalen Feinstaubkonzentration durch den Rauch zu erwarten.

### 2.2.3 Wahl des Sensors und Kalibrierung

Um die Anwendbarkeit der Sensoren zu testen, wurde die bei einer Verbrennung eingefangene Luft in ein luftdichtes Behälter mit den Sensoren dosiert zugeführt. Da bei fast allen Waldbränden die untere Schicht der Vegetation betroffen ist, sind besteht auch die Auswahl des verbrannten Pflanzmaterials hauptsächlich aus einer geringen Menge getrockneter Blätter der häufigsten Baumarten in Deutschland [8]. Die Blätter wurden in einem Metallbehälter verbrannt, und das entstandene Gas wurde mit mehreren Spritzen aufgenommen (s. Abbildung 6). Danach wurden die Proben schrittweise in eine luftdichte Kammer injiziert. Die Messdaten der in der Kammer platzierten Sensoren wurden in Echtzeit beobachtet.



Abbildung 6: Verbrennung von Blätter

---

<sup>2</sup> $PM_x$  bezeichnet die Partikeln, deren Größe kleiner als  $x$   $\mu m$  ist.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Wahl des Sensors

#### 3.1.1 MOX-Sensor

Aus dem in 2.2.3 beschriebenen Versuch ergab sich, dass ein MOX-Gassensor nicht in der Lage ist, ein Waldbrand zu erkennen. Die Messdaten des Sensors (Widerstandsprofil bei einem Temperaturzyklus) haben sich gegenüber dem Anfangszustand nicht geändert, auch bei den Konzentrationen, die schon durch den menschlichen Geruchssinn gespürt werden können. Somit ist es nicht möglich, ein Metalloxid-Halbleiter-Sensor für die Zwecke der Branderkennung einzusetzen.

#### 3.1.2 Feinstaubsensor

Bei der Messung im geschlossenen Behälter hat sich gezeigt, dass der Feinstaubsensor Sensirion SPS30 sehr empfindlich auf die kleinsten Konzentrationen des eingefangenen Gases und Rauchs reagiert hat. Vor allem vervielfachte sich die Konzentration der Staubpartikel der Größe über PM2.5 erhöht.

### 3.2 Bestimmung der Grenzwerte

Um die minimale Konzentration des Feinstaubs zu bestimmen, bei denen das Sensormodul eine Warnung senden wird, wurde eine Messung der natürlichen Feinstaubkonzentration in einem typischen Wald durchgeführt. Um den Einfluss von spezifischen lokalen Faktoren zu minimieren, wurden Messungen an drei verschiedenen Orten durchgeführt. Die Entfernung der Orten voneinander betrug ca. 1 km. An jedem Ort wurde der Messvorgang 20 mal wiederholt. Die Mittelwerte für jeden Ort und Partikelgröße wird in der unterstehenden Tabelle dargestellt.

Teilchengröße	Messort 1	Messort 2	Messort 3
PM0.5	274.54	275.41	271.03
PM1.0	322.10	321.42	318.27
PM2.5	324.36	325.81	320.68
PM4	324.63	326.00	320.98
PM10	324.72	326.09	321.08

Konzentration in  $\text{cm}^{-3}$

Anhand der Tabelle kann man sehen, dass die Messwerte Unabhängigkeit vom genauen Messort aufweisen. Aus den Messdaten ergab sich auch, dass die zeitliche Stabilität des Sensor sehr hoch ist. Im Folgenden wird die Berechnung des Grenzwertes am Beispiel von der Größe PM4 beschrieben. Aus dem arithmetischen Mittel aller Messwerte

$$\bar{n} = 323.87 \text{ cm}^{-3}$$

wird der Grenzwert ausgerechnet. Da bereits die kleinsten Mengen von Rauch Vervielfachung der Messwerten verursachten, ist es sinnvoll den Verdoppelten Durchschnittswert als Grenzwert zu setzen:

$$n_{\max} = 646 \text{ cm}^{-3}$$

Dieselbe Berechnung wurde mit den Konzentrationswerten der Teilchen in anderen Größenbereichen durchgeführt.

## 4 Ergebnisdiskussion

### 4.1 Erklärung der Ergebnissen von MOX- und Feinstaubsensor

Wie es sich im oben beschriebenen Versuch herausstellte, sind MOX-Sensoren nicht fähig, Verbrennungsprodukte von Waldbränden in der Luft zu erkennen. Der Grund besteht offenbar darin, dass bei Verbrennungen in waldbrandähnlichen Bedingungen nicht genügend Stoffe freigesetzt werden, die mit dem Halbleitersensor chemisch reagieren könnten. Wie oben bereits angedeutet, war eine Änderung der Messdaten aufgrund des produzierten Kohlenstoffmonoxid zu erwarten. Allerdings entsteht bei einer Verbrennung im Freien nicht ausreichend CO, vermutlich aufgrund der unbegrenzten Sauerstoffzufuhr, die zu einer vollständigen Verbrennung zu CO<sub>2</sub> führt. Evident werden auch andere reaktive organische Substanzen nicht in ausreichenden Mengen freigesetzt.

Im Gegensatz zu MOX-Sensoren reagieren die Feinstaubsensoren auf die Präsenz von kleinen Partikeln und können somit Rauch detektieren.

### 4.2 Detektionsweite

Im Folgenden werden Faktoren betrachtet, die den Abstand, an dem ein Waldbrand erkannt werden kann, beeinflussen können.

### **4.2.1 Wind**

Da die Rauchpartikel im Vergleich zu den Gasmolekülen sehr langsam diffundieren, werden sie überwiegend von Luftströmungen getragen. Somit hat die Windstärke und die Windrichtung einen großen Einfluss auf die Geschwindigkeit und Abstand der Branderkennung. Dennoch hängt auch die Richtung der Waldbrandausbreitung stark ebenfalls stark vom Wind ab. Demzufolge wird ein auf den Standort des Sensors zubewegende Waldbrand immer detektiert.

### **4.2.2 Installationshöhe des Sensors**

Da die Rauchpartikeln vom Wind getragen werden, ist es sinnvoll das Sensor-modul in großer Höhe zu montieren, da der Luftstrom dort nicht so stark von der Vegetation gehindert wird, als in Bodennähe. Allerdings müssen spezifische Besonderheiten der Vegetationszone beachtet werden. Dazu zählt nicht nur die Geometrie von Bäumen bzw Pflanzen, an den das Modul installiert wird, sondern auch die erwarteten Eigenschaften des Waldbrandes. Insbesondere ist die Vegetationsschicht, in der sich die Waldbrände überwiegend ausbreiten, von Bedeutung.

## **4.3 Messungen der Kommunikationsweite**

Neben den Hintergrundkonzentrationen vom Feinstaub wurde auch die Kommunikation über LoRaWAN im Wald getestet. Die erwartete Kommunikationsweite hat sich bestätigt: das Sensormodul war in der Lage, Messdaten an das Servermodul in der Entfernung von über 1.5 km störungsfrei zu senden.

## 5 Zusammenfassung

Wie es in der Einleitung bereits angedeutet wurde, war das Ziel des Projektes die Entwicklung eines Systems, mit dem Privatpersonen ein eigenes Frühwarnsystem für Waldbrände bereitstellen können. Im Laufe des Projekts wurde eine optimale Sensortechnologie ausgesucht und in realitätsnahen Bedingungen getestet. Außerdem wurde die gesamte Elektronik und Software entwickelt, die für die Datenaufnahme vom Sensor, Auswertung und Benachrichtigung des Benutzers zuständig ist, entwickelt. Letztlich wurde auch die Kommunikationsweite des ausgewählten Kommunikationsverfahrens befriedigend getestet. Allgemein erfüllt das entwickelte Gerät alle Anforderungen der vorgesehenen Anwendung.

Selbstverständlich existieren Aspekte, die weiterentwickelt werden. Auf der einen Seite wird das Gehäuse kompakter, robuster und ästhetischer gemacht. Auf der anderen Seite wird die vollständige Benutzeroberfläche entwickelt, die neben der Benachrichtigung über detektierten Waldbrand eine bequeme Abfrage des Zustandes von einzelnen Sensormodulen, wie z. B. Batterieladung. Des Weiteren können Änderungen der Einstellungen durch den Benutzer implementiert werden. Insbesondere bietet sich an, die Änderung der Grenzwertkonzentration durch Benutzer zu ermöglichen, damit Sensor an die Besonderheiten der Luft am Ort der Installation angepasst werden kann.

## Literatur

- [1] Bildquelle: <https://www.airnow.gov/index.cfm?action=airnow.mapsarchivedetail&domainid=2&mapdate=20180801&tab=1>
- [2] Luftqualitätsskala  
<https://www.airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi#unh>
- [3] <https://www.bbc.com/news/50986293>  
15.01.2020 Konsequenzen der Waldbrände in Australien für Tieren
- [4] <https://sciencebrief.org/briefs/wildfires>  
20.01.2020, Klimawandel als die Ursache von Waldbränden heute und in der Zukunft
- [5] [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/fires/main/missions/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/fires/main/missions/index.html)  
20.01.2020, Informationen über Satelliten, die zur Überwachung von Waldbränden eingesetzt werden
- [6] [https://www.all-in.de/kempton/c-lokales/luftbeobachter-im-oberallgaeu-helfen-dabei-waldbraende-frueh-zu-erkennen\\_a5008269](https://www.all-in.de/kempton/c-lokales/luftbeobachter-im-oberallgaeu-helfen-dabei-waldbraende-frueh-zu-erkennen_a5008269)  
21.02.2020, Einsatz von Hubschrauber zur Überwachung von Waldbränden in Deutschland
- [7] Fotografie von Sebastian Höffner, Universität des Saarlandes
- [8] <https://www.baumkunde.de/haeufigste-baeume-deutschland.php>  
13.12.2019, Informationen über die häufigsten Baumarten in Deutschland
- [9] [https://www.sensirion.com/fileadmin/user\\_upload/customers/sensirion/Dokumente/0\\_Datasheets/Particulate\\_Matter/Sensirion\\_PM\\_Sensors\\_SPS30\\_Datasheet.pdf](https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/0_Datasheets/Particulate_Matter/Sensirion_PM_Sensors_SPS30_Datasheet.pdf)  
Datenblatt des Feinstaubsensoren Sensirion SPS30

## I.9 Facharbeit: Regulieren Bienen CO<sub>2</sub>?



Teilnehmerinnen: Svenja Groß (18) und Janina Boullay (18)

Erarbeitungsort: Geschwister-Scholl-Gymnasium Lebach

Projektbetreuer: Martin Wörner und Sebastian Höfner

Thema des Projektes: Regulieren Bienen CO<sub>2</sub>?

Fachgebiet: Biologie

Wettbewerbssparte: Jugend forscht

Bundesland: Saarland

Wettbewerbsjahr: 2020

## **Kurzfassung**

In unserer Arbeit wollten wir die in verschiedenen Studien aufgestellte These, dass Bienen auf CO<sub>2</sub> reagieren und es regulieren können, überprüfen. Hierzu haben wir zwei Beuten, eine mit Bienen und eine ohne, mit Sensoren ausgestattet. Die Messungen in der leeren Beute dienen als Kontrolle. Die Sensoren messen CO<sub>2</sub>, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Temperatur, Feinstaub und TVOC. Dadurch wollten wir vorerst testen, ob eine Abhängigkeit zwischen CO<sub>2</sub> und anderen Umweltfaktoren besteht. Schließlich haben wir CO<sub>2</sub> in den Stock eingeleitet, um zu testen, ob die Bienen CO<sub>2</sub> regulieren. Währenddessen haben wir die CO<sub>2</sub>-Konzentration überwacht. Gleichzeitig haben wir darauf geachtet, ob das Summen der Bienen lauter wurde und ob man Bienen am Stockeingang beobachten konnte. An den Daten, die wir gemessen haben, konnte man sehen, inwieweit die Bienen CO<sub>2</sub> aktiv regulieren können.

## **Inhaltsverzeichnis**

Kurzfassung	2
Einleitung	4
Sensorik und Software	5
Aufbau der Sensoren und Messergebnisse	7
Analyse der bisherigen Ergebnisse	9
Versuch: CO <sub>2</sub> einleiten	12
Ergebnisse	13
Diskussion der Ergebnisse	16
Literaturverzeichnis	17
Unterstützungsleistungen	18

## Einleitung

Anfangs hatten wir uns zum Ziel gesetzt mehr über die Atmung des Bienenvolkes herauszufinden. Hierzu haben wir mithilfe von Sensoren Werte erfasst, Kurven erstellt und ausgewertet. Wir benutzten dafür zwei Beuten, die wir mit Sensoren ausstatteten: eine Beute mit Bienen und eine Beute ohne Bienen als Kontrollwert.

Während unserer Treffen kristallisierte sich jedoch eine andere Fragestellung heraus. Es existieren bereits Studien von Larcher et al. aus dem Jahre 1967 und Seeley et al. aus dem Jahre 1974 [1], die belegen, dass Bienen in der Lage sind die  $\text{CO}_2$ -Konzentration zu regulieren, sobald diese einen kritischen Wert erreicht. Wir wollten die These, ob Bienen zur Regulierung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Lage sind, überprüfen. Hierbei half uns der Kontrollwert aus der Beute ohne Bienen, wodurch ausgeschlossen werden konnte, dass andere Parameter den  $\text{CO}_2$ -Wert beeinflussen. Gleichzeitig konnten wir so den normalen  $\text{CO}_2$ -Wert ohne Einfluss der Bienen für den Messstandort ablesen, da die beiden Beuten in äußerst geringer Entfernung zueinander platziert werden. Teil unseres Projektes war ebenso festzustellen, ob eine Abhängigkeit zwischen  $\text{CO}_2$  und einer der anderen Messwerte besteht. Durch die Kurvenverläufe hatten wir bereits die Vermutung, dass die These stimmt. Daher beschlossen wir dies zu überprüfen, in dem wir in einem Versuch  $\text{CO}_2$  in den Bienenstock einleiteten. Hierbei bestand zu keiner Zeit eine Gesundheits- oder Lebensgefahr für die Bienen. Auch in Imkerkreisen findet  $\text{CO}_2$  zur Betäubung der Königin während der künstlichen Besamung Verwendung. Wenn sich wie erwartet bestätigt, dass Bienen  $\text{CO}_2$  regulieren können, könnte dies insofern einen Nutzen haben, da man vergleichen könnte, ob an Standorten mit verschiedener  $\text{CO}_2$ -Belastung dies je nach  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft langfristig einen Einfluss auf Lebenserwartung und Honigqualität hat. Man könnte zum Beispiel Bienenvölker in der Nähe großer Städte, mit denen in eher kleinen Siedlungen mit niedrigem Verkehrsaufkommen vergleichen. Eine Möglichkeit für spätere Jugend-forscht-Teilnehmer könnte es sein zu erforschen, ob Bienen auch auf andere organische Gase, wie zum Beispiel Ethanol reagieren beziehungsweise sie regulieren können.

## Sensorik und Software

Um die Messwerte der verschiedenen Parameter zu erfassen, benutzen wir den Luftqualitätssensor BME680, den CO<sub>2</sub>-Sensor SCD30 und den Feinstaubsensor SPS30. Der Luftqualitätssensor BME680 beinhaltet einen Halbleitersensoren, einen Temperatur-, Luftfeuchtigkeits- und einen Luftdrucksensor.

SCD30 misst ebenso die Temperatur und Luftfeuchte, hat aber noch einen Infrarotsensor inkludiert.

Der Feinstaubsensor misst den Feinstaub in zwei verschiedenen Größen: PM2.5 und PM10. Der PM2.5-Sensor zeichnet den Feinstaub bis zu einer Größe von 2,5µm auf und der PM10-Sensor bis zu einer Größe von 10µm.

Halbleitersensoren basieren darauf, dass Sauerstoff aus der Umgebung eine Bindung mit der Oberfläche des Sensors eingeht. Dadurch werden freie Elektronen im Halbleiter gebunden und stehen somit für den Stromfluss nicht mehr zur Verfügung, wodurch sich die Leitfähigkeit verringert. Reduzierende Gase können eine Bindung mit dem Sauerstoff auf der Oberfläche eingehen und lösen diesen dadurch. Dadurch werden die zuvor gebundenen Elektronen wieder frei und die Leitfähigkeit steigt. Oxidierende Gase hingegen können eine Bindung mit der Sensoroberfläche eingehen, was eine Leitfähigkeitssenkung zur Folge hat.

Je nach Art und Konzentration des Gases sowie Temperatur des Halbleiters unterscheidet sich das Ausmaß der Leitfähigkeitsänderung. Daher kann man, indem man den Sensor auf verschiedene Temperaturen aufheizt und die Leitwertänderung betrachtet, auf den Stoff und die Konzentration schließen [2]. Wir betrachteten mittels Halbleitersensoren die Konzentration von TVOC, welches ein Gesamtwert ist, zudem die verschiedenen VOCs, da sie alle sehr ähnlich reagieren, zusammengefasst werden. TVOC ist die Abkürzung für Total Volatile Organic Compounds. Dies sind zu Deutsch flüchtige organische Verbindungen [3].

Bis zum 22.05.2019 haben wir die Luftfeuchtigkeit und den Luftdruck mit dem BME680 gemessen, danach verwendeten wir für diese beiden Parameter die Messwerte des SCD30. CO<sub>2</sub> wird mit dem SCD30 mittels nicht-dispersivem Infrarot-Sensor gemessen. Hier wird im Gegensatz zu dispersivem Infrarot-Sensoren statt mit wellenlängen-unspezifischen Detektoren mit selektiven Detektoren gearbeitet, die nur bei bestimmten Wellenlängen reagieren. Die Funktionsweise des Infrarot-Sensors beruht darauf, wie viel der Infrarot-Strahlung am Detektor ankommt [4], [5].

Bei den Messwerten des SPS30 wird zwischen Partikeln mit einer maximalen Größe von 2,5µm und 10µm unterschieden. Der Feinstaubsensor enthält einen Ventilator, der aktiv Luft von außen einsaugt und diese über einen Detektor führt. Der Laserstrahl verläuft im 90° Winkel dazu über den Detektor. Wenn sich kleinste Teilchen in der Luft befinden, wie z. B. Feinstaubpartikel, wird der Laserstrahl daran gebrochen und abgelenkt. Durch den Detektor wird diese Ablenkung gemessen. Je nach Größe und Konzentration der kleinen Teilchen in

der Luft unterscheidet sich die Ablenkung des Laserstrahls [6].

„Internet of Things“ ist ein von Kevin Ashton geprägter Begriff, welcher die zunehmende Vernetzung zwischen intelligenten Objekten untereinander sowie mit dem Internet bezeichnet. Diese intelligenten Objekte sind mit Prozessoren und Sensoren ausgestattet, sodass sie via WLAN-Netz miteinander kommunizieren können. Durch eine eigene Internet Protokoll-Adresse, IP-Adresse, kann jedes intelligente Objekt vom Menschen angesprochen werden [7], [8].

Die Sensoren werden in unserem Falle von dem internetfähigen Microcontroller ESP8266 gesteuert und ausgelesen, welcher die Messdaten über eine WLAN-Verbindung an den „ThingSpeak“ Server sendet. Zwischen zwei Messungen beträgt der zeitliche Abstand circa 90 Sekunden. Beginnend mit dem 14.04.2019 nimmt das System, bis auf eine dreitägige Ausnahme aufgrund einer Störung der Internetverbindung, ununterbrochen Messdaten auf. Thingspeak ist eine Open Source Plattform, die es ermöglicht mithilfe des „Internet of Things“ Daten zu sammeln, zu analysieren und zu visualisieren [9].

Wir haben das Programm Matlab verwendet, um Graphen zu erstellen. Dazu gehören zum Beispiel die Graphen zu CO<sub>2</sub> an verschiedenen Tagen sowie CO<sub>2</sub> im Verhältnis zu anderen gemessenen Parametern.

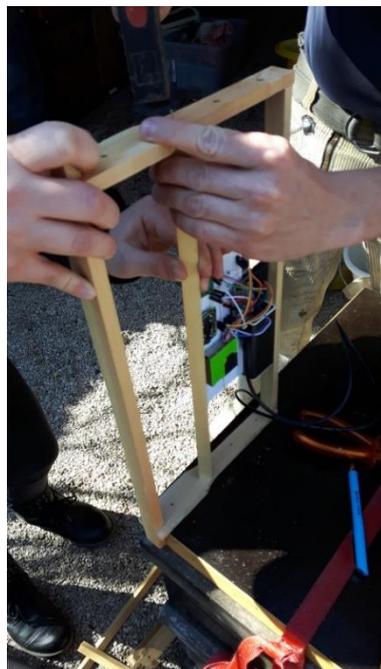
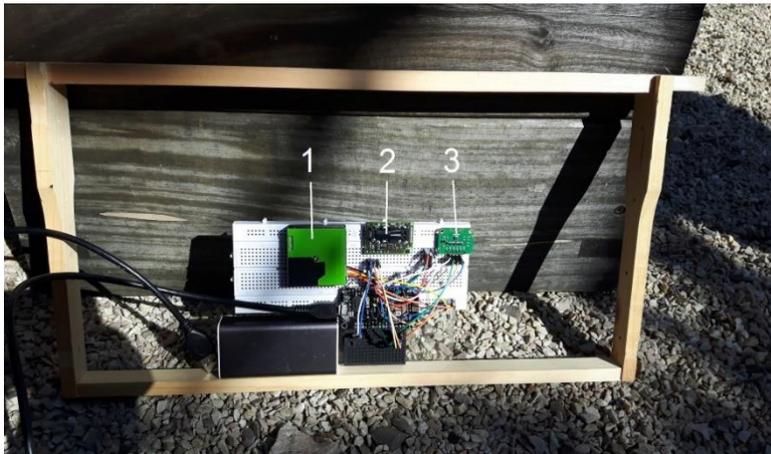
Das Programm Excel haben wir verwendet, um die Kurven für den Versuch zu erstellen, als wir CO<sub>2</sub> eingeleitet haben.

## Aufbau der Sensoren und Messergebnisse

Anfang Januar 2019 haben wir uns zum ersten Mal mit Herr Wörner und Herr Höfner an der Universität in Saarbrücken getroffen, wo Herr Höfner uns eine Einführung in die Funktionsweise von Halbleiter-Gassensoren gegeben hat. Wir haben Versuche mit Wasser, Apfelsaft und Bier gemacht. Dadurch konnten wir sehen, dass man die Sensoren, bevor man sie benutzen kann, erst kalibrieren muss.

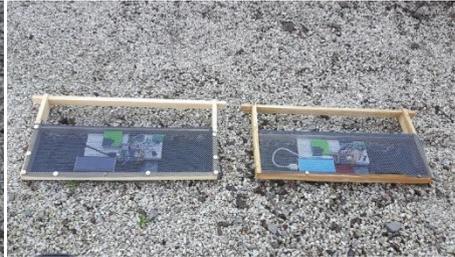
### Abbau des Testes

Der Test sollte zeigen, ob es möglich ist, Daten vom Bienenstock auf die App zu senden. Da das funktioniert hat, wurde der Test wieder abgebaut, damit die richtigen Sensoren alle eingebaut werden konnten. An diesem Tag hat Sebastian uns noch gezeigt, wie und wo man die Daten später herunterladen kann. Dazu hatte er eine Seite erstellt, auf der man für die einzelnen Gase die Daten herunterladen konnte, die dann in eine Excel- bzw. Open-Office-Tabelle eingefügt werden konnten.



### Aufbau des Experimentes

In unserem Experiment vergleichen wir die gemessenen Gase in einer leeren Beute mit denen in einer Beute mit Bienen. Die Gase, die die Sensoren messen, sind Feinstaub (Sensor 1), CO<sub>2</sub>, Temperatur und Luftfeuchtigkeit (Sensor 2) und Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und TVOC (Sensor 3). Zuerst mussten wir ein feinmaschiges Netz am Eingang der leeren Beute befestigen, damit keine Bienen hineinfliegen können. Dann wurden die Waben mit den Sensoren vorbereitet. Die Sensoren, die wir von Sebastian Höfner bekommen hatten, waren an einer Plexiglasscheibe



befestigt. Diese klebten wir an den Rahmen der Wabe. Als nächstes haben wir Holzleisten zurechtgeschnitten.

Daran sollte später das Netz befestigt werden, damit die Bienen die Sensoren nicht zubauen konnten. Auch sollten sich auf der oberen Hälfte des Rahmens noch Waben befinden, damit die Sensoren so gut wie möglich von Bienen umgeben waren. Nachdem wir die Holzleisten an beiden Rahmen festgenagelt hatten, mussten wir das Netz

zurechtschneiden. Dieses haben wir schließlich mit Reißzwecken am Rahmen fixiert. Danach hat Herr Wörner noch Wachs am oberen Teil des Rahmens angeklebt, der in der Beute mit Bienen eingesetzt werden sollte. Das war nötig, damit die Bienen einen Anfang haben, um die



Waben zu bauen.

Nun mussten die fertigen Rahmen noch in die Beuten eingesetzt werden. Der Rahmen in der leeren Beute hing in der Mitte, und auch der andere Rahmen sollte in der Mitte platziert werden, weil sich dort die meisten Bienen aufhalten. Da in der Mitte des Stockes aber die Brut gelagert wird, musste Herr Wörner eine der äußeren Waben herausnehmen, da dort nur Vorräte lagern. Dann haben wir die anderen Waben zur Seite geschoben, sodass in der Mitte Platz für unseren präparierten Rahmen war.



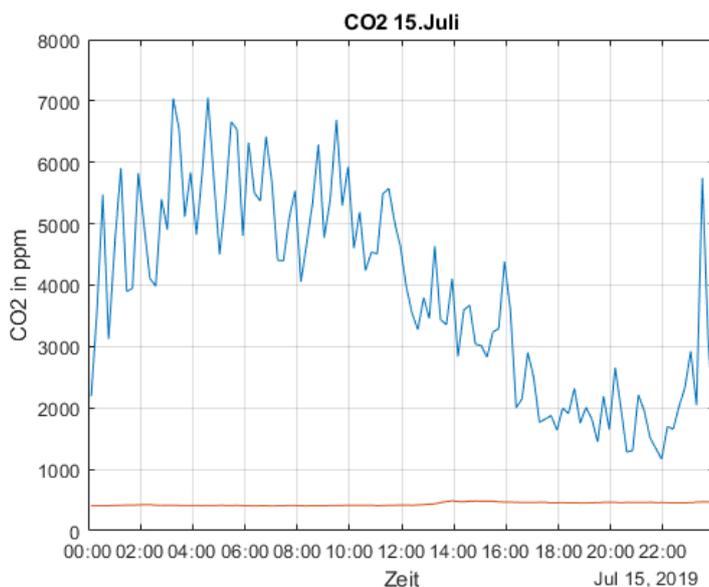
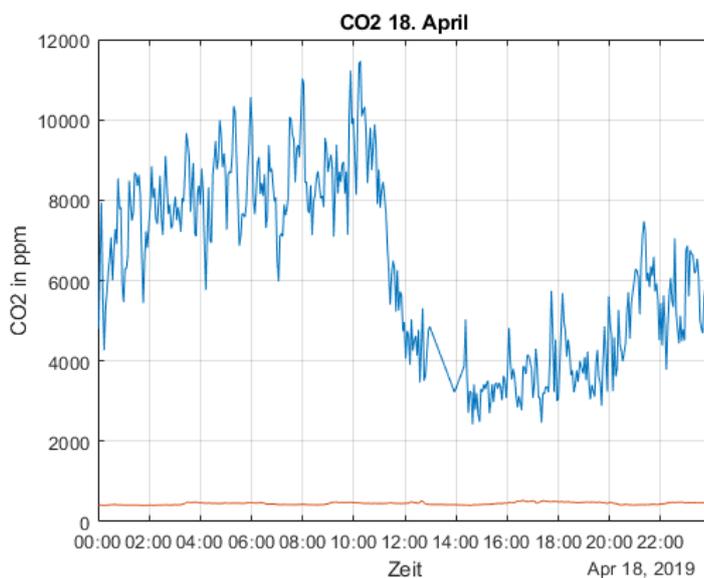
Schließlich wurde das WLAN installiert, damit die Daten der Sensoren gesendet werden konnten. Wir testeten kurz, ob die Daten auch in der App angezeigt wurden. Anfangs funktionierte alles, aber die Powerbanks, die wir zur Stromversorgung eingebaut hatten, hielten nicht lange. Daher entschlossen wir uns, die Sensoren direkt mit Stromkabeln zu verbinden, die durch eine Öffnung im Stock nach draußen führten.

8

## Die Messungen laufen

Da die Brut weiter weg vom Sensor gewandert ist, haben wir die Wabe mit dem Sensor in Richtung Brut um zwei nach rechts verrückt. Daher befindet sich unser Sensor nun in der vierten Wabe von rechts. Außerdem hat Herr Wörner uns erzählt, dass der Schwarm sich am 1. Mai 2019 geteilt hat, wodurch es zu einem kurzzeitigen Temperaturabfall kam. Zudem hat Herr Höfner den CO<sub>2</sub>-Sensor sowie den Feinstaubsensor aus dem leeren Bienenstock entfernt, da dort keine Auffälligkeiten zu sehen waren. Des Weiteren hat Herr Höfner uns gezeigt, wie man mit Excel aus unseren Werten Kurven erstellt, sodass man die Werte interpretieren kann. Bis zu unserem nächsten Termin haben wir aus den Daten Kurven erstellt, um sie auszuwerten.

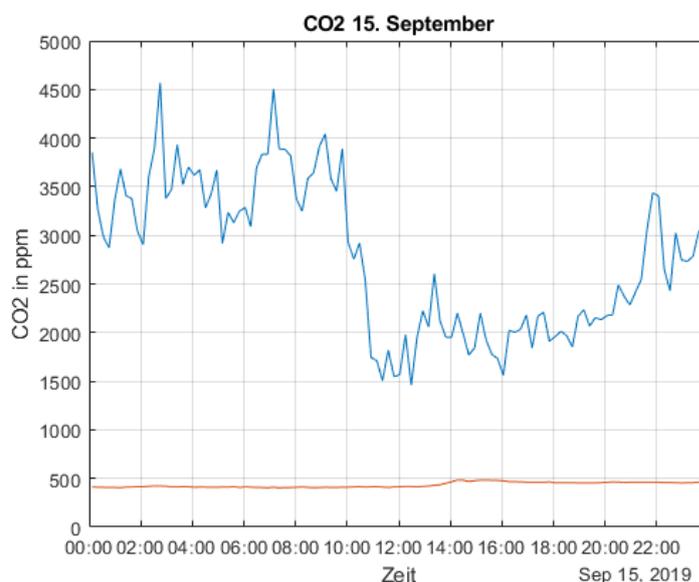
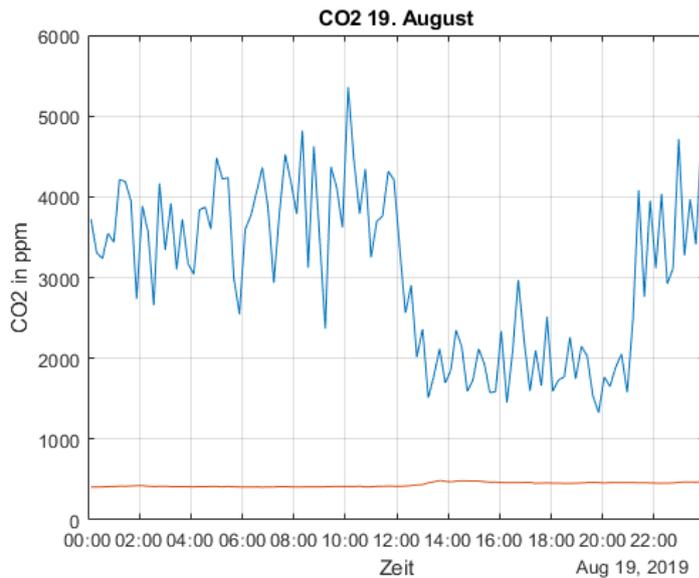
## Analyse der Ergebnisse



Als nächstes haben wir uns bei Herr Wörner getroffen, um die bisherigen Ergebnisse und die erstellten Graphen zu besprechen und zu erklären. Vor allem ging es uns um die CO<sub>2</sub>-Werte, da wir sehen wollten, ob die CO<sub>2</sub>-Konzentration von den Bienen reguliert wird. In unseren Graphen ist der CO<sub>2</sub>-Wert im Bienenstock blau und der gemessene Kontrollwert in der leeren Beute orange.

Zuerst haben wir jedoch überprüft, ob die Kurven der anderen Parameter so aussehen, wie wir es erwartet haben. Da das der Fall war, widmeten wir uns als nächstes den CO<sub>2</sub>-Werten.

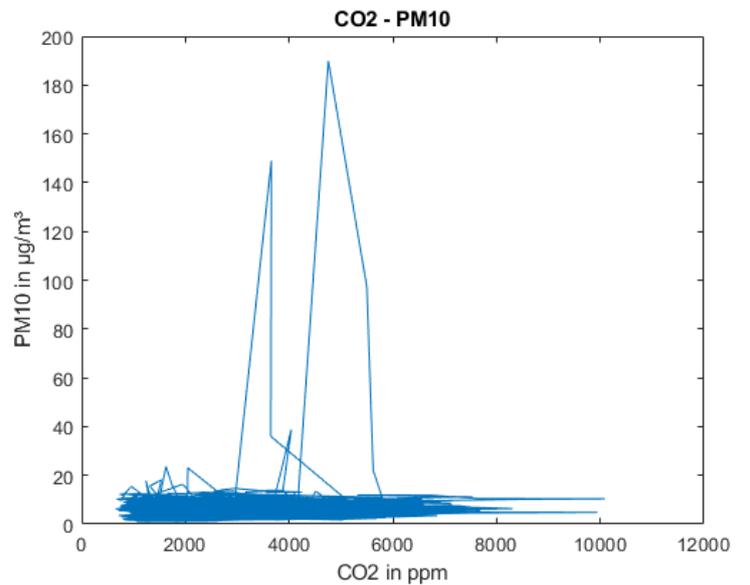
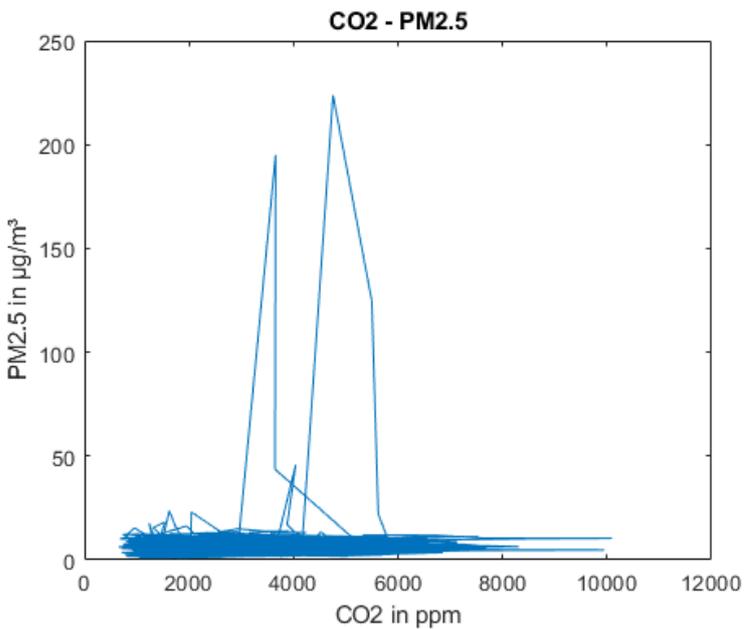
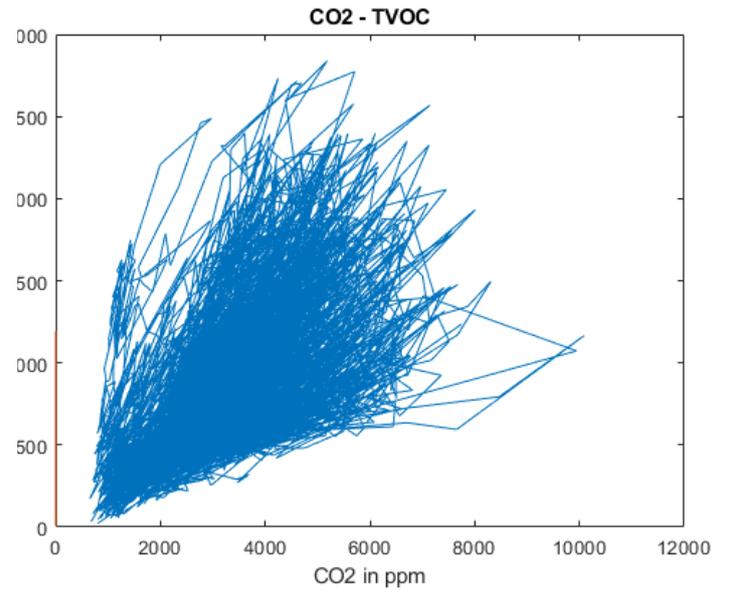
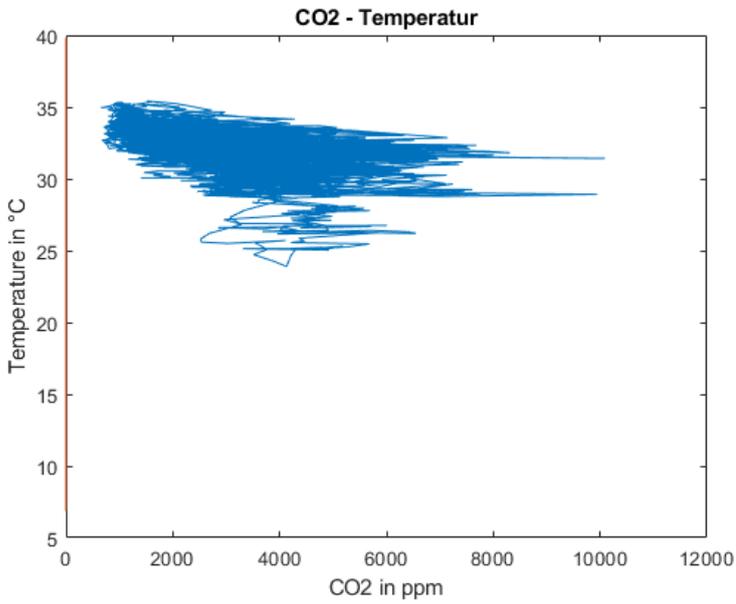
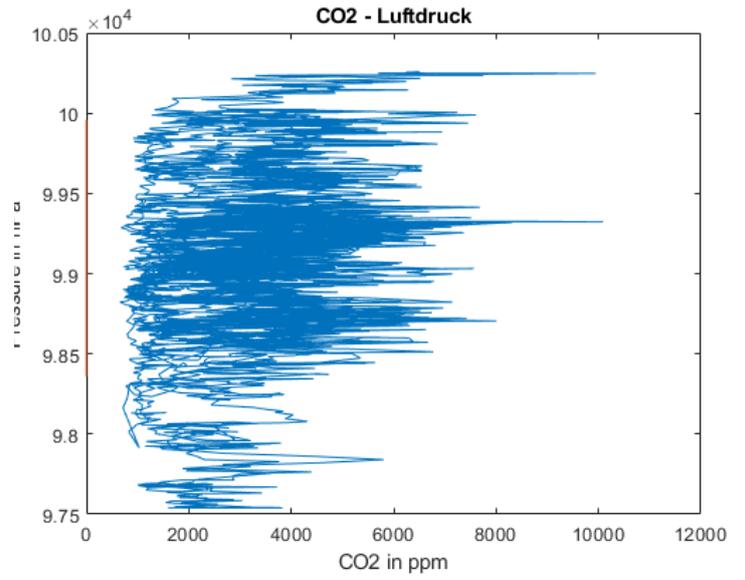
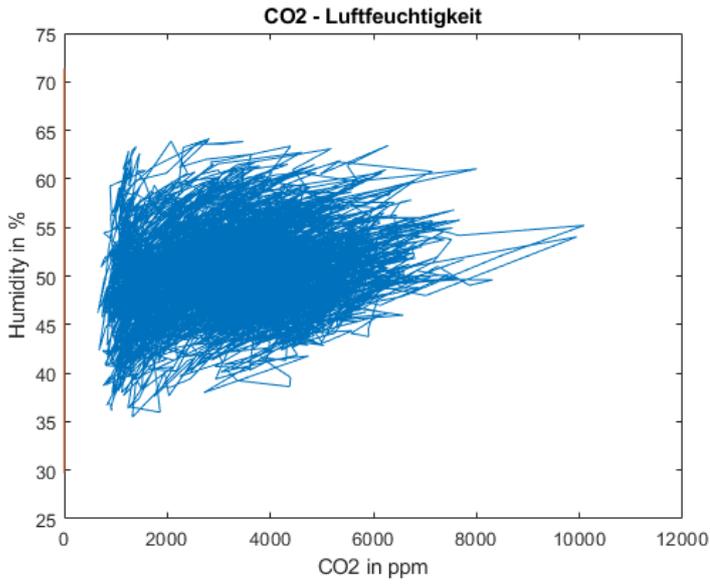
Wir konnten beobachten, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Laufe des Tages ansteigt, aber immer gegen zwölf Uhr abfällt.



Danach steigt sie wieder an. Wir sind nicht sicher, wodurch dieser Abfall ausgelöst wird, aber wir vermuten, dass die Bienen gegen Mittag, wenn es wärmer wird, stärker fächeln müssen, um die Temperatur konstant zu halten. Dabei würde dann auch die  $\text{CO}_2$ -Konzentration sinken. Die Kontrollwerte in der leeren Beute bleiben dagegen recht konstant. Auch kann man immer kleinere Schwankungen im Bienenstock erkennen, die wir als kleine „Atmer“ interpretiert haben. Sie entstehen vermutlich durch das Fächeln der Bienen, wenn sie die Temperatur im Stock regulieren. Unter „Atmer“ verstehen wir die kleinen Extremstellen des

Graphen, beispielsweise gegen drei Uhr und gegen fünf Uhr des Graphen vom 15. September. Durch diese Atmer steigt die  $\text{CO}_2$ -Konzentration immer kurz an und fällt wieder ab, wodurch die „gezackte“ Kurve zu erklären ist. Die Graphen, die wir hier ausgesucht haben, sind aus verschiedenen Monaten, um zu zeigen, dass der Abfall der  $\text{CO}_2$ -Konzentration kein Zufall ist, dass er immer im gleichen Zeitraum stattfindet und dass er nicht von äußeren Verhältnissen abhängig ist. Der Toleranzbereich für  $\text{CO}_2$  umfasst eine weite Spanne, er liegt zwischen 1000 und 12000 ppm.

Dass die  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Bienenstock nicht von anderen Verhältnissen abhängig ist, konnten wir mithilfe der anderen gemessenen Parameter beweisen. Wir haben mit dem Programm Matlab Graphen erstellt, die jeweils  $\text{CO}_2$  mit jedem der anderen Parameter abbildet. Es entstanden die Graphen auf der folgenden Seite. Wäre eine Abhängigkeit vorhanden, dann müsste eine Kurve erkennbar sein. Da aber bei keinem der Parameter mit  $\text{CO}_2$  eine Kurve erkennbar ist, können wir davon ausgehen, dass keine Abhängigkeit besteht.



Als Nächstes wollten wir also testen, ob die Bienen auch wirklich aktiv den CO<sub>2</sub>-Gehalt steuern.

### Versuch: CO<sub>2</sub> einleiten



Nachdem wir anhand der Kurven angenommen haben, dass Bienen die CO<sub>2</sub>-Konzentration regulieren können, wollten wir, um dies zu überprüfen, CO<sub>2</sub> in den Bienenstock einleiten. Dieser Versuch ist essenziell, da die Abfälle der CO<sub>2</sub>-Konzentration grundsätzlich auch mit der Temperatur zusammenhängen könnten. Es wurde darauf geachtet, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration 4% nicht überschreitet. Die

Materialien hierzu brachte uns Herr Höfner von der Universität des Saarlandes mit. Mithilfe eines Ventils stellten wir ein, wie viele Liter CO<sub>2</sub> pro Minute in den Bienenstock eingeleitet werden sollten, was wir wiederum an einem Durchflussmesser ablesen. Des Weiteren benötigten wir einen Druckminderer sowie die CO<sub>2</sub>-Flasche. Der Druckminderer verhindert hierbei die explosionsartige Entleerung der CO<sub>2</sub>-Flasche.



Angefangen haben wir mit einer Dosis von einem halben Liter pro Minute, welche wir im Laufe des Versuchs auf bis zu zwölf Liter pro Minute erhöht haben. Testweise haben wir zuerst CO<sub>2</sub> in den leeren Bienenstock mit dem Kontrollsensor eingeleitet. Wir haben erst den Schlauch nur an einer Stelle in den Bienenstock gesteckt. Nachdem



uns auffiel, dass sich das CO<sub>2</sub> so nicht überall verteilen konnte, versahen wir den Schlauch mit Löchern, die wir mit Reißbrettstiften machten. Den

Schlauch legten wir so in den Bienenstock, dass CO<sub>2</sub> so gleichmäßig wie möglich im gesamten Stock verteilt werden konnte.

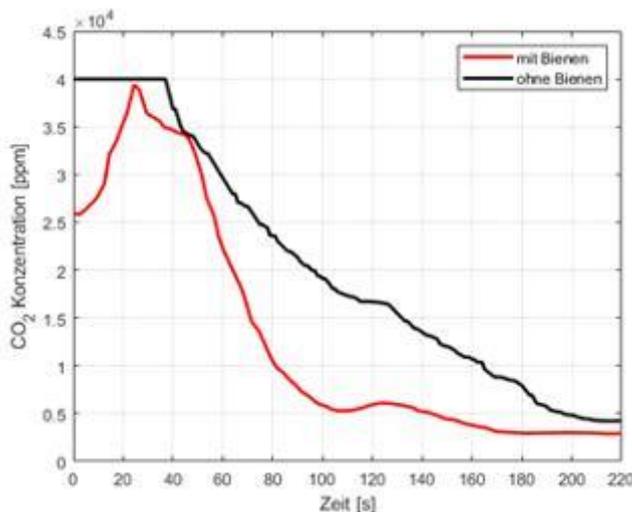


Äußerlich konnte man erst nur das Summen der Bienen wahrnehmen, welches sich mit steigendem Einflussstrom intensivierte. Bei acht Liter pro Minute konnten wir eine Biene beobachten,

die am Stockeingang fächelte. Bei höherer  $\text{CO}_2$ -Konzentration konnte man sehen, dass sich auch die Anzahl der fächelnden Bienen am Stockeingang vergrößerte. Da wir außer dem Parameter  $\text{CO}_2$  nichts änderten, ist davon auszugehen, dass Bienen in der Lage die  $\text{CO}_2$ -Konzentration zu regulieren.

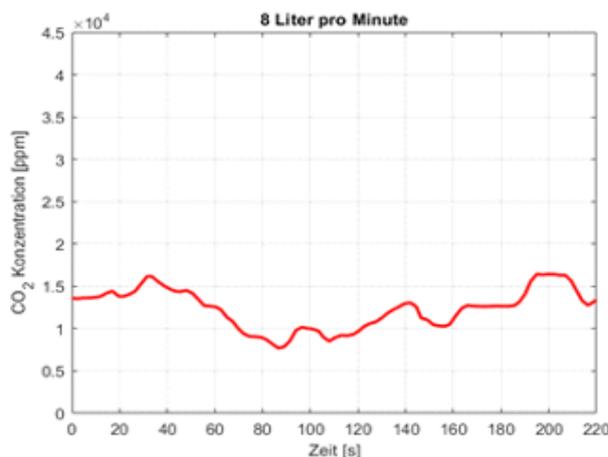
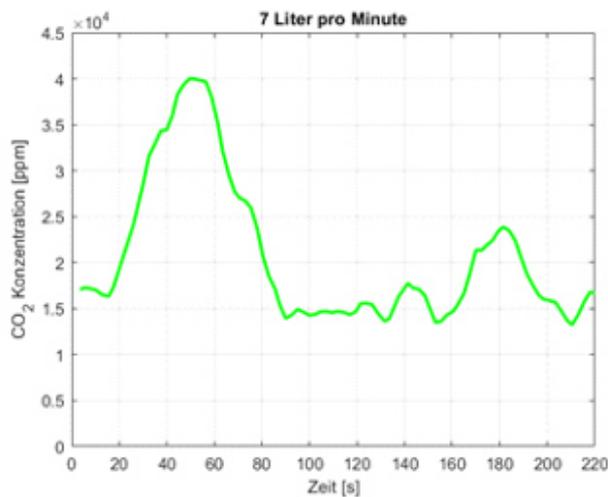
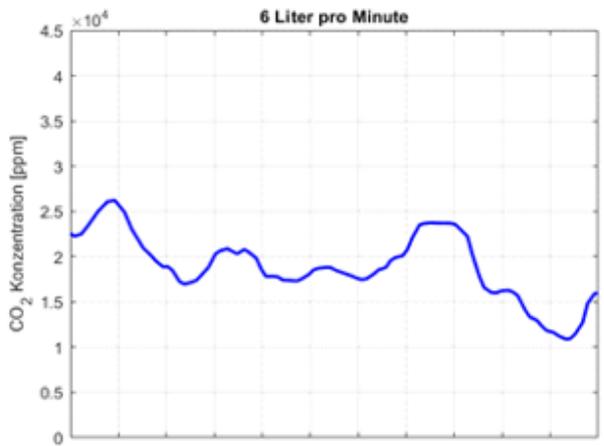
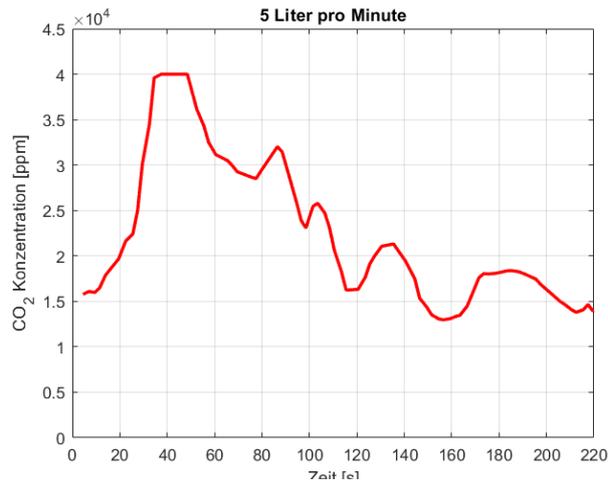
[Fächelnde Bienen sind mit den Zahlen 1 und 2 markiert]

## Ergebnisse



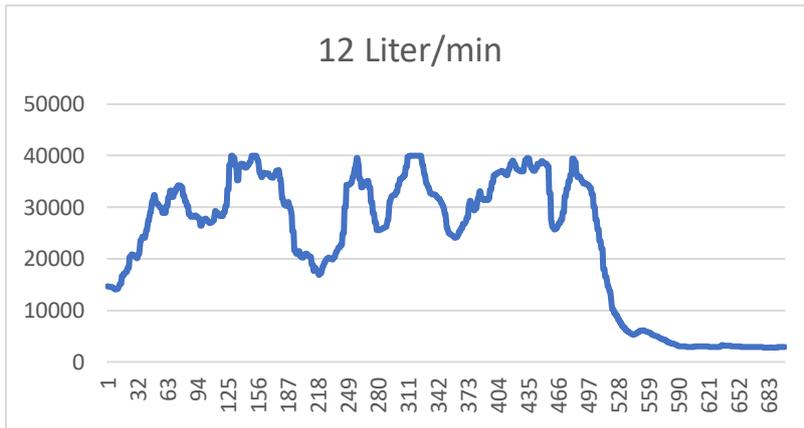
Durch Analyse der erstellten Graphen konnten wir weitere Aussagen machen. Die erste Abbildung zeigt die  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Vergleich bei der Beute mit Bienen und der Beute ohne Bienen bei einer  $\text{CO}_2$ -Einflussrate von 1l pro Minute. Hier kann man erkennen, dass schon anfangs die Kurve ohne Bienen stagniert und erst ab 39 Sekunden

abfällt, wohingegen die mit Bienen erst bis zur circa 25. Sekunde unregelmäßig ansteigt und dann beginnt zu fallen. Die Kurve von der leeren Beute fällt zu Beginn stärker ab, hat danach aber kaum bemerkenswerte Änderungen im Kurvenverlauf. Bis zur circa 45. Sekunde fällt die Kurve schon relativ stark, wobei der Abfall sich dann noch einmal intensiviert und erst ab der circa 110. Sekunde gebremst wird. Gegen Ende unserer Kurven ist die  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Kurve aus der Beute mit Bienen etwas unter der ohne Bienen. Bei unseren Beobachtungen muss berücksichtigt werden, dass in der Beute ohne Bienen mehr Volumen zur Ausbreitung des  $\text{CO}_2$  zur Verfügung steht, wohingegen sich in der Beute mit Bienen diese darin befinden sowie die bebauten Waben. Dennoch kann man mit der Kurve bestätigen, dass Bienen in der Lage sind auf  $\text{CO}_2$  zu reagieren.



Bei der Einflussrate von 5l pro Minute steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration bis zur circa 35./36. Sekunde auf 40.000ppm an, stagniert kurz und fällt ab der circa 50. Sekunde wieder ab. Hierbei lassen sich kleine Maxima erkennen, vermutlich versuchten die Bienen so herauszufinden, wie viel sie fächeln müssen, damit die CO<sub>2</sub>-Konzentration wieder in ihren Toleranzbereich fällt.

Bei 6l pro Minute steigt die Konzentration nicht mehr so hoch an, sondern nur noch auf circa 2,6/2,7l pro Minute an. Vermutlich haben sich die Bienen schon an den CO<sub>2</sub>-Einflussstrom gewöhnt und reagieren somit schneller oder es haben noch nicht alle Bienen der 5l-Kurve aufgehört zu fächeln. Die Kurve von 7l pro Minute gleicht der Kurve der 5l-CO<sub>2</sub>-Einflussrate. Die Kurve fällt aber zumindest anfangs mit weniger zwischenzeitlichen Erhöhungen ab. Nachdem die Konzentration auf 15.000ppm gefallen ist, steigt sie wieder zwischenzeitlich an, wird aber wieder schnell reguliert, sodass kleinere Maxima entstehen. Diese werden aber wieder schnell reguliert. Bei der 8l pro Minute-Kurve gibt es eher geringere Schwankungen, weil vermutlich die Bienen noch am Fächeln waren. An den anderen Kurven hat man gesehen, dass die Bienen bis zu 8l pro Minute die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Stock noch gut kontrollieren konnten.



Im Gegensatz zu den bisherigen Kurven verzeichnet die x-Achse nun einen Zeitbereich von über 600 Sekunden, wohingegen es sonst immer eine Zeitspanne von 220 Sekunden war, in welcher die Bienen auch immer in der

Lage waren, die CO<sub>2</sub>-Konzentration zu regulieren. Hier bei der 12l-Kurve sind aber nicht wie sonst nur kleinere Maxima zu sehen, sondern die CO<sub>2</sub>-Konzentration steigt immer wieder auf 40.000ppm und sinkt erst wieder durch das Zudrehen des Ventils, welches die CO<sub>2</sub>-Zufuhr steuert. Somit sind Bienen bei einer CO<sub>2</sub>-Einflussrate von 12l pro Minute nicht mehr in der Lage, CO<sub>2</sub> zu regulieren. Zu der Frage, bis zu welcher CO<sub>2</sub>-Einflussrate Bienen CO<sub>2</sub> regulieren können, können wir uns kein Urteil bilden. Wir wissen nur, dass dieser Punkt zwischen 8l pro Minute und 12l pro Minute liegen müsste.

## **Diskussion der Ergebnisse**

Während unserer Arbeit an diesem Projekt sind wir auf verschiedene Schwierigkeiten gestoßen. Zum Beispiel hielten anfangs die Powerbanks für die Sensoren nicht so lange, wie wir dachten. Sie sollten eigentlich drei Tage halten, aber nachdem wir sie donnerstags eingebaut hatten, fielen schon freitags gegen 14 Uhr die Sensoren im Bienenstock aus. Gegen 15 Uhr empfangen wir auch keine Daten mehr aus der leeren Beute. Wir hatten außerdem keine Ersatz-Powerbank, weshalb wir immer Lücken zwischen den Daten hatten, solange die Powerbanks laden mussten. Daher hat Herr Wörner schließlich ein Stromkabel bis zum Stock gelegt, an das wir die Sensoren anschließen konnten.

Auch mussten wir mehrmals den Rahmen mit den Sensoren im Bienenstock umhängen, da die Bienen ihn allem Anschein nach als eine Art Abgrenzung sahen. Sie brachten ihre Brut nicht mehr in der Mitte, sondern eher am Rand unter. So lagerten in der Nähe der Sensoren hauptsächlich Vorräte, was man beispielsweise an der Temperatur erkennen konnte, die etwas niedriger (ca. 32°C) war.

Am 1. Mai 2019 hatte sich außerdem das Bienenvolk geteilt, sodass sich plötzlich nur noch die Hälfte der Bienen in der Beute befand. Dies geschieht häufiger in der Zeit zwischen Mai und Juni, weil die Königin dann sehr viele Eier legt und so das Volk in kurzer Zeit sehr stark wachsen kann. Da nicht zu viele Bienen auf einmal im Stock wohnen können, „schwärmt“ eine Hälfte des Volkes mit der alten Königin aus, während die andere Hälfte mit einer jungen Königin zurückbleibt [10]. Dieses „Schwärmen“ konnte man an den Daten sehen, weshalb wir die Daten vom 1. Mai nicht verwenden konnten.

Trotz der Schwierigkeiten konnten wir in unserer Arbeit beweisen, dass die Bienen die CO<sub>2</sub>-Konzentration in ihrem Stock regulieren können. Zunächst hatten wir ja wegen des regelmäßigen Abfalls der CO<sub>2</sub>-Konzentration gegen 12 Uhr die Vermutung, dass sie dazu fähig sind. Unser Versuch, in dem wir CO<sub>2</sub> eingeleitet haben, zeigte, dass die Bienen aktiv CO<sub>2</sub> aus ihrem Stock fächeln und somit auch fähig sind, zu bemerken, wenn zu viel CO<sub>2</sub> vorhanden ist. Nur so können sie wissen, dass sie aktiv etwas unternehmen müssen. Auch ist es interessant, dass sie hier ebenfalls zusammengearbeitet haben, da man mehrere Bienen am Stockeingang beobachten konnte, die alle in dieselbe Richtung fächelten. Sie wissen also auch, wie sie sich aufstellen müssen, damit das CO<sub>2</sub> aus ihrem Stock herausbefördert wird.

## Literaturverzeichnis

[1] Seeley T.D. (1977) Measurement of nest cavity volume by the honey bee (*Apis mellifera* L.). Behav. Ecol. Sociobiol. 2: 201-227

[2] <http://www.umweltsensortechnik.de/gassensoren/mox-gassensor-funktionsprinzip.html>  
Zuletzt eingesehen am 25.01.20

[3] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/fluechtige-organische-verbindungen#textpart-1>  
Zuletzt eingesehen am 25.01.20

[4] <https://www.sensirion.com/de/umweltsensoren/kohlendioxidsensoren-co2/>  
Zuletzt eingesehen am 25.01.20

[5] <https://www.soselectronic.de/articles/sensirion/der-scd30-ist-mehr-als-nur-ein-ndir-co2-sensor-2152>  
Zuletzt eingesehen am 25.01.20

[6] <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=1447>  
Zuletzt eingesehen am 25.01.20

[7] <https://www.gruenderszene.de/lexikon/begriffe/internet-of-things?interstitial>  
Zuletzt eingesehen am 25.01.20

[8] <http://www.softselect.de/business-software-glossar/ip-adresse>  
Zuletzt eingesehen am 25.01.20

[9] <https://thingspeak.com/>  
Zuletzt eingesehen am 25.01.20

[10] <http://www.bee-careful.com/de/initiative/bienenschwarm/>  
Zuletzt eingesehen am 25.01.20

Alle verwendeten Bilder und Graphiken wurden von uns selbst erstellt.

## **Unterstützungsleistungen**

Bei unserem Projekt haben uns Dr. rer. nat. Martin Wörner, Diplombiologe und Imker, und Sebastian Höfner, Diplomphysiker, tätig am Lehrstuhl für Messtechnik in der Fachrichtung Systems Engineering an der Universität des Saarlandes, geholfen. Herr Wörner hat uns bereits bei der sinnvollen Eingrenzung unseres Themas hinsichtlich Machbarkeit unterstützt, Herr Höfner haben wir hinzugezogen, als feststand, dass wir Messwerte aufzeichnen wollen. Er hat uns dann aufgezeigt, welche Messwerte technisch möglich sind. Herr Wörner hat uns zwei seiner Beuten für unser Projekt zur Verfügung gestellt, eine davon mit einem seiner Bienenvölker besiedelt. Durch die Bienen fanden alle Treffen bei Herr Wörner statt und dieser war somit auch immer anwesend. Herr Höfner hat uns insbesondere bei allen technischen Belangen unterstützt, war bei allen Treffen dabei und hat uns die Sensoren bereitgestellt. Das Drahtnetz und den Draht zum Absichern der Sensoren gegen mögliches Zubauen der Sensoren stammen von Herr Wörner.

Herr Höfner hat beim Versuchsaufbau kontrolliert beziehungsweise dafür gesorgt, dass die Sensoren Messwerte aufzeichnen. Des Weiteren hat er eine Seite eingerichtet, auf der wir die Messwerte herunterladen konnten und in Excel einfügen konnten. Hier hat er uns auch gezeigt, wie wir die Messwerte herunterladen und einfügen können. Zu einem späteren Zeitpunkt hat er uns erst mit Excel gezeigt wie man Kurven aus den Messwerten erstellt, bei einem anderen Treffen dann, wie dies mit Matlab funktioniert. Hierbei hat Herr Höfner eine Eingabeoberfläche geschaffen, in die wir die Eckdaten wie Datum, Uhrzeit und ähnliches hinzufügen konnten. Er hat uns außerdem die Materialien für den Versuch des CO<sub>2</sub>-Einleitens von der Universität des Saarlandes mitgebracht.

## I.10 Abkürzungen

---

<b>Abk.</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>ams</b>	Austria Mikro Systeme
<b>ANU</b>	Arbeitsgemeinschaft für Natur- und Umweltbildung
<b>ANN</b>	Artificial Neural Network
<b>AQI</b>	Air Quality Index
<b>BNE</b>	Bildung für nachhaltige Entwicklung
<b>CO</b>	Kohlenmonoxid
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlendioxid
<b>CS</b>	Citizen Science
<b>CSS</b>	Cascading Style Sheet
<b>DLR</b>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<b>FFF</b>	Fridays For Future
<b>FTIR</b>	Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie
<b>GC</b>	Gaschromatograph
<b>GC-MS</b>	Gaschromatographie-Massenspektrometrie
<b>GLN</b>	Großer Alternativer Leistungsnachweis
<b>GMA</b>	Gasmischanlage
<b>HTML</b>	HyperText Markup Language
<b>K</b>	Körpergröße
<b>KMK</b>	Kultusministerkonferenz
<b>LeLa</b>	LernortLabor
<b>LoRa</b>	Long Range
<b>LoRaWAN</b>	Long Range Wide Area Network
<b>LPM</b>	Landesinstitut für Pädagogik und Medien
<b>M</b>	Masse
<b>MAK</b>	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration
<b>MFC</b>	Mass Flow Controller
<b>MIT</b>	Massachusetts Institute of Technology
<b>MOX</b>	Metalloxid
<b>MSL</b>	Mobile Assisted Seamless Learning
<b>NDIR</b>	nicht-dispersive Infrarotabsorption
<b>NFC</b>	Near Field Communication
<b>NH<sub>3</sub></b>	Ammoniak
<b>NO<sub>x</sub></b>	Stickoxid
<b>NTC</b>	Negative Temperature Coefficient
<b>O</b>	atomarer Sauerstoff

---

---

<b>O<sub>2</sub></b>	molekularer Sauerstoff
<b>PCR</b>	Principle Component Analysis
<b>PLSR</b>	Partial Least Square Regression
<b>POM</b>	particulate organic matter
<b>ppb</b>	parts per billion
<b>ppm</b>	parts per million
<b>RMSE</b>	Root Mean Square Error
<b>SDG</b>	Sustainable Development Goals
<b>SL</b>	Seamless Learning
<b>SETI</b>	Search for Extra Terrestrial Intelligence
<b>SnO<sub>2</sub></b>	Zinndioxid
<b>SO<sub>2</sub></b>	Schwefeldioxid
<b>SVOC</b>	Semivolatile Organic Compounds
<b>T</b>	Tailenumfang
<b>TVOC</b>	Total Volatile Organic Compounds
<b>UNESCO</b>	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
<b>USA</b>	United States of America
<b>VOC</b>	volatile organic compound
<b>VVOC</b>	very volatile organic compounds
<b>WHO</b>	World Health Organization

---

## I.11 Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 2.1</b>	Mehrdimensionale Betrachtung von „Umweltbewusstsein“. Aus [40] nach [39] .....	7
<b>Abb. 2.2</b>	Beispielfrage zur Ermittlung des Umweltbewusstseins im Teilbereich des Umweltaffekts [31]. .....	7
<b>Abb. 2.3</b>	Beispielfrage zur Ermittlung des Umweltbewusstseins im Teilbereich der Umweltkognition [31]. .....	8
<b>Abb. 2.4</b>	Beispielfrage zur Ermittlung des Umweltbewusstseins im Teilbereich des Umweltverhaltens [31]. .....	8
<b>Abb. 3.1</b>	Entwicklung der Anzahl an Publikationen über CS auf der wissenschaftlichen Online-Datenbank „ScienceDirect“ des Verlags Elsevier [66]. .....	19
<b>Abb. 3.2</b>	Unterschiedliche Ebenen der Partizipation in einem CS-Projekt [51]. .....	19
<b>Abb. 3.3</b>	Entwicklung der Zahl der Geräte, die über IoT miteinander vernetzt sind [79]. .....	26
<b>Abb. 3.4</b>	Links: Internetfähiger Mikrocontroller ESP8266 NodeMCU. Rechts: Arduino IDE zur Programmierung von Mikrocontrollern. ....	27
<b>Abb. 3.5</b>	App "ThingView" zur Visualisierung von Sensordaten auf einem Tablet (links, [82]) oder Smartphone (rechts, [83]). .....	28
<b>Abb. 4.1</b>	Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors. Schematische Darstellung als Struktur- bzw. Bändermodell einer polykristallinen Schicht eines halbleitenden Metalloxid-Halbleiter-Gassensors mit (rechts) und ohne (links) Gasangebot, nach [92] und [95]. ....	34
<b>Abb. 4.2</b>	Qualitativer theoretischer Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit $G$ (links) und des Widerstandes $R$ (rechts) eines MOX-Halbleiter Gassensors im Gleichgewicht in Abhängigkeit von der Sensortemperatur $T$ in Luft (gestrichelte Linie) und in Anwesenheit eines reduzierenden Gases (durchgezogene Linie). Die Diagramme basieren auf Gleichung (4.6) mit unterschiedlichen Bindungsenergien $EB$ nach Gleichung (4.2). .....	35
<b>Abb. 4.3</b>	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 [102]. .....	36
<b>Abb. 4.4</b>	Halbleiter Gassensor AS-MLV-P2. Links: Sensor mit Schutzkappe. Rechts: Mikroskop-Aufnahme ohne Schutzkappe. ....	37
<b>Abb. 4.5</b>	Verlauf der atmosphärischen $CO_2$ Konzentration von 1958 bis 2014, gemessen am Mauna Loa Observatorium auf Hawaii [105]. .....	38
<b>Abb. 4.6</b>	Korrelation zwischen $CO_2$ und TVOC. Messung in einem Klassensaal einer Berufsschule in der Zeit zwischen 0:00 Uhr und 24:00 Uhr. Links: Verlauf der $CO_2$ -Konzentration. Rechts: Verlauf der TVOC-Konzentration. ....	39
<b>Abb. 4.7</b>	Morse-Potential eines anharmonischen Oszillators [110]. .....	40
<b>Abb. 4.8</b>	Mögliche Schwingungszustände eines $CO_2$ -Moleküls mit dazugehörigen Resonanz-Wellenlängen [111]. .....	41

<b>Abb. 4.9</b> Rotations- und Schwingungsübergänge eines CO <sub>2</sub> -Moleküls. ....	41
<b>Abb. 4.10</b> Schwingungs- und Rotationsspektrum eines CO <sub>2</sub> -Moleküls der asymmetrischen Valenzschwingung mit R- und P-Zweig [113]. ....	42
<b>Abb. 4.11</b> Schematischer Aufbau eines Einstrahlsensors [115]. ....	43
<b>Abb. 4.12</b> Qualitatives Strahlungsspektrum eines schwarzen Körpers bei unterschiedlichen Temperaturen. Mit steigender Temperatur verschiebt sich das Maximum der Strahlungsleistung zu kleineren Wellenlängen. ....	44
<b>Abb. 4.13</b> Schematischer Aufbau eines Zweistrahlsensors [115]. ....	45
<b>Abb. 4.14</b> CO <sub>2</sub> Sensor SCD30 der Firma Sensirion mit integriertem Temperatur- und Luftfeuchtesensor. ....	45
<b>Abb. 4.15</b> Größenvergleich verschiedener Partikelarten [119]. ....	46
<b>Abb. 4.16</b> Feinstaubgrenzwerte laut Umweltbundesamt [121]. ....	47
<b>Abb. 4.17</b> Streulichtmessung an einzelnen Partikeln. Eine Lichtwelle kann auf drei Arten mit einem Partikel wechselwirken [103]. ....	48
<b>Abb. 4.18</b> Intensitätsverteilung des Streulichts nach der Streuung an einem Partikel mit unterschiedlichen Streuparameter $\alpha$ in Abhängigkeit des Streuwinkels als Funktion des Beobachtungswinkels relativ zur Richtung des einfallenden Lichtes in der Streuebene. Blau: Parallel zur Streuebene. Rot: Senkrecht zur Streuebene [125]. ....	49
<b>Abb. 4.19</b> Low-cost-Feinstaubsensor SPS30 von Sensirion. Links: geschlossener Sensor. Rechts: geöffneter Sensor. ....	50
<b>Abb. 4.20</b> Prinzipieller Aufbau einer Gasmischanlage [129]. ....	52
<b>Abb. 4.21</b> Schematischer Aufbau eines Gaschromatographen [128]. ....	53
<b>Abb. 4.22</b> Aufbau eines Massenspektrometers mit Quadrupol-Analysator, nach [130]. ....	54
<b>Abb. 4.23</b> Dreidimensionale Darstellung der aus einem GC – MS erhaltenen Signale [130]. ....	54
<b>Abb. 4.24</b> Chromatogramm eines Lackes mit dem Umweltsiegel "Blauer Engel". ....	55
<b>Abb. 4.25</b> Verwendete Proben. V.l.n.r.: Lack mit Umweltsiegel, Lack ohne Umweltsiegel, Kork, emissionsarmer Bodenbelag, Bastelkleber, Sekundenkleber, Filzstift mit Umweltsiegel, Filzstift ohne Umweltsiegel. ....	56
<b>Abb. 4.26</b> Prinzip der Analyse einer Probe auf der Basis der Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) [133]. ....	56
<b>Abb. 4.27</b> Spektrum eines Fourier-Transformations-Infrarot Spektrometers [134]. ....	57
<b>Abb. 4.28</b> Links: Schematischer Aufbau eines Kaskadenimpaktors. Rechts: Detailansicht einzelner Stufen eines Kaskadenimpaktors [103]. ....	58
<b>Abb. 4.29</b> Beispiel eines Gasprofils zur Aufnahme von Trainingsdaten [89]. ....	60
<b>Abb. 4.30</b> Zyklusverlauf bei unterschiedlichen CO-Konzentrationen und einer relativen Luftfeuchte von 40 %. Links: Rohdaten. Rechts: Normalisiert. ....	61
<b>Abb. 4.31</b> Beispiel einer Merkmalsextraktion mittels der Matlab Toolbox DAV <sup>3</sup> E [89]. ....	62

<b>Abb. 4.32</b> Schematischer Aufbau eines ANN mit einer Eingabeschicht, einer verborgenen Schicht und einer Ausgabeschicht.....	63
<b>Abb. 4.33</b> Vorhersage des erstellten mathematischen Modells auf Basis eines ANN, bestehend aus zwei verborgenen Schichten mit je 10 Neuronen, gegen die wahre CO-Konzentration. Schwarze Punkte: Trainingsdaten. Rote Punkte: Validierungsdaten. ....	65
<b>Abb. 4.34</b> Overfitting am Beispiel der Kalibrierung eines Sensors auf verschiedene CO-Konzentrationen. Das mathematische Modell kann die Trainingsdaten gut vorhersagen, versagt jedoch bei Validierungsdaten.....	65
<b>Abb. 5.1</b> Formales, non-formales und informelles Lernen als Teil des lebenslangen Lernens. Die Übergänge sind fließend. Non-formales Lernen ist kann Teile des formalen und informellen Lernens enthalten.....	71
<b>Abb. 5.2</b> Schülerlabor-Atlas des Verbands Lernort Labor (LeLa) [151]. Blaue Vierecke: Mitglieder im LeLa-Verband, grüne Vierecke: Organisation zur Koordination eines regionalen oder überregionalem Schülerlabor-Netzwerks. Weiße Kreise: keine Mitglieder im LeLa-Verband.....	74
<b>Abb. 5.3</b> Erschließung des Themengebiets „Sensoren im Alltag – Physikalische Grundprinzipien alltäglicher Technik“ durch Kontextorientierung, (modifiziert) nach [153]. ....	76
<b>Abb. 5.4</b> Schematischer Aufbau und Komponenten eines vereinfachten Funktionsmodells von MOX-Halbleiter Gassensoren.....	78
<b>Abb. 5.5</b> Schematische Darstellung des Sensorverhaltens ohne äußere Atmosphäre bei niedrigen (links), mittleren (Mitte) und hohen (rechts) Temperaturen. Die Geschwindigkeit der Elektronen steigt mit der Temperatur. Die Gesamtladung bleibt konstant. Dadurch steigt der elektrische Leitwert mit der Temperatur. ....	79
<b>Abb. 5.6</b> Links: Qualitativer Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit eines NTC-Heißleiters. Rechts: Qualitativer Verlauf des elektrischen Widerstands eines NTC-Heißleiters. ....	80
<b>Abb. 5.7</b> Schematische Darstellung des Sensorverhaltens in einer Sauerstoff Atmosphäre bei niedrigen (links), mittleren (Mitte) und hohen (rechts) Temperaturen. Die Geschwindigkeit der Elektronen steigt mit der Temperatur. Gleichzeitig reduziert sich die Zahl der freien Elektronen aufgrund der Bindung von Sauerstoff mit der Oberfläche. ....	81
<b>Abb. 5.8</b> Verlauf des Leitwerts $G$ (links) und des elektrischen Widerstands $R$ (rechts) als Überlagerung zweier gegenläufiger Effekte nach Gl. (5.3), (5.10) und (5.11). Die Geschwindigkeit der Elektronen steigt mit der Temperatur. Gleichzeitig reduziert sich die Zahl der freien Elektronen aufgrund der Bindung von Sauerstoff mit der Oberfläche. ....	82
<b>Abb. 5.9</b> Schematische Darstellung des Sensorverhaltens in einer Sauerstoff Atmosphäre mit reduzierendem Gas bei niedrigen (links), mittleren (Mitte) und hohen (rechts) Temperaturen. ....	83
<b>Abb. 5.10</b> Einfluss eines reduzierenden Gases auf den Leitwert $G$ (links) und den elektrischen Widerstand $R$ (rechts) in Abhängigkeit der Temperatur nach Gl. (5.11) und (5.15).....	84

<b>Abb. 5.11</b> Schematische Darstellung eines temperaturzyklischen Sensorbetriebs. Links: Stationäre und transiente Zustände. Rechts: Widerstandsverlauf über die Zeit, hervorgerufen durch abrupte Temperaturänderungen.....	85
<b>Abb. 5.12</b> Vergleich der qualitativen Vorhersagen der elektrischen Leitfähigkeit $G$ (links) und des elektrischen Widerstandes $R$ (rechts) nach dem physikalischen Sensormodell auf der Basis von Korn-Korn-Grenzen (gepunktete Linie) und dem vereinfachten Sensormodell (durchgezogene Linie) auf der Basis von $G$ . (5.15) und (4.6).....	86
<b>Abb. 5.13</b> 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.....	90
<b>Abb. 5.14</b> 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.....	90
<b>Abb. 5.15</b> Schaltplan der Messplatine.....	91
<b>Abb. 5.16</b> Screenshot des Selbstlernkurses mit Multiple Choice Fragen. Ein Voranschreiten im Kurs ist erst nach erfolgreicher Beantwortung der Fragen möglich.....	92
<b>Abb. 5.17</b> Logarithmische Darstellung des Sensorwiderstands in Anwesenheit von Wasser (blau), alkoholfreiem Bier (rot) und Apfelsaft (grün) bei unterschiedlichen Heizspannungen....	92
<b>Abb. 5.18</b> Screenshot aus dem Selbstlernkurs: Sensoren im Alltag.....	93
<b>Abb. 5.19</b> Comic zur Verdeutlichung der Verschlechterung der Luftqualität im Laufe eines Schultages, sowie der Unfähigkeit der Nase, langsame Verschlechterungen der Luftqualität zu registrieren.....	94
<b>Abb. 5.20</b> Versuchsaufbau für Lernmodul 1. Über Multimeter können eingestellte Heizspannung (links) und Sensorwiderstand (rechts) ausgelesen werden.....	94
<b>Abb. 5.21</b> Absolute Sensorwiderstände (schwarz) im Headspace für drei Testsubstanzen (Wasser, Apfelsaft, alkoholfreies Bier) und Werte relativ zu Wasser (blau) bei Heizspannungen von 1,2 V (125°C, links) und 2,6 V (340°C, rechts), aufgezeichnet 60 Sekunden nach einer Temperaturänderung. Eine Heizspannung von 2,6 V ermöglicht eine bessere Unterscheidung der drei Testsubstanzen.....	95
<b>Abb. 5.22</b> Schematische Darstellung des vereinfachten Sensormodells. Links: ohne Betrachtung der Atmosphäre. Mitte: Sauerstoffhaltige Atmosphäre. Rechts: Sauerstoffhaltige Atmosphäre mit reduzierendem Gas.....	96
<b>Abb. 5.23</b> Charakteristische Verläufe der Sensorreaktion in Anwesenheit von Wasser (blau), alkoholfreies Bier (grün) und Apfelsaft (rot) in Abhängigkeit von der Heizspannung. Links: lineare Darstellung. Rechts: halblogarithmische Darstellung.....	98
<b>Abb. 5.24</b> Schematische Darstellung des vereinfachten Sensormodells bei variablen Sensortemperaturen. Die Geschwindigkeit der freien Ladungsträger steigt monoton mit der Temperatur. Entsprechend steigt die Stromstärke und sinkt der Sensorwiderstand.....	98

<b>Abb. 5.25</b>	Schematische Darstellung des vereinfachten Sensormodells in Anwesenheit einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre und variablen Sensortemperaturen. Bei niedrigen Sensortemperaturen (links) dominiert der Effekt der Erhöhung der Geschwindigkeit der freien Ladungsträger. Bei hohen Temperaturen (rechts) dominiert die Adsorption von Sauerstoff auf der Oberfläche. Bei mittleren Temperaturen (Mitte) gleichen sich diese Effekte aus.....	99
<b>Abb. 5.26</b>	Schematische Darstellung des Sensorverhaltens in einer Sauerstoff Atmosphäre mit reduzierendem Gas bei niedrigen (links), mittleren (Mitte) und hohen (rechts) Temperaturen. ....	99
<b>Abb. 5.27</b>	Entwickelte Hardware zur Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors. Links: Gasvorratskammer mit integrierter Heizplatte und zwei Ventilatoren. Rechts: Messkammer mit integriertem Sensorboard. Der Sensor (BME680) wird über einen ESP32 Mikrocontroller über ein I <sup>2</sup> C Interface gesteuert und ausgelesen.....	103
<b>Abb. 5.28</b>	Screenshot des Selbstlernkurses. Das Bild zeigt den Effekt eines abrupten Temperatursprungs auf das Sensorsignal als Video mit gleichzeitiger Visualisierung der Messdaten.....	104
<b>Abb. 5.29</b>	Screenshot der Kalibrierungssoftware. Links: Hauptmenü. Rechts: Tutorial.....	104
<b>Abb. 5.30</b>	Verdeutlichung der Wichtigkeit einer Kalibrierung. Obwohl die Eichstriche an den Gläsern „0,5 l“ zeigen befindet sich nach dem Füllen der Gläser mit einer „1 l“-Falsche in dieser noch Restflüssigkeit. Die Gläser wurden falsch geeicht bzw. falsch „kalibriert“. ....	105
<b>Abb. 5.31</b>	Kalibrierung eines virtuellen Füllstandthermometers. Links: Thermometer in Eiswasser. Rechts: Thermometer in siedendem Wasser. ....	106
<b>Abb. 5.32</b>	Analogie zwischen der Kalibrierung eines Thermometers und eines MOX-Halbleiter Gassensors. Die ursprüngliche, nicht direkt bestimmbare Messgröße (Temperatur, Gaskonzentration) wird in eine messbare Größe gewandelt. Die anschließende Rücktransformation wird als Kalibrierung bezeichnet. ....	106
<b>Abb. 5.33</b>	Wiederholung des vereinfachten Sensormodells. Die Schüler müssen entscheiden, ob der Einfluss einer Größe X auf eine andere Größe Y gleichsinnig, gegensinnig oder ob keine allgemeine Aussage möglich ist. ....	107
<b>Abb. 5.34</b>	Bestimmung besonderer Merkmale zur Quantifizierung der Kurvenverläufe in Anwesenheit unterschiedlicher Gaskonzentrationen $c_1$ und $c_2$ . V.l.o.n.r.u.: Widerstand kurz vor einem Temperatursprung, Änderung des Widerstands kurz nach einem Temperatursprung, Steigung der Kurven kurze Zeit nach einem Temperatursprung. ....	109
<b>Abb. 5.35</b>	Links: Konzentration als Teilchenanteil. Rechts: „Promille“ (‰), „parts per million“ (ppm) und „parts per billion“ (ppb) als Konzentrationseinheiten. ....	110
<b>Abb. 5.36</b>	Temperaturzyklischer Betrieb. Der blaue Bereich markiert einen Zyklus. Oben: Typische Sensorreaktion in Luft. Unten: Temperaturzyklus mit zwei Hochtemperatur-Plateaus bei 400°C und zwei verschiedenen Tieftemperatur-Plateaus bei 300 °C bzw. 250 °C. ....	111

<b>Abb. 5.37</b>	Schematischer Versuchsaufbau für die Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors auf verschiedene Ethanol-Konzentrationen. V.l.n.r: Gasvorratskammer, Messkammer mit Spritze, Mikrocontroller, Kalibriersoftware. ....	111
<b>Abb. 5.38</b>	Aufnahme von Trainingsdaten und Bestimmung besonderer Merkmale. Oben: Mittlere Muster der Sensorantwort bei bestimmten Konzentrationen. Unten: Vorschau von zwei ausgewählten Merkmalen aus verschiedenen Bereichen des Zyklus. ....	112
<b>Abb. 5.39</b>	Zuordnung besonderer Merkmale zu einer Zielgröße und Erstellung eines mathematischen Modells. Analogie der mathematischen Modellerstellung für ein Alltagsbeispiel (links) und für die Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors (rechts). ....	113
<b>Abb. 5.40</b>	Links: Trainingsdatensatz bestehend aus fünf Masse-, Körpergrößen- und Taillenumfang-Werten. Rechts: Resultierendes lineares Gleichungssystem mit zwei unbekanntem Gewichtungsfaktoren. Dieses ist überbestimmt und besitzt im Allgemeinen keine Lösung. ....	113
<b>Abb. 5.41</b>	Links: Ermittlung der optimalen Kombination von Gewichtungsfaktoren. Rechts: Vorhersage des Datenmodells als Vorschau. ....	114
<b>Abb. 5.42</b>	Vorhersage der Gaskonzentration mit Hilfe eines ANN nach 10.000 Trainingsiterationen mit mehr (links) und weniger (rechts) geeigneten Merkmalen. Die schwarze Linie zeigt das ideale mathematische Modell an. ....	115
<b>Abb. 5.43</b>	Links: Entwickelte Messplatine, bestückt mit dem TVOC Sensor SGP30, dem CO <sub>2</sub> Sensor SCD30 und dem Feinstaubsensor SPS30. Rechts: Sensoren und Messgrößen. ....	117
<b>Abb. 5.44</b>	Doppelseite der unterstützenden Broschüre.....	117
<b>Abb. 5.45</b>	Aufbau der Mess-Software. ....	118
<b>Abb. 5.46</b>	Weltweite CO <sub>2</sub> -Emission (blau, [171]) sowie Anstieg der CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Atmosphäre von 1860 bis 2015 (rot, [105]) . ....	119
<b>Abb. 5.47</b>	Verdeutlichung der Korrelation von CO <sub>2</sub> (rot) und TVOC (blau) im Schlafzimmer bei geschlossenem (10 – 380 Minuten) und geöffnetem (> 380 Minuten) Fenster. ....	119
<b>Abb. 5.48</b>	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 [172]. ....	120
<b>Abb. 5.49</b>	Screenshot der Mess-Software. Station 1 - Test der Sensoren. ....	121
<b>Abb. 5.50</b>	Links: Versuchsaufbau zur Sensormessung in der Station „Ich rieche was, was du nicht reichst“. Rechts: Typische Messkurven der Sensormessung über einen Zeitraum von 60 Sekunden für unterschiedliche Verdünnungen von Ethanol zu Wasser. Die Sensormessung ermöglicht die zuverlässige Bestimmung der Reihenfolge. Die Nase ist nicht in der Lage, die niedrigsten drei Konzentrationen überhaupt wahrzunehmen. ....	122

<b>Abb. 5.51</b>	Vergleich der Einschätzung der TVOC-Emission von Alltagsgegenständen durch die menschliche Nase und den Sensor (geeignete Zuordnung der TVOC-Messung zur Riechskala).....	123
<b>Abb. 5.52</b>	GC-MS-Messungen von Filzstiften. Links: Herkömmlicher Filzstift. Rechts: Emissionsarmer Filzstift mit Umweltsiegel. Zu beachten ist die um den Faktor 10 gestreckte Skalierung des linken im Vergleich zum rechten Diagramm.....	124
<b>Abb. 5.53</b>	GC-MS Messung eines Filzstifts in der Mess-Software. Zu ausgewählten Inhaltsstoffen werden allgemeine Informationen, typische Verwendungsfälle und Gefahrenhinweise angezeigt .....	124
<b>Abb. 5.54</b>	Experiment zur Demonstration des Funktionsprinzips eines auf Lichtabsorption basierenden CO <sub>2</sub> -Sensors. Links: Drei Küvetten mit unterschiedlich stark verdünnter roter Lebensmittelfarbe. Rechts: 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 nahezu verlustfrei .....	125
<b>Abb. 5.55</b>	Links: Schüler in begehbarer Messkammer. Rechts: Verlauf der CO <sub>2</sub> -Konzentration und der TVOC-Konzentration (unten) ohne Lüftung (durchgezogene Linie) und mit Lüftung (gepunktete Linie) .....	126
<b>Abb. 5.56</b>	Experiment zur Demonstration des Funktionsprinzips eines auf Lichtstreuung basierenden Feinstaubensors. Links: Drei 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 umso besser ist es sichtbar. ....	127
<b>Abb. 5.57</b>	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. ....	128
<b>Abb. 5.58</b>	Kurzbeschreibung des MINT-Praktikums zum Thema Gassensorik des Schuljahres 2018/2019 des Max-Planck-Gymnasiums Saarlouis.....	130
<b>Abb. 5.59</b>	Unbekannte, mit Lebensmittelfarbe gefärbte Proben. ....	131
<b>Abb. 5.60</b>	Beispielhafte halblogarithmische Darstellung charakteristischer Kurven der Sensorreaktion in Abhängigkeit der Sensortemperatur von Spülmittel (blau), Cola (rot) und Essig (gelb).....	132
<b>Abb. 5.61</b>	Notenverteilung des „großen alternativen Leistungsnachweises“ im MINT-Praktikum desMax-Planck-Gymnasium in Saarlouis zum Thema Gassensorik im Schuljahr 2018/2019.....	133
<b>Abb. 6.1</b>	Leistungen des Schülers und Hilfestellung durch einen Wissenschaftler/Betreuer bei der Entwicklung eines mobilen CO-Melders. ....	142
<b>Abb. 6.2</b>	Hardware des mobilen CO-Melders mit zwei verschiedenen Mikrocontrollern. Dieser hat die Maße 4 cm x 4 cm und ist mit dem MOX-Halbleiter Gassensors BME680, einem Buzzer,	

<p>einer LED und eine Knopfzelle zur Energieversorgung bestückt. Links: Erste Version mit dem Mikrocontroller ATtiny. Rechts: Überarbeitete Version mit dem Mikrocontroller ATmega328. ....</p>	145
<b>Abb. 6.3</b> Verwendeter Temperaturzyklus für die Kalibrierung eines MOX-Halbleiter Gassensors auf CO. ....	146
<b>Abb. 6.4</b> Gas- und Feuchteprofil zur Aufnahme von Trainingsdaten. ....	146
<b>Abb. 6.5</b> Zyklusverlauf bei unterschiedlichen CO-Konzentrationen und einer relativen Luftfeuchte von 40 %. Links: Rohdaten. Rechts: Normalisiert. ....	147
<b>Abb. 6.6</b> Normalisierte Zyklen bei unterschiedlichen CO-Konzentrationen und relativen Luftfeuchten. ....	148
<b>Abb. 6.7</b> Oben: Durchschnittliche normalisierte Zyklen bei unterschiedlichen CO-Konzentrationen und Bestimmung der Merkmale in definierten Zyklusintervallen. Steigung (gelb), Maximum (blau), Minimum (rot) und Mittelwert (grün).....	149
<b>Abb. 6.8</b> Ermittelte Merkmale bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten und CO-Konzentrationen. V.l.o.n.r.u.: Steigung, Maximum, Minimum und Mittelwert in zuvor definierten Zyklusintervallen. ....	149
<b>Abb. 6.9</b> Verlauf des mittleren quadratischen Fehlers für Trainingsdaten (schwarz) und Validierungsdaten (rot) innerhalb der ersten 300 Sekunden des Trainingsprozesses. Links: Validierungsdatensatz bestehend aus zufälligen 10 % des Trainingsdatensatzes. Rechts: Validierungsdatensatz bestehend aus der Gruppe „20 ppm“. ....	150
<b>Abb. 6.10</b> Vorhersage des erstellten mathematischen Modells auf Basis eines ANN, bestehend aus zwei verborgenen Schichten mit je 10 Neuronen, gegen die wahre CO-Konzentration. Schwarze Punkte: Trainingsdaten. Rote Punkte: Validierungsdaten. Links: Validierungsdatensatz bestehend aus zufälligen 10 % des Trainingsdatensatzes. Rechts: Validierungsdatensatz bestehend aus der Gruppe „20 ppm“.....	151
<b>Abb. 6.11</b> Leistungen des Schülers und Unterstützung durch einen Wissenschaftler/Betreuer bei der Entwicklung eines Waldbrandfrühwarnsystems. ....	155
<b>Abb. 6.12</b> Links: Prinzip des automatischen Waldbrandüberwachungssystems „FireWatch“, welches zusammen vom deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und dem Unternehmen IQ wireless GmbH entwickelt wurde. Rechts: Kamera zur Detektion von Rauchwolken [189]. ....	156
<b>Abb. 6.13</b> Oben: Verbrennung von Blättern und Ästen zur Simulation eines Waldbrandes und Test der Reaktion des Feinstaubensors und des MOX-Halbleiter Gassensors in einer Messkammer. Unten: Reaktion des Feinstaubensors und des MOX-Halbleiter Gassensors bei zwei unterschiedlichen Sensortemperaturen von 350°C und 200°C. Der Rauch wurde nach 20 Sekunden injiziert. ....	157
<b>Abb. 6.14</b> Entwickelte 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. ....	158
<b>Abb. 6.15</b> Prinzip des Waldbrand-Früherkennungssystems. Mehrere Sensor-Nodes werden am Waldrand platziert und können die gemessenen Daten über ein LoRa-Netzwerk weiterleiten. Das Warnsignal wird dann per E-Mail auf einem Smartphone angezeigt.....	158
<b>Abb. 6.16</b> Screenshot des Alarms in Form einer E-Mail auf dem Smartphone bei der Detektion einer erhöhten Feinstaubkonzentration.....	160
<b>Abb. 6.17</b> Leistungen der Schülerinnen und Unterstützung durch Wissenschaftlicher/Betreuer bei der Untersuchung der Luft in Bienenstöcken. Bei der Durchführung der Umweltstudie wurden zunächst die blau markierten Arbeitsschritte („Teil 1“) durchgeführt. Darauf aufbauend wurden die rot markieren Arbeitsschritte durchgeführt („Teil 2“). ....	164
<b>Abb. 6.18</b> Korrelation zwischen der Temperatur innerhalb des Brutkerns in drei Bienenstöcken und der Außentemperatur [194]. ....	165
<b>Abb. 6.19</b> Experimenteller Aufbau. Links: Leerer Bienenkorb als Referenz. Rechts. Bewohnter Bienenkorb.....	166
<b>Abb. 6.20</b> Befestigung der verwendeten Sensoren an einem Bienenrahmen. Der Messaufbau ist durch ein luftdurchlässiges Drahtgeflecht geschützt.....	167
<b>Abb. 6.21</b> Verlauf der Temperatur in einem bewohnten (durchgezogene Linie) und einem leeren (gepunktete Linie) Bienenkorb. ....	168
<b>Abb. 6.22</b> Korrelation zwischen Temperatur innerhalb des bewohnten Bienenkorbs mit der Umgebungstemperatur. Es zeigt sich eine negative lineare Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von - 0,45. ....	169
<b>Abb. 6.23</b> Verlauf der relativen Luftfeuchte in einem bewohnten (durchgezogene Linie) und einem leeren (gepunktete Linie) Bienenkorb. ....	169
<b>Abb. 6.24</b> Korrelation zwischen der relativen Luftfeuchte innerhalb des bewohnten Bienenkorbs mit der Umgebung. Es zeigt sich eine leicht negative lineare Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von - 0,19. ....	170
<b>Abb. 6.25</b> Verlauf der Feinstaubkonzentration PM10 in einem bewohnten (schwarz) und unbewohnten (rot) Bienenkorb. ....	171
<b>Abb. 6.26</b> Verlauf der CO <sub>2</sub> -Konzentration in Bienenkörben mit (durchgezogene) und ohne Bienen (gepunktete Linie). ....	172
<b>Abb. 6.27</b> Detaillierter Verlauf der CO <sub>2</sub> Konzentration innerhalb eines bewohnten Bienenstocks in einem Zeitraum von 48 Stunden. ....	172
<b>Abb. 6.28</b> Experimenteller Aufbau zum Testen, ob Bienen CO <sub>2</sub> aktiv regulieren. Links: CO <sub>2</sub> -Flasche. Rechts: CO <sub>2</sub> wird über einen Schlauch in den Bienenkorb geführt.....	173
<b>Abb. 6.29</b> Verlauf der CO <sub>2</sub> -Konzentration nach Einlass von CO <sub>2</sub> mit den Flussraten 0,5 l/min, 7 l/min und 12 l/min.....	173
<b>Abb. 6.30</b> Reaktion der Bienen auf aktives Einlassen von CO <sub>2</sub> ; Flussraten 5 l/min (links) und 12 l/min	

(rechts). .....	174
<b>Abb. 6.31</b> Verlauf der TVOC-Konzentration in Körben mit (durchgezogene) und ohne Bienen (gepunktete Linie). .....	174
<b>Abb. 6.32</b> Detaillierter Verlauf der TVOC-Konzentration innerhalb des bewohnten Bienenstocks über einen Zeitraum von 48 Stunden. ....	175
<b>Abb. 6.33</b> Verlauf der VOC-Konzentration nach Einlass von mit Ethanol gesättigter Luft mit den Flussraten 0 l/min (oben), 3 l/min (links unten) und 5 l/min (rechts unten). Es ist die unterschiedliche Skalierung der Graphen zu beachten. ....	176
<b>Abb. 6.34</b> Versuchsaufbau zur Messung des Einflusses von Pflanzen auf die Luftqualität. Links: Leere Kontrollkammer. Rechts: Messkammer mit verschiedenen Pflanzenarten.....	178
<b>Abb. 6.35</b> 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 Line) und mit (gepunktete Line) Pflanzen. ....	179
<b>Abb. 6.36</b> Links: 3D-gedruckte Messkammer mit Display und integriertem Luftqualitätssensor. Mitte: Visualisierung der Messdaten auf der Smartphone App „Blynk“. Rechts: Visualisierung der Luftqualitätsdaten als Heatmap. ....	179
<b>Abb. 6.37</b> Überarbeitete Messkammer zur Luftqualitätskartierung. ....	180
<b>Abb. 6.38</b> Kartierung der Luftqualität am Beispiel der Aufnahme der Feinstaubkonzentration. Links: Google Maps Landkarte. Rechts : Feinstaubkonzentrationen als Heatmap in der App „Blynk“. ....	181
<b>Abb. 6.39</b> Feinstaubemission PM25 eines Benziners in einem Abstand von 1 m zum Auspuff. Nach Angaben der Schülerinnen wurde der Motor nach 75 Sekunden ausgeschaltet. ....	182
<b>Abb. 6.40</b> Feinstaubkonzentration am Ende der 6. Schulstunde (12:50 Uhr). In der Stoßzeit zwischen 12:45 Uhr und 13:00 Uhr ist ein leichter Anstieg der Konzentration zu erkennen. ....	182
<b>Abb. 6.41</b> Messung der Feinstaubkonzentration während des Staubsaugens in einer Entfernung von ca. 1 m zum Staubsauger über einen Zeitraum von 10 Minuten. ....	183
<b>Abb. 6.42</b> Messung der Feinstaubkonzentration beim Grillen mit einem Einweggrill. ....	183
<b>Abb. 6.43</b> Messung der Feinstaubkonzentration an Silvester. Um Mitternacht wird der zulässige Grenzwert von 25 µg/m <sup>3</sup> um den Faktor 70 überschritten. Auch im weiteren Verlauf der Nacht bleibt die Konzentration mit ca. 120 µg/m <sup>3</sup> stark erhöht.....	184

## I.12 Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1.1</b> Umweltbildung zum Thema Luftqualität. Um ein Bewusstsein über Luftschadstoffe zu vermitteln muss einerseits Wissen über Schadstoffe und Sensorprinzipien vermittelt werden, und andererseits authentische Lernszenarien entwickelt werden.....	3
<b>Tab. 2.1</b> Statistische Kennwerte für Umweltaffekt, Umweltkognition und Umweltverhalten. Der Wert „Cronbach Alpha“ ist ein Gütekriterium für die interne Konsistenz eines Fragebogens. Ab 0,6 gilt es als akzeptabel, ab 0,7 als befriedigend, zwischen 0,8 und 0,9 als gut [31]......	8
<b>Tab. 2.2</b> Deklaratives, konzeptuelles und prozedurales Wissen in Bezug auf das Thema Luftqualität.....	15
<b>Tab. 4.1</b> Kategorisierung von organischen Verbindungen anhand ihres Siedepunkts [86]......	32
<b>Tab. 4.2</b> Streubereiche in Abhängigkeit des Streuparameters $\alpha$ , sowie die mögliche Auflösung von Partikelgrößen bei Nutzung von sichtbarem Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 500$ nm.....	49
<b>Tab. 5.1</b> Verwendete Lernmedien. Je nach Anforderung werden basieren die Module auf HTML, CSS, JavaScript, Java oder einer Broschüre.....	88
<b>Tab. 5.2</b> Multiple Choice Fragen, wie sich Anzahl und Geschwindigkeit der freien Ladungsträger, sowie Stromstärke und elektrischer Widerstand beim Übergang der Szenarien (1) ohne äußere Atmosphäre, (2) mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre und (3) mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre inklusive reduzierendem Gas ändern. ....	97
<b>Tab. 5.3</b> Multiple Choice Fragen, wie sich die Temperatur des Sensors, die Anzahl und Geschwindigkeit der freien Ladungsträger, die Stromstärke und der elektrische Widerstand beim Übergang der Fälle (a) „niedrige Sensortemperatur“, (b) „mittlere Sensortemperatur“ und (c) „hohe Sensortemperatur“, in den Szenarien (1) ohne äußere Atmosphäre, (2) mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre und (3) mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre inklusive reduzierendem Gas ändern. ....	101
<b>Tab. 5.4</b> Musterlösung der Aufgabe zur Wiederholung der Funktionsweise eines MOX-Halbleiter Gassensors. Legende: $\otimes$ = „keine allgemeine Aussage möglich“, $\oplus$ = „je größer X, desto größer Y“, $\ominus$ = „je größer X, desto kleiner Y“.....	108
<b>Tab. 5.5</b> Testen der Funktionalität der verwendeten Sensoren. Die Schüler überlegen sich selbstständig Prüfmethode, um die Sensoren zu testen und notieren diese in der Broschüre. ....	121
<b>Tab. 5.6</b> Emissionsarme und konventionelle Produkte für die Station „TVOC-Duelle“. ....	123
<b>Tab. 5.7</b> Auswahlthemen im Rahmen des MINT-Praktikums der 9. Klassen des Max-Planck-Gymnasiums in Saarlouis.....	130
<b>Tab. 6.1</b> Symptome einer CO-Vergiftung [178]. ....	143
<b>Tab. 6.2</b> Klinisch-toxische Risikobewertung in Abhängigkeit der CO-Konzentration [177]. ....	144
<b>Tab. 6.3</b> Durchschnittliche Feinstaubkonzentration in einem Wald an drei verschiedenen Messorten mit einem Abstand von jeweils 1,5 km. ....	159

<b>Tab. 6.4</b> Durchschnittliche Feinstaubkonzentration an drei Messorten in 50 m Entfernung von einem Grillplatz .....	160
--	-----

## I.13 Eigene Veröffentlichungen und Vorträge

Jahr	Art	Autor	Titel	Journal / Konferenz / Veranstaltung
2021	Journal Paper	S. Höfner, M. Hirth, B. Brück, J. Kuhn, A. Schütze	Calibration of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors by High School Students	International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE) (2021) 17(4), pp. 4-20, doi: 10.3991/ijoe.v17i04.19215
2021	Journal Paper	S. Höfner, M. Hirth, B. Brück, J. Kuhn, A. Schütze	Modeling of the Function Principle of Semiconductor Gas Sensors for High School Students	International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE) (2021) 17(3), pp. 5-25, doi:10.3991/ijoe.v17i03.19213
2021	Journal Paper	S. Höfner, A. Schütze	Air Quality Measurements and Education: Improving Environmental Awareness of High School Students	Frontiers in Sensors: Sensor Devices (2021), doi:10.3389/fsens.2021.657920
2020	Abschlussbericht	S. Höfner, M. Hirth, B. Brück, J. Kuhn, A. Schütze	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 durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt
2020	Conference Abstract	S. Höfner, A. Schütze, M. Hirth, J. Kuhn, B. Brück	Evaluation of Indoor Air Quality by High School Students	SMSI 2020 - Measurement Science, pp 131 - 132, doi: 10.5162/SMSI2020/B5.3
2020	Conference Abstract	S. Höfner, M. Hirth, B. Brück, J. Kuhn, A. Schütze	Citizen Science for Students: Fundamentals of Gas Sensing and Realization of Environmental Studies	IMCS2020 - The 18th International Meeting on Chemical Sensors, May 10-14, 2020, Montréal, Canada
2020	Vortrag und Poster	S. Höfner, M. Hirth, J. Kuhn, A. Schütze	Gassensorik für Schüler*innen – Entwicklung von Umweltstudien zum Thema Luftqualität	LeLa Jahrestagung 2020, 08.-10.03. 2020, Dresden
2019	Conference Paper, Poster und Vortrag	S. Höfner, A. Schütze	Umweltstudien mit Smartphone für Schüler*innen am Beispiel der Untersuchung der Luft in Bienenstöcken	14. Dresdner Sensor-Symposium, Dresden, 2.-4. Dezember 2019, pp. 148 – 153, doi: 10.5162/14dss2019/P1.12
2019	Conference Abstract und Vortrag	S. Höfner, M. Hirth, B. Brück, J. Kuhn, A. Schütze	Citizen Science für Schüler*innen: Durchführung von Umweltstudien mit Smartphone und mobiler Messtechnik	20. GMA/ITG Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2019, Nürnberg, 25. und 26. Juni 2019
2019	Conference Abstract und Live-Demonstration	S. Höfner, A. Schütze	Gas Sensor System for Environmental Studies and Field Tests	2nd PortASAP Meeting, Varazdin, Croatia, February 12 - 14, 2019
2018	Conference Paper	M. Hirth, S. Höfner, B. Brück, A. Schütze, J. Kuhn	SUSmobil - mobile Schülerumweltstudien mit Gassensoren	GDCP-Jahrestagung 2018 "Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe", Poster P113, 17. - 20. September 2018, Kiel.

<b>Jahr</b>	<b>Art</b>	<b>Autor</b>	<b>Titel</b>	<b>Journal / Konferenz / Veranstaltung</b>
2018	Conference Abstract	A. Schütze, S. Höfner, B. Brück, M. Hirth, J. Kuhn	Citizen Science with Smart Gas Sensors: Air Quality Assessment and Environmental Studies by Students	IMCS 2018, 17th International Meeting on Chemical Sensors, July 15-19, 2018, Vienna, Austria
2018	Vortrag und Poster	S. Höfner, A. Schütze	Projekt SUSmobil: Befähigung und Begleitung von Schülern zur Durchführung von Umweltstudien mit Smartphone und mobiler Messtechnik	LeLa-Jahretagung 2018, 11.-13. März 2018, Kiel
2018	Workshop	S. Höfner	Citizen science with smart gas sensors: air quality assessment and environmental studies by students	COST Action CA15212, workshop WG2: Systematic review on training requirements and recommendations, November 12-13th, 2018, Riga, Latvia



## **I.14 Danksagung**

An erster Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze für die Möglichkeit einer Promotion am Lehrstuhl für Messtechnik und für die sehr gute Betreuung in den letzten 3 Jahren danken.

Herrn Prof. Dr. Rolf Pelster danke ich sehr für die Übernahme des Zweitgutachtens. Weiterhin möchte ich mich bei Benjamin Brück für die sehr gute Zusammenarbeit und vor allem die freundschaftliche Atmosphäre während der gesamten Zeit bedanken. Mein Dank gilt auch den Projektpartnern Herrn Prof. Dr. Jochen Kuhn und Dr. Michael Hirth der AG Didaktik der Physik der TU Kaiserslautern für die gute Zusammenarbeit.

Während meiner Zeit am LMT herrschte stets eine sehr gute Atmosphäre und kollegialer Zusammenhalt. Daher möchte ich meinen aktuellen und ehemaligen Kollegen Henrik Lensch, Julian Joppich, Caroline Schultealbert, Tobias Baur, Tilman Sauerwald, Harald Nagel, Christiana Dabove, Manuel Bastuck und MySa Marschibois danken.

Außerdem möchte ich Nga für alles danken. Ohne dich hätte ich es nicht geschafft.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung bedanken.



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form in einem Verfahren zur Erlangung eines akademischen Grades vorgelegt.

Saarbrücken, 26. Oktober 2020

.....  
(Sebastian Höfner)