

PÄDAGOGISCHE HOCHSCHULE KARLSRUHE

WISSENSCHAFTLICHE ARBEIT IM FACHBEREICH PHYSIK UND TECHNISCHE BILDUNG

Aufbau einer Messstation für Umweltdaten und
Möglichkeiten der Auswertung und Interpretation im
Schulbereich mit dem Ziel der Bildung für nachhaltige
Entwicklung

vorgelegt von:

Julian Benedikt Weingärtner

Matrikelnummer:



Studiengang:

Lehramt WHRS nach Prüfungsordnung 2011
mit den Fächern Physik, Biologie und Technik

Bearbeitungszeitraum:

03. Mai 2019 bis 03. September 2019

Erstgutachter:

Herr Jun. Prof. Dr. Tobias Ludwig

Zweitgutachter:

Herr Dr. Martin Remmele

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Fachwissenschaftliche Hintergründe	4
2.1	Feinstaub	4
2.2	Temperatur	10
2.3	Elektromagnetische Strahlung	16
2.4	Druck	23
2.5	Schall	30
2.6	Luftfeuchtigkeit	35
3	Fachdidaktische Hintergründe	39
3.1	Nachhaltigkeit	39
3.1.1	Die Entwicklung des Nachhaltigkeitsbegriffs	39
3.1.2	Konzepte und Dimensionen von Nachhaltigkeit	43
3.1.3	Bildung für eine nachhaltige Entwicklung	45
3.2	Scientific und Data Literacy	47
3.3	Citizen Science	50
3.4	Schülervorstellungen	52
3.4.1	Umgang mit Schülervorstellungen	54
3.4.2	Schülervorstellungen zum Thema Wetter	56
4	Aufbau der Messstation	58
4.1	Zur Plattform senseBox	58
4.2	openSenseMap	59
4.3	Informationen zu den einzelnen Komponenten der Messstation	60
4.3.1	Sensor-Board 1: Temperatur und Luftfeuchtigkeit	61
4.3.2	Sensor-Board 2: Beleuchtungsstärke und UV-Intensität	61
4.3.3	Sensor-Board 3: Luftdruck	62
4.3.4	Mikrofon-Board	63
4.3.5	Feinstaubsensor	64
4.4	Aufbau der Messstation	66
4.4.1	Standortwahl	66
4.4.2	Gehäuse	66
4.4.3	Energieversorgung	68
4.4.4	Trägerkonstruktion und Aufstellung auf dem Dach	68
5	Ergebnisse der Messungen	71
5.1	Lufttemperatur	72
5.2	Relative Luftfeuchtigkeit	72
5.3	Beleuchtungsstärke und UV-Intensität	72
5.4	Luftdruck	73
5.5	Feinstaubkonzentrationen für PM25 und PM10	74
5.6	A-bewerteter Schalldruckpegel	75

6	Auswertung der Messdaten	76
6.1	Temperatur	76
6.1.1	Abkühlung der Luft bei Nacht	76
6.1.2	Erwärmung der Luft am Tag	78
6.1.3	Temperatur und Beleuchtungsstärke im Tagesgang	78
6.2	Beleuchtungsstärke und UV-Intensität	81
6.3	Luftfeuchtigkeit	82
6.4	Luftdruck und Temperatur	85
6.5	Feinstaub	86
6.5.1	Feinstaub und Luftfeuchtigkeit	86
6.5.2	Feinstaubkonzentration und Schalldruckpegel	89
6.5.3	Beschränkungen bei der Auswertung	91
7	Möglichkeiten der Umsetzung in der Schule	92
	Erklärung zur Arbeit	99
	Literatur	100
	Abbildungsverzeichnis	105
	Abbildungsquellen	107
	Internetquellen	109

1 Einleitung

Es ist mittlerweile Gewissheit geworden, dass der Mensch durch Industrialisierung, Verbrennung fossiler Energieträger sowie durch Abholzung und Zerstörung riesiger Waldflächen Einfluss auf die Klimaentwicklung unseres Planeten und damit auf unsere Lebensgrundlage genommen hat.

Begriffe wie Erderwärmung, Ozonloch und Klimawandel sind in unserer Gesellschaft und auch in den Schulen angekommen. Der Ausstoß von CO₂, die Belastung mit Feinstaub und Ruß sowie die UV-Strahlung werden diskutiert, und der Blick wird gerade von jungen Menschen auf neue und klimaneutrale Technologien gerichtet. Es ist ein Gefühl für die komplizierten und sensiblen Zusammenhänge in Natur und Umwelt entstanden. Nicht zuletzt mit der aktuellen Protestbewegung junger Menschen in Europa „Fridays for future“ zeigen Lernende, dass sie sich in Kenntnis der bereits spürbaren Klima- und Umweltveränderungen für eine Verbesserung und einen nachhaltigen Umgang mit der Natur und ihren Elementen einsetzen und positive Veränderungen erwirken wollen.

Mit dieser Arbeit sollen durch den Bau einer Messstation für Umweltdaten, die Durchführung von Messungen und die Darstellung verschiedener und alltäglicher Parameter aus den Bereichen der Physik und der Meteorologie Zusammenhänge zwischen aufgetretenen physikalischen Größen sowie deren Wechselwirkungen untereinander dargestellt werden.

Durch den Einsatz für Lernende gerade der mittleren Jahrgangsstufen relativ einfach zu bedienender Technik und Messmethoden soll es ihnen ermöglicht werden, Erkenntnisse über physikalische und meteorologische Größen zu erlangen sowie Zusammenhänge herzustellen und abzuleiten. Wenn im alltäglichen Umgang mit Wetter- und Umweltphänomenen bei Lernenden grundsätzliches Wissen über deren Zusammenhänge gefördert und manifestiert werden kann, so können bei heranwachsenden jungen Menschen auch die Erkenntnisse über die sensiblen Gleichgewichte einer intakten Umwelt und die Verantwortung eines Jeden hierfür heranreifen.

Gerade der Einsatz neuer Technologie in der Datenverarbeitung macht es auch in der Schule möglich, große Mengen von Messdaten zu erheben, auszuwerten und darzustellen sowie diese zu verbreiten. Noch vor wenigen Jahren wäre ein entsprechender Einsatz von Technik an Schulen undenkbar gewesen.

Durch das beschriebene Projekt wird es Lernenden ermöglicht, sich entsprechend ihrem Entwicklungsstand mit wissenschaftlichen Themen aus den Bereichen der Datenverarbeitung, der Umwelttechnologie sowie Bereichen Biologie, Geographie, Physik, Mathematik und Technik zu befassen. In Zeiten einer zunehmenden Vernetzung und Verflechtung von Wissenschaft und Technik mit dem alltäglichen Leben steigt auch die Notwendigkeit, die hierfür erforderlichen Kompetenzen zu erwerben und sicher einsetzen zu können.

Mit der vorgelegten Arbeit sollen hierfür Grundlagen aus Fachwissenschaft und Fachdidaktik erarbeitet und aufgezeigt werden.

2 Fachwissenschaftliche Hintergründe

2.1 Feinstaub

In unserem Alltag wird in verschiedensten Zusammenhängen von Staub gesprochen. Doch Staub ist nicht gleich Staub. Es tritt eine Vielzahl verschiedener Stäube auf. Allgemein lässt sich Staub als die „festen Partikel in der Luft“ beschreiben [Schleyer et al., 2013, S. 25].

Es lässt sich eine Einteilung in Grobstaub, Feinstaub und Ultrafeinstaub vornehmen. Ausschlaggebend hierzu ist der aerodynamische Durchmesser der Partikel. Ein Grobstaubpartikel besitzt einen aerodynamischen Durchmesser von über $10\ \mu\text{m}$, während ein Ultrafeinstaubpartikel einen Durchmesser von nur $50\ \text{nm}$ besitzen kann [Schleyer et al., 2013, Vgl. S. 25]. Der aerodynamische Durchmesser eines Partikels bezieht sich hier auf ein ideales kugelförmiges Partikel, das in Luft die selbe Absinkgeschwindigkeit besitzt.

Feinstaub lässt sich erneut nach seinem aerodynamischen Durchmesser aufteilen. Partikel mit einem Durchmesser von $10\ \mu\text{m}$ oder weniger werden in der Gruppe PM₁₀, von englisch particulate matter, zusammengefasst, Partikel mit einem Durchmesser von $2,5\ \mu\text{m}$ oder weniger werden in der Gruppe PM₂₅ zusammengefasst.

Diese Einteilung geht auf die von der Partikelgröße abhängigen Immissionseigenschaften zurück. Werden Partikel verschiedenen aerodynamischen Durchmessers von einem Menschen eingeatmet, so schaffen es 50 % der Partikel mit einem Durchmesser von $10\ \mu\text{m}$ die oberen Atemwege zu passieren. Größere Partikel werden zuvor abgefangen. Bei Partikel mit einem Durchmesser von $2,5\ \mu\text{m}$ schaffen es 50 % bis in die Alveolen vorzudringen.

Die Aufnahme höherer Mengen an Feinstaubpartikeln über einen längeren Zeitraum kann zu schweren gesundheitlichen Schäden führen. So können Luftverunreinigungen, darin miteingeschlossen Feinstaub, Erkrankungen der Atemwege, des Herz-Kreislauf-Systems, neurologische Erkrankungen, Stoffwechselerkrankungen sowie Krebs zumindest beeinflussen [Straff, 2017, Vgl. S. 16 f].

Aus diesem Grund wurden Regelungen für Feinstaubkonzentrationen erlassen. In Deutschland fällt dies unter die Bundes-Immissionsschutzverordnung, kurz BImSchV. Nach §4 39.BImSchV liegt der Grenzwert von PM₁₀ im Jahresmittel bei $40\ \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$, ein Tagesmittelwert von $50\ \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ darf nicht mehr als 35 mal pro Jahr überschritten werden. Nach §5 Abs. 2 39.BImSchV darf seit dem 01. Januar 2015 der Jahresmittelwert von PM₂₅ im Jahresmittel eine Konzentration von $25\ \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ nicht überschreiten [Vgl. gesetz-im-internet.de: 39. BImSchV].

Doch woher stammt der Feinstaub in unserer Luft? Es lässt sich zwischen anthropogenen und nicht-anthropogenen Feinstaubquellen unterscheiden. Anthropogen geschaffener Feinstaub stammt aus Verbrennungsprozessen, der Landwirtschaft oder aus Produkten selbst [Schleyer et al., 2013, Vgl. S. 21].

Benzin, Öl, Gas, Holz und Kohle erzeugen beim Verbrennen in Autos, Privathaushal-

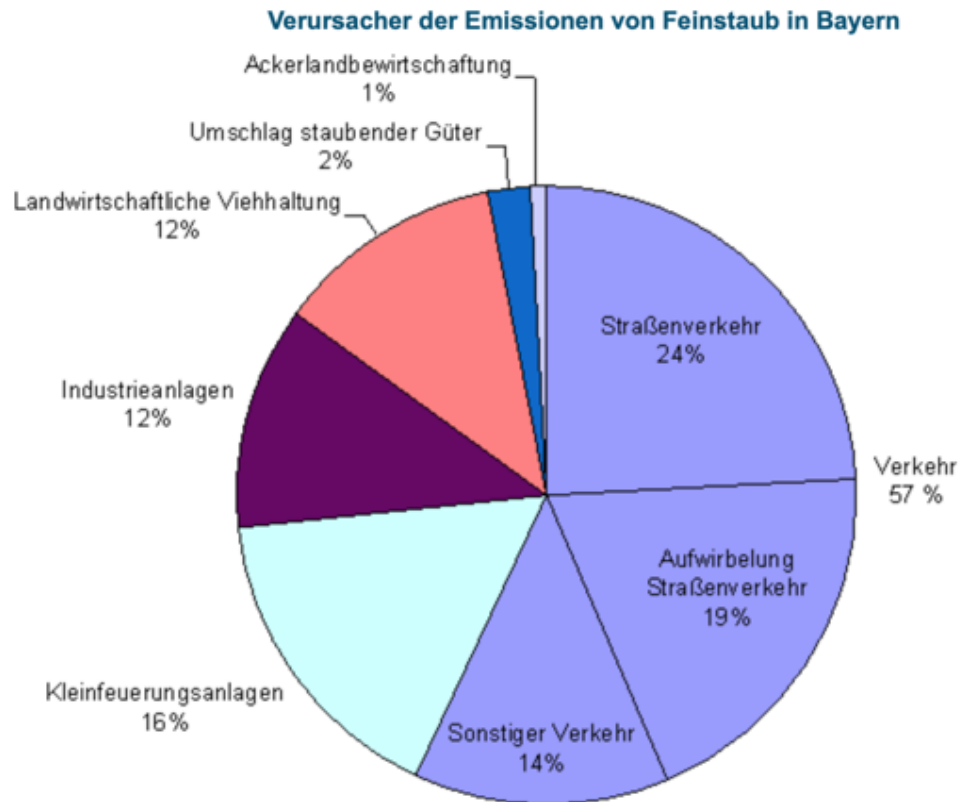


Abbildung 1: Verursacher der Emissionen von Feinstaub in Bayern

ten oder Fabrikanlagen große Mengen an Abgasen, in denen je nach Grad der Reinigung noch hohe Konzentrationen an Feinstaubpartikeln festgestellt werden können.

Eine Untersuchung des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz hat ergeben, dass der Verkehr 57 % des in Bayern emittierten PM10 Feinstaubs ausmacht, ein Anteil von 43 % stammt aus dem Straßenverkehr. Der (Straßen)Verkehr kann somit als ein Hauptverursacher von Feinstaubemissionen ausgemacht werden [Vgl. stmuv.bayern.de: Feinstaub]. Die gesamte Verteilung ist in Abbildung 1 dargestellt. Eine weitere Quelle von Feinstaub im Straßenverkehr sind Abriebe von Reifen, Bremsen etc. [Schleyer et al., 2013, Vgl. S. 21].

Unter „Sonstiger Verkehr“ fallen Wasser-, Luft- und Schienenverkehr. Während die Binnenschifffahrt mit ca. 1,5 % nur einen geringen Teil der deutschlandweiten Feinstaubemissionen (PM10) ausmacht, ist es in erster Linie die internationale Schifffahrt, die in Küsten- und Hafenregionen für einen erheblichen Teil der Feinstaubemission verantwortlich ist [Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2019, S. 5].

Nicht zu vernachlässigen sind Feuerwerke zu Silvester. Nach Angaben des Umweltbundesamtes werden allein in der Silvesternacht in Deutschland ca. 4500 Tonnen Feinstaubpartikel im Größenbereich PM10 freigesetzt [Umweltbundesamt, 2018, Vgl. S. 3 f].

Abbildung 2 des Umweltbundesamtes zeigt den Stundenverlauf der Konzentration

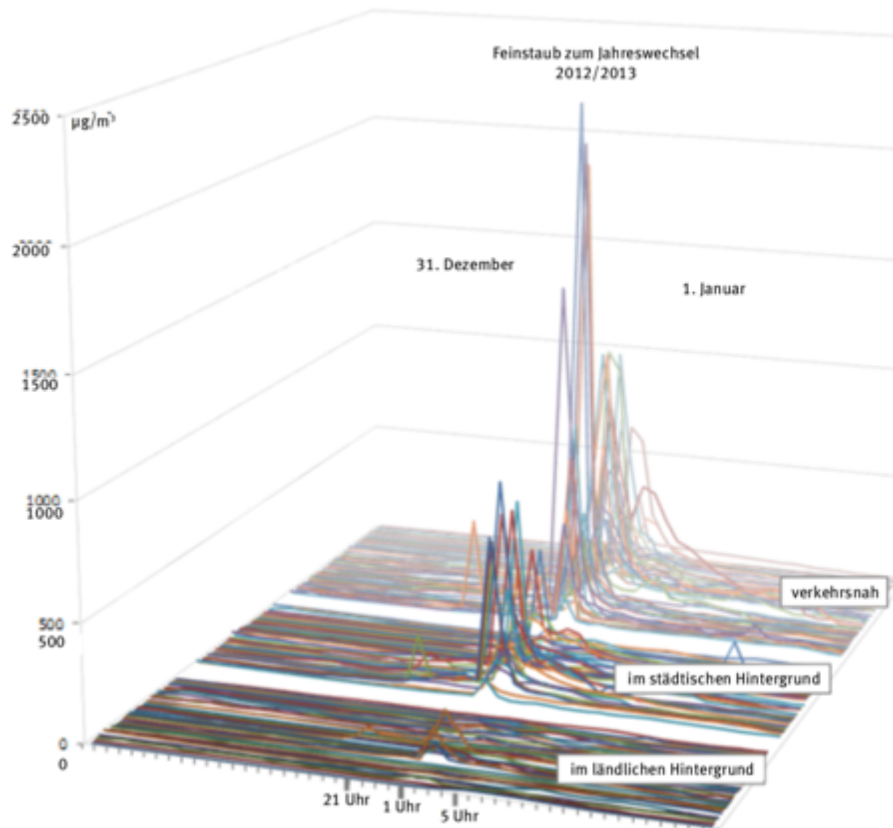


Abbildung 2: Feinstaubbelastung an Silvester

von PM₁₀ Feinstaub deutschlandweit gemessen. Besonders in Städten bleiben die hohen Feinstaubkonzentrationen zum Teil über Stunden erhalten. Auswirkungen darauf haben besonders die Windverhältnisse [Umweltbundesamt, 2018, Vgl. S. 3 f].

Zu hohen lokalen Feinstaubkonzentrationen können Produktion, Gebrauch und Entsorgung von Produkten sorgen [Schleyer et al., 2013, Vgl. S. 21].

Zu den nicht-anthropogenen Feinstaubquellen zählen unter anderem Naturkatastrophen wie Waldbrände oder Vulkanausbrüche, ausgetrocknete Böden und Wüstenregionen sowie Pilze und Pflanzen, deren Sporen und Pollen über den Wind verbreitet werden [Schleyer et al., 2013, Vgl. S. 21].

Eine weitere Unterteilung ist möglich in organische und nicht-organische Partikel. Ein Beispiel für nicht-organische Partikel sind Salze, die über Meeressgicht in die Luft geraten. Organische Partikel werden hingegen oftmals nicht näher betrachtet. Dabei können sie nach Rollins et al. knapp die Hälfte der in der Luft befindlichen Feinstaubpartikel ausmachen [Rollins et al., 2012, Vgl. S. 1210].

Organische Partikel lassen sich nach ihrem Ursprung in primäre und sekundäre Partikel aufteilen. Primäre Partikel werden bereits als Partikel freigesetzt, während sekundäre Partikel erst durch chemische Reaktionen in der Luft entstehen [Rollins et al., 2012, Vgl. S. 1210].

Besonders herauszuheben sind dabei Stickstoff- und Schwefeloxide, die unter anderem bei Verbrennungsprozessen entstehen. Durch weitere Reaktionen, z.B. mit Limonen, entstehen daraus nachweisbare Feinstaubpartikel [Vgl. dkrz.de: Feinstaub].

So kann Stickstoffdioxid (NO_2) mit in der Luft vorhandenem Ozon (O_3) zu NO_3 reagieren. Das Reaktionsprodukt kann im weiteren Verlauf mit NO wieder zu NO_2 reagieren. Diese Reaktion wird durch Sonneneinstrahlung begünstigt. Dadurch sind hohe Konzentrationen von NO_3 besonders nachts zu messen. Außerdem ist die messbare Konzentration in den Sommermonaten deutlich höher. Die Bildung von NO_3 am Tag über andere Reaktionswege kann vernachlässigt werden [Rollins et al., 2012, Vgl. S. 1210 ff].

Nach Rollins et al. kann ein verminderter Ausstoß von Stickstoffoxiden zu einer Verringerung der Konzentration von organischen Feinstaubpartikeln führen [Rollins et al., 2012, Vgl. S. 1212]. Das Deutsche Klimarechenzentrum verweist jedoch darauf, dass entsprechende Produkte in der Luft weite Strecken zurücklegen können [Vgl. dkrz.de: Feinstaub].

Zur Messung von Staubkonzentrationen stehen passive und aktive Messverfahren zur Verfügung. Passive Messverfahren werden zur Untersuchung von Grobstaub eingesetzt. Passiv bedeutet dabei, dass keine Hilfsmittel wie Lüfter eingesetzt werden, eine Stromversorgung ist deshalb nicht notwendig. Ein Beispiel für eine passive Messanlage ist das Sigma-2 Sammelgerät. Zur Messung wird die Eigenschaft der Grobstaubpartikel ausgenutzt, sich in ruhiger Luft abzusetzen. Eingefangene Partikel werden auf einem Klebefilm fixiert. Nach Ende der Sammeldauer werden die Proben mikroskopisch untersucht [Deutscher Wetterdienst, 2015a, Vgl. S. 1 f]. Abbildung 3 zeigt ein Sigma-2 Sammelgerät des Deutschen Wetterdienstes.

Zur Messung und Analyse von Feinstäuben werden aktive Messverfahren eingesetzt. Dabei wird Luft aktiv von einer Pumpe in einen Volumensammler eingesaugt. Dabei werden verschiedene Verfahren eingesetzt: Gravimetrische Messverfahren, Absorptionsverfahren, motorische und optische Messverfahren. Gemeinsam ist allen Verfahren, dass das Luftvolumen, das während der Messung den Aufbau durchströmt, bekannt sein muss.

Bei der gravimetrischen Messung wird Luft in das Messgerät eingesaugt und zunächst gefiltert, sodass Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von mehr als $10 \mu\text{m}$ bzw. $2,5 \mu\text{m}$ (für eine PM_{10} - bzw. PM_{25} -Messung) ausgesondert werden [Deutscher Wetterdienst, 2015b, Vgl. S. 1 f]. Eine entsprechende Filterung kann bereits durch eine geschickte Wahl des Luftwegs innerhalb des Messgeräts erreicht werden. Ein weiterer Filter fängt die Partikel auf und sammelt sie. Typischerweise in einem Rhythmus von 24 Stunden werden die Filter gewechselt und analysiert [Vogel, 2012, Vgl. S. 44 f].

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die gesammelten Partikel weitergehend untersucht werden können. So lassen sich neben Größe und Volumenkonzentration auch Rückschlüsse auf Quelle und Zusammensetzung ziehen. Zudem kann



Abbildung 3: Sigma-2 Sedimentationsammler



Abbildung 4: Messstation Karlsruhe Reinhold-Frank-Straße

die Probe getrocknet werden, um gegebenenfalls. Verfälschungen durch schwankende Luftfeuchtigkeit zu vermeiden. Ein großer Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch, dass die Messung über einen längeren Zeitraum verläuft und manuell ausgewertet werden muss, sodass keine Messungen in Echtzeit möglich sind [Vogel, 2012, Vgl. S. 45].

Dazu kann sowohl das Absorptionsverfahren wie auch das mechanische Verfahren eingesetzt werden. Beim Absorptionsverfahren sendet ein ^{14}C -Strahler Elektronen aus. Mit Hilfe eines Zählers kann bestimmt werden wie hoch der Anteil von Feinstaubpartikeln absorbiertes Elektronen ist, woraus sich die Konzentration der Partikel bestimmen lässt [Vogel, 2012, Vgl. S. 45]. Der Messaufbau kann automatisiert werden und es sind mehrere Messungen pro Tag möglich.

Das mechanische Messverfahren nutzt die Masse der Feinstaubpartikel aus. Ein durch Elektromagneten zu Schwingung angeregtes Röhrchen ist mit einem Filter ausgestattet. Durch die Ablagerung von Partikeln im Filter kommt es zu einer Änderung der Schwingfrequenz. Anhand der Frequenzänderung lässt sich die Masse bestimmen [Vogel, 2012, Vgl. S. 45].

Des Weiteren existieren verschiedene optische Verfahren. Das Grundprinzip der optischen Bestimmung von Feinstaubkonzentrationen basiert auf der Streuung von elektromagnetischer Strahlung an Feinstaubpartikeln, in der Regel wird dazu ein Laserstrahl verwendet. Auf diese Weise lässt sich nicht nur die Volumenkonzentration bestimmen, sondern anhand des Streuwinkels auch die Partikelgröße [Vogel, 2012, Vgl. S. 45]. Auf ähnlichem Wege lässt sich auch die Konzentration verschiedener Abgase in der Luft bestimmen [Vogel, 2012, Vgl. S. 44].

Für die drei zuletzt genannten Verfahren ist bei Verwendung in offiziellen Messstationen eine regelmäßige Kalibrierung vorgesehen. Die zu verwendenden Messverfahren sind durch die Norm DIN EN 12341:2014 geregelt. Zu erwähnen ist allerdings, dass für die offiziell durchgeführten Messungen auf europäischer Ebene eine Unsicherheit

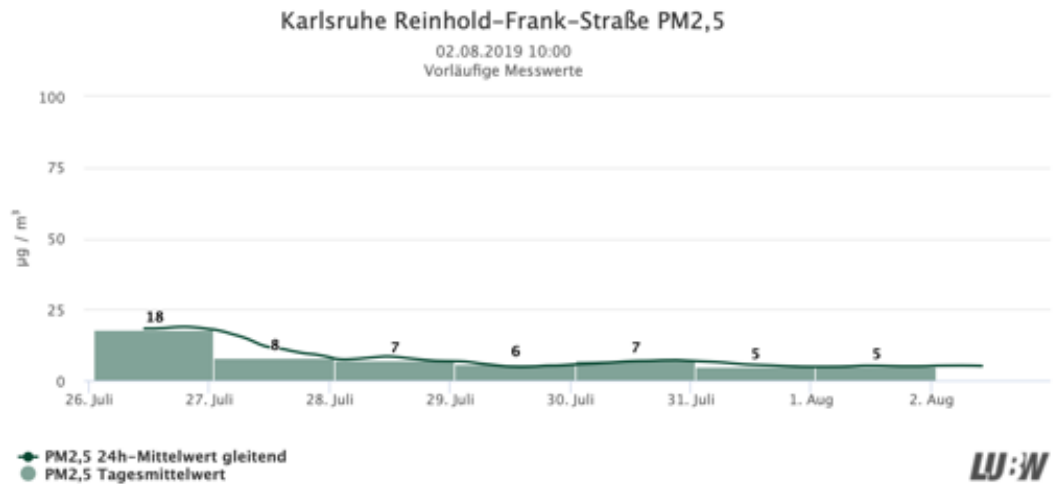


Abbildung 5: Feinstaubkonzentration (PM25) der Messstation Reinhold-Frank-Straße

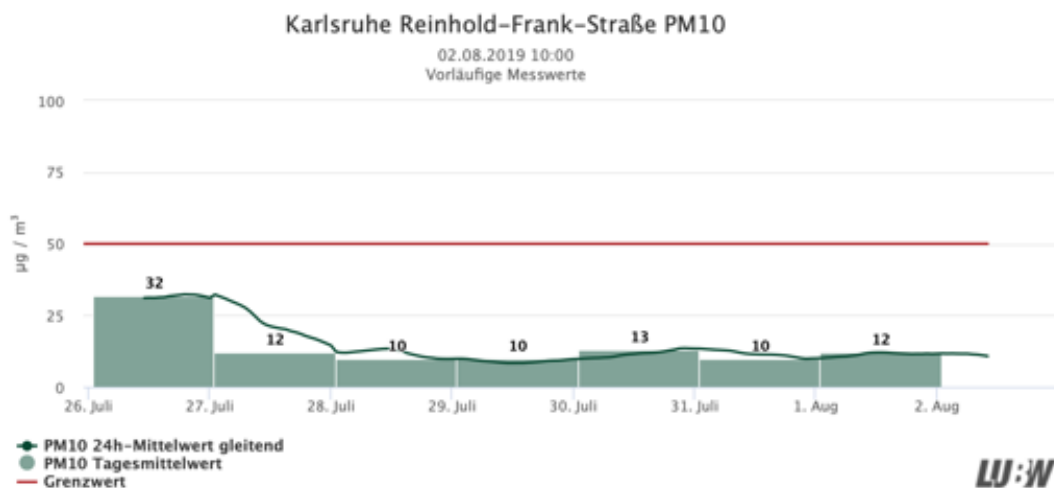


Abbildung 6: Feinstaubkonzentration (PM10) der Messstation Reinhold-Frank-Straße

von bis zu 15 % bestehen bleibt [Vogel, 2012, Vgl. S. 45]. Es ist außerdem zu beachten, dass die Bestimmung der Feinstaubkonzentration allein keine vollständige Aussage über die Luftqualität erlaubt. Dazu müssen auch die Konzentrationen verschiedener Gase wie beispielsweise Ozon, Stickoxide etc. betrachtet werden.

Abbildung 4 zeigt das Gehäuse eines aktiven Messgeräts zur Messung der Feinstaubkonzentration auf der Messstation Karlsruhe Reinhold-Frank-Straße der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. Zur Messung wird ein optisches Verfahren angewandt. Links daneben befindet sich ein Sigma-2 Sammelgerät. Eine nähere Beschreibung der Station findet sich im Kapitel zur Lärmmessung. Eine weitere Station befindet sich in der Nordweststadt.

Aktuelle Messdaten lassen sich neben privaten Anbietern auch vom Bundesumweltamt oder für Baden-Württemberg von der LUBW im Internet erhalten. Die Tagesmittelwerte der von der Messstation Reinhold-Frank-Straße gemessenen Konzentra-

tionen von PM25 und PM10 Partikeln im Zeitraum von Freitag, dem 26.07.2019, bis Donnerstag, dem 01.08.2019, sind in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt.

2.2 Temperatur

Im Alltag sind die Begriffe „Temperatur“ und „Wärme“ sehr gebräuchlich und werden oft nicht genau voneinander getrennt bzw. synonym verwendet (dazu siehe Kapitel Schülervorstellungen). Doch um was handelt es sich bei diesen Begriffen genau?

Ein oftmals vernachlässigter Begriff ist der der thermischen Energie. Jeder Körper besitzt innere Energie. Dabei handelt es sich um „in seinem Inneren gespeicherte Energie in Form von Translations-, Rotations- und Schwingungsenergie der Elementarteilchen“ [Grote, 2007, S. D4]. Einen Teil dieser inneren Energie eines Körpers macht seine thermische Energie aus. Dabei handelt es sich um die Summe der kinetischen Energie der Atome des Körpers [Meschede, 2015, Vgl. S. 252].

Betrachtet man zur Vereinfachung ein Gas, so zeigt sich, dass die Bewegung der Teilchen ungeordnet ist. Das bedeutet, dass sich die Geschwindigkeit der einzelnen Teilchen in Richtung und Betrag unterscheidet. Damit ist auch die kinetische Energie der Teilchen nicht einheitlich. An dieser Stelle kann man die Temperatur aufgreifen. Sie gibt in diesem Zusammenhang die mittlere kinetische Energie der im Gas vorhandenen Teilchen an [Meschede, 2015, Vgl. S. 252].

Für die kinetische Energie E_{kin} der Teilchen in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit bzw. Temperatur gilt:

$$\bar{E}_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \bar{v}^2 = \frac{3}{2} \cdot k_b \cdot T \text{ mit } k_b = 1,381 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \quad (1)$$

Der Faktor k_b bezeichnet dabei die Boltzmann-Konstante. Die mittlere kinetische Energie der Teilchen ist also proportional zur Temperatur [Meschede, 2015, Vgl. S. 252].

Als Einheit der Temperatur dient das Kelvin, abgekürzt K. Historisch bedingt werden zum Teil noch das Grad Celsius und das Grad Fahrenheit verwendet. Die Kelvin Skala wird in der Literatur auch als absolute Temperaturskala bezeichnet [Demtröder, 2013, Vgl. S. 264].

Das Gesetz von Gay-Lussac beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Volumen eines Gases und der Temperatur bei konstantem Druck. Demnach ist das Volumen V eines (idealen) Gases proportional zur Temperatur T ; es gilt [Demtröder, 2013, Vgl. S. 263]:

$$V(T) = V_0 \cdot (1 + \gamma_0 \cdot (T - T_0)) \text{ mit } \gamma_0 = \frac{1}{T_0} \quad (2)$$

T_0 entspricht 273 K, V_0 ist das Volumen des Gases bei 273 K. Für eine Temperatur T von 0 K ergibt sich, dass das Gas ein Volumen von Null besitzt. Für T kleiner 0 K wäre das Volumen des Gases kleiner Null, sodass 0 K als die tiefste erreichbare Temperatur, auch als absoluter Nullpunkt bezeichnet, angesehen werden kann. Dieser ist jedoch nicht zu erreichen [Demtröder, 2013, Vgl. S. 264]. Gemäß Gleichung 1 besäßen die Teilchen eines Gases bei 0 K eine mittlere kinetische Energie von 0 J. Es fände somit keine Teilchenbewegung mehr statt.

Auf diese Weise lassen sich thermische Energie und Temperatur auf mikroskopische Weise unterscheiden. Doch auch auf einem anderen Weg ist eine Unterscheidung möglich. Bei thermischer Energie handelt es sich um eine extensive Größe, bei der Temperatur um eine intensive Größe. Eine intensive Größe bleibt im Gegensatz zu einer extensiven Größe unverändert, „wenn die Systemgröße skaliert wird“ [Stadlmayr, 2018, S. 6].

Zur Veranschaulichung liefert Stadlmayr folgendes Beispiel:

Zu einem Liter Wasser mit der Temperatur von 300 K wird ein weiterer Liter Wasser mit der selben Temperatur hinzugegeben (Skalierung um den Faktor 2). Die Temperatur des Wassers als intensive Größe beträgt auch nach dem Mischen weiterhin 300 K, die thermische Energie als extensive Größe hingegen wird ebenfalls skaliert.

Als drittes ist die Wärme zu betrachten. Diese bezeichnet die Menge an thermischer Energie, „die ein System mit seiner Umgebung austauscht und die nicht als Arbeit oder mit Materie die Systemgrenze überschreitet“ [Grote, 2007, S. D5]. „Vereinbarungsgemäß ist eine zugeführte Wärme positiv, eine abgeführte negativ“ [Grote, 2007, S. D5]. Besitzt ein System die selbe Temperatur wie seine Umgebung, befindet es sich im thermischen Gleichgewicht mit dieser [Meschede, 2015, Vgl. S. 257]. Es wird somit keine Wärme übertragen.

Beispielsweise für einem Körper der Masse m , der Ausgangstemperatur T_0 und der Endtemperatur T_1 zugeführte Wärmemenge ΔQ gilt:

$$\Delta Q = c \cdot m \Delta T = c \cdot m \cdot (T_1 - T_0) \quad (3)$$

Dabei ist c die spezifische Wärmekapazität des Stoffes, aus dem der Körper besteht. Es handelt sich um eine Stoffeigenschaft. Besteht der Körper aus einem homogenen Stoffgemisch, so muss die spezifische Wärmekapazität des Stoffgemischs verwendet werden [Demtröder, 2013, Vgl. S. 264].

Während heute in der Physik für Wärme die Einheit Joule verwendet wird, ist es bei der Angabe von Nährwerten auf Lebensmittelverpackungen in der EU noch üblich, neben der Angabe in Kilojoule auch in Kilokalorie anzugeben. Bei einer Kilokalorie handelt es sich um die Wärme, die einem Kilogramm Wasser zugeführt werden

muss, um einen Anstieg von dessen Temperatur von 14,5 °C auf 15,5 °C zu erreichen [Demtröder, 2013, Vgl. S. 264].

Die thermische Energie oder die übertragene Wärme lassen sich nur mittels der Temperatur bestimmen. Somit ist die Messung der Temperatur ein wichtiger Aspekt. Die Zahl der Möglichkeiten, eine Temperatur zu bestimmen, scheint endlos, da viele andere (messbare) Größen von der Temperatur abhängig sind [Klose, 2016, Vgl. S. 128].

Bei einer Erhöhung ihrer Temperatur dehnen sich Festkörper, Flüssigkeiten oder auch Gase in der Regel aus. Da diese Ausdehnung proportional zur Temperatur ist, kann auf diese Weise die Temperatur des Körpers bestimmt werden. Thermometer, die thermische Ausdehnung zur Messung nutzen, werden als Ausdehnungsthermometer bezeichnet. So dienen schon seit dem 18. Jahrhundert mit Flüssigkeit gefüllte Flüssigkeits-Glasthermometer zur Temperaturmessung. Lange Zeit wurde dabei Quecksilber eingesetzt, da dessen Ausdehnungskoeffizient annähernd temperaturabhängig ist [Grote, 2007, Vgl. S. W20].

Heutzutage sind elektronische Messverfahren weit verbreitet, da sie oftmals eine preisgünstige Lösung darstellen. Dazu werden temperaturabhängige Widerstände eingesetzt. Je nach verwendetem Material besitzen sie einen positiven oder negativen Temperaturkoeffizienten. Anhand dieses Merkmals werden sie in PTC- (positive temperature coefficient), oft auch als „Kaltleiter“ bezeichnet, und NTC-Widerstände (negative temperature coefficient), auch „Heißeiter“ genannt, unterteilt. Thermometer, die eine Temperatur auf diese Weise messen, werden als Widerstandsthermometer bezeichnet. Zur Messung wird zusätzlich eine Messschaltung benötigt. Im einfachsten Fall kann es sich dabei um einen Spannungsteiler handeln [Tkotz, 2014, Vgl. S. 195 ff]. Ein Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit, auf einfache und kostengünstige Weise Temperaturen mit beispielsweise einem Mikrocontroller zu erfassen.

Thermoelemente stellen ein weiteres elektronisches Messverfahren dar. Diese nutzen den Seebeck-Effekt. Zwischen zwei elektrischen Leitern entsteht auf Grund einer Temperaturdifferenz eine Kontaktspannung auf Grund thermischer Diffusionsströme innerhalb der Materialien [Tkotz, 2014, Vgl. S. 195 ff]. Ähnlich wie bei Widerstandsthermometern ist eine Erfassung über einen Mikrocontroller o.ä. vergleichsweise einfach möglich.

Die bisher beschriebenen Verfahren benötigen zur korrekten Messung direkten Kontakt mit dem Körper bzw. Medium, dessen Temperatur zu messen ist. Eine kontaktlose Möglichkeit, um die Oberflächentemperatur eines Körpers zu messen, bietet das Pyrometer. Pyrometer enthalten ein pyrometrisches Element (PIR), mit dem es möglich ist, Strahlungsleistung eines Körpers zu bestimmen. Daraus lässt sich auf die Temperatur der Oberfläche dieses Körpers schließen [Tkotz, 2014, Vgl. S. 195 ff]. Eine nähere Beschreibung der physikalischen Grundlagen ist im Kapitel zur thermischen Strahlung zu finden. Es existieren verschiedene Pyrometertypen, die auf verschiedene Wellenlängenbereiche ausgelegt sind und somit bei verschiedenen Temperaturen eingesetzt werden. Der Großteil der im Alltag zu messenden thermischen Strahlung liegt im Infrarot-Bereich. Daher sind Infrarot-Pyrometer im Handel



Abbildung 7: Handpyrometer

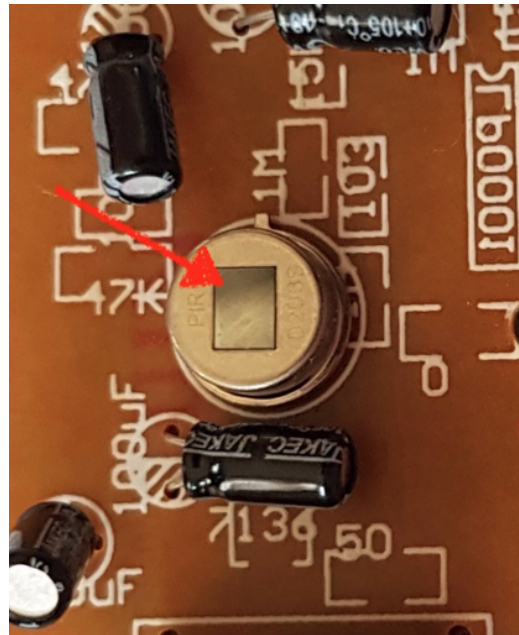


Abbildung 8: PIR-Sensor auf Platine

weit verbreitet (siehe Abbildung 7).

Auf ähnliche Weise funktionieren Infrarot-Bewegungsmelder. Sie sind mit einem PIR-Sensor ausgestattet, der auf Veränderungen der auf den Sensor einfallenden Infrarotstrahlung reagiert. In dieser Verwendungsform ist es notwendig, durch weitere Beschaltung das Auslösen auf Grund von Temperaturschwankungen der Umgebung und Helligkeitsschwankungen zu verhindern [Tkotz, 2014, Vgl. S. 107 u. 435]. Die Platine eines einfachen Bewegungsmelders ist in Abbildung 8 zu sehen. Der PIR Sensor ist mit einem Pfeil markiert. Auch Wärmebildkameras folgen dem selben Funktionsprinzip. Diese nehmen über einen Bildsensor Infrarotstrahlung auf und geben sie als Bild für den Menschen sichtbar wieder aus.

Eine Möglichkeit, eine Wärmemenge zu bestimmen, bietet die Kalorimetrie. Die gängigste Form der Kalorimetrie ist die Flüssigkeitskalorimetrie. Dabei wird der Versuchskörper in ein mit Flüssigkeit gefülltes Gefäß eingesetzt. Die an die Flüssigkeit abgegebene Wärme führt zu einer mit Hilfe eines Thermometers nachweisbaren Temperaturerhöhung der Flüssigkeit. Auf diese Weise lässt sich mittels Gleichung 3 die Wärmemenge bestimmen [Grote, 2007, Vgl. S. W20]. Um den Austausch mit der Umgebung und damit Ungenauigkeiten zu minimieren, wird für dieses Verfahren in der Regel ein Dewar-Gefäß eingesetzt [Demtröder, 2013, Vgl. S. 265].

In der Meteorologie stellt die Temperatur eine der wichtigsten Größen dar. Messungen werden in verschiedenen Höhen der Atmosphäre, an der Erdoberfläche und in der Erde sowie an der Oberfläche von Meeren und Seen durchgeführt [Klose, 2016, Vgl. S. 125 ff]. Um die Vergleichbarkeit der Messungen zu garantieren, wurden für entsprechende Messungen Richtlinien, beispielsweise durch den Deutschen Wetterdienst, festgelegt.

So soll nach Vorgabe des Deutschen Wetterdienstes das sogenannte Messfeld zur



Abbildung 9: klassische Wetterhütte



Abbildung 10: Wetterhütte für automatischen Sensor

Messung der Lufttemperatur eben und mit Gras bewachsen sein und eine Fläche von ca. 10 m² besitzen. Die direkte Umgebung des Messfelds muss frei sein, sodass es zu keiner Beeinträchtigung beispielsweise durch hohe Gebäude oder Bäume kommt [Deutscher Wetterdienst, 2017, Vgl. S. 3 ff].

Während das Ablesen der Messgeräte von Hand durchgeführt werden musste, kommen heute weitgehend automatische Messstationen zum Einsatz. Als Sensor zur Temperaturmessung ist für automatisch betriebene Stationen der Temperaturfühler PT 100 vorgesehen. Gemessen wird die Temperatur im Schatten und in eine Höhe von 2 m. Standortbedingt kann die Messhöhe auch abweichen. Um eine ganztägige Abschattung des Sensors und somit verlässliche Messwerte zu garantieren, wird eine Thermometerhütte verwendet. Diese schützt den Sensor vor Sonnenstrahlung, erlaubt aber gleichzeitig durch ihre Lamellen eine Luftströmung um den Sensor. Des Weiteren ist die Wetterhütte hell lackiert, um einen hohen Albedo-Wert zu erreichen. Je nach Aufbau der Messstation sind Thermometerhütten klassisch aufklappbar aufgebaut, wie in Abbildung 9 zu sehen, oder in deutlich kleinerer Bauweise wie in Abbildung 10 dargestellt. Thermometerhütten nach dieser Bauform werden für automatische Messstationen verwendet. Parallel wird an einigen Standorten außerhalb der Thermometerhütte die Temperatur in einer Höhe von 5 cm über dem Boden gemessen [Deutscher Wetterdienst, 2017, Vgl. S. 6 ff].

Die gemessenen Temperaturen in 5 cm und 2 m Höhe werden jeweils über eine Minute gemittelt und gemeinsam mit Maximal- und Minimalwerten (über je 10 Minuten) jede halbe Stunde übertragen. Dazu wird je nach Standort das Mobilfunk-, DSL- oder ISD(N)-Netz genutzt.

Die Lufttemperatur an einem Standort ist abhängig von verschiedenen Einfluss-

größen. Klose benennt dazu unter anderem die „Oberflächenbeschaffenheit der Erde [...], Meeresströmungen, Höhenlage eines Ortes, orografische [Einflüsse], Bedeckungsgrad und die Albedo“ [Klose, 2016, S. 135]. Somit ist der genaue Temperaturverlauf an einem Standort sehr individuell.

Dennoch lassen sich allgemein zutreffende Muster erkennen. So schwankt die Lufttemperatur im Tagesgang. Es ist „charakteristisch, dass das nächtliche Minimum im Winter etwa zwei Stunden, im Sommer etwa eine Stunde nach Sonnenaufgang eintritt, während das Tagesmaximum cirka [sic!] zwei Stunden nach dem Sonnenhöchststand beobachtet wird“ [Klose, 2016, S. 134].

Die Erwärmung der Luft folgt dabei im Tagesgang einem beschränkten Wachstum. Es gilt für die Temperatur T zum Zeitpunkt t :

$$T_{erw}(t) = T_{max} + (T_{max} - T_0) \cdot e^{-k_{erw} \cdot t} \quad (4)$$

Dabei ist T_0 die Ausgangstemperatur zum Zeitpunkt $t = 0$ und T_{max} die maximale erreichte Temperatur.

Abends und nachts ist ein exponentieller Abfall der Lufttemperatur zu beobachten. Dieser lässt sich mit Hilfe des Newtonschen Abkühlungsgesetzes erklären. Das Abkühlungsgesetz wurde vermutlich in den 1690er Jahren von Isaac Newton im Zusammenhang mit der Entwicklung des Newtonschen Abkühlungsthermometers erarbeitet, das bis heute Einsatz findet [Grigull, 1978, Vgl. S. 7 ff].

In Anlehnung daran lässt folgende Gleichung aufstellen:

$$T_{abk}(t) = (T_0 - T_U) \cdot e^{-k_{abk} t} + T_U \quad (5)$$

T_U ist die Temperatur der Umgebung.

Im Hinblick auf den Verlauf der Lufttemperatur bei Nacht lässt sich T_0 als die Ausgangstemperatur am Abend zu Beginn der Abkühlung ausmachen. T_U beschreibt dann die minimale Lufttemperatur, die, bedingt durch die meteorologischen Verhältnisse, im Verlauf der Abkühlung erreicht wird.

Zu beachten ist, dass Faktoren wie Bewölkung und Niederschlag sowohl die Erwärmungs- sowie die Abkühlungskurve erheblich beeinflussen können.

Auch im Jahresgang lässt sich, in Abhängigkeit vom Standort, eine charakteristische Schwankung erkennen. Dies lässt sich mit der variierenden Sonnenhöhe, also dem maximalen Vertikalwinkel, den sie Sonne über dem Horizont einnimmt, erklären [Kuttler, 2013, Vgl. S. 167 f].

Je nachdem, ob Klimaschwankungen im Tages- oder Jahresgang dominieren, wird in der Meteorologie von Tageszeiten- und Jahreszeitenklima gesprochen. Tageszeitenklima ist ein Charakteristikum der Tropen. Im Gegensatz dazu weisen alle nicht-tropischen Regionen ein Jahreszeitenklima auf [Kuttler, 2013, Vgl. S. 167 f].

Zu einem Transport von thermischer Energie kann es auf unterschiedlichen Wegen kommen. Es handelt sich dabei um Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung. Für die Lufttemperatur spielt die Wärmeleitung nur eine untergeordnete Rolle. Sie ist in erster Linie bei Flüssigkeiten und Festkörpern, dabei beispielsweise für die Bodentemperatur, von Bedeutung [Klose, 2016, Vgl. S. 136 ff]. Im Gegensatz dazu haben Konvektion und Strahlung große Auswirkungen auf unser Wettergeschehen und Klima.

Der Transport durch Konvektion findet in der Atmosphäre vertikal zwischen verschiedenen Luftschichten statt. Dabei ist eine stetige Abnahme der Lufttemperatur von bis zu 6,5 K/km zu beobachten [Klose, 2016, Vgl. S. 136 ff].

2.3 Elektromagnetische Strahlung

Nach Klose und Klose ist Strahlung der „Transport von Energie mittels sich nicht gegenseitig beeinflussender elektromagnetischer Wellen“ [Klose, 2016, S. 202]. Eine elektromagnetische Welle besitzt eine elektrische Komponente mit der Feldstärke \vec{E} und eine magnetische Komponente mit der Feldstärke \vec{H} , die senkrecht zueinander stehen. Die Richtung der transportierten Energie entspricht der Richtung des Poynting-Vektors \vec{S} , sein Betrag der Leistungsdichte der elektromagnetischen Welle. Es gilt [Klose, 2016, S. 202]:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (6)$$

Vergleichbar mit mechanischen Wellen kann es durch Überlagerung zu Interferenzen und stehenden Wellen kommen. In Abbildung 11 ist das Modell einer stehenden elektromagnetischen Welle in einem Koordinatensystem dargestellt. Im oberen Teil sind die Momentanwerte von \vec{E} und \vec{H} dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die elektrische Feldstärke \vec{E} dann ihr Maximum bzw. Minimum erreicht, wenn die magnetische Feldstärke \vec{H} gegen Null geht und umgekehrt. Dies kann als ein periodisches „Umherschwingen“ der Energie zwischen dem elektrischen und magnetischen Feld interpretiert werden [Meschede, 2015, S. 553]. Im unteren Teil von Abbildung 11 ist der zeitliche Verlauf des zugehörigen Poynting-Vektors mit Betrag und Richtung dargestellt.

Für die als Lichtgeschwindigkeit bezeichnete Ausbreitungsgeschwindigkeit c einer elektromagnetischen Welle in einem Medium mit der Dielektrizitätskonstante ϵ und der Induktionskonstante μ gilt:

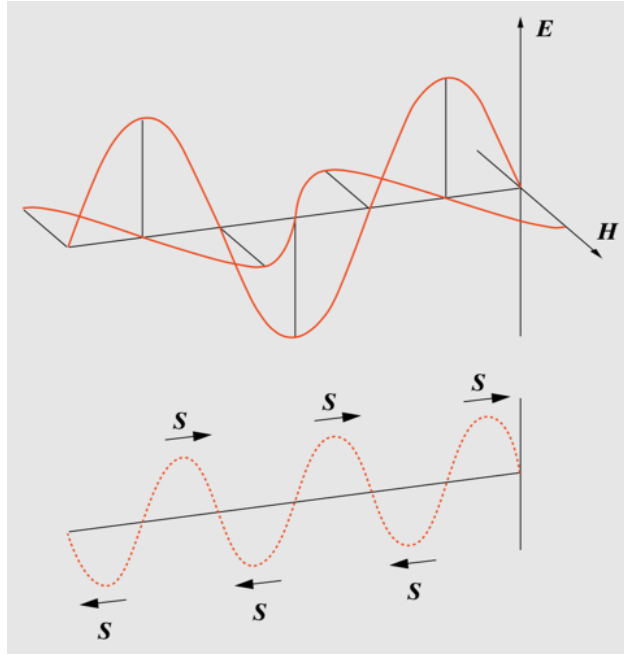


Abbildung 11: Modelldarstellung einer elektromagnetischen Welle

$$c = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon} \quad (7)$$

Daraus lässt sich schließen, dass sich eine elektromagnetische Welle auch in einem Vakuum fortsetzen kann. Für die Lichtgeschwindigkeit c_0 in einem Vakuum mit $\epsilon = 1 \frac{As}{Vm}$ und $\mu = 1 \frac{Vs}{Am}$ gilt durch Einsetzen in Gleichung 7:

$$c = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0} = 2,99792458 \frac{m}{s^2} \quad (8)$$

Da das Produkt von ϵ und μ für Vakuum am kleinsten ist, ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum die für elektromagnetische Wellen höchste erreichbare Geschwindigkeit.

Nach Planck ist die übertragene Energiemenge ΔE proportional zur Frequenz f der Welle. Mit der Hilfskonstante $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, heute auch Planck-Konstante, gilt:

$$\Delta E = h \cdot f \quad (9)$$

Die nach Frequenz (bzw. nach Wellenlänge) geordneten elektromagnetischen Wellen lassen sich zu einem Spektrum zusammensetzen, das in verschiedene Bereiche unterteilt werden kann. Abbildung 12 zeigt einen Ausschnitt um das für den Menschen

sichtbare Spektrum.

Trifft elektromagnetische Strahlung beispielsweise auf die Oberfläche eines Körpers, so kann sie reflektiert, transmittiert oder absorbiert werden. Im Folgenden wird die Absorption kurz näher betrachtet.

Das Verhältnis aus der absorbierten und der auftreffenden Strahlungsleistung wird als Absorptionsvermögen A bezeichnet. Da für gewöhnlich eine Kombination aus Reflexion, Transmission und Absorption auftritt, ist das Absorptionsvermögen realer Körper kleiner eins. Ein schwarzer Körper dient als idealer Körper mit $A = 1$, der Strahlung jeder Frequenz vollständig absorbiert [Demtröder, 2013, Vgl. S. 279 f]. Gleichzeitig gibt der schwarze Körper Energie in Form von thermischer Strahlung ab. Für die abgestrahlte Leistung eines Flächenelements dA , die in den Winkel $d\Omega$ strahlt, gilt [Demtröder, 2013, S. 279 f]:

$$\frac{dW}{dt} = E^* \cdot dA \cdot d\Omega \quad (10)$$

E^* ist dabei analog zu A das Emissionsvermögen des Körpers.

Das Verhältnis vom Emissionsvermögen E eines Körpers zu seinem Absorptionsvermögen A ist bei gleicher Temperatur konstant. Dies wird auch als Kirchhoffsches Strahlungsgesetz bezeichnet. Ein schwarzer Körper ist somit auch eine ideale Strahlungsquelle. Eine Änderung der Temperatur führt zu einer Veränderung des Verhältnisses [Demtröder, 2013, Vgl. S. 279 f].

Die abgegebene thermische Strahlung eines schwarzen Strahlers bildet ein kontinuierliches Spektrum. Trägt man die Leistungsdichte L , also die Leistung pro Flächeneinheit und Steradian, über der Frequenz auf, so zeigt sich, dass sich das Maximum der Leistungsdichte mit zunehmender Temperatur des Körpers hin zu einer höheren Frequenz verschiebt. Die Abhängigkeit der Leistungsdichte L eines schwarzen Körpers von der Frequenz und Temperatur wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben. [Klose, 2016, Vgl. S. 206 f].

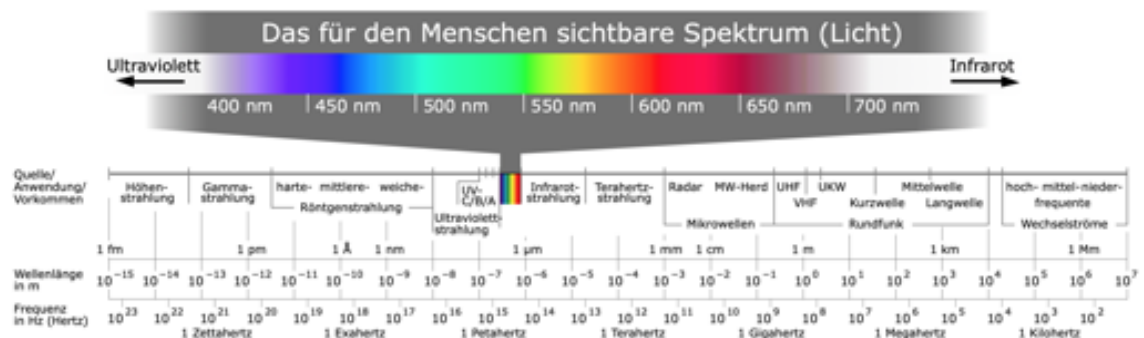


Abbildung 12: Spektrum elektromagnetischer Strahlung

Aus dem Planckschen Strahlungsgesetz lässt sich durch Differenzieren das Maximum der Leistungsdichtekurve bestimmen. Für dieses gilt das Wiensche Verschiebungsgesetz [Meschede, 2015, S. 594]:

$$f_{max} = \frac{2,82 \cdot k_b}{h} \cdot T \text{ mit } k_b = 1,381 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \quad (11)$$

Eine Beschreibung der Gesamtheit der vom Körper der Fläche A in einen Halbraum abgegebenen Strahlungsleistung liefert das Stefan-Boltzmann-Gesetz [Meschede, 2015, S. 595]:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 \text{ mit } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \quad (12)$$

Somit führt eine Verdopplung der Temperatur eines schwarzen Strahlers zu einer 16-fachen Strahlungsleistung auf den Halbraum.

In der Realität sind ideale schwarze Körper nicht erreichbar. In Versuchen werden häufig Hohlkörper verwendet; eine sehr gute Annäherung an einen schwarzen Körper bietet das Weltall selbst [Meschede, 2015, Vgl. S. 596].

Betrachtet man die Sonne als Strahlungsquelle, so zeigt sich, dass sich das Spektrum außerhalb der Erdatmosphäre von der eines schwarzen Körpers selber Temperatur ($T = 5600 \text{ K}$) unterscheidet. In Abbildung 13 ist die spektrale Strahlungsintensität, also die durch Strahlung einfallende Leistung pro Fläche und Wellenlänge, dargestellt.

Es zeigt sich, dass die spektrale Strahlungsintensität der Sonne die eines schwarzen Körpers bei ca. $0,5 \mu\text{m}$ übersteigt, bei kleineren Wellenlängen jedoch deutlich unterschreitet. Bei einer genaueren Betrachtung des Spektrums fallen einzelne Frequenzen bzw. Frequenzbereiche auf, bei denen scheinbar keine oder nur geringe Strahlung die Sonne verlässt. Diese werden als Fraunhoferlinien bezeichnet. Sie entstehen aufgrund von Absorption durch Gase innerhalb der Sonne [Meschede, 2015, Vgl. S. 610]. Da unterschiedliche Gase unterschiedliche Absorptionslinien hervorrufen, sind Fraunhoferlinien in der Astronomie von großer Bedeutung, da sie es erlauben, Rückschlüsse auf die Zusammensetzung von Sternen zu ziehen. Abbildung 14 zeigt einen Ausschnitt des Sonnenspektrum um den für den Menschen sichtbaren Spektralbereich.

Auch beim Durchlaufen der Erdatmosphäre kommt es zu einer weiteren Veränderung der spektralen Strahlungsintensität. In Abbildung 13 ist die Flussdichte (Intensität) ebenfalls für das Meeresniveau dargestellt. Dabei kann es zu starken wetterbedingten Schwankungen kommen.

Die Veränderung beim Durchlaufen der Atmosphäre werden als Strahlungsmodifikation bezeichnet. Diese beinhaltet Streuung, Absorption und Reflexion an und in

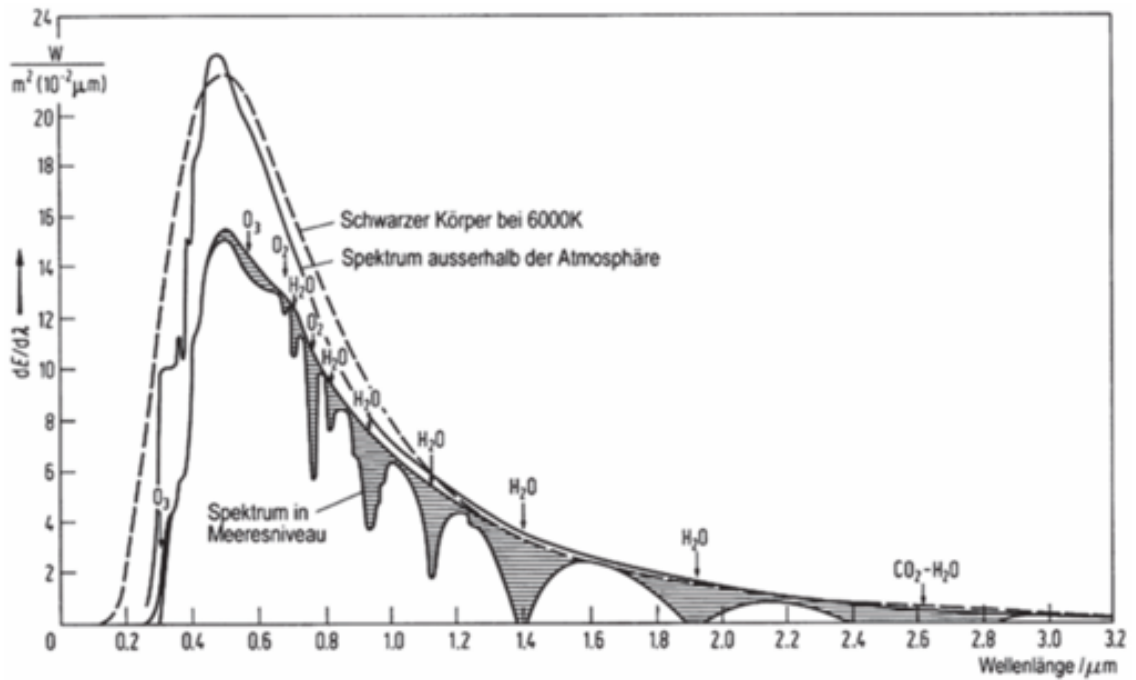


Abbildung 13: Spektrum der Sonne außerhalb der Atmosphäre und auf Meeresniveau

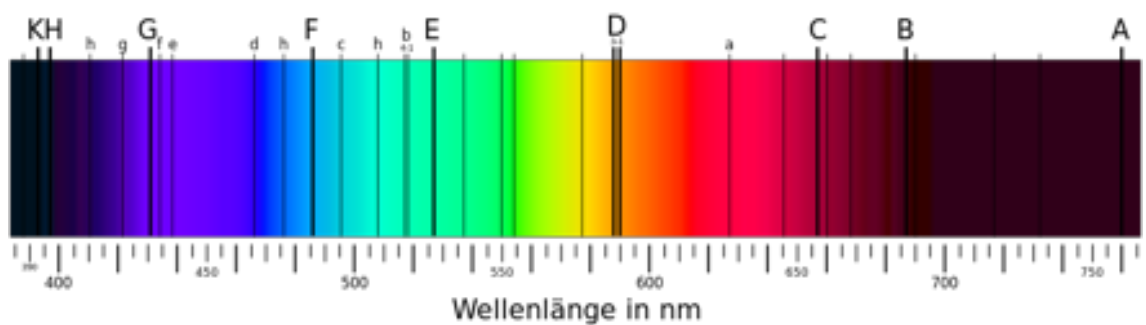


Abbildung 14: Ausschnitt des Sonnenspektrum mit Fraunhoferlinien

der Atmosphäre [Klose, 2016, Vgl. S. 213 ff].

Besondere Beachtung bedarf der Bereich von 380 - 100 nm. Es handelt sich dabei um den Bereich der ultravioletten Strahlung, kurz UV-Strahlung. Eine Einteilung kann in drei Wellenlängenbänder vorgenommen werden. Das UV-A-Band umfasst den Bereich von 380 - 315 nm, das UV-B-Band den Bereich von 315 - 280 nm und das UV-C-Band den Bereich von 280 - 100 nm. Aufgrund der Interaktion mit Molekülen in unserer Atmosphäre gelangt üblicherweise nur noch UV-A-Strahlung bis zur Erdoberfläche. Die Absorption von UV-B-Strahlung findet in großem Maße durch Ozon statt. So zeigt sich in Gebieten, die von einer drastischen Schädigung der darüber befindlichen Ozonschicht, Alltagsprachlich vom „Ozonloch“, betroffen sind, eine deutliche Erhöhung der UV-B-Intensität. UV-Strahlung gilt als „photochemisch besonders aktiv“ und ist daher aus gesundheitlicher Sicht relevant [Meschede, 2015, S. 605].

Betrachtet man die Bilanz der auf die Erde einfallenden kurzwelligeren Sonnenstrah-

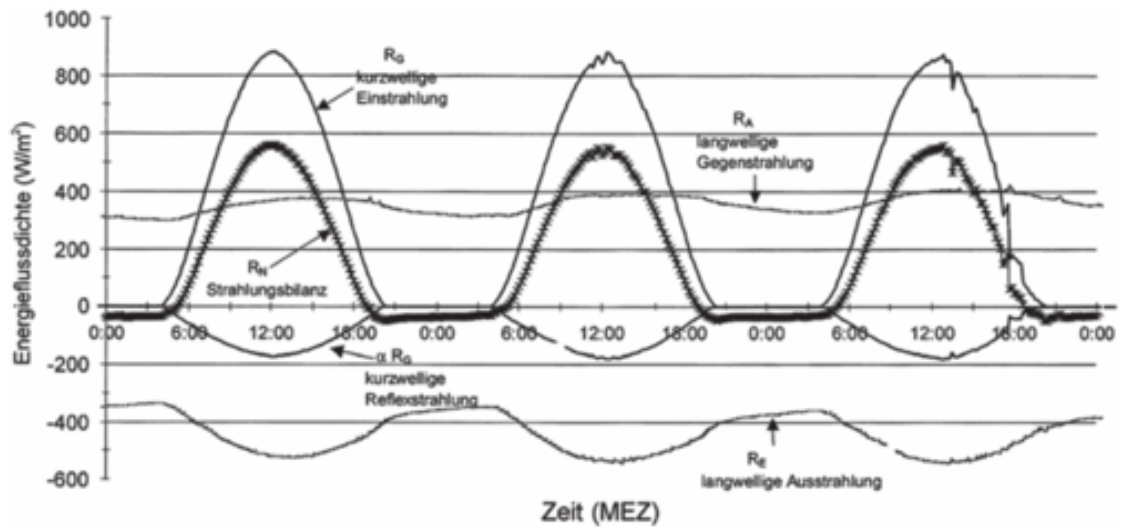


Abbildung 15: Tagesgang der Energieflussdichten

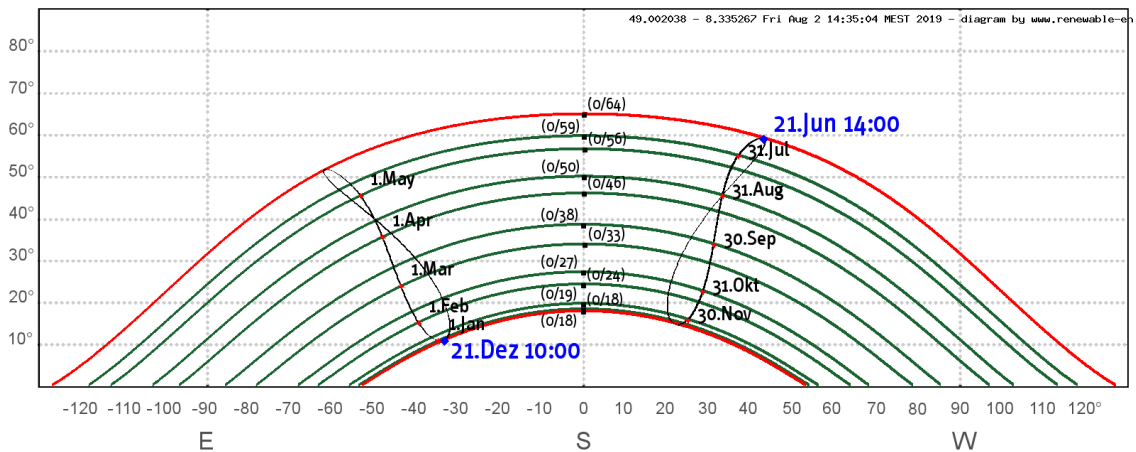


Abbildung 16: Sonnenstandsdiagramm für Karlsruhe

lung, so werden ca. 30 % der Strahlung sofort zurück ins All reflektiert. Den Hauptanteil daran besitzt die Reflexion an Wolken. Ca. 20 % der nicht reflektierten Strahlung wird durch Wolken, Gase und Partikel in der Atmosphäre absorbiert. Die verbleibenden 50 % erreichen der Erdoberden, wovon ein gewisser Anteil reflektiert wird. Nicht zu vernachlässigen ist die thermische Strahlung, die durch die Erdatmosphäre selbst verursacht wird. Auf diese Weise erhält die Erdoberfläche ca. 146 % der zu Beginn eintreffenden Strahlungsintensität. Ausgeglichen wird die Bilanz in erster Linie durch von der Erdoberfläche ausgehende langwelligere thermische Strahlung (Ausstrahlung), sowie in deutlich kleineren Anteilen durch Verdunstung und Konvektion. Ein Teil der Ausstrahlung kehrt nach Absorption durch die Atmosphäre erneut an den Boden zurück [Klose, 2016, Vgl. S. 223 f]. Abbildung 15 zeigt die Strahlungsbilanz im zeitlichen Verlauf, aufgenommen im Sommer bei Melpitz bei Torgau.



Abbildung 17: Pyrheliometer

Über den Jahresgang gesehen kommt es zu Schwankungen durch die sich verändernde Sonnenstandshöhe. Die Sonnenstandshöhe in Abhängigkeit von Datum und Uhrzeit lässt sich aus sogenannten Sonnenstandsdiagrammen bestimmen. Abbildung 16 zeigt das Sonnenstandsdiagramm für Karlsruhe. Eingezeichnet sind die Sonnenstandsverläufe im Jahresverlauf für 10 Uhr und 14 Uhr. Der größte Vertikalwinkel wird am 21. Juni um 12 Uhr erreicht. Er beträgt dann 64° . Zur selben Tageszeit am 21. Dezember, dem Tag des kleinsten Vertikalwinkels, beträgt er lediglich 18° .

Zur Messung der Strahlungsintensität stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, je nachdem, welche Strahlungen gemessen werden sollen. Allen Verfahren ist gemeinsam, dass die Messung indirekt über die erwärmende Wirkung der Strahlung durchgeführt wird.

Die direkt einfallende Strahlungsintensität der Sonnenstrahlung lässt sich mittels eines Pyrheliometers (siehe Abbildung 17) bestimmen. Das Messgerät wird dabei auf die Sonne ausgerichtet. Die einfallende Strahlung erwärmt einen Probekörper. Ein zweiter Probekörper befindet sich im Schatten. Mittels der Temperaturdifferenz lässt sich die Strahlungsintensität bestimmen. Eine Weiterentwicklung stellt das Angströmsche Kompensationspyrheliometer dar. Der im Schatten befindliche Probekörper, in diesem Fall ein Manganstreifen, wird durch einen elektrischen Strom erwärmt, bis er die selbe Temperatur besitzt wie der Körper in der Sonne. Durch die gemessene Stromstärke lässt sich auf die vom Probekörper aufgenommene Energie schließen [Klose, 2016, Vgl. S. 227].

Eine Alternative stellt das Bimetallaktinometer dar. Ein der Sonnenstrahlung ausgesetzter Bimetallstreifen biegt sich mit zunehmender Temperatur. Anhand einer Skala kann die Strahlungsintensität bestimmt werden [Klose, 2016, Vgl. S. 227].

Weitere in der Meteorologie verwendete Messgeräte sind das Pyranometer zur Messung kurzweiliger Strahlung und Prygeometer zur Messung der Ausstrahlung bei Dunkelheit. Strahlungsbilanzmesser besitzen zwei Probekörper. Einer der Körper ist nach oben, der andere nach unten gerichtet, sodass sowohl die von oben einfal-

lende Strahlung als auch die vom Boden abgegebene Strahlung gemessen werden kann [Klose, 2016, Vgl. S. 227].

Von meteorologischer Bedeutung ist zudem die tägliche Sonnenscheindauer. Diese wird heutzutage mittels elektronischer Sensoren bestimmt [Deutscher Wetterdienst, 2017, Vgl. S. 9].

Elektronische Sensoren verwenden zur Messung der oben genannten Größen in der Regel Photodioden.

Neben meteorologischen Größen spielen im Alltag auch photometrische Größen eine Rolle. Als Grundeinheit dient die Lichtmenge Q . Für Q gilt [Grote, 2007, S. W21]:

$$Q = K_m \cdot \int Q_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (13)$$

Dabei ist K_m das photometrische Strahlungsäquivalent mit $K_m = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$. $Q_e(\lambda)$ stellt die spektrale Strahlungsmenge dar. Die Funktion $V(\lambda)$ spiegelt die individuelle spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges wieder. Weitere bedeutende photometrische Größen sind der Lichtstrom Φ als zeitliche Änderung der Lichtmenge und die Beleuchtungsstärke E als Flächendichte der Lichtmenge [Grote, 2007, Vgl. S. W21]. Der Lichtstrom wird in Lumen (lm), die Beleuchtungsstärke in Lux (lux) angegeben. Es gilt:

$$\Phi = \frac{dQ}{dT} \quad (14)$$

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (15)$$

A ist die vom Lichtstrom Φ getroffene Fläche.

Zur Messung werden Photometer, besonders häufig Luxmeter, eingesetzt. In einfachen Aufbauten werden ebenfalls Fotodioden und -widerstände eingesetzt.

2.4 Druck

Übt man eine Kraft F auf eine Fläche A senkrecht aus, so gilt für den Druck p :

$$p = \frac{F}{A} \quad (16)$$

Der Druck ist eine skalare Größe, die in der Regel direkt in $\frac{N}{m^2}$ oder Bar angegeben wird [Meschede, 2015, Vgl. S. 101]. Andere gebräuchliche sind beispielsweise Einheiten Pascal (Pa), Torr (Torr), Millimeter Quecksilbersäule (mmHg), technische (at) und physikalische Atmosphäre (atm) [Vgl. spektrum.de: Druck]. Diese Einheiten finden in verschiedenen Bereichen noch heute Anwendung. Es handelt sich um eine intensive Größe.

Betrachtet man den Druck in Flüssigkeiten und Gasen, so zeigt sich, dass nach dem Gesetz von Pascal unter Vernachlässigung der Gewichtskraft der Druck an allen Punkten gleich ist und in alle Richtungen hin wirkt. Gegen die Wände eines Gefäßes, in dem sich die Flüssigkeit bzw. das Gas befindet, tritt eine senkrecht wirkende Kraft auf [Grote, 2007, Vgl. S. B44 f].

Bei einem idealen Gas ist der Druck p antiproportional zum Volumen V des Gases. Dieser Zusammenhang wird durch das Gesetz von Boyle-Mariotte beschrieben. Es gilt [Meschede, 2015, S. 105]:

$$V = \frac{c}{p} \Leftrightarrow p \cdot V = c \quad (17)$$

Wie sich zeigt, ist die Konstante c abhängig von der Temperatur T und der Zahl n der im Gas enthaltenen Teilchen. Durch Erweiterung von Gleichung 17 erhält man die Zustandsgleichung idealer Gase. Es gilt [Grote, 2007, S. D10 u. D15]:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T = \text{const.} \quad (18)$$

Besteht ein Gas aus einem Gemisch mehrerer einzelner Gase, so gilt entsprechend für i Gase [Grote, 2007, S. D24]:

$$\sum p_i \cdot V = \sum n_i \cdot R \cdot T \quad (19)$$

Der Gesamtdruck p eines Gasgemischs ist die Summe seiner Partialdrücke p_i . Dieser Zusammenhang wird als Daltonsches Gesetz bezeichnet [Klose, 2016, Vgl. S. 147].

Eine Änderung der Größen bei konstanter Teilchenzahl führt zu Veränderungen des Zustands. Auf diese Weise lassen sich verschiedene Zustandsänderungen ausmachen:

Eine Zustandsänderung, bei der das Volumen konstant bleibt, wird als isochor bezeichnet. Dem Gas wird von außen Energie zugeführt oder entnommen, sodass es zu einer Änderung der Temperatur und damit verbunden des Drucks kommt.

Bleibt die Temperatur konstant, so ist die Zustandsänderung isotherm. Eine Änderung des Volumens führt zu einer Änderung des Drucks oder umgekehrt.

Eine isobare Zustandsänderung liegt vor, wenn der Druck des Gases erhalten bleibt. Änderungen des Zustands werden durch entsprechende Veränderungen von Temperatur und Volumen verursacht.

Als vierte Form existiert noch die isentrope Zustandsänderung. Bei dieser bleibt die Entropie des Systems konstant.

In der Realität sind rein isotherme und isentrope Zustandsänderungen praktisch nicht zu erreichen, sodass in der Regel von polytropen Zustandsänderungen ausgegangen werden muss [Grote, 2007, Vgl. S. 15].

Die bisherige Betrachtung des Drucks bei Gasen (und Flüssigkeiten) geschah unter Vernachlässigung der auf die Teilchen einer Flüssigkeit oder eines Gases wirkende Gewichtskraft. Dabei üben die einzelnen Teilchen einen Druck auf die unter ihnen befindlichen Teilchen aus. Dieser Druck wird als Schweredruck bezeichnet. Schaut man sich eine Säule der Höhe h und Querschnittsfläche A an, die mit einer Flüssigkeit oder einem Gas gefüllt ist, so gilt für die Gewichtskraft am Boden der Säule [Metschede, 2015, S. 102]:

$$F = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot A \cdot h \cdot g \quad (20)$$

Für den Schweredruck p_{schw} gilt damit:

$$p_{schw} = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \rho \cdot h \cdot g \quad (21)$$

Mit zunehmender Höhe der Säule steigt also der Schweredruck am Boden linear an. Umgekehrt würde beispielsweise ein Taucher bei seinem Auftauchen vom Boden der Säule zur Oberfläche der Säule einen entsprechend linearen Abfall des Schweredrucks messen, da die über ihm befindliche Flüssigkeitssäule immer kleiner würde.

Dabei spielt die Form der Säule keine Rolle. So ist der Druck am Boden des in Abbildung 18 dargestellten U-Rohrs auf beiden Seiten gleich. Durch die Verbindung der beiden Einzelrohre am Boden käme es anderenfalls zu einer Ausgleichsströmung, die unterschiedliche Füllhöhen bewirken würde. Dies ist tatsächlich zu beobachten, wenn das U-Rohr mit zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte gefüllt wird. Diese Beobachtung ist auf Gleichung 20 bzw. 21 zurückzuführen [Metschede, 2015, Vgl. S. 103].

In der Atmosphäre der Erde ist ebenfalls eine Abnahme des Atmosphärendrucks mit zunehmender Höhe über dem Boden (siehe Taucher-Beispiel) zu beobachten. Auf

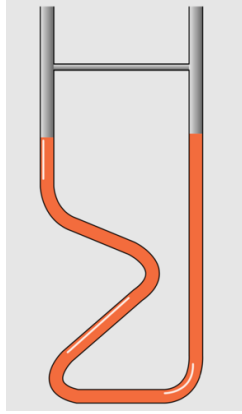


Abbildung 18:
U-Rohr

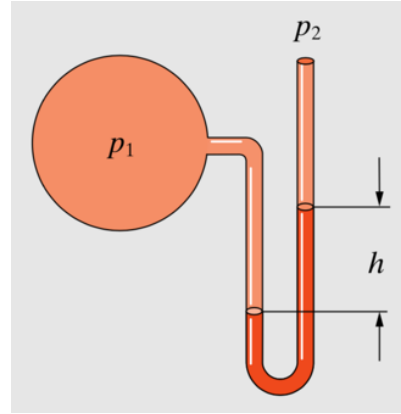


Abbildung 19:
U-Rohr zur Druckmessung

Meereshöhe beträgt der Atmosphärendruck p_0 ca. $1,013 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$. Bei einer konstanten Dichte der Atmosphäre ρ_0 von $1,3 \frac{kg}{m^3}$ ergibt sich für die Höhe H der Atmosphäre nach Gleichung 21:

$$p_0 = \rho_0 \cdot g \cdot H \Leftrightarrow H = \frac{p_0}{\rho_0 \cdot g} \quad (22)$$

$$H = \frac{1,013 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}}{1,3 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \frac{m}{s^2}} = 7943,2 \text{ m} \quad (23)$$

Dies entspricht jedoch nicht der tatsächlichen Höhe der Atmosphäre, sodass man daraus schließen kann, dass die Dichte der Atmosphäre nicht über die Höhe konstant ist. Die zuvor bestimmte Höhe H wird als Skalenhöhe bezeichnet [Meschede, 2015, Vgl. S. 105]. g wird als konstant betrachtet.

Der tatsächlich annähernde Verlauf des Atmosphärendrucks in Abhängigkeit von der Höhe h lässt sich mittels der barometrischen Höhengleichung beschreiben [Meschede, 2015, Vgl. S. 105]:

$$p_{schw} = p_0 \cdot e^{-\frac{h}{H}} \quad (24)$$

Zu beachten sind Abweichungen durch die bereits zuvor beschriebene Abnahme der Temperatur sowie Schwankungen der Luftfeuchtigkeit [Meschede, 2015, Vgl. S. 105]. Im Folgenden wird der Begriff Luftdruck für den Atmosphärendruck in Bodennähe verwendet.

Neben dem Schweredruck p_{schw} tritt bei nicht ruhenden Flüssigkeiten und Gasen ein weiterer Druck auf. Es handelt sich um den Staudruck p_{stau} . Es gilt [Meschede, 2015, S. 116]:

$$p_{stau} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \quad (25)$$

Der Staudruck p_{stau} ist also proportional zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit v . Bei einer konstanten Höhe h (siehe Gleichungen 21 und 24) und unter Vernachlässigung von Viskosität, Reibung und gegebenenfalls strömungsbedingten Zustandsänderungen gilt für den auftretenden Gesamtdruck p_{ges} nach der Bernoulli-Gleichung [Meschede, 2015, S. 116]:

$$p_{ges} = p_{schw} + p_{stau} \quad (26)$$

Druck in Festkörpern wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

Bei der Messung von Drücken in Flüssigkeiten und Gasen muss zunächst zwischen absolutem und relativem Druck unterschieden werden. Während sich der absolute Druck auf ein ideales Vakuum bezieht, beschreibt der relative Druck die Differenz zwischen zwei verschiedenen Drücken [Vgl. spektrum.de: Druck]. Im Folgenden wird die Druckmessung bei ruhenden Gasen betrachtet.

Das zur Messung eines Drucks eingesetzte Messgerät wird als Manometer bezeichnet. Viele klassische Manometer basieren auf dem in Abbildung 18 dargestellten U-Rohr. Zur Bestimmung des Drucks wird ein Ende des U-Rohrs verschlossen. Ein solcher Aufbau ist in Abbildung 19 abgebildet. Das sich in der verschlossenen Hälfte des Rohrs oberhalb der Flüssigkeit befindliche Gas besitzt den Druck p_1 . Das andere Ende des U-Rohrs bleibt unverschlossen, sodass dort überhalb der Flüssigkeit der jeweils vorliegende und bekannte Druck p_2 des den Aufbau umgebenden Gases herrscht.

Ist nun der Druck p_2 geringer als p_1 , so steigt die Flüssigkeitssäule im rechten Teil des Rohrs, wie in Abbildung 19 exemplarisch dargestellt, an, während sie im linken Teil abfällt. Dies geschieht, bis $p_1 = p_2$ entspricht. Aus der messbaren Höhendifferenz h der Flüssigkeitssäulen lässt sich p_1 bestimmen. Für p_2 größer als p_1 kommt es zu einer Höhendifferenz in die umgekehrte Richtung. Ein auf diese Weise aufgebautes Manometer wird als Flüssigkeitsmanometer bezeichnet [Slama, 2018, Vgl. S. 72].

Auf ähnliche Weise lässt sich der Atmosphärendruck messen. Dazu wird das verschlossene Ende vollständig mit Flüssigkeit ausgefüllt. Beim Aufrichten des U-Rohrs entsteht im verschlossenen Ende ein Vakuum. Mit der sich einstellenden Höhendifferenz h zwischen beiden Flüssigkeitssäulen lässt sich der Atmosphärendruck p bestimmen. Für p gilt rden. Während sich der absolute Druck auf ein ideales Vakuum bezieht, beschreibt der relative Druck die Differenz zwischen zwei verschiedenen Drücken Gleichung 21. Manometer, die den Atmosphärendruck messen, werden als Barometer bezeichnet [Slama, 2018, Vgl. S. 72].

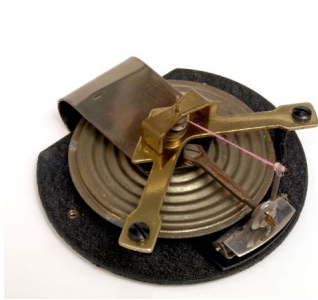


Abbildung 20:
Aneroidbarometer

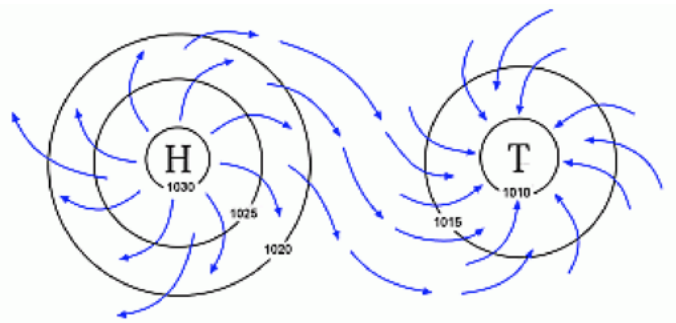


Abbildung 21: Hoch- und Tiefdruckgebiet

Als Flüssigkeit wird dabei oft Quecksilber verwendet. Grund dafür ist zum einen die große Dichte des Quecksilbers, die einen insgesamt im Vergleich mit beispielsweise Wasser kleineren Messaufbau und somit eine bessere Handhabung erlaubt sowie der niedrigere Dampfdruck. Nachteile der Verwendung von Quecksilber sind zum einen die gesundheitlichen Gefahren des Umgangs mit Quecksilber sowie die größere temperaturbedingte Ausdehnung, die einer rechnerischen Korrektur bedarf [Klose, 2016, Vgl. S. 116].

Eine weitere Möglichkeit, den Atmosphärendruck zu messen, bieten Aneroidbarometer. Diese bestehen aus einem evakuierten Gefäß, das eine elastische Membran besitzt. Die durch den Schweredruck der Atmosphäre auf die Fläche der Membran ausgeübte Kraft führt zu einem Einrücken der Membran in das Gefäß. Bei mit einem Zeiger ausgestatteten Aneroidbarometern wird mit Hilfe der verbauten Mechanik der Atmosphärendruck an einer Skala ablesbar dargestellt. Moderne Aneroidbarometer benötigen konstruktionsbedingt keine temperaturbedingte Korrektur [Klose, 2016, Vgl. S. 122]. Abbildung 20 zeigt ein geöffnetes Aneroidbarometer. Die Membran ist an ihrer gewellten Oberflächenform deutlich zu erkennen. Bei historischen Geräten wurde der Zeiger teilweise durch einen Stift ersetzt, sodass der Verlauf über einer Walze aufgezeichnet werden konnte.

Auf ähnliche Weise funktionieren moderne automatische Drucksensoren. Aufgrund des Drucks kommt es auch hier zur Verformung einer Membran. Das Auslesen erfolgt je nach Modell auf unterschiedliche Weise, beispielsweise resistiv oder kapazitiv [Vgl. hbm.com: Drucksensoren].

Ein vergleichsweise ungebräuchliches Gerät zur Bestimmung des Drucks ist das Hypsometer, das den druckabhängigen Siedepunkt von Wasser ausnutzt.

Nicht nur für den Flugverkehr ist der Atmosphärendruck von Bedeutung sondern auch für das Klima. Die von Messstationen gemessenen Luftdrücke werden in Bodenwetterkarten gesammelt. An Stelle von einzelnen Messwerten werden die Messwerte zu Isobaren, also Linien, entlang derer gleicher Druck herrscht, zusammengefügt. Eine solche Bodenwetterkarte ist in Abbildung 22 dargestellt.

Entlang der Isobaren ist der Luftdruck in Hektopascal (hPa) aufgetragen [Klose, 2016, Vgl. S. 111 ff]. Dies ist die in der Meteorologie gängige Einheit für Druck.

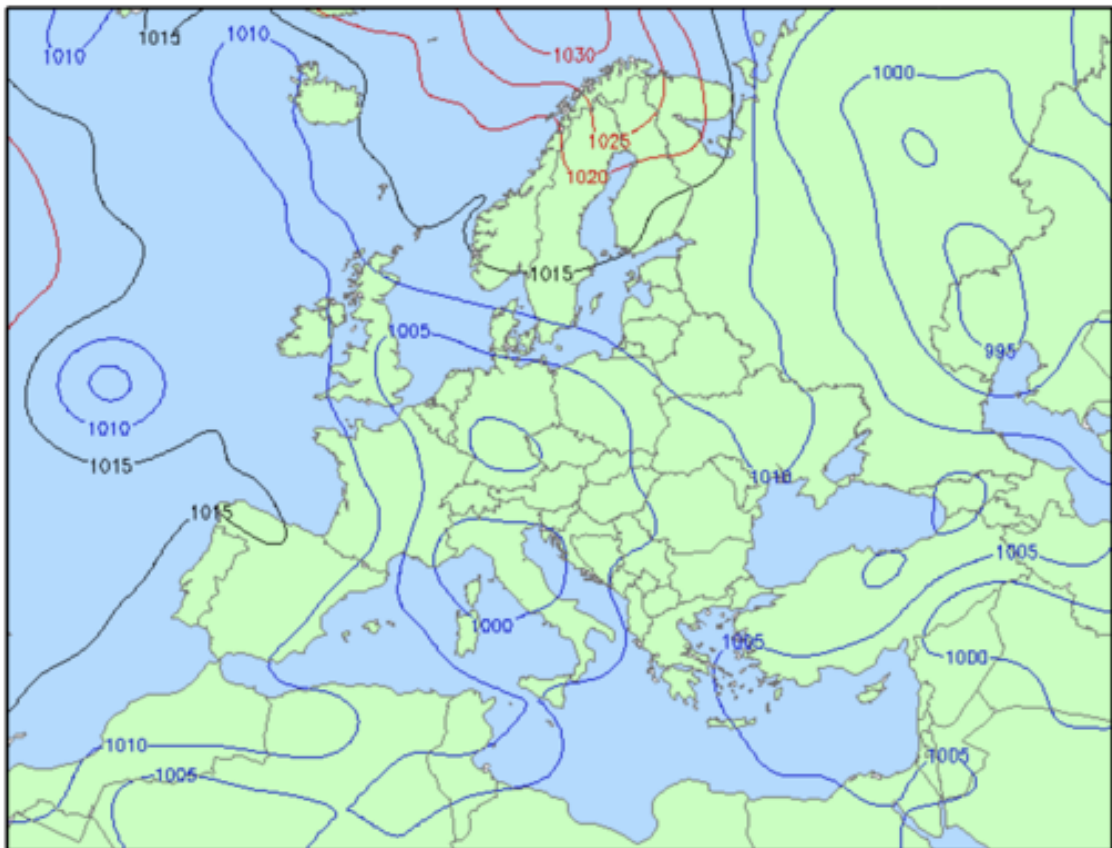


Abbildung 22: Luftdruckkarte vom 28.07.2019

Abgeschlossene Gebiete tiefen Drucks werden als Tiefdruckgebiete bezeichnet. In Abbildung 22 ist ein Tiefdruckgebiet über Süd- und Mitteleuropa zu sehen. Tiefdruckgebiete lassen sich weiter in thermische und dynamische Tiefdruckgebiete unterteilen. Beide weisen in Bodennähe einen niedrigen Luftdruck auf. Das thermische Tiefdruckgebiet besitzt in höheren Lagen jedoch einen höheren Druck. Die Luft strömt auf das Zentrum des Tiefdruckgebiets zu. Gebiete mit einem hohen Luftdruck werden als Hochdruckgebiete bezeichnet. Die Luft strömt vom Zentrum des Hochdruckgebiets ab [Klose, 2016, Vgl. S. 113 f].

Auffällig ist, dass sowohl Tief- als auch Hochdruckgebiete eine Rotation besitzen. Auf der Nordhalbkugel rotieren Tiefdruckgebiete entgegen dem Uhrzeigersinn, diese Rotationsrichtung wird auch als zyklonal bezeichnet. Dem gegenüber rotieren Hochdruckgebieten auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn, antizyklonal. Zur Veranschaulichung siehe Abbildung 21. Die Entstehung dieser Rotation lässt sich mittels der Coriolis-Kraft erklären [Meschede, 2015, Vgl. S. 43 ff].

Im zeitlichen Verlauf weist der Luftdruck deutliche Schwankungen auf. Verantwortlich dafür sind zum einen wechselnde Tief- und Hochdrucklagen. Zum anderen kommt es zu einer periodischen Schwankung im Tagesgang mit einer Periodendauer

von 12 Stunden. Grund dafür ist der „Tagesgang der Temperatur in Verknüpfung mit einer Resonanzschwingung der Atmosphäre“ [Klose, 2016, S. 117]. Der niedrigste Luftdruck kann um vier Uhr morgens und nachmittags gemessen werden, der höchste Luftdruck um zehn Uhr morgens und abends [Klose, 2016, Vgl. S. 117].

2.5 Schall

Schall ist im Alltag allgegenwärtig. Dennoch können wir nur einen geringen Teil des Schallspektrums wahrnehmen. Der für den Menschen hörbare Frequenzbereich beginnt bei ca. 16 Hz und endet bei ca. 16 kHz. Der Frequenzbereich unterhalb unseres Hörbereichs wird als Infraschall bezeichnet, der Bereich oberhalb bis ca. 10 MHz als Ultraschall. Jenseits von 10 MHz beginnt der Hyperschallbereich [Demtröder, 2013, Vgl. S. 371].

In der Akustik wird Schall außerdem aufgeteilt in Ton, Klang, Geräusch und Knall. Ein Ton ist dabei „eine reine harmonische Schwingung, deren Amplitude konstant ist oder sich zumindest nur langsam gegen die Schwingungsdauer T ändert“, ein Klang „eine periodische, aber nicht rein sinusförmige Schwingung“, der aus mehreren Tönen entsteht; dem gegenüber ist ein Geräusch eine unperiodische Schwingung und ein Knall ein kurzer Impuls [Demtröder, 2013, S. 371].

Bei Schall handelt es sich um „mechanische Schwingungen und Wellen [in] elastische[n] Medien“ [Grote, 2007, S. W23]. Er breitet sich dabei im Medium als Druck- und somit auch Dichteschwankung aus. Schallwellen sind Longitudinalwellen [Blau, 2009, Vgl. S. 122]. Der Ausbreitungsbereich der Schallwelle wird als Schallfeld bezeichnet.

Die Phasengeschwindigkeit, mit der sich eine Schallwelle in einem Medium ausbreitet, wird als Schallgeschwindigkeit c_s bezeichnet. Für einen Festkörper gilt [Demtröder, 2013, S. 350 f]:

$$c_s = v_{ph} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \lambda \cdot f \quad (27)$$

E ist dabei das Elastizitätsmodul des Körpers, ρ seine Dichte. Diese Gleichung gilt auch für Flüssigkeiten. Das Elastizitätsmodul E wird dann jedoch durch das Kompressionsmodul K ersetzt [Demtröder, 2013, Vgl. S. 354].

Für ein Gas mit dem Druck p gilt analog [Demtröder, 2013, S. 353]:

$$c_s = v_{ph} = \sqrt{\frac{p}{\rho}} \quad (28)$$

Da der Druck p und die Dichte ρ eines Gases abhängig von der Temperatur sind, ist auch die Schallgeschwindigkeit c_s des Gases temperaturabhängig [Demtröder, 2013, Vgl. S. 353]. Ebenso kann man aus Gleichung 28 schließen, dass in einem Vakuum keine Ausbreitung möglich ist. In Tabelle 1 sind Schallgeschwindigkeiten ausgewählter Stoffe bei Normaldruck angegeben [Kuchling, 2011, Vgl. S. 650 f]. Es zeigt sich, dass je nach Stoff erhebliche Unterschiede bestehen können.

Tabelle 1: Schallgeschwindigkeiten verschiedener Stoffen

Stoff	Schallgeschwindigkeit	Stoff	Schallgeschwindigkeit
Luft, trocken, 20 °C	344 m/s	Eis, -4 °C	3200 m/s
Luft, trocken, -20 °C	319 m/s	Eisen	5180 m/s
Wasser, dest., 20 °C	1483 m/s	Buchenholz	3300 m/s
Meerwasser	1531 m/s	Gummi	54 m/s

Bei der Ausbreitung in einem Medium ist der Schallwelle ein Wellenwiderstand Z entgegengesetzt. In einem gleichmäßigen Medium gilt:

$$Z = \frac{p}{v} \quad (29)$$

$$Z = c \cdot \rho \quad (30)$$

Gemäß Gleichung 29 ist der Wellenwiderstand antiproportional zur Schallschnelle v . Diese beschreibt die „Wechselgeschwindigkeit schwingender Teilchen“ [Grote, 2007, S. W23]. Die im Fernfeld gültige Gleichung 30 zeigt, dass der Wellenwiderstand proportional zu seiner Dichte ist. Wie auch die Schallgeschwindigkeit ist der Wellenwiderstand temperaturabhängig.

Neben den bereits genannten Größen lässt sich Schall mit Hilfe weiterer Größen charakterisieren.

Der Schalldruck Δp beschreibt den Druckwechsel, der bei der Übertragung der Schallwelle entsteht. Der geringste für den Menschen wahrnehmbare Schalldruck p_s liegt bei $20 \mu\text{Pa}$ ($f = 1 \text{ kHz}$) [Grote, 2007, Vgl. S. W23]. Im Zusammenhang mit dem menschlichen Gehör wird der Schalldruck daher oftmals als Pegel mit δp_s als Bezugsmaß angegeben. Da der Schalldruck eine Leistungswurzelgröße ist, gilt für den Schalldruckpegel L_p [Demtröder, 2013, S. 372]:

$$L_p = 20 \cdot \log \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_s} \right) \quad (31)$$

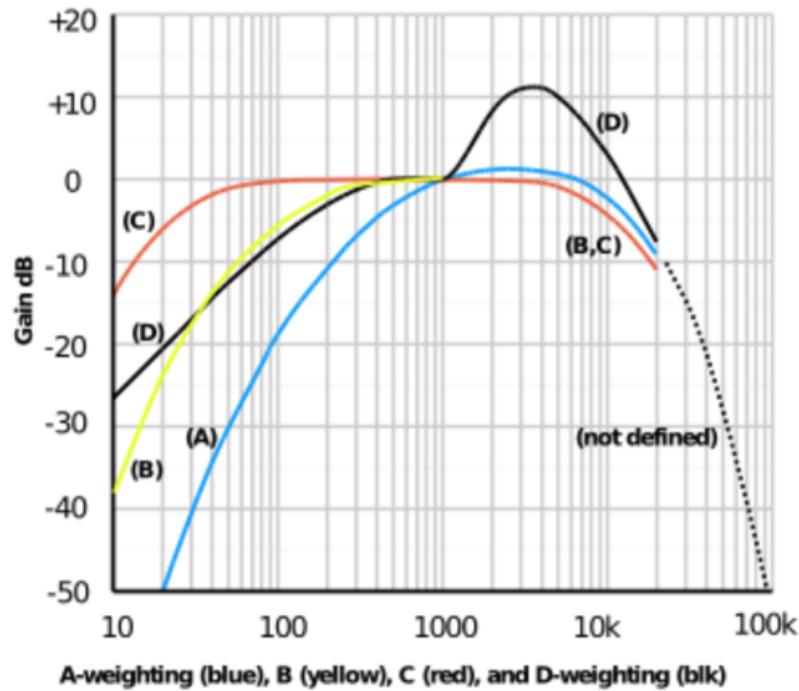


Abbildung 23: Filter für die Gewichtung von Schalldruckpegeln

Für den in Luft in der Nähe der Erdoberfläche größtmöglichen Schalldruckpegel gilt damit mit $p = 101300 \text{ Pa}$ in Bezug auf p_s :

$$L_{max} = 20 \cdot \log \left(\frac{101300 \text{ Pa}}{20 \mu\text{Pa}} \right) = 194,09 \text{ dB} \quad (32)$$

Da das menschliche Gehör nicht über den gesamten Frequenzbereich gleich empfindlich ist, wird bei der Beurteilung von Schalldruckpegeln eine Frequenzbewertung vorgenommen. Dabei wird versucht, mit einem Filter den frequenzabhängigen Empfindlichkeitsverlauf des Gehörs nachzubilden. Am häufigsten wird dabei die A-Bewertung vorgenommen. Der bewertete Schalldruckpegel wird in dB(A) angegeben, um dies deutlich zu machen [Vgl. lindsay.co.uk]. In Abbildung 23 ist die Verstärkung bzw. Dämpfung verschiedener Filter über die Frequenz aufgetragen.

Zwei weitere wichtige Größen sind die Schalleistung P , also die Leistung, die in Form von Schall übertragen wird, und die Schallintensität I als Flächenleistungsdichte des Schalls. Das menschliche Ohr ist noch in der Lage, bei einer Frequenz von 1 kHz eine Schallintensität I_s von $10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ wahrzunehmen [Vgl. lindsay.co.uk]. Ähnlich wie beim Schalldruck wird auch bei der Schallintensität oftmals ein Pegel angegeben; analog wird der als Hörschwelle bestimmte Minimalwert als Bezugsmaß herangezogen. Es gilt:

$$L_{st} = 10 \cdot \log \left(\frac{I}{I_s} \right) \quad (33)$$



Abbildung 24: Kohlemikrofon (li.)
und Elektretmikrofon (re.)

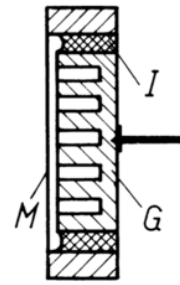


Abbildung 25:
Aufbau eines
Kondensatormi-
krofons

Der Pegel der Schallintensität wird auch als Lautstärke bezeichnet. Als Einheit wird das Phon verwendet.

In der Messtechnik wird in der Regel der Schalldruck gemessen. Dazu werden Schallwandler eingesetzt. Ein Beispiel für einen Schallwandler stellt das Mikrofon dar. Im Laufe der Jahre wurden zahlreiche Mikrofontypen unterschiedlichster Funktionsweisen entwickelt.

Grob ist eine Unterteilung in aktive und passive Mikrofone möglich. Als Beispiel für einen aktiven Wandler dient das früher weit verbreitete Kohlemikrofon (Abbildung 24, links). Hinter einer dünnen, gleichzeitig als Kontakt dienenden Membran befindet sich Kohlegrieß. Der Widerstand des Grieß zwischen dem Membrankontakt und einem weiteren Kontakt, dem Gegenkontakt, ist abhängig vom Grad der Auslenkung der Membran [Bóre, 1999, Vgl. S. 9].

Als passive Wandler werden hauptsächlich dynamische Mikrofone und Kondensatormikrofone verwendet. Die Funktion des dynamischen Mikrofons basiert auf der elektromagnetischen Induktion. Auf eine Membran treffende Schallwellen regen die Membran zu einer Bewegung an. An der Membran ist eine Spule befestigt, die durch ein Magnetfeld bewegt wird. Auf diese Weise wird eine Spannung induziert, die weiterverarbeitet werden kann [Bóre, 1999, Vgl. S. 26 ff].

Kondensatormikrofone besitzen einen den Kohlemikrofonen ähnlichen Aufbau. Jedoch ist der Raum zwischen den Kontakten nicht mit Kohlegrieß sondern mit Luft gefüllt. Der schematische Aufbau eines Kondensatormikrofons ist in Abbildung 25 dargestellt. Schallwellen bringen auch hier die Membran (M) zum Schwingen. Dadurch ändert sich die Kapazität zwischen der Membran und dem Gegenkontakt (G). Beide sind durch einen Isolator (I) voneinander getrennt [Bóre, 1999, S. 32 f]. Eine Weiterentwicklung der einfachen Kondensatormikrofone stellt das Elektretmikrofon dar (Abbildung 24, rechts). Elektretmikrofone machen einen Großteil der heute verwendeten Mikrofone aus.

Nach der Definition der Berufsgenossenschaft Holz und Metall ist Lärm ein „Geräusch [...], das stören, belästigen, die Gesundheit schädigen und die Unfallgefahr erhöhen kann“ [Berufsgenossenschaft Holz Metall (BGHM), 2017, S. 8].

Neben psychischer Belastung durch vermehrten Stress und bei langfristig erhöhten Schalldruckpegeln einer Schädigung des Gehörs kann es unter anderem zu „Schlaflosigkeit, Nervosität, Erhöhung des Blutdruckes, Beschleunigung der Herzrhythmus, Stoffwechselstörungen und ähnlichen Beeinträchtigungen“ kommen [Berufsgenossenschaft Holz Metall (BGHM), 2017, S. 8]. Es ist eine Einteilung von Lärm mittels des Schalldruckpegels in vier Lärmbereiche möglich. In Lärmbereich 1 bis 65 dB(A) kann es zu „psychischen Reaktionen“, wie erhöhtem Stress, kommen. In Lärmbereich 2 bis 90 dB(A) treten bereits „vegetative Veränderungen“ auf. Lärmbereich 3 bis 120 dB(A) kann zu „organischen Schädigungen“ führen. Lärmbereich 4 fasst jeglichen Lärm mit einem Schalldruckpegel über 120 dB(A) zusammen [Grote, 2007, S. W23].

Daher wird auch die Lärmbelastung ähnlich wie die Feinstaubbelastung durch das BImSchG erfasst. Hierfür zuständig sind §§47a - f [Vgl. [gesetze-im-internet.de: BImSchG §47](http://gesetze-im-internet.de/BImSchG_47)]. Für Lärmbelastungen am Arbeitsplatz gilt zudem die Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefahren durch Lärm und Vibrationen (LärmVibrationsArbSchV) [Berufsgenossenschaft Holz Metall (BGHM), 2017, Vgl. S. 11].



Abbildung 26: Messstation in der Reinhold-Frank-Straße

Die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) unterhält in diesem Zusammenhang für Messungen zur Lärmbelastung durch Straßen-, Schienen- und Flugverkehr Messstationen. In Abbildung 26 ist die Messstation in der Reinhold-Frank-Straße, Karlsruhe zu sehen.

Im Abstand von 10 Sekunden wird in einer Höhe von 4,5 m der A-bewertete Schalldruckpegel bestimmt und zur Auswertung über 30 Minuten gemittelt. Die Station ist zudem mit einem Thermometer, Hygrometer, Anemometer (Windgeschwindigkeit) und Messgerät für die Niederschlagsmenge ausgestattet. Auf diese Weise können wetterbedingte Störungen beispielsweise durch starken Regen oder Wind korrigiert werden. Verkehrszählstationen erfassen zudem durch ein Radarsystem Zahl und Typ der passierenden Fahrzeuge [Bayer, 2019, Vgl. S. 8]. Aktuelle Messdaten werden auf der Seite des LUBW veröffentlicht. Des Weiteren misst die Station den Feinstaubpegel (PM_{2,5} und PM₁₀) sowie die Konzentration verschiedener Gase.

2.6 Luftfeuchtigkeit

Im Alltag ist Wasserdampf für gewöhnlich unsichtbar. Erst, wenn er bereits wieder zu Wassertropfen kondensiert Wolken bildet oder sich als Tau absetzt nehmen wir ihn vermeintlich wahr. Dennoch macht der Partialdruck von Wasserdampf in Bodennähe bei 20 °C ca. 2 Prozent des Gesamtdrucks aus [Klose, 2016, Vgl. S. 147]. Damit ist Wasserdampf in Bodennähe der drittgrößte Bestandteil der Atmosphäre.

Umgeben man zum Beispiel ein mit Wasser gefülltes Gefäß mit trockener Luft, d.h. es herrscht ein niedriger Partialdruck von Wasserdampf e in der Luft, wechseln Wassermoleküle von der flüssigen in die gasförmige Phase, das Wasser verdunstet. Ist das Volumen der umgebenden Luft begrenzt, so beginnt mit steigendem Partialdruck des Wasserdampfs e eine wachsende Anzahl von Wassermolekülen wieder aus der gasförmigen in die flüssige Phase zu wechseln [Meschede, 2015, S. 296 f].

Solange mehr Moleküle die flüssige Phase verlassen, ist der Wasserdampf in der Luft untersättigt. Ab einem bestimmten Partialdruck kommt es zu einem Gleichgewicht zwischen beiden Phasen, der Dampf ist nun gesättigt. Es herrscht der Sättigungsdampfdruck e_w [Klose, 2016, S. 148 f].

Der Sättigungsdampfdruck e_w ist abhängig von der Lufttemperatur; mit steigender Lufttemperatur nimmt der Sättigungsdruck exponentiell zu. Dieser Zusammenhang lässt sich mittels der Magnus-Formel bestimmen. Für e_w gilt [Klose, 2016, S. 149]:

$$e_w(t) = 6,10708 \cdot e^{\frac{17,08085 \cdot t}{234,17+t}} \quad (34)$$

Zu beachten ist, dass die Magnus-Formel die Angabe der Temperatur in Grad Celsius erfordert. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird aus diesem Grund hierfür deshalb t statt T verwendet.

Um die Luftfeuchtigkeit zu beschreiben, werden neben dem Partialdruck noch die absolute, relative und spezielle Luftfeuchtigkeit verwendet.

Die absolute Luftfeuchtigkeit ρ_w gibt die Dichte des in der Luft vorhandenen Wasserdampfs an. Diese ist proportional zum aktuellen Partialdruck des in der Luft vorhandenen Wasserdampfs e . Es gilt dabei [Klose, 2016, S. 151]:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V} = \frac{e}{R_w \cdot T} \quad (35)$$

m_w ist die Masse des Wasserdampfs im Luftvolumen V , R_w ist die spezifische Gaskonstante des Wasserdampfs. Sie beträgt $461,6 \frac{J}{kg \cdot K}$ (Vgl. ebd., S. 150). Gleichung 35 gilt bei konstantem Luftdruck und -volumen.

Die relative Luftfeuchtigkeit RH beschreibt den Grad der Sättigung mit Wasserdampf, den die Luft erreicht hat. Sie ist „das Verhältnis zwischen dem aktuellen und dem maximal möglichen Dampfdruck“ [Klose, 2016, S. 150]. Es gilt [Klose, 2016, S. 150]:

$$RH = \frac{e}{e_w} \cdot 100\% \quad (36)$$

Gesättigte Luft besitzt demnach eine relative Luftfeuchtigkeit RH von 100 %. Es ist außerdem möglich, die relative Luftfeuchtigkeit auf über 100 % zu erhöhen. Die Luft ist dann übersättigt. Eine deutliche Übersättigung ist jedoch nur unter Versuchsbedingungen möglich. In der Atmosphäre kommt es durch in der Luft befindliche Partikel, die als Kondensationskeime dienen, zur Bildung kleiner Tröpfchen. Auf diese Weise bilden sich Nebel und Wolken.

Wie bereits zuvor beschrieben, ist der Atmosphärendruck und damit verbunden die Dichte der Luft ρ_l abhängig von der Höhe. Die spezielle Luftfeuchtigkeit s bietet die Möglichkeit, die Luftfeuchtigkeit auf verschiedenen Höhen miteinander vergleichen zu können. Es gilt [Klose, 2016, S. 151 f]:

$$s = \frac{\rho_w}{\rho_l} \quad (37)$$

Zur Messung der Luftfeuchtigkeit stehen verschiedene Methoden zur Auswahl. Eine klassische Methode stellt das Haarhygrometer dar. Dabei steht ein Haar bzw. ein Haarbündel unter Zugspannung. Eine Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit führt zu einer Längenänderung des Haars. Die Längenänderung lässt sich auf einen Zeiger übertragen [Klose, 2016, S. 155]. In Abbildung 27 ist ein geöffnetes Haarhygrometer dargestellt.

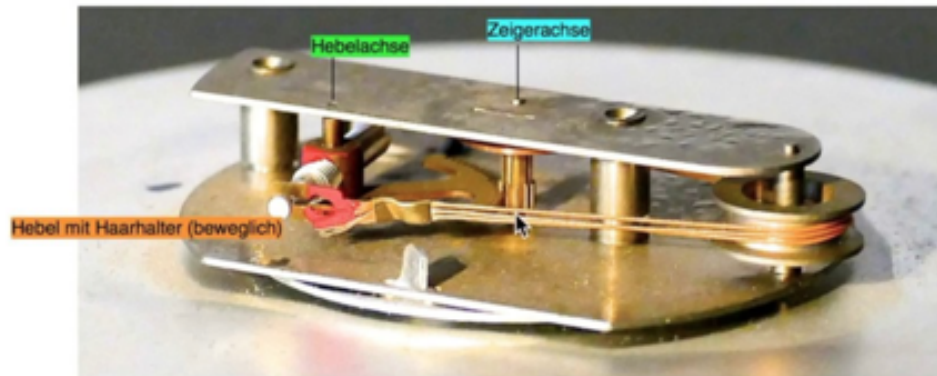
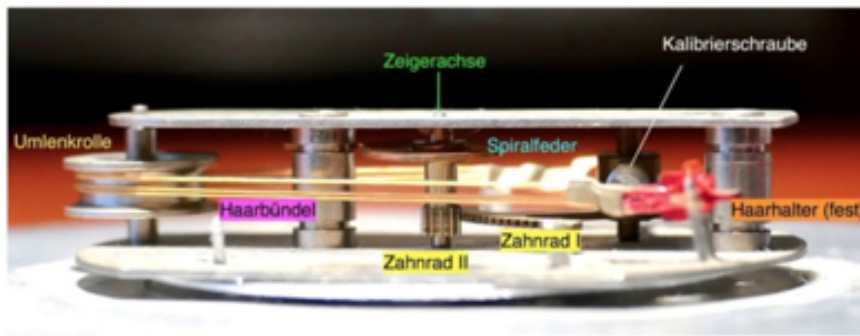


Abbildung 27: Haarhygrometer

Eine weitere Möglichkeit zur manuellen Messung stellt das Psychrometer. Es besteht aus zwei Thermometern. Eines der Thermometer befindet sich in einer mit einem befeuchteten Stoff überzogenen Glaskugel. Durch Schleudern der Kugel kommt es zu einer messbaren Abkühlung und somit zu einer Differenz der Messwerte beider Thermometer. Da die Verdunstungsrate abhängig von der Luftfeuchtigkeit ist, lassen sich bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchtigkeiten verschiedene Temperaturdifferenzen feststellen. Diese dienen als Rechengrundlagen [Klose, 2016, S. 156].

In automatisierten Messablagen kommen Luftfeuchtigkeitssensoren zum Einsatz. Diese funktionieren nach zahlreichen Prinzipien. Weit verbreitet sind kapazitive Sensoren, bei denen Folien einen Kondensator bilden. Der Raum zwischen den einzelnen Kondensatorplatten ist für Luft zugänglich. Luft hoher Feuchtigkeit besitzt eine andere Dielektrizitätskonstante als Luft geringer Feuchtigkeit. Mit Hilfe einer Messbrücke und eines Oszillators kann die relative Luftfeuchtigkeit bestimmt werden [Bernstein, 2014, S. 328 ff].

Neben der kapazitiven Messung finden auch resistive Verfahren Anwendung. Als Beispiele dafür sollen Aluminiumoxid-Fühler dienen. Das poröse Aluminiumoxid, das sich zwischen zwei Kontakten befindet, nimmt Feuchtigkeit aus der Luft auf. Dadurch ändert sich neben der Dielektrizitätskonstante auch der Widerstand der Schicht. Um einen Austausch zwischen Luft und Aluminiumoxid zuzulassen, besteht einer der beiden Kontakte aus einer dünnen, durchlässigen Goldschicht. Aluminiumoxid-Sensoren gelten als widerstandsfähig und wurden ursprünglich unter anderem in der Raumfahrt eingesetzt. Nachteile bestehen darin, dass die Oxidschicht nur

Temperaturen bis 70 °C standhält und dass die Wasseradsorption stark temperaturabhängig ist, sodass ein Einsatz bei konstanter Temperatur empfohlen wird [Bernstein, 2014, S. 321 ff].

Ähnlich wie für die Temperaturmessung gibt es auch für die Messung der Luftfeuchtigkeit Vorgaben des Deutschen Wetterdienstes. Da die Messungen in der Regel an den selben Anlagen durchgeführt werden, gelten an das Messfeld die bereits oben genannten Vorgaben. Auch die Luftfeuchtigkeit wird in einer Höhe von zwei Metern in einer Wetterhütte gemessen [Deutscher Wetterdienst, 2017, S. 7].

3 Fachdidaktische Hintergründe

3.1 Nachhaltigkeit

3.1.1 Die Entwicklung des Nachhaltigkeitsbegriffs

Der Begriff der Nachhaltigkeit ist heutzutage allgegenwärtig anzutreffen. Auch wenn es scheint, es handle sich dabei um einen noch recht neuen Begriff, so besitzt er bereits eine lange Vorgeschichte.

Der deutsche Beamte Johann Carl von Carlowitz (1645 - 1714) verfasste im Jahre 1713 sein Werk „Sylvicultura Oeconomica oder hauswirthliche Nachricht und naturgemäße Anweisung zur wilden Baum-Zucht“. Es befasst sich mit der Forstwirtschaft, die zu dieser Zeit Teil des Aufgabenbereichs von von Carlowitz war. Von Carlowitz macht darin deutlich, dass zu einer Zeit nicht mehr Holz aus einem Waldstück entnommen werden darf als in der Zwischenzeit in nutzbarer Form nachwachsen kann. Dies entspricht dem ökonomischen Prinzip, „von den „Zinsen“ des Kapitals [...] zu leben, und nicht das Kapital ([hier der] Wald) selbst anzugreifen“. Dabei sprach von Carlowitz erstmals von einer „nachhaltenden Nutzung“ der vorhandenen Ressource Wald [Heinrichs, 2014, S. 5].

Der Mathematiker, Ökonom und Bevölkerungswissenschaftler Thomas Malthus (1766 - 1834) stellte gegen Ende des 18. Jahrhunderts sein Bevölkerungsgesetz auf. Dieses weist auf das „Missverhältnis zwischen der Ressourcenmenge in einem Lebensraum und der Bevölkerungszahl“ hin [Heinrichs, 2014, S. 6]. Im Rahmen der Tragfähigkeitstheorie der Bevölkerungswissenschaft zu Malthus Zeiten führen bessere Lebensumstände zu einer Zunahme der Geburtenrate. Dies führt zu einem Wachstum der Bevölkerung mit gleichzeitigem Anstieg der benötigten jedoch begrenzten Ressourcen, sodass es schließlich zu einem Ressourcenmangel kommt.

Die Berechnungen der damaligen Bevölkerungswissenschaftler wiesen jedoch große Schwankungen auf; während Malthus eine Tragfähigkeit von ca. 1 Milliarde Menschen bestimmte, sagten beispielsweise Süßmilch und Euler eine Tragfähigkeit 14 Milliarden voraus [Vgl. bpd.de: Geschichte der Bevölkerungswissenschaft].

Bedingt auch durch die Entwicklungen der industriellen Revolution wurde den Vorhersagen von Malthus kaum Aufmerksamkeit geschenkt. Stattdessen gerieten soziale und ökonomische Probleme in den Vordergrund.

Anstoß für erste weitgreifende Nachhaltigkeitsdebatten lieferte die US-amerikanische Biologin Rachel Carson (1907 - 1964) mit ihrem im Jahr 1962 veröffentlichten Buch „Der stumme Frühling“, im englischen Originaltitel „Silent Spring“, das sich mit dem Einsatz und den ökologischen Auswirkungen von Pestiziden auseinandersetzt. In diese Zeit vielen auch mehrere Umweltkatastrophen wie das Unglück der Torrey Canyon im Jahr 1967, das zu einer großen Ölpest führte und großes Aufsehen erregte.

Der 1968 gegründete Club of Rome sorgte mit seinem 1972 veröffentlichten Bericht „Die Grenzen des Wachstums“ für eine weitere Ausweitung der Debatten.

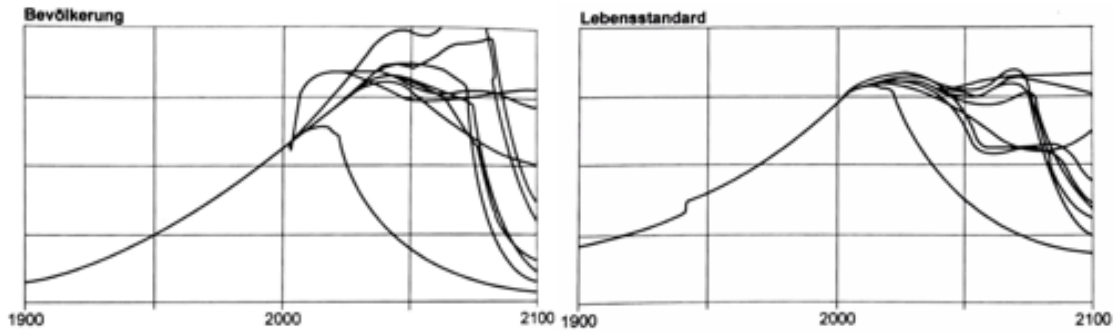


Abbildung 28: Prognose des Club of Rome bezüglich Bevölkerungszahl und Lebensstandard

Der Bericht legte verschiedene berechnete Vorhersagen für die Entwicklung der Bevölkerungszahl und des Lebensstandards dar. So sagte ein Großteil der Prognosen einen drastischen Rückgang beider Variablen im Laufe des 21. Jahrhunderts voraus [Heinrichs, 2014, Vgl S. 6]. In Abbildung 28 sind einige der Voraussagen dargestellt.

Noch im selben Jahr fand die United Nations Conference on the Human Environment statt, aufgrund ihres Austragungsorts oft auch als Stockholm-Konferenz bezeichnet. Die Teilnehmer der Konferenz hatten dabei zwei scheinbar verschiedene Schwerpunkte. So ging es zum einen um „Maßnahmen zur Begrenzung industrieller Umweltverschmutzung und zum Schutz von Ökosystemen [...] um [damit] eine drohende Umweltkatastrophe abzuwenden“, zum anderen um Ziele wie „die Bekämpfung der Armut, der Aufbau von Schul- und Bildungssystemen, die Versorgung mit sauberem Wasser und die Gewährleistung medizinischer Dienste“ [Heinrichs, 2014, S. 8]. Eine Teilung verlief zwischen dem wirtschaftlich starken Norden und dem schwachen Süden.

Unter dem Kompromiss „poverty is the biggest polluter“ kam es schließlich zum Action Plan for the Human Environment, der von dem eigens dafür geschaffenen United Nations Environment Programme, kurz UNEP, umgesetzt werden sollte [Heinrichs, 2014, S. 9]. Der Action Plan umfasste neben weiterer Vereinbarungen zum Schutz der Umwelt auch die Aufklärung der Bevölkerung. Zunehmend wurde neben dem Süden auch der Norden in die Pflicht genommen durch die „Forderung nach einer Reduzierung des Umweltverbrauchs der reichen Länder [...] [, um ein] stabiles ökologisches und soziales Gleichgewicht [...] zu erzielen“ [Heinrichs, 2014, S. 10]. Damit verbunden war die Erkenntnis, dass nicht Wachstum sondern Konsum der entscheidende Faktor ist.

Im Rahmen der World Conservation Strategy aus dem Jahre 1980 wurde klar, dass „[o]hne die Erhaltung der Funktionsfähigkeit der Ökosysteme [...] die ökonomische Entwicklung ebenfalls nicht aufrecht zu erhalten sein [wird]“ [Heinrichs, 2014, S. 11]. Eine nachhaltige Entwicklung der Wirtschaft und Gesellschaft muss also dazu führen, dass, in Anlehnung an von Carlowitz, das Kapital erhalten bleibt.

Eine Sonderkommission der UN, nach ihrer Leiterin auch Brundtland-Kommission

genannt, arbeitete Mitte der 1980er Jahre drei wesentliche gegenwärtige Probleme aus. Dabei handelte es sich um den „Raubbau an den natürlichen Lebensgrundlagen“, „die wachsende Ungleichheit und Armut“ und „die Bedrohung von Frieden und Sicherheit“, aus denen sich direkt die Grundvoraussetzungen einer nachhaltigen Entwicklung herleiten ließen: „Bewahrung der Umwelt, Herstellung sozialer Gerechtigkeit und Gewährleistung sozialer Partizipation“ [Heinrichs, 2014, S. 12 f].

Ein weiteres Ergebnis der Arbeit dieser Kommission ist eine Definition des Begriffs der nachhaltigen Entwicklung. Demnach ist eine Entwicklung nachhaltig, wenn sie „die Bedürfnisse der heutigen Generationen befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“ [Heinrichs, 2014, S. 12].

Die Arbeit der Sonderkommission war einer der Wegbereiter für die United Nations Conference on Environment and Development, kurz Rio-Konferenz, im Jahre 1992. Zentrale Ergebnisse der Rio-Konferenz sind unter anderem die Deklaration von Rio bestehend aus 27 Grundsätzen, die unter anderem zum ersten Mal eine nachhaltige Entwicklung durch Verbindung von Umweltschutz und Entwicklung (Grundsatz 4) mit einbezieht, die Klimaschutz-Konvention mit Ziel, den CO₂ Ausstoß bis 2050 zu senken, sowie die vierzigteilige Agenda 21 [Vgl. nachhaltigkeit.info: Rio-Konferenz].

Die Agenda 21 umfassen sowohl die Bereiche Soziales, Wirtschaft als auch Ressourcen. Besonders betont wird dabei, dass ein nachhaltigen Konsumverhalten anzustreben ist. In diesem Zusammenhang wird auch auf die nähere Untersuchung von Wirtschaft und Konsum gesetzt [Vereinte Nationen, 1992, Vgl. S. 19]. Des Weiteren sollen oftmals noch benachteiligte Gruppen wie Frauen, Kinder, Bauern und indigene Gruppen gefördert [Vereinte Nationen, 1992, Vgl. S. 276 ff].

In Zuge der Agenda 21 wird den Umsetzungsmaßnahmen ein eigenes Kapitel gewidmet. Dieses umfasst ebenfalls den Bereich der Bildung. So wird in Punkt 36 eine „Neuausrichtung der Bildung auf nachhaltige Entwicklung“ gefordert [Vereinte Nationen, 1992, S. 329]. Bereits hier wird betont, dass eine solche Bildung fachübergreifend eingesetzt werden soll.

Da „formale als auch die nichtformale Bildung [...] [als] unabdingbar für die Herbeiführung eines Einstellungswandels bei den Menschen“ erachtet wird, wird es als Ziel angesehen, mindestens 80 % der Kinder, sowohl Jungen als auch Mädchen, eine Grundschulausbildung zu ermöglichen [Vereinte Nationen, 1992, S. 329 f].

Im letzten Teil der Agenda 21 wird den beteiligten Staaten ein Katalog mit Maßnahmen und Wegen zur Umsetzung der Ziele geboten. Angestrebt wurde eine Umsetzung der festgelegten Ziele in nationales und internationales Recht innerhalb von zehn Jahren. Es herrschte jedoch keine Verbindlichkeit, was von vielen Seiten zu Kritik führte. Mit der Umsetzung wurde die eigens geschaffene Commission on Sustainable Development betraut [Heinrichs, 2014, Vgl. S. 17 f].

In Folge der Rio-Konferenz von 1992 wurden zahlreiche Fachkonferenzen durchgeführt. Zum fünfjährigen Bestehen der Agenda 21 wurde 1997 die Rio+5-Konferenz

durchgeführt. Auf der Konferenz wurde deutlich, dass die bisherige Entwicklung in Folge der Agenda 21 nicht zielführend war und dass weiterhin ein Konflikt zwischen dem Norden und Süden herrschte, der die Umsetzung weiter erschwerte [Heinrichs, 2014, Vgl. S. 18 f].

Zehn Jahre nach der Rio-Konferenz fand in Johannesburg der World Summit on Sustainable Development, im deutschsprachigen Raum der Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung statt. Als Ergebnis entstand die Johannesburg Deklaration on Sustainable Development, die der UN-Generalversammlung zur Übernahme empfohlen wurde.

Die UN-Vollversammlung folge der Empfehlung der Johannesburg-Konferenz und führte die „Weltdekade der Bildung für nachhaltige Entwicklung“ ein, mit deren Umsetzung in der Zeit von 2005 bis 2014 die UNESCO betraut wurde [Vgl. unesco.de: BNE].

Die von den Vereinten Nationen im Jahre 2000 verabschiedeten Millennium-Entwicklungsziele bestanden aus acht Punkten, die in der Übersichtsgrafik in Abbildung 29 dargestellt sind. Eine Umsetzung sollte bis ins Jahr 2015 stattfinden. Auch hier findet sich eine flächendeckende Grundbildung, wie sie bereits in den Agenda 21 gefordert wurde, wieder. Besonders macht die Millennium-Entwicklungsziele, dass erstmals feste Ziele vorgegeben sind, die in einem festgelegten Zeitraum zu erreichen sind [Heinrichs, 2014, Vgl. S. 23].

In ihrem Bericht zum Stand der Umsetzung der Millennium-Entwicklungsziele im Jahre 2015 können die Vereinten Nationen in allen Bereichen deutliche Fortschritte aufweisen. So ist beispielsweise der Anteil der Menschen, die unter extremer Armut leiden (d.h. von unter 1,25 \$ pro Tag leben müssen) um mehr als 30 % im Vergleich zu 1990 gesunken und die Anzahl der Kinder, die keine Schule besuchen, verglichen mit dem Jahr 2000 international fast um die Hälfte geschrumpft [Vereinte Nationen, 2015, Vgl. S. 4 f].



Abbildung 29: Millennium-Entwicklungsziele

Dennoch wird darauf hingewiesen, dass weiterhin zahlreiche Probleme bestehen, einige sich sogar weiterhin ausweiten, wie beispielsweise der deutliche Anstieg von Stickstoffemissionen oder die Anzahl der täglich durch bewaffnete Konflikte Vertrie-

benen, die sich allein zwischen 2010 und 2014 vervierfacht hat [Vereinigte Nationen, 2015, Vgl. S. 8 f].

3.1.2 Konzepte und Dimensionen von Nachhaltigkeit

Nachhaltige Entwicklung ist kein rein wissenschaftliches oder ökonomisches Feld, auch die Ethik spielt eine große Rolle. Gemäß der Verantwortungsethik besitzt der Mensch Verantwortung „für seine natürliche Umwelt, [...] für seine soziale Mitwelt [- sei es für die gegenwärtige oder zukünftige -] und [...] für sich selbst“ [Heinrichs, 2014, S. 25].

Da unterschiedliche Gruppen den Begriff von Nachhaltigkeit bzw. einer nachhaltigen Entwicklung unterschiedlich auffassen, existieren eine Vielzahl verschiedener Begriffskonzepte. Hopwood et al. betrachten die verschiedenen Konzepte im Hinblick auf ihren sozio-ökonomischen und ökologischen Standpunkt. Eine Übersicht bekannter Konzepte bzw. derer Urheber ist in Abbildung 30 dargestellt.

Dabei unternehmen sie eine Einteilung in drei Gruppen: „Status Quo“, „Reformation“ und „Transformation“ [Hopwood et al., 2005, S. 41].

Unterstützer des „Status Quo“, zu denen nach Hopwood et al. neben der Europäischen Union auch zahlreiche Regierungen zählen, lehnen einen Wandel hin zu einer nachhaltigen Entwicklung nicht ab, erachten grundlegende Veränderung („fundamental changes“) jedoch als nicht notwendig [Hopwood et al., 2005, S. 41].

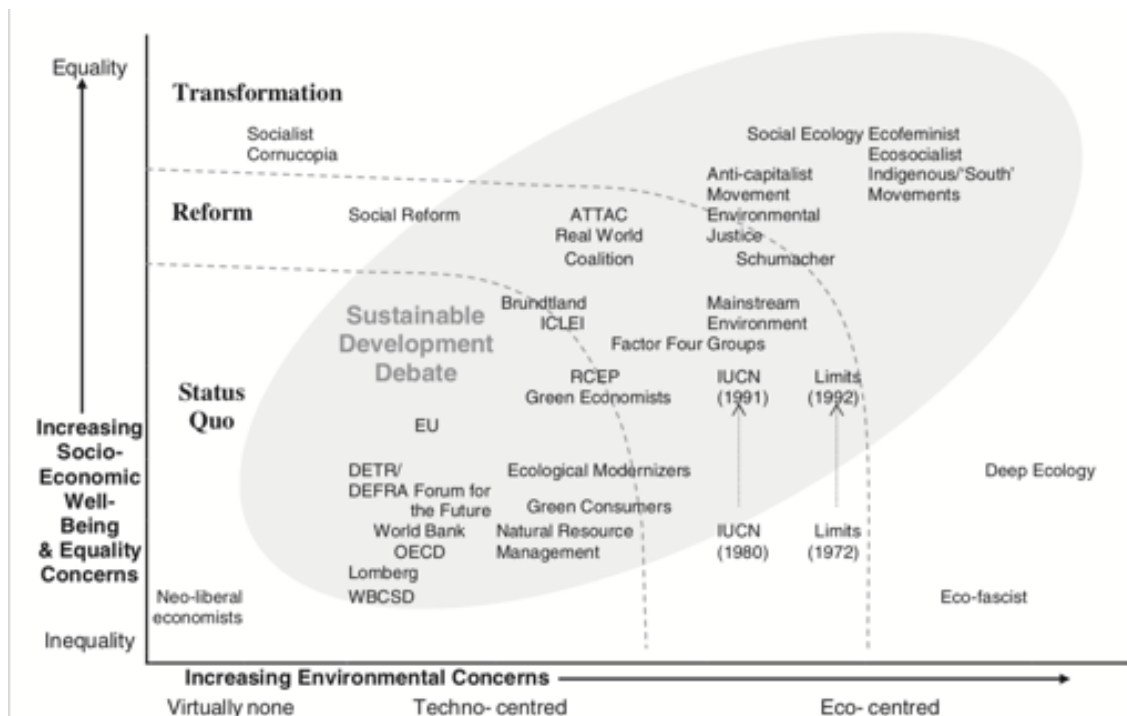


Abbildung 30: Ausrichtung verschiedener Nachhaltigkeitskonzepte

Zu Veränderungen kommt es in erster Linie durch den Verbraucher selbst, weniger durch rechtliche Vorgaben [Hopwood et al., 2005, Vgl. S. 42].

Ähnlich den Unterstützern des „Status Quo“ sehen die Unterstützer der „Reform“ grundlegende Veränderung als nicht notwendig an, erkennen im Gegensatz zu diesen jedoch an, dass es aufgrund der gegenwärtigen Probleme zu einem Wandel durch Reformen des bestehenden Systems kommen muss. Neben Reformen in Politik und Wirtschaft wird auch eine Aufklärung der Bevölkerung als wichtig betrachtet. In diesen Bereich lässt sich auch die oben genannte World Conservation Strategy einordnen [Hopwood et al., 2005, Vgl. S. 43 f].

Als dritte Gruppe existieren die Unterstützer einer „Transformation“. Diese fordern eine grundlegende Veränderung des bestehenden gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Systems als zwingend notwendig, um den Problemen entgegenzutreten zu können. Einige lehnen ebenfalls eine nachhaltige Entwicklung ab [Hopwood et al., 2005, Vgl. S. 45 f].

Da einige Konzepte zu einseitig orientiert sind, scheiden diese für eine Diskussion um eine tatsächlich nachhaltige Entwicklung aus. Hopwood et. al. haben daher den an Diskussionen beteiligten Bereich grau gekennzeichnet.

Die verschiedenen Konzepte umfassen dabei verschiedene Dimensionen von nachhaltiger Entwicklung.



Abbildung 31: Nachhaltigkeitsviereck nach Stoltenberg und Michelsen

Im „Nachhaltigkeitsviereck“ nach Stoltenberg und Michelsen besitzt nachhaltige Entwicklung eine ökonomische, ökologische, soziale und kulturelle Dimension [Stoltenberg, 2005, S. 12 f]. Das „Nachhaltigkeitsviereck“ ist in Abbildung 31 dargestellt.

Im Umgang mit verschiedenen Entwicklungsmodellen lässt sich eine Unterteilung in „Ein-Dimensionen-Modelle“ und „Mehr-Dimensionen-Modelle“ treffen [Heinrichs, 2014, S. 28]. Grundlage dafür ist die Fragen nach der Gewichtung der einzelnen Dimensionen in den Modellen. „Ein-Dimensionen-Modelle“ führen unterschiedliche Gewichtungen der Dimensionen zu Gunsten einzelner Dimensionen durch. Dem gegenüber räumen „Mehr-Dimensionen-Modelle“ allen Dimensionen eine Gleichwertigkeit ein.

Betrachtet man die Diskussionen der vergangenen UN-Konferenzen, so zeigt sich, dass sowohl der Norden als auch der Süden „Ein-Dimensionen-Modelle“ von nachhaltiger Entwicklung aufgreifen, jedoch mit unterschiedlicher Schwerpunktsetzung. Während in Entwicklungsmodellen des Südens vor allem die soziale und / oder ökonomische Dimension überwiegt, setzen die Entwicklungsmodelle des Nordens den Schwerpunkt auf die ökologische Dimension [Heinrichs, 2014, Vgl. S. 29 f].

3.1.3 Bildung für eine nachhaltige Entwicklung

Schon in den 1970ern gab es mit der Umweltbildung Bestrebungen, die zu einer umweltbewussteren Lebensweise führen sollten. In Bezug auf das Nachhaltigkeitsviereck befasste sich die Umweltbildung im Wesentlichen jedoch nur mit der ökologischen Dimension. Die anderen Dimensionen wurden zwar im Rahmen anderer Bereiche aufgegriffen, jedoch nicht zusammenhängend betrachtet [Heinrichs, 2014, Vgl. S. 569 f].

Spätestens mit der Agenda 21, in der die entscheidende Rolle der Bildung bei der Förderung einer nachhaltigen Entwicklung explizit hervorgehoben wurde, wurde der Prozess zur Entwicklung einer entsprechenden Bildung angestoßen. So merkte die Bundes-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung im Jahre 1998 an, dass die bisherige Strategie zur Umweltbildung nicht die erwünschten Ergebnisse erzielt hat. Stattdessen wird ein Wechsel des Leitbilds weg von der reinen Umweltbildung hin zu einer „Bildung für eine nachhaltige Entwicklung“ vorgeschlagen [Bundes-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung, 1998, S. 16 ff]. In diesem Zusammenhang wird ein erster „Orientierungsrahmen“ zur Umsetzung einer „Bildung für eine nachhaltige Entwicklung“ geboten [Bundes-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung, 1998, S. 1]. Zu einer weiteren Entwicklung von Umsetzungsmöglichkeiten im Unterricht wurde ein Jahr später das „Programm „21““ sowie dessen Nachfolgeprogramm „Transfer 21“ gegründet [Heinrichs, 2014, Vgl. S. 571].

Die von der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen, kurz UNECE, im März 2005 verabschiedete „UNECE-Strategie über die Bildung für nachhaltige Entwicklung“ forderte die Mitgliedsstaaten, darunter auch Deutschland, auf, die Bildung für eine nachhaltige Entwicklung „in ihren formellen Bildungssystemen in alle einschlägigen Unterrichtsgegenstände und sowohl in nicht-formelle als auch

in informelle Bildung einzugliedern“ [Vereinte Nationen, Ausschuss für Umweltpolitik, 2005, S. 2].

Diese Strategie hatte für das Bildungssystem weitreichende Auswirkungen, da zur Umsetzung eine „Neuorientierung weg von der ausschließlichen Konzentration auf Vermitteln von Wissen hin zum Auseinandersetzen mit Problemen und dem Suchen nach möglichen Lösungen“ von Nöten war [Vereinte Nationen, Ausschuss für Umweltpolitik, 2005, S. 5].

Auf nationaler Ebene wurde ein „Nationaler Aktionsplan für Deutschland 2011“ von der Deutschen UNESCO-Kommission unter Schirmherrschaft des damaligen Bundespräsidenten Christian Wulff veröffentlicht, dessen Hauptziel die Umsetzung und Verbesserung eines entsprechenden Bildungskonzepts war [Deutsche UNESCO-Kommission, 2011, S. 12].

Zu beachten ist, dass eine Bildung für nachhaltige Entwicklung keine reine Angelegenheit der Schulen und Hochschulen ist sondern ein Prozess, der sich durch das gesamte Leben zieht und somit alle Altersschichten betrifft. Allgemein lässt sich nach dem heutigen Verständnis sagen, dass eine Bildung für nachhaltige Entwicklung dazu führen soll, dass Menschen „sich verantwortlich und kreativ auf der Grundlage eines fundierten Wissens über komplexe Zukunftsfragen an der Gestaltung von Gegenwart und Zukunft im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung [...] beteiligen“ [Heinrichs, 2014, S. 571].

Im aktuellen Bildungsplan des Landes Baden-Württemberg ist die Bildung für nachhaltige Entwicklung, kurz BNE, neben der Bildung für Toleranz und Akzeptanz von Vielfalt sowie der Prävention und Gesundheitsförderung als eine der drei allgemeinen Leitperspektiven vertreten (siehe Abbildung 32). Dabei werden neben der ökologischen Dimension, die bereits in der Umweltbildung im Rahmen früherer Lehrpläne enthalten war, auch die anderen Dimensionen aufgegriffen. Dabei ist BNE als Leitperspektive nicht auf einzelne Fächer beschränkt sondern wird übergreifend umgesetzt.

Auch die Leitperspektiven sind nicht gesondert zu betrachten. So steht BNE in direkter Verbindung mit den anderen Leitperspektiven; BNE lässt sich beispielsweise nicht von der Verbraucherbildung, Medienbildung oder Prävention und Gesundheitsförderung vollständig trennen. Neben der BNE lassen sich die anderen Leitperspektiven ebenfalls mit den vier Dimensionen der Nachhaltigkeit nach Stoltenberg in Verbindung setzen.

Eine bloße Veränderung des Verhaltens erfüllt noch nicht den Anspruch von BNE. Stattdessen hängen sowohl „nachhaltige Entwicklung und sozialer Zusammenhalt [...] entscheidend von den Kompetenzen der gesamten Bevölkerung ab“ [Heinrichs, 2014, S. 574].

Zudem geht mit der Umsetzung der BNE die Notwendigkeit der Fähigkeit und Bereitschaft zur Reflexion und Selbsttätigkeit einher. Es ist notwendig, das eigene sowie das Handeln der Gesellschaft kritisch reflektieren und nachhaltig weiterentwickeln

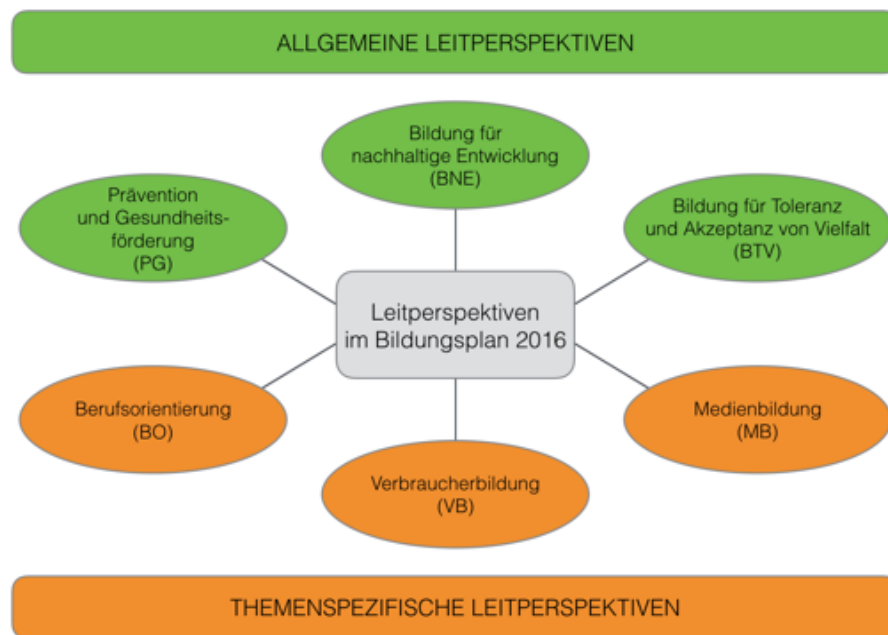


Abbildung 32: Leitperspektiven im Bildungsplan 2016

zu können [Heinrichs, 2014, Vgl. S. 569 ff].

Insofern ist auch die mit dem Bildungsplan 2016 eingeführte starke Orientierung an Kompetenzen zur Umsetzung der BNE erforderlich. Kompetenzen der Schülerinnen und Schüler wie der Menschen außerhalb der Schule müssen selbsttätig erarbeitet werden, sodass ein Wandel der häufig noch auf bloße Wissensvermittlung ausgelegten Lernumgebungen im schulischen Bereich erforderlich ist [Heinrichs, 2014, Vgl. S. 578].

Besonders die MINT-Fächer, in die sich unter anderem die Fächer Physik, Biologie und Technik einordnen lassen, spielen in Bezug auf BNE eine entscheidende Rolle, da sowohl physikalisches und technisches Wissen, Wissen um Umwelt, Wechselwirkungen und Kreisläufe als auch grundlegende Kompetenzen zur Gewinnung, Bewertung als auch Präsentation von naturwissenschaftlichen Erkenntnissen vermittelt werden [BP 2016 Physik, 2016, Vgl. S. 3 und 8 f] und [BP 2016 Biologie, 2016, S. 3].

3.2 Scientific and Data Literacy

Ein Begriff, der zunehmend Bedeutung erlangt, ist der der scientific literacy. In der Übersetzung der OECD bezeichnet scientific literacy eine „naturwissenschaftliche Grundbildung“ [Baumert et al., 2001, S. 3].

Ziel dieser Grundbildung ist es, die Lernenden auch über ihre Schulzeit hinaus dazu zu befähigen, „naturwissenschaftliches Wissen anzuwenden, naturwissenschaftliche Fragen zu erkennen und aus Belegen Schlussfolgerungen zu ziehen, um Entscheidungen zu verstehen und zu treffen, die die natürliche Welt und die durch menschliches

Handeln an ihr vorgenommenen Veränderungen betreffen“ [Baumert et al., 2001, S. 3]. Es geht also nicht nur um eine reine Wissensakkumulation sondern um das Erlangen einer tatsächlichen Bildung, die sie befähigt „als autonome Persönlichkeit am gesellschaftlichen Leben teilnehmen zu können“ [Fischer, 1998, S. 41].

Im Rahmen der PISA-Studien wurde auch die scientific literacy einbezogen. In der PISA-Studie von 2006 wurde speziell der Zusammenhang von Kompetenz von Lernenden und ihrem gezeigten Interesse an den Naturwissenschaften untersucht. Es zeigte sich, dass in der Tat ein Zusammenhang zwischen Kompetenz und Interesse besteht. Ein hoher Anteil der als kompetent eingestuften Lernenden zeigte ebenfalls ein hohes Interesse an den Naturwissenschaften. Für die Unterrichtspraxis lässt sich daraus schließen, dass die Förderung von Interesse im naturwissenschaftlichen Unterricht eine große Rolle bei der Förderung von Kompetenz und scientific literacy spielt [Prenzel et al., 2008, Vgl. S. 7 f].

Die Digitalisierung ist mittlerweile in alle Lebensbereiche vorgedrungen. Daher sollte Schule den Lernenden eine „digitale Bildung“ ermöglichen, durch die die digitalisierte Welt aus „technologischer, gesellschaftlich-kultureller und anwendungsbezogener Perspektive“ in Betracht genommen werden kann [Gesellschaft für Informatik, 2016, S. 3]. In der Dagstuhl-Erklärung aus dem Jahr 2016 heißt es, dass es Aufgabe der einzelnen Fächer sei, die digitale Bildung durch die Herstellung von Bezügen in den Unterricht einzubinden [Gesellschaft für Informatik, 2016, Vgl. S. 3].

Als dazu besonders geeignet sieht Brandhofer Programmieren im Unterricht. Dies begründet er mit der steigenden Bedeutung der Informationstechnik sowohl in der Lebens- als auch Berufswelt [Brandhofer, 2017, Vgl. S. 52]. Neben der reinen Arbeit am Computer stellen mittlerweile kostengünstige und für verschiedene Altersstufen ausgelegte Mikrocontroller- und Einplatinencomputerplattformen wie beispielsweise Arduino, Microbit oder Raspberry Pi (Abbildung 33) eine gute Umsetzungsmöglichkeit nicht nur im Informatikunterricht dar.

Auch in anderen Unterrichtsfächern wie zum Beispiel dem Physik- oder Biologieunterricht führt der Einsatz solcher Plattformen zu zahlreichen neuen Möglichkeiten.

Zum einen können die medialen Vorzüge eines Messcomputers genutzt werden. Auf-



Abbildung 33: Arduino UNO, BBC micro:bit und Raspberry Pi 3B (v.l.n.r.)

grund der in der Regel aber geringeren Kosten können mehr Versuchsaufbauten beschafft werden, sodass die Lernenden die Möglichkeit haben, mehr Versuche selbst durchzuführen [Kircher et al., 2015, Vgl. S. 404 f].

Zum anderen ist es im Rahmen eines Versuchs mit vergleichsweise geringem Aufwand nicht nur innerhalb kürzester Zeit möglich, große Mengen an Messdaten aufzunehmen und zu speichern, sondern auch Messungen über einen größeren Zeitraum durchzuführen. Im Gegensatz zu einem Messcomputer sind solche Messungen problemlos auch außerhalb des Fachraums oder Schulgebäudes möglich. Dies erlaubt es den Lernenden, sich am Umgang mit großen Datenmengen zu erproben. Der sichere Umgang mit Messdaten trägt maßgeblich zum Ausbau einer scientific literacy bei den Lernenden bei. Dabei sind von den Lernenden selbst erhobene Daten denen dritter Quellen vorzuziehen [Crujeiras-Pérez, 2017, Vgl. S. 245].

Nach Wilkerson et al. umfasst die Arbeit der Lernenden im Zuge der „data transformation“ drei Phasen [Wilkerson et al., 2018, S. 1383]. Diese sind in Abbildung 34 dargestellt. In der ersten Phase prüfen die Lernenden die erhaltenen Daten auf ihre Relevanz im Hinblick auf das gesetzte Ziel. Wurde eine ausreichende Relevanz ausgemacht, so kommt es in der nächsten Phase zu einer Betrachtung der Umstände und Methoden der Erhebung, welche zu den vorliegenden Daten geführt haben. In der dritten Phase wird von den Lernenden das weitere Vorgehen hinsichtlich der Verarbeitung geplant [Wilkerson et al., 2018, Vgl. S. 1383].

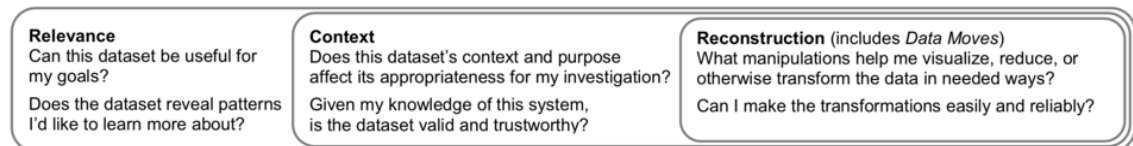


Abbildung 34: Phasen der data transformation

Der angemessene Umgang mit großen Datenmengen ist in einer Zeit, in der das Schlagwort Big Data beinahe allgegenwärtig ist, nicht nur aus wissenschaftlicher Sicht von großer Bedeutung, sondern auch in Bezug auf das Gesellschafts- und Arbeitsleben. Diese Fähigkeit lässt sich als „data literacy“ oder im deutschsprachigen Raum Datenkompetenz bezeichnen. „Data literacy“ lässt sich im Allgemeinen als „die Fähigkeit, Daten auf kritische Art und Weise zu sammeln, zu managen, zu bewerten und anzuwenden“ definieren [Heidrich et al., 2018, S. 22]. Von dieser lässt sich eine enge Verbindung zu scientific literacy herstellen.

Um im Kontext von Schule data literacy zu fördern, bietet sich Projektarbeit an, in deren Verlauf die Lernenden mit selbsterhobenen Daten aus der echten Welt arbeiten können [Ridsdale et al., 2015, Vgl. S. 5].

Sowohl die Förderung von scientific literacy als auch data literacy im Rahmen des Unterrichts oder in citizen science Projekten stellen einen wichtigen Beitrag zu einer Bildung zur nachhaltigen Entwicklung dar. Gemeinsam mit anderen notwendigen Fähigkeiten lässt sich in Bezug auf Nachhaltigkeit von einer „sustainable literacy“

sprechen, die es den Lernenden ermöglicht, den „Herausforderungen des 21. Jahrhunderts begegnen zu können“ [Heinrichs, 2014, S. 575].

3.3 Citizen Science

Bei citizen science handelt es sich um wissenschaftliche Projekte, die mit Beteiligung von Laienwissenschaftlern durchgeführt werden. Dabei ist es möglich, dass das Projekt als Kooperation von Laienwissenschaftlern mit professionellen Wissenschaftlern oder allein von Laienwissenschaftlern durchgeführt wird.

Der Begriff citizen science in seiner heutigen Bedeutung entstand Mitte der 1990er Jahre in Anlehnung an Veröffentlichungen von Alan Irwin. Er beabsichtigte auf diese Weise, die Öffentlichkeit stärker an der wissenschaftlichen Arbeit zu beteiligen. Des Weiteren wurde der Begriff durch die Arbeit des Cornell Lab of Ornithology geprägt. Diese setzten zur Erhebung von Daten Laien ein [Bonney et al., 2015, Vgl. S. 3].

Obwohl der Begriff citizen science recht neu ist, verweisen Miller-Rushing et al. darauf, dass es durchaus üblich war, Laienwissenschaftler zu beteiligen. Als Beispiel nennen sie den schwedischen Naturforscher Carl von Linné (1707 - 1778), der mit seiner Arbeit eine wichtige Grundlage für die moderne Taxonomie legte [Miller-Rushing et al., 2012, Vgl. S. 286].

Auch heute noch können die alten Aufzeichnungen von Laien zu neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen führen. So konnten beispielsweise Tian et al. bei ihren Untersuchungen zu den Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Ökosysteme auf aus China stammende Aufzeichnungen zurückgreifen, die in ihrer Gesamtheit den Verlauf der letzten 3500 Jahre abdecken [Tian et al., 2011, Vgl. S. 14521].

Erst im Laufe des 19. Jahrhunderts entstand das bis heute bestehende Bild der modernen Wissenschaften, in denen Laienwissenschaftler zunächst nur noch eine geringe Rolle spielen. Dennoch greifen einzelne Projekte, zum Beispiel aus den Bereichen Ökologie oder Klimatologie, auf Laien zurück [Miller-Rushing et al., 2012, Vgl. S. 286 f].

Begünstigt durch die Verbreitung des Internets entstanden in den vergangenen zwei Jahrzehnten eine Vielzahl von citizen science Projekten [Bonney et al., 2015, Vgl. S. 3]. Durch die Kooperation mit einer großen Anzahl von Beteiligten wird es möglich, umfangreiche Untersuchungen durchzuführen, die auf andere Weise auf Grund zu hoher Kosten nicht möglich wären. Ebenso können durch citizen science Bereiche betrachtet werden, die zuvor beispielsweise wegen einer zu kleinen Adressatengruppe nicht beleuchtet wurden [Miller-Rushing et al., 2012, Vgl. S. 287].

In diesem Zusammenhang spricht Franzen von der „Inklusion des ‚Jedermann‘ in die Forschungsarbeit“ [Franzen, 2016, S. 2], die im Rahmen der Open Science Bewegung eine „Demokratisierung der Wissenschaft“ anstrebt [Franzen, 2016, S. 9].

Bonney et al. schlagen vier Übergruppen vor, in die sich citizen science Projekte einordnen lassen: „data collection projects“, „data processing projects“, „curriculum-based-projects“ und „community science projects“ [Bonney et al., 2015, S. 4].

Ein großer Teil der citizen science Projekte fällt in die Gruppe der data collection projects. Laien werden hierbei eingesetzt, um Daten zu erheben. Die anschließende Auswertung wird von Wissenschaftlern durchgeführt [Bonney et al., 2015, Vgl. S. 4 ff].

Neben der Erhebung von Daten können Laien im Rahmen von data processing projects auch die Verarbeitung bereits erhobener Daten übernehmen. Die Daten können von Laien selbst, Wissenschaftlern oder automatisierten Messstationen stammen [Bonney et al., 2015, Vgl. S. 6 f]. Mit Apps wie Phylo der McGill Universität, Montreal, wird versucht, citizen science basierte Datenauswertung in Form von beispielsweise Spielen für ein größeres Publikum zugänglich zu machen [phylo.ca].

In eine ähnliche Richtung weisen curriculum-based projects. Während sich die beiden oben genannten Gruppen überwiegend an erwachsene Teilnehmer richten, zielen curriculum-based projects auf Schüler und Jugendliche ab. Diese können im Rahmen von Projektarbeiten oder des Regelunterrichts Daten erheben und / oder auswerten. Lehrpersonen, Eltern oder außerschulische Partner stehen zur Unterstützung bereit [Bonney et al., 2015, Vgl. S. 7 ff].

Unter community science projects werden hingegen Projekte gesammelt, die auf regionaler Ebene stattfinden. Ziel von Projekten dieser Art ist die Einflussnahme auf die lokale Entscheidungsfindung vor allem in der Umweltpolitik. Neben dem eigentlichen wissenschaftlichen Projekt liegt der Fokus oftmals auch auf einer medienwirksamen Verbreitung der Ergebnisse [Bonney et al., 2015, Vgl. S. 9 f].

Eng verbunden mit dem Begriff der citizen science ist der Begriff des „public understanding of science“ [Bonney et al., 2015, S. 1]. Untersuchungen in den 1980ern zeigten, dass das wissenschaftliche Verständnis der Bevölkerung als auch deren Unterstützung gegenüber wissenschaftlichen Einrichtungen deutlich geringer war als zuvor angenommen. In diesem Zuge kam es zur Diskussion, wie der Bevölkerung wieder ein stärkerer Bezug zur Wissenschaft vermittelt werden kann [Bauer, 2009, Vgl. S. 224 ff].

Eine bedeutende Rolle wurde dabei auch citizen science zugewiesen. Wie groß die Auswirkungen von citizen science auf das public understanding of science tatsächlich sind, ist umstritten. In ihrer Arbeit kamen Bonney et al. zu dem Schluss, dass citizen science im Allgemeinen zwar einen Beitrag zu public understanding of science liefert, jedoch in dieser Hinsicht deutliches Ausbaupotential besitzt. Besonders müssten die Teilnehmenden der Projekte deutlich stärker in die Planung und den Aufbau der Projekte miteinbezogen werden [Bonney et al., 2015, Vgl. S. 14]. Besonders großes Potential wird Projekten im Bereich der community science zugeordnet [Bonney et al., 2015, Vgl. S. 9 f].

3.4 Schülervorstellungen

Dem Konstruktivismus zufolge ist der Lernprozess ein aktiver Prozess. Die Lernenden konstruieren sich dabei ein eigenes Bild der Welt. Eine Wissensvermittlung im Sinne des Nürnberger Trichters ist nicht erfolgreich. Die im Rahmen des Unterrichts aufgenommenen Informationen führen bei jedem einzelnen Lernenden zu einem individuellen Verständnis des Unterrichtsgegenstands [Dubs, 1995, Vgl. S. 890].

Eine besondere Rolle bei der Konstruktion spielen individuelles Vorwissen und individuelle Vorstellungen, da sie maßgeblich die Interpretation neuer Informationen beeinflussen [Dubs, 1995, Vgl. S. 890]. Dabei kann zu einem einzigen Gegenstand eine Vielzahl verschiedener Vorstellungen existieren [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 10].

In der Literatur finden sich neben dem Begriff Schülervorstellungen noch zahlreiche weitere Begriffe, die oftmals nicht klar voneinander abgegrenzt werden wie beispielsweise der des Präkonzepts oder auch der naiven Theorie. Um Unklarheiten zu vermeiden, verwenden Feige et al. den Begriff der Schülervorstellung. Von der „naturwissenschaftlich anerkannten Vorstellung in einem [zu starken] Maße abweichen[de]“ Vorstellungen werden als „alternative Schülervorstellungen“ bezeichnet [Feige et al., 2017, S. 3].

Schecker et al. weisen darauf hin, dass nicht selten Schülervorstellungen „frappierende Parallelen zu Vorstellungen, die in Vorläufern heutiger physikalischer Theorien eine Rolle gespielt haben“, aufweisen [Schecker et al., 2018, S. 6]. Als Beispiel wird unter anderem die Impetus-Theorie angeführt.

Dabei gibt es drei Quellen für Schülervorstellungen: Die Sprache, die vorhandenen Wahrnehmungsmuster und die individuellen Erfahrungen [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 12 ff].

Im Hinblick auf die Sprache ist besonders die Alltagssprache von Bedeutung. Zum einen kommt es hier zu einer Umdeutung von Begriffen; so wird beispielsweise die



Abbildung 35: Schülervorstellungen im Unterricht

Masse zum Gewicht, zum anderen werden bereits abgeschaffte Begriffe weiterverwendet oder neu aufgegriffen. Im Unterschied zu Fachbegriffen sind alltagssprachlich genutzte Begriffe meist weniger präzise [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 12 ff].

Alle drei Quellen lassen sich im sozialen Umfeld zusammenführen, in dem sich die Lernenden befinden. Dieses beinhaltet neben der Familie und der Peer-Group zunehmend auch Medien [Feige et al, 2017, Vgl. S. 2].

Wie oben erwähnt, beeinflussen die Vorstellungen der Lernenden die Interpretation neuer Informationen. Nicht selten führen eben diese Schülervorstellungen zu unangemessenen oder falschen Interpretationen, die sich in Fehlvorstellungen überführen. Somit sind Schülervorstellungen die „wichtigste Quelle (innenbedingter) Lernschwierigkeiten“ [Schecker et al., 2018, S. 5].

Feige et al. gliedern die Vorstellungen der Lernenden des Weiteren in labile und stabile Vorstellungen auf. Während labile Vorstellungen bereits viele Gemeinsamkeiten mit der wissenschaftlichen Vorstellung besitzen und somit vergleichsweise einfach modifiziert werden können, stehen stabile Vorstellungen im Konflikt mit der wissenschaftlichen Vorstellung. Da sie sich im Alltag jedoch bewähren konnten, sind sie deutlich schwerer umzuwandeln. Als dritte Vorstellung existieren Fehlvorstellungen, die im Rahmen des Unterrichts entstanden sind. Diese werden deshalb auch als „hausgemachte Fehlvorstellungen“ bezeichnet [Feige et al, 2017, S. 4].

Es zeigt sich, dass es wichtig ist, im Zuge einer Unterrichtsplanung auch die Vorstellungen der Lernenden zu berücksichtigen. Zu bedenken ist allerdings, dass auch die Lehrpersonen nicht völlig frei von Alltagsvorstellungen und Alltagssprache sind.

Zur Diagnose bestehender Schülervorstellungen nennen Feige et al. die Kriterien „Inhalt“, „Ursache“, „Verbreitung“, „Stabilität“ und „Art“ der Vorstellung [Feige et al, 2017, S. 5].

Bei der Diagnose kann eine nähere Betrachtung der Sprache zahlreiche Aufschlüsse liefern. Harald Gropengießer bezeichnet Sprache als ein „Fenster zu unserer Kognition“ [Gropengießer, 2007, S. 105 f]. Besondere Beachtung verdienen dabei verwandte Metaphern. Täglich verwenden wir bewusst oder unbewusst eine Vielzahl an Metaphern. Dabei handelt es sich jedoch nicht um bloße Mittel der Rhetorik; unser Verstand selbst ist metaphorisch aufgebaut.

Metaphern, oder nach Gropengießer „metaphorische Konzepte“, entstehen dadurch, dass wir aus einem uns bekannten Bereich Begriffe und damit verbundene Bilder aufgreifen und sie in einen neuen Bereich übertragen, um diesen zu verstehen [Gropengießer, 2007, S. 107]. Beschreiben wir beispielsweise einen Berg, so verwenden wir Begriffe, die wir auch zur Beschreibung einer Person verwenden könnten. Der Berg besitzt einen Fuß, Flanken, Schultern oder auch ein Haupt. Für ein und denselben Begriff können mehrere Bereiche herangezogen werden.

Welche Metaphern verwendet werden, kann sich individuell unterscheiden, ausschlaggebend dafür sind Vorerfahrungen. Noch vor einer sprachlichen Äußerung, „struk-

turiert ein ganz bestimmtes metaphorisches Konzept unser Verstehen und Denken in diesem Bereich“. Anhand der verwendeten Metaphern können also Rückschlüsse auf Vorstellungen einer Person gezogen werden [Gropengießer, 2007, S. 107 ff].

3.4.1 Umgang mit Schülervorstellungen

Wurden Schülervorstellungen ausfindig gemacht, stellt sich im nächsten Schritt die Frage des Umgangs mit diesen. Entscheidend für das weitere Vorgehen ist dabei, ob die Lehrperson es für möglich hält, die Schülervorstellung im Rahmen des Unterrichts in Einklang mit der wissenschaftlichen Theorie zu bringen oder nicht [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 41 f].

Je nach Entscheidung führt dies zu einem kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Lernweg. Ist es möglich, auf der bestehenden Schülervorstellung aufzubauen, sodass im weiteren Verlauf des Lernwegs eine der wissenschaftlichen Theorie konforme Vorstellung steht, kann ein kontinuierlicher Lernweg verfolgt werden. Es kann deshalb von „Aufbaustrategien“ gesprochen werden [Schecker et al., 2018, S. 50]. Dabei kann schon eine Änderung der Problemstellung zu deutlichen Fortschritten führen.

Schecker et al. unterscheiden bei Aufbaustrategien in drei Strategien: „Umgehen“, „Anknüpfen“, „Umdeuten“ [Schecker et al., 2018, S. 51].

Der Strategie des Umgehens liegt die Idee zugrunde, zu Beginn problematische Schülervorstellungen gar nicht erst einzubeziehen. Stattdessen wird zunächst eine fachwissenschaftliche und methodische Basis geschaffen, auf der im Anschluss die Vorstellungen aufgegriffen und ausgebaut werden können. Dem gegenüber versucht die Strategie des Anknüpfens, absichtlich Schülervorstellungen zu aktivieren. Allerdings wird angestrebt, eben solche Vorstellungen einzubeziehen, die mit der wissenschaftlichen Theorie möglichst gut in Einklang zu bringen sind. Bei der Strategie des Umdeutens wird die irreführende Schülervorstellung aufgegriffen und mit den Lernenden in Richtung einer physikalisch korrekten Richtung umgedeutet. Dabei wird die zugrundeliegende Vorstellung nicht als vollständig falsch abgewiesen [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 52].

Ist ein Aufbau auf die bestehende Vorstellung möglich, wird ein diskontinuierlicher Lernweg verfolgt. Es erscheint einleuchtend, davon auszugehen, dass nach dem Austausch einer alternativen Schülervorstellung durch eine geeignete Vorstellung das Problem gelöst sein wird. Allerdings verschwindet eine alternative Vorstellung nicht einfach aus dem Gedächtnis der Lernenden, nachdem ein anderes Konzept eingeführt wurde [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 40].

Stattdessen muss ein von den Lernenden selbst ausgehender Wechsel stattfinden. Lässt man die Lernenden beispielsweise den Ausgang eines Versuchs vorhersagen, in dessen Folge die Lernenden einen Konflikt mit dem bestehenden Konzept verspüren, kann ein solcher Wechsel ausgelöst werden [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 43 f].

Der Ansatz des Conceptual Change, im deutschsprachigen Raum auch Konzeptwechsel, setzt an diesem Punkt an. Ansatzpunkt ist zunächst der ausgelöster „kognitiver

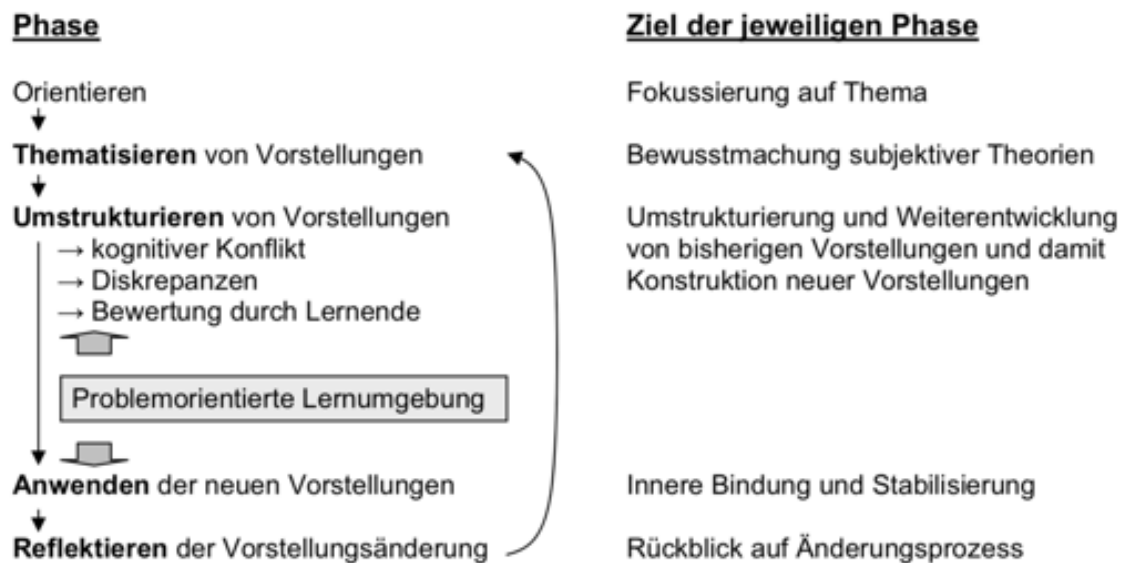


Abbildung 36: Konfrontationsstrategie nach Scott und Driver, abgewandelt durch Friedrich

Konflikt“, den die Lernenden erfahren haben [Schecker et al., 2018, S. 28].

In dessen Folge kommt es zu einer wachsenden Unzufriedenheit mit dem bestehenden Konzept. Nun kann die Lehrperson den Lernenden ein neues, physikalisch korrektes Konzept anbieten. Dabei ist es wichtig, dass dieses neue Konzept den Lernenden verständlich ist. Begegnen die Lernenden in der Folge einer Problemstellung, in der sich das neue Konzept als nützlich und gegenüber dem alten Konzept überlegen erweist, kann es zu einem Wechsel des Konzepts durch die Lernenden selbst kommen [Schecker et al., 2018, S. 28].

Zur Umsetzung existieren verschiedene Strategien. In Abbildung 36 ist die Konfrontationsstrategie nach Driver und Scott dargestellt. Nach einer Phase der Orientierung im neuen Thema kommt es in der Phase des Thematisierens zu einem Bewusstwerden der eigenen Vorstellungen. Friedrich schlägt dazu beispielsweise das Bearbeiten eines Fragebogens oder das Anfertigen von Zeichnungen vor [Friedrich, 2009, Vgl. S. 5].

Die Konfrontation geschieht in der Phase des Umstrukturierens zwischen der bestehenden Schülervorstellung und der physikalisch korrekten Vorstellung. Im Zuge der sich abzeichnenden Diskrepanz kann eine neue Vorstellung entstehen. Eine wichtige Rolle im gesamten Prozess kommt einer angemessenen problemorientierten Lernumgebung zu. Sie unterstützt die Lernenden sowohl bei der Bewertung der bestehenden wie neuen Vorstellung als auch in der darauffolgenden Phase des Anwendens.

Zum Abschluss findet eine Reflexion statt, die auch die ursprüngliche Schülervorstellung der neuen Vorstellung gegenüberstellt [Friedrich, 2009, Vgl. S. 5 f].

3.4.2 Schülervorstellungen zum Thema Wetter

Auch zum Thema Wetter lässt sich eine Vielzahl von Schülervorstellungen finden, die mitunter problematisch sind. Im Folgenden wird eine Auswahl an Vorstellungen kurz dargestellt.

Temperatur und Wärme Lernenden fällt es oftmals schwer, Temperatur und Wärme zu unterscheiden. In der Alltagssprache werden beide oft synonym verwendet. Wärme stellt so für viele Lernende eine Temperatur bzw. einen Temperaturbereich dar; „Das ist heute wieder eine Wärme draußen!“ [Schecker et al., 2018, S. 150].

Des Weiteren besteht häufig die Vorstellung, bei Wärme handle es sich um etwas Stoffliches. Demnach wird der Fluss thermischer Energie als die „Bewegung eines ‚Wärmestoffs‘ betrachtet“, der einen „inneren Antrieb“ nicht näher bekannter Funktionsweise besitzt [Schecker et al., 2018, S. 149]. Damit eng verbunden ist die Vorstellung, dass der in einen Körper gewanderte Wärmestoff diesen leichter macht [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 151].

Luft und Luftdruck Verbreitet ist die Vorstellung, dass Luft ‚nichts‘ ist. Nach Schecker et al. ist die Vorstellung von Luft dicht mit der Vorstellung von bewegter Luft verbunden. Folgt man dieser Vorstellung, so kann Luft aus Wind eingefangen werden, eine mit Luft aufgezugene Spritze ist aber dennoch leer. Ebenso besitzt gemäß dieser Vorstellung Luft keine Masse [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 249].

Verknüpft mit dieser Vorstellung ist auch die Schülervorstellung, dass zwar bewegte Luft, z.B. in Form von Stürmen, große Kräfte ausüben kann, ruhende Luft allerdings nicht fähig ist, eine Kraft auszuüben. Die Kräfte, die durch den statischen Luftdruck auf Oberflächen ausgeübt werden können, lassen sich somit nicht erklären [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 250].

Durch unsere Alltagssprache bedingt verbinden vor allem jüngere Lernende den Begriff „Gas“ mit gefährlichen bzw. gesundheitsschädlichen Gasen. Demnach handelt es sich bei Luft, die für sich als positiv besetzt ist, nicht um ein Gas in diesem Sinne [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 250].

Sonne Schülervorstellungen zur Strahlung der Sonne richten sich oftmals auf unmittelbare Phänomene im Alltag. So wird der Schatten, der durch einen Gegenstand entsteht, von Lernenden häufig in der selben Form und Größe dargestellt, wie der Gegenstand selbst [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 251].

In Bezug auf das Wetter stößt man auf die Schülervorstellung, dass „Sonnenstrahlen [...] [verdunstendes] Wasser aktiv nach oben ziehen [Schecker et al., 2018, S. 255]. In Anlehnung an Feige et al. handelt es sich dabei um eine hausgemachte Fehlvorstellung, die darauf beruht, dass die Sonnenstrahlung selbst als Ursache der Verdunstung genannt wird [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 255].

Wolken Zu dem Thema Wolken lassen sich zahlreiche Vorstellungen ausmachen, die nicht selten auch nach Ende der Schulzeit fortbestehen. Häufig wird angenommen, dass Wolken aus Wasserdampf bestehen. In der Primarstufe wird des Weiteren auch Rauch genannt [Schecker et al., 2018, Vgl. S. 255].

Die Entstehung von Regen wird auf unterschiedliche Weisen erklärt. Beispielsweise ist die Wolke ‚voll‘ oder beginnt zu schmelzen. Genauso ist die Vorstellung einer „Hülle“ vertreten, nach deren Reißen die Wolke abregnet [Schecker et al., 2018, S. 256].

4 Aufbau der Messstation

Als Grundlage der Messstation dient ein senseBox:edu-Set. Dieses enthält ein Mikrocontroller-Board, ein Steckbrett, Verbindungskabel sowie einige lose Bauteile. Mit den im Lieferumfang enthaltenen Sensoren lassen sich die folgenden Umweltdaten erfassen:

- Lufttemperatur
- Luftdruck
- Luftfeuchtigkeit
- Beleuchtungsstärke
- Schalldruck
- Distanzen mittels Ultraschallmessung



Abbildung 37: senseBox:edu-Set

Zur Ausgabe von Messdaten sind zudem ein OLED-Display, je ein WLAN- und SD-Modul zur Aufnahme von micro SD Karten enthalten. Als Alternative sind Module zur Datenübertragung mittels LoRa WAN oder LAN verfügbar. Die Module für die Datensicherung über WLAN und SD-Karte werden als „XBEES“ bezeichnet.

Neben den enthaltenen Sensoren wurden ein Sensor zur Messung der Feinstaubkonzentration sowie eine Echtzeituhr in der Messstation verbaut.

4.1 Zur Plattform senseBox

Ihren Anfang nahm die senseBox im Jahre 2006 als Projekt am Institut für Geoinformatik der Westfälischen Wilhelms-Universität. Angeboten wurde zunächst ein Shield, das sich auf das zu dieser Zeit ebenfalls erst erschienene Arduino UNO-Board aufstecken ließ [Vgl. photonikforschung.de]. In den Folgejahren wurde ein eigenes Mikrocontroller-Board entwickelt, das selbstständig arbeiten kann. Förderung erhielt das Projekt dabei neben privaten Partnern von öffentlicher Seite durch das Amt für Schule und Weiterbildung der Stadt Münster wie auch durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung [Vgl. senseBox.de: Awards].

Neben dem senseBox:edu-Set ist für den Gebrauch im Privaten ein senseBox:home-Set erhältlich. Es bietet eine kostengünstigere Alternative und verfügt über einen reduzierten Lieferumfang. Der Schwerpunkt beider Sets liegt in der Erfassung von Umweltdaten. Für die Untersuchung von Gewässern befindet sich das senseBox:WaterQuality-Set in Entwicklung.

Beim Aufbau der Station im Rahmen der Arbeit sowie bei der Verwendung durch Lernende ermöglicht diese Plattform auf Grund des verwendeten Steckkastensystems gegenüber anderen Plattformen wie Arduino oder Raspberry Pi ein deutlich schnelleres und sicheres Arbeiten. Werden nur die auf den Sensor-Boards verbauten Sensoren verwendet, ist die Verwendung von zusätzlichen Steckbrettern oder



Abbildung 38: openSenseMap (Stand: 08.08.2019)

eines Lötkolbens nicht erforderlich. Zudem verhindern die verwendeten Stecker ein Verpolen der Anschlusskontakte, was zu einer Beschädigung der Sensoren oder des Mikrocontroller-Boards führen könnte.

Das Mikrocontroller-Board ist Arduino-kompatibel, sodass eine Programmierung durch gängige Programmierungsumgebungen wie der Arduino IDE möglich ist. Die Website des senseBox Projekts bieten einen auf Blockly basierenden visual coding Editor, der speziell auf das Board ausgelegt ist. Dieser deckt die grundlegenden Funktionen des Boards ab, sodass die Plattform nach Angaben der Entwickler auch in der Grundschule einsetzbar ist [Witte, 2018, Vgl. S. 1].

4.2 openSenseMap

Von einer auf der senseBox basierenden Messstation aufgezeichnete Daten können mittels des kostenfreien Dienstes openSenseMap im Internet gespeichert, verwaltet und veröffentlicht werden. Daraus entsteht ein Netzwerk von Messstationen, deren Daten frei einsehbar sind. Bis zum derzeitigen Stand sind auf diese Weise durch über 4700 auf weiten Teilen der Welt verteilten Messstationen ca. 3 Milliarden Messwerte gesammelt worden [Vgl. opensensemap.org, Stand 08.08.2019].

In Abbildung 38 zu sehen ist die weltweite Verteilung registrierter Messstationen. Grün markiert ist der Anteil von Stationen, die bereits Daten an openSenseMap übertragen haben. Die grau markierten Stationen sind zwar registriert, haben aber bis zum Zeitpunkt des Abrufs noch keine Daten übermittelt.

Die Nutzung von openSenseMap im Rahmen des Unterrichts erlaubt es, auch ohne den Aufbau einer eigenen Messstation auf reale Umweltdaten zurückgreifen zu

senseBox MCU – Gesamtübersicht der Anschlüsse

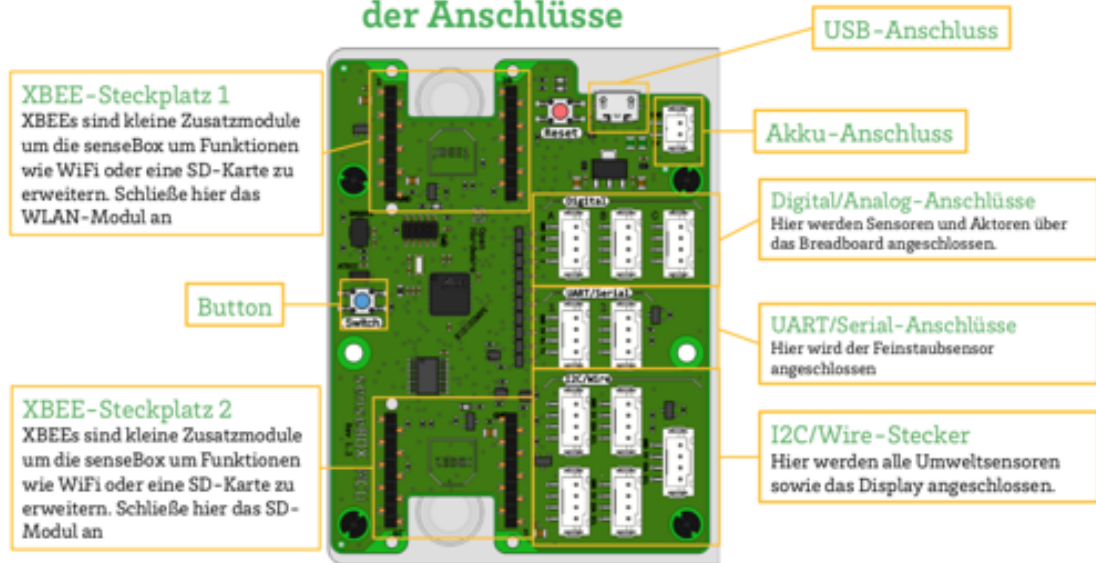


Abbildung 39: senseBox Gesamtübersicht

können. Dabei können Vergleiche zwischen den Daten von Messstationen an weit entfernten Orten der Welt angestellt werden.

4.3 Informationen zu den einzelnen Komponenten der Messstation

Herzstück der senseBox:edu ist das Mikrocontroller-Board. Es handelt sich um eine Multilayer-Platine, die einseitig mit oberflächenmontierten Bauteilen bestückt ist. Eine Auswahl der wesentlichen Bauteile ist in Abbildung 39 auf dem Board markiert.

Bereitgestellt werden fünf I²C-Ports, zwei UART-Ports und drei frei verwendbare Ports mit je zwei GPIO-Kontakten, die auch als analoge Eingänge zur Messung verwendet werden können. Die Position der mit den I²C-Ports verbundenen Sensoren wird automatisch erkannt. Als Buchsen werden vierpolige JST-Buchsen verwendet. JST-Steckverbinder bieten neben dem Verpolungsschutz den Vorteil, dass Erweiterungen durch eigene Sensoren vergleichsweise einfach hergestellt werden können. Zu beachten ist jedoch, dass ein Vertauschen der Steckverbinder beispielsweise zwischen einem I²C-Port und einem UART-Port durchaus möglich ist.

Das Board wird mit einer Spannung von 5 V betrieben. Die Versorgung kann über einen zweipoligen JST-Steckverbinder oder über Micro USB erfolgen.

Als Mikrocontroller ist ein SAM D21G des Herstellers Atmel verbaut. Dieser bietet mit bis zu 256 kB Flash Speicher, einer Taktrate bis 48 MHz, 14 ADC-Kanälen sowie 16 externen Interrupt-Leitungen deutlich mehr Möglichkeiten als die in den gängigen Arduino-Boards verbauten Mikrocontroller [Atmel, 2015, Vgl. S. 3].

Der SAM D21G besitzt eine integrierte Echtzeituhr. Dennoch wurde eine externe

Echtzeituhr auf Basis des DS3231 verwendet, damit die Uhrzeit auch nach dem Trennen der Energieversorgung vom Mikrocontroller-Board, sei es durch Arbeiten an der Messstation, Auslesen der Daten oder unbeabsichtigte Unterbrechungen, erhalten bleibt. Zur Versorgung der Echtzeituhr dient eine Knopfzelle.

Im folgenden soll kurz auf die verwendeten Sensoren eingegangen werden.

4.3.1 Sensor-Board 1: Temperatur und Luftfeuchtigkeit



Abbildung 40: Sensor-Board 1

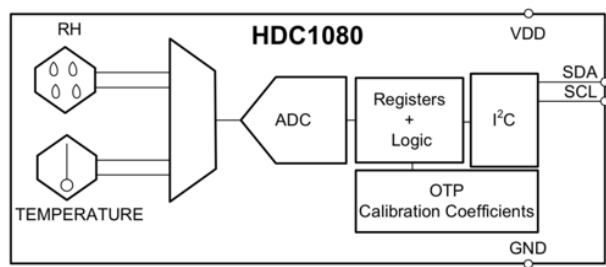


Abbildung 41: Blockdiagramm des HDC1080

Sensor-Board 1 verfügt über einen Sensor zur Messung der Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Verbaut ist ein HDC1080 Sensor von Texas Instruments (Abbildung 40). Es handelt sich dabei um einen im Abschnitt Luftfeuchtigkeit beschriebenen Luftfeuchtigkeitssensor mit integriertem Temperatursensor.

Das Blockdiagramm des HDC1080 ist in Abbildung 41 dargestellt. Die analoge Ausgabe der beiden Messelemente (RH und TEMPERATURE) wird durch einen ADC mit einer wählbaren Auflösung von bis zu 14 bit in ein digitales Signal umgewandelt. Der Sensor ist von Werk kalibriert; die zur Korrektur benötigten Daten sind in einem OTP-Speicher (one time programmable) hinterlegt. Die Kommunikation mit dem Mikrocontroller-Board findet mittels I²C statt [Texas Instruments, 2018, Vgl. S. 9].

4.3.2 Sensor-Board 2: Beleuchtungsstärke und UV-Intensität

Zur Messung der Beleuchtungsstärke und der UV-Intensität besitzt Sensor-Board 2 zwei getrennte Sensoren. Der Beleuchtungsstärke-Sensor TSL45315 verfügt über eine dem menschlichen Auge nachempfundene Empfindlichkeitskurve mit einem Maximum bei ca. 550 nm (siehe Abbildung 42). Zur Messung wird ein Array von Photodioden eingesetzt. Dieses Array liefert ein analoges Ausgangssignal, das an einen 16 bit ADC weitergeleitet wird. Das ausgegebene digitale Signal dient zur Berechnung der Beleuchtungsstärke. Kommunikation findet via I²C statt [TAOS, 2011, Vgl. S. 1].

Eine nicht unerhebliche Rolle während der Messung kommt dem Einfallswinkel der auftreffenden Strahlung zu. Wie Abbildung 43 zeigt, verringert sich die Empfindlichkeit des Sensors bei einem Einfallswinkel von 60 ° um ca. 50 % gegenüber der

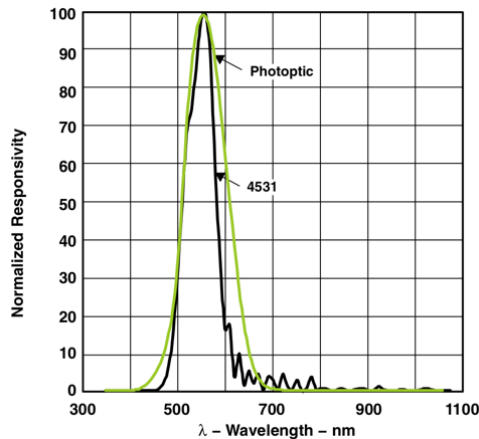


Abbildung 42:
Empfindlichkeitskurve des TSL45-315 nach Wellenlänge

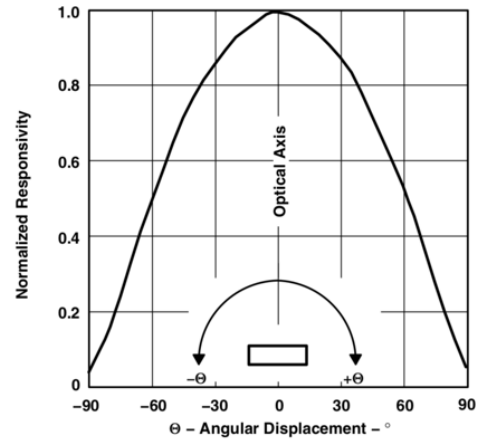


Abbildung 43:
Empfindlichkeitskurve des TSL45-315 nach Winkel

Senkrechten [TAOS, 2011, Vgl. S. 5]. Ein Vergleich mit Abbildung 16 (Sonnenstandsdiagramm für Karlsruhe) ergibt, dass ein Winkel von 60° und mehr zur Senkrechten in Abhängigkeit von der Jahreszeit morgens wie abends stattfindet.

Der TSL45315 ist für einen 1,8 V Signalpegel ausgelegt und nicht 5V-kompatibel, sodass zum Betrieb an und zur Kommunikation mit dem senseBox Mikrocontroller-Board eine weitere Beschaltung notwendig ist.

Die UV-Intensität im Bereich von UV-A wird mit Hilfe eines VEML6070 von Vishay ermittelt. Der Grundaufbau ist analog zu dem des TSL45315, jedoch weist der Sensor seine maximale Empfindlichkeit bei ca. 360 nm auf. Für die Abhängigkeit der Empfindlichkeit vom Einfallswinkel gilt ebenfalls annähernd Abbildung 43.

Im Gegensatz zum TSL45315 ist der VEML6070 5V-kompatibel.

4.3.3 Sensor-Board 3: Luftdruck

Das dritte Sensor-Board ist mit einem Bosch BMP280 Drucksensor ausgestattet. Grundlage ist ein resistives Druck-Element, dessen Signal ähnlich wie bei den zuvor beschriebenen Sensoren in ein digitales Signal umgewandelt und über I²C übermittelt wird. Der verbaute ADC erlaubt bei der Messung des Luftdrucks eine Auflösung von bis zu 20 bit [Bosch Sensortec, 2015, Vgl. S. 11 ff].

Haupteinsatzgebiet des Sensors ist neben der Aufzeichnung von Wetterdaten die Unterstützung von Navigationsgeräten besonders innerhalb von Gebäuden, indem aus dem gemessenen Luftdruck die Höhe bestimmt wird [Bosch Sensortec, 2015, Vgl. S. 2].

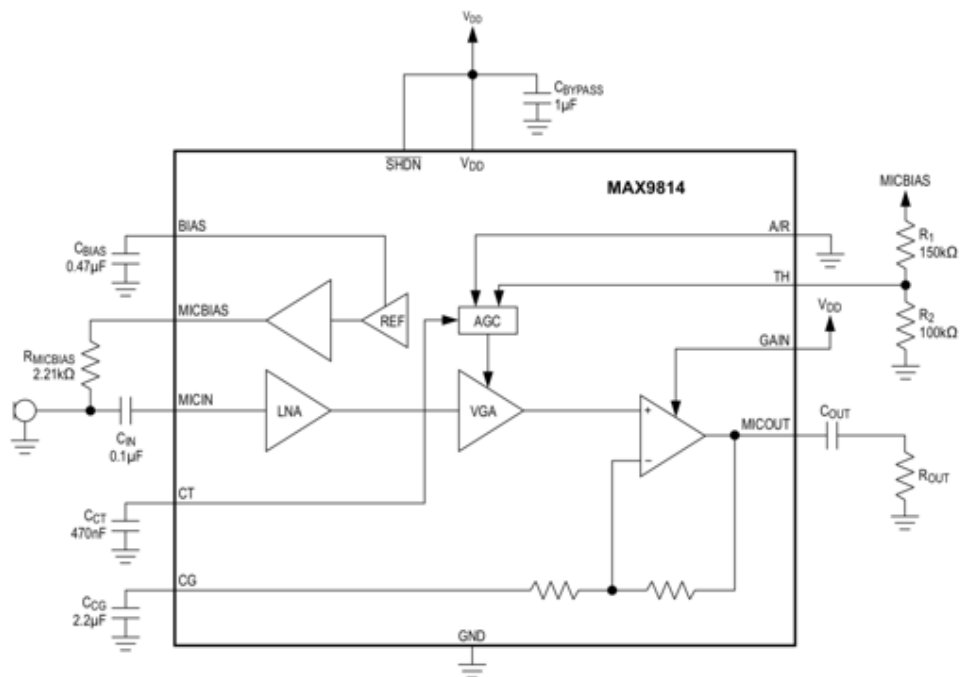


Abbildung 44: Blockdiagramm des MAX9814

4.3.4 Mikrofon-Board

Im Lieferumfang des senseBox:edu-Sets enthalten ist ein Mikrofon-Board. Es besteht aus einem Elektretmikrofon mit einem einfachen Verstärker. Die Verstärkung ist mittels eines Trimm-Potentiometers einstellbar. Das Ausgangssignal wird in analoger Form ausgegeben.

Bei ersten Versuchen am späteren Standort der Messstation zeigte sich, dass das mitgelieferte Board auch nach Anpassen der Verstärkung nur sehr laute Schallereignisse in der Umgebung aufzeichnete.

Aus diesem Grund wurde stattdessen ein externes Mikrofon-Board verwendet. Dieses verwendet als Verstärker ein MAX9814 von Maxim Integrated. Die Verstärkung zwischen 40 dB und 60 dB kann man durch Steckverbindungen in Schritten von 10 dB festlegen. Eine automatische Verstärkungsregelung (AGC) ist integriert, die die Messungen im zu erwartenden Bereich jedoch nicht oder nur geringfügig beeinflusst.

Abbildung 44 zeigt das Blockdiagramm des MAX9814 sowie die von Maxim integrated empfohlene Beschaltung, der das Design des Mikrofon-Boards weitestgehend entspricht. Am Elektretmikrofon liegt eine von einer Referenzspannungsquelle (REF) erzeugte und gebufferte Spannung an. Treffen Schallwellen auf das Mikrofon, entsteht ein Signal, das über einen Kondensator (C_{IN}) in der ersten Stufe an einen rauscharmen Vorverstärker (low noise amplifier, LNA) weitergegeben wird. Die Verstärkung beträgt konstant 12 dB. In der zweiten Stufe erfolgt eine Verstärkung durch einen weiteren Verstärker (variable gain amplifier, VGA), dessen Verstärkung durch die AGC gesteuert wird. Die Verstärkung durch den VGA kann zwischen 0 dB und 20 dB liegen. In der dritten Stufe kommt es, je nach gewählter Gesamtver-

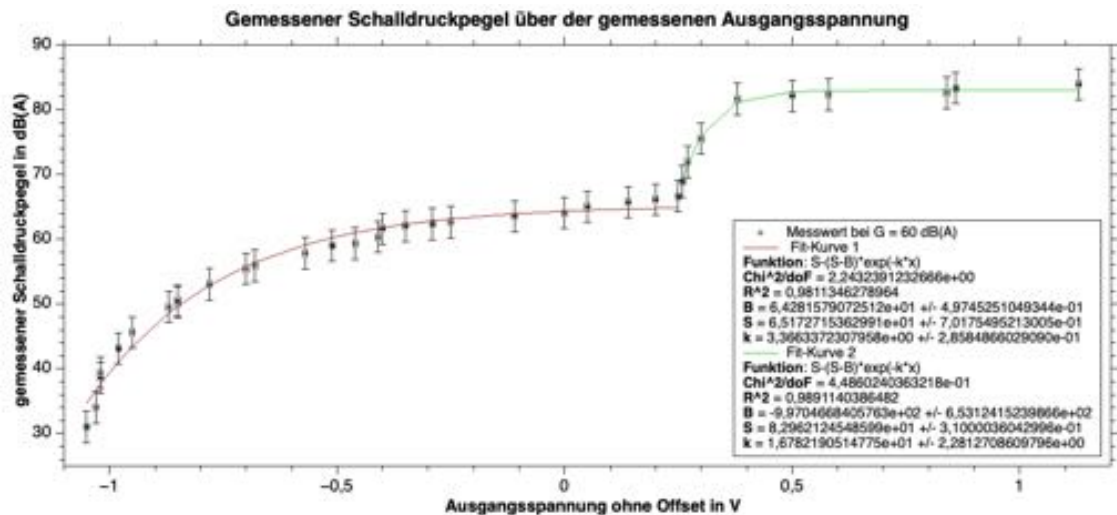


Abbildung 45: Umrechnung der Ausgangsspannung des MAX9814

stärkung, zu einer konstanten Verstärkung um 8 dB bis 28 dB [Maxim Integrated, 2016, Vgl. S. 1].

Die Ausgabe des Signals erfolgt mit einem Gleichstrom-Offset von 1,25 V, da der in Abbildung 45 vorhandene Kondensator C_{OUT} nicht verbaut wurde. Ausgelesen wird das Signal durch den Analogeingang A1 des Mikrocontroller-Boards der senseBox. Das Mikrofon-Modul ist 5 V-kompatibel.

Um die in Form einer Spannung gemessenen Signale des Mikrofon-Moduls wieder in ein Schalldruckpegel umwandeln zu können, wurden im Vorfeld der Auswertung mit Hilfe eines geeigneten Messgeräts die in Abbildung 45 dargestellten Messwerte aufgenommen. Mit Hilfe einer daraus resultierenden Fit-Kurve lassen sich die im Rahmen späterer Messungen aufgetretenen Schalldruckpegel bestimmen. Der in mit den verwendeten Einstellungen maximal messbare Schalldruckpegel liegt bei ca. 83 dB(A).

4.3.5 Feinstaubsensor

Ergänzend zu den im senseBox:edu-Set enthaltenen Sensoren wurde die Messstation durch einen Feinstaubsensor erweitert. Es handelt sich dabei um den Sensor SDS011 des Herstellers Nova Fitness.

Die Funktion des Sensors beruht auf dem Funktionsprinzip eines aktiven optischen Feinstaubensors mit Laserdiode. Ein geöffneter SDS011 Sensor ist in Abbildung 46 abgebildet.

Der Sensor bestimmt mit Hilfe eines eigenen Mikrocontrollers ca. einmal in der Sekunde die Feinstaubkonzentration für PM25- und PM10-Partikel. Die Daten werden über einen UART-Port an das Mikrocontroller-Board der senseBox übermittelt.

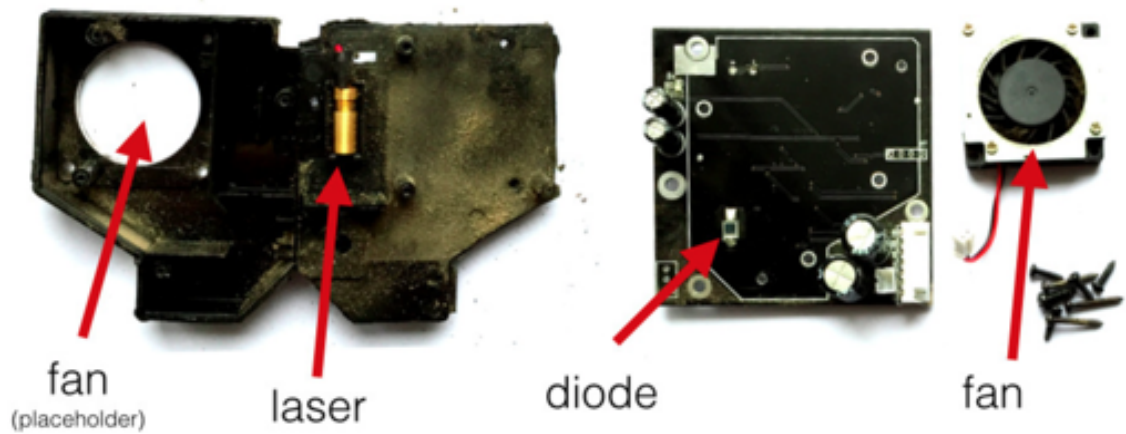


Abbildung 46: Geöffneter SDS011 Feinstaubsensor

Da während der Betriebszeit Luft durch den Sensor strömt, kommt es zu einer Ablagerung von Staub im Sensor. Die Verschmutzung des in Abbildung 46 abgebildeten Sensors entstand während einer Betriebsdauer von ca. sechs Monaten. Nach Angabe des Herstellers beträgt die Lebensdauer des Sensors im Dauerbetrieb ca. 8000 Stunden [Nova Fitness, 2015, Vgl. S. 4].

Ein Blockdiagramm des Aufbaus der gesamten Messstation ist in Abbildung 47 dargestellt. Der Programmcode ist auf der beigefügten CD zu finden.

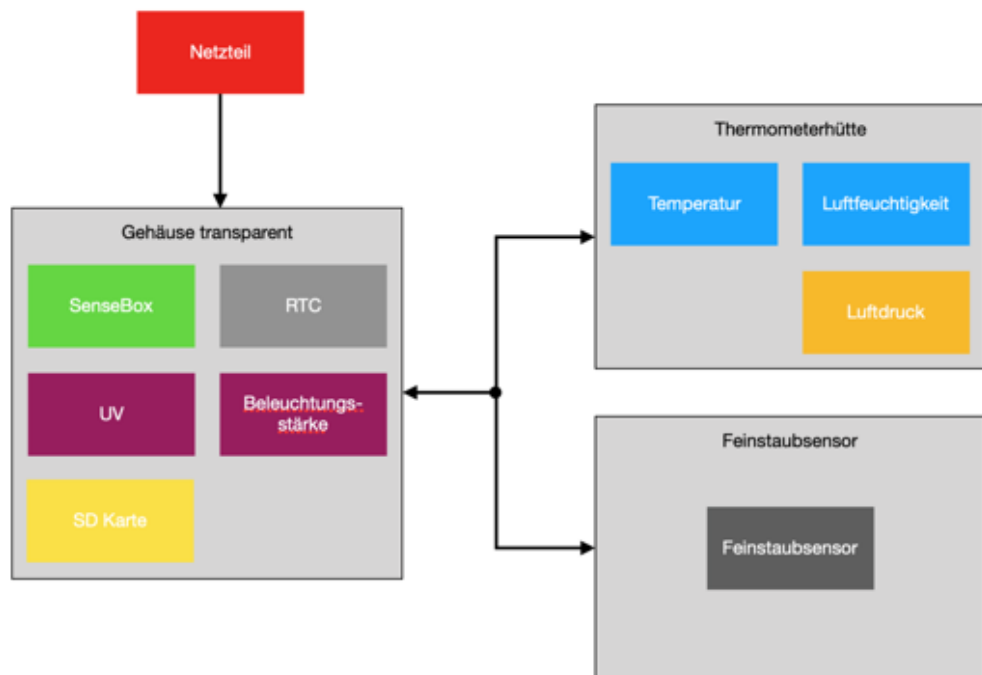


Abbildung 47: Blockdiagramm der Messstation



Abbildung 48: Für die Messungen gewählter Standort

4.4 Aufbau der Messstation

4.4.1 Standortwahl

Ein zur Durchführung des Messungen geeigneter Standort muss eine Reihe von Voraussetzungen erfüllen. Dabei wurden die Anforderungen des Deutschen Wetterdienstes an Standort und Messfeld als Vorlage aufgegriffen [Deutscher Wetterdienst, 2017, Vgl. S. 3].

Es muss sich demnach um eine ebene, freie Fläche handeln, die nicht von hohen Gebäuden oder Bäumen eingegrenzt wird. Auf diese Weise wird eine Beeinflussung der Messungen durch Abschattung oder Blockieren des Luftströmung vermieden. In erreichbarer Nähe muss sich eine Steckdose befinden. Zudem muss gewährleistet sein, dass die Station vor Diebstahl und Vandalismus geschützt ist.

Auf Grund dessen schied eine Messung in Bodennähe in der unmittelbaren Nähe der Pädagogischen Hochschule als Möglichkeit aus. Als am besten geeigneter Standort wurde die Dachterrasse im dritten Stockwerk des Gebäudes II/A gewählt. Ein Foto des Standorts ist in Abbildung 48 abgebildet.

Die Terrasse ist über das Gewächshaus des Instituts für Biologie und Schulgartenentwicklung zugänglich. Die Versorgung der Station ist über eine Steckdose im Gewächshaus möglich.

4.4.2 Gehäuse

Um das Mikrocontroller-Board der senseBox sowie die Echtzeituhr vor der Witterung zu schützen, wurden sie in einem für den Außenbereich geeigneten Kunststoffgehäuse untergebracht. Da dieses einen transparenten Deckel besitzt, wurde das Sensor-Board 2 ebenfalls dort untergebracht. Zur Befestigung des Sensor-Boards wurde an den Deckel eine Halterung aus Acrylglas angebracht. Um die Reinigung

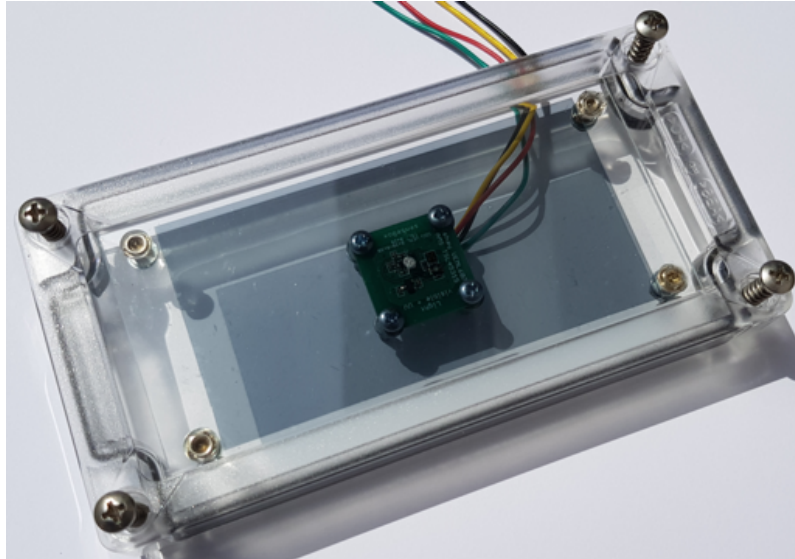


Abbildung 49: Gehäusedeckel mit befestigtem Sensor-Board 2

und gegebenenfalls Reparatur einfach zu ermöglichen, sind sowohl die Halterung als auch das Sensor-Board mit Schrauben befestigt (Vgl. Abbildung 49).

Nach ersten Testmessungen zeigte sich, dass der Beleuchtungsstärkesensor TSL45315 unter direkter Sonneneinstrahlung wiederholt fehlerhafte Daten lieferte. Deshalb wurde direkt unter dem Gehäusedeckel eine Kunststoffolie angebracht. Nach Versuchen mit verschiedenen Folien fiel die Wahl dabei auf eine Fenstertönungsfolie aus dem KFZ Bereich. Diese Folie senkt die Beleuchtungsstärke ausreichend ab, lässt aber im Vergleich mit den anderen getesteten Folien noch ausreichend UV-Strahlung passieren und kann auf einfache Weise befestigt werden.

Durch die Folie wie auch durch den Gehäusedeckel kommt es zu einer Beeinflussung der Messwerte der Sensoren für Beleuchtungsstärke und UV-Intensität. Um dies auszugleichen, wurden für verschiedene, über die Messungen konstante Einstrahlungen in einem Winkel von ca. 90° zur Oberfläche des Gehäuses je Messungen ohne Deckel, mit Deckel sowie mit Deckel und Tönungsfolie durchgeführt. Das Verhältnis der gemessenen Beleuchtungsstärken und UV-Intensitäten kann im Zuge der Datenauswertung zur Korrektur verwendet werden.

Da auch Kabel aus dem Gehäuse heraus bzw. in das Gehäuse hinein geleitet werden, wurden als Schutz vor Verunreinigung, Insekten und eindringender Feuchtigkeit geeignete Kabelverschraubungen eingesetzt.

Hierdurch wurde das Gehäuse des Mikrocontrollers möglichst luftdicht verschlossen. Somit war es nicht möglich, den Sensor zur Messung der Feinstaubkonzentration im selben Gehäuse unterzubringen. Dieser erhielt ein eigenes Gehäuse. Der Einzug von Frischluft geschieht über ein leicht nach unten gekrümmtes Kunststoffrohr. Durch die Krümmung gelangt kein Regenwasser in den Sensor. Die Abluft entweicht durch lose Kabelverschraubung auf der Rückseite des Gehäuses. Um zu verhindern, dass Insekten oder Schwebstoffe wie Pappelflaum mit der Frischluft eingesaugt werden

und den Sensor beschädigen können, wurde ein Stück eines Insektengitters an der Öffnung des Kunststoffrohrs befestigt.

Die Sensoren für Lufttemperatur, -feuchtigkeit, -druck und Schalldruck müssen außerhalb des abgeschlossenen Gehäuses angebracht werden. In Anlehnung an die Vorgaben des Deutschen Wetterdienstes wird hierzu eine Thermometerhütte aus Kunststoff verwendet.

4.4.3 Energieversorgung

Die Energieversorgung der gesamten Messstation läuft über ein Schaltnetzteil. Es befindet sich witterungsgeschützt im Gewächshaus. Ein Netzteil bietet den Vorteil einer sicheren Energieversorgung, ohne dass Akkus oder Batterien gewechselt werden müssen.

Die Leitung des Netzteils führt zu einer Steckbuchse in einer Installationsdose, sodass keine Veränderung am Netzteil selbst vorgenommen wird. In der Installationsdose befindet sich eine Schmelzdrahtsicherung (1 A, mtr.) sowie der Anschluss zur Versorgungsleitung der senseBox. Sowohl die Leitung des Netzteils als auch die Versorgungsleitung sind mit einer Zugentlastung geschützt.

Die Versorgungsleitung besteht aus einer H03VVH2-F Flachleitung mit einer Gesamtlänge von ca. 30 Metern, sodass beinahe jeder Ort auf der Terrasse erreicht werden kann. Dieser Leitungstyp ist zwar nicht für den Außenbereich ausgelegt, sollte den Belastungen im Rahmen der begrenzten Messdauer jedoch standhalten. Die Farbe weiß wurde gewählt, damit die Leitung innen sowie außen auf den vorwiegend dunklen Untergründen gut sichtbar ist.

Um die Gefahr des Stolperns im Gewächshaus sowie die Länge der offen liegenden Leitung zu reduzieren, ist der nicht verwendete Teil der Leitung auf einer Kabelrolle aufgerollt. Als Schutz gegen das Quetschen der Leitung am Fenster wurde ein Schutz aus Holz an der Leitung angebracht.

Die Versorgungsleitung führt zum Gehäuse des Mikrocontroller-Boards. Im Inneren des Gehäuses befindet sich ein LM7805 Festspannungsregler, der die für den Betrieb der Messstation notwendige Spannung von 5 V erzeugt. Der Festspannungsregler befindet sich direkt im Gehäuse, damit gegebenenfalls auftretende Spannungsabfälle durch die Leitung nicht die Funktionsfähigkeit der Messstation beeinflussen. Zur Stabilisierung des Reglers wurden Kondensatoren entsprechend dem Datenblatt verbaut. Die am Festspannungsregler auftretende Wärme wird über einen ausreichend dimensionierten Kühlkörper abgegeben. Eine Kühlung im geschlossenen Gehäuse ist nicht notwendig.

4.4.4 Trägerkonstruktion und Aufstellung auf dem Dach

Die beiden Gehäuse wurden auf einer Grundplatte befestigt, die Thermometerhütte ist an einem Stück Dachlatte oberhalb der Grundplatte angebracht. Dies ermöglicht

es, die Messstation einfach zu transportieren und zu montieren. Das Gehäuse, das die Sensoren für Beleuchtungsstärke und UV-Intensität enthält, weist eine geringfügige Neigung auf. Regenwasser bleibt deswegen nicht über den Sensoren stehen. Da die Daten- und Versorgungsleitungen zwischen den Gehäusen durch die gelockerte Kabelverschraubung zum Feinstaubsensor führen, wurden die Leitungen mit einer Klammer an der Grundplatte befestigt, sodass kein Regenwasser hinein fließen kann.

Zunächst geplant war mittels einer Trägerkonstruktion die Thermometerhütte in einer Höhe von zwei Metern aufzustellen. Diese Höhe wurde jedoch reduziert, um außerhalb der abgeschätzten Blitzkugel der Gebäudeblitzschutzanlage zu liegen.

Die Trägerkonstruktion wurde aus imprägnierten Dachlatten sowie Spanplatten aufgebaut. Sie ist möglichst einfach gehalten, damit Windböen eine geringstmögliche Angriffsfläche geboten wird. Zur Stabilisierung wurden Stahlwinkel verwendet. Zum Schutz vor Feuchtigkeit wurde die Trägerkonstruktion vollständig mit einem Schutzlack überzogen.

Das Kippen der Station soll durch einen kreuzförmigen Standfuß mit einer Diagonalen von 1,50 Metern verhindert werden. Zudem ist die Trägerkonstruktion mit 12 Betonsteinen in Bodennähe beschwert.

Auch für den Entwurf der Trägerkonstruktion war es wichtig, einen möglichst einfachen Transport zu ermöglichen. So handelt es sich bei sämtlichen Verbindungen um Schraubverbindungen. Die beiden Hälften des Standfußes sind als einfache Überblattung mit Schraubverbindung ausgeführt und lassen sich zum Transport trennen.

Die Grundplatte der Messstation kann einfach auf die Trägerkonstruktion aufgeschraubt werden. Abbildung 50 zeigt alle Teile verbunden auf der Terrasse.

Um die Messstation auf der Terrasse aufstellen zu können, musste zunächst eine Abnahme durch die technische Abteilung der Hochschulverwaltung erfolgen. Diese wurde mit den angegebenen Spezifikationen bestanden.

Aufgestellt wurde die Station auf dem mit Betonplatten befestigten Teil der Terrasse. Dabei wurde der dortige Fluchtweg in Absprache mit der technischen Abteilung ausreichend freigehalten. Die Versorgungsleitung ist in den Fugen der Betonplatten verlegt und mit wetterbeständigem Klebeband fixiert worden, sodass die Stolpergefahr minimiert wurde.

Die Ausrichtung der Station erfolgte nach Süd-Südosten. Auf diese Weise ist Sensor-Board 2 längst möglich direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt, ohne, dass die Thermometerhütte oder Leitungen für eine Abschattung sorgen. Die Messstation befindet sich ca. 130 m über Normalhöhennull.

Um 100 Messungen pro Stunde zu erhalten, liest die Messstation ca. alle 36 Sekunden sämtliche Sensoren aus. Kurzzeitige Schwankungen werden ausgeglichen, indem im Anschluss an die Messungen aus je zehn Messwerten das arithmetische Mittel

gebildet wird.

Als Speichermedium dient eine micro SD-Karte, da eine Verbindung der Station mit dem WLAN der Pädagogischen Hochschule aus technischen Gründen nicht möglich war.



Abbildung 50: Messstation in Betrieb

5 Ergebnisse der Messungen

Im Folgenden werden von der Messstation erhobene Umweltdaten über den zeitlichen Verlauf der Messung kurz dargestellt. Insgesamt wurden im Zeitraum vom 04.07.2019 bis 28.07.2019 ca. 57000 Messungen von acht Größen vorgenommen, so dass etwa 460000 Messwerte aufgezeichnet wurden. Nach dem Bilden der Mittelwerte bleiben somit ca. 5700 Werte je Größe übrig.

Da die Ungenauigkeiten der Sensoren im Vergleich zu den erhaltenen Werten gering sind, wird zur übersichtlicheren Darstellung auf die Einblendung von Fehlerbalken zunächst verzichtet.

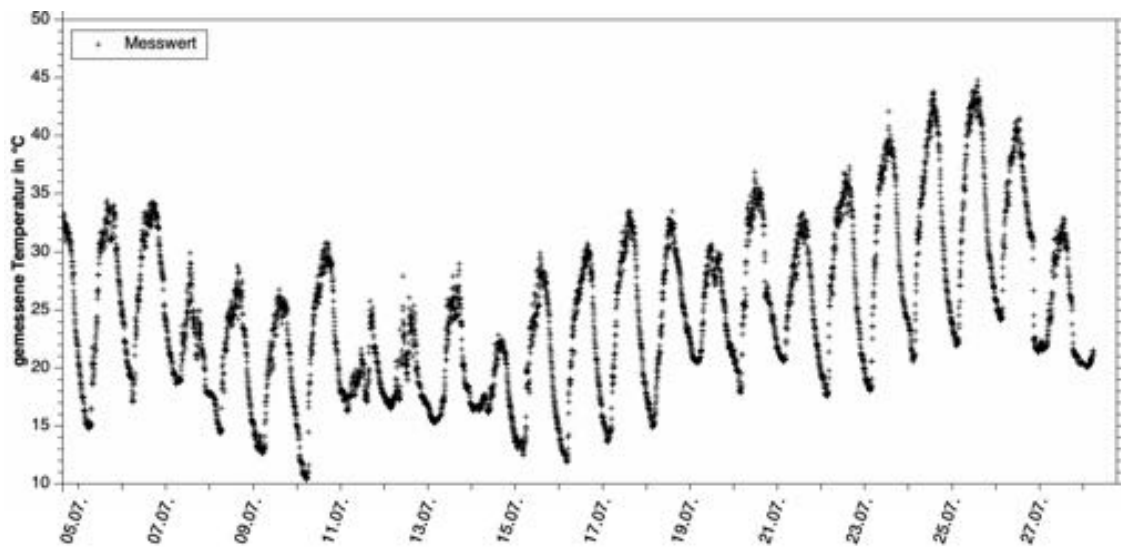


Abbildung 51: Temperaturverlauf über die gesamte Messdauer

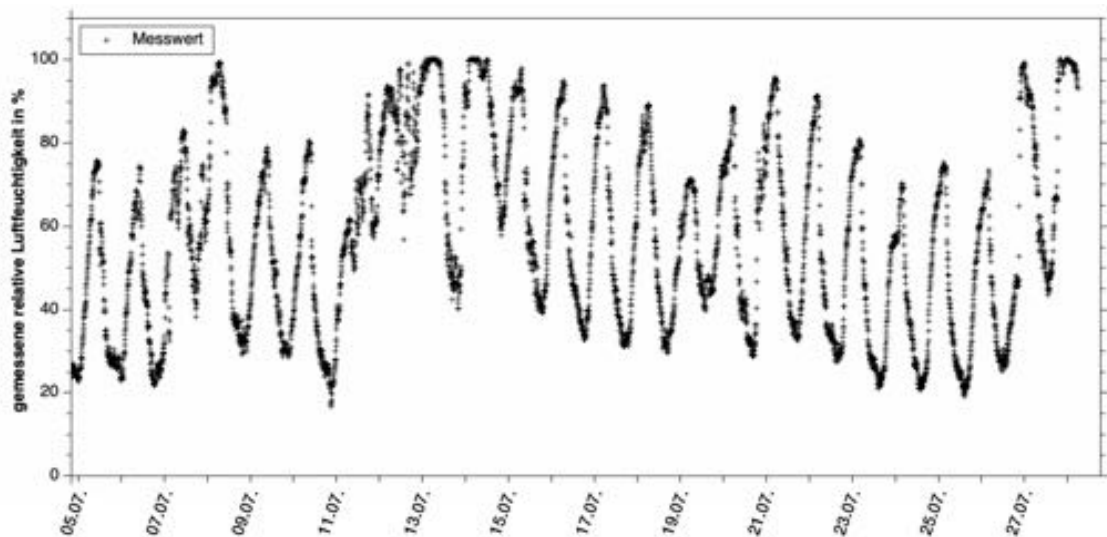


Abbildung 52: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über die gesamte Messdauer

5.1 Lufttemperatur

Die gemessenen Lufttemperaturen sind in Abbildung 51 aufgetragen. Erkennbar sind Schwankungen über den Tagesverlauf. Ein Minimum liegt in den Morgenstunden, ein Maximum in den Nachmittagsstunden zu sehen. Zudem weichen die höchsten Temperaturen der jeweiligen Tage deutlich voneinander ab. So lag die höchste Temperatur am 14.07.2019 bei ca. 23 °C, am 25.07. hingegen bei fast 45 °C. Die niedrigste Temperatur wurde am Morgen des 10.07.2019 mit ca. 10 °C gemessen. Demgegenüber betrug zur selben Uhrzeit die Temperatur am 26.07.2019 ca. 23 °C.

5.2 Relative Luftfeuchtigkeit

Analog zur Darstellung der Lufttemperatur ist der Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in Abbildung 52 zu sehen. Auch hier zeigt sich eine deutliche Schwankung im Tagesverlauf. So sinkt beispielsweise im Verlauf des 08.07.2019 die relative Luftfeuchtigkeit zwischenzeitlich um ca. 70 % ab. Ein Wert von annähernd 100 % wird an drei Tagen erreicht. Am späten Nachmittag des 10.07.2019 wird eine relative Luftfeuchtigkeit von 17 % erreicht.

5.3 Beleuchtungsstärke und UV-Intensität

Die Abbildungen 53 und 54 zeigen die zeitlichen Verläufe von Beleuchtungsstärke und UV-A-Intensität. Einflüsse der Tönungsfolie wurden bereits berücksichtigt und entsprechend korrigiert.

Die Beleuchtungsstärke schwankt stark über den Tagesverlauf. In der Nacht fällt die Beleuchtungsstärke auf 0 Lux ab, während tagsüber an den meisten Tagen eine maximale Beleuchtungsstärke im Bereich von 150000 Lux erreicht wird. Deutliche Abweichungen treten nur an wenigen Tagen auf. Am 05.07.2019 wird zur Mittagszeit

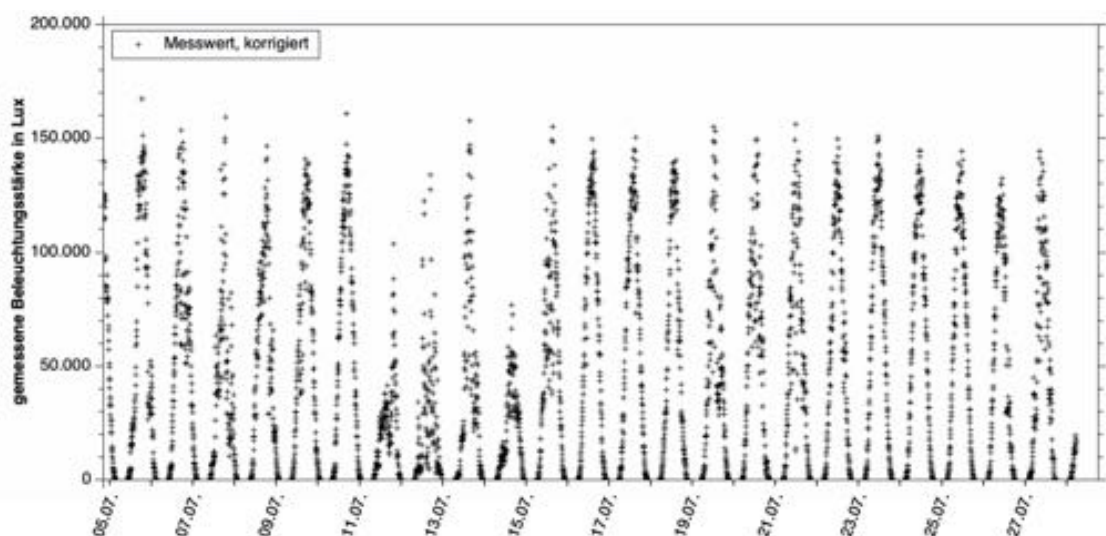


Abbildung 53: Verlauf der Beleuchtungsstärke über die gesamte Messdauer

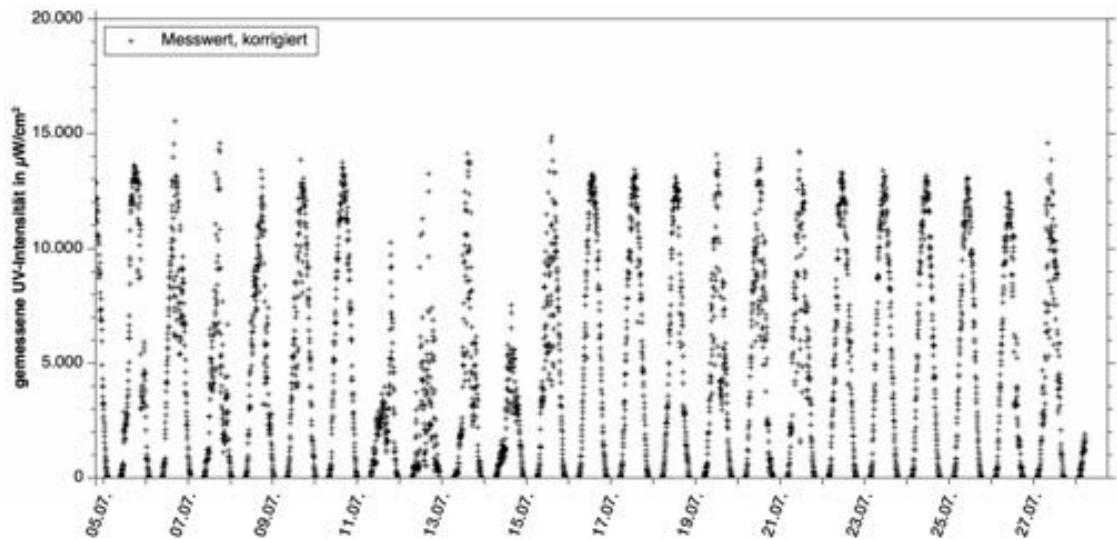


Abbildung 54: Verlauf der UV(A)-Intensität über die gesamte Messdauer

ein Spitzenwert von über 167000 Lux erreicht. Demgegenüber wird am 14.07.2019 ein Wert von ca. 77800 Lux nicht überschritten.

Im grundlegenden Verlauf ist die UV-Intensität der Beleuchtungsstärke ähnlich. An den meisten Tagen wird ein tägliches Maximum von ca. 13 - 14 $\frac{mW}{m^2}$ erreicht, nachts fällt die Intensität auf 0 $\frac{mW}{m^2}$ ab. Das niedrigste Tagesmaximum wird ebenfalls am 14.07.2019 erreicht.

5.4 Luftdruck

Der Luftdruck ist in Abbildung 55 dargestellt. Als Orientierungshilfe wurde zudem der mittlere Luftdruck auf Höhe der Messstation von 99773 Pa als rote Gerade abgebildet (Vgl. rechneronline.de).



Abbildung 55: Verlauf des Luftdrucks über die gesamte Messdauer

Es ist zu sehen, dass über den Großteil der Messung der Luftdruck über dem Mittelwert lag. Zu kurzen Unterschreitungen kam es am 06., 07. und 12.07.2019., ab dem 26.07.2019 kam es bis Ende der Messungen am 28.07.2019 zu einer längeren Unterschreitung.

Der höchste Luftdruck im Rahmen der Messungen wurde am 22.07.2019 mit einem Wert von 101118 Pa erreicht. Der niedrigste Luftdruck herrschte am 27.07.2019 mit 98674 Pa.

5.5 Feinstaubkonzentrationen für PM25 und PM10

Ebenfalls wurden die Konzentrationen von Feinstaubpartikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser bis $2,5 \mu\text{m}$ (PM25) bzw. $10 \mu\text{m}$ (PM10) über den gesamten Messzeitraum ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Abbildung 56 und 57 abgebildet. Zu beachten ist, dass in den beiden Abbildungen die Skalen der Konzentrationen unterschiedliche Bereiche umfassen. Diese Form der Darstellung wurde gewählt, damit beide Diagramme unabhängig voneinander in angemessener Größe betrachtet werden können.

Die Konzentration von PM25 Partikeln überschreitet nur an wenigen Tagen einen Wert von $15 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$. Deutlich erhöhte Werte zeigen sich hingegen am 13., 14., 16. sowie 28.07.2019. Am Morgen des 14.07.2019 wurde eine Konzentration von ca. $40 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ ermittelt.

Ähnlichkeit besitzt der Verlauf der Konzentration in der Luft befindlicher PM10 Partikel. Die Zeitpunkte der Maxima sind weitgehend identisch. Eine Konzentration von $25 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ wird nur zu wenigen Zeitpunkten überschritten. Die maximale ermittelte Konzentration liegt bei $136,80 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ und wurde am Nachmittag des 12.07.2019 erreicht.

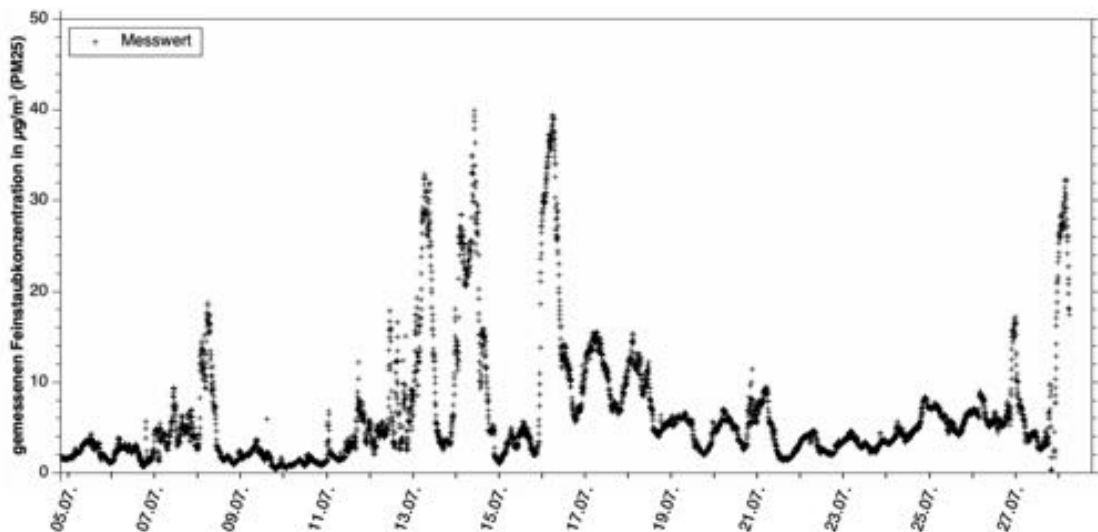


Abbildung 56: Verlauf der Feinstaubkonzentration (PM25) über die gesamte Messdauer

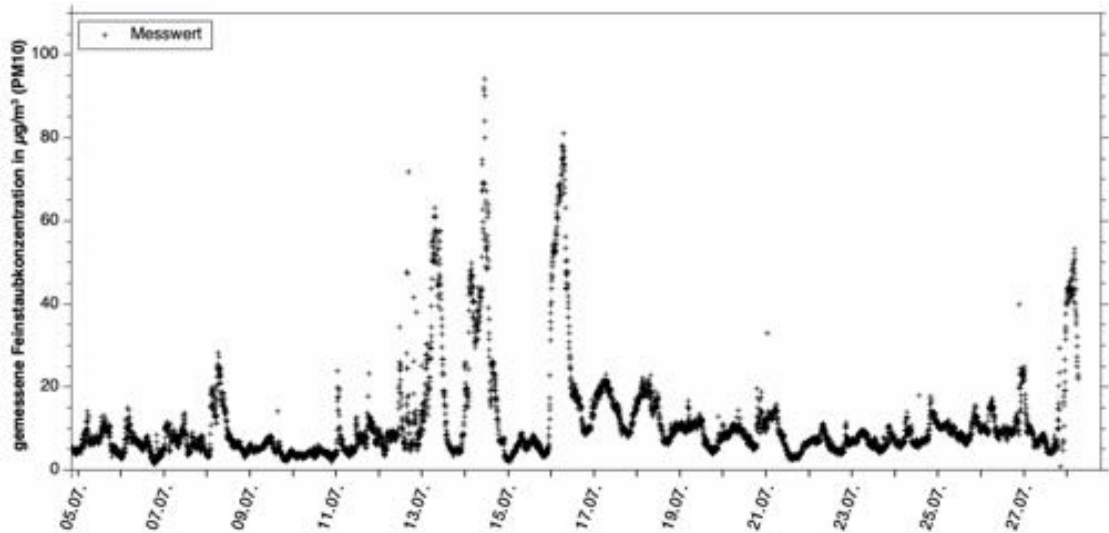


Abbildung 57: Verlauf der Feinstaubkonzentration (PM10) über die gesamte Messdauer

5.6 A-bewerteter Schalldruckpegel

Aus dem Ausgangssignal des MAX9814 ergibt sich wie bereits beschrieben nach Abbildung 45 (A-bewerteter Schalldruckpegel über der Ausgangsspannung des MAX9814) der in Abbildung 58 abgebildete Verlauf des Schalldruckpegels.

Die Werte des Schalldruckpegels schwanken über den Tagesgang, weisen davon abgesehen nur geringe Variation auf. Der Großteil der Werte befindet sich im Bereich von ca. 50 - 65 dB. Abweichungen zeigen vor allem nach oben. Dabei wird mehrfach der Maximalwert von $(82,96 \pm 0,31)$ dB erreicht. Ein besonders deutlicher Ausschlag ist am 20.07.2019 zu erkennen. Abweichungen nach unten sind kaum vorhanden.

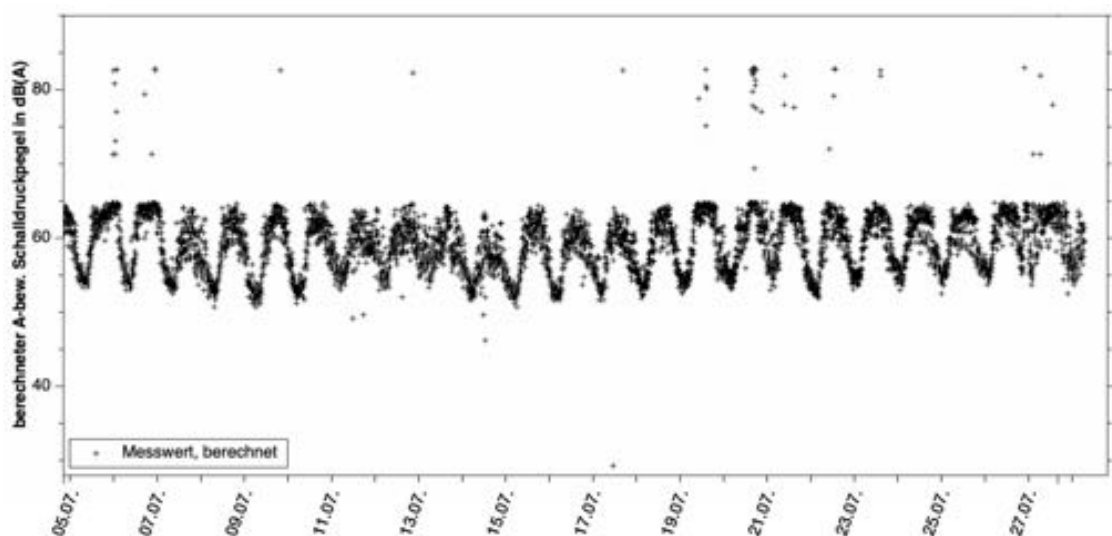


Abbildung 58: Verlauf des A-bewerteten Schalldruckpegels über die gesamte Messdauer

6 Auswertung der Messdaten

Mit den erhobenen Daten lassen sich zahllose physikalische, meteorologische sowie klimatologische Zusammenhänge untersuchen. Die verwendeten Daten sind auf der beigefügten CD zu finden.

Im Folgenden werden einige dieser Zusammenhänge exemplarisch dargelegt. Die ausgewählten Zusammenhänge setzen bei der Umsetzung im Unterricht unterschiedliche mathematische und physikalische Kompetenzen der Lernenden voraus und können daher in unterschiedlichen Jahrgangsstufen der Primarstufe, Sekundarstufe I und II eingesetzt werden. Zudem lassen sie sich im Zuge einer Differenzierung nach Niveaustufen einsetzen.

6.1 Temperatur

6.1.1 Abkühlung der Luft bei Nacht

Aus dem in Abbildung 51 dargestellten Gesamtverlauf der Lufttemperatur wurde der Zeitraum vom 23.07.2019 bis zum Morgen des 26.07.2019 herausgelöst und näher betrachtet. Diese Tage wurden gewählt, da der Himmel weitestgehend frei von Wolken war und eine stabile Wetterlage herrschte.

Beginnend jeweils um 20:00 wurden die Temperaturverläufe der einzelnen Tage in Abbildung 59 aufgetragen. Mit Hilfe des Programms qtiplot wurde für jeden der drei Verläufe eine Fit-Funktion erstellt. Als Grundlage der Fit-Funktion wurde die Abkühlungsfunktion nach Gleichung 5 verwendet.

Besonders in der zweiten (rot) und dritten Nacht (grün) folgt der Temperaturverlauf sehr genau dem Verlauf einer entsprechenden Exponentialfunktion. Der Determinationskoeffizient beider Funktionen beträgt ca. 0,997. Nach Eid et al. weist dies auf

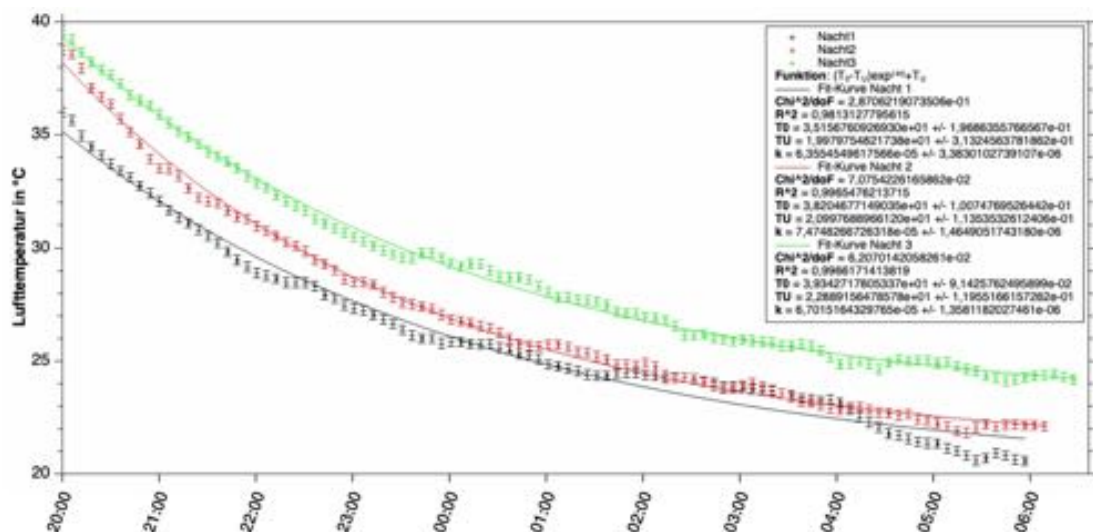


Abbildung 59: Abkühlungskurven für die Nächte vom 23.07. bis 26.07.2019

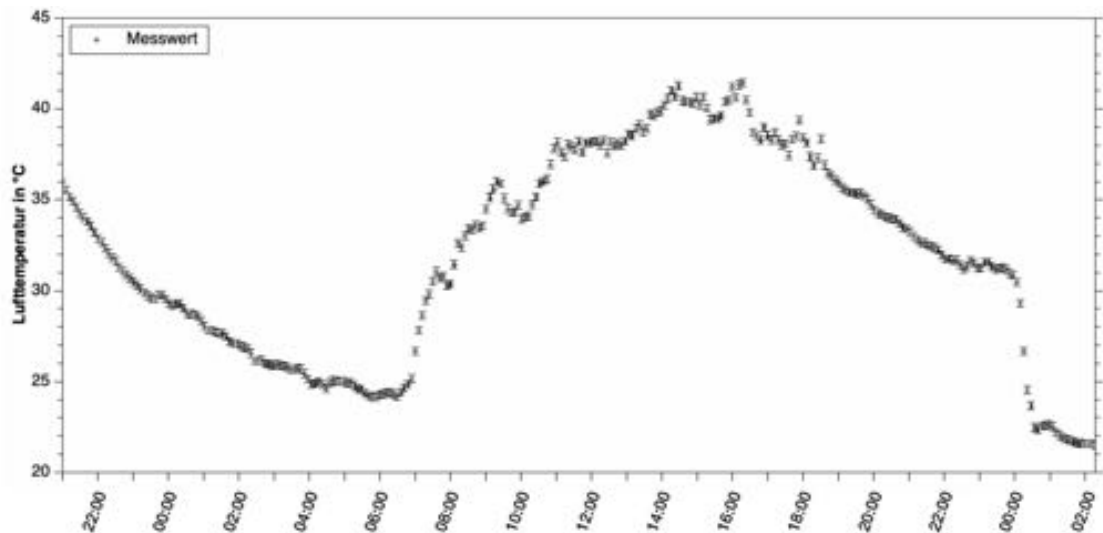


Abbildung 60: Temperaturverlauf vom 25.07. bis 27.07.2019

eine deutliche Korrelation der beiden betrachteten Größen hin [Eid et. al., 2010, Vgl. S. 570].

Die Fit-Kurven von Nacht 1 und Nacht 3 verlaufen annähernd parallel. Die Verschiebung beider Kurven auf der Achse der Lufttemperatur lässt sich anhand der verschiedenen Ausgangstemperaturen erklären.

Demgegenüber fällt die Temperatur während Nacht 2 bis ca. 00:00 schneller. Eine Erklärung dafür sind durch Luftströmungen herbeigeführte kühlere Luftmassen, die aus der ungleichmäßigen Abkühlung der Umgebung resultieren können [Vgl. www.stadt-koeln.de]. Ähnliche Beobachtungen können während Nacht 1 zwischen 04:00 und 06:00 gemacht werden.

Entsprechende Luftströmungen können auch Luft höherer Temperatur an den Messstandort bewegen. Dies könnte eine mögliche Ursache für die Abweichung der Temperaturwerte zwischen 02:00 und 04:00 während Nacht 1 sein.

Andere Wetterereignisse wie Regen, Gewitter oder starke Bewölkung können die Verläufe beeinflussen und sind daher auf den t-T-Diagrammen sichtbar. Als Beispiel dafür kann die Nacht vom 26.07.2019 auf den Folgetag dienen, in der es zu regnen begann. Abbildung 60 zeigt einen Ausschnitt der Verlaufskurve in der Nacht vom 25.07.2019 (Nacht 3) sowie einen Ausschnitt aus der Nacht auf den 27.07.2019.

Es ist zu erkennen, dass die Temperatur in der Nacht auf den 27.07.2019 zunächst deutlich langsamer sinkt aufgrund der Wolkendecke. Mit einsetzendem Regen ab ca. 00:00 sinkt die Temperatur drastisch ab [Vgl. proplanta.de: Regen].

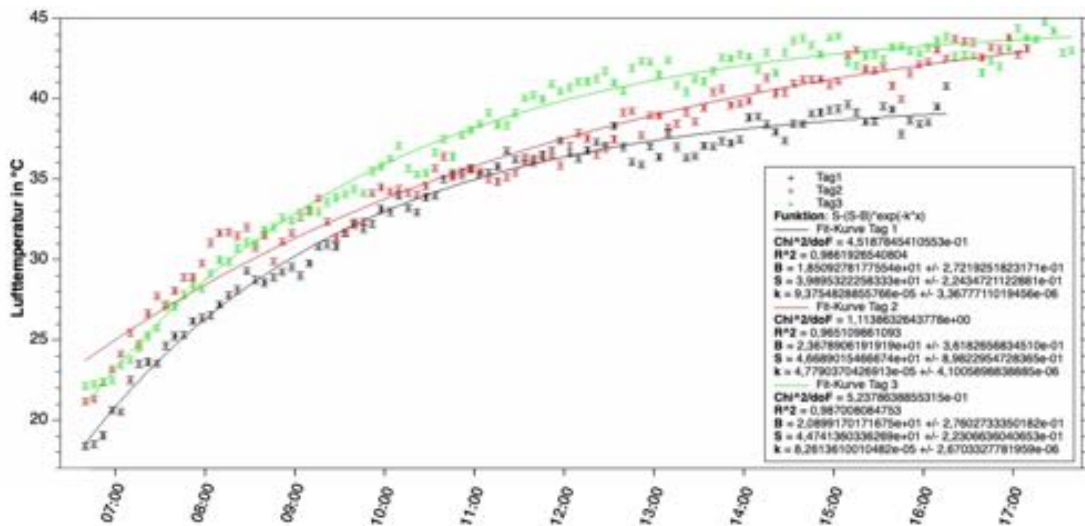


Abbildung 61: Erwärmungskurve für die Tage vom 23.07. bis 25.07.2019

6.1.2 Erwärmung der Luft am Tag

Analog zur Abkühlungskurve lässt sich auch für die Erwärmung der Luft eine Kurve erstellen. Für die Tage des 23. bis 25.07.2019 wurden die Temperaturverläufe zwischen 06:20 und 17:20 in Abbildung 61 dargestellt. Für die Fit-Kurven wurde Gleichung 4 verwendet.

Die Temperaturkurve für den 25.07.2019 (grün) erreicht dabei einen Determinationskoeffizienten von 0,987, der Koeffizient am 23.07.2019 (schwarz) liegt nur um 0,001 niedriger, sodass auch hier von einer Korrelation ausgegangen werden kann.

Der Verlauf am 24.07.2019 weicht vor allem bis ca. 10:00 von der zugehörigen Fit-Kurve ab. Zu Beginn liegt der Temperaturverlauf unterhalb der Fit-Kurve, besitzt jedoch eine größere Steigung. Ab etwa 08:00 kommt es zu einer Stagnation. Eine mögliche Ursache besteht in der zwischenzeitlichen Abschattung durch Wolken.

Auffällig sind die im Tagesverlauf erreichten Temperaturen oberhalb der 40 °C. Eine Erklärung dazu kann die nicht vollständig zu verhindernde Erwärmung der Thermometerhütte durch Sonneneinstrahlung sein. Jedoch wurden in dem betrachteten Zeitraum von offiziellen Messstationen in Karlsruhe Lufttemperaturen jenseits der 38 °C gemeldet.

6.1.3 Temperatur und Beleuchtungsstärke im Tagesgang

Der Temperaturverlauf kann nicht nur einzeln im Tagesgang betrachtet werden sondern auch in Verbindung mit der einfallenden Sonnenstrahlung. Da nach Gleichung 13 die photometrische Größe der Lichtmenge proportional zur Strahlungsmenge ist, können zur Beschreibung der Sonnenstrahlung für diesen Fall die Daten der gemessenen Beleuchtungsstärke verwendet werden.

Trägt man die Temperatur und die Beleuchtungsstärke in einem gemeinsamen Dia-

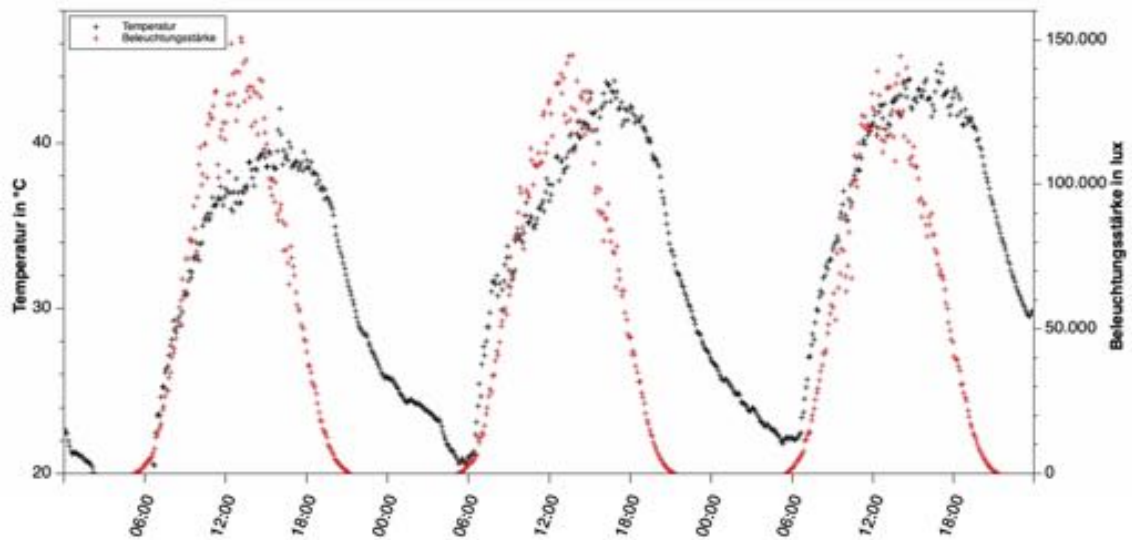


Abbildung 62: Verlauf von Temperatur und Beleuchtungsstärke vom 23.07. bis 25.07.2019

gramm über der Zeit auf, so erhält man für den Zeitraum vom 23.07.2019 bis 25.07.2019 das in Abbildung 62 dargestellte Diagramm. Da der Messfehler des Beleuchtungsstärke-Sensors nicht bekannt sind, wird auf eine Darstellung von Fehlerbalken verzichtet.

Zu sehen ist zunächst der bereits beschriebene Abfall der Temperatur während der Nacht. Mit zunehmender Beleuchtungsstärke endet zunächst der Abfall, und es kommt zu einem Anstieg der Temperatur.

Mit abnehmender Beleuchtungsstärke nimmt die Temperatur kurzzeitig noch weiter zu und beginnt erst im Anschluss selbst abzusinken. Das Absinken wird dann durch die steigende Beleuchtungsstärke am nächsten Tag unterbrochen.

Ausgehend von Gleichung 15 gilt für den Lichtstrom ϕ , dem eine Fläche A bei einer gleichmäßigen Beleuchtungsstärke E ausgesetzt ist:

$$\phi = E \cdot A \quad (38)$$

Für die Lichtmenge Q folgt mit Gleichung 14:

$$Q = \int \phi dt = A \cdot \int E dt \quad (39)$$

Über den Tagesgang steigt die Lichtmenge und damit auch die Strahlungsmenge also auch noch mit abnehmender Beleuchtungsstärke. Dies führt, bei einem als konstant angenommenen Luftdruck, so lange zu einem Anstieg der Temperatur, bis die der

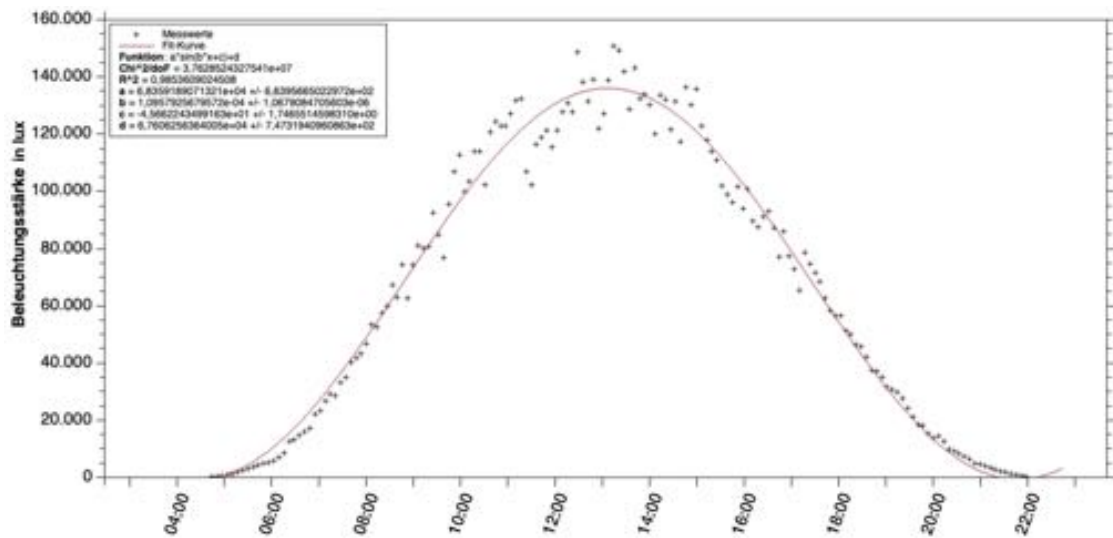


Abbildung 63: Verlauf der Beleuchtungsstärke am 23.07.2019

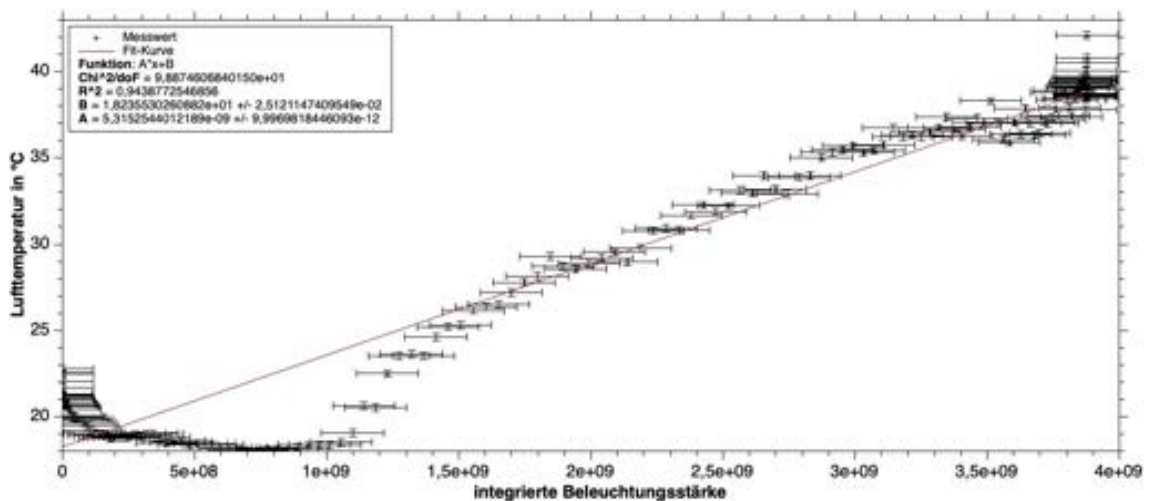


Abbildung 64: Lufttemperatur über der integrierten Beleuchtungsstärke am 23.07.2019

Luft zugeführte Energiemenge nicht mehr größer ist als die abgegebene.

Für die Fit-Kurve der Beleuchtungsstärke am 23.07.2019 wurde eine Funktion der Form $a \cdot \sin(b \cdot x + c) + d$ gewählt und in Abbildung 63 dargestellt. Integriert man diese Funktion über die Zeit, so erhält man gemäß Gleichung 39 eine zur Lichtmenge proportionale Funktion. Diese wird von hier an als integrierte Beleuchtungsstärke bezeichnet.

Über der integrierten Fit-Kurve der Beleuchtungsstärke lässt sich die Lufttemperatur auftragen. Wie in Abbildung 64 zu sehen, besteht eine Korrelation zwischen der integrierten Beleuchtungsstärke (und somit auch der Strahlungsmenge) und der Temperatur.

Zu beachten ist, dass sich aus der Fit-Kurve in Abbildung 64 nicht unmittelbar

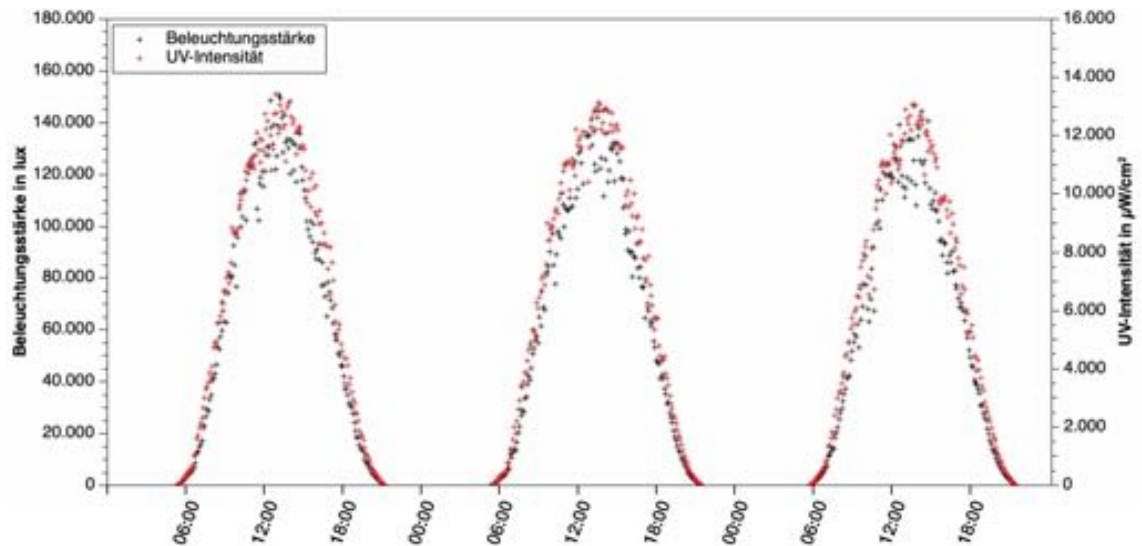


Abbildung 65: Verlauf der Beleuchtungsstärke und UV-Intensität vom 23.07. bis 25.07.2019

auf die Werte der Strahlungsmenge schließen lässt. Dazu muss noch die bestrahlte Fläche sowie die Empfindlichkeitskurve berücksichtigt werden.

6.2 Beleuchtungsstärke und UV-Intensität

Bereits die Abbildungen 53 und 54 lassen vermuten, dass der Tagesgang der Beleuchtungsstärke und der UV-Intensität große Ähnlichkeit aufweist. Um dies näher betrachten zu können, sind in Abbildung 65 beiden Tagesgänge im selben Diagramm für den Zeitraum vom 23.07.2019 bis 25.07.2019 dargestellt. Da die Toleranzen des Sensors zur Messung der UV-Intensität ebenfalls nicht bekannt sind, wird an dieser Stelle auf Fehlerbalken verzichtet.

In der Nacht sinken die Werte Beleuchtungsstärke als auch die UV-Intensität auf null ab. In den Morgenstunden beginnen beide Werte zum selben Zeitpunkt anzusteigen und erreichen im Laufe des Tage zur selben Zeit ihr Maximum.

Es lässt sich vermuten, dass die Intensität der UV-A-Strahlung als Teil der Gesamtintensität proportional zur Gesamtintensität der von der Sonne auf die Sensoren einfallenden Strahlung ist.

Um dies näher zu betrachten, wurde die UV-Intensität über der Beleuchtungsstärke aufgetragen und eine Fit-Kurve erstellt. In diesem Fall wurde eine lineare Fit-Kurve der Form $A \cdot x + B$ gewählt. Das Ergebnis ist in Abbildung 66 dargestellt.

Die verwendete Fit-Funktion besitzt einen Determinationskoeffizienten von ca. 0,985. Eine lineare Regressionsanalyse der zugrundeliegenden Daten in Excel ergibt einen Korrelationskoeffizienten von ca. 0,992. Es besteht also eine starke Korrelation zwischen der UV-Intensität und der Beleuchtungsstärke [Eid et. al., 2010, Vgl. S. 508 f].

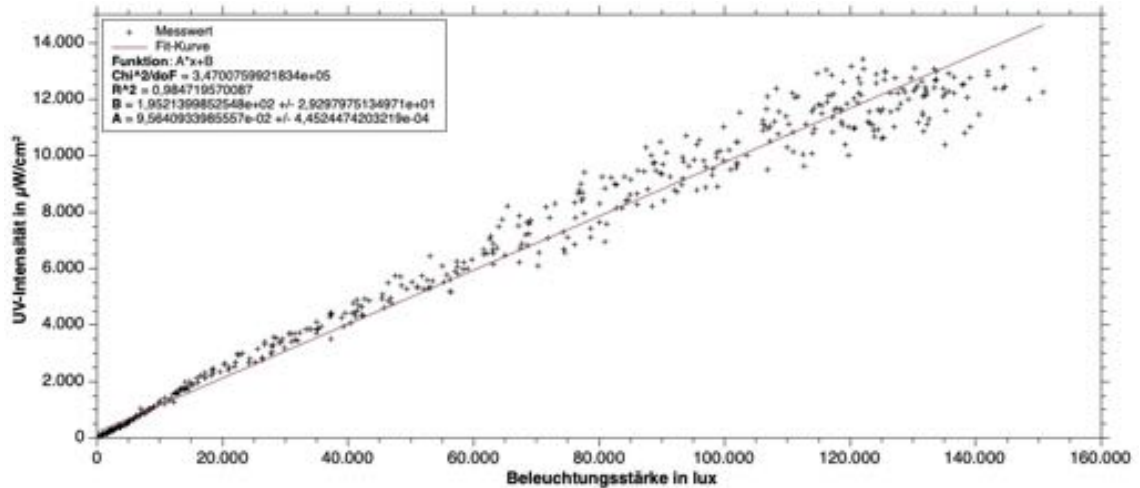


Abbildung 66: UV-Intensität über der Beleuchtungsstärke vom 23.07. bis 25.07.2019

Auch hier kann eine Übertragung der Beleuchtungsstärke auf die Strahlungsmenge und somit auf die Strahlungsintensität vorgenommen werden.

Der in der Fit-Kurve auftretende Faktor a macht eine Aussage über die Steigung der Funktion. Wird in Abbildung 66 die Beleuchtungsstärke durch Daten der Gesamtintensität ersetzt, erlaubt a eine Aussage über den Anteil der UV-A-Intensität an der Gesamtintensität. Läge der UV-A-Anteil bei 100 % so würde die Steigung eins betragen; läge er bei 0 %, wäre auch die Steigung null. Der Faktor a kann in diesem Fall also als eine Art Proportionalitätsfaktor zwischen den beiden Intensitäten interpretiert werden.

6.3 Luftfeuchtigkeit

Wie bereits im fachwissenschaftlichen Teil dargestellt, beschreibt die relative Luftfeuchtigkeit RH „das Verhältnis zwischen dem aktuellen und dem maximal möglichen Dampfdruck“ [Klose, 2016, S. 150]. Entsprechend gilt Gleichung 36.

Da sowohl der momentane Dampfdruck als auch der maximale Dampfdruck von der Temperatur abhängen, sollte deshalb auch die relative Luftfeuchtigkeit temperaturabhängig sein.

Betrachtet man in Abbildung 67 den Verlauf der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit, so zeigt sich, dass eine Zunahme der Lufttemperatur zu einer Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit führt. Umgekehrt führt eine Abnahme der Temperatur zu einer Zunahme relativen Feuchtigkeit.

Trägt man die relative Luftfeuchtigkeit über der Temperatur auf, so erhält man für den 23.07.2019 den in Abbildung 68 abgebildeten Verlauf.

Da der Sättigungsdampfdruck e_w nach der Magnus-Gleichung (siehe Gleichung 34) mit der Temperatur exponentiell zunimmt, sollte die relative Luftfeuchtigkeit wegen

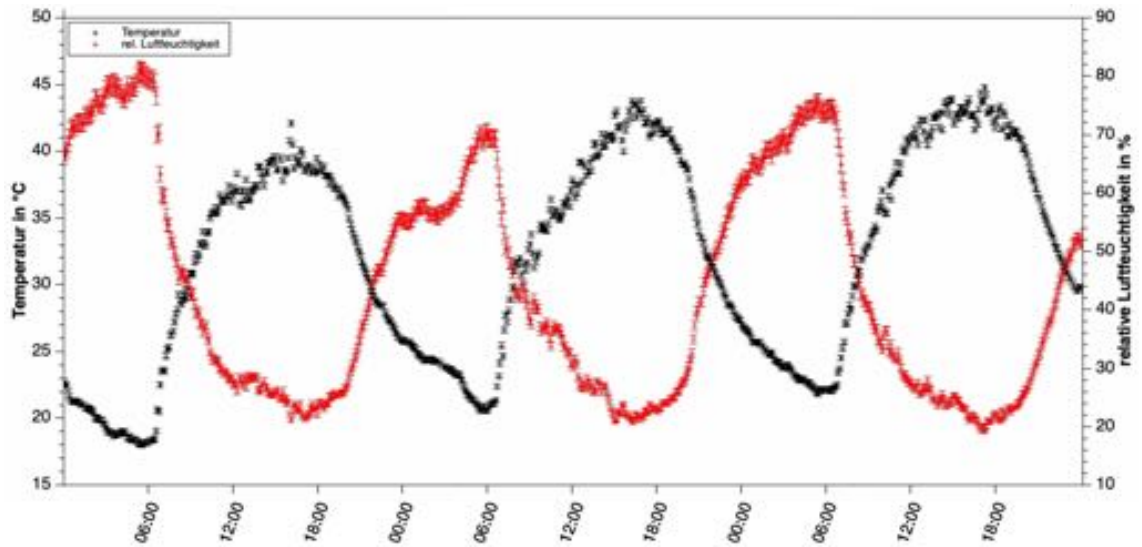


Abbildung 67: Verlauf der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit vom 23.07. bis 25.07.2019

$RH \sim \frac{1}{e_w}$ exponentiell abnehmen. Aus diesem Grund wird für die Fit-Kurve eine Exponentialfunktion mit negativem Exponenten gewählt.

Die Fit-Kurve weist einen Determinationskoeffizienten von 0,993 auf.

Mit Hilfe der Magnus-Gleichung sowie der Gleichungen 35 und 36 lässt sich aus der relativen die absolute Luftfeuchtigkeit errechnen. Es gilt für eine Temperatur T (in Kelvin):

$$\rho_w = \frac{e}{R_w \cdot T} = \frac{\rho_{rel} \cdot e_w}{R_w \cdot T} = \frac{\rho_{rel} \cdot 611 \cdot e^{\frac{17,08 \cdot (T-273,15)}{234,17+(T-273,15)}}}{R_w \cdot T} \quad (40)$$

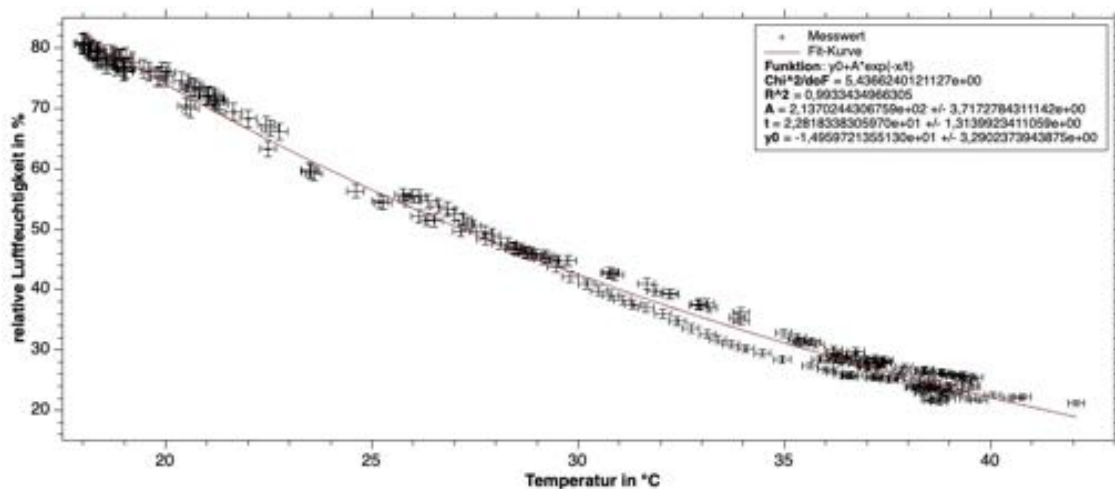


Abbildung 68: Relative Luftfeuchtigkeit über der Temperatur am 23.07.2019

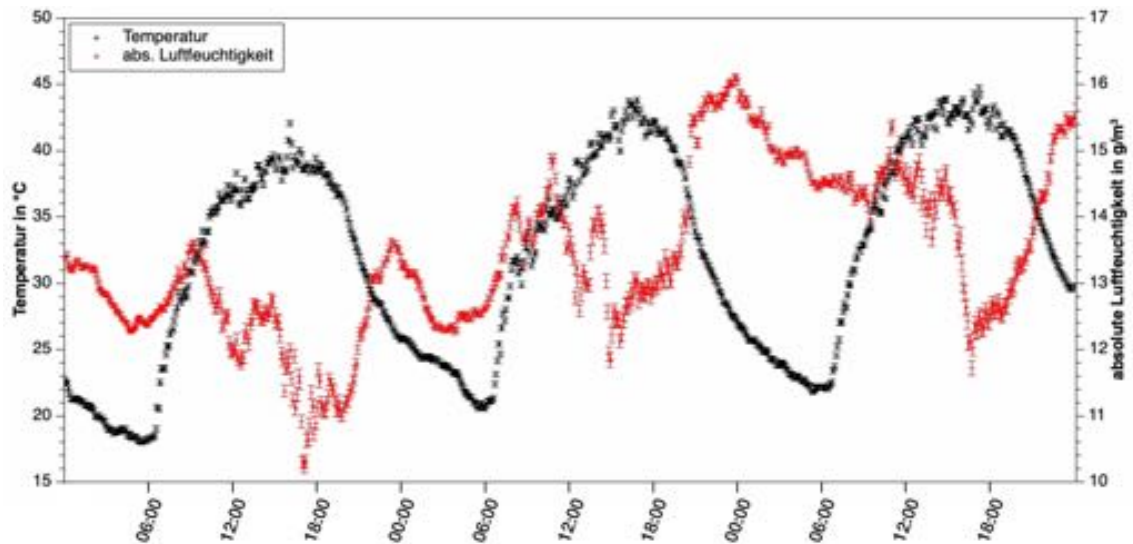


Abbildung 69: Verlauf der Temperatur und absoluten Luftfeuchtigkeit vom 23.07. bis 25.07.2019

Der Faktor von 6,11 aus der Magnus-Gleichung wurde aufgrund der Umrechnung von hPa in Pa zu 611 geändert.

Aus den Daten der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit wurde auf diese Weise der Verlauf der absoluten Luftfeuchtigkeit errechnet. Das Ergebnis der Rechnung ist für die Tage vom 23.07. bis 25.07.2019 in Abbildung 69 dargestellt.

Gemäß Gleichung 40 ist eine exponentielle Zunahme der absoluten Luftfeuchtigkeit mit der Temperatur zu erwarten. Betrachtet man Abbildung 69 zeigt sich jedoch ein anderer Verlauf.

In den Morgenstunden nimmt die absolute Luftfeuchtigkeit mit der Lufttemperatur zu. Im Laufe des späten Morgens und Vormittags beginnt die absolute Luftfeuchtigkeit abzufallen bis auf das Tagesminimum am späten Nachmittag. Im Anschluss steigt die absolute Luftfeuchtigkeit bis ungefähr Mitternacht, um dann gemeinsam mit der Temperatur bis in die Morgenstunden des Folgetages zu fallen.

Zu erklären ist diese Beobachtung durch den Anstieg konvektionsbedingter Luftströmungen, die dazu führen, dass trockene Luft die feuchtere Luft in Bodennähe verdrängt [Klose, 2016, Vgl. S. 138 f]. Die Luftströmungen beginnen im Tagesverlauf gemeinsam mit der Temperatur anzusteigen. Auf diese Weise führt ein Anstieg der Temperatur in den späten Morgenstunden gleichzeitig zu einem Abfall der absoluten Luftfeuchtigkeit.

Betrachtet man im gewählten Beispiel die Verläufe der absoluten Luftfeuchtigkeit und der Temperatur am 23.07.2019 zwischen dem Beginn des Temperaturanstiegs um 07:14 und dem Beginn des Einbruchs der absoluten Luftfeuchtigkeit um 09:14, so lässt sich das in Abbildung 70 wiedergegebene Diagramm erstellen. Entsprechend Gleichung 40 wurde für die Fit-Kurve eine exponentiell wachsende Funktion gewählt.

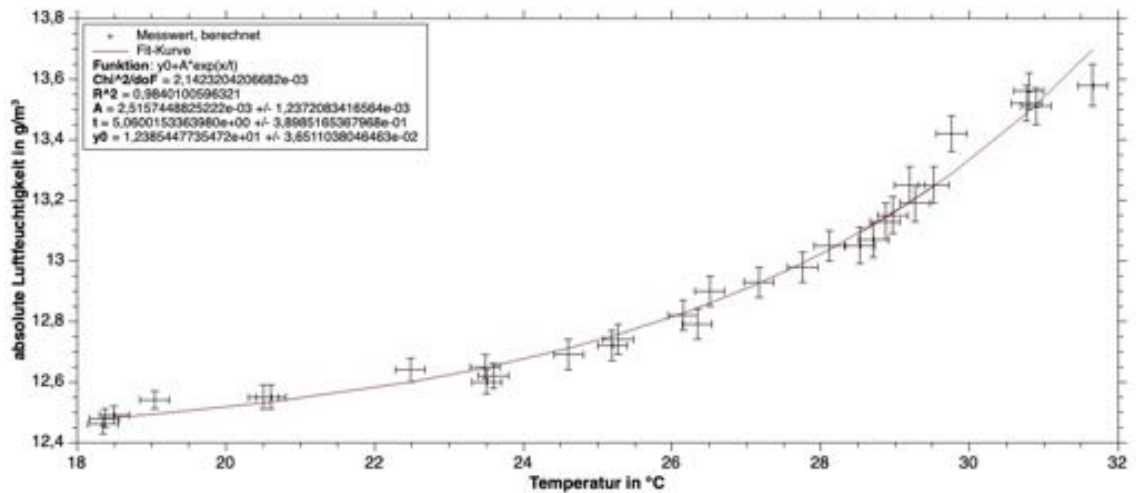


Abbildung 70: Berechnete absolute Luftfeuchtigkeit über der Temperatur am 23.07.2019 zwischen 07:14 und 09:14

Die Fit-Funktion besitzt zu den Daten einen Determinationskoeffizienten von 0,98. Somit lässt sich der Verlauf der absoluten Luftfeuchtigkeit über der Temperatur gemäß der Gleichung 40 beschreiben. Dies gilt allerdings aufgrund wetterbedingter Einflüsse nur während einzelner Zeitabschnitte in den Tagesverläufen.

6.4 Luftdruck und Temperatur

Nach Gleichung 18 (Gasgleichung) führt bei einem idealen Gas konstanten Volumens V eine Veränderung der Temperatur zu einer linearen Veränderung des Drucks. Überträgt man dies auf die Erdatmosphäre, würde eine Erhöhung der Lufttemperatur zu einem linearen Anstieg des Luftdrucks führen und umgekehrt.

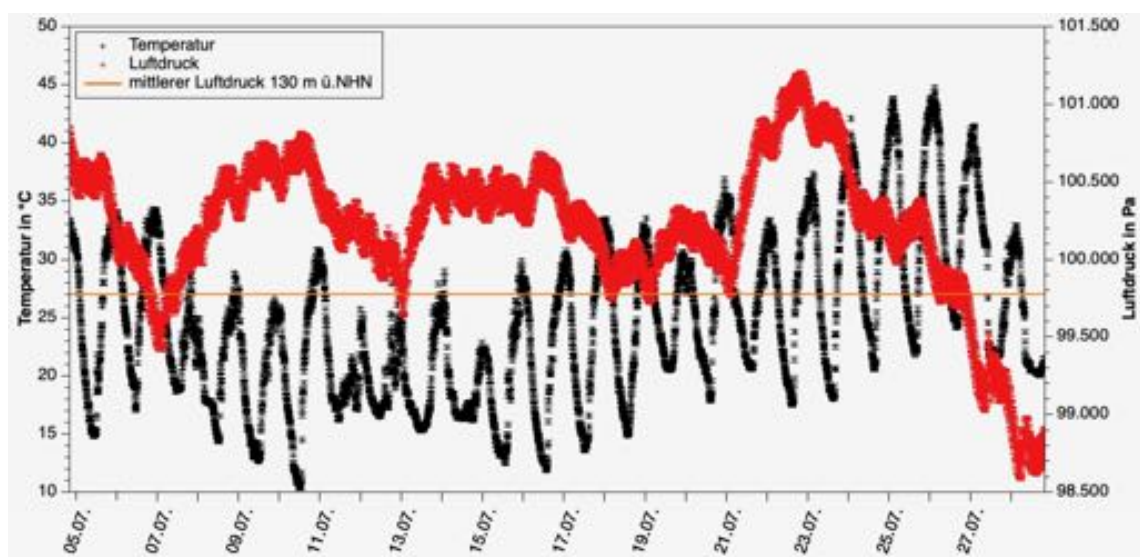


Abbildung 71: Verlauf der Temperatur und des Luftdrucks über die gesamte Messdauer

In Abbildung 71 ist der Verlauf der Lufttemperatur und des Luftdrucks über die gesamte Messdauer dargestellt. Im Zeitraum vom 09.07. bis 11.07.2019 scheint der Luftdruck im Tagesgang der Temperatur vorübergehend zu folgen. Zwischen dem 16.07. und 17.07.2019 steigt der Luftdruck mit fallender Temperatur und fällt mit ansteigender Temperatur. Eine Untersuchung der Korrelation zwischen Luftdruck und Temperatur über den Gesamtzeitraum ergab einen Korrelationsfaktor von $-0,47$. Für den bisher herangezogenen Zeitraum vom 23.07. bis 25.07.2019 lag der Korrelationsfaktor hingegen bei $+0,21$.

Sofern die meteorologischen Einflussgrößen konstant sind, führt die Schwankung des Luftdrucks zwei volle Perioden im Tagesgang mit einer Amplitude von maximal einem Hektopascal durch. Ausgelöst werden diese Schwankungen durch den Tagesgang der Lufttemperatur. Bei Veränderung der Gesamtwetterlage kommt es jedoch zu deutlich stärkeren und nicht-regelmäßigen Schwankungen, die sich mit den thermischen Schwankungen überlagern. Dadurch ist die ursprüngliche, periodische Schwankung im Tagesgang nicht mehr nachzuweisen [Klose, 2016, Vgl. S. 117].

Für die an einem festen Ort zu messenden Druckverhältnisse sind daher nicht die Schwankungen im Tagesgang, sondern vielmehr die Wanderbewegungen von Hoch- und Tiefdruckgebieten maßgebend.

6.5 Feinstaub

6.5.1 Feinstaub und Luftfeuchtigkeit

Trägt man die gemessenen Feinstaubkonzentrationen über der Messdauer auf, so zeigt sich, dass die Feinstaubkonzentration an Tagen mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit mit zunehmender Luftfeuchtigkeit anzusteigen scheint.

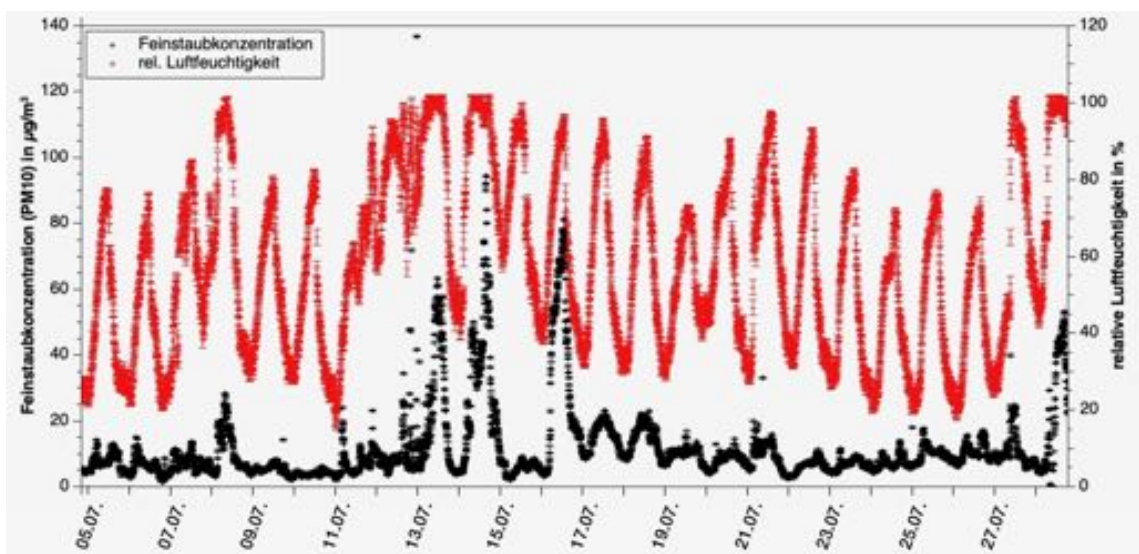


Abbildung 72: Verlauf der Feinstaubkonzentration (PM10) und der relativen Luftfeuchtigkeit über die gesamte Messdauer

In Abbildung 72 ist der Verlauf der beiden Größen über die Messdauer vom 04.07.2019 bis 28.07.2019 wiedergegeben.

Beispielhaft sind hierzu für den 16.07. und 17.07.2019 die Feinstaubkonzentrationen über der relativen Luftfeuchtigkeit aufgetragen (Abbildung 73). Die beiden Tage wurden gewählt, da sich hier die Feinstaubkonzentrationen trotz vergleichbarer Tagesverläufe von relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur deutlich voneinander unterscheiden.

Der Determinationskoeffizient der Fit-Kurve für den 16.07.2019 liegt bei ca. 0,85 und für den 17.07.2019 bei ca. 0,95. Für beide Tagesgänge wurde jeweils eine Fit-Kurve erstellt. Als Grundlage hierfür dient eine Funktion der Form $A \cdot x + B$. Mit Excel wurde für den 16.07.2019 ein Korrelationsfaktor von 0,92, für den 17.07.2019 von 0,97 berechnet.

Es kann also auf einen Zusammenhang zwischen der Konzentration von PM10 Partikeln und relativer Luftfeuchtigkeit geschlossen werden. Zu einem ähnlichen Schluss lässt sich bei der Betrachtung der Konzentration von PM25 Partikeln kommen.

Eine Erklärung lässt sich durch eine nähere Betrachtung der in der Luft befindlichen Partikel finden. Ein Teil der Partikel, darunter zahlreiche Salze, sind in der Lage, Wasserdampf aus der Luft zu binden. Dadurch beginnen die Salzpartikel anzuwachsen und werden bei Feinstaubmessungen, die mit dem Streulichtverfahren arbeiten, nun registriert [Laquai, 2018, Vgl. S. 2 f].

Messgeräte, die nach dem gravimetrischen Prinzip arbeiten, weisen über den gleichen Zeitraum keine signifikanten Schwankungen auf. Aus diesem Grund sollten die Messwerte, die mit Hilfe von Messgeräten auf Basis optischer Verfahren erhoben wurden, korrigiert werden, um eine Vergleichbarkeit über den zeitlichen Verlauf wie auch mit anderen Stationen zu erreichen.

Zur Korrektur stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. So kann relative Feuchtigkeit der Luft beispielsweise im Gerät vor der Messung verringert werden, indem

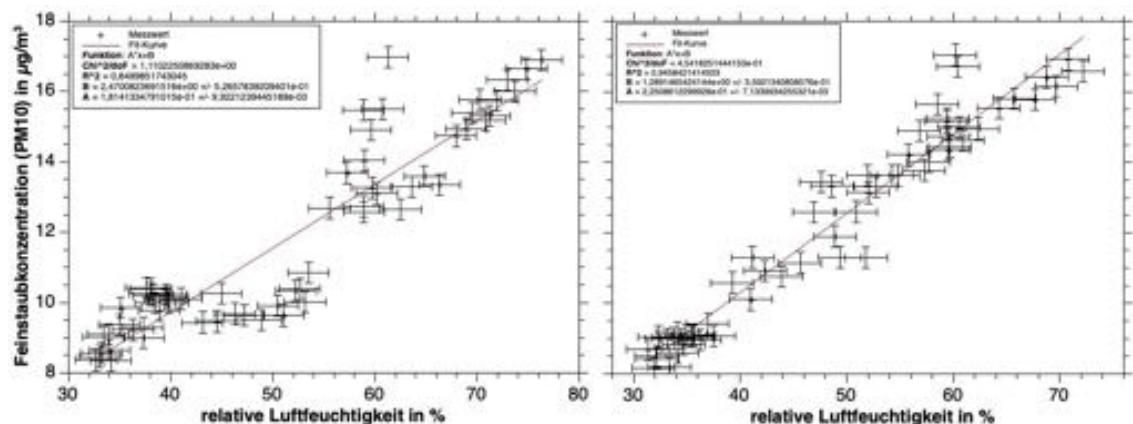


Abbildung 73: Feinstaubkonzentration (PM10) über der relativen Luftfeuchtigkeit am 16.07. (l.) und 17.07.2019 (r.)

die Temperatur der Luft erhöht wird (siehe Gleichung 35). Dies ist jedoch bei einfachen Sensoren wie dem SDS011 nicht mit vertretbarem Aufwand zu erreichen. Stattdessen bietet es sich an, im Anschluss an die Messung eine Korrektur der erhobenen Daten durchzuführen.

Nach Soneja et al. ist die mittels gravimetrischer Verfahren bestimmte Feinstaubkonzentration proportional zur optisch bestimmten Feinstaubkonzentration, sodass ein Faktor zur direkten Umrechnung bestimmt werden kann. Für den Faktor CF gilt die folgende empirisch gefundene Gleichung [Soneja et al, 2014, S. 6402]:

$$CF = a + \frac{b \cdot RH^2}{1 - RH} \text{ mit } a = 1 \text{ und } b = 0,25 \quad (41)$$

Damit gilt für die gravimetrische Feinstaubkonzentration c_{grav} :

$$c_{grav} = \frac{1}{CF} \cdot c_{optisch} \quad (42)$$

Wie von Laquai vorgeschlagen, wird die Funktion auf das gleitende Mittel über jeweils eine Stunde angewendet [Laquai, 2018, Vgl. S. 12 f]. Für die Konzentration der PM10 Partikel wird in Abbildung 74 die korrigierte Konzentration dargestellt. Dieselbe Korrektur wurde für die Konzentration der PM25 Partikel durchgeführt.

Trägt man die Konzentration der PM25 Partikel über die Konzentration der PM10 Partikel über den gesamten Verlauf der Messung auf, kann wie in Abbildung 75 abgebildet eine lineare Fit-Kurve erstellt werden.

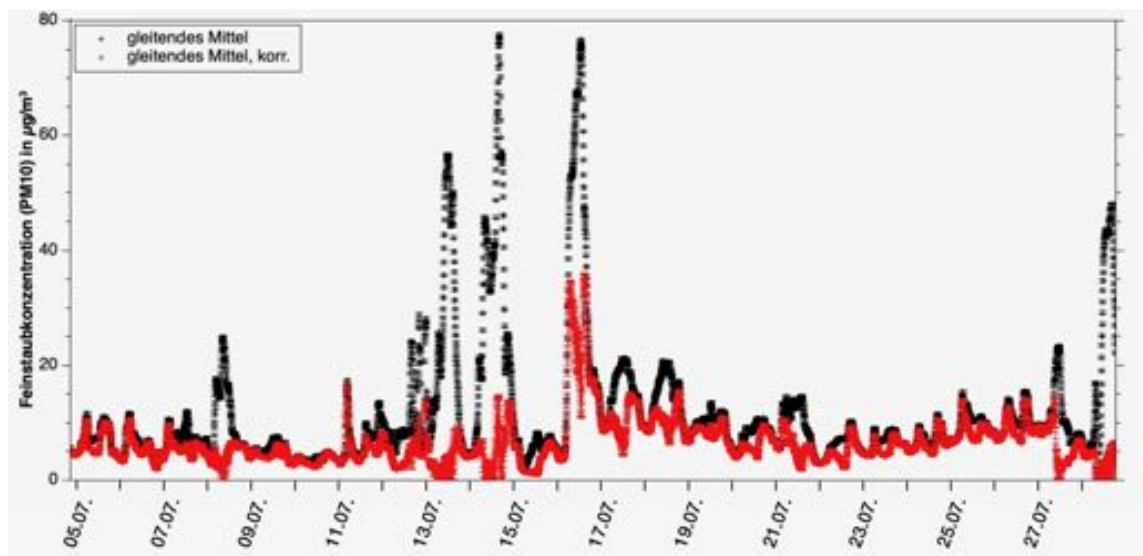


Abbildung 74: Gleitendes Mittel der Feinstaubkonzentration (PM10) über die gesamte Messdauer

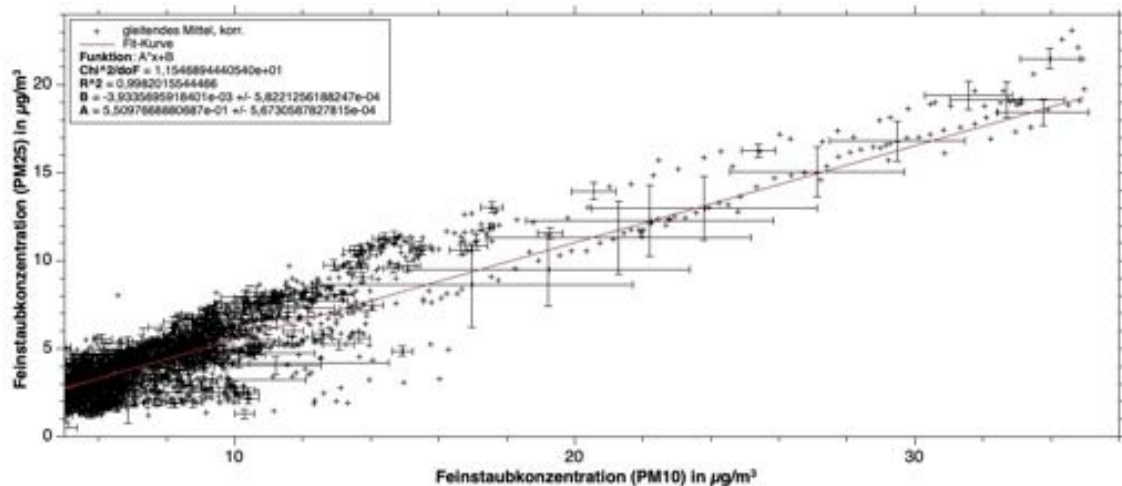


Abbildung 75: PM25-Konzentration über der PM 10 Konzentration

Die beiden Konzentrationen besitzen einen Korrelationskoeffizienten von 0,94, der Determinationskoeffizient der Fit-Kurve liegt bei 0,99. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde nur jeder zehnte Wert mit Fehlerbalken versehen.

Die Steigung A mit einem Wert von ca. 0,55 kann als Anteil derjenigen Partikel aufgefasst werden, die sowohl unter den Bereich von PM25 als auch PM10 fallen. Im Mittel der Messung besitzen PM25 Partikel also einen Anteil von 55 % an der Gesamtzahl der gemessenen Partikel. Die Bildung des arithmetischen Mittels ergibt einen Anteil von 54,8%.

6.5.2 Feinstaubkonzentration und Schalldruckpegel

Zuletzt soll der Zusammenhang zwischen der Feinstaubkonzentration und dem Abwerteten Schalldruckpegel untersucht werden. Dazu wird hier die im Voraus bestimmte korrigierte und geglättete Feinstaubkonzentration verwendet. Für die Daten des Schalldruckpegels wird ebenfalls ein gleitendes Mittel über jeweils eine Stunde bestimmt. Abbildung 76 zeigt das Ergebnis.

Es zeigen sich parallele Verläufe im Tagesgang von Feinstaubkonzentration und Schalldruckpegel. Dennoch kann es, wie beispielsweise am 16.07.2019, zu deutlichen Abweichungen von diesem Muster kommen.

Um eine genauere Beobachtung zu ermöglichen, wurde erneut der Zeitraum vom 23.07.2019 bis 25.07.2019 herangezogen und in Abbildung 77 mit einer Stundenskala versehen. Es ist zu erkennen, dass jeweils in den frühen Morgenstunden mit steigendem Schalldruckpegel leicht verzögert die Feinstaubkonzentration ansteigt. Es kann vermutet werden, dass sowohl der Schalldruckpegel als auch die Feinstaubkonzentration überwiegend mit dem Straßenverkehr in der Stadt einhergehen.

Ab dem späteren Abend kommt es erneut zu einem Anstieg der Feinstaubkonzentration, während der Schalldruckpegel abfällt. Als mögliche Begründung hierfür kann die unter dem Punkt Feinstaub bereits beschriebene Reaktion von Stickstoffdioxid

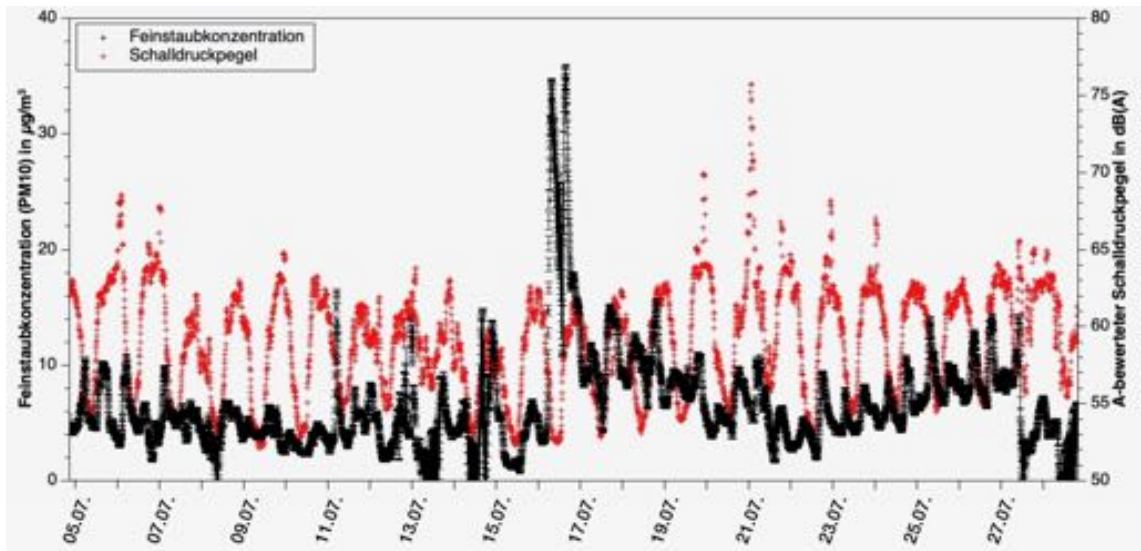


Abbildung 76: Verlauf der Feinstaubkonzentration (PM10) und des Schalldruckpegels über die gesamte Messdauer

herangezogen werden. Ohne Einwirkung der Sonnenstrahlung kann es in der Nacht auf diese Weise zu einer deutlich höheren Konzentration an NO_3 Molekülen in der Luft kommen.

Da bei den Messungen kein Sensor für die Konzentrationen von NO_2 und NO_3 eingesetzt wurde, ist eine messwertgestützte Verifizierung nicht möglich.

Gemäß den Ausführungen des Umweltbundesamtes ist darüber hinaus der Wind bei der Entwicklung der Feinstaubkonzentration im Tagesverlauf von großer Bedeutung [Umweltbundesamt, 2018, Vgl. S. 3 f].

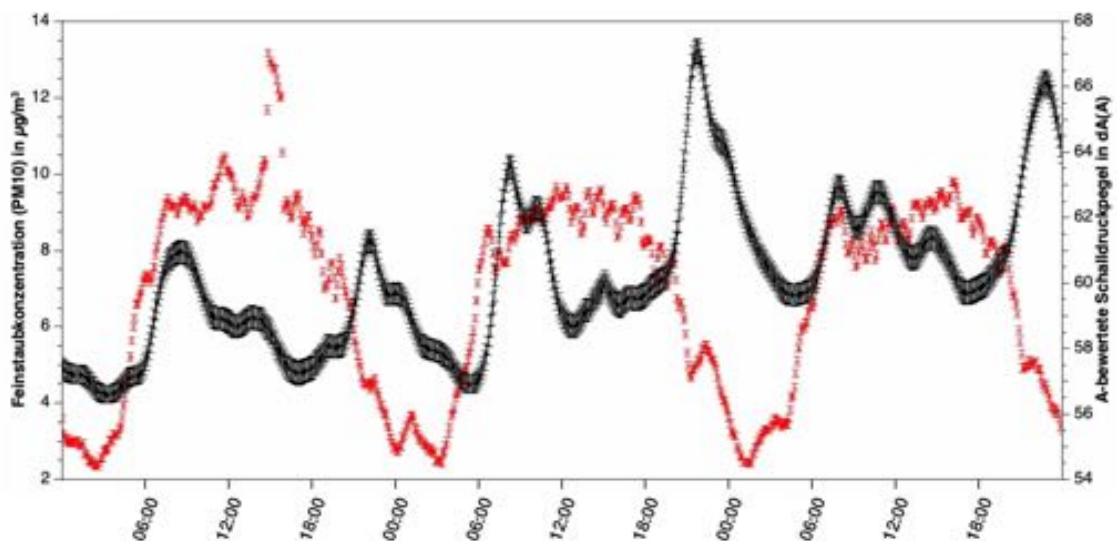


Abbildung 77: Verlauf der Feinstaubkonzentration (PM10) und des Schalldruckpegels vom 23.07. bis 25.07.2019

Zu berücksichtigen ist auch, dass die Bestimmung des Schalldruckpegels durch Wiedereinflüsse wie Wind oder Regen beeinflusst werden kann.

6.5.3 Beschränkungen bei der Auswertung

Durch den im Zuge der beschriebenen Messungen eingesetzten Messaufbau sind der Arbeit gewisse Grenzen gesetzt. Wie sich gezeigt hat, stellt besonders der Wind eine bedeutende Einflussgröße dar. So wäre es für eine ausführlichere Interpretation der Messdaten von Bedeutung, auch Daten über den Verlauf der Windrichtung und -geschwindigkeit zu erhalten.

Ebenso kann Bewölkung die Messungen von Temperatur- und Strahlungsverläufen beeinflussen. Zwar lässt sich eine starke Bewölkung in den entsprechenden Diagrammen ausmachen, schwache Bewölkungsgrade über kürzere Zeiträume sind jedoch schwer als Ursache für eventuelle Schwankungen in den Messergebnissen nachzuweisen.

Für die nähere Untersuchung im Zusammenhang mit der Feinstaubkonzentration fehlt ein Sensor zur Analyse der Gaszusammensetzung der Luft. Neben den Konzentrationen von NO_x sind unter anderem auch die Konzentrationen von CO_2 , N_2O sowie verschiedener Schwefel- und Fluorverbindungen aus Sicht einer Bildung für nachhaltige Entwicklung von Bedeutung.

Einfluss auf die Messungen hat ebenfalls der Standort aufgrund der Beschaffenheit des Messfelds und seiner direkten Umgebung. Die Wahl des Standorts war, wie zuvor bereits näher begründet, im Rahmen dieser Arbeit nicht anders möglich. Dennoch muss beim Vergleich mit anderen Messstationen der besondere Standort berücksichtigt werden.

Die Grenzen der bisher durchgeführten Messungen bieten jedoch gleichzeitig Möglichkeiten für zukünftige Projekte.

7 Möglichkeiten der Umsetzung in der Schule

Stationen zur Erhebung von Umweltdaten werden nicht selten im schulischen Bereich eingesetzt. Ausführung der Station, Ursprung sowie Erhebung der Daten variieren dabei stark.

Einfache Messstationen, wie in Abbildung 78 abgebildet, sind bereits für ca. 20 € erhältlich. Hier können beispielsweise Temperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Niederschlagsmenge bestimmt werden. Die Messwerte müssen von Lernenden oder der Lehrperson abgelesen werden, sodass mit einem vertretbaren Aufwand nur eine geringe Menge an Daten generiert wird.



Abbildung 78: Einfache Messstation

Professionelle Messstationen sind in der Lage, große Mengen an Daten innerhalb kurzer Zeit aufzuzeichnen. Jedoch verfügen aufgrund der hohen Anschaffungskosten nur wenige Schulen über solche Messstationen.

Mit dem Einzug von für den Unterricht geeigneten Mikrocontroller-Boards in die Schule eröffnen sich neue Möglichkeiten. Die bisher professionellen Messstationen vorbehaltenen Vorzüge, wie eine hohe Datenerfassungsrate und -präzision, lassen sich mit einem angemessenen Budget umsetzen. Zudem kann der Aufbau der Messstation - oder Messstationen - den Lernenden übertragen werden, sodass neben dem bisher überwiegenden Umgang mit Daten auch weitere Aspekte mit einbezogen werden können. Auf diese Weise lassen sich zum Beispiel „Kooperationsfähigkeit, Kommunikationsfähigkeit, Beurteilungsvermögen, Kreativität, Problemlösefähigkeit, Folgebewusstsein und Eigenverantwortung“ der Lernenden fördern [Mehling et al., 2017, S. 5].

Da dieser Themenbereich für die Schule somit sehr attraktiv ist, entstand innerhalb weniger Jahre eine Vielzahl an Ansätzen für alle Jahrgangsstufen sowohl durch Schulen selbst wie auch durch außerschulische Partner. Als Beispiel kann das Projekt „Eine Wetterstation mit dem Calliope mini“ genannt werden. Es entstand in Zusammenarbeit von Microsoft mit dem 21st Century Competence Center im Förderverein für Jugend und Sozialarbeit e.V..

Das Projekt ist ausgelegt für die Jahrgangsstufen drei bis sechs und setzt sich aus vier Einheiten mit einer Gesamtdauer von ca. fünf Zeitstunden zusammen. Die Größen Temperatur, Beleuchtungsstärke, Niederschlagsmenge und Windgeschwindigkeit werden dabei nacheinander gemessen [Mehling et al., 2017, S. 3 ff].

Der Schwerpunkt des Projekts liegt eindeutig im Bereich der Informatik. Zwar ist es möglich mit einem modifizierten Aufbau Umweltdaten aufzunehmen, beispielsweise

zwischen den einzelnen Projekteinheiten, eine tatsächliche Auswertung der aufgenommenen Daten ist jedoch nicht vorgesehen. Zudem wird die Idee einer Bildung für nachhaltige Entwicklung nicht aufgenommen.

Die Arbeit an und mit einer Messstation auf Basis der senseBox sowie der Umgang mit den erhobenen Daten unter der Perspektive einer umfassenden Bildung für nachhaltige Entwicklung erfordert jedoch ein fächerverbindendes Arbeiten. So werden Elemente des Unterrichtsfachs Informatik genauso benötigt wie Elemente der Fächer Physik, Biologie, Technik, Mathematik, Chemie und Geografie.

Betrachtet man die prozessbezogenen Kompetenzen im gemeinsamen Bildungsplan der Sekundarstufe I für das Fach Physik, so zeigt sich, dass im Zuge einer solchen Arbeit viele Kompetenzen erlangt oder ausgebaut werden können.

Es wird die Fähigkeit der Lernenden, „zielgerichtet [zu] experimentieren“, gefördert [BP 2016 Physik, 2016, S. 8]. Dies beinhaltet neben der Fähigkeit der Durchführung auch die Fähigkeiten zur Hypothesenbildung, Dokumentation und Auswertung [BP 2016 Physik, 2016, Vgl. S. 8].

Mit Hinblick auf die Auswertung der aufgenommenen Umweltdaten ist es den Lernenden möglich, ihre Kompetenz bezogen auf das Mathematisieren und Modellieren physikalischer Größen anhand realer Daten weiterzuentwickeln [BP 2016 Physik, 2016, Vgl. S. 8]. Auf die Wichtigkeit und zugleich Förderbedürftigkeit der Mathematisierung im Physikunterricht weisen unter anderem Kircher et al. hin [Kircher et al., 2015, Vgl. 731].

Neben der Erhebung und Auswertung der Daten ist für den Erkenntnisprozess von Bedeutung, dass die Lernenden in der Lage sind, ihre Arbeitsweise zu reflektieren sowie ihre Erkenntnisse zu „verbalisieren [...] [,] dokumentieren und präsentieren“ [BP 2016 Physik, 2016, S. 9 f]. Hier wird die Leitperspektive der Medienbildung besonders einbezogen.

Bei der Arbeit mit einer entsprechenden Messstation lässt sich die Förderung zahlreicher inhaltsbezogener Kompetenzen aus den Bereichen Optik, Akustik (beide Kap. 3.2.2), Energie (Kap. 3.2.3) und Wärmelehre (Kap. 3.3.3) erreichen [BP 2016 Physik, 2016, Vgl. S. 12 ff].

Im Fach Biologie sind die eingebundenen prozessbezogenen Kompetenzen vergleichbar mit den oben genannten Kompetenzen des Fachs Physik, werden in diesem Kontext jedoch aus biologiedidaktischer Sicht betrachtet.

Aus der Perspektive der BNE kommt besondere Bedeutung bei den inhaltlichen Kompetenzen kommt dem Basiskonzept System zu, das sich unter anderem mit unserem Ökosystem wie auch allgemein mit unserer Biosphäre beschäftigt [BP 2016 Biologie, 2016, Vgl. S. 5].

Da im Rahmen der Messungen auch Daten zu Feinstaubkonzentration, UV-Intensität und Lärmbelastung gesammelt werden können, lässt sich ein unmittelbarer Bezug

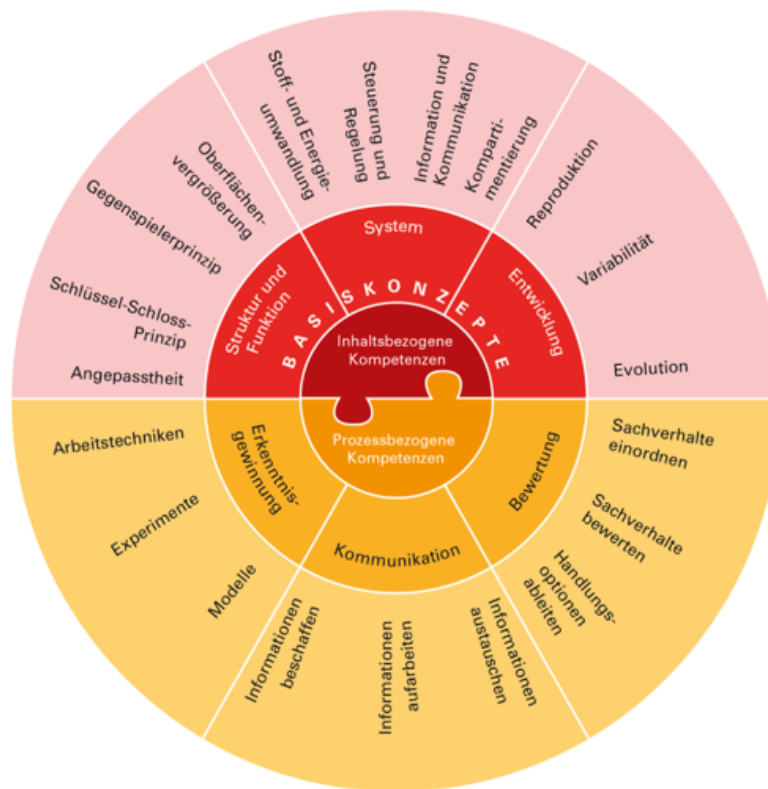


Abbildung 79: Aufteilung der inhalts- und prozessbezogenen Kompetenzen im Fach Biologie

zu der Leitperspektive Prävention und Gesundheitsförderung erreichen.

Wird der Einsatz einer Mikrocontroller-basierten Messstation im Rahmen der Schule geplant, muss neben der technischen Umsetzung der Station auch die didaktische Gestaltung betrachtet werden. Wird zunächst die „methodische Großform“ nach Hilbert Meyer gewählt, so lässt sich in Anbetracht der vorgesehenen Inhalte und Ziele die „Projektarbeit“ gegenüber dem „lehrgangsförmige[n] Unterricht“ und der „Freiarbeit“ bevorzugen [Meyer et al., 2002, S. 118 f].

Eine Projektarbeit wird, ähnlich der Freiarbeit, charakterisiert durch die „Selbstorganisation des Lernens“, ist jedoch gleichzeitig als „kooperative Lehr-Lernform“ ausgelegt [Meyer et al., 2002, S. 119]. Als ein wichtiges Merkmal einer solchen Arbeit gilt unter anderem die Relevanz des Projektgegenstands für die Gesellschaft [Gropengießer et al., 2013, Vgl. S. 235]. Die gesellschaftliche Relevanz der Förderung einer Bildung für nachhaltige Entwicklung wurde bereits in einem vorherigen Kapitel dargelegt. Für die Wahl der Projektarbeit spricht auch, dass in dieser Großform Jungen wie Mädchen gleich angesprochen werden, sodass ein Beitrag zur Schließung der „Gender-Gap“ geleistet werden kann [Kircher et al., 2015, S. 766].

An die Wahl der Großform schließt sich die Frage nach der Umlegung in den Unterrichtsturnus der Schule an. Soll die Projektarbeit im Rahmen des Regelunterrichts der beteiligten Unterrichtsfächer stattfinden, soll eine Umsetzung durch eine Arbeitsgruppe stattfinden oder im Rahmen von Projekttagen?

Alle drei Möglichkeiten besitzen Vor- und Nachteile, sind jedoch je nach Ausgangslage der einzelnen Schule denkbar. Für eine Umsetzung im Regelunterricht oder in einer AG spricht, dass die Lernenden über einen längeren Zeitraum Daten selbst aufnehmen und auswerten können. Zu Schwierigkeiten kann es hingegen durch die Lage der verfügbaren Unterrichtsstunden im Stundenplan der beteiligten Lernenden wie Lehrpersonen kommen, besonders dann, wenn die Projektarbeit mehrere Klassen - gegebenenfalls sogar verschiedene Jahrgangsstufen - umfasst. Außerdem muss seitens der betroffenen Lehrpersonen und der Schulleitung die notwendige Bereitschaft vorhanden sein.

Kritisch zu sehen ist zudem, dass im Zuge einer Arbeitsgruppe nur ein kleiner Teil der Schülerschaft einbezogen wird, die bewusst eine Teilnahme aufgrund von persönlichem Interesse und / oder Vorerfahrungen übernommen haben. Lernenden, die sich wegen fehlender Vorerfahrungen oder mangelndem Anfangsinteresse nicht beteiligen, entgeht somit die Möglichkeit der Förderung im Bereich der Bildung für nachhaltige Entwicklung.

Die Wahl eines Projekts im Rahmen von Projekttagen, idealerweise zu Beginn eines Schuljahres, eröffnet zwei verschiedenen Projektverläufe: entweder wird das Projekt nur während dieser Projektstage umgesetzt und im Anschluss wieder demontiert oder der Aufbau der Messstation wird für einen dauerhaften Betrieb konzipiert, sodass auch nach den Projekttagen eine Fortsetzung zum Beispiel im Rahmen einer Arbeitsgruppe möglich ist.

Der Vorteil des kurzzeitigen Aufbaus besteht darin, dass sich ebenfalls Lernende der Folgejahre mit der Planung und dem Aufbau einer Messstation auseinandersetzen können. Einem so konzipierten Projekt entgeht jedoch die Möglichkeit, Phänomene zu erfassen, die sich über einen längeren Zeitraum erstrecken. Eine Lösung kann darin liegen, dass ein Teil der Stationen im Rahmen der Projektstage für die Versuche der Lernenden eingesetzt wird, während ein anderer Teil dauerhaft Messungen durchführt. Dies ist zuletzt auch eine Frage des zur Verfügung gestellten Budgets. Wichtig in beiden Fällen ist eine angemessene Würdigung der Ergebnisse der Lernenden. Das bedeutet in diesem Fall, dass von den Lernenden erhobene, verwendbare Messdaten sich auch in der Phase der Auswertung wiederfinden.

In Hinblick auf die soziale Differenzierung bietet es sich an, die Lernenden als Partner oder in Gruppen arbeiten zu lassen. Dies ist mitunter von der Gruppengröße und den verfügbaren Ressourcen abhängig.

Ist es zeitorganisatorisch möglich, empfiehlt es sich, die Arbeitsphasen „arbeitsgleich“ auszulegen, sodass alle Lernenden die Möglichkeit besitzen, sich mit jedem Schritt individuell auseinanderzusetzen [Gropengießer et al., 2013, S. 238].

Als ein Zwischenfazit lässt sich festhalten, dass es eine große Zahl an Umsetzungsmöglichkeiten gibt. Welche der genannten Möglichkeiten für eine Schule am angemessensten erscheint, hängt von einer ganzen Reihe von Faktoren ab.

Unabhängig von den oben genannten Umsetzungsmöglichkeiten bietet es sich an, außerschulische Lernorte sowie Experten einzubeziehen. Ein Beispiel für einen außerschulischen Lernort könnte in diesem Zusammenhang ein Messfeld beispielsweise des Deutschen Wetterdienstes oder einer Hochschule sein. Durch den Besuch sind die Lernenden in der Lage, „Primärerfahrungen“ zu sammeln [Köhler et al., 2012, S. 175]. Der Besuch eines außerschulischen Lernorts kann, nach Köhler et al., „zu einem Erlebnis werden und für die weitere Beschäftigung mit dem Thema anregen“ [Köhler et al., 2012, S. 181]. Ebenso können außerschulische Experten die Arbeit an und mit der Messstation unterstützen. Beides trägt zu einer „Öffnung der Schule“ zu ihrer Umgebung bei [Gropengießer et al., 2013, S. 190].

Bei der Arbeit mit der Messstation und den erhobenen Daten lässt sich zudem eine Differenzierung nach Niveaustufen vornehmen. Zur Programmierung der Station können verschiedene Programmierungsumgebungen sowie Sprachen eingesetzt werden. Auf diese Weise wird beispielsweise Programmier-Einsteigerinnen und -Einsteigern ein Einstieg in die Programmierung von Mikrocontrollern mittels Blockly ermöglicht, während fortgeschrittenere Lernende durch die Arduino IDE oder andere Umgebungen angemessen gefordert und gefördert werden können. Ebenso kann im Zuge der Auswertung der Daten eine Differenzierung vorgenommen werden, indem leistungsschwächere Lernende sich zunächst an einer rein grafischen Auswertung üben können, leistungsstärkere Lernende hingegen eine zunehmende Mathematisierung vornehmen.

Auf ähnliche Weise können bei einer jahrgangsübergreifenden Projektarbeit Lernende verschiedener Jahrgänge kooperieren und sich gegenseitig fördern.

Gemäß der PISA Studie von 2015 ist der Anteil der leistungsstarken Mädchen im Bereich der Naturwissenschaften immer noch geringer als der Anteil der Jungen [OECD, 2016, Vgl. S. 4]. Insofern ist es auch Aufgabe des Physikunterrichts, Interesse an den Naturwissenschaften zu wecken und besonders Mädchen entsprechend zu fördern. Dabei ist auch die Wahl des Themas von großer Bedeutung. Nach Uhlenbusch ist ein rein technischer Ansatz einer Messwerterfassung für Mädchen wenig attraktiv [Uhlenbusch, 1992, Vgl. S. 11]. Demgegenüber kann die Auseinandersetzung mit dem Themengebiet Wetter durch den hohen Lebensweltbezug dazu dienen, ein Interesse an den Naturwissenschaften zu wecken.

Im Folgenden soll kurz der grobe Ablauf einer der zahlreichen Umsetzungsmöglichkeiten skizzenhaft dargestellt werden. Als Zielgruppe dienen die Jahrgangsstufen der Klassen 8 bis 10 der gemeinsamen Sekundarstufe I im Rahmen einer ganztägigen Projektwoche. Für Tag II ist eine Exkursion vorgesehen.

Tag I:

Am ersten Tag sollen die Lernenden zunächst eine Einführung in die Bereiche Wetter, Klima und Nachhaltigkeit erhalten. Dabei geht es weniger darum, lehrgangsmäßig Sachwissen zu vermitteln, als das Interesse der Lernenden an den Themen zu wecken. Interesse ist für den weiteren Erfolg insofern von großer Bedeutung,

als dass Interesse eine „bildende Funktion“ besitzt [Köhler et al., 2012, S. 95]. Besitzen die Lernenden ein eigenes Interesse am Gegenstand, fördert dies nicht nur die aktive Auseinandersetzung mit dem Gegenstand, sondern regt im weiteren Verlauf auch zur Reflexion an. Die Entwicklung von Interesse sollte daher beides, „Voraussetzung und Zielsetzung gelungener Lernprozesse“, sein [Köhler et al., 2012, S. 95].

Gleichzeit erlaubt diese Phase der oder den Lehrpersonen, das Vorwissen und die bestehenden Vorstellungen der Lernenden zu diesen Themenbereichen zu untersuchen.

Der weitere Verlauf des gesamten Projekts sowie der einzelnen Elemente sollte vorgestellt werden, um seitens der Lernenden für Klarheit zu sorgen. Dies beinhaltet gegebenenfalls auch die Einführung angemessener Verhaltensregeln für die anstehende Exkursion.

Tag II:

Für den zweiten Tag ist eine Exkursion an einen entsprechenden außerschulischen Lernort vorgesehen. Je nach lokalen Gegebenheiten bieten sich für die Wahl eines geeigneten Ortes entweder didaktisch ausgerichtete Lernorte wie Science Center und Schülerlabor mit entsprechender Schwerpunktsetzung oder nicht speziell didaktisch ausgelegte Orte wie beispielsweise Messstationen an [Mikelskis-Seifert, 2007, Vgl. S. 221 ff].

Handelt es sich um einen nicht speziell didaktisch ausgelegten Lernort, so ist es Aufgabe der beteiligten Lehrpersonen, für eine didaktische Ausarbeitung zu sorgen. Im Rahmen der didaktischen Rekonstruktion werden dabei auch die am Vortag ausgemachten Vorstellungen der Lernenden miteinbezogen.

Tag III:

Der Aufbau mehrerer eigener Messstationen erfolgt im Verlauf des dritten Tages. Dabei werden zunächst einfache Versuche mit den einzelnen Sensoren durchgeführt, damit sich die Lernenden mit der Arbeit an einem Mikrocontroller-Board vertraut machen können. Die Versuche sind dabei so zu wählen, dass sie sowohl für Jungen wie für Mädchen attraktiv sind. Auf Basis des forschend-entdeckenden Lernens erfolgt die Erarbeitung selbstständig, ohne explizite Führung durch die Lehrpersonen.

Der Aufbau einer eigenen Trägerkonstruktion ist im Rahmen dieses Projekts aus zeitlichen Gründen nicht möglich. Diese kann im Voraus, zum Beispiel im Technikunterricht, vorbereitet werden. Aufgrund der kurzen Laufzeit können die Stationen mittels eines Akkus betrieben werden.

Für die Durchführung der Messungen müssen durch die Lehrperson zuvor geeignete Standorte in der Nähe der Schule gefunden und entsprechend genehmigt werden. Dabei können die Standorte so gewählt werden, dass im Zuge der Auswertung möglich

ist, beispielsweise die in der Nähe einer stark befahrenen Straße erhobenen Daten mit denen des Schulgeländes oder einer verkehrsfernen Grünfläche zu vergleichen.

Tag IV:

Tag IV bietet zunächst die Möglichkeit, nochmals auf Nachhaltigkeit einzugehen. Es sollte darauf geachtet werden, dass alle vier Dimensionen der Nachhaltigkeit einbezogen werden. Auch hier bieten sich freie Arbeitsformen an.

Im zweiten Teil des Tages werden die Daten der Messstationen eingeholt. Je nach Vorkenntnissen der Lernenden erhalten sie eine Einführung in die Grundlagen der Datenauswertung. Hierbei muss der Grad der Mathematisierung den in den entsprechenden Jahrgangsstufen zu erwartenden Kompetenzen der Lernenden angepasst werden. Da Exponentialfunktionen im aktuellen Bildungsplan für das Fach Mathematik nur im E-Niveau für Klasse 10 vorgesehen sind, können diese nicht vorausgesetzt werden. Stattdessen bietet sich eine qualitative Beschreibung entsprechender Größen mit einer Erklärung der Beobachtung an.

Die Lernenden werden in Gruppen damit beauftragt, die Ergebnisse ihrer Messungen in Form einer kurzen Präsentation den anderen vorzustellen. Da für die Auswertung ohnehin Computer eingesetzt werden müssen, ist die Verwendung von PowerPoint naheliegend.

Tag V:

Zu Beginn von Tag V steht der Abschluss der Gruppenarbeit. Die Ergebnisse werden dann nacheinander vorgestellt. Durch die Erarbeitung und Präsentation des Vortrags werden der Leitperspektive der Medienbildung sowie den prozessbezogenen Kompetenzen im Bereich der Kommunikation in besonderem Umfang Rechnung getragen.


An die Präsentationen soll sich ein Vergleich sowie eine weitere Diskussion der Messergebnisse anschließen. Diese umfasst neben fachwissenschaftlichen Aspekten auch den Bezug zur Nachhaltigkeit.

Am Ende der Woche steht eine Abschlussphase, in der nach Tagen der intensiven Vertiefung in die Themenbereiche eine Besinnung stattfinden kann.

Erklärung zur Arbeit

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe und dass alle Stellen, die aus anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, eindeutig unter Angabe der Quellen als Entlehnungen kenntlich gemacht worden sind.

Im Falle der Aufbewahrung meiner Arbeit in der Bibliothek bzw. im Staatsarchiv erkläre ich mein Einverständnis, dass die Arbeit Benutzern zugänglich gemacht wird.

 24.08.2019
Ort, Datum

Julian Weingärtner

Literatur

- [Atmel, 2015] Atmel (2015). *Datenblatt des SAM D21E / SAM D21G /SAM D21J*.
- [Bauer, 2009] Bauer, M. W. (2009). The evolution of public understanding of science—discourse and comparative evidence. *Science, Technology and Society*, 14(2):221–240.
- [Baumert et al., 2001] Baumert et al. (2001). *Internationales und nationales Rahmenkonzept für die Erfassung von naturwissenschaftlicher Grundbildung in PISA*. Max-Planck-Institut für Bildungsforschung.
- [Bayer, 2019] Bayer, O. und Fock, L. (2019). *Messung von Straßenverkehrslärm 2018*. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- [Bernstein, 2014] Bernstein, H. (2014). *Messelektronik und Sensoren*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [Berufsgenossenschaft Holz Metall (BGHM), 2017] Berufsgenossenschaft Holz Metall (BGHM) (2017). *DGUV Information 209-023 - Lärm am Arbeitsplatz*. Berufsgenossenschaft Holz Metall (BGHM), Mainz.
- [Blau, 2009] Blau, M. (2009). Physikalische Grundlagen der Akustik. *Institut für Hörtechnik und Audiologie der Fachhochschule Oldenburg / Ostfriesland / Wilhelmshaven*.
- [Bonney et al., 2015] Bonney et al. (2015). Can citizen science enhance public understanding of science? *Public Understanding of Science*, 25(1):2–16.
- [Bóre, 1999] Bóre, G. (1999). *Mikrophone - Arbeitsweise und Ausführungsbeispiele*. Georg Neumann GmbH, Berlin. 4. Aufl.
- [Bosch Sensortec, 2015] Bosch Sensortec (2015). *Datenblatt des BMP280*.
- [BP 2016 Biologie, 2016] BP 2016 Biologie (2016). *Gemeinsamer Bildungsplan der Sekundarstufe I Biologie*. Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg.
- [BP 2016 Physik, 2016] BP 2016 Physik (2016). *Gemeinsamer Bildungsplan der Sekundarstufe I Physik*. Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg.
- [Brandhofer, 2017] Brandhofer, G. (2017). Coding und robotik im unterricht. *Erziehung & Unterricht*, 7/8:51 – 58.
- [Bundes-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung, 1998] Bundes-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung (1998). *Bildung für eine nachhaltige entwicklung - orientierungsrahmen. Materialien zur Bildungsplanung und zur Forschungsförderung*, Heft 69:S.
- [Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2019] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019). Drucksache 19/7510 des Deutschen Bundestags - Luftverschmutzungen durch die Binnenchiffahrt. *Bundesanzeiger*.

- [Crujeiras-Pérez, 2017] Crujeiras-Pérez, B. und Jiménez-Aleixandre, M. P. (2017). Students' progression in monitoring anomalous results obtained in inquiry-based laboratory tasks. *Research in Science Education*, 49(1):243–264.
- [Demtröder, 2013] Demtröder, W. (2013). *Experimentalphysik 1*. Springer Berlin Heidelberg.
- [Deutsche UNESCO-Kommission, 2011] Deutsche UNESCO-Kommission (2011). *UN-Dekade - Bildung für nachhaltige Entwicklung - 2005 - 2014 - Nationaler Aktionsplan für Deutschland 2011*.
- [Deutscher Wetterdienst, 2015a] Deutscher Wetterdienst (2015a). Das Messkonzept.
- [Deutscher Wetterdienst, 2015b] Deutscher Wetterdienst (2015b). Die Feinstaub- und Rußmessung.
- [Deutscher Wetterdienst, 2017] Deutscher Wetterdienst (2017). Automatische nebenamtliche Wetterstationen im DWD (Externe Ausgabe).
- [Dubs, 1995] Dubs (1995). Konstruktivismus: Einige Überlegungen aus der Sicht der Unterrichtsgestaltung. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41(6):S. 889 – 903.
- [Eid et. al., 2010] Eid et. al. (2010). *Statistik und Forschungsmethoden*. Beltz Verlag.
- [Feige et al, 2017] Feige et al (2017). Von der Alltagsvorstellung zum fachwissenschaftlichen Konzept. Schülervorstellungen diagnostizieren und weiterentwickeln. *Unterricht Chemie*, 159:2–8.
- [Fischer, 1998] Fischer, H. E. (1998). Scientific Literacy und Physiklernen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 4(2):41 – 52.
- [Franzen, 2016] Franzen, M. (2016). Open Science als wissenschaftspolitische Problemlösungsformel? In *Handbuch Wissenschaftspolitik*, pages 1–18. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [Friedrich, 2009] Friedrich, C. (2009). Alltagsvorstellungen von Schüler/innen thematisieren und umstrukturieren - gezeigt am Beispiel von natürlichen Erdölvorkommen. *Sparkling Science - Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung Österreich*.
- [Gesellschaft für Informatik, 2016] Gesellschaft für Informatik (2016). *Dagstuhl-Erklärung - Bildung in der digitalen vernetzten Welt*.
- [Grigull, 1978] Grigull, U. (1978). Das Newtonsche Abkühlungsgesetz - Bemerkungen zu einer Arbeit von Isaac Newton aus dem Jahre 1701. *Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft*, (29):7 – 31.
- [Gropengießer, 2007] Gropengießer, H. (2007). *Theorie des erfahrungsbasierten Verstehens*, pages 105 – 116. Springer Berlin Heidelberg.
- [Gropengießer et al., 2013] Gropengießer et al. (2013). *Fachdidaktik Biologie*. Aulis Verlag. 9. Aufl.

- [Grote, 2007] Grote, K.-H. (2007). *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau (German Edition)*. Springer.
- [Heidrich et al., 2018] Heidrich et al. (2018). *Future Skills: Ansätze zur Vermittlung von Data Literacy in der Hochschulbildung*. Zenodo.
- [Heinrichs, 2014] Heinrichs, H. und Michelsen, G. (2014). *Nachhaltigkeitswissenschaften*. Springer-Verlag GmbH.
- [Hopwood et al., 2005] Hopwood et al. (2005). Sustainable development: mapping different approaches. *Sustainable Development*, 13(1):38–52.
- [Kircher et al., 2015] Kircher et al. (2015). *Physikdidaktik*. Springer Berlin Heidelberg.
- [Klose, 2016] Klose, B. (2016). *Meteorologie*. Springer Berlin Heidelberg.
- [Köhler et al., 2012] Köhler et al. (2012). *Fachdidaktik: Biologie-Didaktik*. Cornelsen Vlg Scriptor. 7. Aufl.
- [Kuchling, 2011] Kuchling, H. (2011). *Taschenbuch der Physik*. Carl Hanser Verlag München. 20. Aufl.
- [Kuttler, 2013] Kuttler, W. (2013). *Klimatologie*. UTB GmbH.
- [Laquai, 2018] Laquai, B. (2018). *Kompensation des Feuchte-Effekts bei Low-Cost Feinstaubsensoren-Sensoren nach dem Streulichtverfahren*. Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik.
- [Maxim Integrated, 2016] Maxim Integrated (2016). *Datenblatt des MAX9814*.
- [Mehling et al., 2017] Mehling et al. (2017). *Eine Wetterstation mit dem Calliope mini*. Code your Life, 21st Century Competence Center im fjs e.V.
- [Meschede, 2015] Meschede, D. (2015). *Gerthsen Physik*. Springer Berlin Heidelberg.
- [Meyer et al., 2002] Meyer et al. (2002). *Einführung in die Schulpädagogik*. Cornelsen Vlg Scriptor. 2. Aufl.
- [Mikelskis-Seifert, 2007] Mikelskis-Seifert, S. (2007). *Physik-Methodik*. Cornelsen Vlg Scriptor.
- [Miller-Rushing et al., 2012] Miller-Rushing et al. (2012). The history of public participation in ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(6):285–290.
- [Nova Fitness, 2015] Nova Fitness (2015). *Datenblatt des SDS011*.
- [OECD, 2016] OECD (2016). *PISA 2015 - Ergebnisse im Fokus*.
- [Prenzel et al., 2008] Prenzel et al. (2008). *PISA 2006 in Deutschland - Die Kompetenzen der Jugendlichen im dritten Ländervergleich*. Waxmann.

- [Ridsdale et al., 2015] Ridsdale et al. (2015). *Strategies and Best Practices for Data Literacy Education - Knowledge Synthesis Report*. Dalhousie University.
- [Rollins et al., 2012] Rollins et al. (2012). Evidence for nox control over nighttime soa formation. *Science*, 337(6099):1210–1212.
- [Schecker et al., 2018] Schecker et al. (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Springer Berlin Heidelberg.
- [Schleyer et al., 2013] Schleyer et al. (2013). *Das Luftmessnetz des Umweltbundesamtes*. Umweltbundesamt.
- [Slama, 2018] Slama, S. (2018). *Experimentalphysik kompakt für Naturwissenschaftler*. Springer Berlin Heidelberg.
- [Soneja et al, 2014] Soneja et al (2014). Humidity and gravimetric equivalency adjustments for nephelometer-based particulate matter measurements of emissions from solid biomass fuel use in cookstoves. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(6):6400–6416.
- [Stadlmayr, 2018] Stadlmayr, W. (2018). *Thermodynamik – nicht nur für Nerds*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [Stoltenberg, 2005] Stoltenberg, U. (2005). *Bildung für Nachhaltige Entwicklung aktuelle Herausforderungen für die außerschulische Arbeit*. Bundestagung der ANU.
- [Straff, 2017] Straff, W. (2017). Die Bedeutung der Luftqualität für Menschen mit COPD. *Umwelt und Mensch – Informationsdienst*.
- [TAOS, 2011] TAOS (2011). *Datenblatt des TSL45315*.
- [Texas Instruments, 2018] Texas Instruments (2018). *Datenblatt des HDC1080*.
- [Tian et al., 2011] Tian et al. (2011). Reconstruction of a 1,910-y-long locust series reveals consistent associations with climate fluctuations in china. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(35):14521–14526.
- [Tkotz, 2014] Tkotz, K. (2014). *Fachkunde Elektrotechnik*. Europa Lehrmittel Verlag, 29. aufl. edition.
- [Uhlenbusch, 1992] Uhlenbusch, L. (1992). *Mädchenfreundlicher Physikunterricht*. Lang, Peter GmbH.
- [Umweltbundesamt, 2018] Umweltbundesamt (2018). *Zum Jahreswechsel: Wenn die Luft zum Schneiden ist*. Umweltbundesamt.
- [Vereinigte Nationen, 2015] Vereinigte Nationen (2015). Millenniums-entwicklungsziele - bericht 2015.
- [Vereinte Nationen, 1992] Vereinte Nationen (1992). Agenda 21 - Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung.

[Vereinte Nationen, Ausschuss für Umweltpolitik, 2005] Vereinte Nationen, Ausschuss für Umweltpolitik (2005). *UNECE-Strategie über die Bildung für nachhaltige Entwicklung*.

[Vogel, 2012] Vogel, M. (2012). Wächter der Luft. *Physik Journal*.

[Wilkerson et al., 2018] Wilkerson et al. (2018). Data transformations: Restructuring data for inquiry in a simulation and data analysis environment.

[Witte, 2018] Witte, V. (2018). senseBox - Eine Handreichung für Lehrkräfte.

Abbildungsverzeichnis

1	Verursacher der Emissionen von Feinstaub in Bayern	5
2	Feinstaubbelastung an Silvester	6
3	Sigma-2 Sedimentationsammler	8
4	Feinstaubmessung an der Messstation Karlsruhe Reinhold-Frank-Straße	8
5	Feinstaubkonzentration (PM25) Reinhold-Frank-Straße	9
6	Feinstaubkonzentration (PM10) Reinhold-Frank-Straße	9
7	Handpyrometer	13
8	PIR-Sensor auf Platine	13
9	klassische Wetterhütte	14
10	Wetterhütte für automatischen Sensor	14
11	Modelldarstellung einer elektromagnetischen Welle	17
12	Spektrum elektromagnetischer Strahlung	18
13	Spektrum der Sonne	20
14	Ausschnitt des Sonnenspektrum mit Fraunhoferlinien	20
15	Tagesgang der Energieflussdichten	21
16	Sonnenstandsdiagramm für Karlsruhe	21
17	Pyrheliometer	22
18	U-Rohr	26
19	U-Rohr zur Druckmessung	26
20	Aneroidbarometer	28
21	Hoch- und Tiefdruckgebiet	28
22	Luftdruckkarte vom 28.07.2019	29
23	Filter für die Gewichtung von Schalldruckpegeln	32
24	Kohlemikrofon und Elektretmikrofon	33
25	Aufbau eines Kondensatormikrofons	33
26	Messstation in der Reinhold-Frank-Straße	34
27	Haarhygrometer	37
28	Prognose des Club of Rome bezüglich Bevölkerungszahl und Lebens- standard	40
29	Millennium-Entwicklungsziele der Vereinten Nationen	42
30	Ausrichtung verschiedener Nachhaltigkeitskonzepte	43
31	Nachhaltigkeitsviereck nach Stoltenberg und Michelsen	44
32	Leitperspektiven im Bildungsplan 2016	47
33	Mikrocontroller-Boards und Einplatinencomputer	48
34	Phasen der data transformation	49
35	Zeichnung: Schülervorstellungen	52
36	Konfrontationsstrategie nach Scott und Driver	55
37	senseBox:edu-Set	58
38	openSenseMap	59
39	senseBox Gesamtübersicht	60
40	Sensor-Board 1	61
41	Blockdiagramm des HDC1080	61
42	Empfindlichkeitskurve des TSL45315 - Wellenlänge	62
43	Empfindlichkeitskurve des TSL45315 - Winkel	62
44	Blockdiagramm des MAX9814	63
45	Umrechnung der Ausgangsspannung des MAX9814	64

46	Geöffneter SDS011 Feinstaubsensor	65
47	Blockdiagramm der Messstation	65
48	Für die Messungen gewählter Standort	66
49	Gehäusedeckel mit befestigtem Sensor-Board 2	67
50	Messstation in Betrieb	70
51	Temperaturverlauf über die gesamte Messdauer	71
52	Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über die gesamte Messdauer	71
53	Verlauf der Beleuchtungsstärke über die gesamte Messdauer	72
54	Verlauf der UV(A)-Intensität über die gesamte Messdauer	73
55	Verlauf des Luftdrucks über die gesamte Messdauer	73
56	Verlauf der Feinstaubkonzentration (PM25) über die gesamte Messdauer	74
57	Verlauf der Feinstaubkonzentration (PM10) über die gesamte Messdauer	75
58	Verlauf des A-bewerteten Schalldruckpegels über die gesamte Messdauer	75
59	Abkühlungskurven für die Nächte vom 23.07. bis 26.07.2019	76
60	Temperaturverlauf vom 25.07. bis 27.07.2019	77
61	Erwärmungskurve für die Tage vom 23.07. bis 25.07.2019	78
62	Verlauf von Temperatur und Beleuchtungsstärke vom 23.07. bis 25.07.2019	79
63	Verlauf der Beleuchtungsstärke am 23.07.2019	80
64	Lufttemperatur über der integrierten Beleuchtungsstärke am 23.07.2019	80
65	Verlauf der Beleuchtungsstärke und UV-Intensität vom 23.07. bis 25.07.2019	81
66	UV-Intensität über der Beleuchtungsstärke vom 23.07. bis 25.07.2019	82
67	Verlauf der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit vom 23.07. bis 25.07.2019	83
68	Relative Luftfeuchtigkeit über der Temperatur am 23.07.2019	83
69	Verlauf der Temperatur und absoluten Luftfeuchtigkeit vom 23.07. bis 25.07.2019	84
70	Berechnete absolute Luftfeuchtigkeit über der Temperatur am 23.07.2019 zwischen 07:14 und 09:14	85
71	Verlauf der Temperatur und des Luftdrucks über die gesamte Messdauer	85
72	Verlauf der Feinstaubkonzentration (PM10) und der relativen Luftfeuchtigkeit über die gesamte Messdauer	86
73	Feinstaubkonzentration (PM10) über der relativen Luftfeuchtigkeit am 16.07. und 17.07.2019	87
74	Gleitendes Mittel der Feinstaubkonzentration (PM10) über die gesamte Messdauer	88
75	PM25-Konzentration über der PM 10 Konzentration	89
76	Verlauf der Feinstaubkonzentration (PM10) und des Schalldruckpegels über die gesamte Messdauer	90
77	Verlauf der Feinstaubkonzentration (PM10) und des Schalldruckpegels vom 23.07. bis 25.07.2019	90
78	Einfache Messstation	92
79	Aufteilung der inhalts- und prozessbezogenen Kompetenzen im Fach Biologie	94

Abbildungsquellen

Alle Bildquellen wurden, sofern nicht anders angegeben, zuletzt am 24.08.2019 aufgerufen. Bei den Abbildungen 7, 8, 24, 45, 47 - 77 handelt es sich um eigene Abbildungen.

[Abbildung 1] <https://www.stmuv.bayern.de/themen/luftreinhaltung/verunreinigungen/feinstaub/emissionenpm10.htm>

[Abbildung 2] siehe Umweltbundesamt, 20018, S. 4

[Abbildung 3] Deutscher Wetterdienst (2017). Messen - Bewerten - Beraten, Luftqualität unter der Lupe. S. 12

[Abbildung 4] https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/laerm-und-erschuetterungen/messung?station=street_Karlsruhe&aggregation=mom

[Abbildung 5] <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/luft/messwerte-immissionswerte#diagramm> (Aufruf: 02.08.2019)

[Abbildung 6] <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/luft/messwerte-immissionswerte#diagramm> (Aufruf: 02.08.2019)

[Abbildung 9] http://www.wetterglas.de/wht_1b.htm

[Abbildung 10] <https://www.wind-lexikon.de/cms/lexikon/104-lexikon-t/351-thermometerhuette.html>

[Abbildung 11] siehe Meschede, 2015, S. 553

[Abbildung 12] https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum#/media/Datei:Electromagnetic_spectrum_-de_c.svg

[Abbildung 13] siehe Klose, 2016, S. 206

[Abbildung 14] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fraunhofer_lines_DE.svg

[Abbildung 15] siehe Klose, 2016, S. 224

[Abbildung 16] <http://www.renewable-energy-concepts.com/german/sonnenenergie/basiswissen-solarenergie/verschattung-solarmodul/sonnenstand/diagramm-DE-7-6189-Karlsruhe.html>

[Abbildung 17] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DR01_pyrheliometer_1.jpg

[Abbildung 18] siehe Meschede, 2015, S. 103

[Abbildung 19] siehe Meschede, 2015, S. 106

[Abbildung 20] https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Design_of_aneroid_barometer_a-neroid_cell.JPG

[Abbildung 21] http://www.gerd-pfeffer.de/zirk_druckgebiete.html

[Abbildung 22] <https://www.wetterkontor.de/profikarten/gfs/europa/luftdruck.asp>

- [Abbildung 23] <http://www.lindos.co.uk/cgi-bin/FlexiData.cgi?SOURCE=Articles&VIEW=full&id=2>
- [Abbildung 25] siehe Bóre, S. 32
- [Abbildung 26] https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/laerm-und-erschuetterung-en/messung?station=street_Karlsruhe&aggregation=mom
- [Abbildung 27] https://www.youtube.com/watch?v=hEoYVjXv_KA
- [Abbildung 28] siehe Heinrich/Michelsen, S. 8
- [Abbildung 29] <https://www.un.org/millenniumgoals/maternal.shtml>
- [Abbildung 30] siehe Hopwood et al., S. 41
- [Abbildung 31] siehe Stoltenberg (ANU), S. 12
- [Abbildung 32] eigene Abbildung, nach dem Bildungsplan 2016, Physik
- [Abbildung 33.1] <https://www.elektor.de/arduino-uno-r3>
- [Abbildung 33.2] <https://www.elektor.de/bbc-micro-bit>
- [Abbildung 33.3] <https://www.elektor.de/raspberry-pi-3-model-b>
- [Abbildung 34] siehe Wilkerson et al., S. 1383
- [Abbildung 35] Dreesmann, D. (2012) Evolutionsbiologie. Springer Berlin Heidelberg. S. 26
- [Abbildung 36] siehe Friedrich, S. 5
- [Abbildung 37] <https://sensebox.de/de/products>
- [Abbildung 38] <https://opensensemap.org> (Abruf: 08.08.2019)
- [Abbildung 39] https://sensebox.de/docs/senseBox_Karten.pdf
- [Abbildung 40] <https://shop.watterott.com/senseBox-HDC1080>
- [Abbildung 41] siehe Datenblatt des HDC1080, S. 1
- [Abbildung 42] siehe Datenblatt des TSL45315, S. 5
- [Abbildung 43] siehe Datenblatt des TSL45315, S. 5
- [Abbildung 44] siehe Datenblatt des MAX9814, S. 11
- [Abbildung 46] <https://aqicn.org/sensor/sds011/de/>
- [Abbildung 78] <https://www.betzold.de/prod/82115/>
- [Abbildung 79] siehe Bildungsplan 2016, Biologie

Internetquellen

Alle Internetquellen wurden zuletzt am 24.08.2019 abgerufen. Nach Vorgabe des Informationsblatts zur Anmeldung der wissenschaftlichen Arbeit wird jeweils die erste Seite der Internetquelle der Arbeit angehängt.

[adafruit.com] <https://learn.adafruit.com/adafruit-microphone-amplifier-breakout/measuring-sound-levels>

[bpd.de: Geschichte der Bevölkerungswissenschaft] <http://www.bpb.de/izpb/55917/geschichte-der-bevoelkerungswissenschaft?p=all>

[dkrz.de: Feinstaub] <https://www.dkrz.de/kommunikation/galerie/Vis/regional/feinstaub>

[gesetze-im-internet.de: 39. BImSchV] http://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/_3.html

[gesetze-im-internet.de: BImSchG] <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/BJNR007210974.html>

[gesetze-im-internet.de: BImSchG § 47] <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/BJNR007210974.html#BJNR007210974BJNG011004360>

[hbm.com: Drucksensoren] <https://www.hbm.com/en/7646/what-is-a-pressure-sensor/>

[lindos.co.uk] <http://www.lindos.co.uk/cgi-bin/FlexiData.cgi?SOURCE=Articles&VIEW=full&id=2>

[nachhaltigkeit.info: Rio-Konferenz] https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/agenda_21_dokumente_985.htm

[opensensemap.org] <https://opensensemap.org>

[photonikforschung.de] <https://www.photonikforschung.de/service/nachrichten/detailansicht/die-senseBox-vom-schuelerlabor-zum-start-up.html>

[phylo.ca] <https://phylo.cs.mcgill.ca>

[proplanta.de: Regen] https://www.proplanta.de/Wetter/Karlsruhe_Rueckblick_27-07-2019_Wetter.html

[rechneronline.de] <https://rechneronline.de/physik/luftdruck-hoehe.php>

[senseBox.de: Awards] <https://senseBox.de/de/awards>

[spektrum.de: Druck] <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/druck/3421>

[stadt-koeln.de] <https://www.stadt-koeln.de/artikel/03284/index.html>

[stmuv.bayern.de: Feinstaub] <https://www.stmuv.bayern.de/themen/luftreinhaltung/verunreinigungen/feinstaub/emissionenpm10.htm>

[unesco.de: BNE] <https://www.unesco.de/bildung/hochwertige-bildung/bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung/un-dekade-bildung-fuer-nachhaltige>



URL: <http://www.bpb.de/lzpb/55917/geschichte-der-bevoelkerungswissenschaft>

Plus Informationen zur politischen Bildung / Bevölkerungsentwicklung / Geschichte der Bevölkerungswissenschaft

23.12.2011 | Von: **Herwig Birg** ▾

Herwig Birg

Zur Person

Prof. Dr. rer. pol. habil. Herwig Birg war von 1981 bis 2004 Leiter des Lehrstuhls für Bevölkerungswissenschaft und Geschäftsführender Direktor des Instituts für Bevölkerungsforschung und Sozialpolitik (IBS) der Universität Bielefeld. Seine Hauptforschungsgebiete sind Bevölkerungstheorie, Fertilitätstheorie, Migrationstheorie, Mortalitätsanalyse und Lebenserwartung, Bevölkerungsprognose- und Simulationsmodelle sowie Bevölkerungsprojektionen. Kontakt: herwig.birg@uni-bielefeld.de Homepage: www.herwig-birg.de

Geschichte der Bevölkerungswissenschaft

Die Bevölkerungswissenschaft nahm ihren Aufschwung im 18. Jahrhundert mit Kontroversen um die Tragfähigkeit der Erde. Zum ersten Mal wurde der Zusammenhang zwischen der Höhe der Geburtenrate und materiellen Lebensbedingungen diskutiert. Im 19. Jahrhundert dominierten biologische und ökonomische Leitideen, Mitte des 20. Jahrhunderts empirisch-statistische.

Einleitung

Die Bevölkerungswissenschaft besteht aus vier großen Fachgebieten, aus der Theorie der Fertilität, der Mortalität und der Migration sowie aus Theorien, die die Struktur des Bevölkerungsbestandes zum Gegenstand haben. Die moderne Bevölkerungswissenschaft ist von der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen mehreren Fachdisziplinen geprägt. Aus der Zusammenarbeit entstehen Teildisziplinen wie etwa Bevölkerungsökonomie, Bevölkerungssoziologie, Bevölkerungsstatistik, Bevölkerungsmathematik, Bevölkerungsgeografie, historische Demografie, medizinische Demografie und Bevölkerungsökologie.

Die Anfänge der Bevölkerungswissenschaft reichen wie die vieler anderer Wissenschaften bis in die griechische und römische Antike zurück. Auch die modern anmutenden Diskussionen um den Bevölkerungsrückgang durch die niedrige Fertilität einschließlich ihrer Interpretation als egoistisches Verhalten der jungen Generationen sind nicht erst in unserer Zeit aufgetreten, wie das folgende Zitat des griechischen Historikers Polybios aus dem 2. Jahrhundert vor Christus zeigt:

In der Zeit, in der wir leben, ist in ganz Griechenland die Zahl der Kinder, überhaupt der Bevölkerung in einem Maße zurückgegangen, dass die Städte verödet sind und das Land brachliegt, obwohl wir weder unter Kriegen von längerer Dauer noch unter Seuchen zu leiden hatten [...] weil die Menschen der Großmannsucht, der Habgier und dem Leichtsinne verfallen sind, weder mehr heiraten noch, wenn sie es tun, die Kinder, die ihnen geboren werden, großziehen wollen, sondern meist nur eins oder zwei, damit sie im Luxus aufwachsen und ungeteilt den Reichtum ihrer Eltern erben, nur deshalb hat das Übel schnell und unvermerkt um sich gegriffen. Wenn nur ein oder zwei Kinder da sind und von diesen das eine der Krieg, das andere eine Krankheit hinwegrafft, bleibt natürlich Haus und Hof verwaist zurück, und die Städte, ebenso wie ein Bienenschwarm, werden



Feinstaub aus Schiffsemissionen

Regionales Chemietransportmodell: Schadstoffe aus Schiffsemissionen

Die Ausbreitung von Schadstoffen in der Atmosphäre kann mit Chemietransportmodellen simuliert werden. Das Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) setzt für seine Untersuchungen für Europa das „Community Multiscale Air Quality“ Modellsystem (CMAQ) ein. Als Eingangsdaten werden dabei mit dem regionalen Atmosphärenmodell COSMO-CLM berechnete meteorologische Felder verwendet, welches wiederum mit NCEP Re-Analysedaten (durch spektrales „Nudging“) angetrieben wurde. Die verwendeten anthropogenen Emissionen wurden mit dem „SMOKE for Europe“ Emissionsmodell (Bieser et al., 2011) berechnet.

Besonderes Augenmerk liegt auf der Ausbreitung von Schiffsemissionen im Nord- und Ostseeraum. Dabei basieren die verwendeten Schiffsemissionen auf individuellen Schiffsbewegungen sowie Informationen über Schiffsmotor und verwendeten Treibstoff. Für die Schadstoffkonzentrationen und ihre Ausbreitung spielt die Gas-Partikel-Umwandlung in der Atmosphäre eine große Rolle. Gasförmige Schwefeldioxid- (SO₂) und Stickoxid-Emissionen (NO_x) von Schiffen werden besonders im Sommer in Sulfat- (SO₄) und Nitrat-Aerosole (NO₃) (Partikel, sog. Feinstaub) umgewandelt und können dann über viele hundert Kilometer landeinwärts transportiert werden.





Bundesministerium
der Justiz und
für Verbraucherschutz

Bundesamt
für Justiz

[zurück](#)

[weiter](#)

[Nichtamtliches Inhaltsverzeichnis](#)

**Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-
Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und
Emissionshöchstmengen - 39. BImSchV)**
**§ 3 Immissionsgrenzwerte und Alarmschwelle für Stickstoffdioxid (NO₂);
kritischer Wert für Stickstoffoxide (NO_x)**

(1) Zum Schutz der menschlichen Gesundheit beträgt der über eine volle Stunde gemittelte Immissionsgrenzwert für Stickstoffdioxid (NO₂)

200 Mikrogramm pro Kubikmeter

bei 18 zugelassenen Überschreitungen im Kalenderjahr.

(2) Zum Schutz der menschlichen Gesundheit beträgt der über ein Kalenderjahr gemittelte Immissionsgrenzwert für Stickstoffdioxid (NO₂)

40 Mikrogramm pro Kubikmeter.

(3) Die Alarmschwelle für Stickstoffdioxid (NO₂) beträgt über eine volle Stunde gemittelt

400 Mikrogramm pro Kubikmeter,

gemessen an drei aufeinanderfolgenden Stunden an den von den zuständigen Behörden gemäß Anlage 3 eingerichteten Probenahmestellen, die für die Luftqualität in einem Bereich von mindestens 100 Quadratkilometern oder im gesamten Gebiet oder Ballungsraum repräsentativ sind; maßgebend ist die kleinste dieser Flächen.

(4) Zum Schutz der Vegetation beträgt der über ein Kalenderjahr gemittelte kritische Wert für Stickstoffoxide (NO_x)

30 Mikrogramm pro Kubikmeter.

[zum Seitenanfang](#)

[Datenschutz](#)

[Seite ausdrucken](#)



Bundesministerium
der Justiz und
für Verbraucherschutz

Bundesamt
für Justiz

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG)

[Nichtamtliches Inhaltsverzeichnis](#)

BImSchG

Ausfertigungsdatum: 15.03.1974

Volltext:

"Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 8. April 2019 (BGBl. I S. 432) geändert worden ist"

Stand: Neugefasst durch Bek. v. 17.5.2013 | 1274;
zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 8.4.2019 | 432

Näheres zur Standangabe finden Sie im Menü unter [hinzusis](#)

Fußnote

*** Textschwelle Geltung der 1.4.2012 ***
 *** Änderungen aufgrund Einigkeit vgl. 55 St. 10a, 67a u. 74 ***
 *** Amtlicher Hinweis des Normgebers auf BG-Recht:
 Umsetzung der
 BImSchG 16/2019 (CELEX Nr. 32019L0054) vgl. G v. 31.7.2019 | 2019 ***

[Nichtamtliches Inhaltsverzeichnis](#)

Inhaltsübersicht

Erster Teil

Allgemeine Vorschriften

- § 1 Zweck des Gesetzes
- § 2 Geltungsbereich
- § 3 Begriffsbestimmungen

Zweiter Teil

Errichtung und Betrieb von Anlagen

Erster Abschnitt

Genehmigungsbedürftige Anlagen

- § 4 Genehmigung
- § 5 Pflichten der Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagen

+49 6151 8030



Definition of a Pressure Sensor

In this article we explain the working principles and different types of pressure transducers and pressure sensors.

Service & Support | Sensor and Data Acquisition Articles | What is a Pressure Sensor?



What is a Pressure Sensor?

- **Definition of Pressure as a Measured Quantity:** Pressure is defined as the applied force by a liquid or gas on a surface and it is usually measured in units of force per unit of surface area. Common units are Pascal (Pa), bar (bar), N/mm² or psi (pounds per square inch).
- **Definition of a Sensor:** A sensor is a device that measures a physical quantity and translates it to a signal. The quantity can be for instance temperature, length, force, or – of course – pressure. The signal is in most cases electrical but can also be optical.
- **Definition of a Pressure Sensor:** Therefore, a **pressure sensor** is an instrument consisting of a pressure sensitive element to determine the actual pressure applied to the cell (using different working principles) and some components to convert this information into an output signal.

Working Principles of Pressure Sensors

There is a variety of different technologies used within pressure sensors to provide accurate results. The following section will highlight some of these:

- **Strain gauge based pressure sensors** also use a pressure sensitive element where metal strain gauges are glued on or thin film gauges are applied on by sputtering. This

Measurements in Detail

A-weighting in detail

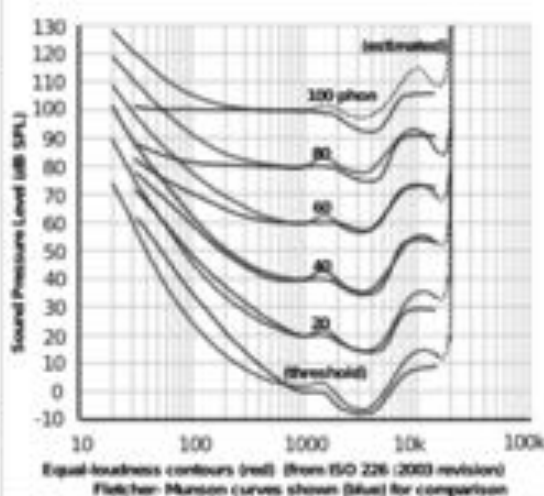
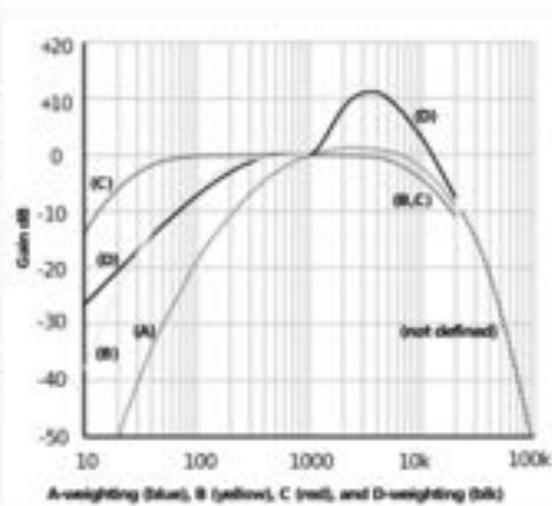
[Return to article list](#)

A, B, C and D weighting

The A-weighting curve is one of a set of four, defined in various standards relating to sound level measurement as A, B, C, and D. Curves A, B and C are for low, medium and high loudness sounds. D is specifically for measuring very loud aircraft noise.

The A-weighting curve is based on the 40-phon equal-loudness contour for typical human hearing, being a rough approximation of that curve after inversion to indicate gain rather than level. Although our absolute threshold of hearing is around 0 Phons, this is a very quiet level indeed, and only realised in specially isolated conditions. 40 phon is the sort of level likely to exist in a normal quiet environment.

While early experimenters had to approximate roughly in order that the A-weighting curve could be realised economically in a filter that did not need too many components, today we could easily realise the true curve. This has not been done, but a revision is arguably overdue, especially as the A-weighting curve is not defined above 20kHz and fails to reflect the steep cut-off in our hearing above 15kHz which is also not made clear by the equal loudness contours, which aim to quantify only our in-band response. Unless the A-weighting filter is used in conjunction with a band-limiting filter cutting off above 20kHz, it cannot be used with any validity for loudness measurement, since ultrasonic noise from many sources can affect the measurement – a fact that is usually overlooked. More damning though, is the fact that equal loudness contours are now known to be invalid for noise measurement, even though this what sound level meters incorporating A-weighting are mostly used for! The later ITU-R weighting curve should therefore be considered for all noise measurement purposes, though this is currently only used in broadcasting and professional audio, and is not usually incorporated into sound level meters.



LEXIKON DER NACHHALTIGKEIT

2000-2015 Konzept und Betreiber

Aachener Stiftung Kathy Beys



Industrie- und Handelskammer
Nürnberg für Mittelfranken



Industrie- und Handelskammer
Nürnberg für Mittelfranken

Agenda 21 Ziele und Dokumente

Die auf der Rio-Konferenz verabschiedete Agenda 21 ist in vier Bereiche mit insgesamt 40 Kapiteln unterteilt. Dabei wird auf soziale, ökologische und ökonomische Ziele ein besonderes Augenmerk gelegt.

Die 40 Kapitel lauten:

1. Präambel zur Agenda 21

Teil I. Soziale und wirtschaftliche Dimension

2. Internationale Zusammenarbeit zur Beschleunigung einer nachhaltigen Entwicklung
3. Kampf gegen die Armut
4. Veränderung des Konsumverhaltens
5. Bevölkerung und nachhaltige Entwicklung
6. Schutz und Förderung der menschlichen Gesundheit
7. Nachhaltige menschliche Siedlungsformen
8. Integration von Umwelt und Entwicklung in Entscheidungsfindung

Teil II. Erhaltung und Bewirtschaftung der Ressourcen für die Entwicklung

9. Schutz der Atmosphäre
10. Nachhaltige Bewirtschaftung von Bodenn Ressourcen
11. Bekämpfung der Entwaldung
12. Bekämpfung der Wüstenbildung und der Dürren
13. Nachhaltige Bewirtschaftung von Berggebieten
14. Förderung nachhaltiger Landwirtschaft und ländlicher Entwicklung
15. Erhaltung der biologischen Vielfalt
16. Umweltverträgliche Nutzung der Biotechnologie
17. Schutz der Ozeane
18. Schutz der Güte und Menge der Süßwasserressourcen
19. Umweltverträglicher Umgang mit toxischen Chemikalien
20. Umweltverträgliche Entsorgung gewerblicher Abfälle
21. Umweltverträglicher Umgang mit festen Abfällen
22. Sicherer und umweltverträglicher Umgang mit radioaktiven Abfällen



DIE SENSEBOX: VOM SCHÜLERLABOR ZUM START-UP

Open Innovation
05.04.2019

Erstellt von Volker Bombien

Eine der Erfolgsgeschichten der vergangenen Jahre für moderne und bürgernahe Wissenschaftsarbeit ist die senseBox. Das Projekt ist außerdem ein schönes Beispiel dafür, wie das BMBF innovative Projekte zum richtigen Zeitpunkt erfolgreich fördert und begleitet.



*Hier entstand die senseBox,
am Institut für
Geoinformatik an der Uni
Münster. Bild: Volker
Bombien*

WHAT'S PHYLO ALL ABOUT?

The comparison of the genomes from various species is one of the most fundamental and powerful technique in molecular Biology. It helps us to decipher our DNA and identify new genes. Though it may appear to be just a game, Phylo is actually a framework for harnessing the computing power of mankind to solve the Multiple Sequence Alignment problem.

WHAT IS A MULTIPLE SEQUENCE ALIGNMENT?

A sequence alignment is a way of arranging the sequences of DNA, RNA or protein to identify regions of similarity. These similarities may be consequences of functional, structural, or evolutionary relationships between the sequences. From such an alignment, biologists may infer shared evolutionary origins, identify functionally important sites, and illustrate mutation events. More importantly, biologists can trace the source of certain genetic diseases.

THE PROBLEM

Traditionally, multiple sequence alignment algorithms use computationally complex heuristics to align the sequences. Unfortunately, the use of heuristics do not guarantee global optimization as it would be prohibitively computationally expensive to achieve an optimal alignment. This is due in part to the sheer size of the genome, which consists of roughly three billion base pairs, and the increasing computational complexity resulting from each additional sequence in an alignment.

OUR APPROACH

Humans have evolved to recognize patterns and solve visual problems efficiently. By abstracting multiple sequence alignment to manipulating patterns consisting of coloured shapes, we have adapted the problem to

Samstag, 24.08.2019 | 17:25:01

Kontakt | Newsletter | Anmelden | Login



Suche Weiter

Aktuelle Wetterinformationen von über 17.000 Orten aus Deutschland

- Nachrichten
- Markt & Preis
- Agrarwetter
- Pflanzenschutz & Sorten
- Veranstaltungen
- Agrifinder
- Stellenmarkt
- Marktplatz
- Landtechnik-Börse
- Futtermittel
- Infothek
- Maps

Deutschland Städte D Österreich Städte AT Schweiz Städte CH Agrarwetter Warnmeldungen Wetterdaten Archive Rückblick Spezial
 Startseite » Wetter Deutschland » Karlsruhe

Wetterrückblick: Karlsruhe am 27.07.2019

Karlsruhe Wetterrückblick

Datum	27.07.2019
Uhrzeit	18:00 Uhr
Temperatur	26,7 °C
Luftdruck	1001,9 hPa
Wetterzustand	
relative Feuchte	57,6 %
Taupunkt	13,7 °C
Sichtweite	45km
Windrichtung	
Windgeschwindigkeit	10,8 km/h

Wettervorhersage

24.08.2019
10-Tage-Wettervorhersage für Deutschland vom 24.08.2019

Öffentlicht - Am Montag hebt die Wolkg. entlang von Rhein und Elbe off vorzug. Im Tagesverlauf bewogen in der Osthälfte einzelne und zum Teil kräftige Schauern und Gewitter, lokal mit heftigen Regengüssen und Hagel. >

Wetterrückblick für Karlsruhe am 27.07.1

Datum	27.07.2019	Datum	
Uhrzeit	00:00 Uhr	Uhrzeit	00:00 Uhr
Temperatur	28,5 °C	Temperatur	20,4 °C
Luftdruck	1003 hPa	Luftdruck	1005,1 hPa
Wetterzustand		Wetterzustand	
relative Feuchte	49 %	relative Feuchte	93,9 %
Taupunkt	16,6 °C	Taupunkt	19,3 °C
Sichtweite	45km	Sichtweite	25km
Höhe der Wolkenuntergrenze	Keine Angabe	Höhe der Wolkenuntergrenze	Keine Angabe
Windrichtung		Windrichtung	
Windgeschwindigkeit	14,4 km/h	Windgeschwindigkeit	7,2 km/h

Datum	27.07.2019	Datum	27.07.2019
Uhrzeit	06:00 Uhr	Uhrzeit	06:00 Uhr
Temperatur	20,2 °C	Temperatur	20,7 °C
Luftdruck	1005,3 hPa	Luftdruck	1004,6 hPa
Wetterzustand		Wetterzustand	
relative Feuchte	88,2 %	relative Feuchte	88,3 %

Physik im Alltag | Stein, in Brunnen | Bill und Doreen | Erde | Was ist Zeit | Strecke stoppen | Arbeit | Rotach | Rotation | Pendel | Beschleunigung |
 Kilogramm, Newton | Kilogramm, Liter | Kofu's address | Stoßsatz | Energie | Ohmsches Gesetz | Erzeuger | Invertierung | Luftdruck, Höhe |
 v.a. Hochrechnen | Messfehler

Anzeige

Luftdruck und Höhe umrechnen

Einfacher Rechner für den Luftdruck in einer bestimmten Höhe über dem Meeresspiegel. Das ist eine Abschätzung, welche bei normalen Wetterbedingungen bis 11000 Meter Höhe gute Werte liefert. Sie geht von einer Temperatur in Meereshöhe von 15°C aus. Eine genauere Berechnung, die aber komplizierter ist, kann man mit der barometrischen Höhenformel machen.

Höhe: Meter & 10³m

Luftdruck: hPa = mbar

Bitte die Höhe in Meter oder den Luftdruck in Hektopascal (= Millibar) angeben. Der andere Wert wird berechnet.

Die zur Berechnung verwendete internationale Höhenformel ist: $\text{Luftdruck} = 1013,25 \text{ hPa} \cdot \left(1 - 6,5 \cdot \frac{\text{Höhe}}{288150 \text{ m}}\right)^{5,255}$

Beispiel: auf der Zugspitze mit ihrer Höhe von 2962 Metern beträgt der Luftdruck durchschnittlich etwas über 700 Hektopascal.

Physik im Alltag | Junk.de Webdienste | Rechnerliste | Impressum & Datenschutzhilfe

Diese Webseite verwendet zu ihrem Betrieb Cookies. Dies kann von Ihnen unterbunden werden. Klicken Sie dazu auf Mehr Infos. [Mehr Infos](#) [DE](#)

Förderungen und Preise

Ne senseBox wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Neben weiteren Förderern sind hier Auszeichnungen und Preise zu sehen, welche die senseBox erhalten hat.

[Zu den Förderungen + \(04/awards#grants\)](#)

[Zu den Preisen + \(04/awards#awards\)](#)

Förderungen

BMBF Open Photonics



„Mit Photonik die Welt vermessen – Mit Hilfe der Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung soll bis 2019 die senseBox Photonik möglichst viele Bürgerinnen und Bürger erreichen. Schulen und Schülerlabore können die Inhalte der senseBox Photonik in ihren Lehrplan integrieren und naturkundliche Museen und Science Center sie bei praktischen Angeboten einsetzen. Zusätzlich wird die OpenSenseMap um verschiedene neue Funktionen erweitert.“

Photonik Forschung Deutschland
<https://www.photonikforschung.de/projekte/open-innovation/projekt/sensebox.html>

AWS 2018 City on a Cloud Innovation Challenge Winners - Partners in Innovation Award 2018



„Die Universität Münster hat die senseBox entwickelt, ein Do-it-Yourself-Kit für stationäre und mobile Sensorstationen - ein Citizen Science Toolkit. Bürger mit einer senseBox: home können die Technologie für ihre eigene lokale Forschung nutzen, um Umweltdaten zu sammeln, oder sie zum openSenseMap-Sensornetzwerk, einer Plattform offener Sensordaten, die auf AWS laufen, beizutragen. Derzeit stehen über 1 Milliarde Messungen zum Herunterladen und Analysieren bereit. Die senseBox: edu bietet Schulen und Nachwuchswissenschaftlern eine Experimentierbox mit didaktischen Konzepten, Anleitungen und Projektideen, um den Nutzern beim Aufbau und

LEXIKON DER PHYSIK

Druck

Druck: Quotient p aus der Kraft F (genauer: des senkrecht auf einer Fläche stehenden Kraftanteils F_{\perp}) und der Fläche A , auf die sie einwirkt: $p = dF_{\perp} / (A \cdot \mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{n}}_A)$ ($\hat{\mathbf{n}}_A$: Normalenvektor von A). Bei ungleichmäßiger Krafteinwirkung oder bei gekrümmten Flächen ist ein hinreichend kleines Flächenelement dA zu betrachten: $p = dF_{\perp} / dA$. Der Druck auf einen Körper ist positiv, wenn die Kraft zum Körper hin gerichtet ist, ein negativer Druck entspricht einem Zug. Eine Übersicht über Druckeinheiten gibt die Tabelle.

Druck: Umrechnungen von verschiedenen Druckeinheiten.

Einheitenname	Einheitenzeichen	Beziehung	Äquivalent
Dyn pro Quadratcentimeter			dyn/cm^2 0,1Pa
Torr	Torr	$1/760\text{atm}$	133,322P
konventionelle Millimeter-Quecksilbersäule	mmHg		133,322P
konventionelle Meter-Wassersäule	mWs	0,1at	9806,65P
Kilopond pro Quadratcentimeter	kp/cm^2		98 066,5Pa
technische Atmosphäre	at, ata, atu, atü	1kp/cm^2	98 066,5Pa
Bar	bar	10^6dyn/cm^2	10^5Pa
physikalische Atmosphäre	atm		101 325Pa
poundal per square foot	pdl/ft^2		1,488 16Pa
pound-force per square foot	lbf/ft^2		47,880 3Pa
conventional inch of water	inH ₂ O		249,089P
foot of water	ftH ₂ O		2



Welches Klima prägt die Kölner Bucht?

Die Kölner Bucht ist der südlichste Ausläufer des Niederrheinischen Tieflandes und zählt klimatisch zu den Gunsträumen der Mittleren Breiten Europas. Das Klima der Kölner Bucht wird, wie im ganzen Westen Deutschlands, stark von der geografischen Nähe zur Nordsee und zum Atlantik und somit vom Golfstrom beeinflusst. Diese Lage sorgt für ein maritim beeinflusstes Klima mit milden Wintern und gemäßigten Sommern. Im Bereich der Westwinddrift überwiegen regelmäßige Tiefausläufer, die vom Atlantik kommend Deutschland mit entsprechenden Niederschlägen überqueren. Bei weniger häufigen Hochdruckwetterlagen nehmen die Tiefdruckgebiete nördliche oder südliche Zugbahnen, so dass sich dann länger anhaltende, trockene Perioden einstellen können.

Besonderheiten in der Kölner Bucht - Geologie, Niederschläge, Temperaturen und Wetterlagen

Durch die Reliefform der Kölner Bucht werden bodennahe Luftströmungen kanalisiert und der Wind schwenkt in Richtung des Rheinverlaufs. Aber nicht nur Luftbewegungen, auch Niederschläge werden hierdurch beeinflusst.

Die Erhebungen des Rheinischen Schiefergebirges verlaufen quer zur Hauptwindrichtung, dies führt zu ausgeprägten Luv und Lee-Effekten. Luv ist die dem Wind zugekehrte Seite und Lee, die dem Wind abgewandte Seite. Die Luftmassen aus westlicher Richtung überqueren das Hohe Venn und die Eifel. Dabei werden sie erwärmt und weisen nur geringe Niederschlagswerte auf, da warme Luft mehr Feuchtigkeit speichern kann. Der Anstieg zum Bergischen Land östlich des Rheins verursacht hingegen eine Stauung und Abkühlung der Luftmassen, dies führt zu deutlich mehr Niederschlägen.

Betrachtet man die langjährigen Temperaturmittel, zeigt sich die Kölner Bucht während der Winter als eine der wärmsten Regionen Deutschlands. Längere Frostperioden oder dauerhafte Schneedecken sind die Ausnahme.

Grundsätzlich sind in Köln zwei Wetterlagen zu unterscheiden: Zum einen treten in Köln Wetterlagen auf, die geprägt sind durch westliche Windrichtungen (Nord-West bis Süd-West Winde) mit teilweise höheren Windgeschwindigkeiten.

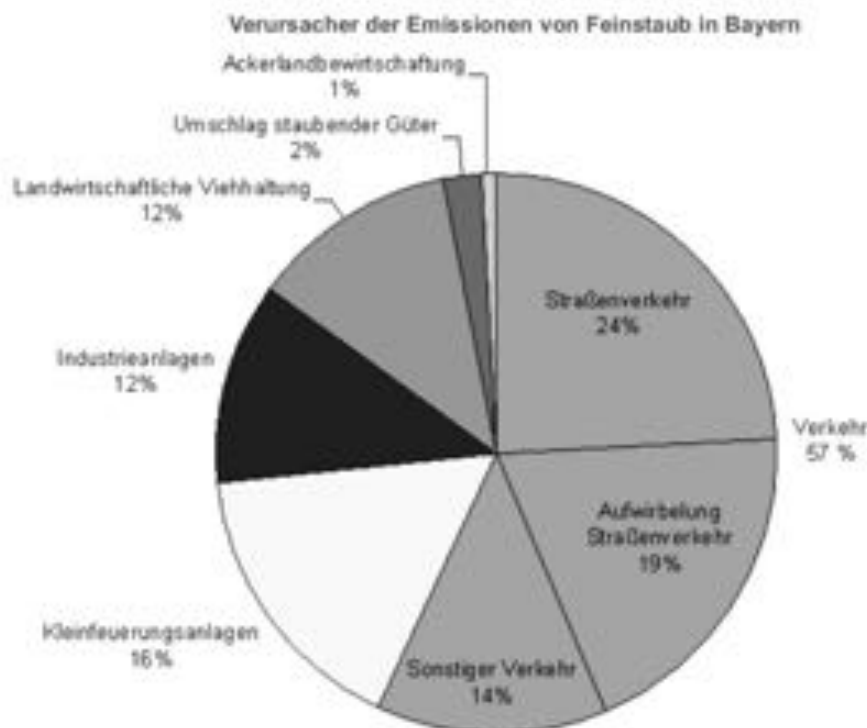
Zum anderen sind Wetterlagen anzutreffen, bei denen sich bodenständige Windsysteme einstellen können, die in der Regel durch Schwachwinde geprägt sind. Neben den auf wenige Prozent der Jahresstunden beschränkten lokalen Kaltluftabflüsse vom bergischen Höhenrand und der Ville, kommt es hier zu einem regionalen Kaltluftabfluss vom Siebengebirge. Kanalisiert durch das Rheintal herrschen dann schwach windige süd-süd-östliche Windrichtungen vor. Dieser Abfluss kann Mächtigkeiten bis über 100 Meter erreichen. Dabei gibt es keine topografischen Hindernisse auf Kölner Stadtgebiet.

Das spezielle Klima in der Großstadt



Verursacher von Feinstaub-PM₁₀- Emissionen in Bayern

Die Verursacher der Feinstaub-Emissionen in Bayern wurden im Rahmen des Emissionskatasters Bayern 2004, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) 2009, vom LfU ermittelt. Die Verursacher bei Feinstaub (PM₁₀) sind danach der Verkehr mit 57 %, die Kleinf Feuerungen mit 16 %, die Industrieanlagen mit 12 %, die landwirtschaftliche Viehhaltung mit 12 %, der Umschlag staubender Güter mit 2 % und die Ackerlandbewirtschaftung mit 1 %. Der hohe Beitrag des gesamten Verkehrs von 57 % ist die Summe von rund einem Viertel (24 %) direkter Auspuffemissionen des Straßenverkehrs, knapp einem Fünftel (19 %) vom Straßenverkehr resultierender Aufwirbelungen und aus weiteren 14 % von dieselbetriebenen Offroad-Fahrzeugen sowie dem Schienen-, Flug- und Schiffsverkehr.



Quelle: Emissionskataster Bayern 2004, LfU 2009

Wie immer, um die Teilzahl mit dem Nenner der jeweiligen Größe dividieren oder multiplizieren

<https://www.lfu.bayern.de/themen/luftreinhaltung/verunreinigungen/feinstaub/emissionen/pm10.htm>

Seite 1 von 2



Bildungsagenda 2030
Bildungsbiografie
Inklusive Bildung
Hochwertige Bildung
○ Menschenrechtsbildung
● Bildung für nachhaltige Entwicklung
○ Global Citizenship Education
Open Educational Resources
UNESCO-Projektschulen
UNESCO-Lehrstühle
Freiwilligendienst kulturweit
Unternehmer werden

Bildung Kultur und Natur Wissen  → zur Karte 

UN-Dekade "Bildung für nachhaltige Entwicklung"

Resolution der 65. Hauptversammlung der Deutschen UNESCO-Kommission, Bonn, 7. Juli 2005