

Low-Cost Absorptionsphotometer

Bachelor Thesis

Joshua Backlund, Systemtechnik

Projekt-Nr. 5077-S



Titel: Entwicklung eines sensitiven Low-Cost Russmessverfahrens

Proj.-Nr.: 5077-S

Auftraggeber: Ernest Weingartner, Institut für Sensorik und Elektronik (ISE)

Projektausführender: Joshua Backlund
Studiengang Systemtechnik

Fachbetreuer: Ernest Weingartner, Jannis Röhrbein, Tobias Rüggeberg

Experte: Dr. Daniel Matter, Mems AG

Brugg-Windisch, 14.08.2020

Version	Datum	Visum	Änderung
1.0	15.01.2020		P5 Grobversion
1.1	24.01.2020		P5 Überarbeitung
1.2	03.02.2020		P5 Abgabe-Version
2.0	31.07.2020		P6 Grobversion
2.1	14.08.2020		P6 Abgabe-Version

Vertraulichkeitshinweis

Dieses Dokument enthält keine vertraulichen Informationen. Die beschriebenen Entwicklungsmethoden, Experimente und Know-how dürfen jedoch nicht ohne Zustimmung des Auftraggebers und des Betreuers an Drittpersonen weitergegeben werden.

Copyright-Hinweis

Ziel des Projekts ist die Veröffentlichung einer Bauanleitung des Produkts mit der angewandten Theorie. Dementsprechend steht es jedem Anwender zu, die Unterlagen nach eigenem Gutdünken zu verwenden, sofern die Verantwortlichen des Projekts als Quelle angegeben werden.

Kontaktangaben

**Projektbetreuer
und Auftraggeber** Prof. Dr.
Ernest Weingartner
Klosterzelgstrasse 1
5210 Windisch
Tel.: +41 56 202 79 18
E-Mail: ernest.weingartner@fhnw.ch

Studierender FHNW Herr
Joshua Backlund
Äussere Baselstrasse 325
4125 Riehen
Tel.: +41 76 505 49 18
E-Mail: joshua.backlund@students.fhnw.ch

Experte Dr.
Daniel Matter
Bruggerstrasse 30
5413 Birmenstorf
Tel.: +41 56 470 92 01
E-Mail: daniel.matter@mems.ch

Abstract (DE)

In dieser Bachelor Arbeit wurde eine Bauanleitung für ein **Low-Cost Absorptionphotometers (APM)** verfasst, welches über ein optisches Messverfahren die Russkonzentration in der Luft misst. Zu dieser Bauanleitung gehört eine Materialliste, eine Beschreibung des Programmier-Codes, sowie die Instruktion für das Zusammenbauen und die Inbetriebnahme des Messgeräts.

Eine allgemeine Beschreibung des verwendeten Messprinzips sowie der Russ Problematik mit möglich schädlichen Auswirkungen ist ebenfalls Teil dieser Dokumentation.

Das Ziel des Projekts war es, den Messaufbau möglichst günstig und leicht nachbildbar zu erstellen. Aus diesem Grund ist der Aufbau sehr simpel gehalten und in den Berechnungen wird teils mit **Vereinfachungen und Annahmen** gearbeitet.

Durch dieses Vorgehen können viele Kosten eingespart werden und das Low-Cost APM kommt somit bei einem Preis von unter 150.- CHF zu stehen. Im Vergleich dazu liegt das qualitativ hochwertige **Magee Scientific Aethalometer AE33**, welches ebenfalls mit dem Lichtabsorbierenden Messverfahren arbeitet, bei über 25'000.- CHF.

Zur Bestimmung der Messgenauigkeit wurde die Standardabweichung bei einem unbelegten Filter ermittelt und über mehrere Integrationszeiten in einem Allan-Plot dargestellt. Um eine **Messgenauigkeit von $<100\text{ng}/\text{m}^3$** zu erreichen, benötigt das Low-Cost APM eine **Integrationszeit von 3600s**, während das AE33 dafür lediglich 100s benötigt. Der Vergleich zwischen dem Low-Cost APM und dem AE33 wird in dieser Dokumentation anhand mehrerer Messungen dargestellt.

Somit liegt der Vorteil des erstellten Low-Cost APM eindeutig im Preis, was es zu einer attraktiven Option für ärmere Institutionen (z.B. in 3. Welt Ländern) macht, welche günstig Messwerte generieren wollen. Der Nachteil liegt je nach Wahl in der Messgenauigkeit oder der Zeitauflösung.

Das Projekt wird auf Wunsch des Auftraggebers auf www.instructables.com veröffentlicht.

Abstract (EN)

In this bachelor thesis, a building manual for a **Low-Cost Absorption Photometer (APM)** was written, which measures the soot concentration in the air using an optical measuring method. These building instructions include a material list, a description of the programming code, as well as the instructions for assembling and starting up the measuring device.

A general description of the measuring principle used and the soot problem with possible harmful effects is also part of this documentation.

The aim of the project was to create the measurement setup as cheaply and easily reproducible as possible. For this reason, the structure is kept very simple and the calculations sometimes work with **simplifications and assumptions**.

This procedure can save a lot of costs and the low-cost APM comes at a price of less than CHF 150.-. In comparison, the high-quality **Magee Scientific Aethalometer AE33**, which also works with the light-absorbing measuring method, is over CHF 25,000.

To determine the measurement accuracy, the standard deviation was determined for an unused filter and displayed in an Allan plot over several integration times. In order to achieve a **measuring accuracy of $<100\text{ng}/\text{m}^3$** , the low-cost APM requires an **integration time of 3600s**, while the AE33 only needs 100s. The comparison between the low-cost APM and the AE33 is shown in this documentation using several measurements.

The advantage of the low-cost APM is clearly the price, which makes it an attractive option for poorer institutions (e.g. in 3rd world countries) who want to generate cheap measured values. Depending on the choice, the disadvantage is the measuring accuracy or the time resolution.

The project will be published on www.instructables.com at the request of the client.

Inhaltsverzeichnis

Ausgangslage	8
Black Carbon – Russ als Problemstoff	9
Entstehung von Black Carbon.....	9
Trends.....	9
Schadstoff für den Mensch	13
Auswirkung auf die Umwelt	14
Theoretische Grundlagen zum Messprinzip.....	15
Theorie zur Lichtmessung.....	17
Vergleich Messaufbau zum «High-Cost» Aethalometer	20
Aufbau Magee Scientific Aethalometer® Model AE33.....	20
Aufbau Low-Cost Absorptionsphotometer	21
Vergleich Aufbau	22
Auswahl des Materials	23
Anforderungen und Beschreibung der Funktionen	24
Verwendete Hardware	26
Komponenten- und Preisübersicht	32
Verwendete Software	33
Arduino Programmierung – Arduino IDE	33
Konstruktion Messkammer – NX und Ultimaker Cura	37
Datenauswertung – Excel und selbstgeschriebenes Programm (von F. Mayer).....	37
Aufbau	41
Verdrahtung und elektrischer Aufbau.....	41
Erstellung der Messkammer.....	42
Überprüfung auf Dichtheit	43
Verwendung des Daten Loggers.....	44
Erstellung des Gehäuses.....	45
Erste Messungen und Ermittlung des Luftflusses	46
Verwendung der Daten	49
Messgenauigkeit.....	50
Attenuation als Grenzwert	52
Erreichte Attenuation.....	52
Analyse der Daten im Vergleich mit dem AE33.....	56
Persönlicher Bericht - Schwierigkeiten.....	57

Erweiterungsmöglichkeiten.....	58
Schlusswort	59
Literaturverzeichnis.....	60
Tabellenverzeichnis	61
Formelverzeichnis	61
Abbildungsverzeichnis.....	62

Ausgangslage

Der Luftschadstoff Russ bezeichnet kohlenstoffhaltige Partikel in der Aussenluft. Atmosphärische Russpartikel entstehen vorwiegend durch Verbrennung von Biomasse und Dieselkraftstoff. Diese schwarzen Partikel sind für ihre negative Wirkung auf unsere Gesundheit bekannt (Dieselruss wurde 2012 von der WHO als krebserregend eingestuft). Sie beeinflussen zudem unser Klima, indem sie Sonnenlicht absorbieren und damit die Atmosphäre erwärmen. Eine Reduktion der Russbelastung hat daher sowohl eine hohe Relevanz in Bezug auf die Gesundheit/Mortalität der Menschen und ist gleichfalls von hoher Bedeutung im Zusammenhang mit dem Klimaschutz.

Globale Trendanalysen zeigen, dass die Russkonzentrationen in unserer Atmosphäre im Ansteigen sind. Insbesondere in urbanen Gebieten (Megacitys in Afrika, Asien und China) können heutige Russkonzentrationen alarmierend hohe Werte annehmen (mehrere $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$), welche die Lebensqualität der Bewohnerinnen und Bewohner unmittelbar und massiv beeinträchtigen.

Die Aerosolgruppe am ISE verfügt über ausgewiesene Kompetenzen im Bereich Russmesstechnik und entwickelt neue Verfahren, welche Russpartikelkonzentrationen über Lichtabsorption nachweisen – dies mit grossen Vorteilen gegenüber heute kommerziell erhältliche «Standard-Russmessmethoden». Diese beruhen auf dem Abscheiden von Russpartikeln auf Faserfiltern. Die Änderung der Lichttransmission des Filters wird während der Belegung kontinuierlich gemessen und in eine Russkonzentration überführt. Solche kommerziell erhältlichen «Absorption-Photometer» erreichen Nachweisgrenzen von wenigen ng/m^3 (bei einer Zeitauflösung von ein paar Stunden). Die Verwendung verschiedener Wellenlängen erlaubt zusätzlich Russsorten aus verschiedenen Quellen (Holz, Diesel) zu unterscheiden. Diese Absorption-Photometer arbeiten autonom und sind vergleichsweise teuer ($>25'000 \text{ CHF}$), weshalb sie vorwiegend von Behörden in Lufthygiene-Messstationen zur Beurteilung der Luftqualität eingesetzt werden. Der hohe Anschaffungspreis stellt eine erhebliche Einschränkung für Privatpersonen oder privatwirtschaftliche Unternehmungen dar, die Russbelastung in ihrer Umgebung selbst messen und beurteilen möchten, um mögliche Massnahmen aus den Resultaten ableiten zu können.

Ziel des vorliegenden P6-Projektes ist die Entwicklung eines vereinfachten, breit einsetzbaren «Low-Cost» Absorptionphotometers, der der globalen Bevölkerung dank Bauanleitung zum Selbstbau zur Verfügung gestellt wird. Selbst bei einer deutlich schlechteren Nachweisgrenze kann ein solches mobiles, kostengünstiges Gerät direkt an belasteten Standorten unmittelbar wertvolle und repräsentative Informationen zur Luftqualität liefern. Der Filterhalter und das Gehäuse für die Komponenten des neuen Messgerätes sollen mittels eines Standard-3D-Druckers hergestellt werden. Gleichfalls sollen möglichst günstige Komponenten (Filter, LED, Photodioden, Pumpe, Durchflussmesser, Arduino, Batterie) verwendet werden, sodass die gesamten Materialkosten unter 400 CHF zu liegen kommen.

Black Carbon – Russ als Problemstoff

Im Folgenden wird eine grobe Übersicht über die Entstehung von Russ und möglichen einhergehenden Gefahren für den Menschen und die Umwelt gegeben. Ebenfalls wird die Situation der globalen Luftqualität kurz angeschnitten. Ziel dieses Kapitels ist es das Bewusstsein für die Problematik zu fördern und Verständnis zu schaffen, weshalb es wichtig ist, die Russkonzentration messen zu können.

Entstehung von Black Carbon

Bei Russ (engl. Black Carbon) handelt es sich um elementaren Kohlenstoff mit einem Partikeldurchmesser der kleiner als 100nm erreichen kann und gilt somit als Nanopartikel. BC-Partikel absorbieren das Sonnenlicht stark und verleihen dem Ruß seine schwarze Farbe. BC entsteht auf natürliche Weise als auch durch menschliche Aktivitäten infolge der unvollständigen Verbrennung von fossilen (z.B. Erdölprodukte) und biogenen (Holz) Brennstoffen. Zu den Hauptquellen zählen Emissionen von Dieselmotoren, Kochherden, Holzverbrennung und Waldbränden. Ebenfalls wird BC industriell gefertigt und verwendet, um die Langlebigkeit und Qualität von Autoreifen und technischen Gummiprodukten wie Zahnriemen zu erhöhen.



Abbildung 1: Ausstoss Russ (Quelle: <https://phys.org/news/2017-02-darkness-soot-air-pollution.html>)

Trends

Gemäss einer Veröffentlichung von Bond et al. in der Zeitschrift Journal of geophysical research [1] sind die größten globalen Quellen von BC das offene Verbrennen von Wäldern und Savannen. Dominante Ausstosser von schwarzem Kohlenstoff aus anderen Verbrennungsarten sind je nach Ortschaft unterschiedlich. Feste Wohnbrennstoffe (d.h. Kohle und Biomasse) tragen 60 bis 80% zu den Emissionen in Asien und Afrika bei, während Dieselmotoren auf der Straße und im Gelände etwa 70% der Emissionen in Europa, Nordamerika und Lateinamerika ausmachen. Kohle ist eine bedeutende Quelle in China, der ehemaligen UdSSR und einigen osteuropäischen Ländern. Diese Kategorien machen etwa 90% der Massenemissionen von Ruß aus. Andere verschiedene Quellen, die reich an Ruß sind, einschließlic Emissionen aus Luftfahrt, Schifffahrt und Abfackeln, machen weitere 9% aus, während die restlichen 1% auf Quellen mit sehr geringen Rußemissionen entfallen. Die weltweiten Gesamtemissionen von Ruß unter Verwendung von Bottom-up-Inventarmethoden betragen 7,5 Megatonnen pro Jahr im Jahr 2000 mit einem Unsicherheitsbereich von 2 bis 29 MT. Emissionen von 4,8 (1,2 bis 15) MT pro Jahr schwarzem Kohlenstoff stammen aus der energiebedingten Verbrennung, die alle außer offenen Verbrennungen umfasst, und der Rest stammt aus der offenen Verbrennung von Wäldern, Grasland und landwirtschaftlichen Rückständen.

Gemäss Schätzungen scheint sich der globale BC Ausstoss seit dem Jahr 2000 gesteigert zu haben. So wurden im Jahr 2004 gemäss Bond weltweit 8 Megatonnen Russ ausgestossen und fast 34 Megatonnen organischer Kohlenstoff. Dieser Russ-Ausstoss teilte sich prozentual wie folgt auf:

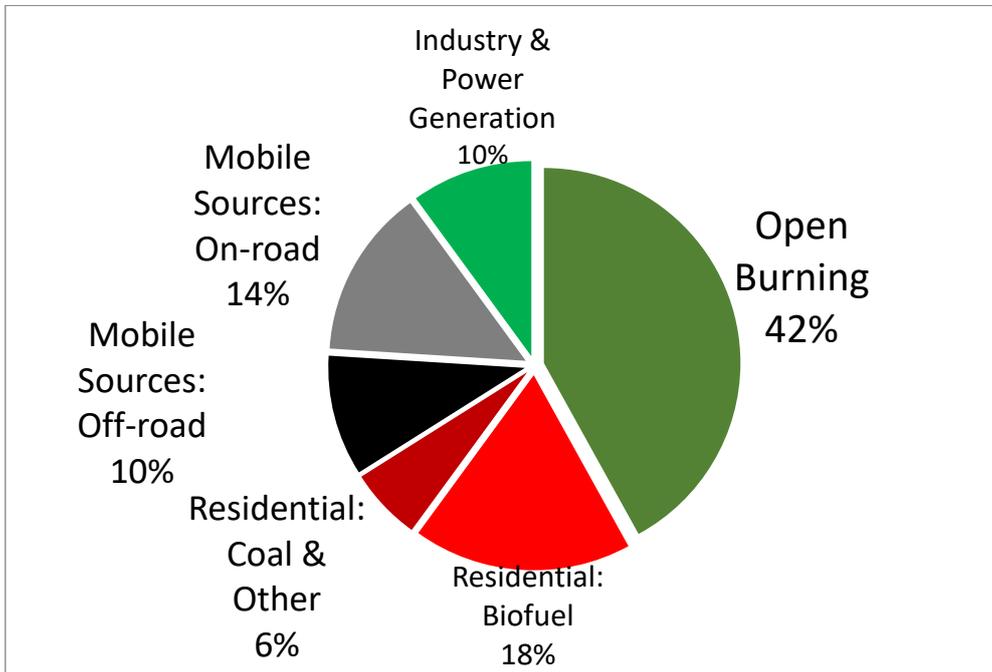


Abbildung 2: Globale Entstehung von Russ (Bond et al (2004))

Platz 1 belegte mit 42% (ungefähr 3.3 Megatonnen) das offene Verbrennen von kohlenstoffhaltigen Ressourcen, wozu Waldbrände und Feuer in der Savanne zählen. [2]

Während man davon ausgeht, dass global die Russkonzentrationen ansteigen, erzeugen Messungen in dem Vereinigten Königreich, dass der BC-Anteil in der Luft in Ballungszentren jedoch abnimmt. Die Abbildung 3: Trend BC in UK zeigt eine Abnahme in den letzten 7 Jahren von bis zu 5 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft (-50%) in London Marylebone. [3]

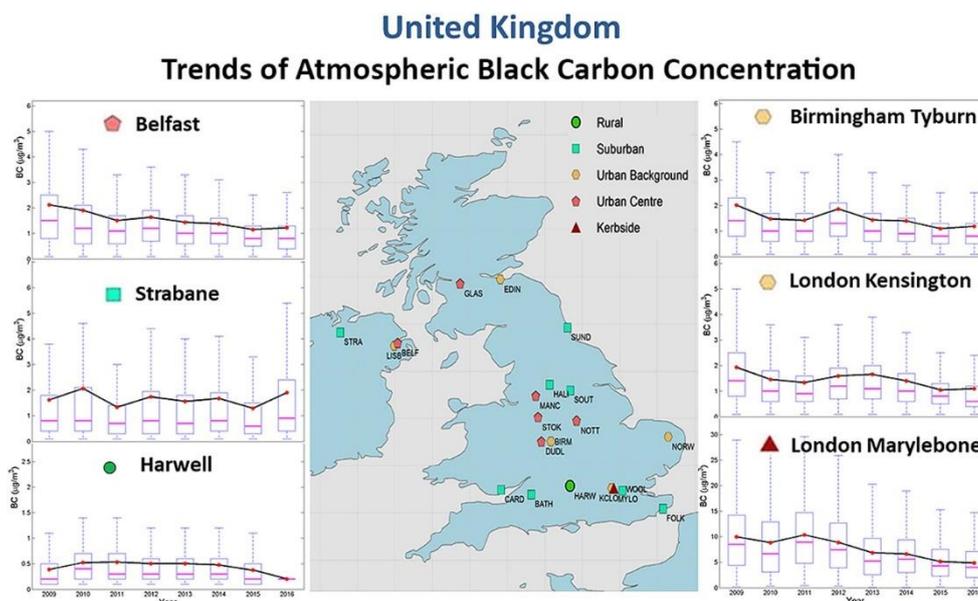


Abbildung 3: Trend BC in UK

Das Nationale Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) misst die Luftverschmutzung an 16 Standorten in der Schweiz und verfolgt die Entwicklung über die letzten Jahrzehnte. Die Stationen sind über das ganze Land verteilt und messen die Belastung an typischen Standorten (z.B. Strassen in Stadtzentrum, Wohngebiet, ländliche Station). [4]

Der Kennlinie in Abbildung 4: Verlauf PM10 Schweiz (bafu Abruf: Juli 2020) ist eindeutig zu entnehmen, dass die Jahreswerte von PM10 (Partikel mit Durchmesser $<10\mu\text{m}$), zu denen auch BC gehört, seit einigen Jahren am Abnehmen sind und die festgesetzte Grenze von $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ unterschritten haben.

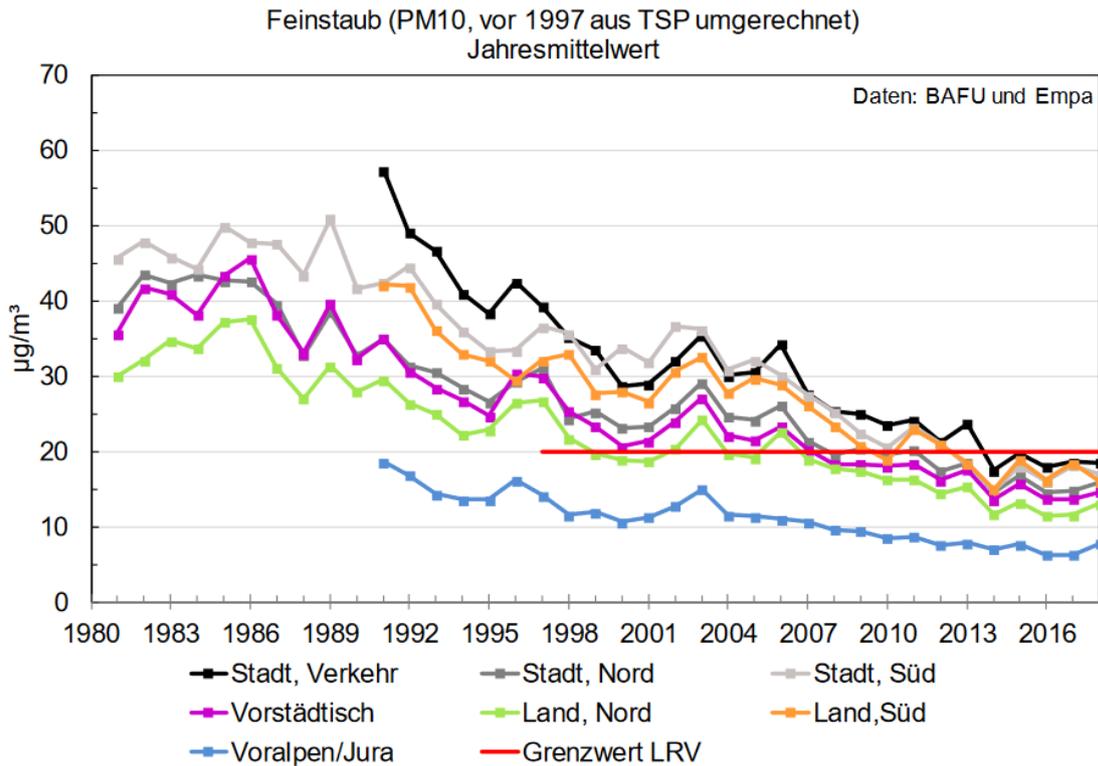


Abbildung 4: Verlauf PM10 Schweiz (bafu Abruf: Juli 2020)

Während in gewissen Ländern BC Konzentrationen abnehmen, ist der Grossteil der Bevölkerung in Städten mit über 100'000 Einwohner laut WHO (Welt Gesundheits Organisation) immer noch schlechter Luft ausgesetzt. So schreibt sie auf ihrer Website (aus dem Englischen übersetzt):

Mehr als 80% der Menschen in städtischen Gebieten, in denen die Luftverschmutzung überwacht wird, sind Luftqualitätsniveaus ausgesetzt, die über den Grenzwerten der Weltgesundheitsorganisation (WHO) liegen. Während alle Regionen der Welt betroffen sind, ist die Bevölkerung in Städten mit niedrigem Einkommen am stärksten betroffen.

Laut der neuesten Datenbank zur Luftqualität in Städten erfüllen 98% der Städte in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen mit mehr als 100 000 Einwohnern nicht die Luftqualitätsrichtlinien der WHO. In Ländern mit hohem Einkommen sinkt dieser Prozentsatz jedoch auf 56%.

In den letzten zwei Jahren hat sich die Datenbank, die jetzt 3000 Städte in 103 Ländern umfasst, nahezu verdoppelt. Mehr Städte messen die Luftverschmutzung und erkennen die damit verbundenen gesundheitlichen Auswirkungen.

Mit abnehmender Luftqualität in der Stadt steigt das Risiko für Schlaganfall, Herzerkrankungen, Lungenkrebs sowie chronische und akute Atemwegserkrankungen, einschließlich Asthma, für die Menschen, die in ihnen leben. [5]

Diese genannten Grenzwerte der WHO liegen für **PM 2.5 bei 10 µg/m³** und für **PM 10 bei 20 µg/m³**. Die genannte Datenbank zeigt jedoch jährliche Durchschnitte in Städten auf, welche die Grenzwerte fast um bis zum 30-fachen erreichen. Einen Auszug ist in der nachfolgenden Grafik Abbildung 5: Datenbank WHO (https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/) zu sehen:

City/Town means			PM10			PM2.5			Reference			
Regio	Country	City/Town	Annual mean, ug/m3	Year	Number and type of monitoring stations (PM10)	note on converted PM10	Annual mean, ug/m3	Year	Number and type of monitoring stations (PM2.5)	note on converted PM2.5	Temporal coverage	for air quality
Afr	Nigeria	Onitsha	594	2009	1 station, NA	measured data	66	2009	1 station, NA	measured data	PM10: <75 %, only day tir	Ngele and Onwu (2015), Reseach Journal of Chemical Sci
Emr LMI	Pakistan	Peshawar	540	2010	1 station, 1 statio	measured data	111	2010	1 station, 1 static	measured data	PM10: NA; PM2.5:<75%	Alam K, et al. Aerosol size distribution and mass concent
Emr LMI	Iran (Islamic Repub	Zabol	527	2012	1 station, NA	measured data	217	2012	-	-	converted from FPM10: <75 % but annually	Department of Environment
Emr LMI	Pakistan	Rawalpindi	448	2010	1 station, 1 statio	measured data	107	2010	1 station, 1 static	measured data	PM10: NA; PM2.5:<75%	Alam K, et al. Aerosol size distribution and mass concent
Afr	Nigeria	Kaduna	423	2013	-	converted from PM2	90	2013	2 stations, indust	measured data	PM10: NA; PM2.5:<75%	Manuscript submitted 11/4/2015
Afr	Nigeria	Aba	373	2009	1 station, NA	measured data	49	2009	1 station, NA	measured data	PM10: <75 %, only day tir	Ngele and Onwu (2015), Reseach Journal of Chemical Sci
Emr HI	Saudi Arabia	Riyadh	368	2014	1 station, NA	measured data	156	2014	-	converted from FPM10: NA; PM2.5:NA	Official communication from Saudi Arabia	
Emr HI	Saudi Arabia	Al Jubail	359	2014	1 station, NA	measured data	152	2014	-	converted from FPM10: NA; PM2.5:NA	Official communication from Saudi Arabia	
Emr LMI	Alghanistan	Mazar-e Sharif	334	2009	1 station, 1 statio	measured data	68	2009	1 station, 1 static	measured data	PM10: <75%; PM2.5:<75%	Magnusson et al., Broad Exposure Screening of Air Pollut
Sear	India	Gwalior	329	2012	2 stations, NA	measured data	176	2012	-	converted from FPM10: <75 % but annually	Open Government Data (OGD) Plateform India	
Emr HI	Bahrain	Hamad Town	318	2012	1 station, 1 Resid	measured data	66	2012	1 station, 1 Resid	measured data	PM10: NA; PM2.5:>75%	Supreme Council of Environment, 2013.
Sear	India	Allahabad	317	2012	2 stations, NA	measured data	170	2012	-	converted from FPM10: <75 % but annually	Open Government Data (OGD) Plateform India	
Wpr LMI	China	Shijiazhuang	305	2013	NA	measured data	121	2014	8 stations, NA	measured data	PM10: NA; PM2.5:>75%	Clean Air Asia, primary source: National Bureau of Statist
Emr LMI	Pakistan	Karachi	290	2009	-	converted from PM2	88	2009	2 stations, indust	measured data	PM10: NA; PM2.5:<75% k	Khaja et al (2012). Effect of air pollution on daily morbi
Emr HI	Saudi Arabia	Dammam	286	2014	1 station, NA	measured data	121	2014	-	converted from FPM10: NA; PM2.5:NA	Official communication from Saudi Arabia	
Afr	Nigeria	Umuahia	274	2009	1 station, NA	measured data	40	2009	1 station, NA	measured data	PM10: <75 %, only day tir	Ngele and Onwu (2015), Reseach Journal of Chemical Sci
Sear	India	Rajpur	268	2012	3 stations, NA	measured data	144	2012	-	converted from FPM10: <75 % but annually	Open Government Data (OGD) Plateform India	
Emr LMI	Alghanistan	Kabul	260	2009	1 station, 1 statio	measured data	86	2009	1 station, 1 static	measured data	PM10: <75%; PM2.5:<75%	Magnusson et al., Broad Exposure Screening of Air Pollut
Emr HI	Bahrain	Ma'ameer	257	2012	1 station, 1 Resid	measured data	64	2012	1 station, 1 Resid	measured data	PM10: NA; PM2.5:>75%	Supreme Council of Environment, 2013.
Emr LMI	Iran (Islamic Repub	Boshehr	255	2010	1 station, NA	measured data	105	2010	-	converted from FPM10: <75 % but annually	Department of Environment	
Emr HI	Bahrain	Ras Hayan	250	2012	1 station, 1 Rural	measured data	44	2012	1 station, 1 Rural	measured data	PM10: NA; PM2.5:>75%	Supreme Council of Environment, 2013.
Emr HI	Bahrain	Nabih Saleh	244	2012	1 station, 1 Urban	measured data	58	2012	1 station, 1 Urban	measured data	PM10: NA; PM2.5:>75%	Supreme Council of Environment, 2013.
Emr LMI	Iran (Islamic Repub	Ahvaz	231	2010	4 stations, NA	measured data	95	2010	-	converted from FPM10: <75 % but annually	Department of Environment	
Emr HI	Saudi Arabia	Yenbu	230	2014	1 station, NA	measured data	97	2014	-	converted from FPM10: NA; PM2.5:NA	Official communication from Saudi Arabia	
Sear	India	Delhi	229	2012	12 stations	measured data	122	2013	10 stations, resid	measured data	PM10: <75%; PM2.5:<75%	Central Pollution Control Board India, Environmental Dat

Abbildung 5: Datenbank WHO (https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/)

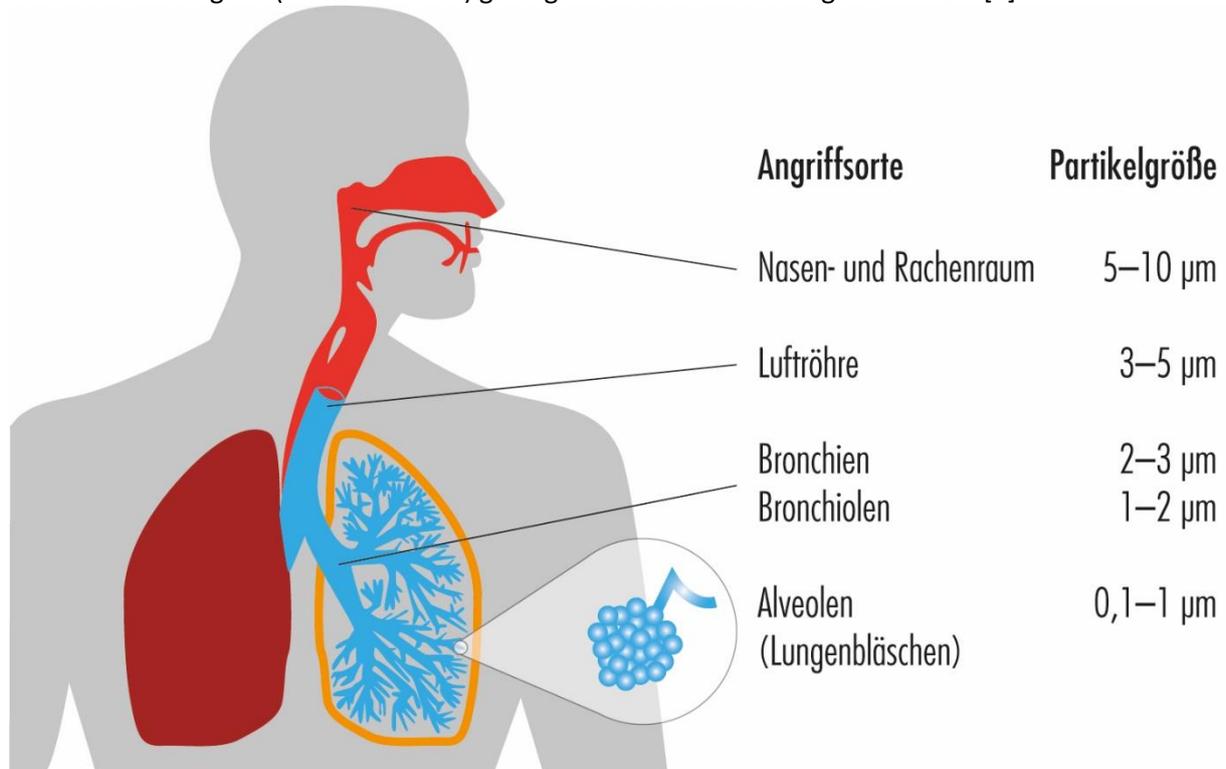
Einer Studie aus den Philippinen für die Metro Manila ist folgender alarmierender Text zu entnehmen (übersetzt aus dem Englischen), welche die Aussagen der WHO bestätigt:

Die durchschnittliche Massenkonzentration von eBC an der städtischen Hintergrundstation (UBS) betrug $7,0 \pm 4,8 \mu\text{g m}^{-3}$, während am Straßenrand (RS) die stündlichen Konzentrationen Maximalwerte von $138 \mu\text{g m}^{-3}$ erreichten, Werte, die signifikant höher sind als in europäischen Städten ... Alarmierend ist, dass die höchsten Konzentrationen in den überfüllten Gebieten gefunden wurden, in denen die Menschen mehr als acht Stunden am Tag verbringen. [6]

Wie auf der WHO Website zu lesen, erreichen besonders ärmere Länder in ihren Städten höhere Werte bei der Luftverschmutzung. Diese Beobachtung führte zur Idee für dieses Projekt, ein möglichst kostengünstiges Messgerät zu erstellen, dass es genau diesen Ländern ermöglicht Messungen der Russkonzentrationen durchzuführen und somit ein Bewusstsein für die Problematik zu fördern.

Schadstoff für den Mensch

Da Rußpartikel sehr klein sind (teils sogar kleiner als 100 nm Durchmesser) können sie über die Atemwege tief in die Lunge eindringen und so vom Körper aufgenommen werden. [7] Inhalierete Nanopartikel besitzen die Fähigkeit, Gewebe zu durchdringen. So können sie, wie in Abbildung 6 zu sehen, über die Alveolen (= Lungenbläschen) der Lunge direkt in den Blutkreislauf und von dort in sekundäre Zielorgane (z. B. die Nieren) gelangen und dort krebserregend wirken. [8]



Angriffsorte des Feinstaubs in den Atemwegen:
Je kleiner die Partikel, desto tiefer dringen sie in das Lungensystem ein.

Abbildung 6: Gefahr durch Feinstaub (© Kutzner + Weber GmbH)

Gemäss einer Studie von Arthur Braun (Physiker an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt), welche im Fachblatt *Toxicology Letters*¹ erschienen ist, lösen die Rußpartikel in Zellkulturen einen genetischen Entgiftungsmechanismus aus, was gemäss «Lungenärzte im Netz» (Herausgeber Deutsche Lungenstiftung e.V.) als Angriff auf die Zellen bezeichnet werden kann. [9]

Eine Studie von Xin Zhang beschäftigt sich mit den negativen Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die kognitiven Fähigkeiten von Menschen und kommt zum Schluss, dass Personen, die über längere Zeit erhöhter Luftverschmutzung ausgesetzt waren, bei mathematischen und verbalen Tests schlechter abschneiden. Die Abnahme der kognitiven Fähigkeiten wird in der Studie ebenfalls als Risikofaktor für Alzheimer genannt. [10]

¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378427411016018>

Auswirkung auf die Umwelt

Aerosole wie Russpartikel wirken sich nicht nur durch einen potenziell schädlichen Einfluss auf den Körper aus, sondern sie beeinflussen auch das Klima. So kann das Aerosol abhängig von den Eigenschaften durch eine Erwärmung oder Abkühlung auf die Umwelt bewirken. Zum Beispiel haben Sulfataerosole eine rein streuende Wirkung und somit kühlenden Effekt, diese werden jedoch in diesem Projekt nicht untersucht und deshalb werden ihre Auswirkungen auf die Umwelt hier nicht beschrieben.

In diesem Kapitel wird hauptsächlich auf die Auswirkungen von Russ eingegangen. Russ absorbiert sichtbares Licht, wie in der Sonneneinstrahlung vorhanden, und erscheint deshalb als äusserst Schwarz. Die absorbierte Energie wird in Wärme umgewandelt und an die umliegende Luft abgegeben und erzielt somit zu einem wärmenden Effekt.

Dieses Prinzip wird symbolisch in Abbildung 7 dargestellt, wobei die Russpartikel als Schwarz und streuende Partikel als Weiss eingezeichnet sind:

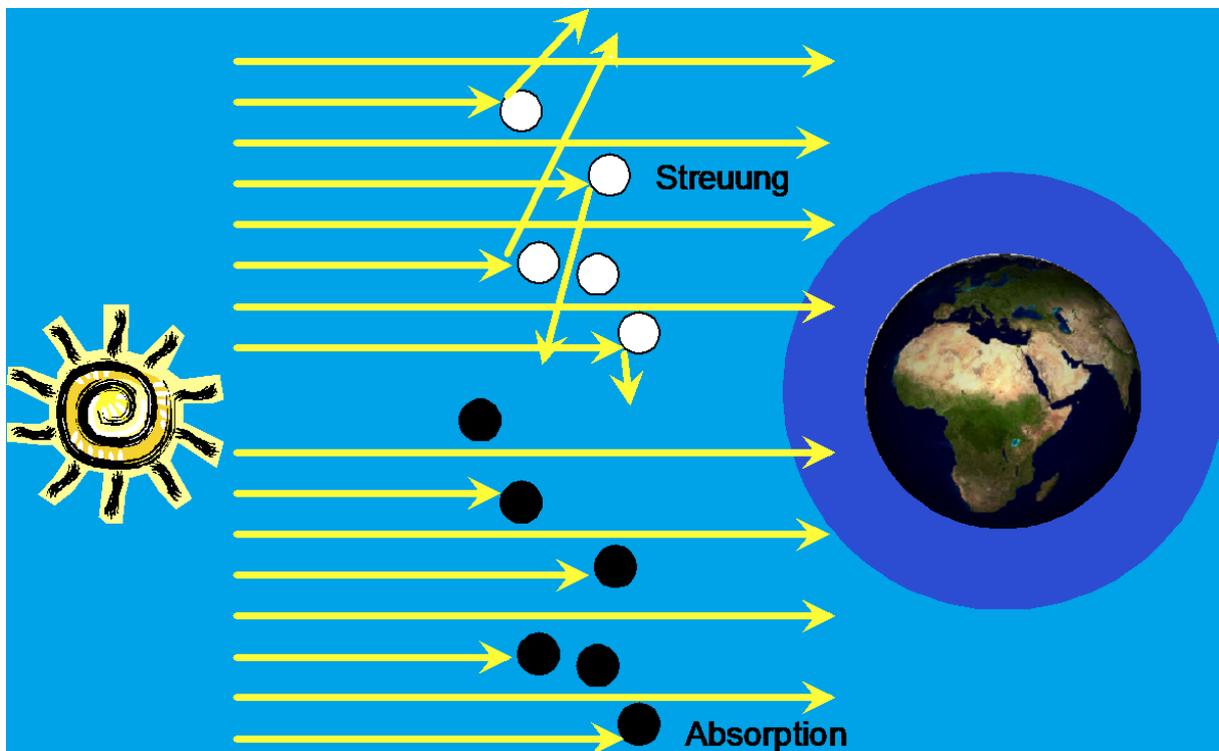


Abbildung 7: Erwärmung durch Absorption (Quelle: E. Weingartner)

Neben ihrem Einfluss auf die Erwärmung der Atmosphäre können Aerosole auch das Reflexionsvermögen des Erdbodens beeinflussen. So setzen sich zum Beispiel aus Verbrennungsprozessen stammende Russpartikel auf Schnee- und Eisoberflächen ab, absorbieren dort Sonnenlicht, erwärmen sich und führen dadurch zu einem Abschmelzen. [11]

Berechnungen zufolge soll allein Black Carbon seit 1890 für eine Erwärmung in der Arktis von 0.5 – 1.4 °C verantwortlich sein. [12]

Theoretische Grundlagen zum Messprinzip

Das Messprinzip der erstellten Messkammer beruht auf der Lichtabsorption von Russpartikel und lässt sich in einfachen Worten an einem Beispiel erklären: Angenommen man leuchtet mit einem ideal gerichteten Laser (0° Streuwinkel) und einer bekannten Lichtstärke (I_0) direkt auf einen Photodetektor, der die Distanz L zum Laser hat, würde man eine geringere Lichtstärke messen, als die die ausgesendet wurde. Grund dafür ist die Lichtabsorption und -streuung, die auf der Strecke zwischen der Lichtquelle und Detektor geschehen. Je mehr Partikel sich in der Luft befinden, desto weniger Photonen werden auf der anderen Seite detektiert. Wie in Abbildung 8: Messung Luft (Quelle: E. Weingartner) aufgezeichnet, lässt sich eine Funktion erstellen, die den Lichtstärkenverlauf abhängig von der durchlaufenen Länge (bei bekannter Partikelkonzentration) aufzeigt.

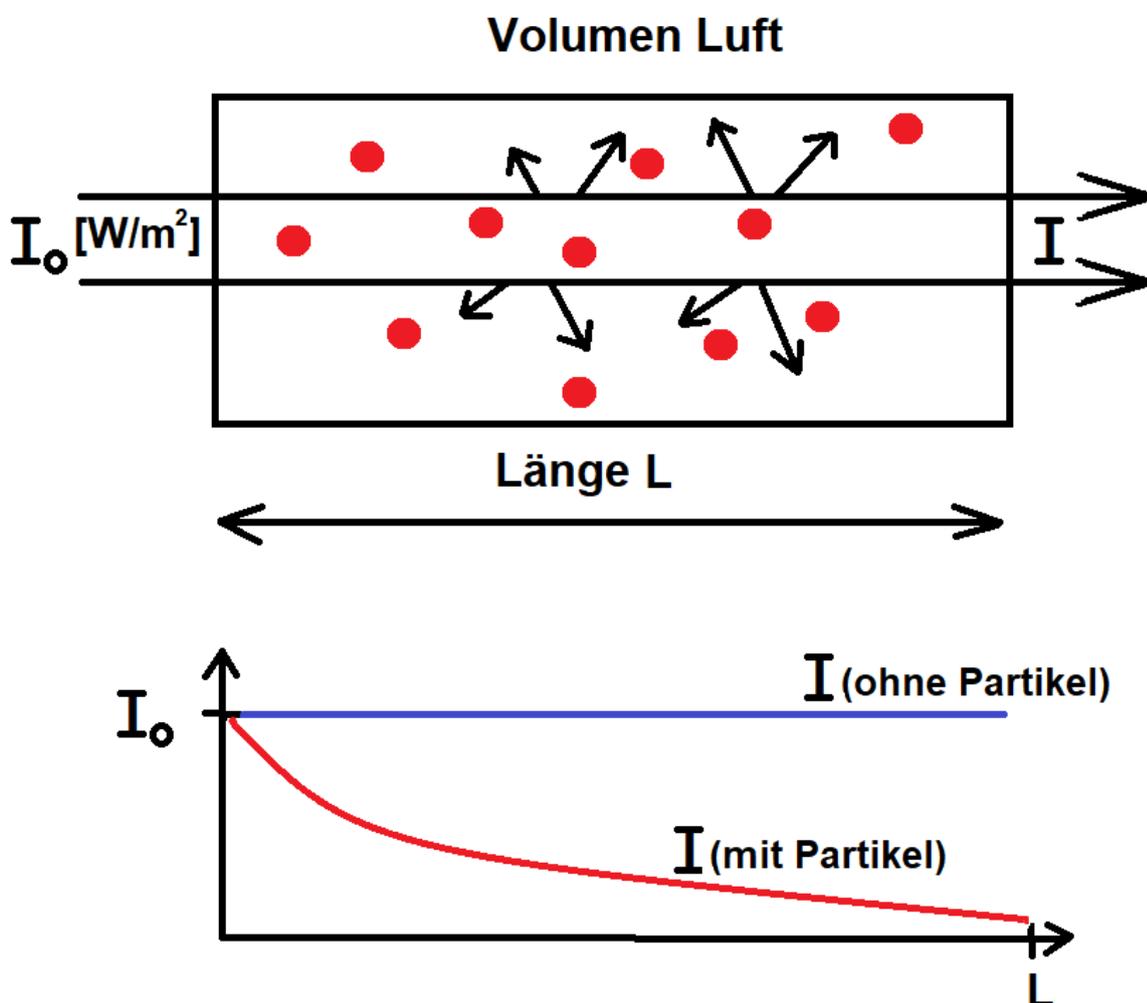


Abbildung 8: Messung Luft (Quelle: E. Weingartner)

Wenn die ausgestrahlte und empfangene Lichtstärke sowie die durchlaufene Distanz bekannt sind, stellt sich die Frage, wie lässt sich die Russkonzentration aus den gemessenen Werten berechnen.

Dafür muss die bekannte Formel von Beer-Lambert verwendet werden (Formel 1: Beer-Lambert):

Formel 1: Beer-Lambert

$$I = I_0 * e^{-L * b_{ext}}$$

Die gemessene Lichtstärke I ergibt sich aus der gesendeten Lichtstärke I_0 und der durchleuchteten Distanz l multipliziert mit dem extinction coefficient b_{ext} $\left[\frac{1}{m}\right]$ (negativ exponentiell zur eulersche Zahl).

Dieser «Auslöschungs Koeffizient» b_{ext} ergibt sich aus dem Streu- und Absorptionskoeffizienten des Materials, in diesem Fall Black Carbon. Die Formel dazu lautet:

$$b_{ext} = b_s + b_{abs}$$

Setzt man die Abschwächung ATN (engl. Attenuation) für $l * b_{ext}$ ein, erhält man:

$$I = I_0 * e^{-ATN}$$

Stellt man die Beer-Lambert-Formel nach der Abschwächung ($l * b_{ext}$) um, erhält man nun daraus die Formel 2: Berechnung der Attenuation:

Formel 2: Berechnung der Attenuation

$$ATN = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

Es ist jedoch schon nur vom technischen Aufwand umständlich, in der freien Natur über grosse Distanz solch eine Messung aufzubauen. Man müsste eine freie Strecke finden, auf der man einen starken Leuchtkörper aufstellen könnte, einen Detektor in ferner Distanz ausrichten, um ein genaues Signal zu empfangen und über längere Zeit verhindern, dass die Messstrecke nicht durchbrochen wird, damit die Werte unverfälscht bleiben. Ebenfalls würde die Streuung der Partikel mitgemessen werden. Um diesen Aufwand zu umgehen lässt sich die Messdistanz folgendermassen simulieren: Über eine Pumpe wird ein bestimmtes Luftvolumen durch einen **Filter** gezogen, durch was auch die Streuung unterdrückt wird. Wenn der Luftstrom bekannt ist und die durchflossene Filterfläche kann man daraus das Luftvolumen berechnen, das sich pro Zeiteinheit durch den Filter begibt.

$$\frac{\Delta Vol}{\Delta t} = v * A$$

Man kann davon ausgehen, dass alle Russpartikel dieses Volumens sich in Filter absetzen. Dieser wird von einer Seite durchleuchtet. Auf der anderen Seite befindet sich der Photodetektor und misst die Ausgangslichtstärke. Somit kann man grössere Luftvolumen auf kürzeste Distanz durchleuchten, dafür wird jetzt allerdings eine vom Luftfluss abhängige Zeit benötigt.

Über die Umrechnung mit der Zeit und der Filterfläche lässt sich erneut die Beer-Lambert-Formel anwenden. Mit der Ableitung der Sättigungskurve lässt sich der Sättigungskoeffizient berechnen:

$$b_{ATN} \cong \frac{A}{Fluss} * \frac{\Delta ATN}{\Delta t}$$

Als letzter Schritt wird der Koeffizient durch den MAC (Mass Absorption Coefficient) und der Konstanten C, die durch die Mehrfachstreuung des Filters entsteht, geteilt (es gilt zu beachten, dass im Filter die Streuung der Russpartikel vernachlässigt werden kann).

Daraus ergibt sich die Formel 3: Berechnung der Russkonzentration in der Luft, welche in diesem Projekt verwendet wird:

Formel 3: Berechnung der Russkonzentration

$$M_{BC} = \frac{b_{ATN}}{C * MAC}$$

Theorie zur Lichtmessung

Um die gemessenen Licht- oder Beleuchtungsstärken interpretieren zu können, wird der physikalische Zusammenhang und die benötigte Formel anhand eines Beispiels kurz erklärt.

Aus dem Datenblatt (Abbildung 9: Beispiel Datenblatt RGB Diode) der ausgewählten Diode erhält man die ausgestrahlte Lichtstärke I_0 in Candela (hier in tausendstel Einheit) bei der entsprechenden Farbe.

Electrical and Optical Characteristic (@ 25 degree C)

Parameter	R	G	B	Test Condition
Luminous Intensity:				
Min (mcd)	1600	2000	1000	If=20mA
Typ (mcd)	3200	4000	2000	If=20mA
Forward voltage (Vf)				
Typ	2.0	3.4	3.4	If=20mA
Max	2.6	3.8	3.8	If=20mA
Dominant Wavelength (nm)	624	525	470	If=20mA

Abbildung 9: Beispiel Datenblatt RGB Diode

Die empfangene Beleuchtungsstärke $\left[\frac{cd}{m^2}\right]$ ist abhängig von 2 verschiedenen Winkeln und der Distanz r . Der Winkel θ bezeichnet den Versatz zur Mittellinie des Lichtstrahls. Der Winkel φ bezeichnet die Abweichung einer Beobachtungsfläche zur senkrechten Ausrichtung zur Lichtquelle. Der Aufbau wird graphisch in der Abbildung 10: Physik Lichtstärke gezeigt.

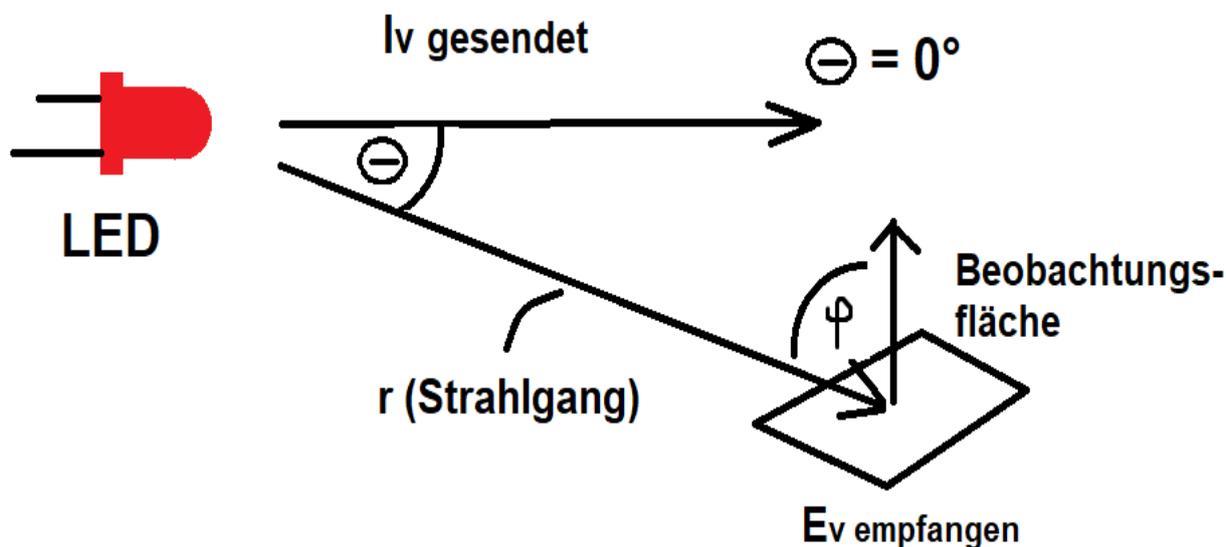


Abbildung 10: Physik Lichtstärke (Quelle: M. Oscity)

Die dazugehörige Formel 4: Berechnung der Beleuchtungsstärke sieht gemäss M. Oscity (Dozent für Wärme und Strahlung) folgendermassen aus:

Formel 4: Berechnung der Beleuchtungsstärke

$$E_v = \frac{I_v(\theta)}{r^2} * \cos(\varphi)$$

$I_v(\theta)$ ist aus der Abstrahlcharakteristik (welche sich im Datenblatt einer Diode befindet) zu entnehmen. Ein zugehöriges Beispiel zeigt Abbildung 11: Beispiel Abstrahlcharakteristik RGB Diode. So wären bei dieser verwendeten Diode bei einem Winkel θ von 30° nur noch 50% der Lichtstärke messbar.

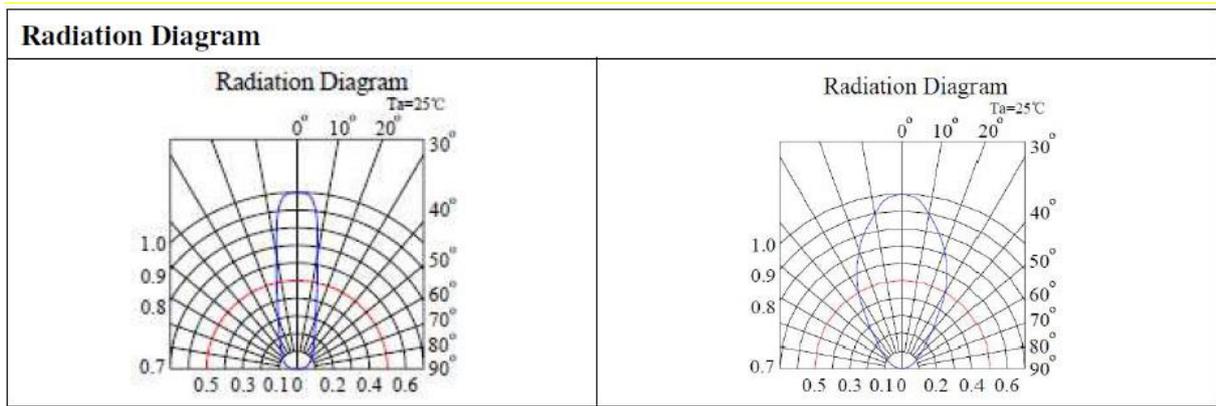


Abbildung 11: Beispiel Abstrahlcharakteristik RGB Diode

Das berechnete Ergebnis aus der Formel hat die Einheit $\left[\frac{cd}{m^2}\right]$ und wird Beleuchtungsstärke E_v genannt. Um wieder zurück auf eine Lichtstärke zu gelangen, damit man den prozentualen Abfall über den Filter bestimmen kann, muss im nächsten Schritt das Ergebnis mit der Aufnahme­fläche A_{Sensor} des Sensors multipliziert werden und dadurch erhält man die empfangene Lichtstärke I , durch welche sich somit die Abschwächung ATN für die Beer-Lambert Formel bestimmen lässt.

Wenn man an den absoluten Werten der Lichtmessung nicht interessiert ist, sondern nur an den prozentualen Änderungen, kann man auf die Umrechnung von E_v in I verzichten und nur den Verlauf der Beleuchtungsstärke E_v betrachten.

Erkenntnis: Um ein möglichst hohes Messsignal zu erhalten, sollte E_v beziehungsweise I so gross wie möglich werden. Aus der Formel lässt sich deshalb schliessen, dass die Distanz zwischen der Lichtquelle und dem Sensor so gering wie möglich gehalten und der Sensor geradlinig und vollkommen senkrecht zur Lichtquelle ausgerichtet werden soll.

Vergleich Messaufbau zum «High-Cost» Aethalometer

Wie in der Ausgangslage beschrieben, sollte ein bereits bestehendes, teures Aethalometer vereinfacht nachgebildet werden. Das Aethalometer das als Referenz dafür dient ist das **Magee Scientific Aethalometer® Model AE33** [13] und kostet auf Anfrage ungefähr: 25'000.- CHF. In diesem Kapitel wird der Aufbau des Low-Cost Absorptionsphotometer beschrieben und mit dem AE33 verglichen.

Aufbau Magee Scientific Aethalometer® Model AE33

Das AE33 basiert auf dem patentierten DualSpot™ Messprinzip. Dabei werden zur selben Zeit zwei Filterbereiche parallel durchleuchtet und mit Russ belegt. Ebenfalls gibt es noch eine Referenzmessung, die auch von der gleichen Quelle durchleuchtet wird, bei der jedoch kein Russ abgelagert wird. Da idealerweise alle Bereiche mit derselben Lichtstärke durchleuchtet werden, dient der unbelegte Spot als Referenz (Nullpunkt), während die Spots, an denen sich der Russ abgelagert, ständig schwärzer wird (Abbildung 12: Messprinzip Dual Spot). Hinter beiden Spots wird die Lichtstärke gemessen. Aus der Differenz zwischen den Messungen zur Referenz berechnet man gemäss den Beer-Lambert Formeln die Attenuation und somit die Russkonzentration in der Luft.

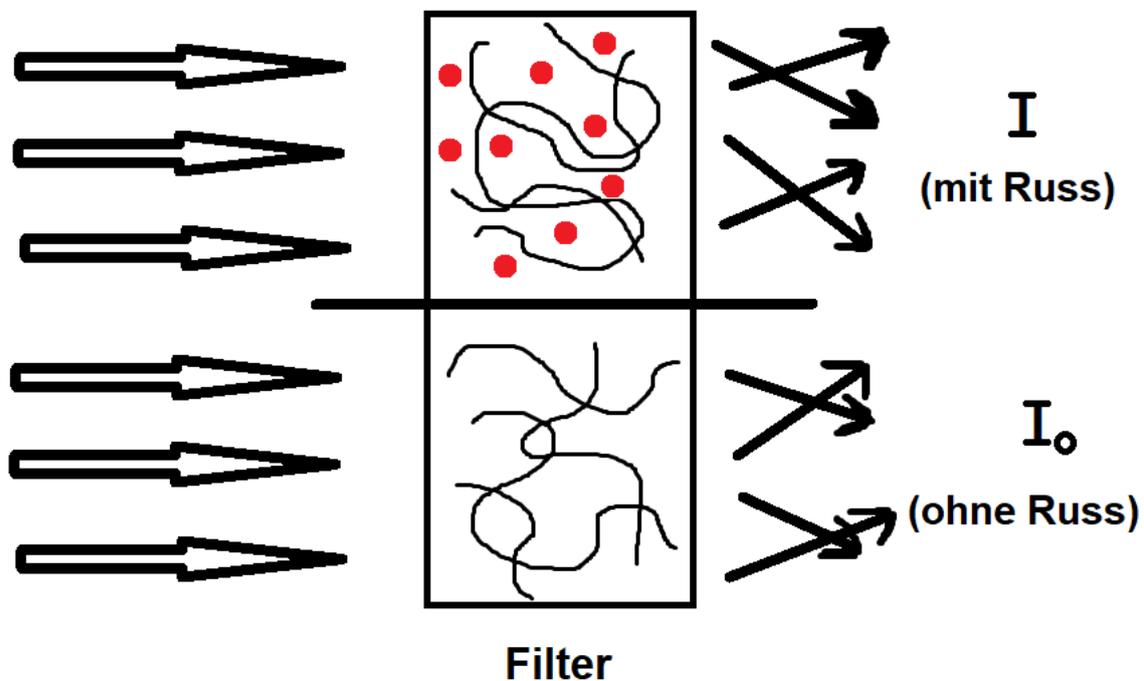


Abbildung 12: Messprinzip Dual Spot

Durch diese Methode ergeben sich mehrere Vorteile:

- Die ausgestrahlte Lichtstärke der Lichtquelle muss nicht bekannt sein. Denn für Berechnung reicht die gemessene Lichtstärke der Referenz als maximalen Wert (unbelegter Filter).
- Die Absorption des Filters kann ignoriert werden, da nur die Differenz der beiden Spots gebraucht wird.
- Schwankungen der Lichtquelle werden irrelevant, da die Differenz zwischen den Messungen verwendet wird, und die Schwankungen somit ausgeglichen werden.

Neben der Referenzmessung ist ein weiteres Merkmal des AE33 die **Einsetzung verschiedener Wellenlängen** bei der Messung. So wird die Sättigungskurve für 7 verschiedene Wellenlängen erstellt. Da der spezifische Absorptionskoeffizient von BC und organischem Kohlenstoff verschieden

ist, und sich jeweils auch bei jeder Wellenlänge anders verhält, können durch diese Mehrzahl von Messungen nicht nur die Attenuation in der Luft gemessen, sondern auch das Material detektiert werden.

Ein technisches Merkmal des AE33 ist das automatische Filterband. Wenn eine bestimmte Sättigung bei der Messung erreicht ist, fährt das Aethalometer automatisch auf eine unbelegte Stelle des Filtersbands weiter. Das ermöglicht langzeitiges Messen ohne manuelles Eingreifen.

Aufbau Low-Cost Absorptionsphotometer

Das Low-Cost APM beruht auf dem Single Spot Prinzip. Es arbeitet nicht wie das Aethalometer mit einer kontinuierlichen Referenzmessung, bei der Schwankungen der Lichtquelle ausgeglichen werden, sondern es wird eine einmalige Referenzmessung genommen, was den Aufbau vereinfacht, indem auf den 2. Spot verzichtet wird (Abbildung 13: Messprinzip Low-Cost Absorptionsphotometer). Dabei wird bei un- oder teilbelegtem Filter zu Beginn der Messung die Lichtstärke gemessen und als I_0 gespeichert. Die Schwärzung des Filters wird dann relativ zu dieser Referenzmessung berechnet. Dafür muss die Annahme getroffen werden, dass sich I_0 über die ganze Messung hinweg nicht verändert (es keine Schwankungen in der Lichtstärke der Diode hat), sondern alle Änderungen im Messwert nur auf die Russkonzentration zurückzuführen sind. Welche Messgenauigkeit mit diesem Aufbau erreicht wird, ist im Kapitel Messgenauigkeit ersichtlich.

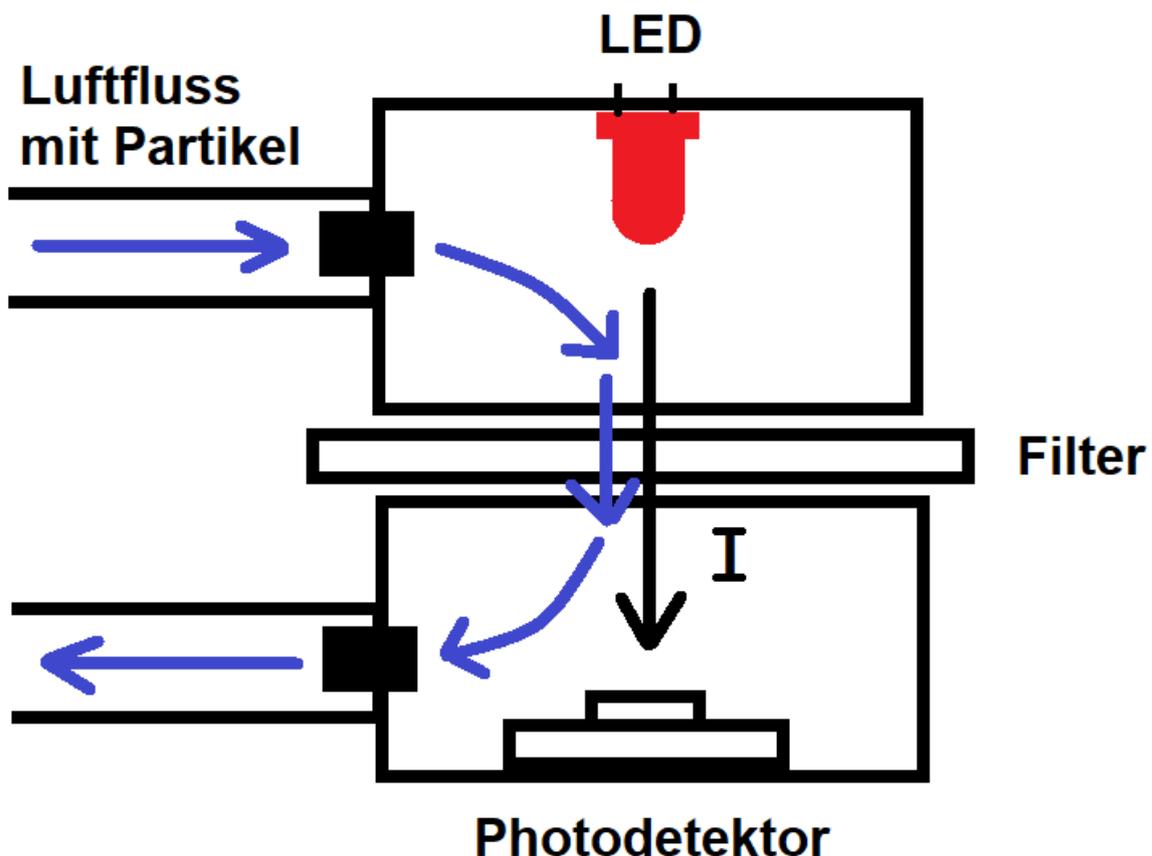


Abbildung 13: Messprinzip Low-Cost Absorptionsphotometer

Die Vorteile der Low-Cost Variante zeigen sich wie folgt:

- Günstiger und kleiner Aufbau wegen geringer Anzahl verwendeter Komponenten
- Einfache Implementierung im Code wegen geringer Anzahl Eingängen
- Stabile Messungen über längerer Zeit trotz Single Spot

Die Low-Cost Variante verfügt zwar nur über eine Lichtquelle, einer RGB Diode, aber somit trotzdem über 3 verschiedene Wellenlängen. Damit lassen sich ebenfalls 3 wellenlängenabhängige Sättigungskurven erstellen und somit theoretisch gemäss materialspezifischen Absorptionskoeffizient verschiedene Russorten detektieren.

Der Filter muss nach jeder Messung manuell von Hand gewechselt werden. Das führt zu einem Mehraufwand, spart jedoch auch wieder an Kosten an Material und Energieverbrauch ein.

Vergleich Aufbau

Die nachfolgende Tabelle 1 soll eine Übersicht über die grundlegenden Unterschiede der beiden Varianten dienen:

	Magee Scientific (AE33)	Low-Cost Photoabsorptionsmeter
Kosten	25'000 CHF	<150 CHF
Referenz	Dual Spot	Single Spot
Anzahl Wellenlängen	7	3
Echtzeit-Anzeige	Ja	Ja (Minuten Werte)
Filter	Autom. Filterband	Einzeln von Hand
Schnittstellen	USB, Serial, Ethernet	SD-Karte
Messgenauigkeit	<100ng/m ³ BC bei einer Zeitauflösung (Integrationszeit) von wenigen Minuten	~100ng/m ³ BC bei einer Zeitauflösung (Integrationszeit) von einer Stunde

Tabelle 1: Vergleich Aufbau

Das AE33 hat wie erwartet in allen Punkten qualitativ mehr zu bieten als die Low-Cost Variante. Der geringere Preis jedoch, in Verbindung mit aussagekräftigen Messwerten, macht das Low-Cost APM zu einem ansprechenden Produkt. **Vorteilhaft erweist sich die Low-Cost Variante besonders für finanziell limitierte Institutionen und an ärmeren Ortschaften.**

Im Kapitel Erweiterungsmöglichkeiten werden jedoch Hinweise gegeben, wie sich die Qualität des Low-Cost Absorptionsphotometers steigern lässt und was für Erweiterungsmöglichkeiten es noch gäbe.

Auswahl des Materials

Bei der Auswahl der Komponenten für den Messaufbau gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten. Gemäss Aufgabenstellung steht jedoch der **Low-Cost Gedanke** im Vordergrund. Das hat zur Folge, dass möglichst kostengünstige Komponenten verwendet werden. Teils wird sogar auf qualitätssteigernde Massnahmen verzichtet, um die Kosten gering zu halten.

Somit werden die notwendigen Funktionen des Low-Cost APM betrachtet und passende Hardware gesucht, welche die Anforderungen erfüllt. Gemäss definiertem Messaufbau muss Russhaltige Luft durch einen Filter gesaugt werden, wobei dieser von einer Lichtquelle durchleuchtet wird und auf der anderen Seite die Abnahme der Lichtstärke im Verlauf der Zeit gemessen wird. Diese Daten sollen zur Auswertung abgespeichert werden und dem Anwender zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich soll gemäss Aufgabenstellung eine Anzeige an dem Messgerät montiert werden, an der die Lichtwerte dargestellt werden. Sämtliche Funktionen sollten nach einem definierten Ablauf gesteuert werden. Ebenfalls wird eine Speisung der Komponenten und der Steuerung benötigt.

In Abbildung 14: Blockdiagramm APM Funktionen ist der funktionelle Aufbau mit den Systemgrenzen des Low-Cost APM dargestellt:

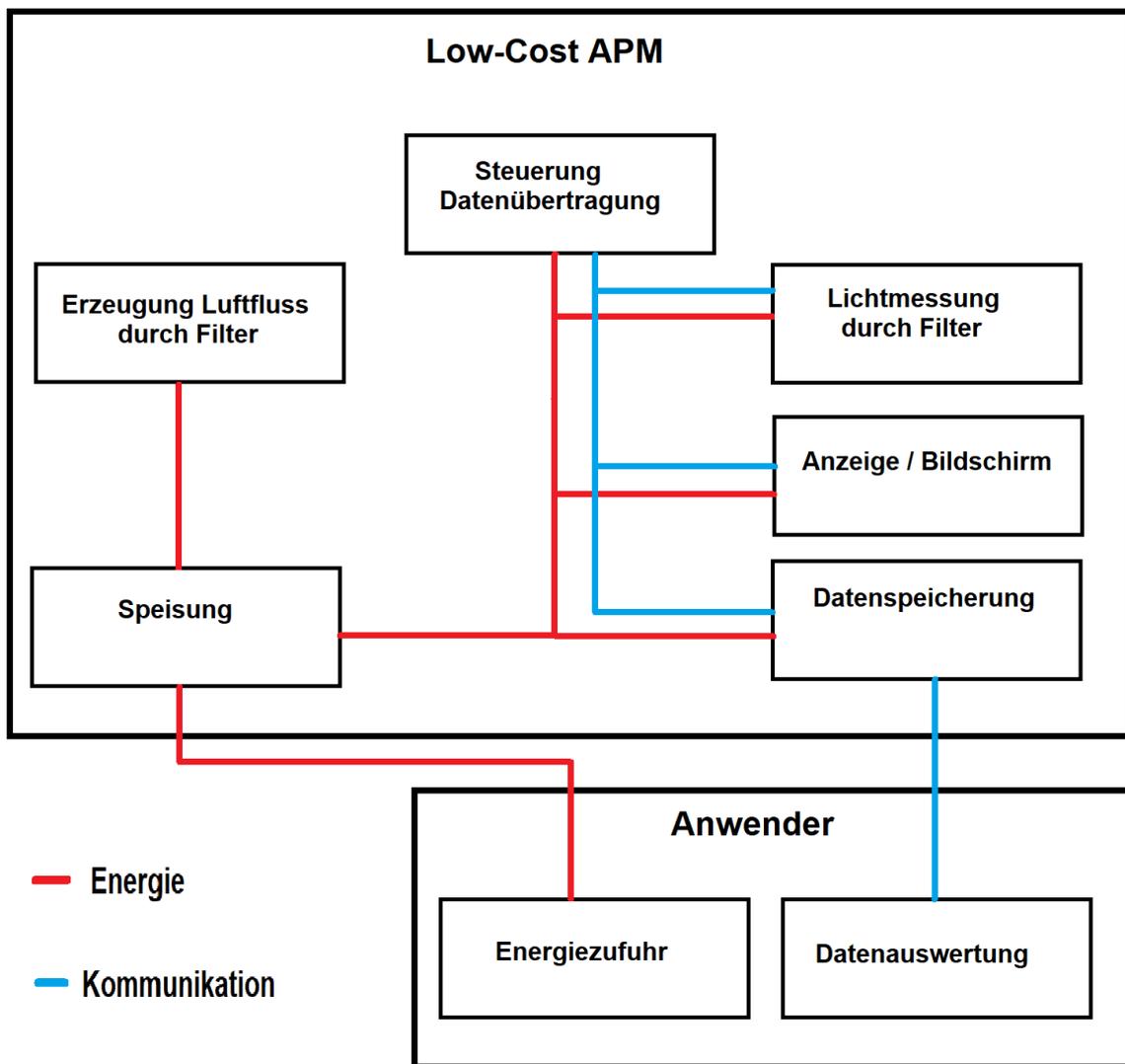


Abbildung 14: Blockdiagramm APM Funktionen

Anforderungen und Beschreibung der Funktionen

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an die Funktionen beschrieben und es wird begründet, auf welche Massnahmen verzichtet wurden, um den Low-Cost Gedanken zu verfolgen. Jedoch werden auch Möglichkeiten beschrieben, um die Qualität der Messungen zu erhöhen, wobei es jedem Anwender freisteht, nach **eigenem Belieben** das Messgerät umzugestalten und für einen vielleicht etwas **höheren Preis eine höhere Messgenauigkeit** zu erzielen.

Steuerung

Die Steuerung des Low-Cost APM ist für Lichtmessung verantwortlich und sendet die eingelesenen Daten an die Anzeige und auf das Speichermedium. Die Aufgaben der Steuerung bringen einige Anforderungen mit sich. So sollte die Steuereinheit:

- genügend Ein- und Ausgänge besitzen (mind. 3 digitale Ausgänge bei Verwendung einer RGB-Diode. Falls ein analoger Sensor verwendet wird mind. 1 analogen Eingang)
- Kommunikationskanäle besitzen (Eine I²C Schnittstelle für das Display und für den digitalen Lichtsensor, falls kein analoger verwendet wird)
- Einen Zeitgesteuerten Ablauf ermöglichen (für die exakte Datenspeicherung sehr wichtig)
- Veränderbares Programm (für Optimierungsanpassungen und zusätzliche Funktionen)

In diesem Projekt wird ein fertiges Arduino Board eingesetzt, da dieses die Mindestanforderungen erfüllt und preisgünstig ist. Es bieten sich jedoch viele Möglichkeiten zum Erreichen der Ziele. Je nach Wahl eines eingesetzten Mittels lassen sich zusätzliche Funktionen einbauen, z.B. ein Bedienpanel, eine Luftflussregelung oder zusätzliche Schnittstellen (USB, Ethernet) zur Datenübertragung.

Lichtmessung

Die Messung der Attenuation (Beer-Lambert Formel) besteht aus zwei Komponenten: der Lichtquelle und dem Photodetektor. Die Messgenauigkeit ist dabei hauptsächlich abhängig von der Lichtstärke der Quelle und der Quantisierung des Detektors.

Sollte z.B. ein digitaler Sensor zum Beispiel einen Bereich von 0...65'535 (16-bit) haben, könnten damit 2^{16} verschiedene Werte dargestellt werden, unabhängig von den absoluten Russkonzentrationen. Wenn ein unbelegter Filter einem digitalen Wert von 20'000 entspricht und ein vollständig belegter Filter (50% Lichtstärke, ATN = 0.69) einen Wert von 10'000 anzeigen würde, so hätte man 10'000 Einheiten dazwischen und somit eine 10x höhere Messauflösung als wenn der unbelegte Filter den Wert 2'000 hätte und der belegte 1'000 (nur noch 1'000 mögliche für die genau gleiche Russablagerung). Die Messgenauigkeit des APM ist somit proportional abhängig von der Anzahl verwendeter Bits des Detektors.

Die Wahl einer geeigneten Lichtquelle ist ebenfalls wichtig für die Verbesserung der Messgenauigkeit, denn ein Photodetektor mit einem Bereich von 2^{16} bringt alleine nicht viel ein, wenn die Lichtquelle so schwach ist, um bei einem unbelegten Filter z.B. den Wert 500 zu erreichen, und somit weniger als 1% des Möglichen ausschöpft (und dadurch die Messgenauigkeit um den Faktor 100 verschlechtert). Die Lichtquelle sollte deshalb im Idealfall so ausgelegt werden, dass bei einem unbelegten Filter der maximale Wert des Lichtdetektors angezeigt wird, damit der ganze Bereich ausgeschöpft werden kann.

Je mehr Bits der Detektor zur Verfügung stellt und je mehr die Lichtquelle davon ausnutzt, desto genauer wird die Messung (wenn Quelle und Detektor stabil sind).

Begrenzt wird die Lichtmessung durch die (Verlust-)Leistung der Lichtquelle. Je mehr Watt die RGB-Diode hat, desto teurer wird sie und erwärmt sich auch stärker. Ab einer bestimmten Erwärmung wäre es dann sinnvoll, einen Kühlkörper einzubauen, was zu einem grösseren Konstruktionsaufwand führt.

Achtung: Durch den Filter entstehen ebenfalls eine Streuung und Absorption des Lichts und somit eine geringere gemessene Lichtstärke.

Erzeugung Luftfluss

Damit die Messung stattfinden kann, muss ruschaltige Luft durch einen Filter gesaugt werden. Dieser Luftfluss ist kritisch bezüglich Qualität der Messung. Je mehr Liter pro Minute gezogen werden, desto schneller und genauer werden Konzentrationsänderungen registriert. Dementsprechend ist ein hoher Luftfluss wünschenswert, jedoch muss auf den Filter Rücksicht genommen werden, da dieser nicht unbegrenzt belastbar ist und durch einen zu hohen Volumenstrom beschädigt oder sogar zerstört werden kann.

Um den Luftfluss konstant zu halten wurde in diesem Projekt eine kritische Düse verwendet, welche einen Druckabfall von mindestens 500mbar über der Düse erfordert. Diese Düse ist jedoch das teuerste Bauteil der gesamten Messung und in ärmeren Gegenden der Welt wahrscheinlich nicht so leicht zu beschaffen. **Deshalb wird diese in der Bauanleitung nicht miteinbezogen, aber es steht jedem Anwender selbst zu, eine kritische Düse oder eine Luftflussregelung einzubauen.** In der Anleitung wird gezeigt, wie man den Luftfluss auf einfache Weise messen und mit diesem Wert die Berechnungen durchführen kann. Dass der Luftfluss konstant bleibt ist lediglich eine Annahme und führt zu Qualitätseinbussen, jedoch auch zu Kosteneinsparungen und einem einfacheren Aufbau, was Ziel des Projektes ist.

Datenspeicherung

Der eigentliche Zweck des Low-Cost APM liegt in der Erzeugung von Information zur Russkonzentration. Diese gewonnenen Messwerte, welche sich über Tage erstrecken und somit zu Tausenden aufsummieren können, müssen bis zur Auswertung abgespeichert und mit einem Zeitstempel versehen werden. Dementsprechend benötigt man eine Uhr mit der genauen Zeit und dem Datum (Real Time Clock – RTC) und einem Speichermedium, welches über genügend Speicherplatz verfügt. Wobei bemerkt werden muss, dass die erzeugten Text-Dateien je nach Messdauer einen Speicherplatz von weniger als 1MB benötigen.

Auch für diesen Punkt bieten sich mehrere Optionen, welche dem Nutzer mit ein bisschen Eigenaufwand zur Verfügung stehen. So wäre eine direkte Übertragung auf einen PC mittels USB-Schnittstelle oder Bluetooth möglich, welche in diesem Projekt allerdings nicht integriert sind. Die einfachste und in dieser Dokumentation beschriebene Variante ist die Verwendung eines fertigen Data-Logger Shields, welcher für die Aufgabe mit geringem Aufwand verwendet werden kann.

Anzeige / Bildschirm

Der Messvorgang lässt sich über die Anzeige von Auge beobachten. An dem integrierten Bildschirm werden die aktuellen Lichtwerte und errechnete Russkonzentration angezeigt. Somit liessen sich alle Messwerte auch von Hand erzeugen, was an einem Ort ohne PC sehr von Vorteil ist. Zusätzlich lässt sich überprüfen, ob die Lichtwerte im erwarteten Bereich liegen.

Über den Bildschirm wäre es möglich, noch weitere Daten anzuzeigen, zum Beispiel wenn der Filter voll ist, oder man könnte noch ein User-Interface hinzufügen, falls weitere Funktionen hinzugefügt werden.

Speisung

Damit die einzelnen Elemente funktionieren, müssen sie elektrisch gespeist werden. In diesem Projekt sind die elektrischen Komponenten auf 12V ausgelegt und werden von einem externen Netzteil gespeist.

Sollte der Anwender ein rein mobiles Gerät, ohne jeglichen Stromnetzanschluss bevorzugen, liesse sich auch ein Akku verbauen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass je nach verwendeter Pumpe der Stromverbrauch ziemlich hoch sein kann.

Sollten Bauteile verschiedener Spannung verwendet werden (z.B. ein Mikrocontroller, der mit 12V gespeist wird und eine Pumpe, die mit 24V betrieben wird) so ist noch ein zusätzlicher Spannungsteiler oder DC/DC-Wandler notwendig.

Verwendete Hardware

Nach den definierten Anforderungen muss die Auswahl für die Hardware getroffen werden. Wie bereits erwähnt bietet sich eine breite Anzahl an möglichen Komponenten, um das Low-Cost APM zu bauen. In diesem Kapitel wird gezeigt, welche Komponenten in diesem Projekt eingesetzt wurden.

Steuerung – Arduino Uno R3

Das **Arduino Uno** ist ein vorzügliches Entwicklungsboard, auf dem man einfach und übersichtlich programmieren kann und ist somit das Hirn des Low-Cost APM. Es steuert den Ablauf und speichert die Daten zur Auswertung auf dem **Adafruit Data Logger Shield** ab. Arduino bietet genügend Ein-/Ausgänge für das Projekt und hat eine I²C Schnittstelle für die Kommunikation mit dem LCD und dem Photodetektor. Die Vielzahl an frei zugänglichen Libraries reduziert den Programmieraufwand erheblich, da sich mit deren Einbeziehung die Ansteuerung der Komponenten auf einzelne Befehle reduziert (anstatt mehrere Zeilen Register Programmierung). Auch gibt es eine grosse Anzahl an nützlichen Erweiterungen für das Arduino, wie den Daten Logger Shield von Adafruit, welcher in diesem Projekt ebenfalls verwendet wird.

Ein weiterer Vorteil des Arduino Uno ist der geringe Preis, was es zur ersten Wahl vor einer eigenen Entwicklung macht und die grosse Bekanntheit bei Bastlern, welche zur Zielgruppe zur Nachbildung dieses Projekts gehören. Weitere technischen Angaben sind in der Tabelle 2: oder auf der Website² ersichtlich.

² <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>

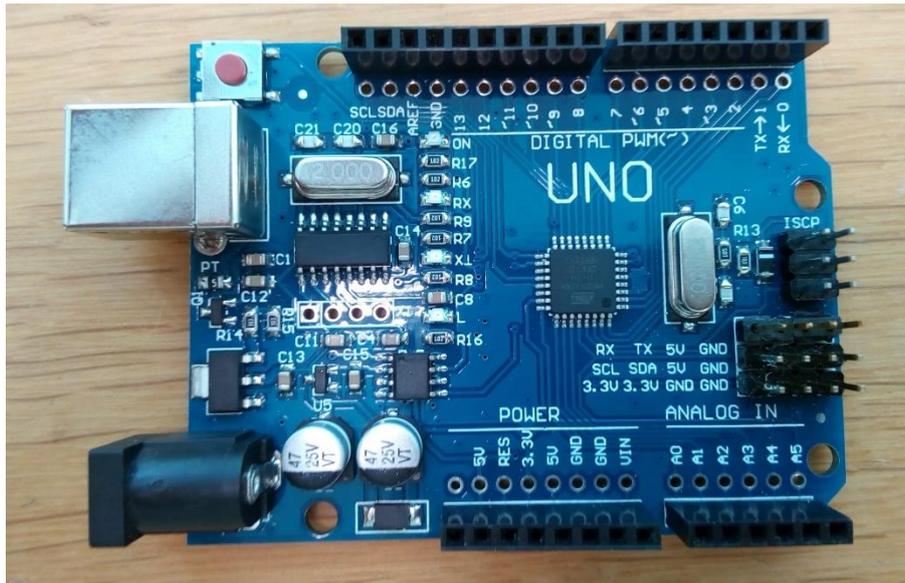


Abbildung 15: Material - Arduino Uno

Lichtquelle – RGB Diode KY-016

Um den Aufbau so einfach wie möglich zu halten, wurde als Lichtquelle die **RGB-Diode KY-016** aus dem Arduino-Kit verwendet. Durch den Einsatz dieser Diode lassen sich 3 verschiedene Wellenlängen, nämlich Rot (**624nm**), Grün (**525nm**) und Blau (**470nm**), für die Messung verwenden, was theoretisch die Erkennung verschiedener Russ Sorten ermöglicht. Die Diode benötigt einen geringen Strom von 20mA und ist im Kit bereits auf einer kleinen Platine mit den notwendigen Vorwiderständen verlötet. Der Preis beläuft sich auf unter einem Dollar pro Stück, was die RGB-Diode zu einer praktischen Komponente dieses Messaufbaus macht.

Photodetektor - TSL2561 (Grove Digital Light Sensor)

Von den Mitarbeitern des Instituts wurde aus Erfahrung der **TSL2561 Photodetektor** mit integriertem A/D-Wandler und Signalverstärkung empfohlen. Durch die vorhandene Wandlung lässt sich ein Analogeingang am Arduino und ebenfalls einiges an Code einsparen. Auch durch die bereits vorhandene Bibliothek (im Anhang), erfolgt die Auswertung des Sensors über lediglich ein paar Zeilen Code. Der Detektor erkennt Wellenlängen zwischen 300nm (UV) und 1000nm (IR) und liegt somit im perfekten Bereich für die Wellenlängen der eingesetzten RGB-Diode. Der Photodetektor wird über I²C angesprochen. Verwendet wurde der TSL2561 von Seeed Studio (**Grove Digital Light Sensor**).

Liquid Crystal Display - hd44780 (mit I²C Adapter)

Zur Anzeige der aktuell gemessenen Lichtwerten wird ein LCD verwendet, nämlich das **hd44780 mit I²C Adapter**, welcher für die Ansteuerung des Displays notwendig ist, weil sonst mehrere digitale Outputs des Arduinos verwendet werden müssten. Das hd44780 bietet eine 2-Zeilige Anzeige mit je 16 Charakteren, was ausreicht, um die aktuellen Lichtwerte zu präsentieren. Die Vorteile dieses Displays liegen darin, dass bereits zahlreiche Bibliotheken (im Anhang) und Hilfestellungen dazu verfügbar sind, was den Eigenaufwand reduziert und der günstige Preis des LCDs.

Filter – 8x2-lagiges WC Papier

Für den ersten Aufbau des Prototypen und die ersten Messungen wurde das Filterband des AE33 verwendet, welches jedoch relativ teuer ist. Im P6 wurde dies jedoch durch 8 Schichten von 2-lagigem (also 16 Lagen) WC Papier ersetzt. Bei der Anzahl Lagen muss ein Kompromiss zwischen Licht- und Partikelabsorption eingegangen werden. Je weniger Lagen verwendet werden, desto mehr Licht dringt durch den Filter, was zu einem besseren Messsignal führt, jedoch hält das WC Papier weniger Russpartikel zurück und die Messung wird dadurch ungenauer. Andererseits ist bei mehreren Schichten an WC Papier die Partikelabsorption sehr hoch, dafür dringt weniger Licht durch den Filter und die Messgenauigkeit nimmt wiederum ab.

Der Filterwechsel findet immer noch von Hand statt, aber der Aufwand ist nicht allzu gross und die Kosten sind geringgehalten.

Vakuumpumpe - Mikromembranpumpe

Für den Aufbau bieten sich mehrere verschiedene Pumpen. So kann zum Beispiel eine günstige Drehschieberpumpe eingesetzt werden. Wegen dem Filter in der Messkammer wird jedoch der Luftstrom abnehmen und muss zu Beginn durch eine Messung bestimmt werden. Zur Vereinfachung gilt die Annahme, dass der Fluss sich während der Messung nicht ändert.

Da die Qualität der Messung stark vom bekannten Luftstrom abhängt, gibt es die Möglichkeit den Luftfluss zu regeln. Dafür wurde in diesem Projekt eine kritische Düse eingesetzt. Diese verlangt jedoch einen Differenzdruck von mehr als 500mbar. Dafür lässt sich am besten eine Membranpumpe verwenden, da diese Pumpengattung tiefe absolute Druckwerte erreicht. Für den ersten Testaufbau wurde eine Micromembran Pumpe vom Hersteller KNF verwendet. Diese wird mit 24V betrieben und erreicht einen Druckdifferenz von ungefähr 1bar. Die mögliche Fördermenge liegt bei ungefähr 3 l/min, welche jedoch durch die kritische Düse reduziert wird. Der Preis für diese Pumpe liegt jedoch bei mehr als 100.- CHF sehr hoch und wird deshalb durch ein günstigeres Modell ersetzt, welche die Anforderungen auch erfüllt und einen deutlich geringeren Preis verlangt (<20.- CHF).

Kritische Düse (optional)

Die kritische Düse wird in diesem Projekt rein optional verwendet, um die Messwerte mit einem genauen Luftstrom berechnen zu können, was die Messunsicherheit reduziert.

Das Prinzip der kritischen Düse wird nachfolgend grob beschrieben: Im Hals einer Düse wird Schallgeschwindigkeit erreicht, wenn der absolute Eingangsdruck vor der Düse mindestens doppelt so groß ist wie der Ausgangsdruck. Diese kann in der Engstelle nicht überschritten werden. Der Volumenstrom auf der Eingangsseite kann sich dann nicht mehr erhöhen. Der Massen- und Normvolumenstrom erhöht sich jedoch mit der Gasdichte, die von Druck und Temperatur abhängig ist. [14] Die im Projekt eingesetzte kritische Düse erreicht bei erforderlichem Druckunterschied einen Volumenstrom von **1.7 Liter/min**.



Abbildung 16: Pumpe mit kritischer Düse

Messkammer – 3D Druck

Die Messkammer wurde aus **schwarzem PLA** mit dem **3D-Drucker Ultimaker S5** gefertigt. Bei der Geometrie ist gemäss Formel von Beer-Lambert darauf zu achten, die Distanz zwischen Lichtquelle und Detektor möglichst gering zu halten, da die Lichtstärke über der Distanz im Quadrat abnimmt und der Detektor soll senkrecht unter der Quelle montiert werden. Für den Filterspot wurde im Gehäuse von der oberen zur Unteren Messkammer ein Loch mit dem **Durchmesser von 1cm** vorgesehen. Weitere Öffnungen benötigen die beiden Luftanschlüsse und PG-Verschraubungen zur Abführung der Kabel zum Arduino. Die Öffnungen müssen durch eine Dichtung und notfalls mit ein wenig Silikonmasse abgedichtet werden. Der Filterhalter wird durch eine **2-Teilige Messkammer** realisiert, wo der Filter dazwischen (mit **Gummidichtung**) eingeklemmt wird. Die «stl»-Datei (Abbildung 17: Vorschau Messkammer CAD) für die Nachbildung der Messkammer ist dem Anhang beigelegt.



Abbildung 17: Vorschau Messkammer CAD

SD-Shield – Adafruit Data Logger Shield

Zur Auswertung der Daten werden alle Messwerte mit der zugehörigen Lichtfarbe, Zeit und Datum Zeilenweise auf die SD-Karte geschrieben. Hierfür wird das **Adafruit Datalogger-Shield** verwendet. Dies ist dafür ausgelegt, direkt auf den Arduino Uno gesteckt zu werden. Der Shield beinhaltet eine RTC (Real Time Clock), die über eine **CR1220 12mm Durchmesser 3V Lithium Knopfatterie** gespeist wird. Ebenfalls gibt es ein SD-Karten Slot, an dem **SD-Karten mit einer Grösse von 32MB bis zu 32GB** eingesetzt werden können (FAT16 oder FAT32 Formatierung). Um eine MicroSD-Karte zu verwenden, muss ein Adapter eingesetzt werden. Die Kommunikation zwischen dem Logger Shield und dem Arduino Uno verläuft bei neueren Versionen des Shields über den 2x3 ICSP Header, bei älteren Versionen besetzt der Shield einige Pins, die dann nicht verwendet werden können. Genauere Informationen sind auf der Website³ von Adafruit angegeben.



Abbildung 18: Material - Data Logger Shield

Speisung

In diesem Projekt wurde ein externes 12V 3A Netzteil mit rundem DC-Stecker verwendet. Als Gegenstück wurde eine Standard Lochplatine verwendet, auf der ein passender weiblicher DC-Stecker angelötet wurde. Dazu werden zwei Klemmen verlötet, an denen +(12V) und -(0V) für die Pumpe und den Arduino abgegriffen werden können. Es ist darauf zu achten, ein Netzteil mit genügend hoher Stromzufuhr zu verwenden, da die Pumpe und der Arduino doch mehrere Ampere ziehen können.

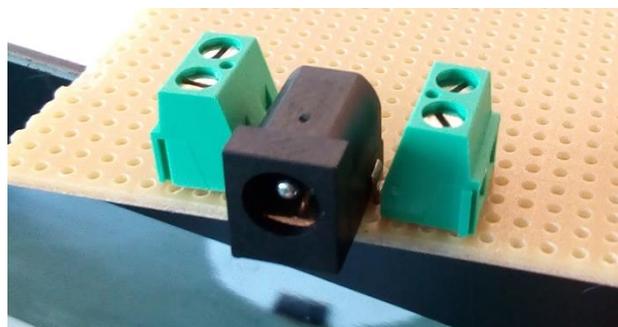


Abbildung 19: Material - Platine Speisung

³ <https://learn.adafruit.com/adafruit-data-logger-shield/wiring-and-config>

Filter

Um den Low-Cost Gedanken zu verfolgen, wird anstatt dem Filterband des AE33 normales 2-lagiges Toilettenpapier eingesetzt. Dieses besteht aus 100% Zellstoff. Wie aus dem CPC (Condensation Particle Counter) Test Abbildung 20: CPC Test 16 Lagen Toilettenpapier hervorgeht, muss das Toilettenpapier jedoch so gefaltet werden, dass 16 Lagen aufeinander liegen, damit mindestens 75% der Partikel, welche einen Durchmesser bis 800nm haben, gefiltert werden. Bei einer geringeren Filtereffizienz wäre das Messresultat zu weit von der Realität entfernt. Sollte man noch mehr Papierlagen als Filter verwenden wollen, würde zwar die Filtereffizienz steigen, jedoch würden die durchdringenden Lichtwerte abnehmen, was zu einer geringeren Messgenauigkeit führt.

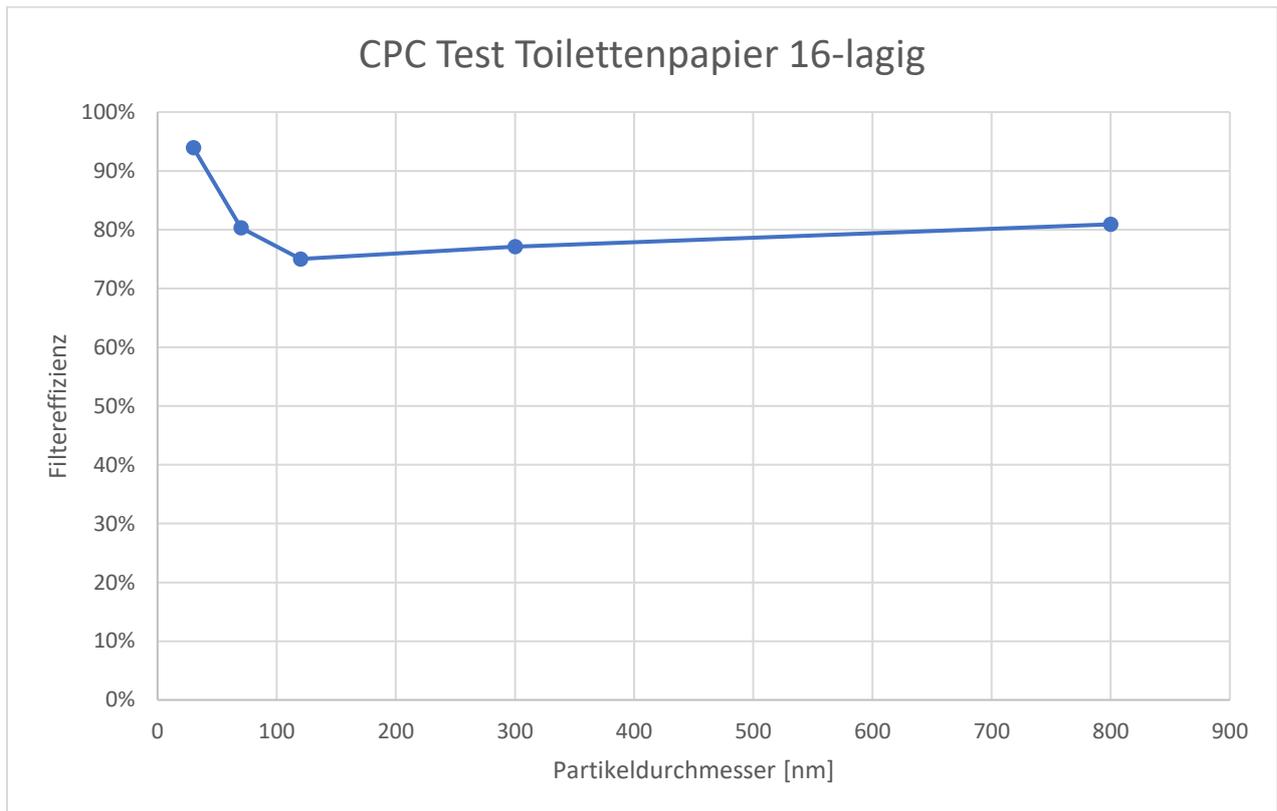


Abbildung 20: CPC Test 16 Lagen Toilettenpapier

Komponenten- und Preisübersicht

Zur Übersicht werden alle verwendeten Komponenten (ohne Schrauben, Luftanschlüssen, etc.) tabellarisch aufgelistet. Eine Bestellliste mit den direkten Links zu den Online Portalen ist dem Anhang beigelegt.

Tabelle 2: Komponenten- und Preisübersicht

	Bezeichnung	Techn. Angaben	Website / Artikel Nr.	Preis CHF
Mikrocontroller	Arduino Uno	ATmega328P, 16MHz	AliExpress	3.00
RGB-Diode	KY-016	$I_f = 20\text{mA}$, $U_{in}=5\text{V}$ ($U_R = 1.8\text{V}$ $U_{G/B}= 2.8\text{V}$)	AliExpress	0.35
Photodetektor	TSL2561 (Grove Digital Light Sensor)	$U = 5\text{V}$, I ² C Ansteuerung, 16x Gain	Mouser 713-101020030	9.68
LCD	LCD1602/hd44780	$U = 5\text{V}$, I ² C Ansteuerung, 16 x 2 Zeichen	AliExpress	0.70
Pumpe	Vakuumpumpe	12V, -800mbar, 12 L/min	AliExpress	20.-
Kritische Düse		1.7 l/min	Bird Precision	
Messkammer	Gehäuse schwarz	Filament PLA 2.85mm schwarz	www.3dware.ch	<20.-
Gehäuse Aufbau	Gehäuse gelb	Filament PLA 2.85mm gelb	www.3dware.ch	<20.-
SD-Shield	Adafruit Data Logger Shield	SD Slot FAT16/FAT32 (32MB...32GB), RTC, 3V Lithium Bat.	Mouser 485-1141	13.64
Filter	Toilettenpapier	2-lagig, 100% Pulp	Vendor 1251	2.-
Verschraubung (2x)	SKINTOP STR-M 12X1,5	1 ... 5mm, M12, Polyamid, Schwarz, Lapp	Distrelec 155-19-375	2.20
Speisung	Netzteil	$U=12\text{V}$, $I=3\text{A}$	AliExpress	8.-
			Gesamt (ohne kritische Düse)	~ 100.-

Da das **Produkt möglichst Low-Cost bleiben** soll, wurde für die Komponentenpreise der günstigste Anbieter gesucht, in diesem Fall ist das meistens über die Suche von www.aliexpress.com.

Die Kosten des Low-Cost APM werden ohne kritische Düse berechnet, da die Verwendung der Düse optional ist, und in dieser Dokumentation eine Messmethode vorgeschlagen wird, in der sie nicht verwendet wird. Jedoch ist der Vorteil (konstanter Luftfluss = kein Drift in den Messresultaten durch veränderten Luftstrom) einer kritischen Düse oder einer Luftflussregelung zweifellos vorhanden und würden bei Verwendung die Kosten den Produkts leicht erhöhen.

Verwendete Software

In diesem Kapitel werden die verwendeten Softwares beschrieben und eine kurze Beschreibung zum Vorgehen und Ressourcen gegeben. Benötigt werden in diesem Projekt Softwares für das Arduino, die Konstruktion der Messkammer, den 3D-Drucker und für die Auswertung der Daten Microsoft Excel und ein selbstgeschriebenes Programm eines Informatik Studenten zur Konvertierung.

Arduino Programmierung – Arduino IDE

Um die Messung durchzuführen, muss die RGB-Diode angesteuert, der Detektor ausgelesen und die Daten auf die SD-Karte geschrieben werden. All diese Schritte erfolgen über den Code, der auf dem Arduino Uno läuft. Programmiert wird der Arduino Uno über die **Arduino IDE** (v1.8.7)⁴. Die dafür verwendete Programmiersprache ist **C**.

Im Hauptprogramm wird der genaue Ablauf definiert. So wird dort hauptsächlich zwischen den Dioden umgeschaltet und die Messwerte auf die SD-Karte geschrieben. Die genaue Codierung zur Ansteuerung der Register für die einzelnen Komponenten erfolgt über die vorgefertigten Funktionen der **inkludierten Bibliotheken**. So kann im Hauptprogramm zum Beispiel der Befehl «SD.flush» verwendet werden, um die Daten auf die SD-Karte zu laden. Aber hinter diesem Befehl steht in der dazugehörigen Bibliothek ein mehrzeiliger Code. Diese Bibliotheken werden im Internet frei zur Verfügung gestellt, befinden sich jedoch auch im Anhang dieser Dokumentation.

Das Hauptprogramm wird hier mit einigen Kommentaren eingefügt:

```

/* Titel: P6 Systemtechnik Low-Cost Absorptionsphotometer
 * Autor: Joshua Backlund
 * Datum: 07.07.2020
 *
 * Für die Funktion und Sicherheit dieses Programms wird keine Garantie gegeben.
 * Die Variablen müssen je nach verwendeten Komponenten und Funktion angepasst werden.
 */

// Alle notwendigen Libraries werden einbezogen
#include <Wire.h>
#include <Digital_Light_TSL2561.h>
// #include <wire.h>
#include <hd44780.h>
#include <hd44780ioClass/hd44780_I2Cexp.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include "RTCLib.h"
#include <avr/interrupt.h>

// Erstellung der Objekte
hd44780_I2Cexp lcd;
File myFile;
RTC_DS1307 RTC;
//DateTime now;

// Initialisierung der verwendeten Variablen zur Licht- und Zeitmessung und Dateinamen

```

⁴ <https://www.arduino.cc/en/main/OldSoftwareReleases>

```

int8_t farbe = 0;
uint32_t Lichtwert = 0;
float Mittelwert = 0;
float ATN = 0;
volatile bool sec = true;
bool first = true;
float refWeissMW = 0;
int cnt = 0;
int cntMW = 0;
char fname[16];
int currentday=-1;

//Anwender kann hier die Konstanten festlegen
#define Zeit 6 // Zeitintervalle
#define Mittlungszeit 1 //Mittlungszeit in Minuten
#define lpm 1.4 // Luftfluss angeben

// Initialisierung der Komponenten und des Interrupts
void setup()
{
  DDRD = 0xE0; // Pin 5,6 und 7 als DO definierten (für RGB)
  PORTD = 0x00; // Ausgänge noch ausgeschalten
  Wire.begin();
  Serial.begin(9600);
  TSL2561.init();
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.home();
  lcd.print("Projekt P6");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("FHNW - ISE");
  delay(4000);
  lcd.clear();
  initSDandRTC();
  createFile();
  Tim(); //Zeit für Farbwechsel und Datenrate
}

// Add the main program code into the continuous loop() function
void loop()
{
  if(sec){ // Im Sekundentakt werden die Lichtwerte gemessen und integriert
    sec = false;
    Lichtwert += TSL2561.readVisibleLux();
    Serial.println(TSL2561.readVisibleLux());
    Serial.println(Lichtwert);
    cnt++;
    cntMW++;
  }
  if(cnt>=Zeit){ // Nach der definierten Zeitkonstanten wird der Lichtwert mit der jeweiligen Farbe angezeigt
    cnt = 0;
    if(farbe==0){saveData();}
    myFile.print(",");
  }
}

```

```

        myFile.print(Lichtwert);
        if(farbe==4){ myFile.println(); myFile.flush();}           // Nach dem Durchlauf aller Farben speichern der
Daten auf die SD-Karte
        lcd.setCursor(0,0);
        switch(farbe){ // Nach der Anzeige des Lichtwertes auf die nächste Farbe wechseln
            case 0: PORTD = 0x20; lcd.print("Dunkel: "); break; // --> Rot
            case 1: PORTD = 0x40; lcd.print("Rot: "); break; // --> Grün
            case 2: PORTD = 0x80; lcd.print("Gr\365n: "); break; // --> Blau
            case 3: PORTD = 0xE0; lcd.print("Blau: "); break; // --> Weiss
            case 4: PORTD = 0x00; Mittelwert+=Lichtwert;lcd.print("Weiss: "); break; // --> Dunkel
        }
        farbe++;
        if(farbe>4){farbe=0;}
        lcd.print(Lichtwert);
        lcd.print("  ");
        if(cntMW>=(Mittlungszeit * 60)){
            if(first){refWeissMW=Mittelwert;first=false;}
            cntMW=0;
            lcd.setCursor(0,1);
            lcd.print("eBC: ");
            lcd.print((log(refWeissMW/Mittelwert)-ATN)*7302000.0/lpm);
            lcd.print("[ng/m3]");
            ATN=log(refWeissMW/Mittelwert);
            Mittelwert = 0;
        }
        Lichtwert = 0;
    }
}

// Im Sekundentakt wird der Boolean sec auf 'true' gesetzt
ISR(TIMER1_COMPA_vect){
    sec = true;
}

// Jeder Messdurchlauf aller Farben wird zuerst mit dem Zeitstempel versehen (Date, Time)
void saveData() {
    DateTime now = RTC.now();
    myFile.print("");
    myFile.print(now.year(), DEC);
    myFile.print("/");
    myFile.print(now.month(), DEC);
    myFile.print("/");
    myFile.print(now.day(), DEC);
    myFile.print("");
    myFile.print(",");
    myFile.print("");
    myFile.print(now.hour(), DEC);
    myFile.print(":");
    myFile.print(now.minute(), DEC);
    myFile.print(":");
    myFile.print(now.second(), DEC);
    myFile.print("");
}

```

```

}

// Initialisierung des Interrupts, wird auf eine Sekunde gesetzt
void Tim(void) {
    cli();//stop interrupts
    TCCR1A = 0;// set entire TCCR1A register to 0
    TCCR1B = 0;// same for TCCR1B
    TCNT1 = 0;//initialize counter value to 0
    // set compare match register for 1hz increments
    OCR1A = 15624;// = (16*10^6) / (1*1024) - 1 (must be <65536)
    // turn on CTC mode
    TCCR1B |= (1 << WGM12);
    // Set CS10 and CS12 bits for 1024 prescaler
    TCCR1B |= (1 << CS12) | (1 << CS10);
    // enable timer compare interrupt
    TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);
    sei();
}

// Initialisierung der RTC
void initSDandRTC(void){
    //SD Card initialisation
    if(SD.begin()){Serial.println("SD Card is ready");}
    else{ Serial.print("SD Card not ready");}

    // connect to RTC
    if (!RTC.begin()) {myFile.println("RTC failed");Serial.println("RTC failed");}
    //{{RTC.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));} // falls RTC vorher nicht Betrieb war, durch PC
    updaten, sonst auskommentieren
    if (! RTC.isrunning()) {RTC.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));}
}

// Text-Datei wird erstellt, erhält den Namen des aktuellen Datums
void createFile(void) {
    DateTime now = RTC.now();
    //sprintf(fname, "%04i%02i%02i%02i.txt",now.year(),now.month(),now.day(),ncnt);
    sprintf(fname, "%04i%02i%02i.txt",now.year(),now.month(),now.day());
    Serial.println(fname);
    myFile = SD.open(fname, FILE_WRITE);
    if(myFile){Serial.println("File ready");}
    else{Serial.println("File could not be created");}
    // 1. Zeile werden alle Spaltennamen aufgeschrieben
    myFile.println("Datum,Zeit,Dunkelstrom,Lichtwert Rot,Lichtwert Grün,Lichtwert Blau,Lichtwert
    Weiss");
}

```

Konstruktion Messkammer – NX und Ultimaker Cura

Um die Messkammer zu erstellen, wurde die kostenpflichtige Software **NX** von Siemens⁵ (ebenfalls möglich **Autodesk Inventor 2020**) verwendet. Um die Messkammer auf dem 3D-Drucker fertigen zu lassen, muss im verwendeten CAD Programm eine **stl-Datei** der Messkammer erstellt werden. Diese wird dann in **Ultimaker Cura 4.3.0**⁶ importiert und an den Drucker gesendet, wo die Kammer gedruckt wird. Die stl-Dateien befinden sich im Anhang dieser Dokumentation.

Die Konstruktion einzelner Komponenten, wie die des Arduinos oder des LCDs, können sich erspart werden. Viele fertige Modelle sind online zu finden⁷ und können direkt ins CAD geladen werden.

Das fertige Modell mit Gehäuse sieht aus wie in Abbildung 21: CAD Messkammer komplett dargestellt.

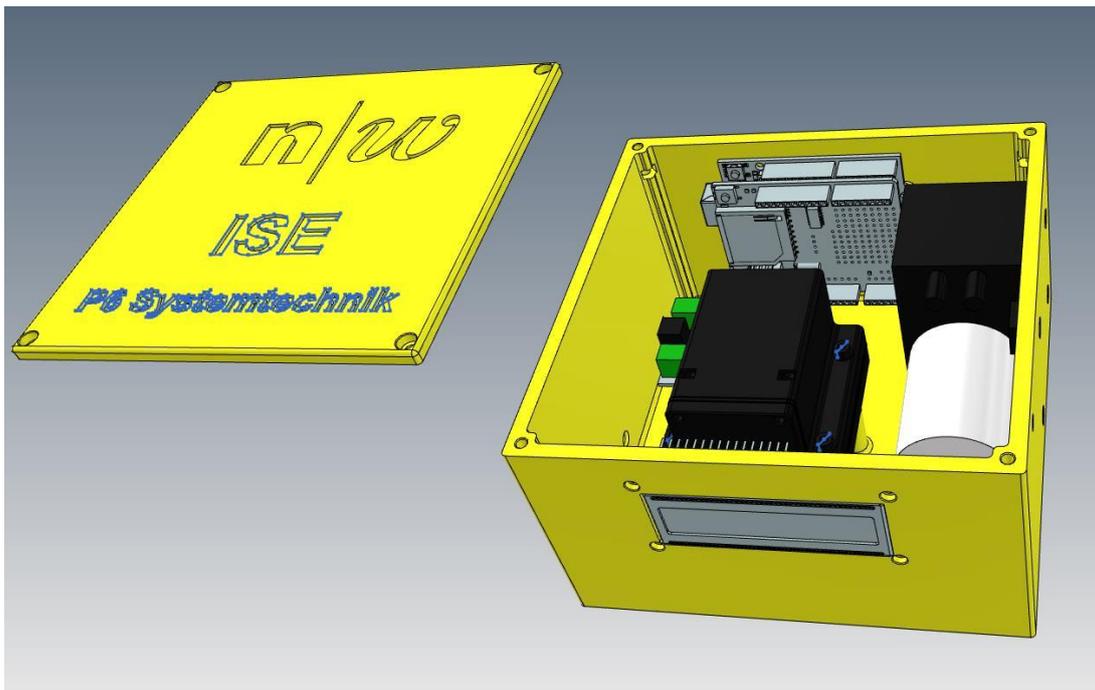


Abbildung 21: CAD Messkammer komplett

Datenauswertung – Excel und selbstgeschriebenes Programm (von F. Mayer)

Die gespeicherten Messwerte können zur Analyse ins **Microsoft Excel**⁸ geladen werden. Dafür wurde in diesem Projekt eine Vorlage (im Anhang beigelegt) erstellt, in der direkt die Attenuation und Russkonzentrationen in ng/m^3 berechnet werden. Auch ein Punkte Diagramm wird bereits automatisch erzeugt, das den Tagesverlauf der Russkonzentration anzeigt.

Dass der Datenimport reibungslos verläuft (Einfügen der Daten in eine falsche Zeile oder Spalte führt zu Fehlern), wurde von Herrn Felix Mayer (Informatik Student FHNW) eine Software geschrieben (befindet sich im Anhang), in der der Benutzer nur die Textdatei mit den Daten auswählen und den Luftfluss der Messung eingeben muss. Die Erstellung des Excel-Files verläuft dann automatisch.

⁵ <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/products/nx/>

⁶ <https://github.com/Ultimaker/Cura/tags>

⁷ <https://grabcad.com/>

⁸ <https://www.microsoft.com/de-ch/microsoft-365/excel>

Der Aufbau der Excel Vorlage wird noch kurz beschrieben, damit der Anwender bei Bedarf Änderungen vornehmen kann:

Die Messwerte müssen zwangsweise in die Zelle **A11** geladen werden. In der ersten Spalte steht das Datum, in der zweiten die jeweilige Uhrzeit der Messung. Die nächsten 5 Spalten sind für die Lichtwerte (Dunkel/Rot/Grün/Weiss) vorgesehen. Die Reihenfolge spielt dort theoretisch keine Rolle, ausser die Dunkelmessung muss als erstes eingetragen werden, da bei den weiteren Lichtwerten die Differenz zur Dunkelmessung gebildet wird (um externe Einflüsse auszugleichen).

Die Vorlage berechnet nachfolgend die Attenuation, der Befehl in den zugehörigen Zellen lautet:

=WENN(ZEILE(I12)<(ANZAHL(\$A:\$A)+12);LN((D\$12-\$C\$12)/(D12-\$C12));"")

Dieser Befehl kontrolliert, wie viele Messzyklen (z.B. 500x den gesamten Durchlauf Dunkel/R/G/B/Weiss) geladen wurden. Zu jeder geladenen Zeile wird die Attenuation gemäss Beer-Lambert gerechnet (Lichtwerte als Differenz zur Dunkelmessung). Wenn alle Zeilen berechnet wurden, bleiben übrige Zeilen leer.

=WENN(ZEILE(N13)<(ANZAHL(\$A:\$A)+12);(I13-I12)*\$R\$1;"")

Als nächstes wird die Russkonzentration berechnet, welche wieder dieselbe Abfrage wegen der Anzahl Messzyklen ausführt. Sollten die Zeilen nicht leer sein, wird gemäss Beer-Lambert die Russkonzentration berechnet. In der Excel Formel ist eine Konstante vorhanden, welche alle physikalischen Werte (Luftfluss, Spotgrösse, MAC, usw.) beinhaltet. Diese Werte können jedoch in der **Spalte N Zeile 1-9** angepasst werden.

=WENN((REST(ZEILE(T12)-12;RUNDEN(\$T\$8/\$N\$8;0))=0)*UND(ZEILE(T12)<(ANZAHL(\$A:\$A)+12));MITTELWERT(INDIREKT(ADRESSE(ZEILE(N12);14)&"':"&ADRESSE(ZEILE(N12)+RUNDEN(\$T\$8/\$N\$8;0)-1;14)));#NV)

Als nächstes wird der variable Mittelwert berechnet (Mittelungszeit im gelben Feld darüber definierbar). Die Formeln rechnet die gewünschte Mittelungszeit durch die Zeitkonstante eines Messzyklus und rundet den Wert. Dementsprechend lassen sich nur Vielfache des Messzyklus darstellen, z.B. dauert ein Messzyklus 30s, dann können Mittelungszeiten wie 60s, 90s, 300s, 600s dargestellt werden. 500s würden aber auf 510s gerundet werden. Abhängig von der Mittelungszeit wird der Mittelwert der Anzahl Messzyklen berechnet [15]. Es stehen mehrere Spalten zur Berechnung der Mittelwerte zur Verfügung, damit die Qualität verschiedene Mittelungszeiten miteinander verglichen werden können.

Als letztes sind 2 Punktediagramme eingefügt, die aus dem ersten Block der Mittelwerte die Russkonzentrationen in ng/m³ für alle Wellenlängen über der zugehörigen Zeit darstellt. In der zweiten Graphik wird nur die Russkonzentration der Lichtfarbe 'Weiss' für den zweiten Mittelungsblock dargestellt. Abbildung 22: Auszug Excel Mittelungsblöcke zeigt an, was mit Mittelungsblock gemeint ist.

1. Mittelungsblock				2. Mittelungsblock										
Nur vielfache von Zeitintervall möglich														
Mittlungszeit [s] 100 s				Mittlungszeit 500 s				Mittlungszeit 100 s						
eBC Grün	eBC Blau	eBC Weiss		MW Rot	MW Grün	MW Blau	MW Weiss	MW Rot	MW Grün	MW Blau	MW Weiss	MW Rot	MW Grün	MW
0	0	0		30447.966	-10101.0538	11523.0391	2721.0199	20332.2537	20752.3359	16841.7249	17236.4128	30447.966	-10101.0538	115
'6	-47226.9928	20166.9684	-33623.21015	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	
11	-16631.5417	10686.8598	16208.86245	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	
i3	23454.3194	15238.3283	28298.42728	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	
i6	93593.2038	14731.7588	51353.72087	18714.2129	32944.2423	14387.2728	17127.9598	#NV	#NV	#NV	#NV	18714.2129	32944.2423	143
i7	-16259.142	46838.2711	8425.086969	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	
i5	17034.9539	20746.3942	24204.91199	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	
i7	37407.9534	-24767.3329	-15471.88045	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	
i2	-21082.8208	29393.0206	23082.28288	16823.3272	21949.8456	13879.4125	23196.2592	#NV	#NV	#NV	#NV	16823.3272	21949.8456	138
i5	-1557.50229	-17893.35	-6440.448558	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	
i4	36754.3674	4033.0967	26114.23881	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	
i6	73685.338	39984.8826	50028.96376	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	
'2	29677.7527	72334.7874	37982.95773	17491.3685	16514.0754	29131.0279	23936.7244	#NV	#NV	#NV	#NV	17491.3685	16514.0754	29
'5	-804.855778	23822.4745	3305.722484	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	
i1	81256.3244	4184.28645	45333.76669	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	
'6	-44072.9197	16182.5634	9124.450721	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	
'8	-20249.0654	61151.488	19224.66855	18184.3941	42454.5703	15287.872	19200.1004	#NV	#NV	#NV	#NV	18184.3941	42454.5703	15
'8	79939.4079	20194.7646	24536.93576	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	#NV	

Abbildung 22: Auszug Excel Mittelungsblöcke

Anwendung der Software

Mit der Java-Applikation kann ein Benutzer bei Betätigung des Buttons «**Choose File**» die Text-Datei mit den gesammelten Rohdaten auswählen und anschliessend den verwendeten Luftfluss in Liter pro Minute und die Zeitbasis (Zeit pro Messzyklus) der Datenspeicherung in Sekunden entsprechend anpassen. Im Einlese-Prozess werden alle Daten bereits extrahiert und in das entsprechende Format konvertiert. Sobald die Datei vollständig geladen wurde, wird der Pfad bei «Selected File:» dargestellt. (Siehe Abbildung 23: Layout Excel Converter)

In einem Zweiten Schritt gilt es den «**Convert to xlsx**»-Button zu betätigen. Der Prozess, welcher nun ausgelöst wird, erstellt zuerst eine Kopie der Vorlagen-Datei Vorlage_V0.xlsx, welche dann mit den entsprechend zwischengespeicherten Daten gefüllt wird. Die Daten werden zuerst zwar eingelesen, jedoch wird erst nach Betätigung von «**cntrl+alt+shift+f9**» die Berechnungen durchgeführt und die Graphiken mit Punkten aufgefüllt.

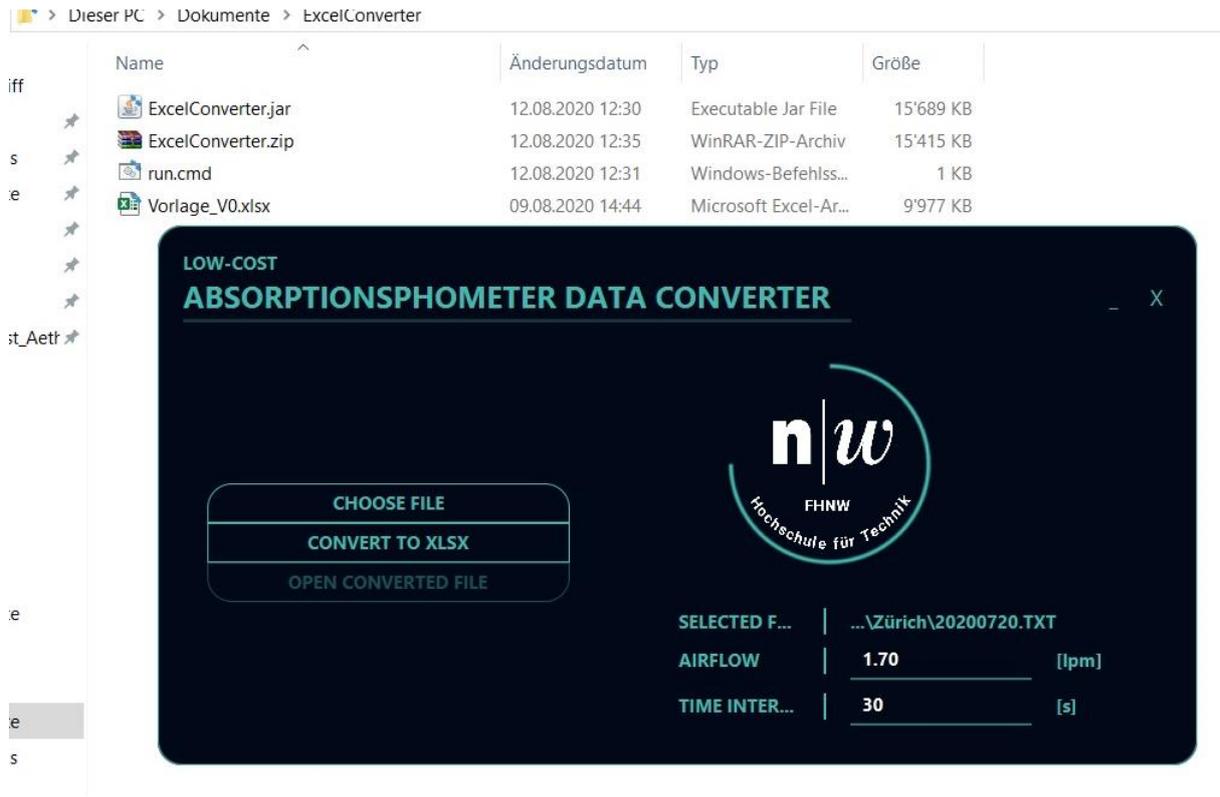


Abbildung 23: Layout Excel Converter

Die nötigen Bestandteile der Software sind die Vorlage, der Java Code und eine ausführende Datei «run.cmd», welche vom Anwender betätigt werden muss. Wichtig ist, zumindest bei der ersten Version der Software, dass die Vorlage nicht aus dem Ordner verschoben wird und das eingelesene Text-File im Format «Datum/Zeit,Dunkelstrom,Lichtwert Rot,Lichtwert Grün, Lichtwert Blau, Lichtwert Weiss» abgespeichert wurde.

Bei dieser Version ist eine Verwendung **nur auf Windows** möglich. Ausserdem muss **Java Version 8⁹** oder höher installiert sein und die JVM 64-bit verwendet werden.

Die Insert-Positionen sind im Programm «hard-coded», das heisst nach Anpassungen der Vorlage muss der Quellcode ebenfalls angepasst werden. Das Programm wurde wie branchenüblich auf Java (jre1.8.0_211) mit der IDE IntelliJ entwickelt.

⁹ <https://www.java.com/de/download/>

Aufbau

Wenn das Material bereitliegt, die Software installiert und die Bibliotheken einbezogen wurden kann mit dem Bau des Low-Cost APM begonnen werden. Der gesamte Aufbau ist Schritt für Schritt auf www.instructables.com veröffentlicht und detailliert beschrieben. In dieser Dokumentation werden einfachere Schritte (wie das festschrauben eines Bauteils) der Überschaubarkeit halber nicht festgehalten.

Verdrahtung und elektrischer Aufbau

Als erster Schritt wäre es ratsam, mit einem simplen Testaufbau die Funktionalität der Komponenten und des Programms und die Verdrahtung zu überprüfen. Dafür muss das Arduino Sketch über die Arduino IDE auf den Arduino Uno geladen werden. Die inkludierten Bibliotheken müssen sich im **Ordner Libraries des Arduino IDE Speicherorts** befinden.

Die Komponenten werden gemäss Abbildung 24: Verdrahtung Arduino Uno (wegen Übersichtlichkeit ohne Adafruit Data Logger Shield) an das Arduino angeschlossen. Der Adafruit Data Logger Shield kann bereits mit Knopf-Batterie und SD-Karte auf den Arduino gesteckt werden. Er bietet wiederum genau dieselben Anschlussmöglichkeiten wie der Arduino Uno, an die dann die Komponenten angeschlossen werden müssen.

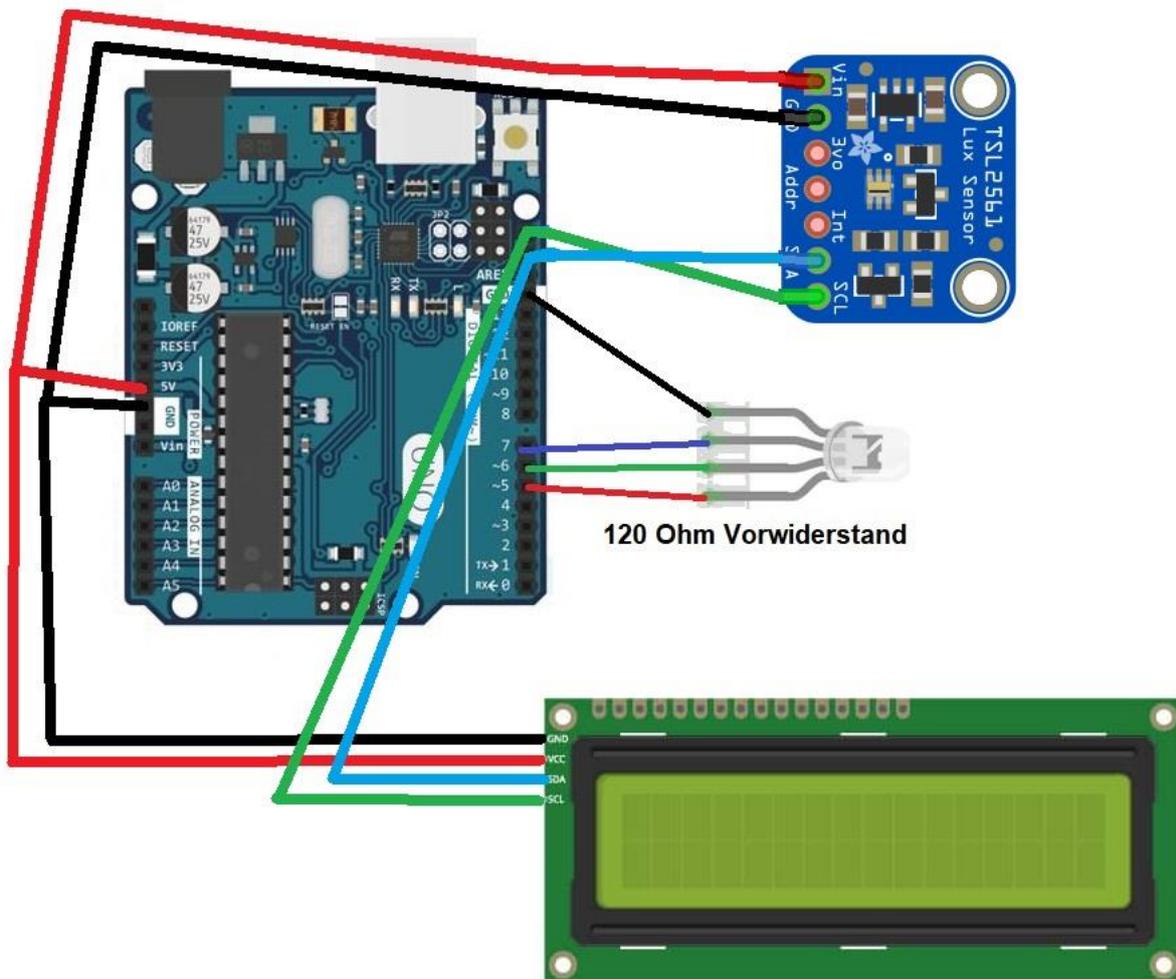


Abbildung 24: Verdrahtung Arduino Uno (wegen Übersichtlichkeit ohne Adafruit Data Logger Shield)

Wenn die Komponenten richtig verdrahtet wurden und funktionstüchtig sind, das Sketch erfolgreich auf den Arduino geladen wurde, dann sollte der Begrüssungstext auf dem LCD erscheinen. Danach beginnt der Messzyklus, indem die RGB-Diode in definierten Zeitabständen die Farbe wechselt. Die Lichtwerte sollten auf dem LCD angezeigt werden (ähnlich wie in Abbildung 25: Test des Aufbaus).



Abbildung 25: Test des Aufbaus

Nach den ersten Versuchen lässt sich feststellen, wie aus der Formel zur Lichtmessung ersichtlich, dass die Lichtstärke zum Abstand zwischen Lichtquelle und Detektor quadratisch abnimmt. Je nach verwendeter Lichtquelle kann der Anwender die Distanz zwischen Quelle und Detektor abschätzen, die er in seiner Messkammer (falls nicht die zur Verfügung gestellte Messkammer verwendet wird) nicht unterschreiten sollte, um seine gewünschte Messgenauigkeit zu erreichen. Wenn die Lichtwerte selbst bei sehr kleiner Distanz zu schwach sind, sollte eine stärkere RGB eingesetzt werden, wobei es dann wegen dem begrenzten Ausgangsstrom des Arduino (20mA pro Pin) noch eine elektronische Erweiterung des Aufbaus benötigen könnte.

Erstellung der Messkammer

Wenn die Lichtwerte genügend stark sind und die zugehörige Geometrie der Messkammer (Platz für Lichtquelle, Detektor, Abstände und Filterplatz) definiert wurden, kann mit der Konstruktion oder (falls die zur Verfügung gestellte Messkammer verwendet wird) direkt mit dem 3D-Druck begonnen werden. Da die Messkammer luftdicht sein muss, ist ein **Füllgrad von 100%** zu empfehlen. Es ist zu bemerken, dass der Druckvorgang mehrere Stunden (sogar mehr als 1 Tag) in Anspruch nehmen kann. Nach dem Druck müssen je nach verwendeten Luftanschlüssen und Kabelverschraubungen **noch Gewinde in die Messkammer gedreht werden**.

Knackpunkte der Messkammer sind eine möglichst geringe Distanz zwischen Lichtquelle und Photodetektor, eine Filterhalterung und eine gesamthaft luftdichte Konstruktion zu erstellen. Um die letzte Anforderung zu erfüllen, wird für die Abdeckungen eine elastische Gummidichtung (z.B. von einem Fahrrad Pneu) ausgeschnitten und eingesetzt, für die Kabel- und Luftanschlüsse kann eine

Silikonmasse verwendet werden. Die fertige Messkammer wird in Abbildung 26: Gedruckte Messkammer dargestellt.



Abbildung 26: Gedruckte Messkammer

Überprüfung auf Dichtheit

Bei der fertigen Messkammer muss als nächstes überprüft werden, ob sie luftdicht ist. Dafür sind die Komponenten darin, die Anschlüsse für Kabel und Luftfluss und als letztes die Abdeckungen zu montieren und abzudichten (Gummidichtung und Silikonmasse). Zwischen die beiden Messkammerhälften wird der Filter mit den passenden Dichtungen eingeklemmt. Dabei ist zu beachten, dass alle Schrauben und Verschraubungen möglichst fest angezogen werden, jedoch ohne die Gewinde oder das Gehäuse zu beschädigen.

Um die Dichtheit zu überprüfen, bieten sich verschiedene Möglichkeiten. In diesem Projekt wurde mit einer Membranpumpe, die ein genügend starkes Vakuum erzeugen kann (<600mbar) und einer daran angeschlossenen kritischen Düse (1.7lpm) Luft durch die Messkammer gesogen. Am anderen Anschluss der Messkammer wird mit einem Messgerät der Luftstrom bestimmt. In Abbildung 27: Messung Luftstrom beträgt der gemessene Luftstrom ungefähr 1.6lpm, damit beträgt die Dichtheit der Messkammer mit Luftanschlüssen ungefähr 94%.



Abbildung 27: Messung Luftstrom

Wichtig für die Auswertung der Daten, ist es den **gemessenen Luftstrom einzutragen** und nicht den theoretischen Soll-Strom.

Die kritische Düse ist aus diesem Grund auch kein Zwang für die Bestimmung des Luftflusses, sondern nur ein praktisches Hilfsmittel, da man durch sie den Sollwert kennt und prozentual die Dichtigkeit berechnen kann.

Verwendung des Daten Loggers

Nun beginnt die Implementierung des Datenloggers. Dafür wird (falls nicht bereits getan) der **Adafruit Data Logger Shield** auf den Arduino Uno gesteckt. Die Diode und der Photodetektor können an die **gleichen Pins** auf dem Shield eingekoppelt werden wie auf dem Arduino Uno. Es gilt die Besetzung der Pins des Shields (abhängig von der Version) zu beachten, die im Unterkapitel Verwendete Hardware genannt werden.

Bei erstmaligem Anschluss oder nach Entfernen der Knopfbatterie, ist es immer wichtig, das aktuelle Datum zu aktualisieren. Dies geschieht, indem im Sketch bei der Zeile 157 (vielleicht geändert)

```
//{RTC.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));} // falls RTC vorher nicht Betrieb war, durch PC updaten, sonst auskommentieren
```

die Kommentarzeichen // vor {RTC.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));} entfernt werden und das Programm so auf den Arduino geladen wird. Danach kann die Zeile wieder auskommentiert werden und das Programm wieder auf den Arduino geladen werden. Es empfiehlt sich, das Datum immer wieder mal zu aktualisieren, auch wenn die Batterie nicht entfernt wurde, da es teils zur zeitlichen Abweichung auf dem Logger Shield kommt, wegen Ungenauigkeiten der RTC.

Wenn das vollständige Sketch auf den Arduino übertragen wurde, sollte zu Beginn jeder Messung (sobald der Arduino an eine Spannungsquelle angeschlossen wird) eine neue Text-Datei auf der SD-Karte erstellt werden, die als Namen das Erstellungsdatum besitzt.

In der Zeile 40-42 (vielleicht geändert) kann bei den Befehlen

```
#define Zeit 6 // Zeitintervalle
#define Mittelungszeit 1 //Mittelungszeit in Minuten
#define lpm 1.4 // Luftfluss angeben
```

die Konstanten für die Messung angegeben werden. Der definierte Zeitintervall gibt an, wie lange in Sekunden pro Lichtfarbe gemessen wird. Bei 6 Sekunden pro Farbe würde ein gesamter Zyklus 30s dauern. Die Mittelungszeit und der Luftfluss werden für die auf dem LCD angezeigte eBC Konzentration benutzt, **haben aber nichts mit den Daten im Text-File oder der Auswertung im Excel zu tun.**

Das Erzeugte Text-File sollte ähnlich wie in folgendem Bild Abbildung 28: Beispiel erzeugtes Text-File aussehen:

```

Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
Datum,Zeit,Dunkelstrom,Lichtwert Rot,Lichtwert Grün,Lichtwert Blau,Lichtwert Weiss
"2020/5/25","10:24:36",0,3056,5501,6821,15016
"2020/5/25","10:25:1",0,3018,5563,6785,15134
"2020/5/25","10:25:26",0,3003,5585,6766,15077
"2020/5/25","10:25:51",0,2983,5554,6739,14978
"2020/5/25","10:26:16",0,2972,5432,6713,14800
"2020/5/25","10:26:41",0,2961,5453,6631,14771
"2020/5/25","10:27:6",0,2950,5431,6595,14688
"2020/5/25","10:27:31",0,2939,5383,6638,14741
"2020/5/25","10:27:56",0,2930,5410,6587,14662
"2020/5/25","10:28:21",0,2920,5412,6618,14684
"2020/5/25","10:28:46",0,2909,5365,6611,14595
"2020/5/25","10:29:11",0,2900,5272,6542,14426
"2020/5/25","10:29:36",0,2890,5235,6419,14299

```

Abbildung 28: Beispiel erzeugtes Text-File

Alle Messzyklen werden als eine neue Zeile dem File hinzugefügt. Sollte die Messung unterbrochen werden, erstellt der Arduino eine neue Datei, oder (falls es sich noch um dasselbe Erstellungsdatum handelt) fügt die Daten (erneut mit der Kopfzeile) in die bestehende Datei hinzu.

Ein passendes Video, in dem die Codierung des Datenloggers erklärt wird, ist als Fussnote angefügt.¹⁰

Erstellung des Gehäuses

Wenn alles Material getestet und einsatzbereit ist, empfiehlt es sich ein Gehäuse für den Messaufbau (Beispiel Abbildung 29: Gehäuse Messaufbau) zu konstruieren, in welchem die Pumpe, der Arduino Uno und die Messkammer montiert werden können. Dabei muss auch noch Platz für eine Spannungsversorgung einberechnet werden. So könnte im Gehäuse ein Netzteil verbaut werden, welches die benötigte Spannung für die Komponenten liefert (z.B. 12V), was in diesem Projekt, wie in Kapitel Verwendete Hardware erwähnt, jedoch nicht der Fall ist. In dem Gehäuse sollten noch zwei Löcher zur Luftzufuhr und -abfuhr vorhanden sein. Für das LCD ist ein Ausschnitt von passender Grösse einzuberechnen (genaue Masse können in der stp-Datei entnommen werden). Alle Konstruktionsunterlagen sind im Anhang beigelegt.

¹⁰ <https://www.youtube.com/watch?v=5Dp-XatLySM>

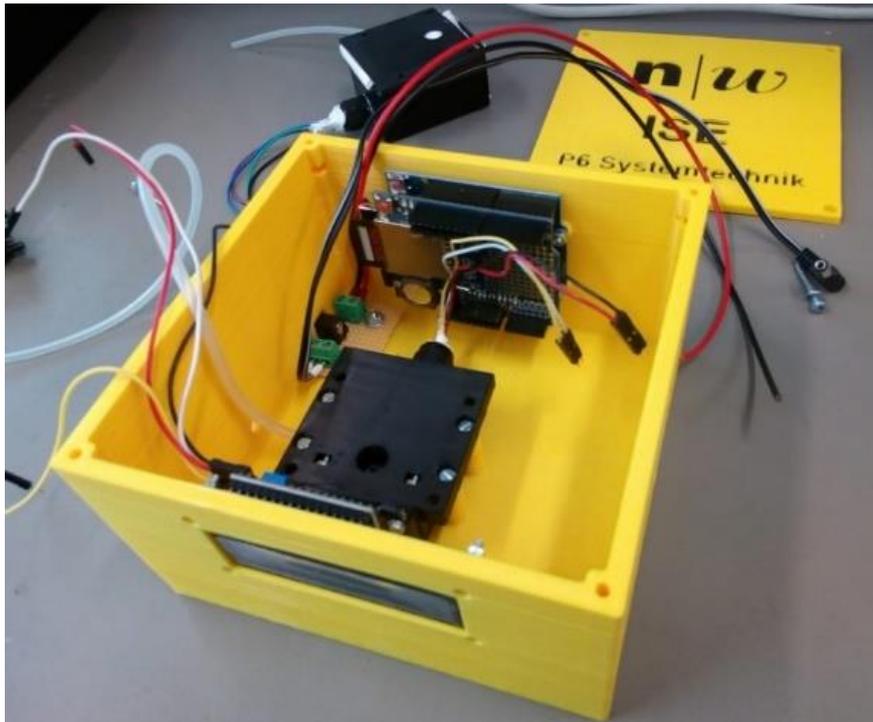


Abbildung 29: Gehäuse Messaufbau

Die detaillierte Anleitung, wie der der gesamte Messaufbau zusammengesetzt wird, ist in der Publikation auf [Instructables.com](https://www.instructables.com) zu finden.

Erste Messungen und Ermittlung des Luftflusses

Mit dem kompletten Messaufbau lassen sich nun erste Messungen der Russkonzentration in der Luft durchführen. Dafür muss allerdings der Luftfluss bekannt sein, was eine zusätzliche Kalibrierung benötigt, falls keine kritische Düse oder Luftflussregelung/-messung eingebaut wurde.

Die Ermittlung des Luftflusses ohne ein kalibriertes Luftflussmessgerät, kann folgendermassen selbst durchgeführt werden. Benötigt wird dafür (Abbildung 30: Material für Luftflusskalibrierung):

- Low-Cost APM
- 5dl PET-Flasche (durchsichtig)
- Kleines Becken mit einer Seifenlösung
- Stoppuhr
- Silikon zur Abdichtung
- Schere

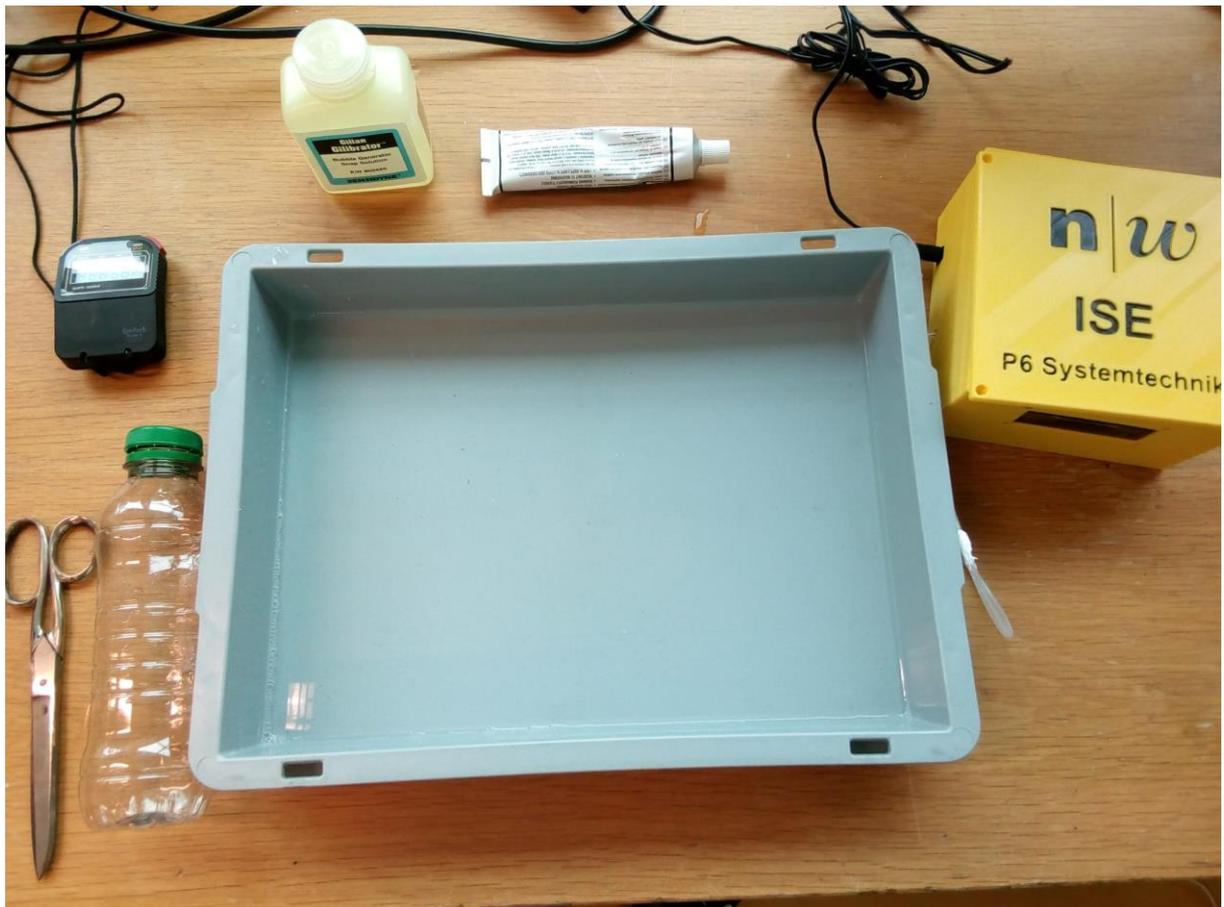


Abbildung 30: Material für Luftflusskalibrierung

Als erstes muss der PET-Flasche der Boden mit einer Schere abgeschnitten werden. In den Deckel der PET-Flasche wird ein kleines Loch mit der Schere gestochen und der Ansaug-Schlauch des Low-Cost APM einen Finger breit hineingesteckt. Der Schlauch und der Deckel werden mit Silikon abgedichtet.

In das Becken wird etwas Wasser (5 mm Höhe) mit genügend Seife gegeben, damit sich leicht einige Seifenblasen an der Oberfläche bilden. Nun muss das Low-Cost APM eingeschaltet werden und die Stoppuhr bereit liegen. **Die Flasche sollte zuvor innen etwas mit der Seifenlösung befeuchtet werden, damit die Seifenblase nicht während der Kalibrierung platzt.** Die Flasche muss nun kurz am Ende des abgeschnittenen Bodens in die Seifenlösung getaucht und wieder hochgezogen werden. Dieser Schritt muss unter Umständen mehrmals wiederholt werden, bis sich eine Seifenblase über den ganzen Querschnitt der Flasche bildet, die der Flaschenwand entlang langsam nach oben gesogen wird. Sobald sich eine Blase bildet, muss die Stoppuhr betätigt und die Zeit gemessen werden, bis die Seifenblase die ganze Flasche durchlaufen hat (Abbildung 31: Kalibrierung Luftfluss). Wenn das geschehen ist, ist der Luftfluss bekannt, da man das (Flaschen-)Volumen durch die benötigte Zeit teilen und in Liter pro Minute umrechnen kann.

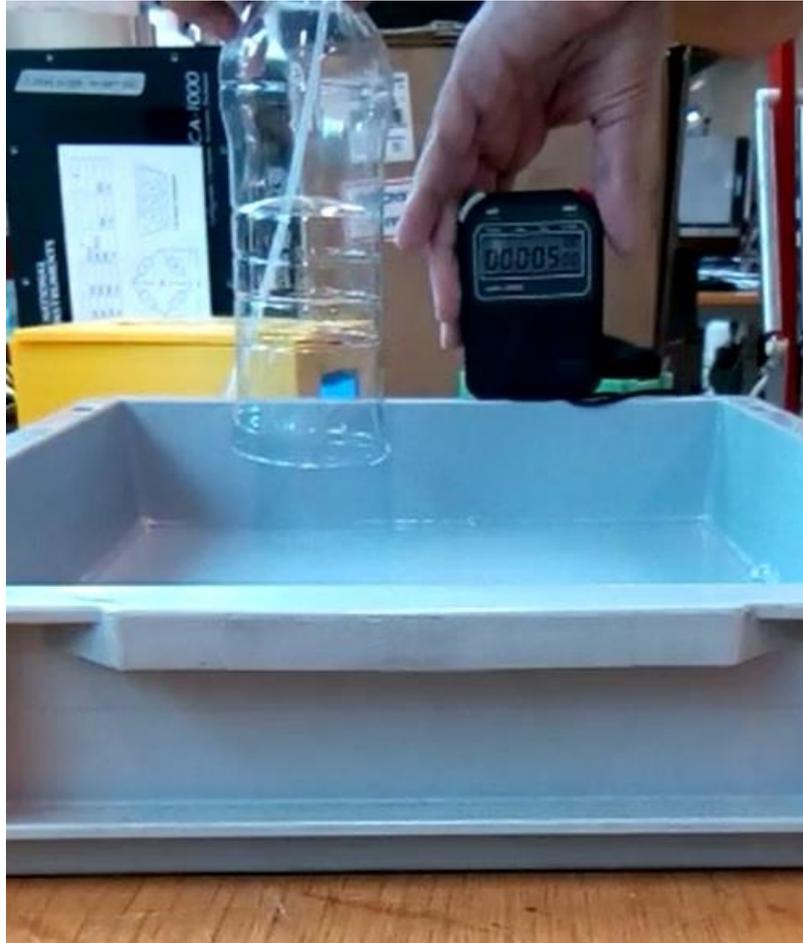


Abbildung 31: Kalibrierung Luftfluss

Wenn danach der Russgehalt in der Umgebung gemessen wird, empfiehlt es sich über mehrere Stunden hinweg Daten zu sammeln. Das Low-Cost APM ist je nach eingesetztem Material nicht sonderlich exakt, sondern braucht längere Mittelungszeiten, um die Messgenauigkeit zu erhöhen (Analyse dazu in Kapitel Messgenauigkeit). Wenn ein genaueres Russ Messgerät zur Verfügung steht, wäre es auch vorteilhaft eine Referenzmessung durchzuführen und durch Anpassung der Konstanten das Low-Cost APM zu kalibrieren.

Verwendung der Daten

Als letzter Schritt steht die Auswertung der Daten an. Mit der Software und Excel Vorlage (beides im Anhang) lassen sich die Messwerte mühelos aus der Text-Datei ins Microsoft Excel importieren. Der Anwender muss noch den Luftstrom eintragen, der während der Messung anlag. Weitere Parameter wie MAC Werte, Spot-Grösse und Zeitintervall lassen sich noch alle in dem Excel Blatt anpassen (Siehe Auszug Abbildung 32: Änderbare Parameter in Excel Blatt).

	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1			Luftfluss [lpm]	0.79	1.3167E-05	m3/s	Konstante Rot	9033371.692			
2			Spot Grösse Ø [cm]	1	0.0000785	m2	Konstante Grün	7556432.594			
3			C	2	2		Konstante Blau	6834050.111			
4			MAC Rot	11	11000	m2/kg	Konstante Weiss	7702875.086			
5			MAC Grün	13.15	13150	m2/kg					
6			MAC Blau	14.54	14540	m2/kg					
7			?MAC Weiss?	12.9	12900	m2/kg					
8			Zeitintervall [s]	30					Nur vielfache von Zeitintervall möglich		
9			nano Gramm	1E+12	ng/kg				Mittelungszeit [s]	100	s
10											

Abbildung 32: Änderbare Parameter in Excel Blatt

Die Vorlage berechnet automatisch die Russkonzentration in Nanogramm pro Kubikmeter [ng/m³] für die gewünschte Mittelungszeit, welche sich ebenfalls anpassen lässt. Es stehen sogar vier verschiedene Blöcke für verschiedene Mittelungszeiten zur Verfügung, um die Zeitaufösungen miteinander vergleichen zu können.

Die Resultate des gesamten ersten Blocks und die Konzentrationen des Lichtwerts 'Weiss' im zweiten Block werden automatisch in einem Punktediagramm (Russkonzentrationen über der Zeit) dargestellt. Die Graphiken lassen sich nach gewohntem Excel Manier mit weiteren Messwerten ergänzen.

Aus den dargestellten Russkonzentrations-Verläufen lassen sich dann die gewünschten Erkenntnisse für den Anwender gewinnen. Zum Beispiel können Maximal- und Minimalwerte abgelesen werden oder aus den zeitlichen Anstiegen/Abfällen Schlüsse zur Auslastung des täglichen Verkehrs oder Industrie gezogen werden.

Messgenauigkeit

Um die Messgenauigkeit des Low-Cost Absorptionphotometers zu bestimmen, muss eine Messung der Lichtwerte an einem Filter **ohne Luftfluss**, also ohne Veränderung der Schwärzung des Filters, durchgeführt werden. Dafür eignet sich am besten ein **unbelegter Filter**, um möglichst hohe Messwerte zu erhalten. (Dabei gilt die Annahme, dass durch den Luftfluss kein weiteres Rauschen entsteht.)

Die Messgenauigkeit wird durch die **Standardabweichung** berechnet. Die Formel 5 dafür lautet:

Formel 5: Berechnung der Standardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad s = \text{Standardabweichung}$$

$n = \text{Anzahl Messwerte}$

$x_i = i - \text{ter Messwert}$

$\bar{x} = \text{Mittelwert}$

Die Dauer der Messung bestimmt die Grenzen der möglichen Mittelungszeiten, bei der die Messgenauigkeit bestimmt werden soll, da aus einem Messwert allein keine Standardabweichung bestimmt werden kann. **So muss die Messdauer mindestens doppelt so gross sein wie die grösste zu kalkulierende Mittelungszeit.** Zum Beispiel muss zur Berechnung der Messgenauigkeit bei einer Mittelungszeit von 3600s Messwerte von mindestens 7200s vorliegen, wünschenswert wäre ein Vielfaches davon, zum Beispiel 18'000s.

Bei einer Messung von über 10 Stunden sind folgende Standardabweichungen (Tabelle 3: Übersicht Messgenauigkeit) der verschiedenen Wellenlängen berechnet worden:

Tabelle 3: Übersicht Messgenauigkeit

Mittelungszeit [s]	300	600	3600	7200
SA Blau Low-Cost APM	498.1257988	342.7981124	69.68640756	74.53645097
SA Grün Low-Cost APM	3785.797176	1768.082499	538.9468277	429.9845762
SA Rot Low-Cost APM	7585.586748	5834.255411	659.0534755	307.5801403
SA Weiss Low-Cost APM	1614.016877	1163.19123	160.3592516	116.5286098

Mittelungszeit [s]	300	600	3600	7200
SA Blau AE33	80.5	59.8	19.4	15.2
SA Grün AE33	90.3	67.5	19.7	16.4
SA Rot1 AE33	103.8	76	23.6	19.1
SA Rot2 AE33	114.9	85.6	25.2	21.2

Verhältnis [Low-Cost APM/AE33]				
Blau	6.187898122	5.732409906	3.592082864	4.903713879
Grün	41.92466418	26.1938148	27.35770699	26.21857172
Rot	69.36979193	72.20613133	27.01038834	15.26452309

So erkennt man aus der Tabelle, dass die beste Messgenauigkeit des Low-Cost APM bei der blauen Lichtfarbe und einer Mittelungszeit von 3600 Sekunden erzielt wird, wo eine Messunsicherheit von fast 70 ng/m³ herrscht.

Im Vergleich dazu erreicht das AE33 dieselbe Messgenauigkeit bei derselben Wellenlänge mit einer Mittelungszeit von etwas mehr als 300 Sekunden. So benötigt das Low-Cost APM in diesem Fall ungefähr **12-mal mehr Zeit, um dieselbe Messgenauigkeit zu erreichen**.

Wenn man jedoch einen groben Tagesverlauf aufzeichnen will, wo **Stundenmittelwerte** genügen, wäre der Low-Cost APM nur **3,6-mal ungenauer als das AE33**.

Der zugehörige Allan Plot zu den Messpunkten wird in Abbildung 33: Allan Plot Vergleich dargestellt. Darin ist ersichtlich, dass grössere Mittelungszeiten ab 3600s die Messgenauigkeit nur gering verbessern, aber die Zeitauflösung deutlich abnimmt. So muss man sich bei der Auswertung entscheiden, ob man die Messgenauigkeit oder Zeitauflösung priorisieren will.



Abbildung 33: Allan Plot Vergleich

Eine interessante Information zur Genauigkeit des Low-Cost APM: Das Bundesamt für Umwelt hat den Jahresmittel Grenzwert für PM2.5 bei 10µg/m³ gesetzt. Wenn Russkonzentrationen in dieser Höhe gemessen werden, beträgt die SA des Low-Cost APM bei einer Mittelungszeit von einer Stunde und der blauen Lichtfarbe lediglich 0.7%.

Attenuation als Grenzwert

Beim Low-Cost APM findet kein automatischer Filterwechsel statt, wie das beim AE33 der Fall ist. Der resultierende Nachteil ist die Begrenzung der Messdauer, da der Filter immer wie schwärzer wird und zusätzlicher Russ diese Schwärzung nicht mehr gross erhöht. Wenn der Filter voll belegt ist, wird zusätzlicher Russ gar nicht mehr messbar.

Um diesen Effekt zu beobachten, werden Messdaten analysiert, die vom 20.07.2020 bis am 27.07.2020 mit dem Low-Cost APM in einer Messstation des Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich in der Nähe des Bahnhof Wiedikon aufgenommen wurden.

Ziel der Analyse ist eine zunehmende Ungenauigkeit der Messdaten (im Vergleich zum AE33) festzustellen und einen geeigneten Grenzwert der Attenuation festzulegen, bei der der Filter gewechselt werden sollte.

Erreichte Attenuation

Zu Beginn der Messung, wenn der Filter noch unbelegt ist, werden hohe Lichtwerte gemessen (Abbildung 34: Messung Zürich unbelegter Filter).

```

20200720.TXT - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
Datum,Zeit,Dunkelstrom,Lichtwert Rot,Lichtwert Grün,Lichtwert Blau,Lichtwert Weiss
"2020/7/20", "9:21:25", 0, 2591, 3769, 5903, 11771
"2020/7/20", "9:21:55", 0, 2585, 3748, 5897, 11818
"2020/7/20", "9:22:25", 0, 2583, 3737, 5889, 11833
"2020/7/20", "9:22:55", 0, 2578, 3720, 5884, 11860
"2020/7/20", "9:23:25", 0, 2567, 3587, 5879, 11780
"2020/7/20", "9:23:55", 0, 2576, 3683, 5874, 11790
"2020/7/20", "9:24:25", 0, 2571, 3664, 5867, 11909
"2020/7/20", "9:24:55", 0, 2557, 3702, 5860, 11920
    
```

Abbildung 34: Messung Zürich unbelegter Filter

Im Verlauf der Messung nehmen die Lichtwerte ab und die Attenuation zu. So werden nur noch wenige Prozent der ursprünglichen Lichtstärke gemessen (Abbildung 35: Messung Zürich belegter Filter).

```

20200720.TXT - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
"2020/7/27", "8:38:38", 0, 55, 48, 78, 186
"2020/7/27", "8:39:8", 0, 55, 48, 78, 186
"2020/7/27", "8:39:38", 0, 55, 48, 78, 186
"2020/7/27", "8:40:8", 0, 54, 48, 78, 186
"2020/7/27", "8:40:38", 0, 54, 48, 78, 186
"2020/7/27", "8:41:8", 0, 54, 48, 78, 186
    
```

Abbildung 35: Messung Zürich belegter Filter

Nun werden die ersten Werte des unbelegten (als I_0) und die des belegten (als I) Filters in die Beer-Lambert Formel eingesetzt, um die Attenuation zu berechnen.

$$ATN = \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

Tabellarisch aufgelistet, ergeben sich folgende maximale Werte:

Tabelle 4: Attenuation Low-Cost Absorptionsphotometer

Farbe	ATN
Keine	-
Rot	3.87 = 387%
Grün	4.36 = 436%
Blau	4.33 = 433%
(Weiss)	4.15 = 415%

Um die Werte mit denen des AE33 vergleichen zu können, müssen die Kennlinien zur Attenuation des AE33 zur Hilfe gezogen werden. Dabei ist zu erwähnen, dass es sich hier um beliebige Messungen handelt und nicht um dieselbe Messung, wie bei der, die für die Low-Cost Daten verwendet wurden. Diese beliebigen Daten sehen wie folgt aus:

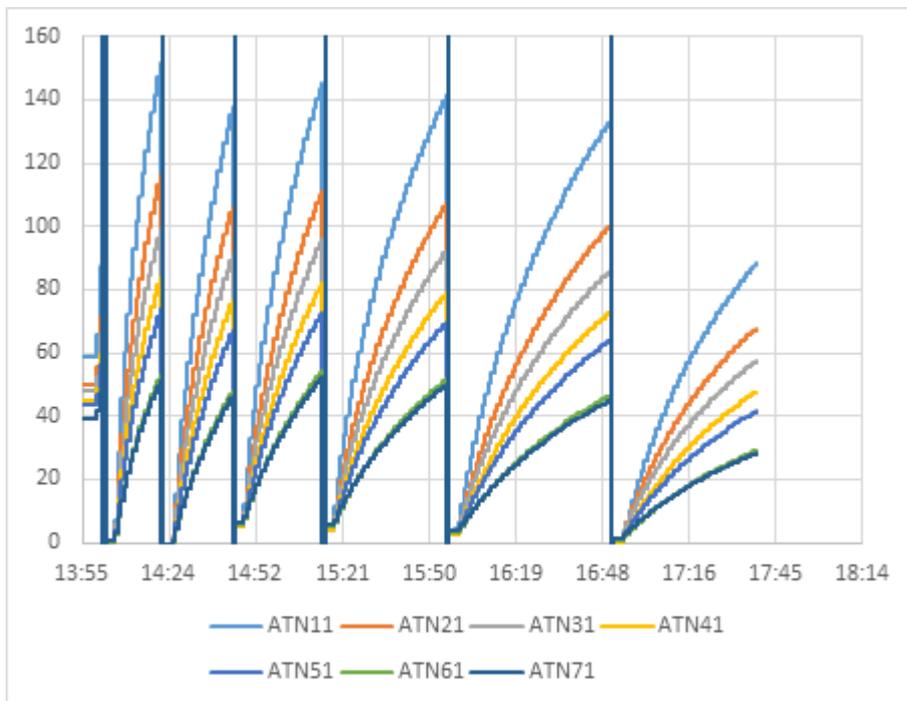


Abbildung 36: Attenuation AE33

Für die Kurvenbeschriftungen gelten folgende Beziehungen zu den Wellenlängen:

ATN11	ATN21	ATN31	ATN41	ATN51	ATN61	ATN71
370 nm	470 nm	520 nm	590 nm	660 nm	880 nm	950 nm

Somit sind **ATN21 (Blau)** und **ATN31 (Grün)** relevant, da sie die exakt gleiche Wellenlänge wie die der Low-Cost Lichtquelle haben. Die eingesetzte **rote Farbe (620nm)** liegt zwischen **ATN41 und ATN51**, deshalb wird Rot mit beiden Referenzen verglichen. Wenn man aus dieser Graphik die durchschnittliche maximale Attenuation berechnet, was von Auge nicht ganz einfach zu bestimmen ist, kommt man grob auf folgende Werte:

Tabelle 5: Attenuation AE33

Farbe	Max. ATN
Blau	105%
Grün	90%
Rot1	75%
Rot2	70%

Die Attenuation-Werte des AE33 hatte das Low-Cost APM in Zürich bereits nach **ungefähr 20 Stunden erreicht**. Trotzdem wurden die Messungen eine Woche lang mit demselben Filter durchgeführt.

Aus den Tagesmittelwerten lässt sich schliessen, dass bei erhöhter Attenuation die Messgenauigkeit abnimmt. So lässt sich aus Tabelle 6: Tagesmittelwerte Einfluss Attenuation erkennen, dass die Abweichung zwischen dem Low-Cost APM und dem AE33 bei gleicher Wellenlänge (470nm / Blau) im Verlauf der Zeit zunimmt.

Tabelle 6: Tagesmittelwerte Einfluss Attenuation

	AE33 BC2 (470nm)	Low-Cost APM Blau	Verhältnis
20.07.2020	1374.04	938	1.46486318
21.07.2020	1394.75	652	2.13918712
22.07.2020	1248.54	450	2.77453704
23.07.2020	1500.79	525	2.85863946
24.07.2020	1445.21	315	4.58796296
25.07.2020	1007.83	240	4.19930556
26.07.2020	1389.13	354	3.92408192

Die Zunahme der Messabweichung lässt sich gut in Abbildung 37: Messverlauf Zürich erkennen:

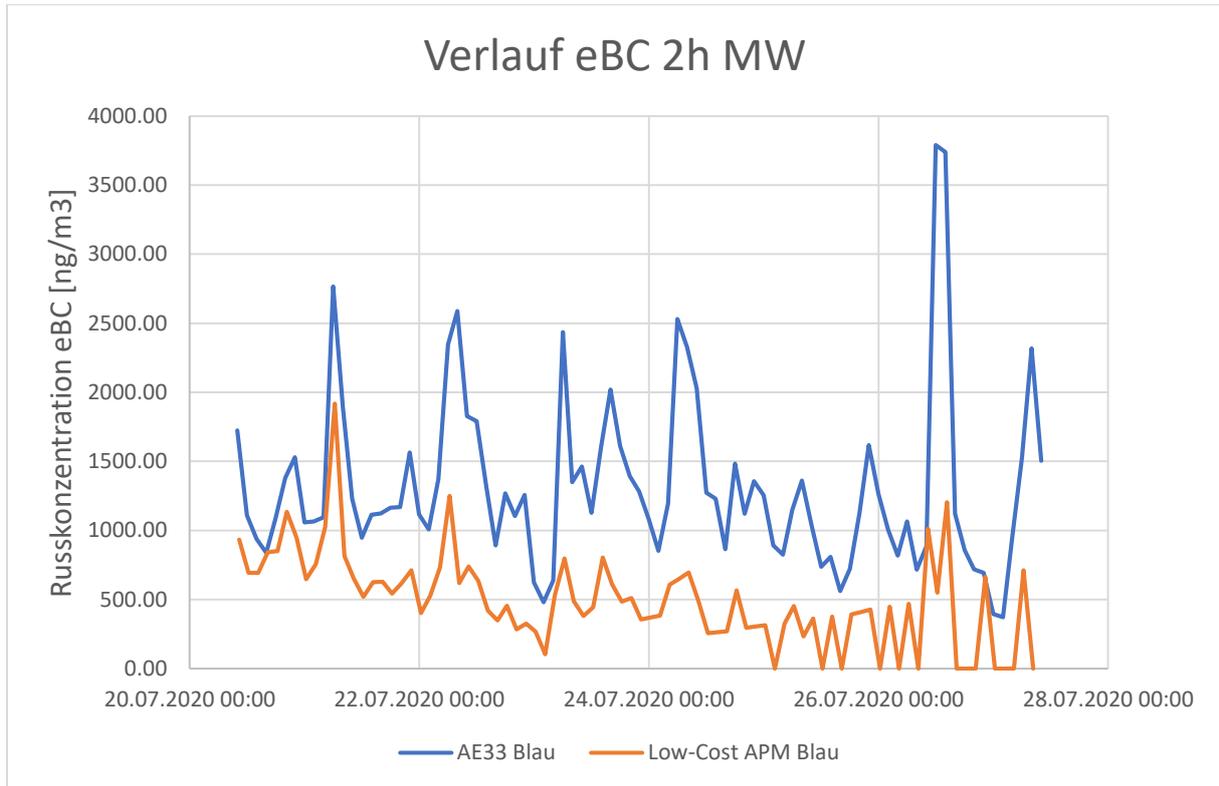


Abbildung 37: Messverlauf Zürich

Während die beiden Kurven anfangs nahe bei einander liegen, kommt mit der Zeit ein grösserer Drift in die Messungen des Low-Cost APM, der die Messungen immer wie unbrauchbarer macht. Ab dem 24.07 (4 Tage Messzeit) sind die Daten nicht mehr zu gebrauchen.

Aus diesen Messungen lässt sich schliessen, dass der Filter nicht unbegrenzt einsetzbar ist. Die Attenuation Grenzwerte des AE33 (ungefähr bei **100%**) können für das Low-Cost APM übernommen werden, so dass bei Erreichen dieser ATN auf dem LCD eine Meldung erscheint, dass ein Filterwechsel vollzogen werden soll.

Analyse der Daten im Vergleich mit dem AE33

Eine Vergleichsmessung des Low-Cost APM mit dem AE33, die am 21.02.2020 am ISE in Brugg/Windisch (in der Nähe einer Hauptstrasse) stattgefunden hat, zeigt bei einer Mittelungszeit von jeweils 15min folgenden Kurvenverlauf auf (Abbildung 38: Messung Brugg Umgebung):

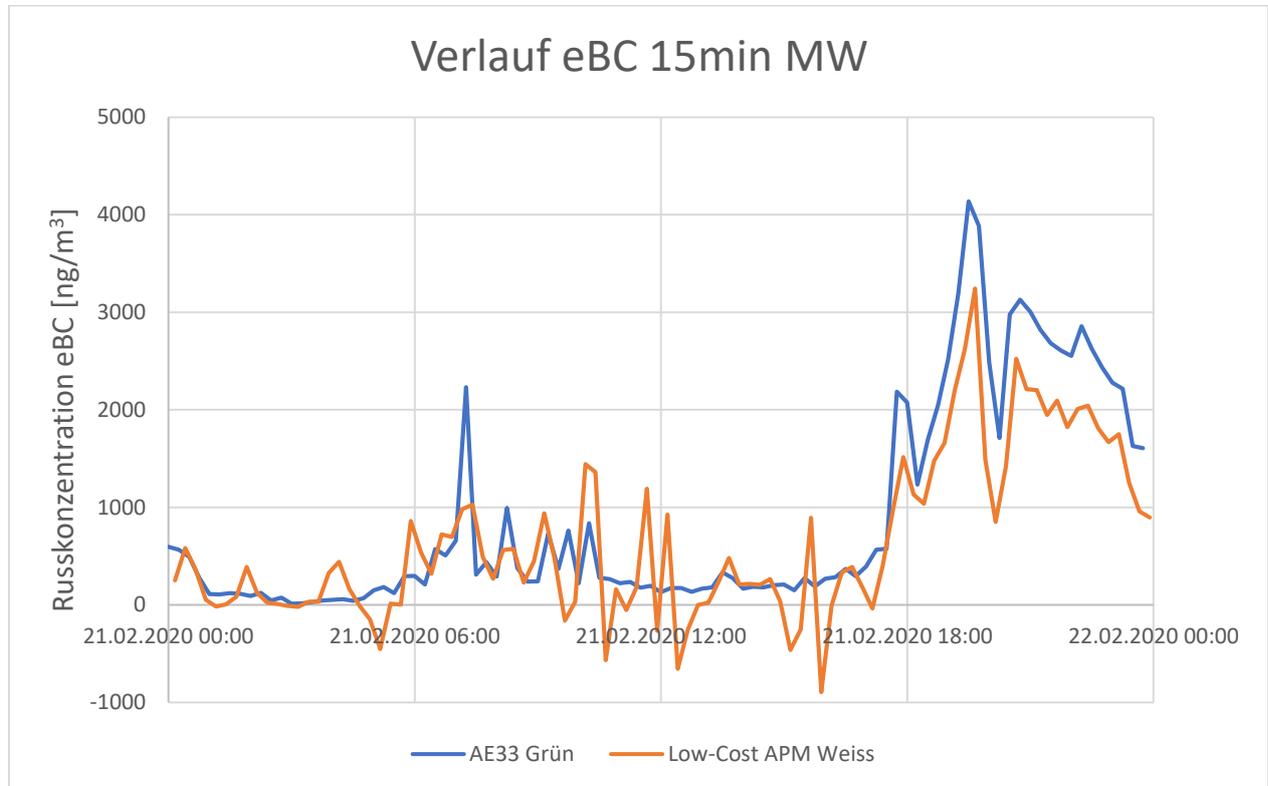


Abbildung 38: Messung Brugg Umgebung

Aufgrund der Messung lassen sich einige Vermutungen anstellen. So erkennt man eine relative geringe Russkonzentration ($<300 \text{ ng/m}^3$ mit Ausnahme einiger Peaks) zwischen 00:00 Uhr und 06:00 Uhr. Um 06:00 Uhr steigt die Konzentration sowohl auf dem AE33 wie auf dem Low-Cost APM an und bleibt in den nächsten Stunden auf etwas erhöhtem Niveau ($>500 \text{ ng/m}^3$ mit Ausnahme einiger Peaks). Diese erhöhte Konzentration ist wahrscheinlich auf den Morgenverkehr, der auf der Hauptstrasse in der Nähe langsam in Fahrt kommt, zurückzuführen.

Die Konzentrationen bleiben am Nachmittag niedrig, bis Sie vor 18:00 Uhr stark ansteigen. Grund dafür wird der Abendverkehr sein, der in Brugg meist stark von Stau begleitet wird.

Aus diesen Daten lässt sich die Verkehrsbelastung erahnen und mögliche Massnahmen herleiten, zum Beispiel eine Verkehrsreduktion erzwingen. Da die Grenzwerte des Bundesamts für Umwelt ($10 \mu\text{g/m}^3$ für $\text{PM}_{2.5}$) nicht überschritten werden, ist dies jedoch nicht nötig.

Persönlicher Bericht - Schwierigkeiten

In diesem Kapitel wird aus persönlicher Sicht geschildert, wo Schwierigkeiten im Projekt auftraten. So wurde über mehrere Bereiche hinweg noch nicht vorhandenes Verständnis und Anwendung von Software und Technik gefordert.

Konstruktion einer dichten Messkammer

Da ich zum ersten Mal mit dem CAD gearbeitet habe und noch keine Erfahrungen mit dem 3D-Druck gemacht habe, fiel es mir schwer, eine dichte Messkammer zu konstruieren. Dementsprechend veränderte sich die Geometrie der Messkammer im Verlauf des Projekts. Ein Vergleich zeigt Abbildung 39: Anpassung Messkammer. Der Unterschied in der Dimension der Messkammer erzielte einen enormen Unterschied in der Signalstärke, stärker als erwartet. So war die Geometrie des Messaufbaus die erste Schwierigkeit. Denn um Platz zu sparen und bessere Messwerte zu erhalten, sollte die Messkammer möglichst klein gehalten werden, dafür steigt die Herausforderung bei der Platzierung und Montage der Bauteile.



Abbildung 39: Anpassung Messkammer

Um die Messkammer abzudichten, wurde anfangs für die Öffnungen der Kabelverschraubungen und Luftanschlüsse Silikon verwendet, was optisch einen sehr unschönen Eindruck hinterliess und nicht sonderlich professionell war. Erst bei Einsatz einer ausgeschnittenen Gummidichtung konnte dieser Makel behoben werden. Die Messkammer muss möglichst dicht sein, da über dem Filter ein Druckabfall entsteht und die Luft sonst um den Filter fließen würde wobei sich die Russpartikel nicht im Filter ablagern. Die Messung wäre somit unpräzise.

Mit Hilfe von Patrick Specht (Konstrukteur am Institut für Sensorik und Elektronik) wurden dann die aktuelle verwendete Messkammer erstellt, welche bei Überprüfung des Luftstroms mit einer kritischen Düse eine **Dichtheit von über 94%** erreichte.

Probleme beim Datenlogger

Die RTC hat leider nach einiger Zeit immer wieder Abweichungen zur echten Zeit und sollte daher regelmässig aktualisiert werden. Es kann auch vorkommen, dass bei einzelne Zeilen ein falsches Datum eingetragen wird, z.B. das Jahr 2065 anstatt 2020.

Erweiterungsmöglichkeiten

Mit dem Abschluss der Bachelor Thesis wurde das Low-Cost Absorptionphotometer verbessert und vervollständigt. Es liessen sich fundamentale Erkenntnisse zum Messprinzip und bereits brauchbare Messdaten generieren. Die Vergleiche mit dem AE33 können ebenfalls als Erfolg bezeichnet werden. Es bieten sich jedoch mehrere Verbesserungsmöglichkeiten an, welche die Messgenauigkeit und Qualität des Low-Cost APM steigern würden.

Dazu gehören folgende:

Flusskontrolle

Ein grosser Teil der Messgenauigkeit ist von der Kontinuität des Luftstroms abhängig. Um Schwankungen auszugleichen, sollte der Luftfluss geregelt oder begrenzt (kritische Düse) werden.

Eigene Software ausbessern

Um dem Anwender des Low-Cost Absorptionsphotometers eine möglichst einfache Bedienung anzubieten, sollte eine Software erstellt werden, die dem Anwender erlauben, nur einen Namen für die Messung anzugeben mit Beschreibungen zur Messung. Die Software erstellt aus den Daten automatisch eine Excel-Tabelle und Graphik mit speziell gekennzeichneten Werten zur Auswertung. Diese Software könnte noch einiges ausgebessert werden, um auch über diverse Schnittstellen mit der Messung zu kommunizieren.

Professionelles PCB

Der momentane Aufbau ist relativ simpel gehalten. Es wird nur eine RGB-Diode als Lichtquelle verwendet. Dieser Aufbau kann um weitere Dioden vergrössert werden, um stärkere Signale zu erhalten. Auch wäre es denkbar, das Arduino Uno Board durch ein eigenes zu ersetzen, das wegen dem Low-Cost Gedanken aufs absolute Minimum beschränkt ist.

Schnittstellen

Zur einfacheren Handhabung der Messung würde es sich anbieten, weitere Schnittstellen, wie ein direkter Anschluss für den PC (z.B. über USB), hinzuzufügen. Zum P6 Abschluss muss der Anwender die Daten über eine SD-Karte auf den PC laden und manuell auswerten. Es wäre weitaus einfacher während der Messung die Daten direkt auf den PC zu schreiben oder ein USB-Stick zu verwenden.

Besserer Screen

Momentan wird ein LCD zur Anzeige der Messwerte verwendet, dieses kann jedoch nur ASCII-Charaktere darstellen. Es wäre komfortabler (auch ohne PC) an dem Messgerät selbst eine Messkurve auslesen zu können. Ebenfalls könnten über einen Touchscreen direkt Befehle an das Low-Cost APM gegeben werden.

Es bieten sich noch zahlreiche weitere Möglichkeiten, das Low-Cost APM auszubauen, bei dieser Liste handelt es sich nur um einen Auszug von Ideen, die während dem Projekt aufgekommen sind.

Schlusswort

Das Projekt wegen der Debatte zum Klimaschutz sehr aktuell. Auch gestaltete es sich als äusserst lehrreich, da viel Wissen, das in den Kursen der FHNW gelernt wird, in diesem Projekt angewandt werden konnte. Trotzdem wäre dieses Projekt ohne die Hilfe der Mitarbeiter des ISE nicht möglich gewesen. Deshalb will ich mich an dieser Stelle bei denjenigen bedanken, die zum Erfolg beigetragen haben:

Gott – Ohne ihn ich heute nicht hier wäre.

E. Weingartner – Für die stetige Hilfe zum Verständnis des Messprinzips und zum Vorgehen der Realisierung des Projekts.

Tobias Rüggeberg – Für die technische Unterstützung bei der Programmierung des Arduinos und Hilfe beim 3D-Drucken.

Jannis Röhrbein – Für die Unterstützung zum Messaufbau und Vorgehen im Projekt.

Patrick Specht – Für die Hilfe bei der Konstruktion einer dichten Messkammer.

Felix Mayer – Für die Erstellung der Software zur Datenübertragung ins Excel.

Matthias Oscity – Für die Hilfe zur Theorie der Beleuchtungsstärke.

Ebenfalls vielen Dank an weitere Mitarbeiter des ISE, die immer wieder bei Fragen zur Verfügung standen: Stefan Muhr, Manuela Wipf, Nadine Karlen und weiteren Personen.

Literaturverzeichnis

- [1] Bond et al., „Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment,“ *JGR Atmospheres*, Bd. 118, Nr. 11, pp. 5380-5552, 15 January 2013.
- [2] T. C. Bond, „A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion,“ *JGR Atmospheres*, Bd. 109, Nr. D14, 24 Juli 2004.
- [3] S. Vikas, „Trends of atmospheric black carbon concentration over the United Kingdom,“ *Atmospheric Environment*, Bd. 178, pp. 148-157, April 2018.
- [4] Bundesamt für Umwelt, [Online]. Available: <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19850321/index.html>. [Zugriff am 27 11 2019].
- [5] WHO (World Health Organization), „<https://www.who.int/>,“ 2016. [Online]. Available: https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/. [Zugriff am 10 Juli 2020].
- [6] H. D. Alas, „Spatial Characterization of Black Carbon Mass Concentration in the Atmosphere of a Southeast Asian Megacity: An Air Quality Case Study for Metro Manila, Philippines,“ *Aerosol and Air Quality Research*, Bd. 18, Nr. 9, pp. 2301-2317, September 2018.
- [7] in-luft.ch, [Online]. Available: <https://in-luft.ch/schadstoffe#russ>. [Zugriff am 27 11 2019].
- [8] Kutzner-Weber, „www.kutzner-weber.de,“ [Online]. Available: <https://www.kutzner-weber.de/deu/news/feinstaub.html>. [Zugriff am 10 Juli 2020].
- [9] Lungenärzte im Netz, 06 09 2012. [Online]. Available: <https://www.lungenaerzte-im-netz.de/news-archiv/meldung/article/was-macht-russpartikel-so-gefaehrlich/>.
- [10] X. Zhang, X. Chen und X. Zhang, „The impact of exposure to air pollution on cognitive performance,“ *PNAS*, Bd. 115, 11 September 2018.
- [11] Bildungsserver wiki, 24 03 2016. [Online]. Available: <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Aerosole>.
- [12] D. Shindell und G. Faluvegi, „Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century,“ *Nature Geoscience* 2, pp. 294-300, 22 März 2009.
- [13] MAGEE SCIENTIFIC, „mageesci.com,“ [Online]. Available: <https://mageesci.com/our-products/ae33/>. [Zugriff am 16 01 2020].
- [14] TetraTec Instruments, „www.tetrattec.de,“ [Online]. Available: <https://www.tetrattec.de/messtechnik/durchfluss-kalibriermittel/kritische-duesen/schallduesen-prinzip/>. [Zugriff am 22 Januar 2020].
- [15] F. CAD.de, „cad.de,“ 16-21 Juli 2012. [Online]. Available: <https://ww3.cad.de/foren/ubb/Forum226/HTML/001693.shtml>. [Zugriff am 21 Juli 2020].

- [16] P. Piwnicki, 17 12 2013. [Online]. Available:
<https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-51450.html>.
- [17] N. Kusche, 17 07 2015. [Online]. Available:
<https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/news/2015/aerosole-machen-wolken-heller/>.
- [18] WHO (World Health Organization), „Air pollution levels rising in many of the world’s poorest cities,“ 12 Mai 2016. [Online]. Available: <https://www.who.int/en/news-room/detail/12-05-2016-air-pollution-levels-rising-in-many-of-the-world-s-poorest-cities>. [Zugriff am 09 Juli 2020].
- [19] Bundesamt für Umwelt (bafu), „Grafiken Jahreswerte NABEL,“ 2019.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich Aufbau.....	22
Tabelle 2: Komponenten- und Preisübersicht.....	32
Tabelle 3: Übersicht Messgenauigkeit	50
Tabelle 4: Attenuation Low-Cost Absorptionsphotometer.....	53
Tabelle 5: Attenuation AE33.....	54
Tabelle 6: Tagesmittelwerte Einfluss Attenuation	54

Formelverzeichnis

Formel 1: Beer-Lambert	16
Formel 2: Berechnung der Attenuation	16
Formel 3: Berechnung der Russkonzentration.....	17
Formel 4: Berechnung der Beleuchtungsstärke	18
Formel 5: Berechnung der Standardabweichung.....	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausstoss Russ (Quelle: https://phys.org/news/2017-02-darkness-soot-air-pollution.html).....	9
Abbildung 2: Globale Entstehung von Russ (Bond et al (2004))	10
Abbildung 3: Trend BC in UK	10
Abbildung 4: Verlauf PM10 Schweiz (bafu Abruf: Juli 2020).....	11
Abbildung 5: Datenbank WHO (https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/).....	12
Abbildung 6: Gefahr durch Feinstaub (© Kutzner + Weber GmbH)	13
Abbildung 7: Erwärmung durch Absorption (Quelle: E. Weingartner)	14
Abbildung 8: Messung Luft (Quelle: E. Weingartner)	15
Abbildung 9: Beispiel Datenblatt RGB Diode.....	17
Abbildung 10: Physik Lichtstärke (Quelle: M. Oscity).....	18
Abbildung 11: Beispiel Abstrahlcharakteristik RGB Diode	19
Abbildung 12: Messprinzip Dual Spot	20
Abbildung 13: Messprinzip Low-Cost Absorptionsphotometer	21
Abbildung 14: Blockdiagramm APM Funktionen	23
Abbildung 15: Material - Arduino Uno	27
Abbildung 16: Pumpe mit kritischer Düse.....	29
Abbildung 17: Vorschau Messkammer CAD.....	29
Abbildung 18: Material - Data Logger Shield.....	30
Abbildung 19: Material - Platine Speisung	30
Abbildung 20: CPC Test 16 Lagen Toilettenpapier	31
Abbildung 21: CAD Messkammer komplett	37
Abbildung 22: Auszug Excel Mittelungsblöcke	39
Abbildung 23: Layout Excel Converter	40
Abbildung 24: Verdrahtung Arduino Uno (wegen Übersichtlichkeit ohne Adafruit Data Logger Shield)	41
Abbildung 25: Test des Aufbaus	42
Abbildung 26: Gedruckte Messkammer	43
Abbildung 27: Messung Luftstrom	43
Abbildung 28: Beispiel erzeugtes Text-File.....	45
Abbildung 29: Gehäuse Messaufbau.....	46
Abbildung 30: Material für Luftflusskalibrierung	47
Abbildung 31: Kalibrierung Luftfluss	48
Abbildung 32: Änderbare Parameter in Excel Blatt.....	49
Abbildung 33: Allan Plot Vergleich	51
Abbildung 34: Messung Zürich unbelegter Filter	52
Abbildung 35: Messung Zürich belegter Filter	52
Abbildung 36: Attenuation AE33.....	53
Abbildung 37: Messverlauf Zürich.....	55
Abbildung 38: Messung Brugg Umgebung.....	56
Abbildung 39: Anpassung Messkammer	57