

Zusammenfassung

Er ist unsichtbar, gesundheitsschädlich und kaum erforscht – Feinstaub.

Silvester und der Diesel-Skandal machen auf die Problematik aktuell aufmerksam. Der kaum erfasste Ultrafeinstaub in unserer Atemluft ist sogar blutgängig und krebsfördernd. Wir haben die Thematik auf interdisziplinäre Art und Weise vielfältig untersucht. In verschiedenen Alltags-situationen wurde die Feinstaubbelastung stichprobenartig gemessen, jedoch sind für verlässliche Aussagen Langzeitmessungen erforderlich, die wir unter anderem an Silvester durchgeführt haben. Ferner haben wir die Wirksamkeit verschiedener Feinstaubfilter erprobt. Zudem haben wir das Sinkverhalten von Partikeln experimentell untersucht. Die Entstehung von sekundärem Feinstaub durch komplexe atmosphärische Reaktionen haben wir im Labor simuliert. Für die Speicherung und Analyse von Datenreihen haben wir ein mobiles Messgerät mit 3D-gedrucktem Gehäuse entwickelt und umfangreiche Software dafür selbstständig programmiert.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
2 Problemfragen	2
3 Was ist Feinstaub?	2
4 Wie entsteht Feinstaub?	2
4.1 Primärer Feinstaub	2
4.2 Sekundärer Feinstaub	3
5 Versuch I - Wie hoch ist die Feinstaubbelastung in Alltagssituationen?	3
6 Wie kann man Feinstaub effektiv filtern?	4
6.1 Chemie der Wunderkerze	4
6.2 Filter	5
6.2.1 Drahtgewebe	5
6.2.2 Faserige Filter	5
6.2.3 Aktivkohlefilter	5
6.3 Versuch II - Staubemissionen sieben	6
6.4 Versuch III - Staubemissionen filtern	6
7 Wie lässt sich ein zuverlässiges Langzeitmessgerät bauen?	8
7.1 Vergleich von Feinstaubmesstechniken	8
7.1.1 Gravimetrisches Verfahren	8
7.1.2 Photometrisches Verfahren	8
7.1.3 Kondensationspartikelzähler	8
7.2 Das Messgerät	8
7.3 Das Gehäuse	9
7.4 Die Software	9
7.4.1 Automatische Fehlerkorrektur	9
7.4.2 Prognose	9
7.5 App	10
7.6 Validierung	10
8 Wie sieht es mit der Feinstaubbelastung an Silvester aus?	10
8.1 Versuch IV - Langzeitmessung an Silvester/Neujahr	10
8.2 Absinkverhalten	12
8.2.1 Versuch V - Absinkverhalten von Primärpartikeln	13
8.3 Versuch VI - Simulation von sekundärer Feinstaubbildung	13
8.4 Absinkverhalten von Sekundärpartikeln	14
9 Kritik	15
10 Fazit und Ausblick	15
11 Literaturverzeichnis	17

1 Einleitung

Zahlreiche Nachrichten verweisen auf das aktuelle Feinstaubproblem in unserer Atemluft. Dieselfahrverbote, Grenzwertüberschreitungen und Feuerwerk an Silvester befeuern die öffentliche Debatte. Je nach Partikeldurchmesser können die winzigen Teilchen unterschiedlich tief in den menschlichen Körper eindringen. Die kleinsten Partikel gelangen sogar in unsere Lungenbläschen und sind blutgängig, sodass Bronchitis, Allergien und Krebserkrankungen resultieren können. Die Zahl der Toten durch direkte Verkehrsunfälle in Deutschland lag 2018 bei 3220 [1]. Nach den Erkenntnissen des Max-Planck-Institut Mainz verursacht Feinstaub dagegen jährlich etwa 120000 verfrühte Tode im Bundesgebiet [2]. Das sind sogar 1000 mehr als durch das (Passiv)Rauchen [3]. Außerdem haben Kleinstpartikel einen noch unbekannten Einfluss auf die Wolkenbildung- und Bewegung [4] und tragen durch ihr Rückstrahlvermögen auch zum Klimawandel bei [ebd.]. Demnach ist offensichtlich, dass es die Feinstaubemissionen zu reduzieren gilt.

2 Problemfragen

Während unserer Forschungsarbeit haben wir uns mit den folgenden Problemfragen beschäftigt:

- Was ist Feinstaub?
- Wie entsteht er?
- Wie hoch ist die Feinstaubbelastung in Alltagssituationen?
- Wie kann man Feinstaub effektiv filtern?
- Wie lässt sich ein zuverlässiges Langzeitmessgerät bauen?
- Wie sieht es mit der Feinstaubbelastung an Silvester aus?

3 Was ist Feinstaub?

Der Begriff Feinstaub beschreibt die aus verschiedensten kleinen Partikeln und Tröpfchen bestehende disperse Phase im Dispersionsmedium Luft. Wobei sich die Bestandteile jener Phase in Form, Farbe, Größe, sowie chemischer Zusammensetzung und Entstehung unterscheiden [5]. Feinstaub wird zumeist in Größenfraktionen PM_x beschrieben. PM_x bezieht sich auf alle Partikel und Tröpfchen, die klein genug sind, um durch einen grösenselektiven Einlass mit 50% Wirkungsradschwächung bei $x \mu m$, zu gelangen [ebd.]. Gewöhnliche Größenfraktionen sind PM_{10} und dessen Subfraktion $PM_{2,5}$. Darüber hinaus werden im Kontext von Feinstaub die Teilchen zwischen $2,5 \mu m$ und $10 \mu m$, $PM_{10-2,5}$, als grobe, $PM_{2,5-0,1}$ als feine und $PM_{0,1}$ als Ultrafeinstaub bezeichnet [6]. Die Feinstaubkonzentrationen werden regulär in $\mu g/cm^3$ angegeben.

Der Begriff Feinstaub ist offiziell keiner Größenfraktion zugeordnet, jedoch ist zumeist die PM_{10} -Kategorie gemeint.

4 Wie entsteht Feinstaub?

Generell kann Feinstaub anthropogenen oder natürlichen Ursprungs sein. Feinstaubpartikel können ferner nach ihrer Entstehungsart unterschieden werden.

4.1 Primärer Feinstaub

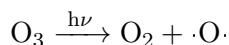
Kleine Staubpartikel, die auch ohne die Reaktion mit weiteren Stoffen in der Atmosphäre entstehen, bezeichnet man als primären Feinstaub. Menschlich erzeugter Primärstäube sind z. B. Aufwirbelungen, Reifen- und Bremsabrieb im Verkehr sowie Ruß aus Verbrennungen in Kraftwerken. Primäre, natürliche Emissionen stammen beispielsweise aus Vulkanen, Wald- und Buschfeuern, Meeren oder biogenen Aerosolen wie Pilzsporen.

4.2 Sekundärer Feinstaub

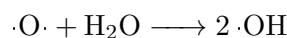
„Als sekundäre Feinstäube bezeichnet man [...] Partikel, die durch komplexe chemische Reaktionen in der Atmosphäre [...] aus gasförmigen Substanzen, wie Schwefel- und Stickstoffoxiden, Ammoniak oder Kohlenwasserstoffen, entstehen.“ [7]

Zu den sekundären Feinstäuben gehören u. a. Ammoniumnitrat (NH_4NO_3) und Ammoniumsulfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). Für die Entstehung jener Stoffe müssen z. B. Ammoniak (NH_3) und Stickstoffdioxid (NO_2) bzw. Schwefeldioxid (SO_2) vorhanden sein. Ammoniak wird in der Landwirtschaft, größtenteils durch Gülle, freigesetzt. Stickstoffoxide entstehen bei nahezu allen Verbrennungsprozessen (z. B. Kraftwerke oder Automotoren) und Schwefeldioxid hauptsächlich bei der Verbrennung von Braunkohle.

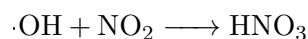
Die Atmosphärenchemie ist komplex. Ein möglicher Reaktionsweg führt über die Spaltung eines Ozonmoleküls durch ein Photon. Das Ozonmolekül kann hier aus der Stratosphäre kommen oder durch stickstoff- und kohlenstoffhaltige Schadstoffe in Bodennähe gebildet worden sein [8]:



Das Sauerstoffatom reagiert daraufhin mit Wasser aus der Luft zu Hydroxyl-Radikalen:



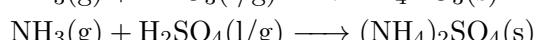
Darauf reagiert ein Hydroxyl-Radikal mit anthropogen erzeugten Stickstoffdioxid zu Salpettersäure:



Alternativ können zwei Hydroxyl-Radikale mit Schwefeldioxid über ein Zwischenprodukt zu Schwefelsäure reagieren:



Die Säuren reagieren jeweils mit dem Ammoniak in einer Säure-Base-Reaktion (Neutralisation) zu sekundärem Feinstaub [9]:



5 Versuch I - Wie hoch ist die Feinstaubbelastung in Alltagssituationen?

Wir möchten die Feinstaubbelastungen verschiedener Alltagssituationen grob vergleichen. Damit soll ein Bewusstsein für die tendenzielle Schädlichkeit verschiedener Umstände geschaffen werden. Im Vorfeld haben wir erfahren, dass bei Laserdruckern, Diesel-Emissionen, Fritteusen, Kaminöfen und an Silvester die Feinstaubbelastung sehr hoch sein soll und möchten dies überprüfen.

Geräte/Versuchsaufbau:

Kommerzielles Feinstaubmessgerät

Durchführung:

Mit dem Messgerät werden stichprobenartig Feinstaub-Konzentrationen an verschiedenen Orten im Alltag ermittelt.

Beobachtung:

Ort/Situation	PM _{2,5} in µg/m ³	PM ₁₀ in µg/m ³
Abbrennen einer Wunderkerze	Anzeigemaximum, 999	Anzeigemaximum, 1999
Auspuff am Dieselauto	466	561
Blockheizkraftwerk einer Biogasanlage	3	5
Hauptbahnhof Bremen	16	20
Hauptverkehrsstraße (Reihdamm)	9	13
Imbiss	50	56
Kleintierställe (Kühe, Schweine,Hühner)	2	5
Kreuzung (Reihdamm, Mühlenstraße)	26	28
Kochen und Braten in der Küche	364	647
Kopierraum der Schule (GZE)	2	4
Landluft (Tarmstedt)	2	4
Löcher in Wand bohren	52	431
McDonalds (Bad Zwischenahn)	20	21
Neujahr (ca. 00.50 Uhr)	10	10
Passivrauchen	Anzeigemaximum, 999	Anzeigemaximum, 1999

Auswertung:

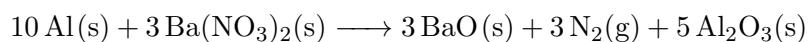
Teilweise scheinen die Werte plausibel, beispielsweise während des Passivrauchens, bei Baustaub oder am Auspuff eines Autos. Viele Ergebnisse sind möglicherweise von äußeren Konditionen wie z. B. durch Luftzug, kondensierten Wasserdampf (Meteorologie) oder physische Hindernisse beeinflusst worden. Dies ist uns vor allem bei der Hauptverkehrsstraße, nach Silvester oder beim Kochen aufgefallen. Vielleicht ist der Feinstaub beispielsweise bei McDonalds auch herausgefiltert worden. Um valide Aussagen bzgl. des Feinstaub treffen zu können, sollte also langfristig gemessen werden, damit unvorhergesehene und ggf. kurzfristige äußere Einflüsse minimiert werden können.

6 Wie kann man Feinstaub effektiv filtern?

Um zu untersuchen, inwieweit es möglich ist, Feinstaub effektiv zu filtern, ist zunächst eine geeignete Feinstaubquelle nötig. Nach verschiedenen Experimenten mit unterschiedlichen Kerzen und Verbrennungen stellte sich die Wunderkerze als idealer Feinstaubemittent für Laborversuche heraus, da sie eine hohe Dosis an Feinstaub ausstößt und einfach durchzuführende Versuche ermöglicht. Dabei ist weder Pumpe noch Sauerstoffzufuhr nötig. Zunächst gilt es, die Wunderkerze auf chemischer Ebene zu verstehen.

6.1 Chemie der Wunderkerze

Aufgebaut ist eine Wunderkerze aus einem 20 cm langen Draht, der mit einer brennbaren Masse beschichtet ist. Die Masse besteht zu 55% aus Bariumnitrat, zu 5% aus Aluminium- und zu 25% aus Eisenpulver sowie zu 15% Dextrin als Bindemittel. Bei der Verbrennung handelt es sich um eine Redoxreaktion, in der die Aluminium- und Eisenatome oxidiert werden und der Stickstoff des Nitrats reduziert wird. Währenddessen werden viel thermische Energie und giftiges Stickstoffmonoxid frei.



Die Reaktionsgleichungen können ähnlich auf Eisenatome angewendet werden.

Bei der vollständigen Verbrennung von Dextrin bilden sich Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf.



Falls dabei Sauerstoffmangel herrscht, können auch giftiges Kohlenstoffmonoxid und Ruß freiwerden. Bei der Reaktion des Bariumnitrats schleudern die gasförmigen Produkte (N_2 , CO_2 , NO) die Eisenpartikel nach außen, die mit Umgebungssauerstoff oxidieren und so für den Funkenflug verantwortlich sind [10]. Die unter anderem entstehenden Magnetit-Partikel sind primärer Feinstaub. Die Stickstoffmonoxid-Emissionen würden bei Anwesenheit von Ammoniak zur sekundären Partikelbildung beitragen.

6.2 Filter

Im Folgenden werden die Feinstaubfilter und ihre Funktionsweisen vorgestellt und experimentell untersucht.

6.2.1 Drahtgewebe

Rechtwinklig überkreuzte Drähte unterteilen eine Fläche in Maschen. Die Größe dieser Maschen wird als Siebschnitt bezeichnet. Das zu siebende Medium wird durch das Gewebe hindurchgeleitet, wobei Partikel mit einem größeren Durchmesser als der des Siebschnitts hängen bleiben (Siegüberlauf) und kleinere Teilchen hindurchgelangen (Siebdurchgang). Am Ende erhält man zwei Fraktionen, die sich in ihrer Größe unterscheiden [11]. Das Sieben mit Drahtgewebe findet u. a. in der Heißgasfiltration bei der Kohlevergasung Anwendung. Vorteile sind die außerordentliche Beständigkeit gegen Hitze und Chemikalien sowie die Langlebigkeit und die gute Trennschärfe [12]. Als Nachteil steht dem gegenüber, dass verstopfte Maschen ständig gereinigt werden müssen.

6.2.2 Faserige Filter

Das verunreinigte Gas durchläuft meist verschiedene Faserschichten. Die Fasern der Schichten variieren dabei in ihrem Abstand, Durchmesser und Länge. Bei der Staubfilterung kommen verschiedene Wirkprinzipien zum Einsatz, die je nach Partikelgröße unterschiedlich effektiv funktionieren: Siebwirkung, Trägheitseffekt, Sperreffekt, Diffusionseffekt und Elektrostatische Anziehung. Erheblichen Einfluss auf den Wirkungsgrad haben auch die Anströmgeschwindigkeit und der Luftzustand (Temperatur, Feuchte und Druck). Die Vorteile von faserigen Filtern liegen in ihrer Effektivität gegenüber diversen Teilchengrößen und im hohen Wirkungsgrad. Nachteilig ist dagegen, dass Faserfilter regelmäßig ausgetauscht werden müssen [13].

6.2.3 Aktivkohlefilter

Aktivkohle besteht wie herkömmliche Kohle hauptsächlich aus Kohlenstoff, hat jedoch eine sehr große Oberfläche. So entspricht die innere Oberfläche von zwei Gramm Aktivkohle ungefähr der Fläche eines Fußballfeldes [14]. Bei der Adsorption handelt es sich um Physisorption, da das Adsorptiv nur durch physikalische Kräfte an das Substrat gebunden, ohne dass dabei die chemische Struktur verändert wird. Es wirken Van-der-Waals-Kräfte [15]. Aktivkohle wird hauptsächlich als Adsorptionsmittel genutzt, um Farb-, Geschmacks- und Geruchsstoffe aus Gasen, Dämpfen und Flüssigkeiten zu entfernen [ebd.]. Klassische Anwendungsbereiche sind Atemschutzmasken, Klimaanlagen von Autos oder Kühlschränke. Für Aktivkohle spricht die Vielzahl an Adsorptiven und, dass sie vor allem kleine Partikelklassen filtert. Außerdem ist sie bis zu einem gewissen Grad thermisch reaktivierbar, jedoch verbrennt sie in Gegenwart von Sauerstoff bei zu hohen Temperaturen zu Kohlenstoffdioxid. Des Weiteren sieht man Aktivkohle die Schadstoffsättigung meist nicht an.

6.3 Versuch II - Staubemissionen sieben

Wir haben erfahren, dass Rauch u. a. in der Kohlevergasung gesiebt wird, um größere Partikel herauszufiltern. Wir erwarten, mithilfe eines feinen Drahtgewebes auf Größeneigenschaften der Staubpartikel aus Emissionen einer Wunderkerze schließen zu können.

Geräte/Versuchsaufbau:

Wunderkerze, Knete, selbst erstelltes Drahtgewebe-Filter (Siebschnitt 35 µm), kommerzielles Feinstaubmessgerät, Stativmaterial, Gasbrenner



Durchführung:

Die Wunderkerze wird mit Knete stehend fixiert und mit dem Gasbrenner entzündet. Anschließend wird schnell der Drahtgewebe-Filter übergestülpt. Mit dem darüber befindlichen Feinstaubmessgerät, das mit Stativmaterial befestigt ist, wird die Partikelkonzentration gemessen. Da die Emissionen einer Wunderkerze, darunter Feinstaub, gesundheitsschädlich sind, sollte der Versuch unter dem Abzug durchgeführt werden.

Beobachtung:

Es steigt ein dunkler Rauch auf. Auf dem Untergrund bildet sich ein schwarzer Staubniederschlag. Die Feinstaubwerte schlagen bis auf das Anzeigemaximum ($1999 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für PM_{10} und $999 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für $\text{PM}_{2,5}$) an. Im Drahtgewebe bleiben keine Partikel hängen.

Auswertung:

Der Rauch besteht aus Eisen- und Aluminiumoxiden. Die Partikel von Wunderkerzenemissionen sind kleiner als 35 µm, da es keinen Siebüberlauf gibt und somit keine Reduzierung der Feinstaubwerte durch das Drahtgewebe entsteht.

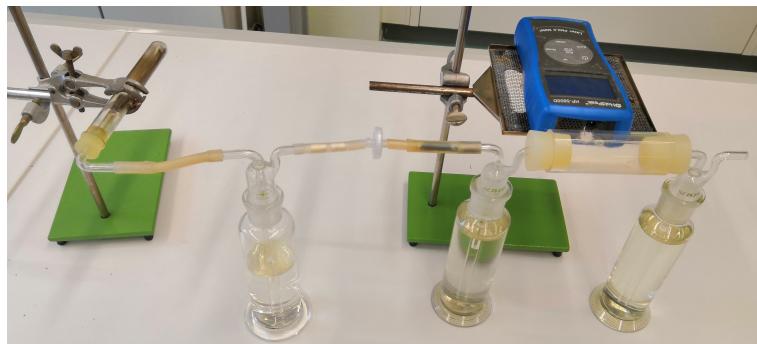
6.4 Versuch III - Staubemissionen filtern

Wir wollten die theoretisch und praktisch ergründeten Emissionen einer Wunderkerze näher untersuchen. Die Partikelbelastung überstieg das Anzeigemaximum unserer Sensoren auch noch nach einiger Zeit. Mit verschiedenen Filtern erhofften wir uns Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Feinstaubes und versuchten, die Partikel von der Luftverschmutzung und Inkorporation abzuhalten. Da das Aerosol vermutlich sehr heterogen ist und die darin enthaltenen größeren Partikel die Aktivkohle-Filterwirkung mindern, indem sie ihre innere Oberfläche verringern, werden sie durch Fasern vorher herausgefiltert. Die Luftfördermenge des Radiators im Messgerät darf bei der Messung nicht beeinflusst werden, da sie für eine exakte Berechnung der Feinstaubbelastung konstant sein muss. Deshalb soll die Messung in einem nahezu geschlossenen Raum ohne äußere Einflüsse stattfinden. Um dies zu gewährleisten, werden ein eigens modifiziertes Plexiglasrohr

mit integriertem Druckausgleichsmechanismus und Gaswaschflaschen als Ventile verwendet. Das Wasser in den Flaschen stellt eine einheitliche Temperatur sicher, um die Feinstaubwerte vergleichbar zu machen.

Geräte/Versuchsaufbau:

Wunderkerze, Reagenzglas, Stopfen mit Rohr, Stativmaterial, Schläuche, 2 Gaswaschflaschen, Wasser, Zigarettenfilter, Partikelfilter, Aktivkohle, modifiziertes Plexiglasrohr, 2 große Stopfen mit Rohr, Feinstaubmessgerät, Gasbrenner



Durchführung:

Zuerst wird der Draht der Wunderkerze umgeknickt, sodass sie in das Reagenzglas passt, welches mit einem Stopfen verschlossen wird. An das Rohr des Stopfens wird mit einem Schlauch die Wasser enthaltende Gaswaschflasche so angeschlossen, dass die emittierten Gase von unten hindurchgeleitet werden. An das andere Ende der Flasche wird wieder ein Schlauch angeschlossen, der das Gas durch zwei faserige Zigarettenfilter, einen faserigen Flüssigkeitsfilter und einen Aktivkohlefilter leitet. Der Schlauch wird an das Rohr eines großen Stopfens angeschlossen, dann folgt das Plexiglasrohr und schlussendlich wieder ein Stopfen mit Rohr. Diese wird an eine Wasser enthaltende Gaswaschflasche angeschlossen. Die Wunderkerze im Reagenzglas wird von außen mit dem Gasbrenner entzündet. Das Loch im Plexiglasrohr wird zunächst verschlossen. Nachdem die Wunderkerze abgebrannt ist, wird der Feinstaub an dem Loch gemessen und der Druckausgleich aktiviert.

Beobachtung:

Im Reagenzglas entstehen ein dunkler Rauch und ein schwarzer Feststoff. An der Reagenzwand kondensiert Wasserdampf. Im Wasser der ersten Gaswaschflasche sammeln sich kleine, dunkle Partikel. An den Zigarettenfiltern und im Partikelfilter ist eine dunkle Färbung zu erkennen. Das Gas im Plexiglasrohr ist klar und es strömt mit nahezu parallel aufsteigenden Bläschen durch das Wasser in den Gaswaschflaschen. Der PM_{2,5}- und PM₁₀-Wert betragen ca. 8 µg/m³ bzw. 13 µg/m³.

Auswertung:

Der Rauch besteht aus Ruß- und Feinstaub-Partikeln. Große Teilchen schlagen sich im Wasser der ersten Gaswaschflasche nieder. Etwas kleinere Partikel bleiben in den faserigen Filtern hängen, was sich in den Färbungen äußert. Die kleinsten Aerosole werden mit Van-der-Waals-Kräfte an die Aktivkohle adsorbiert. Da das Gas im Plexiglasrohr nicht mehr bräunlich, sondern klar ist, adsorbiert die Aktivkohle sehr wahrscheinlich auch die nitrosen Gase (NO₂/N₂O₄-Gleichgewicht). Die parallel aufsteigenden Bläschen zeugen von einem nahezu geschlossenen System. Insgesamt ist das Filtersystem sehr wirksam, um die Emissionen einer Wunderkerze zu säubern. Es ist aber einzuwenden, dass die Filterwirkung nach einigen Versuchsdurchführungen

stark absinkt. Sollte man die Filter dieses Versuchs unter realen Bedingungen nutzen, um die Luftqualität zu verbessern ist jedoch zu erwarten, dass das System weitaus langlebiger ist, da die Feinstaubkonzentrationen geringer sind.

Andere Filtersysteme wurden auch untersucht. Sie sind aufgrund ihrer geringeren Effektivität jedoch nicht erwähnenswert. Die geringe Effizienz anderer, hauptsächlich simplerer, Filter(-kombinationen) spricht jedoch für unsere Hypothese, dass die Kleinstpartikel sehr heterogen sind und für maximale Effizienz hierarchisch herausgefiltert werden sollten.

7 Wie lässt sich ein zuverlässiges Langzeitmessgerät bauen?

Da wir nicht nur punktuell die Quantität des Feinstaubes messen wollen, sondern auch Daten über längere Zeiträume erfassen, streamen und automatisch analysieren möchten, haben wir ein eigenes Messgerät konzipiert.

7.1 Vergleich von Feinstaubmesstechniken

Es gibt drei gängige Verfahren zur quantitativen Feinstaubanalyse: Das gravimetrische Verfahren, auf photometrische Weise und den Kondensationspartikelzähler. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

7.1.1 Gravimetrisches Verfahren

Bei dem gravimetrischen Verfahren wird die Luft erst eingesaugt und dann durch konditionierte Filter geleitet, sodass die Partikel mit einem spezifischen Durchmesser an einem bestimmten Filter hängen bleiben. Aus der Masse der verunreinigten Filter und dem Volumen der eingesaugten Luft kann zum Schluss die Feinstaubkonzentration abgeleitet werden.

Einerseits ist dieses Verfahren aufwendig und ohne die Verwendung eines Vorabscheiders anfällig für Fehler, anderseits ermöglicht es, die Partikel im Anschluss qualitativ zu analysieren [16].

7.1.2 Photometrisches Verfahren

Das photometrische Verfahren nutzt den Tyndall-Effekt, der die Streuung von Licht an suspendierten Stoffen beschreibt. In einem derartigen Messgerät ist ein Laser installiert, der durch das zu messende Gas strahlt und ein Photodetektor, der in einem Winkel von 15 bis 90° zu dem Laserstrahl verbaut ist. Aus dem Volumen der zuvor angesogenen Luft und der gemessenen Intensität der Streuung kann auf die Feinstaubkonzentration zurückgeschlossen werden.

Das photometrische Verfahren ist aufgrund seiner Unkompliziertheit und dem schnellen Erhalt von Daten am weitesten verbreitet. Es bedarf allerdings genauer Kalibrierung [17].

7.1.3 Kondensationspartikelzähler

In einem Kondensationspartikelzähler wird die eingesaugte Luft zunächst mit einer leicht zu verdampfenden Flüssigkeit wie n-Butanol angereichert. Darauf wird das Gas schlagartig abgekühlt, sodass die Flüssigkeit an der Oberfläche der Partikel kondensiert. Dadurch sind die Partikel sichtbar genug, um mithilfe eines Lasers und Impulszählung die Partikelkonzentration zu messen.

Der Kondensationspartikelzähler ermöglicht Aussagen über die Anzahl, jedoch ist dieser Informationsgewinn vergleichsweise umständlich [18].

7.2 Das Messgerät

Das Wichtigste unseres Messgeräts ist der Feinstaubsensor „nova SDS011“, der mit dem photometrischen Verfahren misst. Nach Abwägen der Alternativen haben wir uns hierfür entschieden, da sich dieser Sensor in zahlreichen anderen semiprofessionellen Messgeräten bewährt hat und verhältnismäßig günstig ist. Da wir erfahren haben, dass der Luftzustand einen erheblichen

Einfluss auf die Feinstaubbelastung hat, können wir mit dem Thermo-/Hydrometer „DHT 22“ zusätzlich die Temperatur und Luftfeuchte messen. Für eine mobile Stromversorgung nutzen wir eine herkömmliche Powerbank mit 10000 mAh. Als Minicomputer schien uns zunächst ein Arduino mit SD-Kartenspeicherung ausreichend. Es stellte sich aber heraus, dass die Programmiersprache des Arduinos für unsere Zwecke zu unflexibel ist. Da es sehr zeitaufwendig gewesen wäre, mit einem Raspberry Pi von vorne anzufangen, entwickelten wir ein Protokoll mit dessen Hilfe der Raspberry über ein USB-Kabel an die erfassten Daten des Arduinos kam. Später schrieben wir das Programm jedoch so um, dass ausschließlich der „Raspberry Pi 3 Model B“ mit den Sensoren verbunden werden musste. Dies erfolgte, weil der Entwicklungsprozess der Daten über mehrere Plattformen nicht länger aufrechtzuerhalten war.

7.3 Das Gehäuse

Offene Platinen und lose Kabel sind nicht nur optisch unattraktiv, sondern auch unhandlich und anfällig für Wackelkontakte und Schäden. Wir brauchen also ein entsprechendes Gehäuse für unser eigenes Messgerät. Dafür haben wir mit dem CAD-Programm „Autodesk Inventor“ zwei Gehäusekörper mit Deckeln erstellt und mit dem 3D-Drucker „Ultimaker 2+“ ausgedruckt. Das kompakte Gehäuse aus PLA bietet Zugang zu allen benötigten Anschlüssen, ist kostengünstig und schützt dank Platinen-Verschraubung vor äußereren Beeinträchtigungen. Für Messungen im Außenbereich haben wir ein witterungsgeschütztes Gehäuse aus zwei Rohren gebaut.

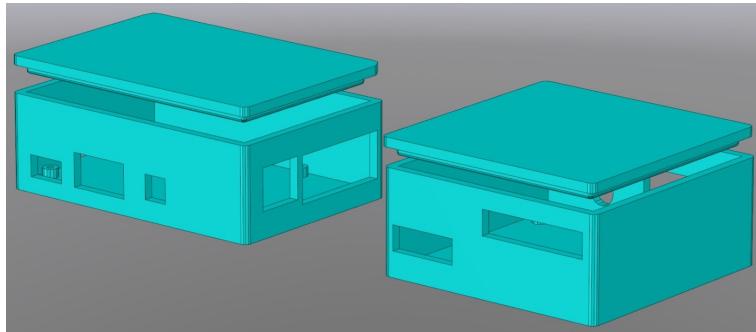


Abbildung 1: Gehäuse des eigenen Messgeräts

7.4 Die Software

Es wurde mit der Programmiersprache „Python“ gearbeitet. Die von uns entwickelte Software ist im Internet auf github.com/paulwollenhaupt einsehbar. In dem Github-Repository sind Python-Scripts für das Messen, Speichern, Analysieren und Plotten von Daten und die sonst genannten selbst entworfenen Computerprogramme vorhanden. Darüber hinaus sind auch einige Scripts im Anhang einsehbar.

7.4.1 Automatische Fehlerkorrektur

Der Sensor misst punktuell eindeutig fehlerhafte Feinstaubkonzentrationen. Diese Fehler erschweren es, Modelle wie künstliche neuronale Netzwerke oder Regressionen an die Daten anzupassen. Es ist uns möglich, mithilfe eines eigens entworfenen Computerprogramms die fehlerhaften Messwerte im Nachhinein nach bestimmten Kriterien aus Datenreihen zu entfernen.

7.4.2 Prognose

Wir haben ein künstliches neuronales Netzwerk entwickelt, welches das nichtlineare Verhältnis der Partikelgrößen approximiert. Diese Vorhersage kann dabei helfen, besser mit fehlenden oder fehlerhaften Daten umzugehen. Außerdem kann man anhand des Unterschieds zwischen prognostizierten und tatsächlichen Werten die Genauigkeit des Modells überprüfen.

stiziertem Wert und tatsächlichem Wert Abnormitäten erkennen und einordnen. Ein Anwendungsbeispiel ist unter 4.3, Abb.7 ersichtlich.

7.5 App

Unser mobiles Messgerät kann bei Internetverbindung die gemessenen Daten direkt zu einem Server senden. Die Daten können dann mithilfe einer Android-Applikation ausgelesen und grafisch dargestellt werden.

7.6 Validierung

Wie oben beschrieben, haben wir unser eigenes Messgerät zusammengestellt und programmiert, jedoch möchten wir die Validität unserer Daten überprüfen. Dafür haben wir eine Vergleichsmessung zur offiziellen Verkehrsstation des Lufthygienischen Überwachungsinstituts Niedersachsen (LÜN) in Oldenburg durchgeführt. Da die offiziellen Daten nur als gleitender 24h-Mittelwert online einsehbar sind, haben wir uns Zugang zu stündlichen Mittelwerten verschafft. Dementsprechend haben wir unsere Daten mit einem eigenen Computerprogramm umgewandelt. Die Verkehrsstation steht an der Straße „Heiligengeistwall“ in Oldenburg (Niedersachsen) und misst mit dem gravimetrischen Verfahren. Wir haben das eigene Messgerät innerhalb des wetterfesten Gehäuses in der Nähe des Ansaugstutzens der Verkehrsstation angebracht, sodass es in 30 Minuten-Abständen einen Stundenmittelwert der gemessenen Daten erstellt hat.

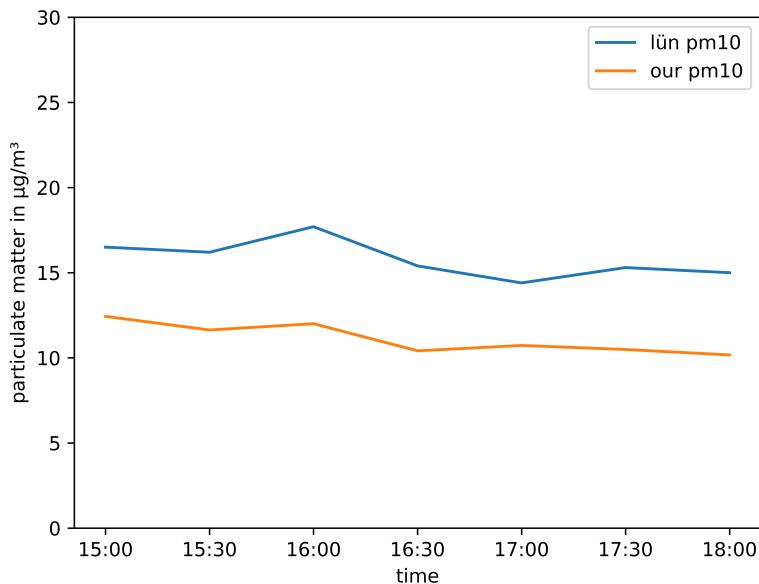


Abbildung 2: Offizielle und eigene Daten im Vergleich

Die verhältnismäßig geringe Differenz der PM₁₀-Werte und die korrelierenden Verlaufsformen der Graphen zeigen, dass unser Messgerät relativ valide Werte liefert. Die Unterschiede zu den Daten des LÜN gründen wahrscheinlich auf den verschiedenen Messverfahren und geringen Messfehlern, die bei beiden Messgeräten aufgetreten sein könnten.

8 Wie sieht es mit der Feinstaubbelastung an Silvester aus?

8.1 Versuch IV - Langzeitmessung an Silvester/Neujahr

Oft wird das Feuerwerk an Silvester für dessen weiträumige Feinstaubemissionen kritisiert, doch ist das berechtigt? Und gilt dies auch für unsere Heimat, den Luftkurort Bad Zwischenahn? Dafür haben wir zwischen 16.09 Uhr an Silvester und 2.53 Uhr an Neujahr 2019 an einer abgelegenen Lichtung am Zwischenahner Meer die Feinstaubkonzentrationen gemessen.

Geräte/Versuchsaufbau:

Eigenes Feinstaubmessgerät, witterfestes Gehäuse, Powerbank

Durchführung:

Das eigene Messgerät wird innerhalb des witterfesten Gehäuses in einen Baum auf 3,5 m Höhe gehängt. Es wird bis zur Entladung der Powerbank des Messgeräts gemessen.

Beobachtungen:

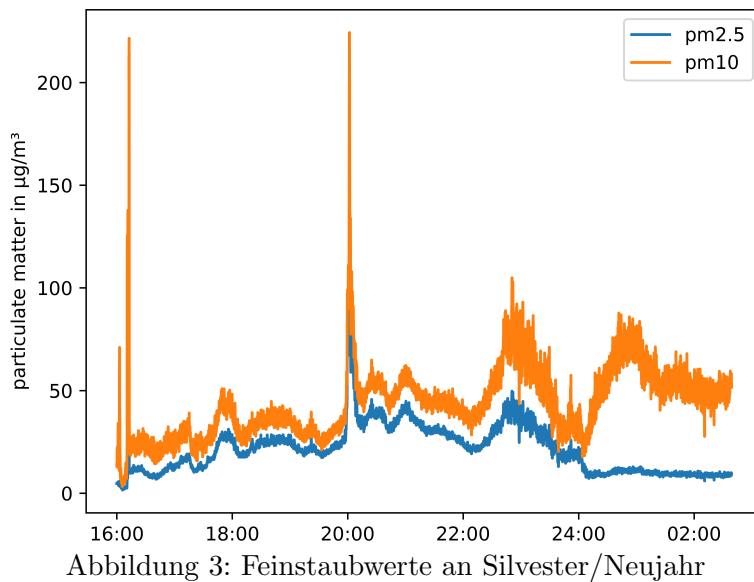


Abbildung 3: Feinstaubwerte an Silvester/Neujahr

Zumeist liegt der PM₁₀-Wert bei ca. 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und der PM_{2,5}-Wert bei ca. 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Um 16.00 und 20.00 Uhr gibt es jeweils kurzzeitig auffällige Feinstaubwerte von ca. 220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Zwischen 22.00 und 24.00 Uhr kommt es erneut zu erhöhten Werten in beiden Partikelpektren, wobei An- und Abstieg der Werte langsamer verlaufen als bei vorigen Ausschlägen. Besonders erscheint vor allem die hohe Differenz der PM₁₀- und PM_{2,5}-Werte ab 24.00 Uhr, wobei der PM₁₀-Wert mit ca. 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ unnormal hoch ist.

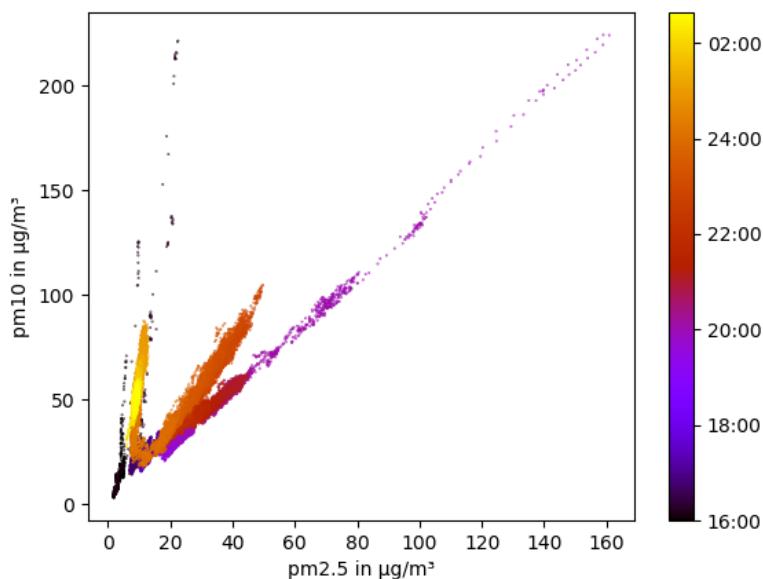


Abbildung 4: Parametrische Darstellung der Feinstaubwerte an Silvester/Neujahr

Das parametrischen Diagramm stellt die Verhältnisse von PM_{2,5}- zu PM₁₀-Konzentrationen dar. Die Datenpunkte scheinen sich auf verschiedene Geraden zu verteilen.

Auswertung:

Die kurzen Ausschläge der Feinstaubwerte für wenige Minuten könnten auf lokale Einflüsse an der Lichtung wie z. B. Raucher oder Personen, die in unmittelbarer Nähe vor Mitternacht Böller abfeuern, zurückzuführen sein. Der länger anhaltende Ausschlag des Graphen ergründet sich wahrscheinlich in einem regionalen Einfluss wie z. B. Feuerwerkemissionen von ungeduldigen Menschen, die mit dem Wind zur Messstelle getragen wurden. Das langfristig abnormale Verhältnis der PM₁₀- zur PM_{2,5}-Kategorie beruht wahrscheinlich auf einer überregionalen, größeren Feinstaubquelle, nämlich den absinkenden Partikeln des Feuerwerks aus dem Ort Bad Zwischenahn. Bei einer lang anhaltenden PM₁₀-Konzentration von ca. 50 µg/m³ kann wahrscheinlich von einer Gesundheitsgefahr durch Silvesterfeuerwerk gesprochen werden, weil dort auch der EU-Grenzwert liegt, der im 24h-Mittelwert maximal 35 mal im Jahr überschritten werden darf. Ohne das regnerische Wetter mit hoher Luftfeuchte in jener Nacht wäre die Partikelbelastung wahrscheinlich deutlich höher ausgefallen.

Da die Linien der parametrischen Darstellung gerade sind, können wir schlussfolgern, dass die Verteilung der Feinstaubgrößen nicht von der gesamten Menge des Feinstaubes abhängt. Jene Verteilung ist vermutlich Folge von unterschiedlichen Feinstaubquellen, sodass jede Gerade einer Quelle entspricht.

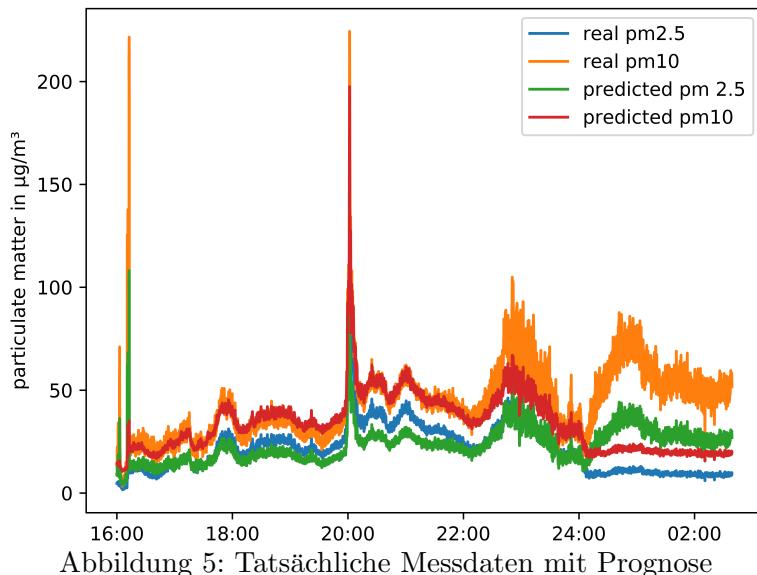


Abbildung 5: Tatsächliche Messdaten mit Prognose

Die außergewöhnlich hohe Differenz zwischen den PM_{2,5}- und den PM₁₀-Werten zum Ende der Messung erkennt man daran, dass die Prognosedaten jeweils stark von den tatsächlichen abweichen. Die Abnormalität ist hier, dass die Feinstaubpartikel vergleichsweise groß sind. Unsere Hypothese ist, dass die kleinen Partikel im Übermaß für das Wasser als Kondensationskerne gedient haben, sodass sie angewachsen sind und danach zur PM₁₀-Kategorie gehörten.

8.2 Absinkverhalten

Da der Strom aus unserer Powerbank nur ausreichte, um bis 2.53 Uhr zu messen, aber das Absinkverhalten von Feinstaub trotzdem interessant ist, haben wir uns entschlossen, dieses anhand eines Modellversuchs im Labor näher zu untersuchen.

8.2.1 Versuch V - Absinkverhalten von Primärpartikeln

Geräte/Versuchsaufbau:

Vakuumglocke, eigenes Messgerät, Wunderkerze

Durchführung:

Das Messgerät wird zusammen mit einer angezündeten Wunderkerze unter die Glocke gelegt. Die Glocke wird dann abgedichtet.

Beobachtung:

Wir können den gespeicherten Daten entnehmen, dass die Feinstaubkonzentration sofort auf das Maximum des messbaren Bereichs angestiegen ist und daraufhin langsam weniger wurde. Die PM_{2,5}- und PM₁₀-Werte sanken jedoch nur bis auf ca. 400 µg/m³ bzw. 600 µg/m³. Selbst nachdem das Messgerät aus der Vakuumglocke entnommen wird, bleiben die Werte erhöht.

Auswertung:

Durch das Abbrennen der Wunderkerze werden sehr viel Feinstaub und Wasser frei. Dies war auch messbar, jedoch kann das tatsächliche Absinkverhalten danach nicht erfasst werden, weil das Wasser im geschlossenen Raum an den Partikeln kondensiert und sich der Feinstaub in dem Sensor absetzt und somit die Messungen verfälscht. Die zwei wichtigen Fehlerquellen sind hier das Wasser aus der Bindemittelverbrennung und die nicht verhältnismäßige Menge an Feinstaub.

Lösungsansatz:

Die Wunderkerze ist bei dem genannten Versuch wegen der erwähnten Probleme als Feinstaubquelle nicht geeignet. Diese Probleme treten bei der sekundären Feinstaubbildung nicht auf. In den folgenden zwei Versuchen werden die sekundären Partikel nachgestellt und schließlich auf ihr Absinkverhalten untersucht.

8.3 Versuch VI - Simulation von sekundärer Feinstaubbildung

Geräte/Versuchsaufbau:

Ammoniumhydroxid, Schwefelsäure, zwei Petrischalen, Heizplatte, kommerzielles Feinstaubmessgerät

Durchführung:

Zunächst werden das Ammoniumhydroxid und die Schwefelsäure jeweils in Petrischalen gegeben, sodass die Böden bedeckt sind. Die Petrischale mit der Schwefelsäure wird auf die Heizplatte gestellt. Die Heizplatte sollte die Schwefelsäure auf etwa 75 °C erwärmen. Darauf wird in der Nähe des Versuchsaufbaus die Feinstaubkonzentration gemessen. Der gesamte Versuch wird unter dem Abzug durchgeführt, da es zur Bildung von ätzenden Gasen kommt.

Beobachtung:

Eine Erhöhung der Feinstaubkonzentration ist zu messen, wenn die Schwefelsäure eine Temperatur von ca. 40 °C überschreitet. Die Werte des Messgeräts erreichen dann relativ schnell das Maximum des messbaren Bereichs. Es ist Rauch über der Schwefelsäure zu erkennen.

Auswertung:

Die Gleichgewichtsreaktion NH₄OH(aq) ⇌ NH₃(g) + H₂O(l) in dem Ammoniakwasser sorgt für gasförmiges Ammoniak in der Luft. Durch das Erhitzen verdampft ein Teil der Schwefelsäure. Diese reagiert in der Luft mit dem gasförmigen Ammoniak zu festem Ammoniumsulfat: 2 NH₃(g) + H₂SO₄(l/g) → (NH₄)₂SO₄(s). Bei dem sichtbaren Rauch handelt es sich um

Ammoniumsulfatpartikel. Diese sind sekundärer Feinstaub.

8.4 Absinkverhalten von Sekundärpartikeln

Es stellte sich als schwierig heraus, das Wasser aus der Luft zu entfernen und die Feinstaubmenge zu dosieren. Aus diesen Gründen wiederholten wir den gleichen Versuch mit Ammoniumnitrat-Partikeln als Reaktionsprodukt. Diese treten in der Realität häufig auf und dienen als Modell für sekundären Feinstaub. Gegenüber Schwefelsäure hat die benötigte Salpetersäure einen höheren Gasdruck und muss deshalb nicht erwärmt werden.

Geräte/Versuchsaufbau:

Vakuumglocke, eigenes Messgerät, zwei kleine Petrischalen, Ammoniumhydroxid, Salpetersäure

Durchführung:

Das Messgerät wird zusammen mit einem Tropfen Ammoniumhydroxid und Salpetersäure in separaten Petrischalen unter die Vakuumglocke gelegt.

Beobachtung:

Die Feinstaubkonzentration bleibt zunächst noch über dem messbaren Bereich, sinkt aber schnell ab. Der Prozess des Sinkens verlangsamt sich mit der Zeit.

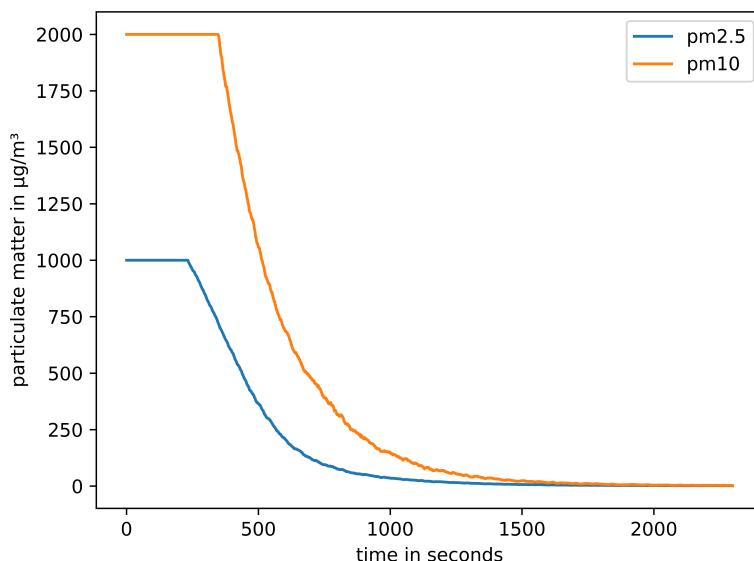


Abbildung 6: Sinkverhalten von Ammoniumnitratpartikeln

Auswertung:

Die Feinstaubkonzentration scheint exponentiell abzunehmen, weil sich Geraden in der logarithmischen Darstellung (siehe Abb. 7) ergeben. Die Regression für die PM_{2,5}-Werte ergibt in etwa $f(t) = 909 * e^{(-4686*t)} + c$, die Regression für die PM₁₀-Daten $f(t) = 2295 * e^{(-3857*t)} + c$. Die Konstante c ist hier 2,5. Demnach halbiert sich die PM_{2,5}-Konzentration ca. alle 2 Stunden und die PM₁₀-Konzentration alle anderthalb Stunden. Die Tendenz, dass kleine Partikel länger in der Luft verbleiben als große, könnte sich auch auf die Atmosphäre übertragen lassen.

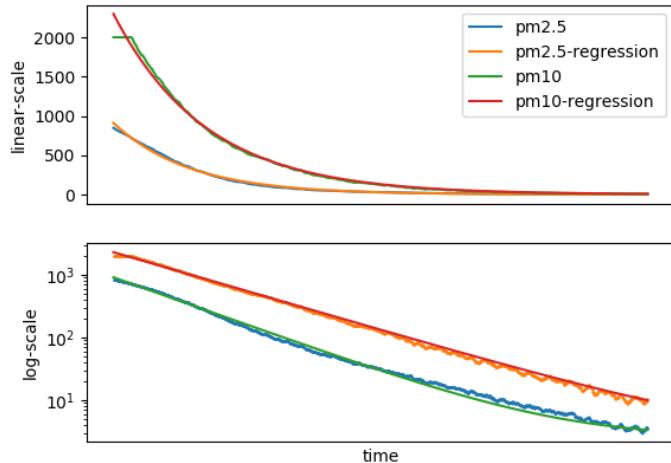


Abbildung 7: Daten mit exponentiellen Regressionen

9 Kritik

Während unserer Untersuchungen sind uns einige Unzulänglichkeiten rund um die Feinstaubthematik aufgefallen, die einen erheblichen Einfluss auf die Beurteilung der Gesundheitsgefahren durch Feinstaub haben.

Die Einheit $\mu\text{g}/\text{m}^3$, in der Feinstaub gemessen wird, ist für die Beschreibung der gesundheitlichen Folgen ungeeignet, da kleinere Partikel einen geringeren Gewichtsanteil ausmachen, obgleich sie tiefer inkorporiert werden als große und somit tendenziell schädlicher sind. Offizielle Messstationen wie die des LÜN in Oldenburg messen oft nur die PM₁₀-Teilchen, wohingegen die PM_{2,5}-Kategorie von offizieller Seite oft gar nicht erfasst wird. Der blutgängige Ultrafeinstaub ist schwierig messbar und deshalb kaum erforscht.

Des Weiteren sollte aber auch die Qualität der Teilchen, sprich deren chemische Zusammensetzung, bei der Beurteilung der Gesundheitsgefahren berücksichtigt werden. Beispielsweise werden meist harmlose Wassertröpfchen zumindest in semiprofessionellen Messungen als Feinstaub erfasst, wohingegen Schwermetallpartikel wirklich gesundheitsschädlich sind.

Während unserer Experimente ist uns die extreme Sensibilität der Messgeräte gegenüber äußeren Einflüssen aufgefallen. Beispielsweise hat die physische Umgebung des Messstandorts einen erheblichen Einfluss auf die Feinstaubwerte: Luftströme werden beeinflusst oder Partikel werden z. B. an Pflanzen adsorbiert oder an Wänden aufgehalten. Auch die Zuverlässigkeit der offiziellen Messstationen darf hinterfragt werden, wie dies auch in den lokalen Medien regelmäßig getan wird (NWZ Oldenburg) [19].

Es gilt außerdem, die Öffentlichkeit für die Problematik zu sensibilisieren. Dies haben wir getan, indem wir unser Messgerät in der Schulpausenhallen aufgehängt und die Daten auf einem Bildschirm sichtbar gemacht haben.

Insgesamt ist die Bewertung der Schadenswirkung durch Feinstaub auf den menschlichen Körper schwierig. Dies bedeutet, es müsste von politischer Seite mehr in die Erforschung von Feinstaub und dessen Risiken für die Gesundheit investiert werden.

10 Fazit und Ausblick

Nach Aneignung theoretischen Hintergrundwissens haben wir uns in Kurzzeitmessungen mit der tendenziellen Schädlichkeit verschiedener Situationen in Bezug auf Feinstaub auseinandergesetzt. Unter Laborbedingungen haben wir uns mit diversen Filtertechniken befasst und sind in der Lage, Wunderkerzenemissionen zu filtern. In Zukunft gilt es, einen geeigneteren (Modell-)

Feinstaubemittor als Wunderkerzen zu finden, da diese vergleichsweise unpraktisch sind. Des Weiteren möchten wir andere Filtersysteme wie Elektrogasabscheider untersuchen.

Schnell sind wir zu dem Entschluss gekommen, ein eigenes Feinstaubmessgerät für die Daten erfassung in Langzeitmessungen und deren Analyse zu entwickeln. Dieses Messgerät hat eine Validierung bestanden und ein 3D-gedrucktes Gehäuse erhalten. Wir möchten zeitnah auf die Stickoxid- und Kohlenstoffmonoxid-Erfassung aufrüsten, damit Zusammenhänge mit der Feinstaubthematik geprüft werden können. Außerdem haben wir verschiedene Anwendungen programmiert, um spontane Fehlerwerte zu entfernen, Entwicklungen von Feinstaubwerten zu errechnen und Szenarien anhand der Größenkonstellation der Partikel zu deuten. An Silvester haben wir die Feinstaubbelastung in unserer Heimat über längere Dauer untersucht und eine Grenzwertüberschreitung feststellen können. Mit unserem Messgerät haben wir den Grundstein für tiefgreifende, zukünftige Untersuchungen von verschiedenen Feinstaubquellen gelegt. Auch eine Langzeitmessung um Ostern (Osterfeuer) streben wir an.

Außerdem haben wir sekundären Feinstaub realitätsnah nachstellen und dessen langes Absinkverhalten unter idealisierten Bedingungen feststellen können. In Zukunft möchten wir die Auswirkung von Aktivkohle auf absinkende Partikel erforschen.

Während unserer Forschungsarbeiten ist uns der unangemessene Umgang mit den Kleinstpartikeln in Bezug auf ihre tatsächliche Schädlichkeit negativ aufgefallen. Für eine wissenschaftlich korrekte Behandlung des Themas scheinen Neuerungen wie z. B. eine andere Maßeinheit oder umfassendere Messungen sinnvoll.

11 Literaturverzeichnis

1. www.spiegel.de/auto/aktuell/deutschland-unfallstatistik-2018-zahl-der-verkehrstoten-steigt-a-1243277.html, Zugriff 05.01.2019
2. www1.wdr.de/daserste/monitor/extras/pressemeldung-feinstaub-100.html, Zugriff 18.02.2019
3. www.feelok.de/de_DE/jugendliche/themen/tabak/interessante_themen/gesundheit_folgeschaeden/leben_und_tod/tote-tabak-deutschland.cfm, Zugriff 31.03.2019
4. www.eea.europa.eu/de/signale/signale-2013/artikel/klimawandel-und-luft, Zugriff 05.01.2019
5. Optical particulate matter sensors in PM_{2.5} measurements in atmospheric air; Marek Badura, Piotr Batog, Anetta Drzeniecka-Osiadacz, Piotr Modzel; E3S Web Conf. 44 00006 (2018); DOI: 10.1051/e3sconf/20184400006
6. Simoes Amaral, Simone & Carvalho, Joao & Martins Costa, Maria & Pinheiro, Cleverson. (2015). An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments. *Atmosphere*. 6. 1327-1345. 10.3390/atmos6091327.
7. www.umweltbundesamt.de/daten/luft/feinstaub-belastung#textpart-5, Zugriff 25.12.2018
8. daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/saurer_regen/saurer_regen.htm#2, Zugriff 27.12.2018
9. www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/ammoniak-emissionen#textpart-1
10. Sauermann ; de Vries: Die Chemie der Wunderkerze. In: *Chemkon* 11. Jg., Heft 1: 2004, S.13-20
11. de.wikipedia.org/wiki/Sieb, Zugriff 25.12.2018
12. [de.wikipedia.org/wiki/Drahtgewebe_\(Filtration\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Drahtgewebe_(Filtration)), Zugriff 04.12.2018
13. www.chemie.de/lexikon/Aktivkohle.html#Einsatzgebiete, Zugriff 18.12.2018
14. de.wikipedia.org/wiki/Aktivkohlefilter, Zugriff 27.12.2018
15. www.chemie.de/lexikon/Physisorption.html, Zugriff 21.12.2018
16. de.wikipedia.org/wiki/Gravimetrische_Staubmessung, Zugriff 11.12.2018
17. Mölter, Leander ; Keßler, Patricia: Grundlagen der Partikelgrößen- und Partikelanzahlbestimmung in der Außenluft mit zählenden Messverfahren. In: Gefahrstoffe – Reinhalt, Luft. 64, Nr. 7/8, Heidelberg: 2004, S.319-323
18. www.waveshare.com/dust-sensor.htm, Zugriff 30.12.2018
19. www.nwzonline.de/oldenburg/oldenburg-stickstoffdioxid-messung-waehrend-des-marathons-auch-ohne-autos-dicke-luft-an-oldenburger-messstation_a_50,2,3791930128.html, Zugriff 10.12.2018

Alle Fotos und Grafiken ohne Quellenverweis wurden von Angelus Dreß und Paul Wollenhaupt erstellt.

Anhang

```
1 from serial import Serial
2 from struct import unpack
3 from os import name
4
5
6 class Reader:
7     def __init__(self, port=None):
8         self.ser = self.connect(port)
9
10    def read(self):
11        ''' returns list of [pm2.5µ, pm10µ]'''
12        byte = 0
13        while str(byte)[3:-1] != 'xaa':
14            byte = self.ser.read(size=1)
15        message = byte + self.ser.read(size=10)
16        decoded = unpack('<HxxBBB', message[2:])
17        pm25 = decoded[0]/10
18        pm10 = decoded[1]/10
19        return [pm25, pm10]
20
21    def show(self):
22        while True:
23            try:
24                pm25, pm10 = self.read()
25                print('[INFO] pm2.5: {} pm10: {}'.format(pm25, pm10))
26            except KeyboardInterrupt:
27                print('[WARNING] terminated')
28                break
29
30    def connect(self, port=None):
31        ser = None
32        if port is None:
33            if name == 'nt':
34                print('[OK] running on windows')
35                for i in range(16):
36                    try:
37                        ser = Serial('COM{}'.format(i), 9600)
38                        print('[OK] sensor connected at COM{}'.format(i))
39                        break
40                    except:
41                        pass
42            else:
43                print('[OK] running on raspberry')
44                for i in range(4):
45                    try:
46                        ser = Serial('/dev/ttyUSB{}'.format(i), 9600)
47                        print('[OK] sensor connected at /dev/ttyUSB{}'.format(i))
48                        break
49                    except:
50                        pass
51            if ser is None:
52                raise RuntimeError('no sensor found')
53        else:
54            try:
55                ser = Serial(port, 9600)
56            except:
57                pass
58        return ser
59
60
61 if __name__ == '__main__':
62     reader = Reader()
63     reader.show()
```

Abbildung 8: Skript zum Auslesen des Sensors via dem „UART communication protocol“

```

1 from reader import Reader
2 from sys import argv
3 import os
4
5
6 class Writer:
7     def __init__(self, path, port=None):
8         if not path.endswith('.csv'):
9             path += '.csv'
10        self.abspath = os.path.abspath(path)
11        if os.path.exists(self.abspath):
12            print('[WARNING] continuing with old document')
13        else:
14            print('[INFO] starting with new document')
15        self.reader = Reader(port)
16
17    def run(self):
18        while True:
19            try:
20                with open(self.abspath, 'a') as f:
21                    pm25, pm10 = self.reader.read()
22                    print('[INFO] pm2.5: {} pm10: {}, saved at {}'.format(pm25, pm10, self.abspath))
23                    f.write(str([pm25, pm10])[1:-1]+'\n')
24            except KeyboardInterrupt:
25                print('[WARNING] terminated')
26                break
27
28
29 if __name__ == '__main__':
30     import argparse
31     parser = argparse.ArgumentParser()
32     parser.add_argument('--path', default='Messung.csv')
33     parser.add_argument('--port', default=None)
34     args = parser.parse_args()
35     writer = Writer(args.path, args.port)
36     writer.run()
37

```

Abbildung 9: Skript zum Speichern der Daten

```

1 import socket
2
3
4 class Sender:
5     def __init__(self, host, port=7169):
6         self.host = host
7         self.port = port
8
9     def send(self, data):
10        sock = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
11        sock.connect((self.host, self.port))
12        sock.sendall(str(data).encode())
13        print('[SENT] {}'.format(data))
14
15
16 if __name__ == "__main__":
17     from reader import Reader
18     import argparse
19     parser = argparse.ArgumentParser()
20     parser.add_argument('--server_ip')
21     parser.add_argument('--port', default=None)
22     args = parser.parse_args()
23     reader = Reader(args.port)
24     sender = Sender(args.server_ip)
25     while True:
26         try:
27             data = reader.read()
28             sender.send(data)
29         except KeyboardInterrupt:
30             break
31

```

Abbildung 10: Skript zum Versenden der Daten an einen Server

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import socketserver
3 import socket
4 import re
5
6
7 class Receiver:
8     def __init__(self, port=7169, lenght=20):
9         self.y = []
10        self.lenght = lenght
11        self.initiated = False
12        s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
13        s.connect(("8.8.8.8", 80))
14        host = s.getsockname()[0]
15        print(host)
16        s.close()
17        class TCPHandler(socketserver.BaseRequestHandler):
18            def handle(self1):
19                self1.data = self1.request.recv(1024).strip()
20                self.callback(self1.data.decode())
21        server = socketserver.TCPServer((host, port), TCPHandler)
22        server.serve_forever()
23
24    def callback(self, data):
25        data = re.split(' ', ' ', data[1:-1])
26        data = [float(i) for i in data]
27        print('[INFO] pm2.5: {} pm10: {}'.format(data[0], data[1]))
28        if len(self.y) < self.lenght:
29            self.y.append(data[1])
30        elif not self.initiated:
31            plt.ion()
32            self.fig = plt.figure()
33            ax = self.fig.add_subplot(111)
34            self.line1, = ax.plot(self.y)
35            plt.yscale('log')
36            plt.ylabel('pm10 in µg/m³')
37            plt.ylim(10**-0.2, 1999)
38            plt.xlabel('elapsed time in seconds')
39            self.initiated = True
40        else:
41            self.y = self.y[1:]
42            self.y.append(data[1])
43            self.line1.set_ydata(self.y)
44            self.fig.canvas.draw()
45            self.fig.canvas.flush_events()
46
47
48 if __name__ == "__main__":
49     receiver = Receiver()
50

```

Abbildung 11: Server-Skript mit Livegraph