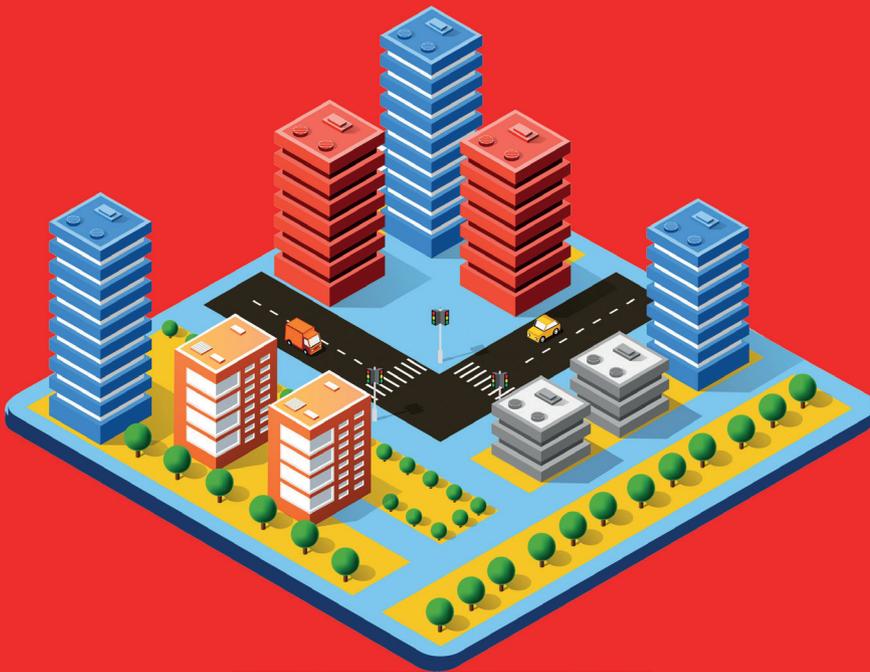


Feinstaub messen im Schulumfeld



© by energyeco 2019

Diese Broschüre und das dahinter stehende Konzept der stationären Langzeitmessung von Feinstaub an Schulstandorten ist von der Schülerfirma energyECO am Robert-Havemann-Gymnasium in Berlin-Karow erarbeitet worden (www.energyeco.de).

Unterstützt wurden die Schüler dabei von der stratum GmbH sowie von Dr. Martin Lützelberger.

Kontakte: Robert-Havemann-Gymnasium, Achillesstr. 79, 13125 Berlin, sek1@rhgym.de
energyECO, c/o Robert-Havemann-Gymnasium, info@energyeco.de
stratum GmbH, Boxhagener Str. 16, 10245 Berlin, info@stratum-consult.de
Dr. Martin Lützelberger, Achillesstr. 120, 13125 Berlin, dr.luetzelberger@gmail.com

Inhalt

Warum ist Feinstaub ein Problem? _ 4

Wie kann man Feinstaub messen? _ 10

Aufbau und Funktionsweise einer stationären Messstation _ 11

Datenübertragung auf www.luftdaten.info _ 13

Auswertung der Daten, Interpretation und Visualisierung _ 14

Was tun gegen zu viel Feinstaub? _ 15

Warum ist Feinstaub ein Problem?

Seit über Diesel-Fahrverbote diskutiert wird, ist die Luftqualität in unseren Städten Tagesthema. Im Fokus stehen dabei Stickoxide und Feinstaub. Primär entsteht Feinstaub durch Emissionen aus Kraftfahrzeugen, Kraft- und Fernheizwerken, Abfallverbrennungsanlagen, Öfen und Heizungen, bei der Metall- und Stahlerzeugung sowie in der Steine- und Erdenindustrie. Sekundär entsteht Feinstaub durch gasförmige Vorläufersubstanzen wie Schwefeldioxid, Stickoxide oder Ammoniak.

Da von Ärzten Feinstaub im Vergleich zu Stickoxiden als größere Bedrohung für die Gesundheit angesehen wird, haben wir uns zunächst auf die Messung von Feinstaub konzentriert. Diese Messungen sind außerdem technisch etwas einfacher und billiger als Stickoxid-Messungen.

Zunächst einige Fakten über Feinstaub.

Feinstaub fliegt

Feinstaub besteht aus winzigen Partikeln in der Luft, die nicht sofort zu Boden sinken, sondern eine gewisse Zeit in der Atmosphäre verbleiben. Die Teilchen sind mit bloßem Auge nicht wahrzunehmen.

Auf die Größe kommt es an

PM₁₀ bezeichnet Staubteilchen, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als 10, aber größer als 2,5 Mikrometer ist. 1 Mikrometer = 1 Millionstel Meter = 1 Tausendstel Millimeter. PM₁₀ wird auch als „Grobfraktion“ bezeichnet.

PM_{2,5} sind die noch feineren Teilchen, deren aerodynamischer Durchmesser weniger als 2,5 Mikrometer beträgt („Feinfraktion“).

PM_{0,1} sind Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 0,1 Mikrometer (= 100 Milliardstel Meter). Man nennt sie auch „ultrafeine“ Fraktion.

Wir können mit unserer Messanordnung nur PM₁₀ und PM_{2,5}-Partikel erfassen.



10 µg

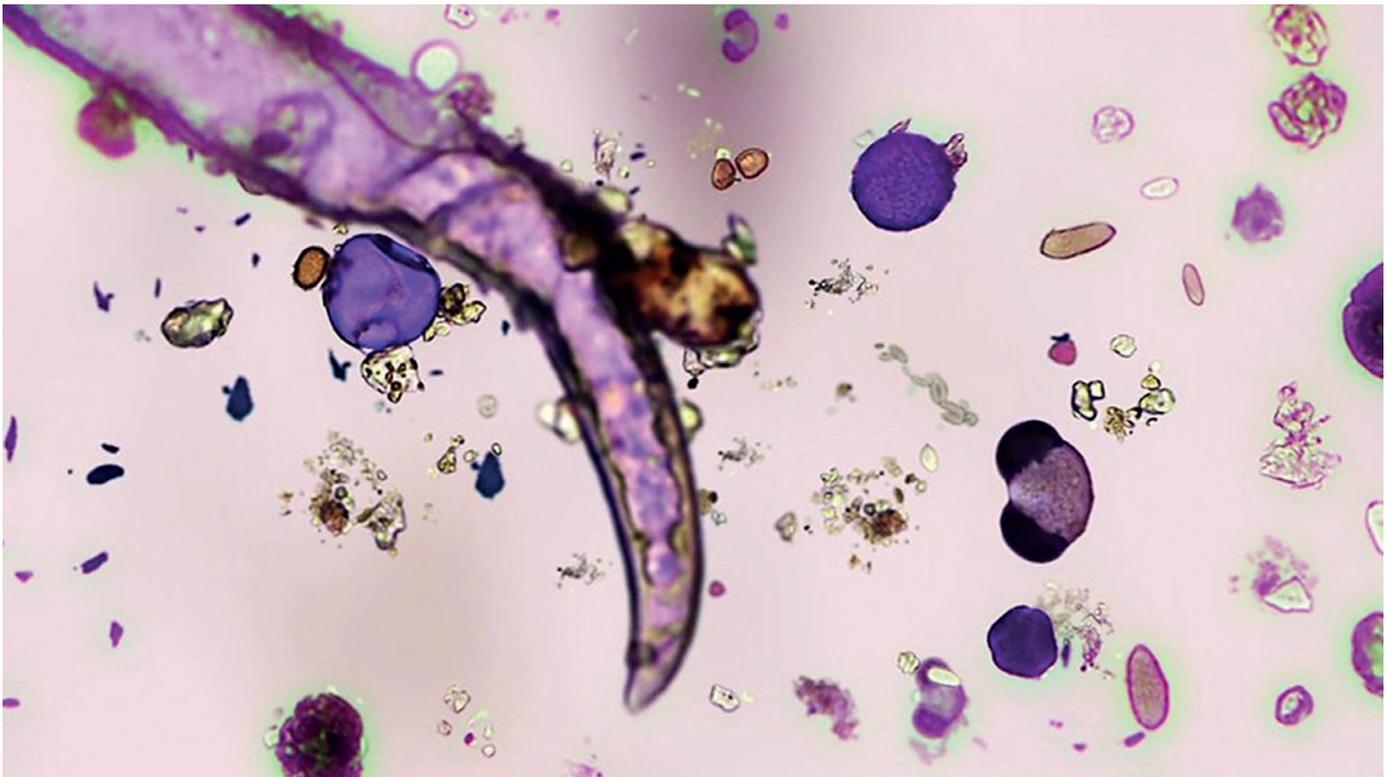


2,5 µg



0,1 µg

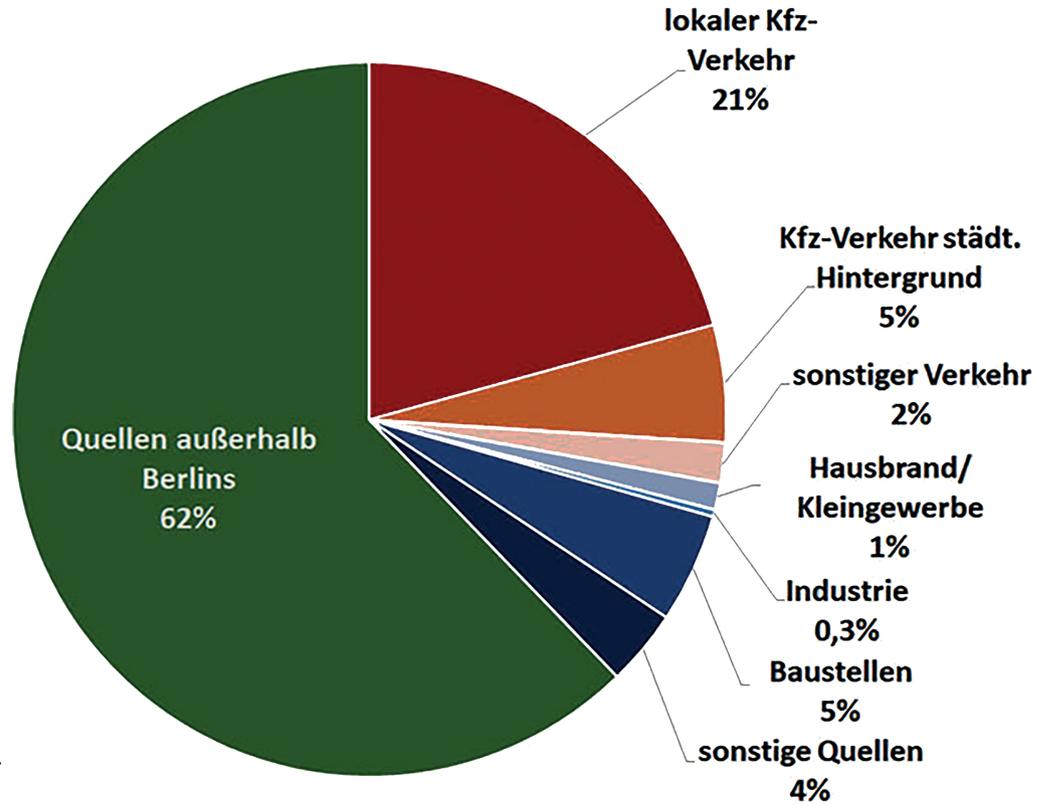
Größenvergleich zwischen PM₁₀, PM_{2,5} und PM_{0,1}. Ein menschliches Haar wäre siebenmal so dick wie PM₁₀ - das ist auf diesem Papierformat gar nicht mehr darstellbar.



Feinstaub-Partikel unter dem Mikroskop (Bildquelle: wdr)

Primäre Feinstaubquellen

- **Verbrennungsmotoren**
- **Kraftwerke, Heizwerke**
- **Abfallverbrennung**
- **Wohnungsbeheizung**
- **Schüttgutumschlag**
- **Tierhaltung**
- **Industrie**
- **Brems- und Reifenabrieb aus dem Straßenverkehr**
- **Emissionen aus Bodenerosion, Waldbränden**

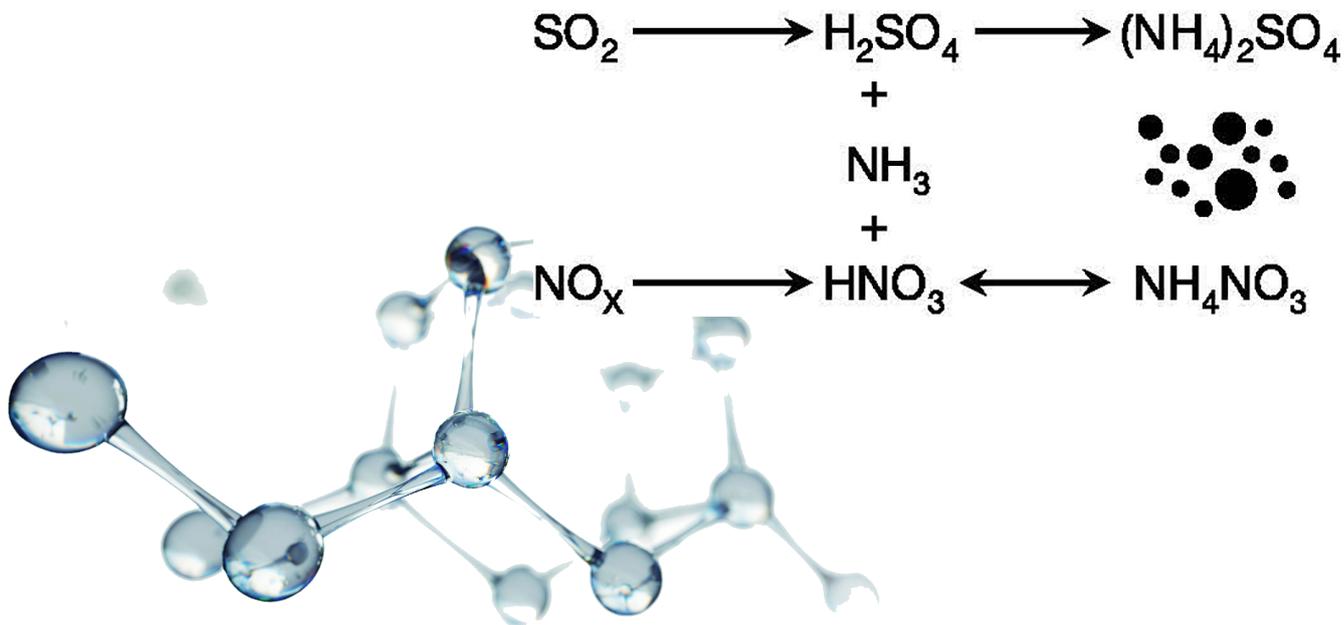


Anteile verschiedener Verursacher an der Feinstaub (PM₁₀)-Belastung an Hauptverkehrsstraßen in Berlin (Quelle: Berliner Luftreinhalteplan, 2. Fortschreibung 2019)

Sekundäre Feinstaubquellen

- Schwefeldioxid (SO_2)
- Stickoxide (NO_x)
- Ammoniak (NH_3)
- Flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds - VOC)

In der Luft vorhandene Schadstoffe können sich mit diesen sogenannten Vorläufergasen zu sekundären Schadstoff-Teilchen verbinden. Diese Verbindung kann mechanisch (Nukleation) oder chemisch (Kondensation) erfolgen. Aus den direkt von einer Quelle ausgestoßenen Schadstoffen entstehen dadurch andere, neue Schadstoffteilchen. Die Abbildung zeigt einen Beispielprozess aus dem landwirtschaftlichen Bereich. Ammoniak (NH_3) reagiert in der Atmosphäre mit Salpetersäure und Schwefelsäure zu Salzen, die sich an vorhandene Partikel anlagern oder selber neue Partikel bilden und so maßgeblich zum Feinstaub in der Luft beitragen.



Gesundheitliche Bedeutung haben Feinstaub-Emissionen für den Menschen, weil die Partikel eingeatmet werden. Allerdings gibt es in der Fachwelt keine eindeutige Meinung dazu, in welcher Weise die bei uns vorkommenden Feinstaubkonzentrationen Auswirkungen auf die Gesundheit haben. Das hat mehrere Gründe:

- Die Luftverschmutzungssituation ist nicht flächendeckend überwacht, so dass teilweise die Basisdaten für eine Bewertung fehlen.
- Die genauen Wirkzusammenhänge im menschlichen Körper sind nur unzureichend bekannt.
- Ergebnisse aus Tierversuchen lassen sich nicht 1:1 auf den Menschen übertragen.
- Laborversuche erfassen nicht die Auswirkungen einer langjährigen Exposition.
- Epidemiologische Untersuchungen, die statistische Effekte aufdecken, haben den Nachteil, dass der Faktor „Feinstaub“ nicht isoliert werden kann, sondern auch andere Risikofaktoren und Einflüsse der Lebensweise eine Rolle spielen.

Je kleiner, desto gefährlicher

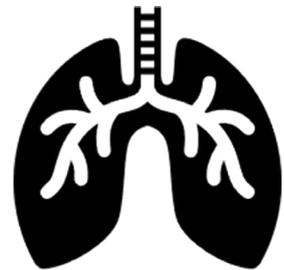
Feinstaub mit der Partikelgröße PM_{10} dringen beim Menschen in die Nasen- und Mundhöhle ein und werden dort von der Schleimhaut aufgenommen, bevor sie in die Lunge gelangen können.

$PM_{2,5}$ -Partikel hingegen können bis in die Bronchien und Lungenbläschen vordringen.

Ultrafeine Partikel mit einem Durchmesser von unter $0,1 \mu m$ können bis in das Lungengewebe und sogar in den Blutkreislauf und damit bis ins Gehirn eindringen. Neuere Untersuchungen zeigen, dass in der Nähe von Flughäfen besonders hohe Konzentrationen von Ultrafeinstaub vorkommen.

Es liegt auf der Hand, dass die gesundheitlichen Gefahren umso größer sind, je tiefer der Feinstaub in den Organismus eindringen kann.

Das Umweltbundesamt stellt dazu fest: „Sie reichen von Schleimhautreizungen und lokalen Entzündungen in der Luftröhre und den Bronchien oder den Lungenalveolen bis zu verstärkter Plaquebildung in den Blutgefäßen, einer erhöhten Thromboseneigung oder Veränderungen in der Regulierungsfunktion des vegetativen Nervensystems (Herzfrequenzvariabilität).“



Die potenzielle gesundheitliche Gefahr durch Feinstaub ist der Grund dafür, dass es heute verschiedene Grenz- und Richtwerte für Feinstaubkonzentrationen in der Außenluft gibt. Aufgrund der unzureichenden Forschungslage und des Mangels an Messdaten für Ultrafeinstaub gibt es für $PM_{0,1}$ keine Grenzwertfestlegungen, sondern nur für PM_{10} und $PM_{2,5}$.

Grenzwerte für Feinstaub in Deutschland (basierend auf EU-Richtlinie)

Nach der 39. BImSchV (Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) gelten folgende Grenzwerte für Feinstaub in der Außenluft:

- Zum Schutz der menschlichen Gesundheit beträgt der über den Tag gemittelte Immissionsgrenzwert für Partikel PM_{10} **50 Mikrogramm pro Kubikmeter bei 35 zugelassenen Überschreitungen** im Kalenderjahr.
- Zum Schutz der menschlichen Gesundheit beträgt der über ein Kalenderjahr gemittelte Immissionsgrenzwert für Partikel PM_{10} **40 Mikrogramm pro Kubikmeter**.
- Zum Schutz der menschlichen Gesundheit und um die Verpflichtung in Bezug auf die Expositionskonzentration einzuhalten, darf der Indikator für die durchschnittliche $PM_{2,5}$ -Exposition nach § 15 ab dem 1. Januar 2015 den Wert von **20 Mikrogramm pro Kubikmeter** nicht mehr überschreiten.

Partikelgröße	Grenzwert	Toleranzgrenzwert: darf maximal an 35 Tagen im Kalenderjahr überschritten werden
PM_{10}	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$PM_{2,5}$	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-

Für Ultrafeinstaub-Partikel (UFP) gibt es noch keine Grenzwerte. Die Messung ist kompliziert, denn Ultrafeinstaubpartikel streuen kein Licht, das heißt, mit den optischen Methoden sind sie nicht zu erfassen. Es gibt deshalb bundesweit bisher nur 17 Messstationen für UFP. Die Weltgesundheitsorganisation hat jüngst empfohlen, die Grenzwerte für PM_{10} auf 15 (Jahresdurchschnitt) bzw. 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tageshöchstwert) und für $PM_{2,5}$ auf 5 (Jahresdurchschnitt) bzw. 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tageshöchstwert) zu senken.

Wie kann man Feinstaub messen?

Es gibt zwei verschiedene Wege, um Feinstaubkonzentrationen zu messen:

- Beim **gravimetrischen Verfahren** wird die durch Filter gesammelte Staubmenge gewogen
- Beim **photometrischen Verfahren** wird das Streulicht gemessen, das Partikel im Infrarot-Spektrum erzeugen.

Bei beiden Verfahren ist die Luftfeuchtigkeit zu berücksichtigen, da feuchte Staubpartikel schwerer sind und auch andere Lichtbrechungseigenschaften haben. Im professionellen Messeinsatz werden deshalb Verfahren zur Probenbeheizung verwendet. Für unsere Zwecke reicht es aus, wenn wir die relative Luftfeuchtigkeit mit einem separaten Messfühler erfassen und als zusätzliche Information notieren. Dadurch werden Messungen an verschiedenen Tagen besser vergleichbar.

In Berlin werden PM_{10} -Messungen zur Zeit an 11 Messstationen photometrisch durchgeführt. An drei Stationen im innerstädtischen Bereich werden zur Bestimmung der durchschnittlichen Exposition gravimetrische Partikelmessungen auch in der $PM_{2,5}$ -Fraktion durchgeführt. Gravimetrische $PM_{2,5}$ -Messungen erfolgen außerdem zusätzlich an einer Station in einer Hauptverkehrsstraße.



Aufbau und Funktionsweise einer stationären Messstation



Wer die Messstation selbst bauen möchte, findet im Internet eine komplette Bauanleitung: <http://bit.ly/2IPa8QX>. Allerdings sind für die Unterbringung der Sensoren im Gehäuse praktischerweise zwei Kunststoff-Träger notwendig, die man im 3-D-Drucker produzieren kann. Wer keinen 3-D-Drucker hat, kann die Träger auch im Shop von energyECO bestellen.

energyECO nimmt euch aber gerne die ganze Arbeit ab und liefert einsatzfähige Messstationen inklusive einer kurzen Einführungspräsentation. Natürlich ist das Team von energyECO auch bereit, eure Messprojekte zu begleiten und bei der Auswertung und Interpretation der Daten, bei der Öffentlichkeitsarbeit und Aktionsplanung zu unterstützen.

Die Messstation besteht im wesentlichen aus diesen Komponenten:

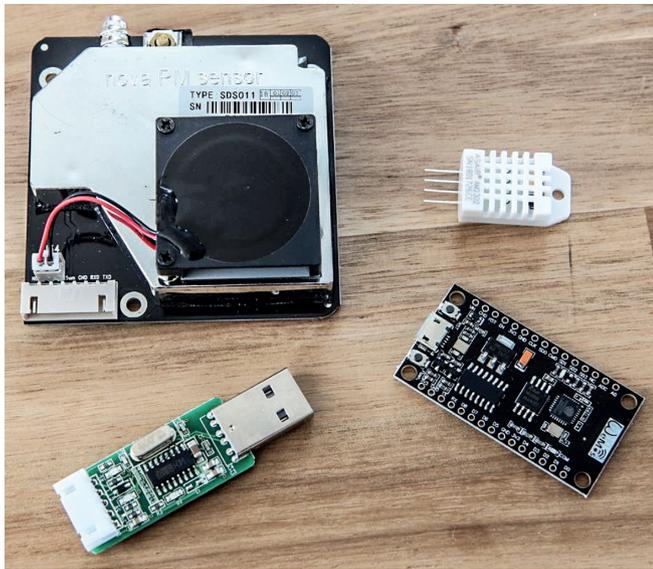
- Mini-Board NodeMCU ESP8266
- SDS011 Feinstaubsensor
- DHT22 Temperatur- und Feuchtigkeitssensor
- OBO Bettermann Kabelabzweigkasten T 60 IP66
- Micro-USB-Kabel und Netzteil

Die wichtigste Komponente ist der Feinstaubsensor selbst. Es handelt sich dabei um einen Laser-Sensor, der die Feinstaubkonzentration über eine photometrische Messung bestimmt. Die Messung erfolgt dabei über die Abschwächung eines Lichtstrahls bzw. dessen Streuung. Rauchwarnmelder arbeiten ebenfalls nach diesem Prinzip.

Der Messbereich des Sensors reicht von 0 bis 999,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die kleinste Partikelgröße, die noch erkannt wird, hat einen Durchmesser von 0,3 μm . Gemessen werden also Werte für $\text{PM}_{2,5}$ und PM_{10} . Der relative Fehler des Sensors liegt bei 10 %. Der Sensor saugt die Luft über einen Anschlussstutzen an und gibt nach einigen Sekunden einen Messwert aus. Die Software, die auf dem Mikrocontroller läuft, erhebt allerdings nur alle 145 Sekunden einen Messwert, um ihn zu übertragen. Der Feinstaubsensor arbeitet bei Temperaturen zwischen -20 und +50 °C, deckt also das mögliche Temperaturspektrum in unseren Breiten ab.

Da ein Messwert für Feinstaub auch von der Temperatur und Luftfeuchtigkeit abhängig sein kann,

ist eine gleichzeitige Messung dieser beiden Werte hilfreich für die Interpretation der Ergebnisse. Deshalb ist in der Messstation auch ein Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensor am Board angebracht. Der Sensor misst die Luftfeuchtigkeit im Bereich von 0 bis 100 % mit einem relativen Fehler von 2 bis 5 %. Die Temperatur wird von -40 bis +80 °C mit einer Genauigkeit von 0,5 °C bestimmt. Theoretisch kann der Sensor alle zwei Sekunden einen Messwert ausgeben, analog zum Feinstaubmesswert nehmen wir aber nur alle 145 Sekunden einen Wert auf.



Die wesentlichen Elemente der Messstation: Feinstaubsensor, NodeMCU, Luftfeuchte- und Temperatursensor, Micro-USB-Netzteil und Gehäuse (Kabelabzweigten); Foto A. Schilling

Für die, die es noch genauer wissen wollen:
Der Feinstaubsensor misst tatsächlich nur die $PM_{2,5}$ -Konzentration. Der PM_{10} -Wert wird rechnerisch abgeschätzt und kann daher ungenauer sein. Bei hoher Luftfeuchte, insbesondere Nebel, können die Werte deutlich höher sein als die Messwerte offizieller Messstationen, denn diese messen den getrockneten Feinstaub. Durch Feuchte kondensierte Feinstaubpartikel können jedoch vor allem bei Smoglagen die negative Gesundheitswirkung von Feinstaub verstärken. Eine softwaremäßige Feuchtekorrektur ist jedoch in Vorbereitung und kann dann durch ein Update der Firmware übernommen werden (<http://bit.ly/2ISDsGd>).

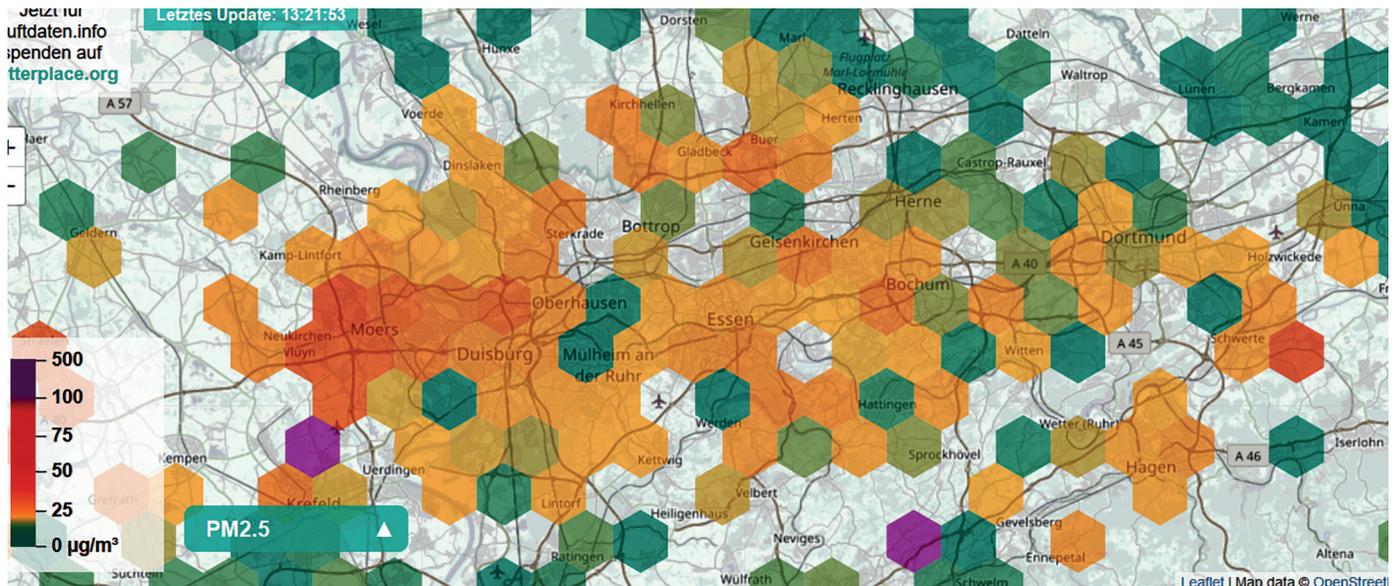
Wenn eine Schule die von energyECO gebaute Messstation erwirbt, übernehmen wir die WLAN-Einrichtung vor Ort.



Datenübertragung auf www.luftdaten.info

Das Open Knowledge (OK) Lab Stuttgart ist Teil des Programms Code for Germany der Open Knowledge Foundation Germany. Ziel des Programms ist es, Entwicklungen im Bereich Transparenz, Open Data und Citizen Science (Bürgerwissenschaft) zu fördern. Das OK Lab Stuttgart widmet sich mit dem Citizen Science Projekt **luftdaten.info** der Feinstaubmessung. Tausende von Paten weltweit installieren selbst gebaute Messgeräte an der Außenwand ihres Hauses. Aus den übermittelten Daten generiert luftdaten.info eine sich ständig aktualisierende Feinstaub-Karte.

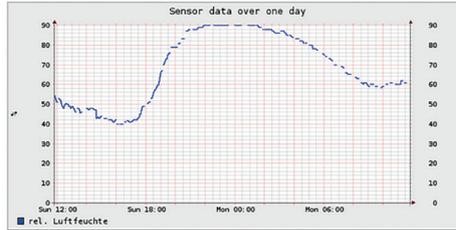
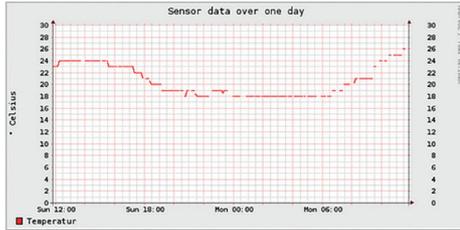
Wird der NodeMCU mit dem USB-Netzteil verbunden und bootet, versucht er sich mit einem WLAN zu verbinden. Da er das heimische WLAN nicht kennen wird, baut er nach einiger Zeit einen WLAN-Hotspot auf. Mit diesem kann man sich verbinden und daraufhin auf den ebenfalls von dem NodeMCU aufgebauten Webserver verbinden. Dieser hat die Adresse 192.168.4.1. Nach etwa 10 Minuten werden erstmals die Messdaten übertragen. Ab jetzt werden laufend die eigenen Messwerte erhoben und auch schon an Luftdaten.info übertragen, die Daten sind aber noch nicht offiziell Teil der Statistik. Damit dies der Fall ist, müssen einige Angaben per E-Mail an rajko@codefor.de übergeben werden: ID des Sensors, Adresse des Sensors, Umgebung des Feinstaubsensors (Höhe über Grund, Straßenseite, Verkehrsaufkommen etc.), • E-Mail-Adresse der Messstelle (wird nicht veröffentlicht), ein Bild, wo der Sensor hängt.



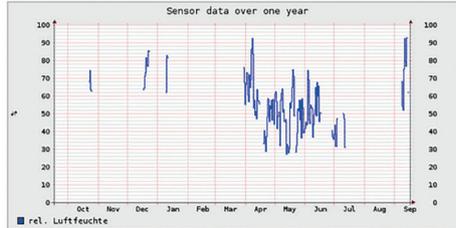
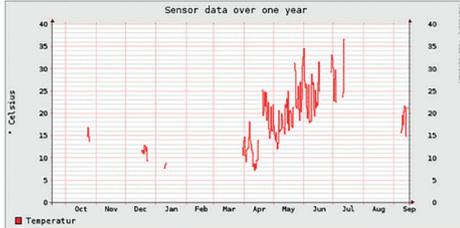
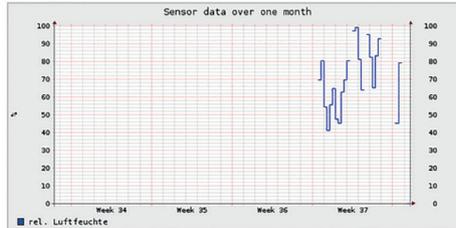
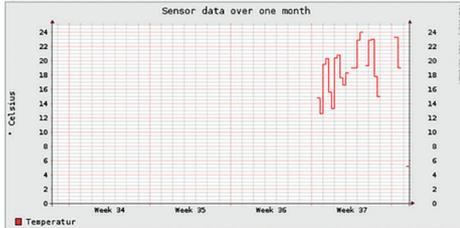
Darstellung der Daten auf www.luftdaten.info

Auswertung der Daten, Interpretation und Visualisierung

Unter <https://www.madavi.de/sensor/graph.php> kann man die Messkurven für die eigenen Messstationen anzeigen lassen:



[zeige Wochengrafiken / show weekly graph](#)



[zeige Grafiken mit gleitendem 24h-Durchschnitt über 7 Tage / show 24h floating average over 7 days graph](#)

Für die Auswertung und Interpretation der Daten ist zu berücksichtigen, dass es nicht sinnvoll ist, wenige Einzeldaten zu betrachten, sondern die Entwicklung über einen längeren Zeitraum zu beobachten. Dabei sollten verschiedene begleitende Variablen mit erfasst werden, um ggf. Messfehlern auf die Spur zu kommen und Zusammenhänge zu erkennen. Solche begleitenden Variablen sind z.B. Wetterdaten, die gemessene Luftfeuchtigkeit und Temperatur, das Verkehrsaufkommen, Baustellen in der Nähe etc.

Empfehlenswert ist es auch, die Messdaten offizieller Mess-

stellen, falls vorhanden, mit den eigenen zu vergleichen. Falls sich hierbei regelhafte, konstante Abweichungen ergeben, könnte man vielleicht einen Korrekturfaktor errechnen. Um die Messgenauigkeit und Aussagekraft der eigenen Messdaten zu erhöhen, ist es ratsam, zwei, drei oder mehrere Messstationen rund um die Schule zu platzieren.

Was tun gegen zu viel Feinstaub?

Die Frage, wie sich Feinstaub reduzieren lässt, hängt natürlich von den jeweiligen Quellen ab. Grundsätzlich kommen u.a. diese Maßnahmen in Betracht:

Straßenverkehr und Stadtpolitik:



- Motorisierten Individualverkehr reduzieren
- ÖPNV ausbauen, Park & Ride-Zonen einrichten
- Radwege ausbauen
- Umweltzonen einrichten, Verkehrsverbote, Tempo 30-Zonen Tempolimit auf Autobahnen
- Erhöhung des Anteils an Elektrofahrzeugen
- Städtische Grünanlagen vergrößern

Haushalte:

- Energieeffizienz im Haushalt verbessern (Wärmedämmung, Heizanlage, Heiz- und Lüftungsverhalten)
- Zu Ökostromanbieter wechseln
- Auf Kamin- und Kachelöfen verzichten



Luftverkehr:

- Reduzierung des Schwefelgehalts im Kerosin
- Beimischung von Bio-Treibstoffen zum Flugbenzin
- Reduzierung von Inlandsflügen



Landwirtschaft:

- Reduzierung der Tierbestände in der Massentierhaltung
- Filteranlagen für Ammoniak in den Ställen
- Abdichtung von Güllebecken



Um aufzuklären, woher die im Umfeld eurer Schule gemessenen Feinstaubkonzentrationen tatsächlich stammen, müsstet ihr also eine Reihe von Umgebungsfaktoren abklären wie z.B. Verkehrsaufkommen, Baustellen, Heizanlagen, Industrie- und Landwirtschaftsbetriebe (in der Hauptwindrichtung) usw. Wenn ihr eine eigene Wetterstation an der Schule betreibt, könntet ihr relativ einfach Korrelationen der Feinstaubmessdaten zu Luftfeuchte und Windbedingungen herstellen.

Was energyECO sonst noch tut.

Wir haben unsere Schülerfirma 2018 begonnen, nachdem einige Schüler aus einer Energie-Projektgruppe die Idee umgesetzt hatten, sich zu Junior-Energieberatern zu qualifizieren. In einer Selbstlernphase haben wir zusammen mit externer Unterstützung durch „Köpfchen statt Kohle“ ein Handbuch für Energiechecks erstellt, das auch als Basis für die Prüfung zum Junior-Energieberater dient.

Als Schülerfirma

- bieten wir anderen Schulen Energiechecks an, um die Energieeffizienz und Klimabilanz ihrer Schule zu verbessern und
- geben in Schulen Unterstützung bei „Lüftungswettbewerben“, mit denen energiesparendes Verhalten, Bewusstsein für gutes Raumklima und richtiges Lüften vermittelt werden
- entwickeln wir digitale Lösungen für die Energie- und Raumdatenerfassung und -präsentation
- vertreiben wir ein Set für die stationäre Messung von Feinstaub im Schulumfeld
- bilden wir weitere Junior-Energieberater aus.

Zusammen mit Wohnungsbaugesellschaften planen wir auch Energiechecks in Privathaushalten und Wohnanlagen.

energyECO