

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/320289961>

Kompensation des Feuchte-Effekts bei Low-Cost Feinstaubsensoren-Sensoren nach dem Streulichtverfahren

Article · October 2017

CITATIONS

0

READS

669

1 author:



Bernd Laquai

Independent Citizen Scientist Stuttgart

48 PUBLICATIONS 155 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Evaluation of low-cost PM sensors [View project](#)



Evaluation of low-cost electrochemical gas sensors for air quality control [View project](#)

Kompensation des Feuchte-Effekts bei Low-Cost Feinstaubsensoren-Sensoren nach dem Streulichtverfahren

Bernd Laquai, 2.4.2017

Einleitung

Die Tatsache, dass Feinstaub-Partikel oft hygroskopische Substanzen enthalten ist der Grund, dass sie bereits ab einer relativen Luftfeuchte von etwa 60% gasförmiges Wasser binden und damit in ihrer Größe deutlich anwachsen. Da vor allem bei feinstaubträchtigen Wetterlagen im den kalten Monaten des Jahres gleichzeitig auch hohe Luftfeuchten zu erwarten sind, ergeben Messverfahren, bei denen die Messluft nicht speziell getrocknet wird, oft deutlich höhere Messwerte als die amtlichen gravimetrischen Messverfahren. Dies gilt insbesondere für Low-Cost Feinstaub-Sensoren, die nach dem Laser-Streulicht-Prinzip arbeiten. In diesem Papier wird dieser Partikel-Wachstums-Effekt an Messungen einzelner Feinstaubsensoren aus dem Sensornetzwerk des Stuttgarter OK Lab beschrieben und anschließend eine Möglichkeit vorgestellt, wie durch Verwendung eines Luftfeuchte-Sensors dieser Messfehler gegenüber den gravimetrischen Messungen sehr einfach und kostengünstig korrigiert werden kann.

Der Feuchte-Einfluß auf Feinstaub-Messungen mit Low-Cost-Sensoren

Derzeit besteht bei der Bevölkerung ein großes Interesse Messungen der Luftqualität selbst vorzunehmen, das gilt insbesondere für das in den Medien viel diskutierte Problem der hohen Feinstaubkonzentrationen in Ballungszentren. Mittlerweile sind sehr günstige und relativ genaue Feinstaub-Sensoren auf dem Markt, die vor allem von chinesischen Firmen für die Innenraumüberwachung oder die Steuerung von Klimaanlage entwickelt wurden. Der Einsatzbereich dieser Sensoren ist jedoch meist nicht für den Außenbereich gedacht. Sie arbeiten in aller Regel nach dem Laser-Streulichtverfahren, bei dem die Intensität und der Streuwinkel des Laserserlichts an Partikeln des Größenbereichs von einigen 100nm bis zu einigen 10µm gemessen wird. Anhand dieser Parameter erfolgt eine Größen-Klassifikation der Partikel in die Größenstandards PM10 ($< 10\mu\text{m}$), PM2.5 ($< 2.5\mu\text{m}$) und PM1.0 ($< 1\mu\text{m}$). Durch entsprechende Zählung der Partikel in diesen Klassen werden schließlich die Zählraten mit Hilfe einer vom Hersteller kalibrierten und im Sensor gespeicherten Funktion auf Massenkonzentrationen abgebildet. Da diese Sensoren vorwiegend für die Innenraumanwendung entwickelt wurden, setzt der zuverlässige Betrieb dieser Sensoren in der Regel eine relative Luftfeuchte von unter 60% voraus. Setzt man diese Sensoren dennoch für die Feinstaub-Messungen im Außenbereich ein, um zum Beispiel die Verschmutzung der Außenluft direkt zu messen, bemerkt man zunächst eine hohe Empfindlichkeit dieser Sensoren. Bei höherer Luftfeuchte jedoch tendieren diese Sensoren aber ganz offensichtlich dazu, die tatsächlich vorhandenen Feinstaubkonzentrationen stark überzubewerten und zwar um so mehr, je näher die Temperatur dem Taupunkt kommt, was gleichbedeutend damit ist, dass dann die Luftfeuchte gegen 100% strebt.

Nun treten hohe Feinstaubkonzentrationen in der Außenluft aber meist in den kälteren Monaten des Jahres auf. Dies liegt einerseits an den erhöhten Immissionen durch Heizungsanlagen andererseits aber auch daran, dass in kälteren Monaten der vertikale Luftaustausch öfters, bedingt durch entsprechende Wetterlagen, stark eingeschränkt ist. Wenn im Winter bodennahe Kaltluft unter Hochdruckeinfluß kommt, kommt kein Luftaustausch durch Konvektion mehr zustande, weil die flache Sonneneinstrahlung nur hohe Luftschichten erwärmen kann und der Boden in den klaren Nächten weiter auskühlt. Auf Grund des höheren spezifischen Gewichts verbleibt dann die kalte Luft oft tagelang in Bodennähe und die Temperatur nimmt mit der Höhe zu, was als Inversion bezeichnet wird. Wenn dann noch Windstille eintritt und damit auch kein horizontaler Luftaustausch mehr stattfindet, konzentrieren sich die

Luftschadstoffe in Bodennähe auf. Im Sommer taucht diese Situation in der Regel nicht auf, da jetzt die steil einfallende Sonne den Boden stark erwärmen kann. Dann steigt auch bei windstillem Hochdruckwetter zumindest bei Nacht die warme Bodenluft auf, so dass die entstehende Konvektion die Bodenluft mit der Luft in höheren Luftschichten austauscht.

Nun bewegt sich aber bei windstillem Hochdruckwetter in den kälteren Monaten des Jahres auch die Temperatur oft in der Nähe des Taupunkts bzw. des Reifpunkts, d.h. die relative Luftfeuchte ist hoch. Da kalte Luft weniger Feuchte aufnehmen kann, tendiert die feuchte Luft zur Kondensation sobald sie weiter abgekühlt wird. Daher stellt man bei windstillem Hochdruckwetter bei Nacht und in den Morgenstunden in Bodennähe durch die zusätzliche Abkühlung der Luft durch Wärmeabstrahlung auch oft eine Nebelbildung fest. Aus diesem Grund heißt dieser Nebel auch Strahlungsnebel. Die in den Wintermonaten flach einfallende Sonne kann den Nebel oft nicht auflösen, so dass sich auch der Nebel oft tagelang halten kann. In der Luft vorhandener Feinstaub begünstigt die Kondensation, da die Partikel als Kondensationskerne für die Feuchte dienen. Treffen so nun hohe Luftschadstoffkonzentrationen und die Nebelbildung zusammen, kommt es zur Ausbildung von Smog (engl. smoke + fog = smog). Im Herbst und Frühling dagegen kann die Sonne dagegen den Boden und damit auch die bodennahen Luftschichten so erwärmen, dass die Lufttemperatur deutlich über den Taupunkt ansteigt und sich der Nebel in den Morgenstunden auflöst. Man kann an solchen Tagen oft erkennen, dass die relative Luftfeuchte morgens deutlich über 80% liegt und im Laufe des Vormittags bei ansteigenden Temperaturen unter dem Einfluss der Sonne dann auf Werte unter 60% absinkt.

Werden nun low-cost Feinstaubsensoren, die nach dem Laser-Streulichtverfahren arbeiten, für Messungen im Außenbereich eingesetzt, dann stellt man insbesondere an kalten und feuchten Tagen fest, dass die Messwerte deutlich von den Messergebnissen gravimetrischer Messungen abweichen. Der Hintergrund dafür ist, dass Feinstaub, der beispielsweise durch den Verkehr oder durch Abgase von Heizungsanlagen entsteht, in der Regel auch immer einen Anteil an Substanzen enthält, die hygroskopisch sind. Hygroskopisch sind vor allem auch die Salze etlicher chemischer Elemente. Salze zeichnen sich auch dadurch aus, dass sie ab einer gewissen Luftfeuchte, der sogenannten Deliqueszenzfeuchte, Wassergas aufnehmen und dabei zunehmend in Lösung gehen. Die Deliqueszenzfeuchten von Salzen können sehr unterschiedlich sein und umfassen einen Bereich von beispielsweise 11% beim Lithiumchlorid bis 98% beim Natriumsulfat. Das Natriumchlorid (Kochsalz) liegt bei 76%. Eine durch die Feuchtebindung hygroskopischer Salze entstehende Salzlösung geht aber mit einem deutlichen Größen- und Massenwachstum eines Partikels einher. Je nach relativer Luftfeuchte und vorliegender Chemie des Feinstaubes kann das hygroskopische Partikelwachstum die Größe und damit auch das Gewicht um einen Faktor zwischen 1.5 und 4 erhöhen. Damit erhöhen sich die angezeigten Feinstaub-Massenkonzentrationen bei entsprechender Feuchte ebenfalls um ein Vielfaches im Vergleich zu gravimetrischen Messungen. Auf Grund der niedrigen Deliqueszenzfeuchten mancher im Feinstaub häufig enthaltener Salze tritt dieser Effekt bereits ab einer relativen Luftfeuchte von 60% mehr als proportional auf.

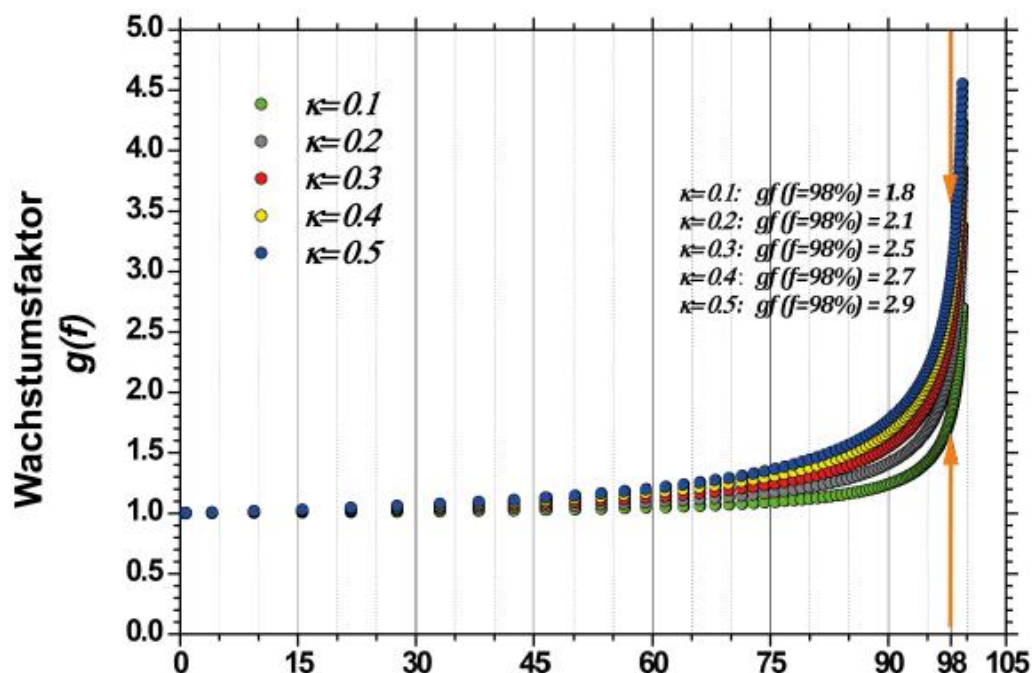


Abb. 1: Modellierung des Partikel-Größenwachstums $g(f)$ über der relativen Feuchte f in %

Quelle: /1/ Skupin, Annett: Optische und mikrophysikalische Charakterisierung von urbanem Aerosol bei (hoher) Umgebungsfeuchte

Dagegen wird bei gravimetrischen Messungen (und auch Laser-Streulicht-Messungen mit Messgeräten aus dem professionellen Bereich) das Problem des Größenwachstums hygroskopischer Partikel dadurch vermieden, dass man die zur Messung angesaugte Luft trocknet, bevor man die Feinstaub-Konzentration misst. Beim gravimetrischen Verfahren, bei dem meist über 24 Stunden Luft durch ein feinporiges Filter gesaugt wird, wird die Feuchte, welche in der abgeschiedenen Luft enthalten ist, verdampft, bevor das Feinstaubgewicht durch präzise Wägung bestimmt wird. Auf diese Weise wird nur der „trockenen Feinstaub“ in einer feuchteunabhängigen Weise zur Konzentrationsangabe herangezogen.

Kostengünstige Kompensationsmöglichkeit für das Feuchte-bedingte Partikelwachstum

Bei low-cost Feistaubsensoren könnte man nun ebenfalls die angesaugte Messluft durch Erwärmen trocknen. Dies würde aber die Größe, Komplexität und vor allem den Energieverbrauch eines solchen Sensors deutlich erhöhen. Es besteht aber eine andere Möglichkeit, die weder Größe und Energieverbrauch und auch die Kosten nicht nennenswert beeinflusst: die Verwendung eines zusätzlichen elektronischen Feuchtesensors in Kombination mit einem Kompensationsverfahren. Da elektronische Feuchtesensoren (meist kombiniert mit Temperatursensoren) als baulich sehr kleine, stromsparende und sehr kostengünstige Module zur Verfügung stehen, bietet es sich für low-cost Anwendungen an, den herkömmlichen low-cost Feistaubsensor um ein solches low-cost Feuchte-Modul zu ergänzen um so nach der Messdatenerfassung von Feinstaubkonzentration und Feuchte an den gemessenen Feinstaubwerten eine Feuchtekorrektur vornehmen zu können, die den Einfluß des Partikelwachstums bei zunehmender Feuchte rechnerisch kompensiert. Da die entsprechenden Feuchtesensoren meist auch mit Temperatursensoren in einem Gehäuse kombiniert sind, könnte so auch gleichzeitig eine Temperaturkompensation der Daten vorgenommen werden, falls das erforderlich wäre.

Schematisch kann ein solcher Feuchte-kompensierter low-cost Sensor folgenden Aufbau haben:

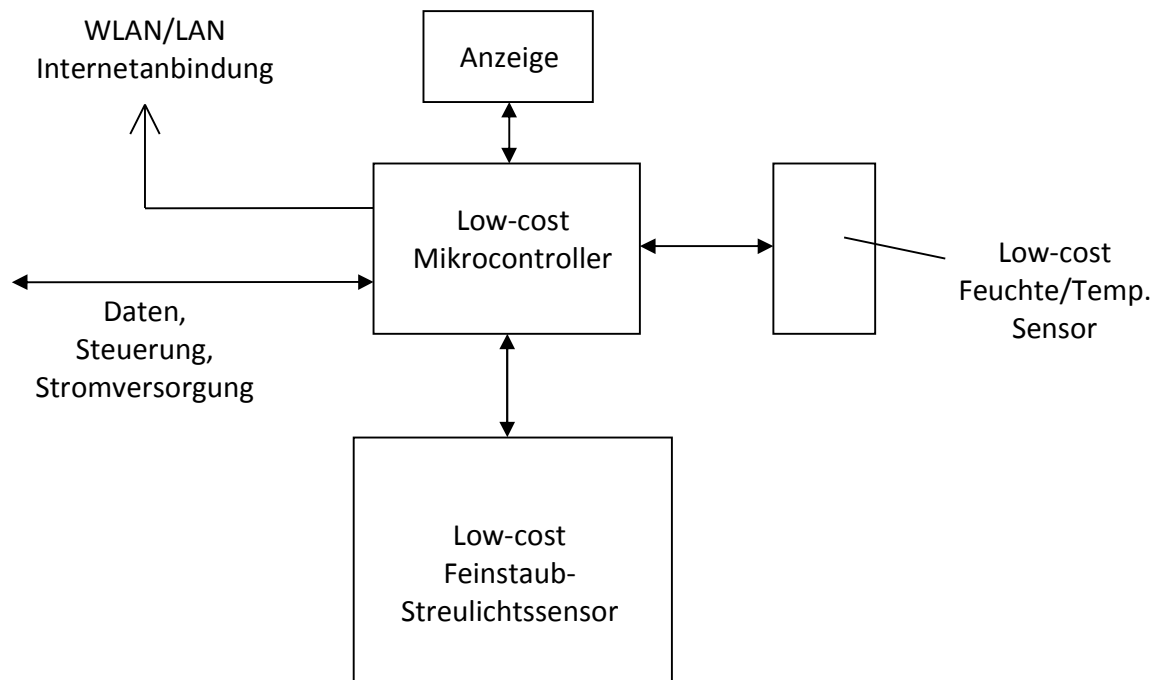


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines Feinstaubsensors mit Feuchte-Kompensation

Der Mikrocontroller steuert die periodische Erfassung der Daten vom Feinstaub-Sensor und vom Feuchtesensor. Die Berechnung der Feuchte- (und Temperatur-) Korrekturwerte können nun einerseits direkt vom Mikrocontroller vorgenommen werden, so dass bereits korrigierte Werte angezeigt bzw. übers Internet auf einen Server übertragen werden. Wenn dagegen keine lokale Anzeige erforderlich ist, wäre es aber ebenfalls möglich Feinstaub-, Feuchte-, und Temperaturmesswerte zum Server zu übertragen und die Korrektur serverseitig vorzunehmen. Da die heutigen Low-cost Feinstaubsensoren aber ihrerseits bereits mit Intelligenz ausgestattet sind, wäre es natürlich genauso denkbar, dass bereits ein im Feinstaubsensor verbauter Mikrocontroller oder eine vergleichbare Logik diese Kompensation vornimmt.

Feuchte-Kompensation der Feinstaubsensoren des OK Lab Stuttgart am Beispiel der Feinstaub-Episode im März 2017

In etlichen Fachpublikationen wurde bereits das Größenwachstum von Partikeln umfassend untersucht und Algorithmen zur Korrektur vorgeschlagen und erprobt. Diese Forschung wurde vorwiegend mit professionellem Equipment betrieben. Es besteht aber kein Grund warum diese Erkenntnisse nicht auch bei low-cost Sensoren obiger Bauart einsetzbar sind. Daher wurde hier nun der Versuch unternommen eine solche Kompensation bei einem low-cost Sensor vorzunehmen der im Open-Knowledge-Lab (OK-Lab) entwickelt wurde. Dieser Sensor setzt einen low-cost Feinstaubsensor nach dem Laser-Streulichtverfahren ein. Es ist der Sensor SDS011 von der Firma Nova-Fitness, der Feinstaubkonzentrationen für die Klassen PM10 und PM2.5 ermittelt. Zur Steuerung wird ein ESP-8266

Mikrocontroller eingesetzt, der über ein WLAN Modul verfügt und Messdaten mit einem Server über das Internet austauscht. Als Feuchte/Temperatursensor wird der Sensor AM2301(baugleich mit DHT22) der Firma Aosong eingesetzt, der für einen Feuchtebereich von 0-99.9% ausgelegt ist. Im Bereich 15-90% ist der spezifizierte Betrag des Fehlers weniger als 2.5% außerhalb dieses Bereichs beträgt er < 5%.

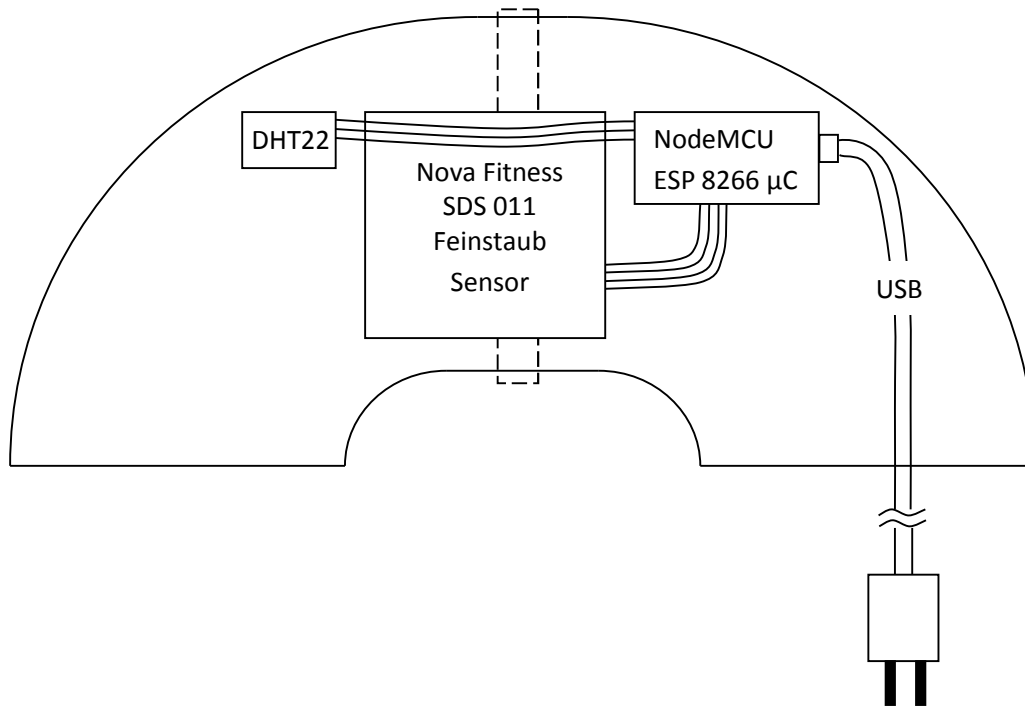


Abb. 3: Spezielle Implementierung eines Feinstaubensors vom OK Lab Stuttgart, der einen Feuchte- und Temperatur Sensor enthält und so eine Feuchte Kompensation zulässt

Das Ok Lab betreibt nun ein ganzes Netzwerk solcher Sensoren, die schwerpunktmäßig über die Region Stuttgart aufgestellt sind aber in der Zwischenzeit auch in etlichen anderen Städten und sogar im internationalen Ausland zu finden sind.

Um die Feuchteabhängigkeit der Messdaten zu visualisieren wurden nun die Messsignale einzelner Sensoren in Stuttgart untersucht. Als Untersuchungszeitraum wurde die verhältnismäßig schwache Feinstaubepisode vom 10.3.17-17.3.17 gewählt, weil hier jahreszeitlichbedingt das Zusammenspiel zwischen Feuchte, Temperatur und Feinstaubkonzentration besonders deutlich zu sehen war. In dieser frühlingshaften Woche herrschten die Nacht über noch relativ tiefe Temperaturen, während tagsüber bereits Temperaturen über 10Grad erreicht wurden. Die für die Feinstaubentwicklung meteorologische günstige Situation begann am Freitag den 10.3. mit dem Hoch Johanna, das über das Wochenende für sehr ruhiges frühlingshaftes Wetter sorgte. Es wurde in der darauffolgenden Woche vom Hoch Kathrin abgelöst, das sich bis Freitag den 17.3. halten konnte. In dieser Zeit stiegen die Temperaturen tagsüber sukzessive an und es kam in der zweiten Wochenhälfte dann zu einer Inversionswetterlage, welche die Feinstaub-Konzentration bis auf etwa 60ug/m3 (amtliche gravimetrische Messung am Neckartor) ansteigen liesen. Am Samstag den 18.3. brachte das Tief Christoph einen Wetterumschwung mit Regen, der dann auch die Luft wieder vom Feinstaub reinigte.

Während dieser Episode wurde von der Wetterstation, die vom Institut für Bauphysik auf dem Gebäude der Hochschule für Technik in der Schellingstrasse (Stadtgarten) betrieben wird, ein stark oszillierender Feuchteverlauf aufgezeichnet. Tagsüber erreichte er bei Sonnenschein unter 40% relative Feuchte und am frühen Morgen waren über 75% erkennbar. In diesem Zeitraum konnte man aber auch einen entsprechend oszillierenden Temperaturverlauf sehen. Nachts rutschte die Temperatur teilweise unter 4 Grad und tagsüber stieg sie an, am Mittwoch den 15.3. sogar auf 18 Grad. Dabei war es annähernd windstill (Geschwindigkeiten unter 2m/s). Die amtliche Messtation für die Feinstaub-Konzentration am Neckartor zeigte vom 12.3.-15.3. einen Anstieg des gleitenden Mittelwerts über 24 Stunden bis auf 60ug/m³, der dann bis Freitag 17.3. etwa konstant auf diesem Niveau blieb.

Auf der Karte des OK Lab, auf der die gemessenen Momentanwerte der Feinstaub-Konzentration der einzelnen Sensoren farblich codiert dargestellt werden, konnte man insbesondere vormittags Momentanwerte von teilweise über 100ug/m³ erkennen. Über das ganze Stadtgebiet gesehen lagen die meisten Sensoren im Bereich zwischen 50 und 100ug/m³ (orange-rot).

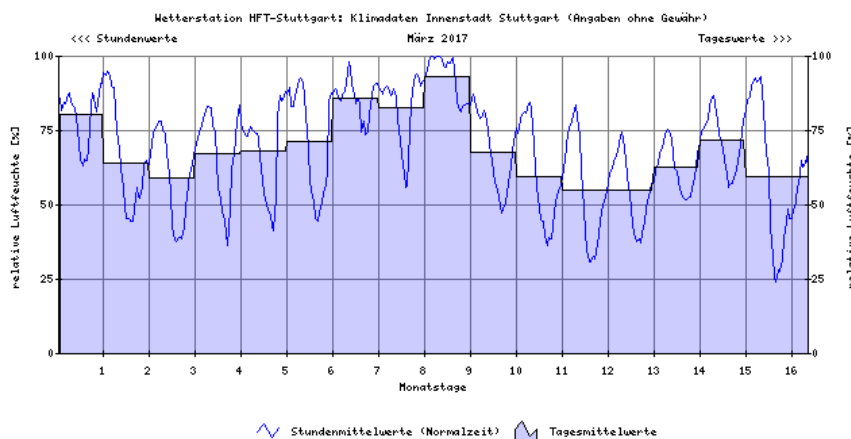


Abb. 4a: Feuchteverlauf während der Feinstaub-Episode, gemessen von der Wetterstation der HFT-Stuttgart

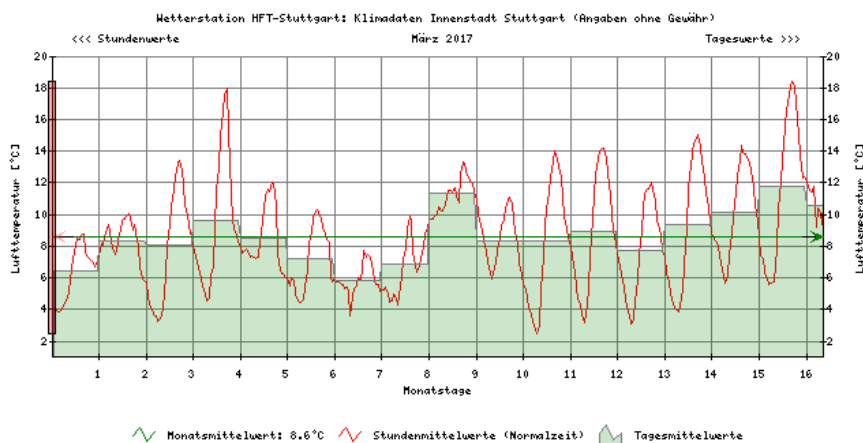


Abb. 4b: Temperaturverlauf während der Feinstaub-Episode, gemessen von der Wetterstation der HFT-Stuttgart

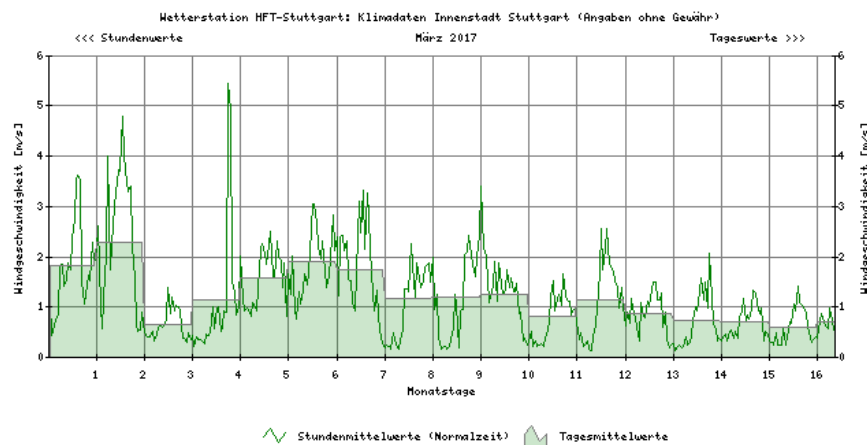


Abb. 4c: Windgeschwindigkeiten während der Feinstaub-Episode, gemessen von der Wetterstation der HFT-Stuttgart

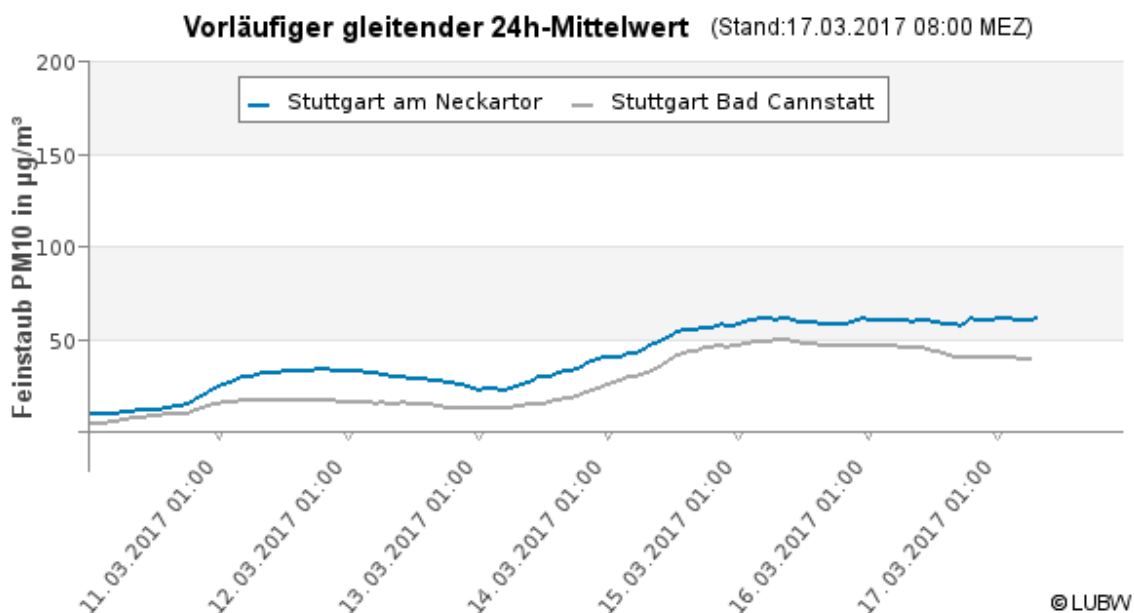


Abb. 5: Amtliche Messung der Feinstaub-Massenkonzentration am Neckartor in Stuttgart für die Feinstaub-Episode im März (Quelle: LUBW)

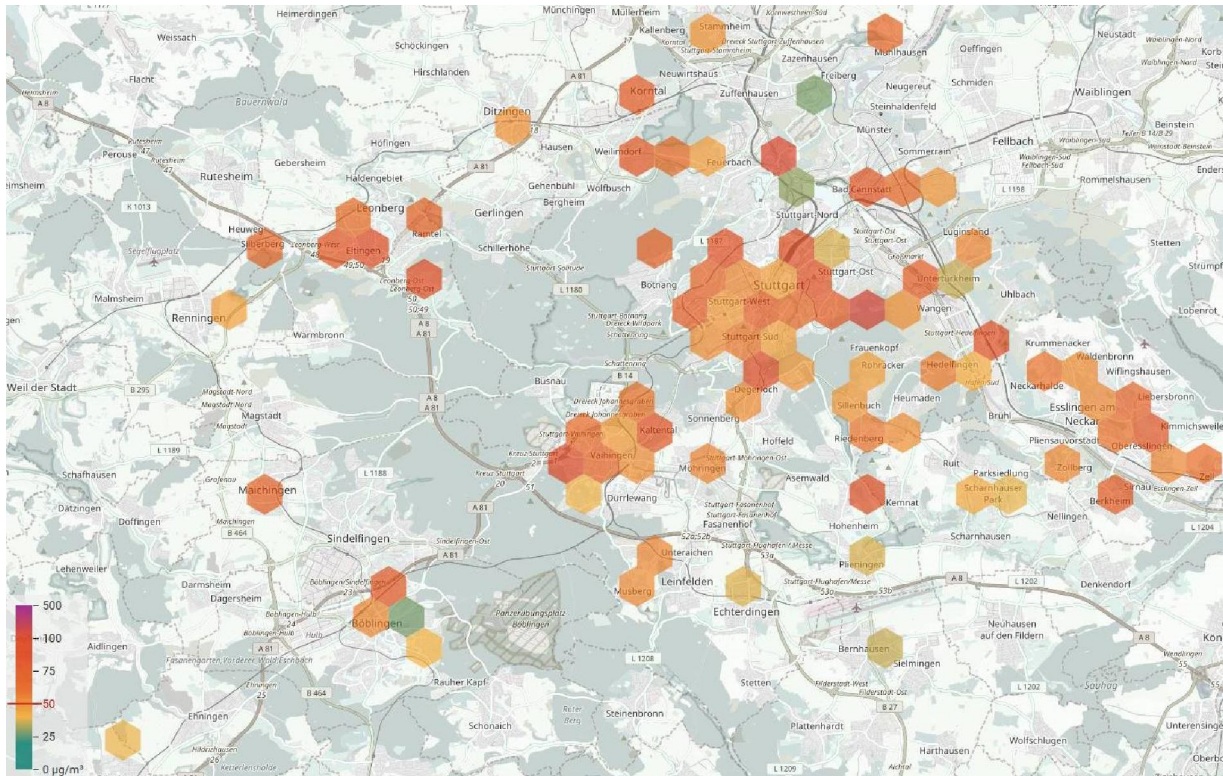


Abb. 6: Feinstaub Map mit farblich codierten Momentanwerten der Feinstaub-Konzentration der OK Lab Sensoren im Stadtgebiet Stuttgart am 16.3.17 um 8:08h

Auswertung der Messdaten einzelner Sensoren

Bei einer genaueren Analyse einzelner Sensoren fallen vor allem 3 starke Peaks in der PM₁₀ Feinstaub-Konzentration am 14.3. am 15.3. und am 16.3. auf. Betrachtet man beispielsweise den Sensor 535 an der Oberen Weisteige (Vorort Degerloch), dann erkennt man, dass sich diese Peaks abends nach Sonnenuntergang entwickeln und ihr Maximum um den Sonnenaufgang am darauffolgenden Morgen erreichen. Sobald die Sonne aber aufgegangen ist, nimmt die gemessene Feinstaubkonzentration wieder rapide ab. Gleichzeitig kann man erkennen, wie die Temperatur nach Sonnenaufgang massiv ansteigt und gegen Mittag ihren Höchstwert erreicht. Während dieser Zeit nimmt der von dem OK Lab Sensor registrierte Feinstaub-Konzentration ab bis auf das Minimum. Ganz vergleichbare Messergebnisse lieferte der Sensor 809 in der Alexanderstrasse in der Innenstadt. Auch hier tritt der markante, ozillierende Tagesgang ganz vergleichbar auf. Ganz offensichtlich zeigten auch andere Sensoren des OK Lab Netzwerk dieses „schwarmähnliche Verhalten“, ob sie nun im Innenstadt-Gebiet oder in den Vororten aufgestellt sind.

Insbesondere vom 15.3. auf den 16.3. lieferte die Feuchte-Messung des Sensors 535 an der Oberen Weisteige beginnend um 16:00h einen Feuchte-Anstieg von ungefähr 50% auf über 70% bis etwa 8:00h am Morgen danach, parallel zu einem Temperaturabfall von 16°C auf 6°C und einem PM₁₀-Konzentrationsanstieg von 40µg/m³ auf 120µg/m³. Das bedeutet einen Anstieg um den Faktor 3 in der Feinstaub-Massenkonzentration während den Abendstunden und der Nacht. Sicherlich mag der Feierabendverkehr einen gewissen Beitrag zum Anstieg geliefert haben, da es aber einer der wärmsten Tage in der Woche war, nahm der Beitrag der Heizungsanlagen dagegen ab. Vergleicht man das Verhalten dagegen mit den Forschungsergebnissen zum Größenwachstum von Partikeln unter dem Feuchteeinfluß, dann liegt es doch sehr nahe, die Erklärung eher darin zu suchen, dass an diesem Tag

hauptsächlich die ansteigende Feuchte in den Abend- und Nachtstunden für den Feinstaub-Konzentrationsanstieg verantwortlich war. Gestützt wird diese Annahme auch dadurch, dass sich dies insgesamt 3 mal genau mit dem selben tageszeitlichen Rhythmus so wiederholt hat und an sehr vielen Sensoren im Stadtgebiet zu sehen war.

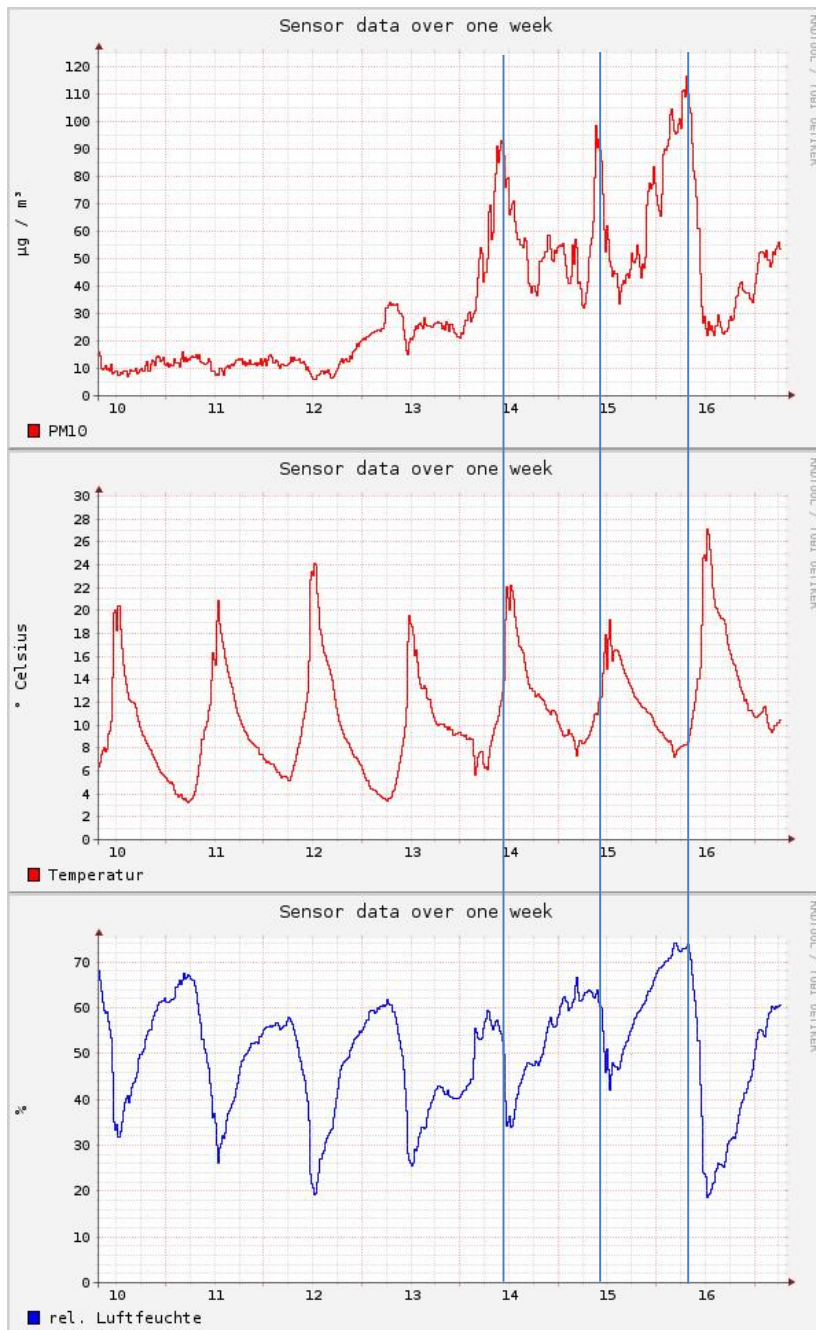


Abb. 7: OK Lab Sensor 535 Obere Weinsteige, Degerloch, während der Feinstaubepisode vom 10.4.-17.3, PM10-Messwerte, Temperaturverlauf und Feuchte, die Linien deuten den Zusammenhang an

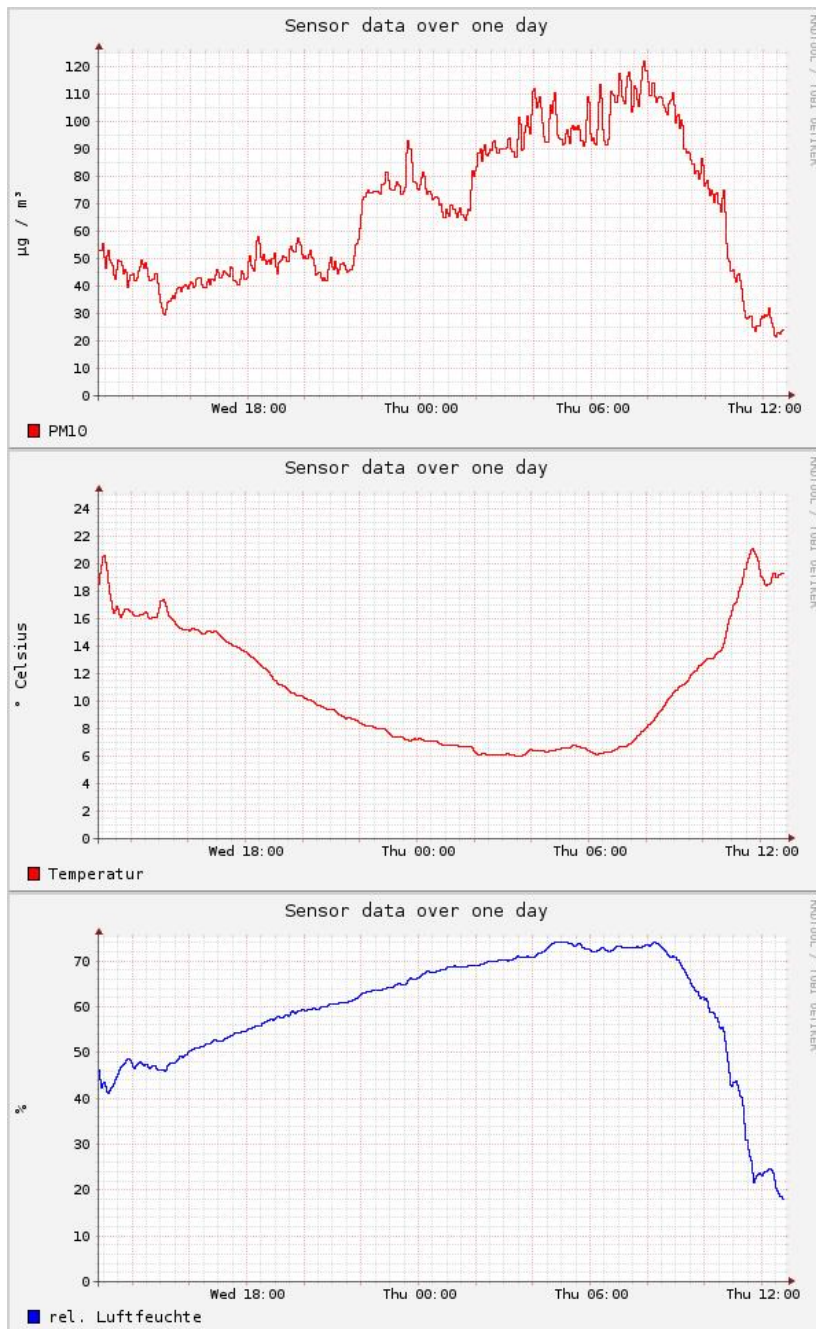


Abb. 8: OK Lab Sensor 535 Obere Weinsteige, Degerloch, Verlauf vom Abend des 15.3. bis zum Mittag des 16.3., PM10-Messwerte, Temperaturverlauf und Feuchte. Das PM10 und das Feuchtesignal verlaufen nahezu proportional, die Temperatur umgekehrt proportional

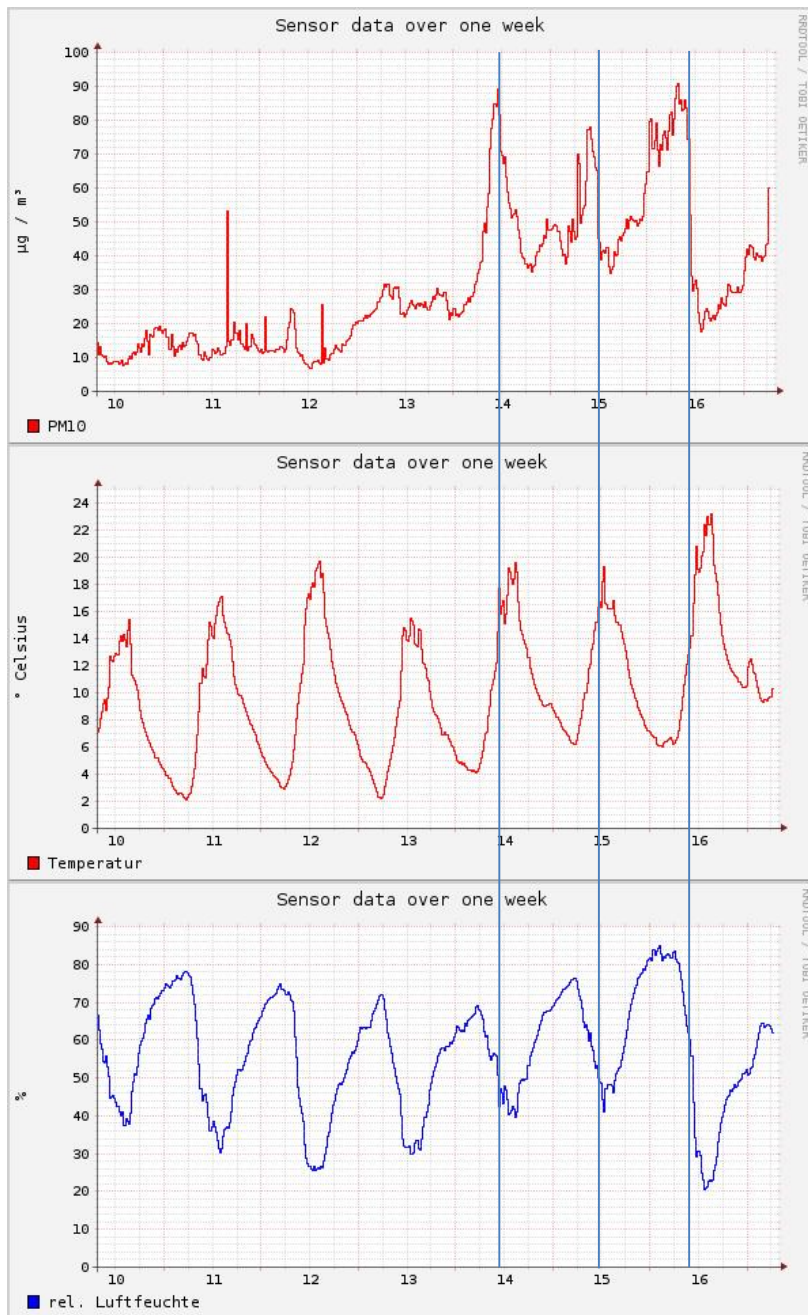


Abb. 9: OK Lab Sensor 809, Alexanderstrasse Innenstadt, während der Feinstaubepisode vom 10.4.-17.3, PM10-Messwerte, Temperaturverlauf und Feuchte, die Linien deuten den Zusammenhang an

Der große Vorteil der OK Lab Sensoren besteht nun darin, dass die Hardware und Firmware bereits so aufgebaut sind, dass auch im Nachhinein noch eine Feuchtekorrektur für die vorhandenen Low-Cost Komponenten entwickelt und angewandt werden kann und danach eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit möglich ist. Sowohl die Roh-Daten der PM10-Messungen des SDS011 Sensors, wie auch die Rohdaten des AM2302/DHT22 Feuchte/Temperatursensors werden im Minutenraster gemessen, an einen Server geschickt und täglich archiviert. Daher ist es nun möglich mit Hilfe der archivierten Daten mögliche Methoden zur Feuchtekompensation auszutesten und die so entwickelten Algorithmen später entweder serverseitig oder bereits im Sensor zu implementieren.

Implementierung einer Feuchte-Kompensation durch Verwendung der Feuchte-Messdaten

Um ein Beispiel für eine Feuchtekompensation zu geben, ist im Folgenden die Implementierung einer Kompensationsmethode, die von Soneja et al. in /2/ untersucht wurde beschrieben. Diese Methode geht auf ein ursprüngliches Werk von Chakrabarti zurück /3/. Dabei wird der Partikel-Wachstums-Faktor (Growth Factor) GF definiert als das Verhältnis der Messwerte der Streulicht-Messung zur Gravimetrischen Messung:

$$GF = \text{Streulicht PM-Wert} / \text{Gravimetrischer PM-Wert}$$

Dieser Growth-Factor kann für jeden zeitgleich zum PM-Wert PM erfassten Feuchte-Wert RH (relative Humidity) wie folgt aus den vorhandenen Daten berechnet werden:

$$GF(RH) = a + (b \cdot RH^2) / (1 - RH)$$

Darin sind a und b empirisch bestimmte Parameter für die Korrektur. In dem hier beschriebenen Beispiel wurden die Werte:

$a=1$ und $b=0.25$

aus den genannten Publikationen übernommen.

Damit kann nun der pro Messung bestimmte Growth-Factor zur Kompensation der einzelnen Laser-Streulicht PM-Werte benutzt werden um die gravimetrischen PM-Werte zu approximieren:

$$\text{Gravimetrischer PM-Schätzwert} = GF(RH) \cdot \text{Streulicht-PM-Wert}$$

Um den Kompensations-Algorithmus nun auf die Messdaten anzuwenden, wurden sowohl die PM-Werte wie auch die Feuchte Werte zunächst mit einem gleitenden Mittelwert über eine Stunde gefiltert und im Stundenraster interpoliert. Dadurch wird die Datenmenge reduziert und dennoch wird der Feuchte-Gang vollständig erfasst. Dies wurde auf die Daten des OK Lab Sensor 217 für die Feinstaub-Episode im März angewandt. Dieser Sensor steht in der Nähe der amtlichen Messstation am Neckartor. Daher können die Messwerte am ehesten mit den amtlichen gravimetrischen Meßdaten verglichen werden. Der Sensor mit der Nummer 218 ist der zugehörige Feuchtesensor.

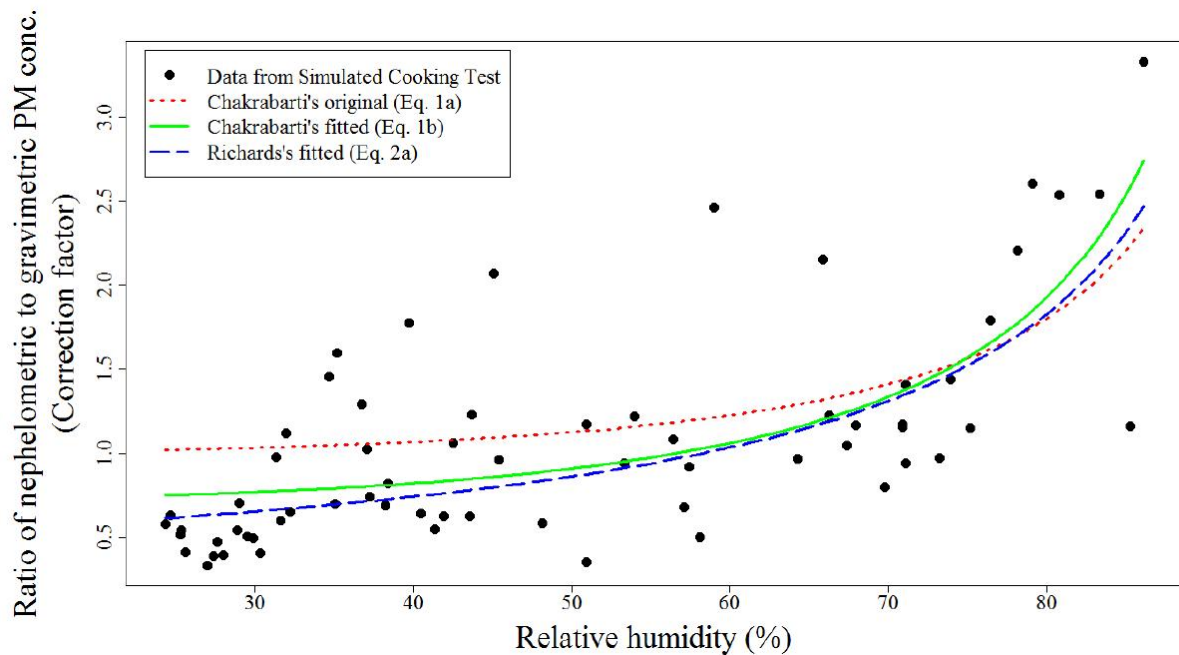


Abb. 10: Das in diesem beispielhaft gezeigten Kompensationsverfahren verwendete Modellierungsbeispiel des Feuchte-bedingten Partikel-Wachstums aus /2/: Sutyaheet Soneja et al. Humidity and Gravimetric Equivalency Adjustments for Nephelometer-Based Particulate Matter Measurements of Emissions from Solid Biomass Fuel Use in Cookstoves, International Journal of Environmental Research and Public Health

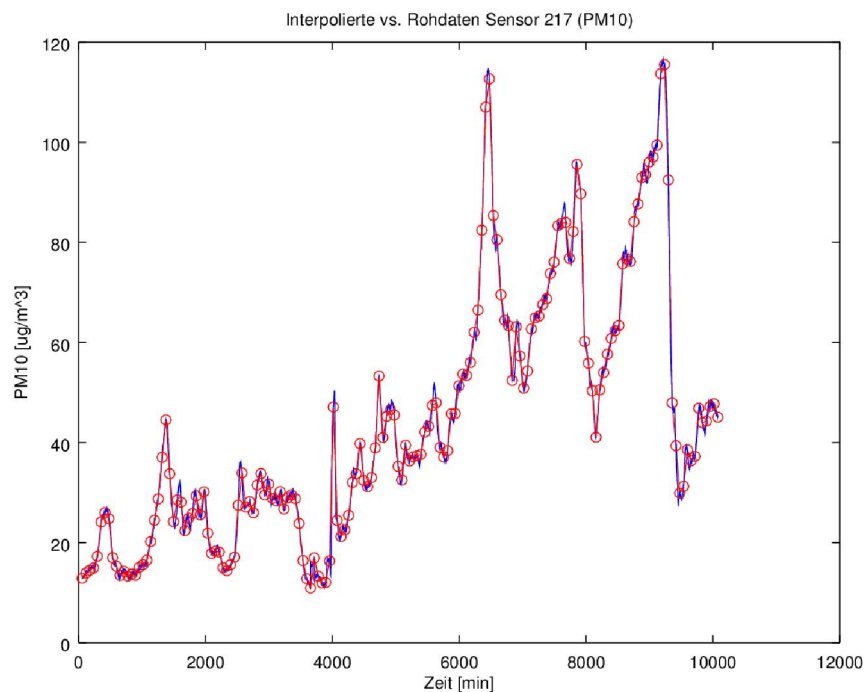


Abb. 11a: Gemittelte und interpolierte Daten des PM-Sensors 217 am Neckartor, Zeit relativ zum 10.3.17 0:00h

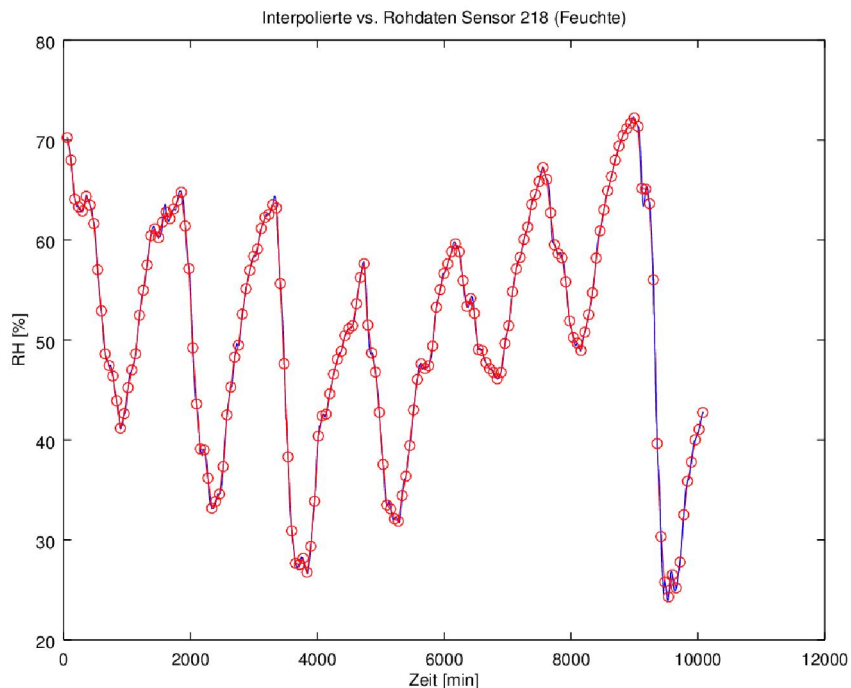


Abb. 11b: Gemittelte und interpolierte Daten des Feuchte-Sensors 218 am Neckartor, Zeit relativ zum 10.3.17 0:00h

Daraufhin wurde pro Feuchte-Wert der Growth-Factor mit den Parametern $a=1$ und $b=0.25$ berechnet und dem zugehörigen Zeitstempel zugeordnet. Im zugehörigen Graphen kann man nun erkennen, dass mit dem oszillierenden Feuchteverlauf auch eine oszillierende Korrekturfunktion in Form des Growth-Factors entsteht. Dabei liegen die Wachstums-Faktoren zwischen grob 1 und 1.5. Damit ist für jeden Zeitstempel auch ein Korrekturwert vorhanden, mit dem schließlich jeder gemessene PM-Wert entsprechend dem Feuchteverlauf für das Partikel-Wachstum korrigiert werden kann. Dies ist im Diagramm 13 gezeigt. Man erkennt deutlich, dass die unkorrigierten Messwerte (blau) deutlich größere Peakhöhen aufweisen und vor allem auch mehr Peakfläche besitzen als die kompensierten Werte (rot). Auch wenn die Berechnung des gleitenden Mittelwerts über 24h die Peaks weitestgehend wegfiltert, läge das Ergebnis ohne Kompensation deutlich zu hoch. Wird die Kompensation dagegen angewandt, kommt das Ergebnis (grün) den amtlichen Messwerten sehr nahe.

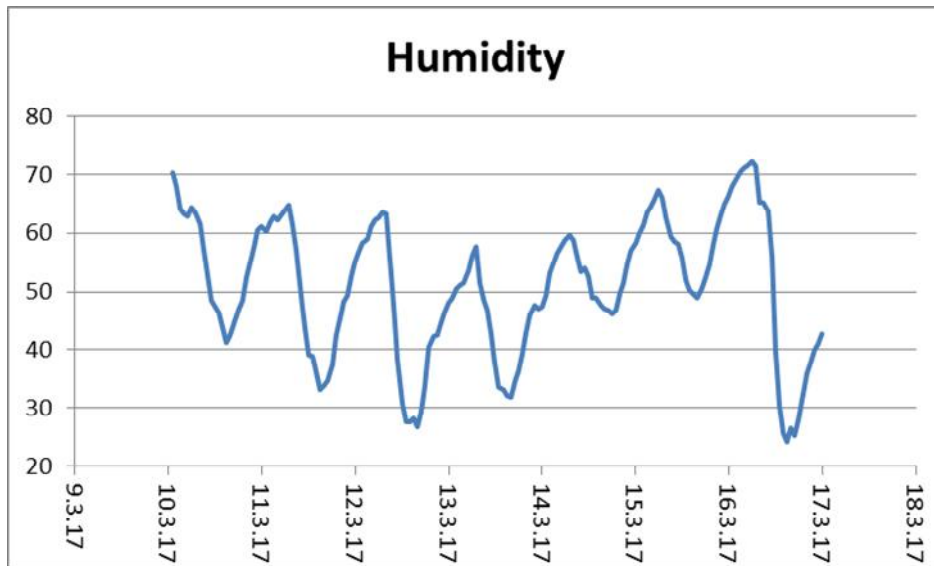


Abb. 12a: Vom Feuchtesensor erfasste Messwerte dargestellt über dem Datum

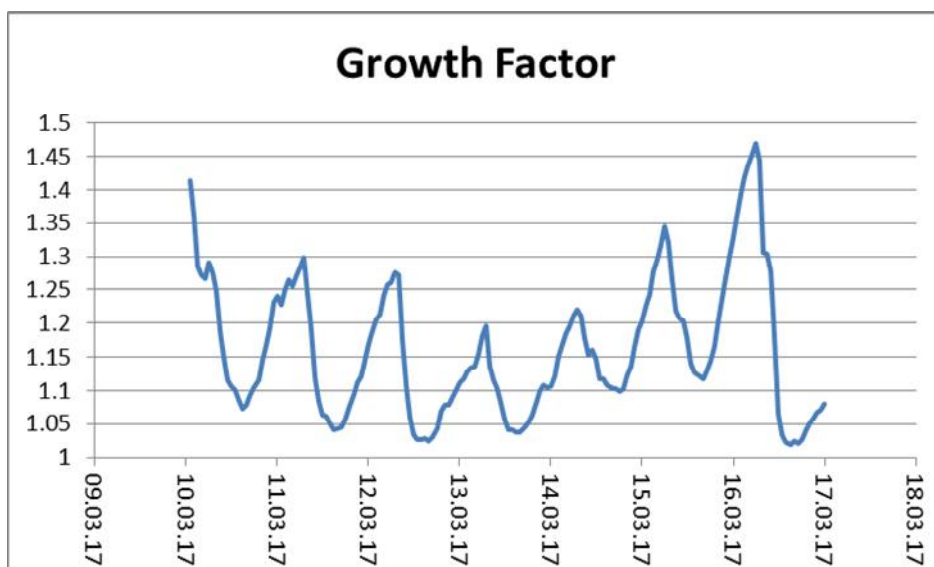


Abb. 12b: Berechnete Korrekturwerte für das Partikelwachstum dargestellt über dem Datum

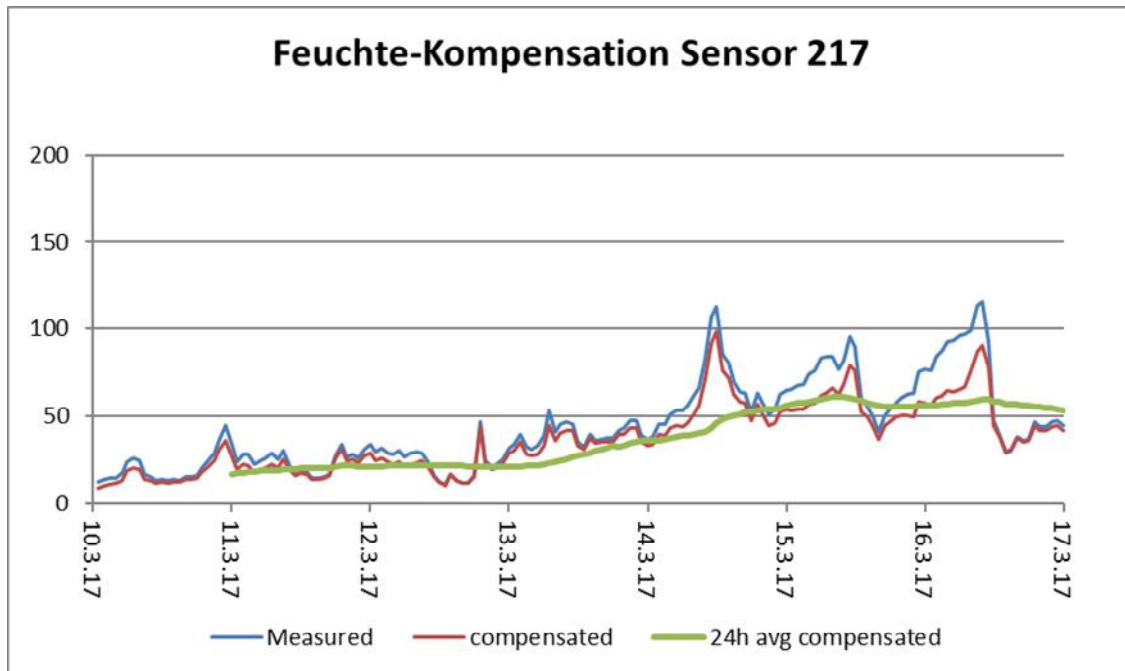


Abb. 13a: Ergebnis der Feuchte-Kompensation der PM-Werte des Sensors 217 (rot) im Vergleich zur Rohmessung (blau) und Bildung des gleitenden 24h-Mittelwerts (grün)

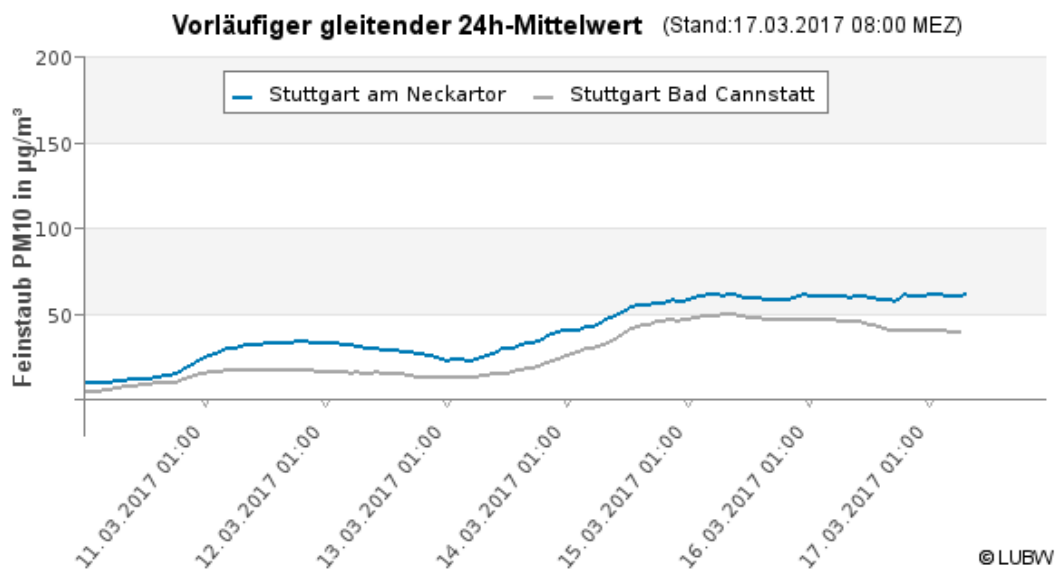


Abb. 13b: Vergleich mit den amtlichen Messwerten am Neckartor (Quelle LUBW)

Schlussfolgerung

Das Hinzufügen eines Low-Cost Feuchtesensors zu einem Low-Cost Feinstaubsensor und das zeitgleiche Erfassen der relativen Luftfeuchte parallel zur Erfassung der Feinstaub-Konzentration ermöglicht auf einfache Weise die Kompensation des Feuchte-Wachstums hygroskopischer Feinstaub-Partikel. Damit wird es möglich, auch mit kostengünstigen Laser-Streulicht Sensoren, die ursprünglich für den Innenraum konzipiert wurden, relativ genaue Feinstaub-Konzentrationen im Außenraum bei stark schwankender Luftfeuchte durchzuführen und sie mit amtlich gemessenen gravimetrisch bestimmten

Messdaten vergleichbar zu machen. Auf Grund der Fähigkeiten der entsprechenden Hardware und des Datenerfassungskonzepts kann das Partikel-Wachstum auf einfache Weise mit Hilfe der in der Fach-Literatur entwickelten Methoden modelliert werden und der entsprechende Algorithmus ohne großen Rechenaufwand bereits im steuernden Mikrocontroller oder bei der Daten-Nachbearbeitung bzw. Visualisierung implementiert werden. Die damit erreichbaren Genauigkeiten erscheinen im Vergleich zu den gravimetrischen Messungen nach ersten Untersuchungen sehr vielversprechend zu sein.

Literatur

/1/ Skupin, Annett

Optische und mikrophysikalische Charakterisierung von urbanem Aerosol bei (hoher) Umgebungsfeuchte

Universität Leipzig, Dissertation

176 S., 136 Lit., 76 Abb., 22 Tab.

/2/ Sutyajeet Soneja et al.

Humidity and Gravimetric Equivalency Adjustments for Nephelometer-Based Particulate Matter Measurements of Emissions from Solid Biomass Fuel Use in Cookstoves

International Journal of Environmental Research and Public Health ISSN 1660-4601

/3/ Chakrabarti, B.; Fine, P.M.; Delfino, R.; Sioutas, C. Performance evaluation of the active-flow personal DataRAM PM2.5 mass monitor (Thermo Anderson pDR-1200) designed for continuous personal exposure measurements. Atmos. Environ. 2004, 38, 3329–3340

/4/ Measured and modeled humidification factors of fresh smoke particles from biomass burning: role of inorganic constituents

J. L. Hand et al., Atmos. Chem. Phys., 10, 6179–6194, 2010

/5/ Assessing Particulate Matter and Black Carbon Emissions from Homes Using Traditional and Alternative Cookstoves in Rural Nepal

Sutyajeet I. Soneja

Dissertation submitted to Johns Hopkins University Baltimore, Maryland, July 2014

/6/ OK Lab Stuttgart, Webseite des Feinstaub-Projekts im OK Lab Stuttgart

<http://luftdaten.info>

/7/ Schwarmbasierte Auswertung der OK Lab Feinstaubsensoren im Stuttgarter Stadtgebiet hinsichtlich eines Feinstaub-Luftgütefaktors

Bernd Laquai, 11.3.2017

<http://opengeiger.de/Feinstaub/feinstaub.html>

/8/ Ein Feinstaub-Messgerät auf Arduino-Basis für die Feinstaubklassen PM10, PM2.5 und PM1.0

Bernd Laquai, 23.12.2016, Update 30.12.16

<http://opengeiger.de/Feinstaub/feinstaub.html>