

An inexpensive system for near-real-time monitoring of particulate matter pollution



In the thurAI project, IMMS has developed a compact, energy autonomous system for continuous particulate matter monitoring, which can be integrated into existing infrastructure with low-power wide-range wireless technology LoRaWAN and which was installed for measurements in the Ilmenau districts and holiday resorts of Frauenwald, Manebach and Stützerbach. Photo: Marco Götz, IMMS.

Motivation and overview

Particulate matter, the main pollutant in air pollution, is partly responsible for around 300,000 premature deaths per year and for critically excessive nutrient inputs into currently two thirds of ecosystem areas in the EU. For this reason, there are legal limits for particulate matter pollution that must be monitored and adhered to, and these will be significantly tightened by the EU's Air Quality Directive currently under revision. Compared to cities, stricter requirements already apply to state-approved health resorts and recreation resorts in particular. For certification as a spa-town or health resort, measurements are taken at intervals of several years by the German meteorological service (Deutscher Wetterdienst, DWD), in which dust collectors are deployed at neuralgic points, collected again after periods of one to several weeks, and analysed in the laboratory. The results are accumulated measurements of particulate matter pollution over the entire period under consideration. It is not possible to draw conclusions about causal events or fluctuations within the period.

If there was an inexpensive and flexible system that could be deployed at potentially representative locations for continuous particulate matter monitoring with a higher temporal resolution, it would be possible to draw conclusions about polluters, identify other dependencies, and, if necessary, take countermeasures at an early stage.

This is where existing citizen science approaches (e.g. AirRohr from LuftDaten.Info) have entered the stage and use low-cost hardware and software to enable continuous measurement. The resulting systems measure particulate matter, but the sensors used are very large. Moreover, at the beginning of the observations in our context, better sensors were already available than those used in the AirRohr design at that time.

In the thurAI research project, IMMS has developed a compact, energy-autonomous system for continuous particulate matter monitoring that can be integrated into existing infrastructure with low-power, wide-range LoRaWAN radio technology. For this purpose, a dedicated hardware including housing with integrated solar cell holder was developed. The system can be installed at various locations for continuous monitoring. In addition to recording the different particle sizes and micro-climate parameters, an autonomous humidity correction of the particulate matter measurement values is carried out. These are visualised with dashboards, whereby different representations from time series to “traffic lights” for limits as well as adaptations to specific requirements of an application are possible. In addition to spa climate monitoring, the solution is also suitable for monitoring particulate matter in general, e.g., in urban areas.

www.imms.de/thurai

System structure

The solution developed at IMMS in collaboration with the city of Ilmenau for monitoring particulate matter pollution is based on an optical measuring principle. The sensors are part of wireless sensor nodes that also measure the micro-climate parameters of air temperature and humidity and transmit them wirelessly to a gateway within range. From there, the data is transmitted to a central server, stored, and visualised in dashboards.

Figure 1:

Sensor node:
assembled on the left,
inside on the right.

Photograph: IMMS.



To avoid maintenance costs,
the wireless sensor nodes were
designed to be energy-autonomous:

They charge a buffer battery via a small solar panel, which enables them to operate even over periods of several weeks with little sunshine.

Sensors and electronics are housed in a “weather hut”, which is common for micro-climate sensor technology (Figure 1). A specially designed, 3D-printed inner construction holds the components in place. The sensor node is suitable for mounting on masts and the solar panel for the energy supply is installed on top of it.

The optical dust sensor (by Sensirion) used detects dust particles in the air with the help of a laser, similar to a light barrier. For this purpose, outside air is blown through the inside of the sensor housing at regular intervals via a fan. The darkening of the laser beam allows particles to be detected and counted in four size classes. These range from coarse dust of the PM₁₀ class with an aerodynamic diameter of less than 10 micrometres to PM₄ and fine dust with PM_{2.5} and PM₁, i.e. 2.5 and 1 micrometre particle size respectively.

Correction calculations for humidity influences

The optical measuring principle is influenced by the humidity in the air. If this is high, it is absorbed by the particles and they appear larger to the sensor than they actually are. To compensate for this, there are various approaches to correction calculation from relevant publications, one of which was implemented in the IMMS



Figure 2: Sensor on a light pole at the spa park in Stützerbach. Photograph: Marco Götze, IMMS.

Proof of function

From June 2023, the developed system was successively rolled out in the Ilmenau districts of Stützerbach (spa-town), Manebach, and Frauenwald (both resorts), each with several sensor nodes (Figure 2), and has been in an ongoing trial ever since. The current values and time series curves are visualised for the city and the spa administrations using dashboards in Grafana (Figure 3).

system.¹ The local micro-climate measurement of temperature and humidity was also integrated into the system for this purpose.

If the micro-climatic conditions are close to the dew point, the result of the correction calculations approaches the zero value exponentially. In such situations, which occur more frequently in the valleys of low mountain ranges, for example, the measured values are correspondingly less reliable in quantitative terms. However, this is a known problem for optical particulate matter measurement.² This can currently only be solved in the large measuring stations commonly used. The particulate matter collected there is determined by weight and therefore dried beforehand.

¹ Soneja, S.; Chen, C.; Tielsch, J.M.; Katz, J.; Zeger, S.L.; Checkley, W.; Curriero, F.C.; Breyse, P.N.: Humidity and Gravimetric Equivalency Adjustments for Nephelometer-Based Particulate Matter Measurements of Emissions from Solid Biomass Fuel Use in Cookstoves. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2014, 11, 6400-6416. <https://doi.org/10.3390/ijerph110606400>

² LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Messungen mit dem Feinstaubsensor SDS011. Ein Vergleich mit einem eignungsgeprüften Feinstaubanalysator. Karlsruhe 2017. <https://pd.lubw.de/90536>

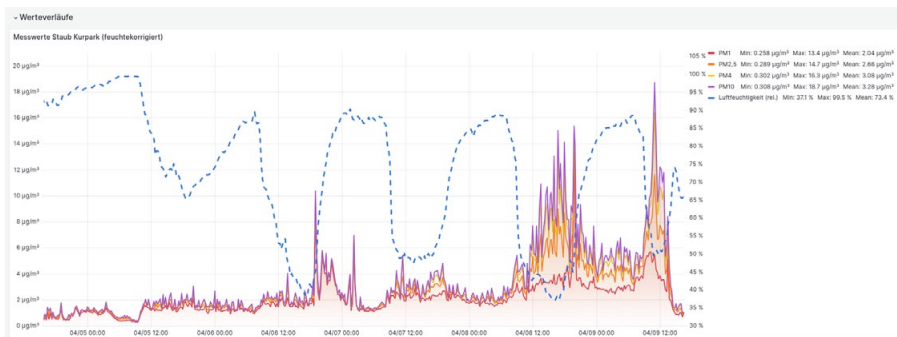
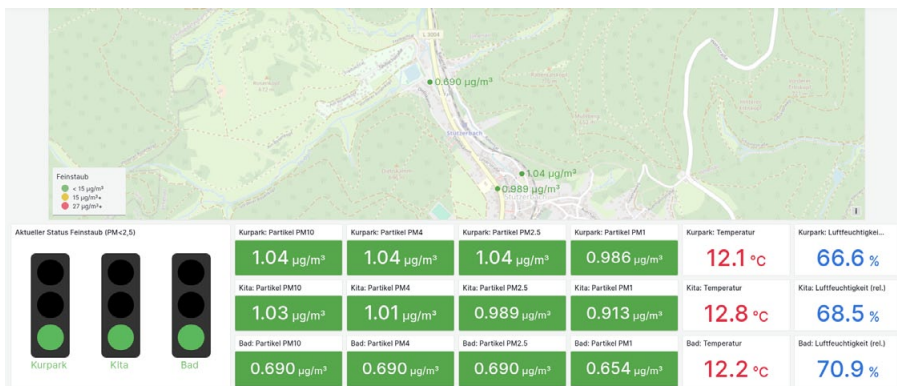


Figure 3: Status visualisation in dashboards: **top:** current status on a map of the town of Stützbach and “traffic lights” indicating adherence to limits; **bottom:** measurement time series curves showing (right) the phase of increased exposure to Saharan dust in April 2024. Source: IMMS.

In the course of testing, no quantitative comparison with DWD measurements has been possible so far due to a lack of reference: there are no public measuring points in the locations under consideration and the measurement data available from public sources such as the Thuringian environmental portal are of lower temporal resolution. However, qualitative correlations with expected or large-scale reported increases could be recorded, e.g., a clear peak after midnight on New Year’s Eve, the weeks with Saharan dust in spring 2024, and other phases with increased particulate matter pollution throughout Germany. In Manebach, a sensor was installed at a location of interest below the height of neighboring chimneys due to the local conditions – as a result, heating periods could be detected in certain weather conditions.

The measured values for particulate matter monitoring in the districts of Ilmenau will also be displayed on citizen information pages in future.

In addition, the continuous measurement of particulate matter with a comparatively high temporal resolution will be used over the longer term to examine the extent to which the measured values correlate with DWD measurements and what conclusions can be drawn about the causes of fluctuations over the course of the year and selective spikes.

As particulate matter is especially relevant for spa-towns and health resorts, but also for cities in general due to legal requirements, the solution is also suitable for a wider range of applications. In the EU Air Quality Directive currently being revised, the annual limit value for the main pollutant particulate matter (PM_{2.5}) has been reduced by more than half. It can therefore be assumed that the number of measuring stations will increase and the demand for more cost-effective solutions such as this could rise in the future.

The data collected can also form the basis for systematic correlation observations and analyses (also using AI), root cause analysis, and also the review of the effectiveness of measures taken.

Contact person: Dr.-Ing. Tino Hutschenreuther, tino.hutschenreuther@imms.de



Hier hat Zukunft Tradition.

The thurAI research project was funded by the German Land of Thüringen via the Thüringer Aufbaubank under the reference 2021 FGI 0008.

- > *Integrated sensor systems*
- > *Distributed measurement + test systems*
- > *Mag6D nm direct drives*
- > *Contents*
- * *Funding*

www.imms.de/thurai

Ein preiswertes System zum echtzeitnahen Monitoring der Feinstaubbelastung



Das IMMS hat im Projekt thurAI ein kompaktes energieautarkes System für das kontinuierliche Feinstaubmonitoring entwickelt, das sich in bestehende Infrastruktur mit Low-Power-Weitbereichsfunktechnologie LoRaWAN einbinden lässt und das für Messungen in den Ilmenauer Ortsteilen und Urlaubsorten Frauenwald, Manebach und Stützerbach installiert wurde. Foto: Marco Götz, IMMS.

Motivation und Überblick

Feinstaub als Hauptschadstoff der Luftverschmutzung ist für etwa 300.000 vorzeitige Todesfälle pro Jahr und für einen kritisch überhöhten Nährstoffeintrag in derzeit zwei Dritteln der Ökosystemgebiete in der EU mitverantwortlich. Daher gibt es gesetzliche Grenzwerte für die Feinstaubbelastung, die zu kontrollieren und einzuhalten sind und die durch die aktuell überarbeitete Luftqualitätsrichtlinie der EU deutlich verschärft werden. Im Vergleich zu Städten gelten bereits heute besonders für staatlich anerkannte Kur- und Erholungsorte strengere Auflagen. Für eine Zertifizierung zum Kurort erfolgen in Abständen mehrerer Jahre Messungen durch den Deutschen Wetterdienst, bei denen Staubsammler an neuralgischen Punkten ausgebracht und nach Zeiträumen von einer bis mehreren Wochen wieder eingesammelt und im Labor analysiert werden. Das Ergebnis sind akkumulierte Messwerte zur Feinstaubbelastung über den gesamten betrachteten Zeitraum. Ein Rückschluss auf ursächliche Ereignisse oder Schwankungen innerhalb des Zeitraums ist nicht möglich.

Gäbe es ein preiswertes und flexibel an potenziell repräsentativen Standorten ausbringbares System zur kontinuierlichen, zeitlich höher aufgelösten Feinstaubüberwachung, ließen sich Rückschlüsse auf Verursacher ziehen, andere Abhängigkeiten erkennen und gegebenenfalls frühzeitig gegensteuernde Maßnahmen ergreifen.

Hier setzen vorhandene Citizen-Science-Ansätze (z.B. AirRohr von LuftDaten.Info) an und nutzen kostengünstige Hard- und Software, um eine kontinuierliche Messung zu ermöglichen. Die so entstehenden Systeme messen Feinstaub, aber die verwendeten Sensoren sind sehr groß. Zu Beginn der Betrachtungen waren zudem bereits bessere Sensoren verfügbar, als sie im AirRohr-Design zu diesem Zeitpunkt verwendet wurden.

Das IMMS hat im Forschungsprojekt *thurAI* ein kompaktes energieautarkes System für das kontinuierliche Feinstaubmonitoring entwickelt, das sich in bestehende Infrastruktur mit Low-Power-Weitbereichsfunktechnologie LoRaWAN einbinden lässt. Dafür wurde eine eigene Hardware samt Gehäuse mit integrierter Solarzellenhalterung entwickelt. Das System kann zum kontinuierlichen Monitoring an verschiedenen Stellen installiert werden. Neben der Erfassung der unterschiedlichen Partikelgrößen und Mikroklimaparameter erfolgt eine autonome Feuchtekorrektur der Feinstaubmesswerte. Diese werden mit Dashboards visualisiert, wobei unterschiedliche Darstellungen von Zeitreihen bis hin zu Grenzwert-Ampeln sowie Anpassungen an spezifische Bedürfnisse eines Anwendungsfalls möglich sind. Über das Kurklima-Monitoring hinaus eignet sich die Lösung auch zum Monitoring von Feinstaub im Allgemeinen, z.B. im städtischen Raum.

[www.imms.de/
thurai](http://www.imms.de/thurai)

Systemaufbau

Die am IMMS in Zusammenarbeit mit der Stadt Ilmenau entwickelte Lösung zum Monitoring von Feinstaubbelastungen setzt auf ein optisches Messprinzip. Die Sensoren sind Bestandteil von Funksensorknoten, die zudem die Mikroklimaparameter Lufttemperatur und -feuchtigkeit messen und drahtlos an ein Gateway in Reichweite übertragen. Von dort werden die Daten zu einem zentralen Server übertragen, gespeichert und in Dashboards visualisiert.

Abbildung 1:

Sensorknoten: links zusammengebaut, rechts Innenleben.

Foto: IMMS.



Zur Vermeidung von Wartungsaufwänden wurden die Funksensorknoten energieautark konzipiert: Über ein kleines Solarpanel laden sie eine Pufferbatterie, die ihnen auch über mehrwöchige Phasen mit wenig Sonnenschein hinweg einen Betrieb ermöglicht.

Sensoren und Elektronik sind in einer für Mikroklima-Sensorik üblichen „Wetterhütte“ untergebracht (Abb. 1). Eine eigens entworfene 3D-gedruckte Innenkonstruktion fixiert die Komponenten dabei. Der Sensorknoten eignet sich für die Montage an Masten, das Solarpanel für die Energieversorgung wird darüber installiert.

Der verwendete optische Staubsensor von Sensirion detektiert Staubpartikel in der Luft über einen Laser, ähnlich einer Lichtschranke. Dazu wird in regelmäßigen Abständen über einen Lüfter Außenluft durch das Innere der Sensoreinhausung geblasen. Durch die Verdunklung des Laserstrahls werden Partikel erkannt und in vier Größenklassen gezählt. Diese reichen von Grobstaub der Klasse PM₁₀ mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer über PM₄ bis zum eigentlich Feinstaub mit PM_{2,5} und PM₁, also 2,5 bzw. 1 Mikrometer Partikelgröße.

Korrekturrechnungen für Luftfeuchte-Einflüsse

Das optische Messprinzip wird durch die Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Ist diese hoch, wird sie von den Partikeln aufgenommen und sie erscheinen dem Sensor größer als sie eigentlich sind. Um das zu kompensieren, gibt es aus einschlägigen Veröffentlichungen verschiedene Ansätze zur Korrekturrechnung, von denen im IMMS-System



Abbildung 2: Sensor an einem Lichtmast am Kurpark in Stützerbach. Foto: Marco Götze, IMMS.

einer umgesetzt wurde.¹ Auch hierfür wurde die lokale Mikroklima-Messung mit Temperatur und Luftfeuchte in das System integriert.

Sind die mikroklimatischen Bedingungen nahe am Taupunkt, nähert sich das Ergebnis der Korrekturrechnungen exponentiell dem Nullwert. In solchen Situationen, die etwa in Tallagen von Mittelgebirgen auch häufiger auftreten, sind die Messwerte entsprechend quantitativ weniger belastbar. Das ist jedoch ein bekanntes Problem für die optische Feinstaubmessung. Lösbar ist das derzeit nur in den gängigen großen Messstationen.² Der dort gesammelte Feinstaub wird über das Gewicht bestimmt und daher vorher getrocknet.

Funktionsnachweis

Das entwickelte System wurde ab Juni 2023 sukzessive in den Ilmenauer Ortsteilen Stützerbach (Kurort), Manebach und Frauenwald (beides Erholungsorte) mit jeweils mehreren Sensorknoten ausgebracht (Abb. 2) und ist seither dort in Erprobung. Die Momentanwerte und Messwertverläufe werden der Stadt und den Kurverwaltungen mittels Dashboards in Grafana visualisiert (Abb. 3).

Im Zuge der Erprobung war mangels Referenz bislang kein quantitativer Vergleich mit DWD-Messungen möglich: In den betrachteten Orten gibt es keine öffentlichen

¹ Soneja, S.; Chen, C.; Tielsch, J.M.; Katz, J.; Zeger, S.L.; Checkley, W.; Curriero, F.C.; Breyse, P.N.: Humidity and Gravimetric Equivalency Adjustments for Nephelometer-Based Particulate Matter Measurements of Emissions from Solid Biomass Fuel Use in Cookstoves. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2014, 11, 6400-6416. <https://doi.org/10.3390/ijerph110606400>

² LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Messungen mit dem Feinstaubsensor SDS011. Ein Vergleich mit einem eignungsgeprüften Feinstaubanalysator. Karlsruhe 2017. <https://pd.lubw.de/90536>

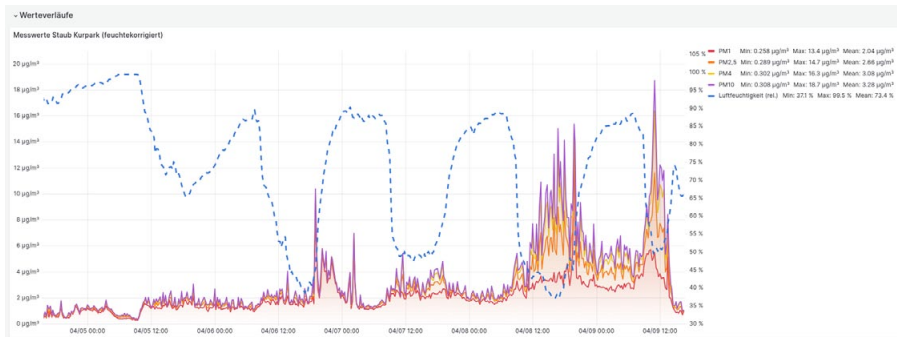
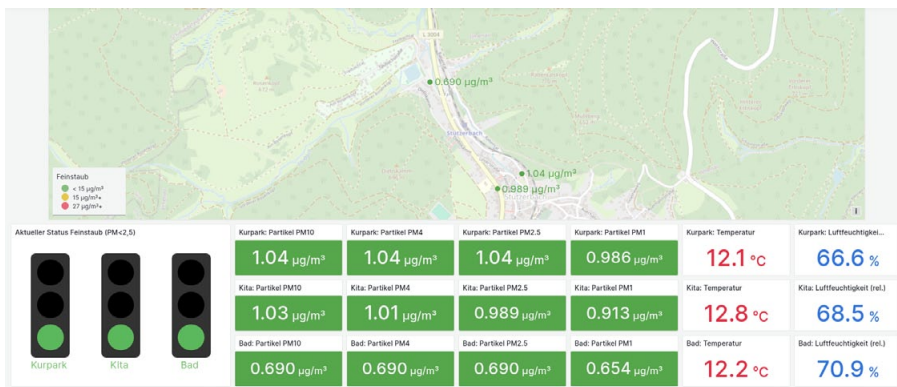


Abbildung 3: Statusvisualisierung in Dashboards: Oben aktueller Status auf einer Karte des Ortsteils Stützerbach sowie Grenzwertampeln, unten Messwertverläufe, die (rechts) die Phase erhöhter Belastung durch Saharastaub im April 2024 zeigen. Quelle: IMMS.

Messstellen und die über öffentliche Quellen wie das Umweltportal Thüringen beziehbaren Messdaten sind zeitlich geringer aufgelöst. Es konnten jedoch qualitative Korrelationen mit erwarteten oder großräumig gemeldeten Anstiegen verzeichnet werden, z.B. ein deutlicher Peak nach Mitternacht Silvester, die Wochen mit Saharastaub im Frühjahr 2024 und weitere Phasen mit deutschlandweit erhöhter Feinstaubbelastung. In Manebach wurde ein Sensor aufgrund der örtlichen Bedingungen an einem interessierenden Installationsort unterhalb der Höhe benachbarter Schornsteine ausgebracht – in der Folge ließen sich bei bestimmten Wetterlagen Heizperioden erkennen.

Die Messwerte zum Feinstaubmonitoring in den Ilmenauer Ortsteilen sollen zukünftig auch auf Bürgerinformationsseiten dargestellt werden.

Zudem soll mit der kontinuierlichen Feinstaubmessung mit vergleichsweise hoher zeitlicher Auflösung längerfristig betrachtet werden, inwieweit die Messwerte mit DWD-Messungen korrelieren und welche Rückschlüsse auf die Ursachen für Schwankungen im Jahresverlauf und punktuelle Ausschläge möglich sind.

Da Feinstaub zwar für Kur- und Erholungsorte in besonderem Maße, aber auch für Städte im Allgemeinen aufgrund gesetzlicher Vorgaben relevant ist, eignet sich die Lösung auch für ein breiteres Anwendungsspektrum. In der aktuell überarbeiteten Luftqualitätsrichtlinie der EU wird der Jahresgrenzwert für den Hauptschadstoff Feinstaub (PM_{2,5}) um mehr als die Hälfte gesenkt. Somit kann von einer Ausweitung der Mess-Stationen ausgegangen werden und der Bedarf an kostengünstigeren Lösungen wie dieser könnte perspektivisch steigen.

Die erhobenen Daten können zudem die Grundlage für systematische Korrelationsbetrachtungen und Analysen (auch per KI), Ursachenforschung und auch die Überprüfung der Wirksamkeit ergriffener Maßnahmen bilden.

Kontakt: Dr.-Ing. Tino Hutschenreuther, tino.hutschenreuther@imms.de



Hier hat Zukunft Tradition.

Das Forschungsvorhaben *thurAI* wurde durch den Freistaat Thüringen über die Thüringer Aufbaubank unter dem Kennzeichen 2021 FGI 0008 gefördert.

- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > Mag6D-nm-Direktantriebe
- > Inhalt
- * Förderung

www.imms.de/thurai