



Ergebniszwischenbericht der Jahre 2022 bis 2024

Messung ultrafeiner Partikel in der Umwelt



1 Einleitung

1.1 Ultrafeine Partikel

Ultrafeine Partikel (UFP) haben Durchmesser kleiner als 100 Nanometer (entspricht 0,1 μm). Sie sind Teil des atmosphärischen Aerosols und können als Primärpartikel beispielsweise durch Verbrennungsprozesse direkt freigesetzt werden oder als Sekundärpartikel aus gasförmigen Vorläufersubstanzen entstehen. Die Masse von UFP ist sehr klein, weshalb die Partikelanzahlkonzentration ein übliches Maß ist, diese zu quantifizieren.

Die im Jahr 2021 erschienenen *WHO Global Air Quality Guidelines*¹ empfehlen die Messung der UFP-Anzahlkonzentration und der Anzahlgrößenverteilung. So soll ein besseres Bild der Luftschadstoffexposition entstehen und der Forschung ermöglicht werden, die gesundheitlichen Effekte genauer festzustellen. Die Neufassung der Richtlinie über Luftqualität und saubere Luft für Europa² sieht nun eine Messverpflichtung ultrafeiner Partikel vor, wobei jedoch keine Grenzwerte für UFP festgelegt wurden. Zur Orientierung gibt die WHO Werte zur Einordnung der Gesamtanzahlkonzentration von Partikeln im Bereich zwischen einer unteren Durchmessergränze von 10 nm oder kleiner und nach oben keiner Begrenzung an. So sind im Tagesmittel Konzentrationen bis 1.000 Partikel/cm³ als geringe Anzahlkonzentrationen anzusehen, wohingegen Tagesmittelwerte über 10.000 Partikel/cm³ und Stundenmittelwerte über 20.000 Partikel/cm³ hohe Konzentrationen darstellen.

1.2 Projekt zur Messung ultrafeiner Partikel

Bereits Anfang des Jahres 2020 begrüßte der Bayerische Landtag die Bestrebungen des Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV), Forschung zur Wirkung von Ultrafeinstaub auf die menschliche Gesundheit an repräsentativen Standorten in Bayern durchzuführen. In diesem Zuge wurden dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) finanzielle Mittel für den Aufbau von drei Messstationen für UFP sowie für den Betrieb im Rahmen eines Projektes von Seiten des StMUV bereitgestellt.

Noch im Jahr 2020 wurden in Abstimmung mit der Gesundheitsforschung (u. a. Helmholtz Zentrum München) drei Standorte im städtischen Hintergrund in Augsburg (Gelände des LfU), München (Johanneskirchen) und Regensburg (Universitätscampus) gefunden und die Messstationen dort aufgebaut. Nach der Inbetriebnahme der Messtechnik, der Anbindung mit einer automatisierten Datenerfassung sowie der Etablierung eines Qualitätssicherungskonzeptes im Jahr 2021 gingen die Stationen im Jahr 2022 in den kontinuierlichen Messbetrieb über. In den Messstationen werden über fünf Jahre hinweg bis zum geplanten Projektende im Jahr 2026 Messzeitreihen der Partikelanzahlkonzentration und -größenverteilung sowie Feinstaubmassenkonzentrationen (PM₁₀ und PM_{2,5}), die Rußkonzentration, die Stickstoffdioxid- und Ozonkonzentration aufgezeichnet. Zur Qualitätssicherung werden darüber hinaus weitere meteorologische Größen gemessen.

¹ WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization, 22.09.2021.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

² Directive (EU) 2024/2881 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast). OJ L, 2024/2881, 20.11.2024.
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881>

2 Messtechnik und Qualitätssicherung

2.1 Messung ultrafeiner Partikel

Die Messung der Partikelanzahlkonzentration erfolgt über Kondensationspartikelzähler (engl. *Condensation Particle Counter*, CPC) mit einer unteren Durchmessergränze von 10 nm. Das Aerosol wird dabei durch eine gesättigte Butanolatmosphäre geleitet. Durch Abkühlen wird anschließend Butanol an den Partikeln kondensiert, sodass die Partikel mittels Streulichtmessung optisch detektiert werden können. Die Messsysteme genügen den Anforderungen der Norm DIN EN 16976³ und werden möglichst jährlich am *World Calibration Center for Aerosol Physics* (WCCAP) des Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) überprüft.

Die Anzahlgrößenverteilung wird mittels Mobilitätspartikelgrößenpektrometer (engl. *Mobility Particle Size Spectrometer*, MPSS) im Durchmesserbereich von 10 bis 800 nm gemessen. Das Aerosol wird dabei durch ionisierte Luft geleitet, anschließend im elektrischen Feld klassiert und die Größenfraktionen wiederum mittels CPC detektiert. Entsprechend den Vorgaben der Norm für die Messung der Partikelanzahlgrößenverteilung DIN CEN/TS 17434⁴ werden die eingesetzten Messgeräte planmäßig alle zwei Jahre am WCCAP kontrolliert.

Neben den sich in den drei Messstationen befindlichen MPSS und CPC besitzt das LfU jeweils eine weitere Ausführung als Referenzsystem. Dieses wird ein bis zweimal pro Jahr für Vergleichsmessungen nacheinander in die einzelnen Stationen gebracht, um die Stabilität der dortigen Messsysteme zu überprüfen. Zudem werden die Partikelgrößenpektrometer vierteljährlich mit einem definierten Polystyrol-Latex-Partikelstandard geprüft. Ein Vergleich zwischen der integrierten Anzahlgrößenverteilung (MPSS-Messung) und der Gesamtanzahlkonzentration (CPC-Messung) wird kontinuierlich in allen Stationen durchgeführt, um die Messgeräte werktäglich zu überwachen. Die Geräte werden darüber hinaus regelmäßig gewartet und manuelle Prüfungen durchgeführt (beispielsweise Nullpunkt, Durchfluss, Dichtheit, Verschmutzung usw.).

2.2 Messung von Ruß

Die Messung der Rußkonzentration erfolgt optisch mit einem sogenannten Aethalometer. Dabei wird über die Lichtabschwächung beim Durchleuchten eines sich durch Ruß schwärzenden Filterbandes über einen Lichtabsorptionskoeffizienten die Größe *Equivalent Black Carbon* (EBC) ermittelt. EBC wird typischerweise bei einer Lichtwellenlänge $\lambda = 880$ nm und mit einem Massenabsorptionsquerschnitt (engl. *Mass Absorption Cross-section*, MAC) $\sigma = 7,77$ m²/g bestimmt. Die verwendeten Aethalometer werden regelmäßig gewartet. Neben routinemäßigen Durchfluss- und Nullpunkt-Prüfungen werden die Geräte wiederkehrend mit optischen Grau-Filtern kalibriert.

2.3 Messung weiterer Luftschadstoffe

Für die in diesem Bericht vorgestellten Luftschadstoffmessungen der Komponenten Feinstaub PM₁₀ und PM_{2,5} (Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 10 µm bzw. 2,5 µm) sowie Ozon

³ DIN EN 16976: Außenluft - Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols; Deutsche Fassung EN 16976:2024.

⁴ DIN CEN/TS 17434: Außenluft - Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung des atmosphärischen Aerosols mit einem Mobilitäts-Partikelgrößenpektrometer (MPSS); Deutsche Fassung CEN/TS 17434:2020.

(O₃) und Stickstoffdioxid (NO₂) werden ausschließlich zertifizierte Mess- und Auswerteeinrichtungen verwendet.⁵

Die Feinstaubfraktionen PM₁₀ und PM_{2,5} werden mit optischen Aerosolspektrometern gemessen. Einzelpartikel werden mittels Mie-Streuung detektiert und Rückschlüsse auf die Partikelgröße gezogen. Die Größenbestimmung wird vierteljährlich mit einem Partikelstandard überprüft. Um die Massenkonzentration kontinuierlich genau zu bestimmen, wurden wiederholt Abgleiche mit der Referenzmessmethode, dem gravimetrischen Basisverfahren, auf Tagesmittelwertbasis durchgeführt (sogenannte Äquivalenznachweise⁶). Neben routinemäßigen Wartungen werden an den Feinstaubmessgeräten ebenso Durchfluss- und Nullpunkt-Messungen durchgeführt.

Die Ozonmessung beruht auf dem Prinzip der UV-Absorption. Für die Messung von Stickstoffdioxid werden sowohl Geräte basierend auf dem Chemilumineszenz-Messverfahren als auch auf der *Cavity Attenuated Phase Shift*-Spektroskopie (CAPS) eingesetzt. Die Geräte werden routinemäßig gewartet und kalibriert. Darüber hinaus werden täglich automatisiert Funktionskontrollen durchgeführt (Prüfung des Nullpunktes und einer definierten Kontrollkonzentration).

Die Qualitätssicherung ist angelehnt an die offiziellen Messungen des LfU im Rahmen des Lufthygienischen Landesüberwachungssystems Bayern (LÜB)⁷, welches die gesetzlichen Anforderungen der Neundreißigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen - 39. BImSchV)⁸ erfüllt. Für die automatischen Feinstaubmessungen findet DIN EN 16450⁹ Berücksichtigung, für die gravimetrische Bestimmung der Feinstaubmassenkonzentration DIN EN 12341¹⁰, für die NO₂-Messung mit dem Chemilumineszenz-Verfahren DIN EN 14211¹¹ und für die O₃-Messung via UV-Absorption entsprechend DIN EN 14625¹².

3 Auswertung der Jahre 2022 bis 2024

3.1 Partikelanzahlkonzentrationen

Die jährlichen Mittelwerte der Partikelgesamtanzahlkonzentration sind in Tab. 1 angegeben. Die Konzentrationen liegen dabei gerundet bei etwa 7.000 bis 8.000 Partikel/cm³. Zur Einordnung der Anzahlkonzentration gibt die WHO abhängig vom Mittelungszeitraum die eingangs erwähnten

⁵ Zertifizierte Mess- und Auswerteeinrichtungen nach DIN EN 15267. TÜV Rheinland Energy & Environment GmbH, 16.03.2023. <https://qal1.de>

⁶ Reference air quality measurement methods. European Commission - Directorate-General for Environment, 31.05.2022. https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/assessment_en

⁷ Immissionsmessungen - Lufthygienisches Landesüberwachungssystem Bayern (LÜB). Bayerisches Landesamt für Umwelt. <https://www.lfu.bayern.de/luft/immissionsmessungen/index.htm>

⁸ Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065), zuletzt geändert durch Artikel 112 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328). https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/index.html

⁹ DIN EN 16450: Außenluft - Automatische Messeinrichtungen zur Bestimmung der Staubkonzentration (PM₁₀; PM_{2,5}); Deutsche Fassung EN 16450:2017.

¹⁰ DIN EN 12341: Außenluft - Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM₁₀- oder PM_{2,5}-Massenkonzentration des Schwebstaubes; Deutsche Fassung EN 12341:2023.

¹¹ DIN EN 14211: Außenluft - Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid mit Chemilumineszenz; Deutsche Fassung EN 14211:2012.

¹² DIN EN 14625: Außenluft - Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Ozon mit Ultraviolett-Photometrie; Deutsche Fassung EN 14625:2012.

Konzentrationswerte an. Die Verläufe auf Tagesmittelwertbasis sind mit dem gekennzeichneten Orientierungswert, ab welchem von hohen Konzentrationen gesprochen werden kann, in Abb. 1 dargestellt. Eine Analyse der gemittelten Partikelanzahlkonzentrationen, die unter den angegebenen Orientierungswerten liegen – also keine hohen Konzentrationen darstellen – finden sich auf Tagesmittelwertbasis in Tab. 2 bzw. auf Stundenmittelwertbasis in Tab. 3. Dabei wird ersichtlich, dass im Messzeitraum an den drei Messstandorten im städtischen Hintergrund überwiegend keine hohen Konzentrationen entsprechend WHO-Definition gemessen wurden.

Tab. 1: Mittlere Partikelgesamtanzahlkonzentrationen in cm^{-3} .

Jahr	Augsburg, LfU	München, Joh.	Regensburg, Uni.
2022	7.400	7.500	8.300
2023	6.900	7.100	8.000
2024	6.700	7.000	8.400
2022 bis 2024	7.000	7.200	8.200

Tab. 2: Anteil der Anzahlkonzentrationstagesmittelwerte unter 10.000 cm^{-3} .

Jahr	Augsburg, LfU	München, Joh.	Regensburg, Uni.
2022	83,9 %	84,8 %	72,8 %
2023	89,5 %	89,7 %	72,9 %
2024	89,2 %	90,4 %	70,2 %

Tab. 3: Anteil der Anzahlkonzentrationsstundenmittelwerte unter 20.000 cm^{-3} .

Jahr	Augsburg, LfU	München, Joh.	Regensburg, Uni.
2022	98,2 %	98,9 %	97,5 %
2023	99,0 %	99,0 %	97,9 %
2024	98,6 %	99,3 %	97,2 %

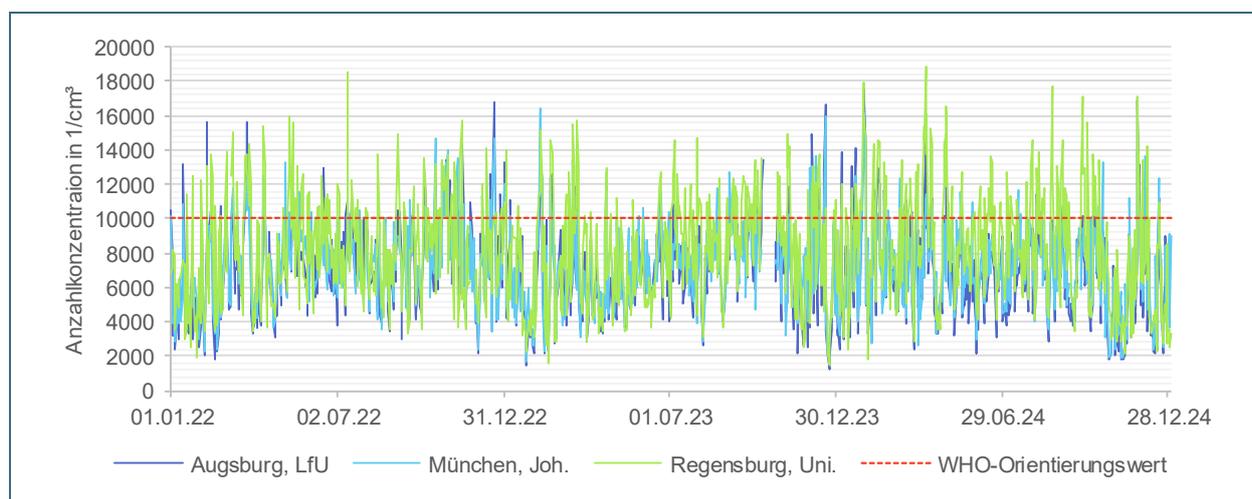


Abb. 1: Verlauf der Tagesmittelwerte der Partikelanzahlkonzentration in den Jahren 2022 bis 2024.

3.2 Partikelgrößenverteilungen

Die über den Messzeitraum von drei Jahren (2022–2024) gemessenen Anzahlgrößenverteilungen sowie die nach Partikeldurchmesser d_p fraktionierten Anzahlkonzentrationen sind in Abb. 2 dargestellt. Dabei sind die kleinsten Partikelfractionen maßgebend für die Konzentrationsunterschiede an den drei Messstandorten.

Die Verläufe des mittleren Partikeldurchmessers sind als Wochenmittelwerte in Abb. 3 gezeigt. Es ist eine hohe Korrelation des mittleren Durchmessers an den weit auseinander gelegenen Messstandorten erkennbar und lässt auf einen starken Einfluss standortunabhängiger, überregionaler Phänomene wie beispielsweise meteorologischer Bedingungen schließen.

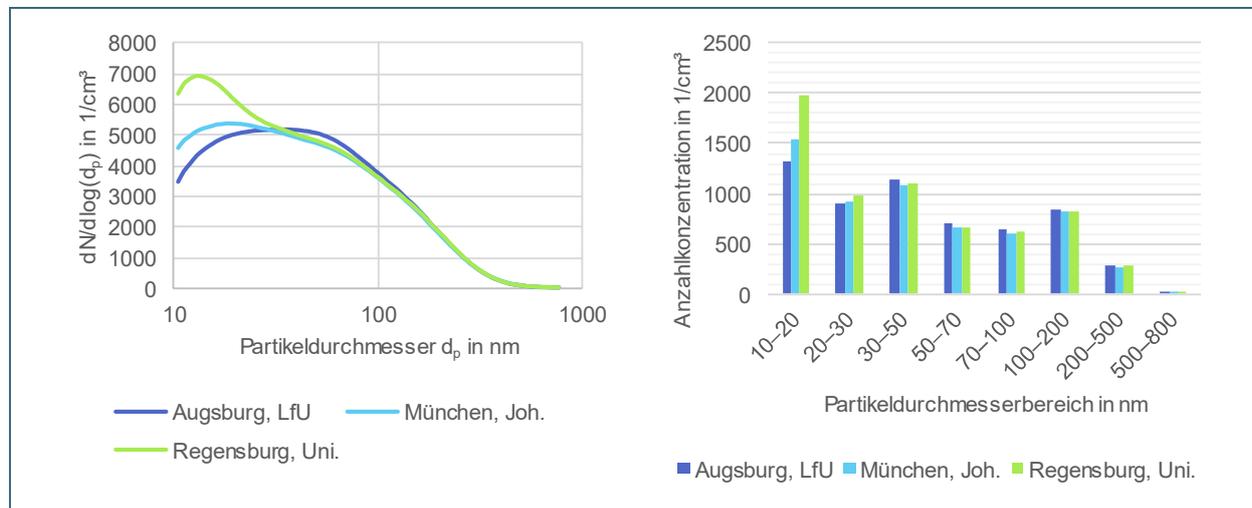


Abb. 2: Gemittelte Größenverteilungen (links) und Anzahlkonzentrationen verschiedener Durchmesserbereiche (rechts) der Jahre 2022 bis 2024.

3.3 Vergleich verschiedener Luftschadstoffe

In Tab. 4 sind die an den drei Standorten ermittelten Jahresmittelwerte verschiedener Luftschadstoffkonzentrationen aufgelistet. In Augsburg und München sind im städtischen Hintergrund ähnliche Belastungsniveaus vorzufinden. In Regensburg liegen die Konzentrationen höher – so auch die Partikelgesamanzahlkonzentration. Die Ozonkonzentrationsniveaus verhalten sich im Standortvergleich gegenläufig.

Ein Vergleich der Konzentrationsverläufe auf Monatsmittelwertbasis ist in Abb. 4 gezeigt. Bei der Anzahlkonzentration sind im Gegensatz zu EBC und NO_2 keine ausgeprägten Jahrgänge zu erkennen. Effekte wie das komplexe Zusammenspiel der UFP-Bildungsmechanismen (Primär- und Sekundärpartikel) beeinflussen die Partikelanzahlkonzentrationen und führt an allen Messstandorten trotz besserer Durchmischungsverhältnisse zu keiner markanten Abnahme im Sommer und zu keinem Anstieg im Winter.

Tab. 4: Jahresmittelwerte verschiedener Luftschadstoffkonzentrationen.

Messort	Jahr	Anzahlkonzentration in cm^{-3}	Mittlerer Durchmesser in nm	EBC ($\lambda = 880$ nm) in ng/m^3	Feinstaub PM_{10} in $\mu g/m^3$	Feinstaub $PM_{2,5}$ in $\mu g/m^3$	NO_2 in $\mu g/m^3$	O_3 in $\mu g/m^3$
Augsburg, LfU	2022	7.390	68	770	12	8	13	52
	2023	6.890	65	660	10	7	12	55
	2024	6.710	67	680	11	7	11	50
München, Joh.	2022	7.520	67	760	13	8	14	52
	2023	7.060	63	570	11	7	13	57
	2024	6.980	64	680	12	7	13	51
Regensburg, Uni.	2022	8.320	67	890	15	9	17	46
	2023	8.040	62	730	14	8	16	49
	2024	8.390	63	760	14	8	15	46

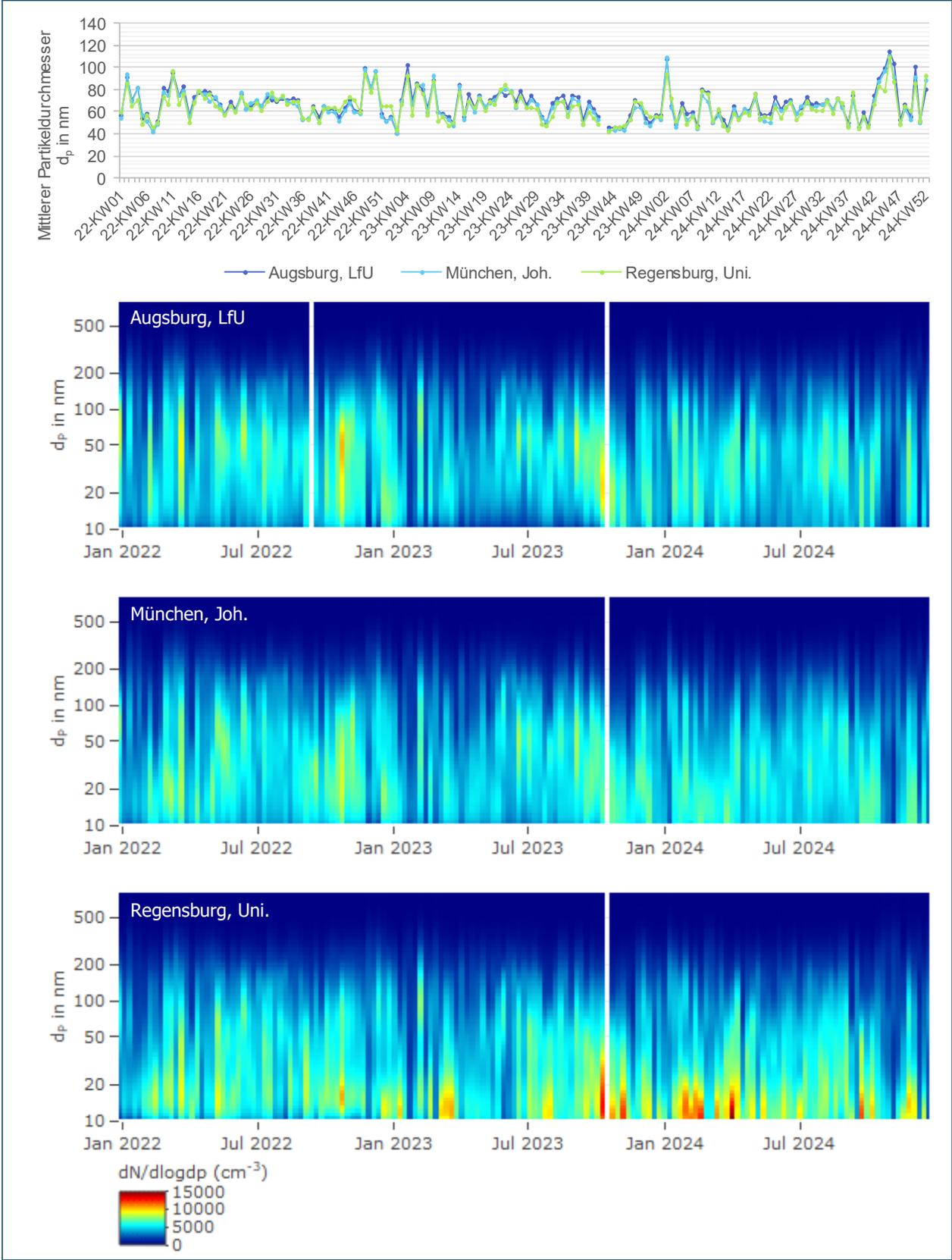


Abb. 3: Mittlere Partikeldurchmesser und Anzahlgrößenverteilungen auf Wochenbasis der Jahre 2022 bis 2024.



Abb. 4: Verläufe der Monatsmittelwerte verschiedener Luftschadstoffkonzentrationen der Jahre 2022 bis 2024.

4 Zusammenfassung

Die gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen liegen an den Messstandorten im städtischen Hintergrund in Augsburg (LfU), München (Johanneskirchen) und Regensburg (Universität) gerundet bei etwa 7.000 bis 8.000 Partikel/cm³. Die kleinsten Partikel sind dabei maßgebend für die unterschiedlichen Anzahlkonzentrationen an den Messstandorten. Ein Vergleich der gemittelten Partikeldurchmesser an den weit voneinander entfernten Messstationen lässt auf einen starken Einfluss überregionaler Phänomene wie meteorologischer Bedingungen schließen. Die Anzahlkonzentrationen sind nicht ausschließlich von den sich jahreszeitlich ändernden Durchmischungsverhältnissen abhängig und werden von anderen Effekten wie den komplexen Bildungsprozessen von ultrafeinen Partikeln als Primär- und Sekundärpartikel überlagert. Ein Vergleich der Partikelanzahlkonzentration mit anderen Luftschadstoffkonzentrationen zeigt am Messstandort im städtischen Hintergrund in Augsburg und München im Mittel eine ähnliche Belastung, während in Regensburg insgesamt etwas höhere Konzentrationen verschiedener Luftschadstoffe vorzufinden sind.

Impressum:

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Telefon: 0821 9071-0
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung:

LfU, Referat 23

Bildnachweis:

LfU, Referat 23

Stand:

April 2025

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.