



Kurzbericht

erstellt am 26. Juni 2024 vom Dezernat I2 - Luftreinhaltung: Immissionen

Temporäre Luftschadstoffmessungen in Neu-Isenburg

Stationsinformationen

Stationsumgebung: städtisches Gebiet, Hintergrund
Typ: temporäre Luftmessstation
Standort: Hugentottenallee, 63263 Neu-Isenburg
Geogr. Breite: 50,05265 °N
Geogr. Länge: 8,689387 °E
Höhe über NN: 120 m
Zeitraum der Messung: 22.08.2022 bis 28.08.2023

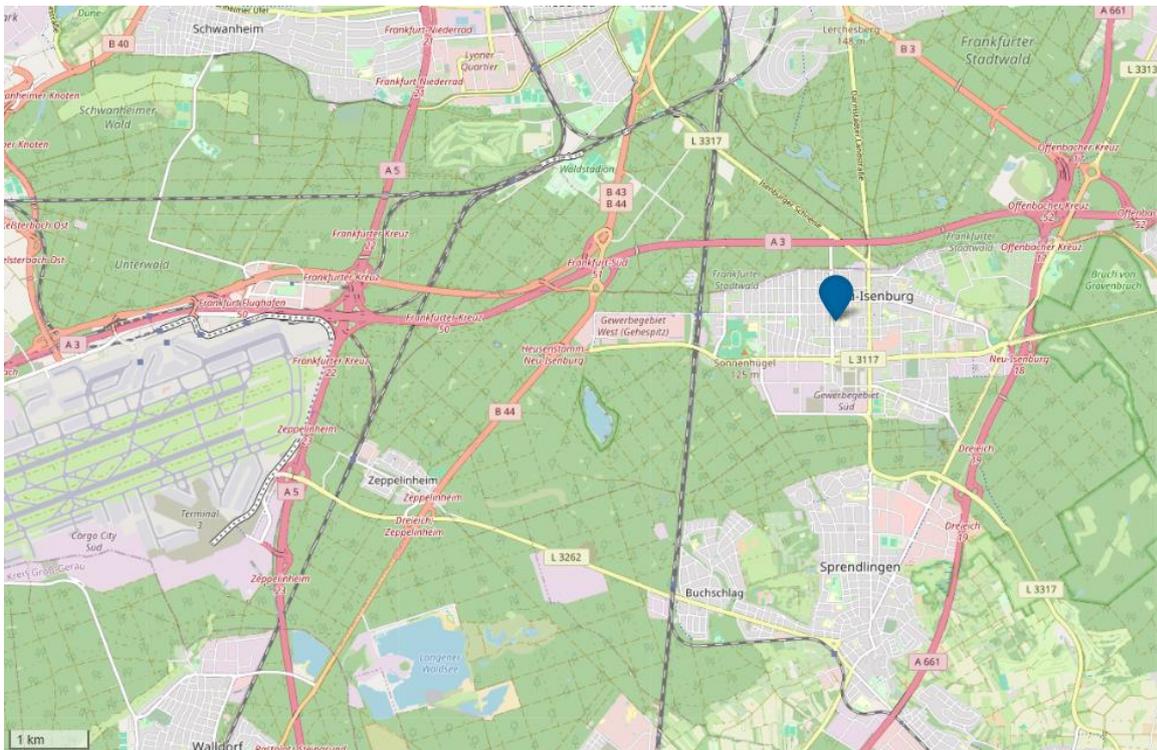


Abbildung 1: Karte mit der Position der temporären Luftmessstation. Karte: [Leaflet](#) | © [OpenStreetMap contributors](#)

Gemessene Luftschadstoffe

Ultrafeine Partikel (Partikelanzahl-Größenverteilung, Größenbereich: 10 – 500 nm),
Stickstoffoxide (NO, NO₂),
Kohlenstoffmonoxid (CO), Ozon (O₃), Schwefeldioxid (SO₂)
Feinstaub (PM_{2,5}, PM₁₀)



Zusammenfassung: Beurteilung der Luftqualität in Bezug auf ultrafeine Partikel

Im Rahmen des Sondermessprogramms „Ultrafeine Partikel“ wurden in Neu-Isenburg vom 22.08.2022 bis 28.08.2023 Messungen zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Partikelanzahl-Größenverteilung mit Hilfe eines Mobilitätspartikelgrößenspektrometers durchgeführt. Die Anzahlkonzentration der Partikel im Größenbereich von 10 – 500 nm betrug im Mittel über den gesamten Messzeitraum 7.400 Partikel pro cm^3 . Hierbei lag der überwiegende Teil der Messwerte zwischen 2.100 und 18.200 Partikeln pro cm^3 (5. – 95. Perzentile).

Um den Einfluss des Flugbetriebs auf die Partikelkonzentration abzuschätzen, wurden unterschiedliche Belastungssituationen getrennt ausgewertet. Bei westlichem Wind liegt Neu-Isenburg im Abwindbereich des Flughafens. Die Emissionen, die durch den Flugbetrieb auf dem Flughafengelände und außerhalb des Flughafengeländes auf niedrigen Anflugrouten entstehen, werden bei diesem Wind in Richtung des Stadtgebiets von Neu-Isenburg verlagert. Betrachtet man im Messzeitraum ausschließlich Zeiten, in denen Neu-Isenburg im Abwindbereich des Flughafens stand, lag die mittlere Partikelanzahlkonzentration bei ca. 10.200 Partikel pro cm^3 , wobei ca. 70 % dieser Partikel im für Emissionen aus dem Flugbetrieb typischen Größenbereich zwischen 10 – 30 nm zu finden waren. Außerhalb der Flugbetriebszeiten sowie tagsüber bei Wind aus anderen Richtungen als dem Flughafengelände ergaben sich mittlere Konzentrationen von 7.000 bis 7.200 Partikel pro cm^3 . Aufgrund der für das Rhein-Main-Gebiet typischen Strömungsverhältnisse weht der Wind häufig aus Südwest oder aus Nordost aber vergleichsweise selten direkt aus Richtung Westen. Daher steht der Standort Neu-Isenburg auch nur selten im Abwindbereich des Flughafens und damit unter dem Einfluss des Flugbetriebs. Im Messzeitraum war dies lediglich ca. 8 % der Zeit der Fall. Trotz des starken Konzentrationsanstiegs bei Wind aus Richtung des Flughafens, erhöhte sich der Mittelwert über den gesamten Zeitraum (7.400 Partikel pro cm^3) durch den Einfluss des Flugbetriebs nur um ca. 6 % gegenüber den Messungen ohne Einfluss durch den Flugbetrieb. An den Standorten Raunheim und Frankfurt-Schwanheim wirkt sich der Einfluss des Flugbetriebs dagegen deutlich stärker auf die Partikelkonzentration aus.

Mit Hilfe einer Cluster-Analyse der gemessenen gesetzlich geregelten Luftschadstoffe und der Partikelanzahl-Größenverteilung lassen sich Rückschlüsse auf die Partikelquellen und unterschiedlichen Belastungssituationen in Neu-Isenburg ziehen. Die Analyse ermöglichte eine qualitative Unterscheidung zweier Partikelquellen aus dem Flugverkehr: 1.) Bodennahe Emissionen, dies meint Emissionen aus dem Flugbetrieb und den damit verbundenen Prozessen, die am Boden und in Bodennähe auf dem Flughafengelände und in unmittelbarer Nähe des Flughafens ausgestoßen werden und 2.) Emissionen landender Flugzeuge, dies meint Emissionen, die von Flugzeugen ausgestoßen werden, die sich bei Betriebsrichtung West im Landanflug in einigen hundert Metern Höhe befinden und nördlich an Neu-Isenburg vorbeifliegen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die bodennahen Emissionen bei westlichem Wind nach Neu-Isenburg verlagert werden und dort zu besonders hohen Konzentrationswerten und einem breiten Maximum der Partikelanzahl-Größenverteilung im Größenbereich zwischen 10 – 30 nm führen. Zusätzlich trägt in Neu-Isenburg die Summe der Emissionen landender Flugzeuge, die sich auf niedrigen Flughöhen bis ca. 400 m befinden, zur Partikelkonzentration bei. Hierbei treten im Gegensatz zu den bodennahen Emissionen besonders viele kleine Partikel (< 20 nm) auf. Diese besonders kleinen Partikel werden bei Wind aus West bis Nord nach Neu-Isenburg transportiert und führen zu einem geringeren Konzentrationsanstieg verglichen mit dem der bodennahen Emissionen. Aufgrund des sehr deutlichen Maximums der Partikelanzahlkonzentration für Wind aus ca. 260° – 270° , lässt sich schließen, dass die bodennahen Emissionen der Flugzeuge die weitaus größere Rolle für die Partikelkonzentration in

Neu-Isenburg spielen als die Emissionen landender Flugzeuge. Außerdem lässt sich aus den Ergebnisse erkennen, dass die Emissionen landender Flugzeuge, die sich oberhalb ca. 400 m befinden, für die Partikelkonzentration in Neu-Isenburg keinen oder nur einen sehr geringen zusätzlichen Beitrag liefern.

Laut Luftgüteleitlinien der Weltgesundheitsorganisation (WHO) sind Stundenmittelwerte der Partikelanzahlkonzentration größer als 20.000 Partikel pro cm^3 als hohe Belastung einzustufen. Dies trifft in Neu-Isenburg auf 3 % aller Stundenmittelwerte zu. Das WHO-Kriterium für den Tagesmittelwert von 10.000 Partikel pro cm^3 wird an 22 % aller Messtage überschritten und ist damit das deutlich strengere Kriterium. Insgesamt werden diese Orientierungswerte deutlich seltener als in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim überschritten. Entsprechend ist die Belastung durch ultrafeine Partikel in Neu-Isenburg im Vergleich zu Raunheim und Frankfurt-Schwanheim deutlich seltener als hoch einzuschätzen.

Ergebnisse

Mittelwerte aller gemessenen Luftschadstoffe

Tabelle 1: Anzahlkonzentration aller Partikel im Größenbereich 10 – 500 nm (N_{10-500}), Konzentration für Stickstoffoxide (NO , NO_2), Kohlenmonoxid (CO), Ozon (O_3) und Feinstaub der Fraktionen $\text{PM}_{2,5}$ und PM_{10} als Mittelwerte über den Bezugszeitraum vom 22.08.2022 bis 28.08.2023.

Luftschadstoff	Mittelwert über den Bezugszeitraum vom 22.08.2022 bis 28.08.2023
N_{10-500} (in $1/\text{cm}^3$)	7.400
NO_2 (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	17,7
NO (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5,1
CO (in mg/m^3)	0,24
O_3 (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	47,9
SO_2 (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,8
$\text{PM}_{2,5}$ (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	9,2
PM_{10} (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	13,7

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die gemessenen Luftschadstoffkonzentrationen in Form von Mittelwerten über den gesamten Bezugszeitraum vom 22.08.2022 bis 28.08.2023. Im Folgenden beziehen sich alle Auswertungen immer auf den gesamten Messzeitraum. In diesem Zeitraum lag die mittlere Partikelanzahlkonzentration bei 7.400 Partikeln pro cm^3 . Für die weiteren gemessenen Luftschadstoffe wurden die jeweils aktuell gültigen Grenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit (laut 39. BImSchV) eingehalten. Der Mittelwert für NO_2 ($17,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ist typisch für den städtischen Hintergrund im Ballungsraum Rhein-Main und lag damit deutlich niedriger als die Werte an den drei verkehrsbezogenen Messstellen auf der Frankfurter Straße in Neu-Isenburg (Jahresmittelwert 2022/23 von 21 – $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Belastung mit Feinstaub, Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid und Ozon ist ebenfalls typisch für den städtischen Hintergrund und ordnet sich in einem ähnlichen Konzentrationsbereich ein wie andere Messstellen im städtischen Hintergrund im Rhein-Main-Gebiet. Zur weite-

ren Einordnung wird hier auf den Lufthygienischen Jahresbericht des Hessischen Landesamts für Naturschutz, Umwelt und Geologie verwiesen (siehe Anhang 3).

Windrichtungsabhängige Partikelanzahlkonzentration

Der Frankfurter Flughafen stellt in Bezug auf die Konzentration ultrafeiner Partikel für die Umgebung eine erhebliche Quelle dar. Dies geht unter anderem aus mehreren Berichten des HLNUG hervor (siehe Anhang 3).

Um den Einfluss des Flugbetriebs für den Standort Neu-Isenburg zu untersuchen, wurde die Partikelanzahlkonzentration in Abhängigkeit der Windrichtung und des Flugbetriebs ausgewertet.

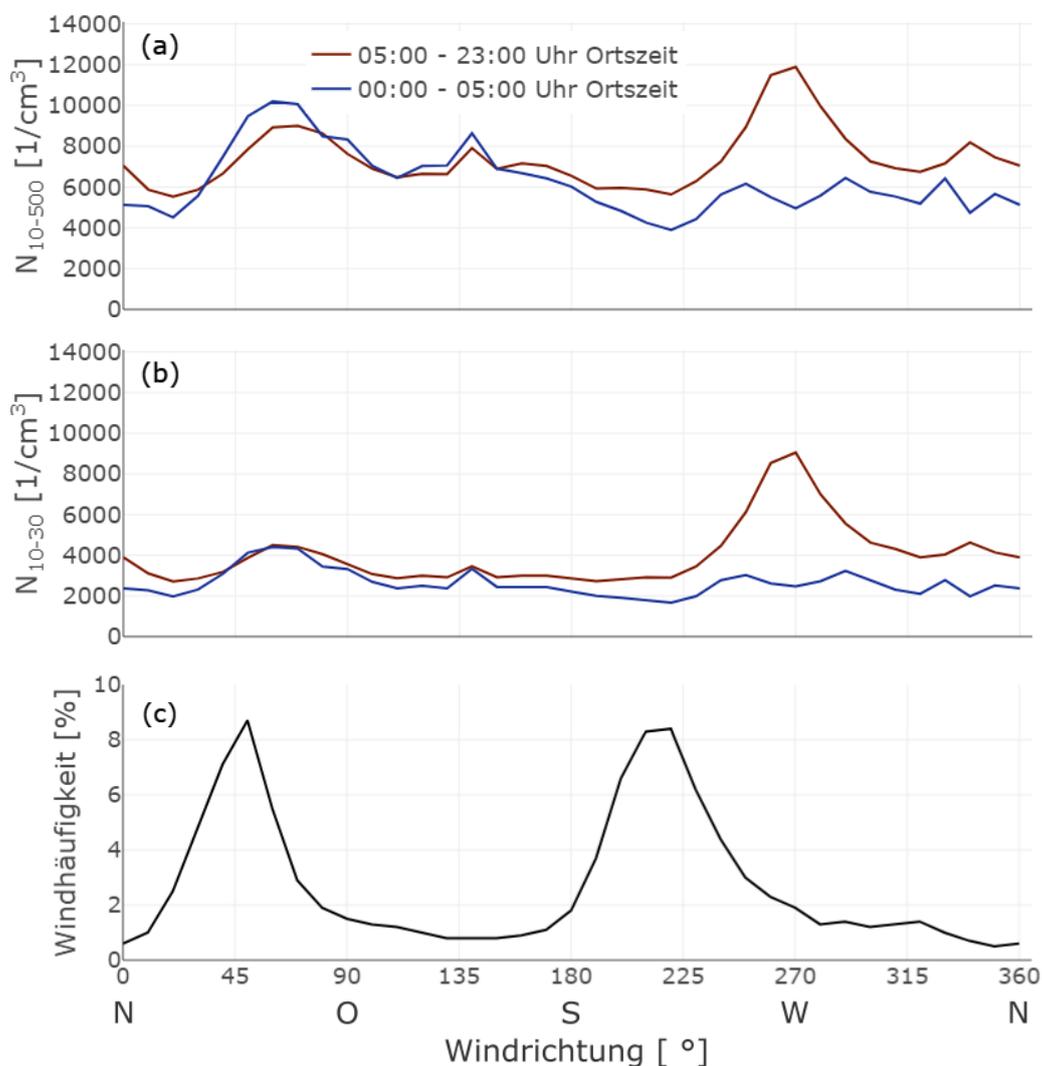


Abbildung 2: Mittlere Partikelanzahlkonzentration in Abhängigkeit der Windrichtung und Tageszeit für (a) Partikel im Größenbereich von 10 bis 500 nm (N_{10-500}) und (b) für Partikel im Größenbereich 10 bis 30 nm (N_{10-30}). Die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung im Messzeitraum ist in (c) dargestellt. Die zugrundeliegenden Winddaten stammen von der Messstation des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Frankfurt (DWD Climate Data Center, Stations-ID 1420).

In Abbildung 2 wird die mittlere Partikelanzahlkonzentration in Abhängigkeit der Windrichtung über den gesamten Messzeitraum dargestellt. Es wird zwischen Zeiten während des Flugbetriebs (5:00 –

23:00 Uhr Ortszeit) und Nachtmessungen (0:00 – 5:00 Uhr) unterschieden. Der Zeitraum von 23:00 bis 0:00 Uhr Ortszeit wird für diese Analyse nicht betrachtet.

Aus Abb. 2(a) wird ersichtlich, dass die Anzahlkonzentration für Partikel im Größenbereich von 10 bis 500 nm für weite Windrichtungsbereiche während und außerhalb der Flugbetriebszeiten ähnlich hohe Werte aufweisen, die sich zwischen 5.000 und 10.000 Partikeln pro cm^3 bewegen. Für diesen Fall ist davon auszugehen, dass die maßgeblichen Quellen nicht dem Flugbetrieb zuzuordnen sind. Bei Wind aus West zeigt sich jedoch ein verändertes Bild. Hier ist ein deutlicher Anstieg von im Mittel ca. 6.000 Partikel pro cm^3 für Messungen zwischen 0:00 und 5:00 Uhr auf über 10.000 Partikel pro cm^3 während des Flugbetriebs zu beobachten. Abbildung 2(b) zeigt die mittlere Anzahlkonzentration für Partikel aus dem für Emissionen aus dem Flugbetrieb typischen Bereich von 10 – 30 nm. Auch hier weist die Partikelkonzentration für weite Windrichtungsbereiche während und außerhalb der Flugbetriebszeiten ähnlich hohe Werte auf. Es ist jedoch ebenso bei Westwind und während des Flugbetriebs ein deutlicher Anstieg von ca. 3.000 auf über 8.000 Partikel pro cm^3 zu verzeichnen. Der Anstieg für N_{10-500} bei Westwind wird durch die besonders kleinen Partikel mit Durchmessern zwischen 10 und 30 nm dominiert und ist somit sehr wahrscheinlich den Emissionen aus dem Flugbetrieb zuzuordnen.

Dieser ausschließlich während des Flugbetriebs beobachtete, besonders deutliche Anstieg der Partikelanzahlkonzentration im Windrichtungsbereich von $245^\circ - 294^\circ$ wird im Folgenden als Grundlage für eine Abschätzung des Einflusses des Flugbetriebs auf die Gesamtbelastung in Neu-Isenburg genutzt. Die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt erläutert.

Abbildung 2(c) zeigt die mittlere Häufigkeitsverteilung der Windrichtung im gemessenen Zeitraum. Zur Charakterisierung der übergeordneten Windverhältnisse wurden hier die Winddaten der Messstation des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Frankfurt verwendet. Es wird deutlich, dass während des Messzeitraums die zwei Hauptwindrichtungen Nordost und Südwest vorherrschend waren.

Jahresmittelwerte der Partikelanzahlkonzentration in verschiedenen Belastungssituationen

Basierend auf den Auswertungen zur windrichtungsabhängigen Partikelanzahlkonzentration und den Flugbetriebszeiten werden drei grundsätzliche Belastungssituationen unterschieden: 1. Belastung unter Einfluss des Flugbetriebs (im oben genannten Windsektor); 2. Belastung ohne Einfluss des Flugbetriebs, tagsüber; 3. Belastung ohne Einfluss des Flugbetriebs, nachts. Die Definition dieser Belastungssituationen wird im Anhang 1 erläutert.

In Tab. 2 werden die mittleren Partikelanzahlkonzentrationen für unterschiedliche Belastungssituationen für Neu-Isenburg dargestellt. Zur Einordnung dieser Werte werden zusätzlich die Ergebnisse für die Messstationen in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim im gleichen Messzeitraum angegeben. Für diese beiden Standorte bezieht sich die Definition „Einfluss des Flugbetriebs“ auf den für den entsprechenden Standort definierten Windsektor (siehe Anhang 1).

In Neu-Isenburg wurde im Mittel über den gesamten Messzeitraum eine Partikelanzahlkonzentration aller Partikel mit Durchmesser von 10 bis 500 nm von 7.400 festgestellt, wobei 90 % aller gemessenen Werte zwischen etwa 2.100 und 18.200 Partikeln pro cm^3 (5. – 95. Perzentile) lagen. Gemittelt über Zeiten, in denen der Standort nicht unter Einfluss des Flugbetriebs stand, ergibt sich eine niedrigere Konzentration von 7.000 (tagsüber) und 7.200 Partikeln pro cm^3 (nachts).

Bei westlichem Wind liegt Neu-Isenburg im Abwindbereich des Flughafens. Die Emissionen durch den Flugbetrieb und der damit in Zusammenhang stehenden weiteren Prozesse auf dem Gelände und in unmittelbarer Nähe des Flughafens werden bei entsprechendem Wind in Richtung des Stadtgebiets von Neu-Isenburg verlagert. Während des Flugbetriebs und bei Wind aus Richtung Flughafengelände lag die mittlere Partikelanzahlkonzentration (10 – 500 nm) bei etwa 10.200 Partikeln pro cm³, wobei die Partikel aus dem für Emissionen aus dem Flugbetrieb typischen Partikelgrößenbereich von 10 – 30 nm hierbei den größten Anteil von etwa 70 % ausmachten. Diese Belastungssituation machte ca. 8 % des Messzeitraums aus und führte zu einer Erhöhung des Mittelwerts auf ca. 7.400 Partikel pro cm³. Bezogen auf die nächtlichen Messungen ohne Einfluss des Flugbetriebs entspricht dies einer Erhöhung um ca. 6 %. Trotz der deutlich erhöhten Partikelanzahlkonzentration unter Einfluss des Flugbetriebs ist somit aufgrund des vergleichsweise selten auftretenden Westwinds (siehe Abb. 2(c)) die Bedeutung der Emissionen aus dem Flugbetrieb für die mittlere Gesamtkonzentration in Neu-Isenburg vergleichsweise gering.

An den permanenten Messstationen in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim ist der Einfluss des Flugbetriebs deutlich größer. Unter Einfluss des Flugbetriebs ergaben sich im gleichen Messzeitraum wie in Neu-Isenburg höhere Partikelanzahlkonzentrationen von ca. 14.400 Partikeln pro cm³ in Raunheim und über 24.000 Partikeln pro cm³ in Frankfurt-Schwanheim. Diese werden jeweils ebenfalls durch Partikel im Größenbereich von 10 – 30 nm dominiert. Beide Messstationen liegen aufgrund ihrer geografischen Lage wesentlich häufiger (> 20 %) im Abwindbereich des Flughafens und der tiefen Anfluglinien, was zu einer Erhöhung der mittleren Partikelanzahlkonzentrationen von 20 % (Raunheim) bis über 40 % (Frankfurt-Schwanheim) gegenüber der nächtlichen Messungen ohne Einfluss des Flugbetriebs führt.

Tabelle 2: Mittlere Partikelanzahlkonzentration aller Partikel im Größenbereich von 10 bis 500 nm (N₁₀₋₅₀₀) und der Partikel im Größenbereich von 10 bis 30 nm (N₁₀₋₃₀) getrennt nach unterschiedlichen Belastungssituationen in Neu-Isenburg im Vergleich zu den permanenten Messstationen in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim. Es wird zwischen Tageszeiten und Messungen unter bzw. ohne Einfluss des Flugbetriebs (FB) an der jeweiligen Messstation unterschieden. Zusätzlich ist die jeweilige prozentuale Häufigkeit für Messungen unter Einfluss des Flugbetriebs (f) angegeben. Die Werte beziehen sich auf den gesamten Messzeitraum.

Messstation	alle Messungen (in 1/cm ³)		unter Einfluss FB; N (in 1/cm ³)			ohne Einfluss FB, tagsüber (in 1/cm ³)		ohne Einfluss FB, nachts (in 1/cm ³)	
	N ₁₀₋₅₀₀	N ₁₀₋₃₀	N ₁₀₋₅₀₀	N ₁₀₋₃₀	f (in %)	N ₁₀₋₅₀₀	N ₁₀₋₃₀	N ₁₀₋₅₀₀	N ₁₀₋₃₀
Neu-Isenburg	7.400	3.700	10.200	7.300	8	7.000	3.500	7.200	3.000
F - Schwanheim	11.400	7.000	24.700	19.300	22	7.900	4.200	7.100	2.500
Raunheim	9.300	4.600	14.400	8.700	21	7.800	3.700	7.700	2.800

Histogramm (Stundenmittel) und Einordnung der Konzentrationswerte nach WHO-Kriterien

Zur Einordnung der Belastungssituation werden neben der mittleren Partikelanzahlkonzentration auch kurzfristige hohe Konzentrationswerte (Stundenmittelwerte) herangezogen.

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat 2021 neue Luftgüteleitlinien veröffentlicht (siehe Anhang 3). In diesen Leitlinien werden für die gesetzlich geregelten Luftschadstoffe neue niedrigere Schwellenwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit vorgeschlagen (bspw. $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Jahresmittelwert für Stickstoffdioxid). Für ultrafeine Partikel wurden erstmals zur Einordnung der Partikelanzahlkonzentration zwei Orientierungswerte genannt. Die Konzentration wird danach als hoch eingeschätzt bei Überschreitung eines Stundenmittelwerts von $20.000 \text{ Partikel pro cm}^3$ oder bei Überschreitung eines Tagesmittelwerts von $10.000 \text{ Partikel pro cm}^3$.

Abbildung 3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Stundenmittelwerte der Anzahlkonzentration aller Partikel mit im Größenbereich von $10 - 500 \text{ nm}$. Der Anteil der Stundenmittelwerte zu den Zeiten, in denen der Standort unter dem Einfluss des Flugbetriebs steht, ist zusätzlich türkis hervorgehoben. Weiterhin ist der Orientierungswert der Weltgesundheitsorganisation für als hoch einzuschätzende Stundenmittelwerte von mehr als $20.000 \text{ Partikel pro cm}^3$ mit einem senkrechten Strich gekennzeichnet. Die Abbildung zeigt, dass der überwiegende Teil aller gemessenen Stundenmittelwerte deutlich niedriger als der Orientierungswert von $20.000 \text{ Partikel pro cm}^3$ ist und als hoch einzuschätzende Konzentrationswerte von mehr als $20.000 \text{ Partikel pro cm}^3$ nur sehr selten auftreten. Der Hauptteil der Stundenmittelwerte ist weit niedriger als $10.000 \text{ Partikel pro cm}^3$. Auch unter Einfluss des Flugbetriebs sind in Neu-Isenburg die Stundenmittelwerte überwiegend niedriger als $20.000 \text{ Partikel pro cm}^3$. Besonders hohe kurzfristige Konzentrationswerte treten sowohl unter Einfluss als auch ohne Einfluss durch den Flugbetrieb auf.

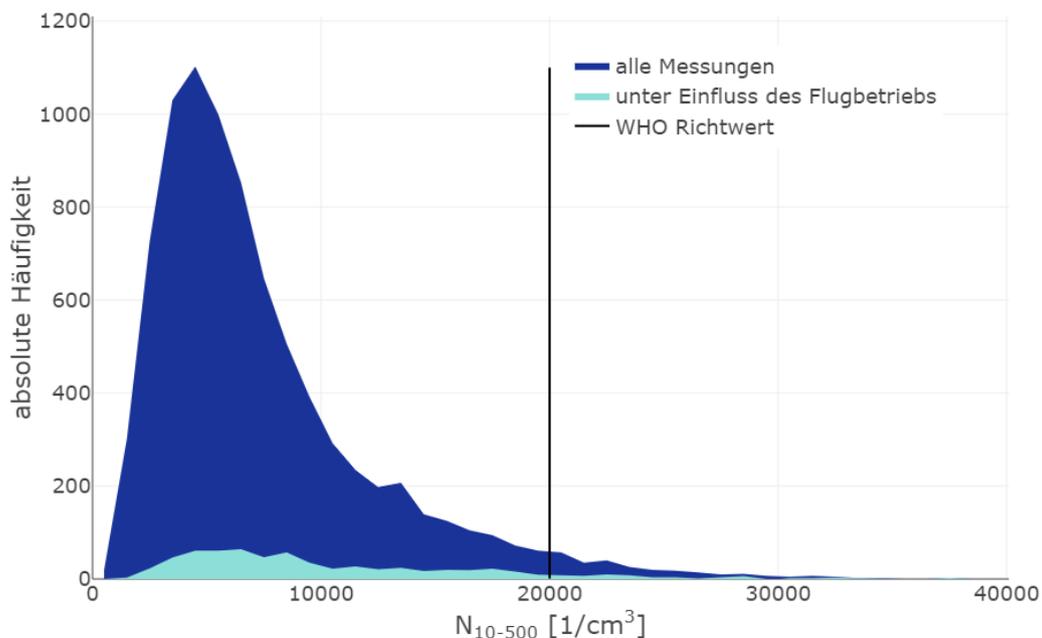


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der Stundenmittelwerte der Anzahlkonzentration aller Partikel mit im Größenbereich von $10 - 500 \text{ nm}$. In blau sind sämtliche gemessenen Werte dargestellt. Die türkis-farbenen Werte heben die Stundenmittelwerte unter Einfluss des Flugbetriebs hervor.

Tabelle 3 zeigt die Anzahl der Stundenmittelwerte, die den Schwellenwert von 20.000 Partikel pro cm³ überschreitet. In Neu-Isenburg wird der Wert insgesamt 266 mal überschritten. Das entspricht etwa 3 % aller gemessenen Stundenmittelwerte. Der Tagesmittelwert zeigt sich hier als schärferes Kriterium. Dieser überschreitet an 75 Tagen (22 % der Messtage) den WHO-Orientierungswert. Diese Orientierungswerte sind in Neu-Isenburg somit deutlich seltener überschritten als an den Messstationen in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim. Die Partikelanzahlkonzentration ist daher in Neu-Isenburg nur selten als hoch einzuschätzen. Im Gegensatz dazu ist in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim die Partikelanzahlkonzentration häufig bzw. überwiegend als hoch zu beurteilen.

Tabelle 3: Einordnung der gemessenen Anzahlkonzentration aller Partikel mit Durchmesser im Bereich von 10 – 500 nm nach den Luftqualitätsrichtlinien der Weltgesundheitsorganisation (WHO). Hierbei wird die Anzahl und relative Häufigkeit der Überschreitungen eines Stundenmittelwerts von 20.000 Partikeln pro cm³ und eines Tagesmittelwerts von 10.000 Partikeln pro cm³ angegeben.

	Überschreitungen des Stundenmittelwerts (> 20.000 Partikel pro cm ³)		Überschreitungen des Tagesmittelwerts (> 10.000 Partikel pro cm ³)	
	Anzahl der Stunden	%	Anzahl der Tage	%
Neu-Isenburg	266	3	75	22
F - Schwanheim	1361	16	176	51
Raunheim	604	7	128	37

Einfluss unterschiedlicher Quellen auf die Partikelanzahl-Größenverteilung

Die Form und die Konzentrationshöhe der Partikelanzahl-Größenverteilung kann Aufschluss über die zugrundeliegenden dominierenden Quellen der Partikel geben. Es ist beispielsweise aus den vorherigen Berichten des HLNUG aber auch aus der wissenschaftlichen Literatur bekannt, dass bei Emissionen aus dem Flugbetrieb insbesondere sehr kleine Partikel < 30 nm entstehen. Im Gegensatz dazu sind Emissionen anderer Verkehrsträger durch eine breitere und zu größeren Partikeldurchmessern verschobene Anzahlgrößenverteilung gekennzeichnet (bspw. Rivas et al., 2020). Stark gealterte Partikelpopulationen zeichnen sich wiederum durch eine sehr breite Partikelanzahl-Größenverteilung mit einem hohen Anteil an großen ultrafeinen und feinen Partikeln. Von welcher Quelle ein Messstandort beeinflusst wird, kann zeitlich sehr variabel sein und hängt beispielsweise von seiner Lage und der damit verbundenen Entfernung zu einzelnen Quellen ab aber auch von den meteorologischen Bedingungen.

Die Messungen in Neu-Isenburg weisen zeitlich sehr variable Partikelanzahl-Größenverteilungen mit unterschiedlichen Formen und Konzentrationsbereichen auf. Um einzelne, für Neu-Isenburg dominante Quelltypen aus der Partikelanzahl-Größenverteilung abzuleiten, wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Abbildung 1 zeigt, dass die Partikelanzahlkonzentration systematisch mit der Windrichtung variiert. Daher wurde in einem ersten Ansatz der Datensatz nach der vorherrschenden Windrichtung gruppiert und die mittlere Partikelanzahl-Größenverteilung bestimmt.

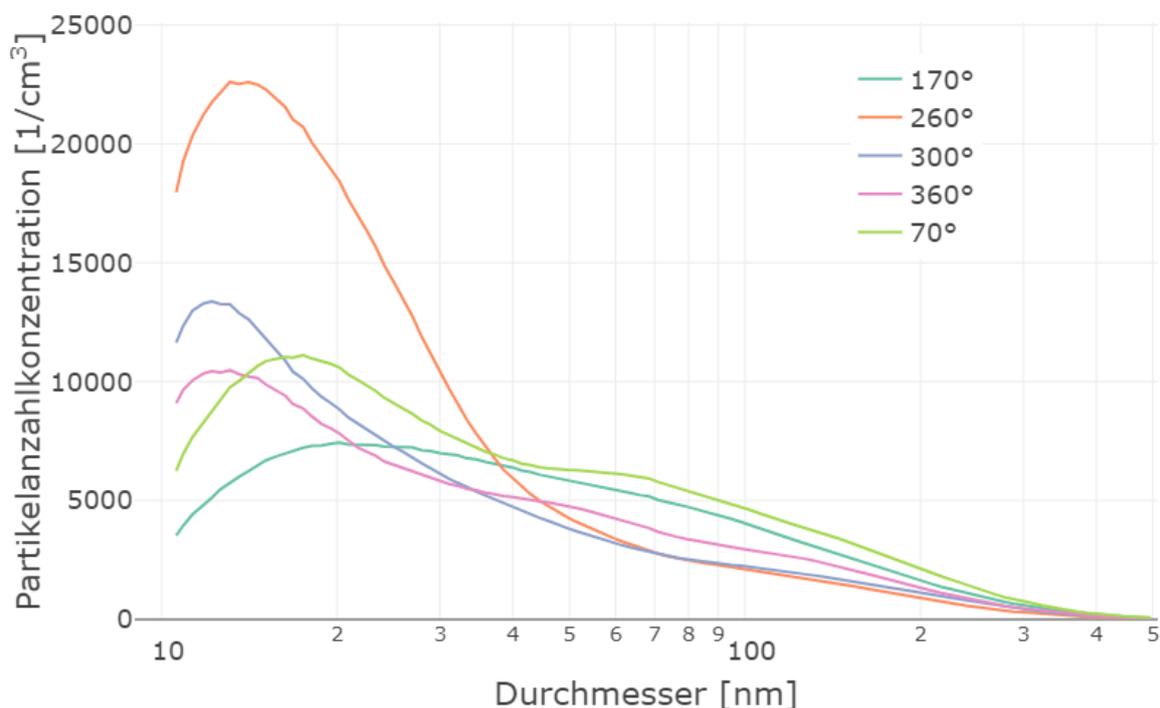


Abbildung 4: Mittlere Partikelanzahl-Größenverteilungen (in $dN / d\log D$) in Abhängigkeit der Windrichtung während der Flugbetriebszeit zwischen 5:00 und 23:00 Uhr Ortszeit. Die zugrundeliegenden Winddaten stammen von der Messstation des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Frankfurt (DWD Climate Data Center, Stations-ID 1420).

Das Ergebnis ist in Abb. 4 dargestellt. Hierbei sticht vor allem die Partikelanzahl-Größenverteilung für Wind aus 260° (West) heraus, welche ein ausgeprägtes Maximum für Partikel kleiner als 30 nm und einen starken Abfall mit sehr niedrigen Konzentrationswerten für feine Partikel aufweist. Diese Form

der Partikelanzahl-Größenverteilung ist typisch für Emissionen aus dem Flugbetrieb. Dem gegenüber steht beispielsweise eine sehr breite Partikelanzahl-Größenverteilung für Wind aus 170° (Süd), welche auf gealtertes Aerosol hindeutet. Eine weiterhin sehr auffällige Partikelanzahl-Größenverteilung wird für Wind aus 300° (Nordwest) gemessen. Diese weist ähnlich wenig feine Partikel (> 100 nm) auf, wie die Flugbetrieb-dominierte Partikelanzahl-Größenverteilung bei 260°. Es zeigt sich jedoch ein weniger stark ausgeprägtes und zu besonders kleinen Partikeln verschobenes Maximum. Mit diesem einfachen Ansatz können bereits sehr dominante und geografisch begrenzte Emissionsquellen wie beispielsweise das Flughafengelände von anderen Quellen unterschieden werden.

In einem weiteren Ansatz zur Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Quellen auf die Partikelbelastung in Neu-Isenburg wurde auf Basis der in Neu-Isenburg gemessenen Partikelanzahl-Größenverteilungen sowie weiterer Luftqualitätsmessungen eine sogenannte *k-means*-Clusteranalyse durchgeführt. Bei dieser Analyse handelt es sich um ein unüberwachtes Verfahren des maschinellen Lernens. Ziel der Clusteranalyse ist es, in dem multidimensionalen Datensatz aus verschiedenen Messwerten Gruppen mit ähnlichen Eigenschaften zu identifizieren. Realisiert wird dies mathematisch, indem die Gesamtvariabilität innerhalb der Gruppen aus ähnlichen Messwerten (Cluster) minimiert wird. Sofern sinnvoll und möglich können diese Gruppen unterschiedlichen Belastungssituationen oder sogar Quellen zugeordnet werden.

Für die hier durchgeführte Clusteranalyse wurden die Partikelanzahl-Größenverteilung im ultrafeinen Größenbereich von 10 – 100 nm sowie die Konzentration von Stickstoffdioxid (NO_2), Stickstoffmonoxid (NO), Kohlenstoffmonoxid (CO), Ozon (O_3) und Feinstaub ($\text{PM}_{2,5}$) in einem gemeinsamen Datensatz zusammengefasst. Aufgrund der sehr geringen Konzentration und Variabilität wurde SO_2 nicht mit in die Cluster-Analyse einbezogen. Da die Luftschadstoffe NO_2 , NO, CO, O_3 und $\text{PM}_{2,5}$ als Halbstundenmittelwerte vorliegen, wurden die Partikelanzahl-Größenverteilungen ebenfalls auf Halbstundenmittelwerte aggregiert. Vor der Clusteranalyse wurden die Eingangsdaten jeweils normiert sowie Ausreißer ($< 0,5$ -Perzentile oder $> 99,5$ -Perzentile) entfernt. Insgesamt fanden über 15.000 Halbstundenmittelwerte Eingang in diese Analyse. Bei der *k-means*-Clusteranalyse muss die Anzahl der Cluster vorgegeben werden. Zur Bestimmung der optimalen Anzahl der Cluster wurde die Clusteranalyse jeweils für eine vorgegebene Anzahl von 2 bis 25 Cluster durchgeführt. Für jede dieser Auswertungen wurde die Gesamtvariabilität innerhalb der Cluster betrachtet und daraus ein Optimum von 7 Clustern identifiziert, da die Gesamtvariabilität innerhalb der Cluster für mehr als 7 Cluster nur noch wenig abnimmt (Ellenbogen-Methode).

Abbildung 5 zeigt die mittleren Partikelanzahl-Größenverteilungen für die 7 gefundenen Cluster. Diese zeigen teilweise Ähnlichkeit zu den in Abb. 4 dargestellten Partikelanzahl-Größenverteilungen für verschiedene Windrichtungen. Auffällig hierbei ist die Partikelanzahl-Größenverteilung des Clusters 4, welche stark erhöhte Konzentrationen im Bereich 10 – 30 nm und ein markantes Maximum bei ca. 16 nm aufweist. Cluster 2 zeigt ebenso erhöhte Konzentrationen für sehr kleine Partikel, wobei das Maximum der Verteilung gegenüber Cluster 4 deutlich zu kleineren Partikeln verschoben ist. Für beide Cluster 2 und 4 ist ein deutlicher Abfall der Konzentration für größere Partikel zu beobachten. Die Größenverteilungen der Cluster 1 und 5 weisen hingegen eine deutlich breitere Form auf und zeigen für Partikel größer 30 nm höhere Konzentrationen als die anderen Cluster. Die mittleren Partikelanzahl-Größenverteilungen der Cluster 3, 6 und 7 zeigen insgesamt die geringsten Konzentrationen, wobei Cluster 3 und 6 im feinen Größenbereich vergleichsweise höhere Werte als Cluster 2, 4 und 7 aufweisen.

Zur Interpretation der Quellen bzw. Belastungssituationen, die wahrscheinlich einen maßgeblichen Beitrag zum jeweiligen Cluster liefern, sind die mittleren Konzentrationen der weiteren Luftschadstoffe und die mittlere Windgeschwindigkeit (Tab. 4) der einzelnen Cluster sowie die Häufigkeitsverteilungen der Cluster je nach Tageszeit und Windrichtung (Abb. 6) dargestellt.

Aus Tab. 4 und Abb. 6 geht hervor, dass die Cluster 1 und 5 mit besonders breiten Partikelanzahl-Größenverteilungen die höchsten Konzentrationen von NO_2 , NO und CO sowie erhöhte Konzentrationen von Feinstaub aufweisen. Weiterhin ist die mittlere Windgeschwindigkeit mit 1,3 – 1,7 m/s vergleichsweise niedrig. Diese Cluster treten vermehrt nachts sowie aus nordöstlichen Windrichtungen auf. Daraus lässt sich schließen, dass diese Cluster unter lufthygienisch ungünstigen Bedingungen (z.B. austauscharmen Wettersituationen) von lokalen und regionalen Emissionen aus urbanen Quellen vor allem des Kfz-Verkehrs dominiert werden.

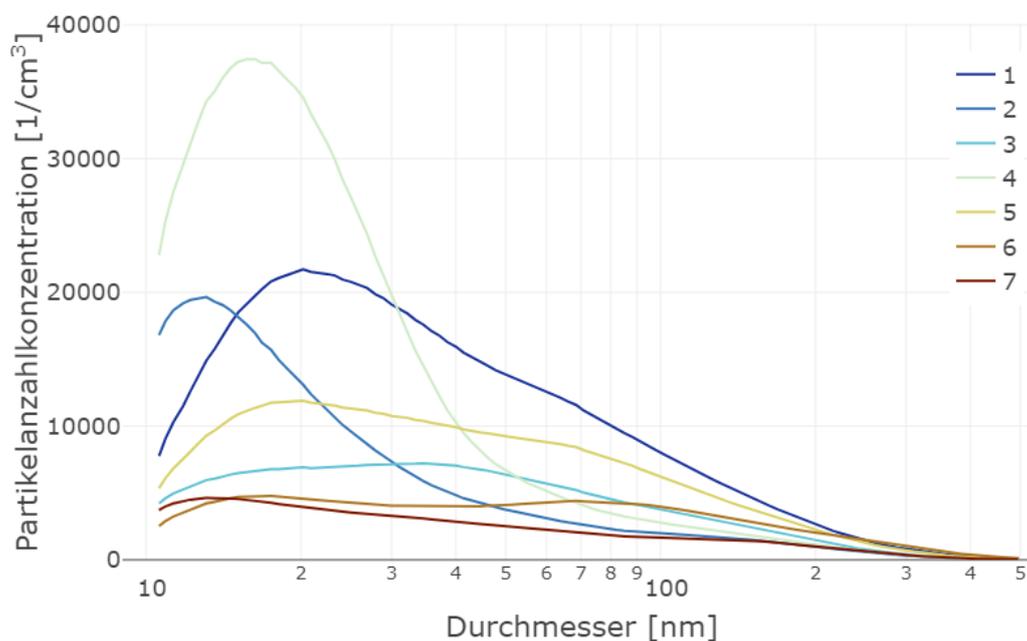


Abbildung 5: Mittlere Partikelanzahl-Größenverteilung (in $dN / d\log D$) für die unterschiedlichen Cluster der k-means-Clusteranalyse.

Die Cluster 3 und 6 zeigen sehr breite, gealterte Partikelanzahl-Größenverteilungen mit vergleichsweise niedriger Partikelanzahlkonzentration. Beide Cluster weisen niedrige NO -Werte und eine erhöhte mittlere Windgeschwindigkeit auf. Dies deutet auf den Einfluss weiter entfernter Quellen hin. Für Cluster 6 werden hierbei die höchsten mittleren Feinstaubwerte und erhöhte NO_2 -Werte detektiert. Cluster 3 zeichnet sich hingegen durch niedrigere Feinstaub-, NO und NO_2 -Werte aus.

Cluster 2, 4 und 7 zeigen sehr niedrige Werte für NO , $\text{PM}_{2,5}$ und CO , sowie niedrige bis moderate Werte für NO_2 und hohe Werte für Ozon. Diese Cluster (2, 4, 7) sind aber sehr heterogen bezüglich der Partikelanzahl. Cluster 7 weist dabei die geringste Partikelanzahl auf. Dieser Cluster wird insgesamt am häufigsten klassifiziert und ist zudem durch erhöhte Windgeschwindigkeit aus unterschiedlichen Windrichtungen mit Ausnahme des Flughafen-Bereichs gekennzeichnet. Unter diesen Bedingungen werden Schadstoffe effizient verdünnt und abtransportiert, sodass die Luftqualität mit Ausnahme der Ozonkonzentration am besten ist.

Tabelle 4: Mittlere Partikelanzahlkonzentration aller Partikel im Größenbereich von 10 bis 500 nm (N_{10-500}) und der Partikel im Größenbereich von 10 bis 30 nm (N_{10-30}), mittlere Konzentration der weiteren Luftschadstoffe und mittlere Windgeschwindigkeit jeweils für den entsprechenden Cluster. Zusätzlich ist die Auftrittshäufigkeit der Cluster angegeben.

Cluster-Nr. (Häufigkeit in %)	Partikelanzahl (in 1/cm ³)		Luftschadstoffe (in µg/m ³)				(in mg/m ³)	Windgeschwindigkeit (in m/s)
	N_{10-500}	N_{10-30}	NO ₂	NO	PM _{2,5}	O ₃	CO	
1 (5%)	14.900	8.100	46,0	25,3	13,2	10,7	0,47	1,3
2 (8%)	8.300	6.300	14,0	1,4	6,1	63,3	0,19	4,3
3 (19%)	5.800	2.800	14,3	1,1	7,3	58,8	0,19	3,1
4 (3%)	17.800	13.800	24,8	3,6	6,7	49,6	0,23	3,7
5 (11%)	9.100	4.600	32,4	11,1	11,5	18,0	0,32	1,7
6 (14%)	4.000	1.900	23,7	5,9	16,7	18,4	0,31	2,5
7 (39%)	3.000	1.800	9,0	0,7	6,3	62,6	0,18	4,6

Cluster 4 zeigt die höchste Partikelanzahl im für Emissionen aus dem Flugbetrieb typischen Bereich von 10 – 30 nm, Cluster 2 zeigt ein ausgeprägtes Maximum für sehr kleine Partikel. Beide Cluster werden insgesamt vergleichsweise selten klassifiziert, zeigen aber eine sehr auffällige Häufigkeit für westliche Windrichtungen und treten während der Flugbetriebszeiten am häufigsten auf. Trotz der hohen Partikelanzahl bleiben die Werte für NO, PM_{2,5} und CO auf vergleichsweise niedrigem Niveau, wodurch ein maßgeblicher Beitrag durch den Kfz-Verkehr unwahrscheinlich ist. Für diese Cluster werden Emissionen aus dem Flugbetrieb bei erhöhter Windgeschwindigkeit effizient nach Neu-Isenburg transportiert. Bemerkenswert ist hierbei, dass mit Cluster 2 und 4 zwei bezüglich ihrer Form unterschiedliche Partikelanzahl-Größenverteilungen voneinander getrennt klassifiziert werden. Cluster 4 weist eine breitere Verteilung und eine besonders hohe Partikelanzahlkonzentration von im Mittel etwa 17.800 Partikel pro cm³ auf. Dieser Cluster ist hauptsächlich im sehr schmalen Windrichtungsbereich von 245° - 274° vertreten. Aus der geografischen Lage deutet dies vor allem auf das Gebiet des Flughafengeländes hin. Cluster 2 zeichnet sich hingegen durch eine etwas geringere Partikelanzahlkonzentration und besonders kleine Partikel aus. Dieser Cluster tritt besonders häufig im Windrichtungsbereich von 245° - 294° auf zeigt aber zusätzlich auch für Wind aus Richtung Nordwest bis Nord eine erhöhte Häufigkeit. Die unterschiedlichen Formen der Partikelanzahl-Größenverteilungen und unterschiedlichen Windrichtungsverteilungen können auf Beiträge verschiedener Quellen des Flugbetriebs hindeuten. Cluster 4 stellt vermutlich eine Überlagerung von allen Quellen in unmittelbarer Nähe des Flughafengeländes (Gesamtbetrieb inkl. bspw. Rollen, Starten, Landen, übriger Bodenbetrieb) dar. Cluster 2 hingegen weist eine erhöhte Häufigkeit in Richtung Nordwest bis Nord auf und deutet damit geografisch nicht nur auf das Flughafengelände. In Richtung Nordwest bis Nord befinden sich aus Sicht von Neu-Isenburg bei Betriebsrichtung West die Anflugrouten auf das Parallelbahnsystem. Die Anflugroute auf die Südbahn liegt etwa 1 km entfernt von der Messstelle. Beim Anflug auf diese Landebahn befinden sich die Flugzeuge während des Vorbeiflugs im Norden von Neu-Isenburg in einer Flughöhe von etwa 400 bis 500 m. Die Ergebnisse der Cluster-Analyse deuten somit darauf hin, dass die Emissionen auf diesen niedrigen Anflugrouten von den Gesamtemissionen des Flughafens am Boden und in Bodennähe unterscheidbar sind und besonders kleine ultrafeine Partikel

umfassen. Die Häufigkeit des Clusters 2 nimmt für östliche Windrichtungen deutlich ab. Weiterhin zeigt auch die Partikelanzahlkonzentration im Größenbereich von 10 – 30 nm für östliche Windrichtungen, aus einem Bereich, in dem die Flughöhe mehr als 400 m beträgt, keine Erhöhung während des Flugbetriebs. Daher tragen diese Emissionen nur bis zu einer Flughöhe von ca. 400 m nachweisbar zur Partikelbelastung am Boden bei.

Zusammenfassend kann mit Hilfe der Cluster-Analyse qualitativ zwischen zwei Partikelquellen aus dem Flugverkehr unterschieden werden: 1.) Bodennahe Emissionen, gemeint sind hierbei Emissionen aus dem Flugbetrieb und den damit verbundenen Prozessen, die am Boden und in Bodennähe auf dem Flughafengelände und in unmittelbarer Nähe des Flughafens ausgestoßen werden und 2.) Emissionen landender Flugzeuge, dies meint die Summe der Emissionen, die von Flugzeugen ausgestoßen werden, die sich bei Betriebsrichtung West im Landanflug in einigen hundert Metern Höhe befinden und nördlich an Neu-Isenburg vorbeifliegen.

Bodennahe Emissionen werden bei westlichem Wind nach Neu-Isenburg verlagert und führen dort zu besonders hohen Konzentrationswerten und einem breiten Maximum der Partikelanzahl-Größenverteilung im Größenbereich zwischen 10 – 30 nm (Cluster 4). Zusätzlich trägt in Neu-Isenburg die Summe der Emissionen landender Flugzeuge, die sich auf niedrigen Flughöhen befinden, zur Partikelkonzentration bei. Hierbei treten im Gegensatz zu den bodennahen Emissionen besonders viele kleine Partikel (< 20 nm) auf (Cluster 2). Diese besonders kleinen Partikel werden bei Wind aus West bis Nord nach Neu-Isenburg transportiert und führen zu einem geringeren Konzentrationsanstieg verglichen mit dem der bodennahen Emissionen.

Abschließend ist festzustellen, dass die Cluster-Analyse jeder Messung genau einem Cluster zuweist. Da jedoch die reale Belastungssituation häufig aus der Überlagerung unterschiedlicher Quellen resultiert und weiterhin durch die meteorologischen Bedingungen modifiziert wird, ist zum einen die exakte Zuweisung von einzelnen Quellen sowie eine trennscharfe Quantifizierung der Beiträge der unterschiedlichen Quellen, sowie des Beitrags durch den Flugbetrieb nur eingeschränkt möglich. Aufgrund des sehr deutlichen Maximums der Partikelanzahlkonzentration für Wind aus ca. 260° – 270°, lässt sich jedoch schließen, dass die bodennahen Emissionen der Flugzeuge die weitaus größere Rolle für die Partikelkonzentration in Neu-Isenburg spielen als die Emissionen landender Flugzeuge.

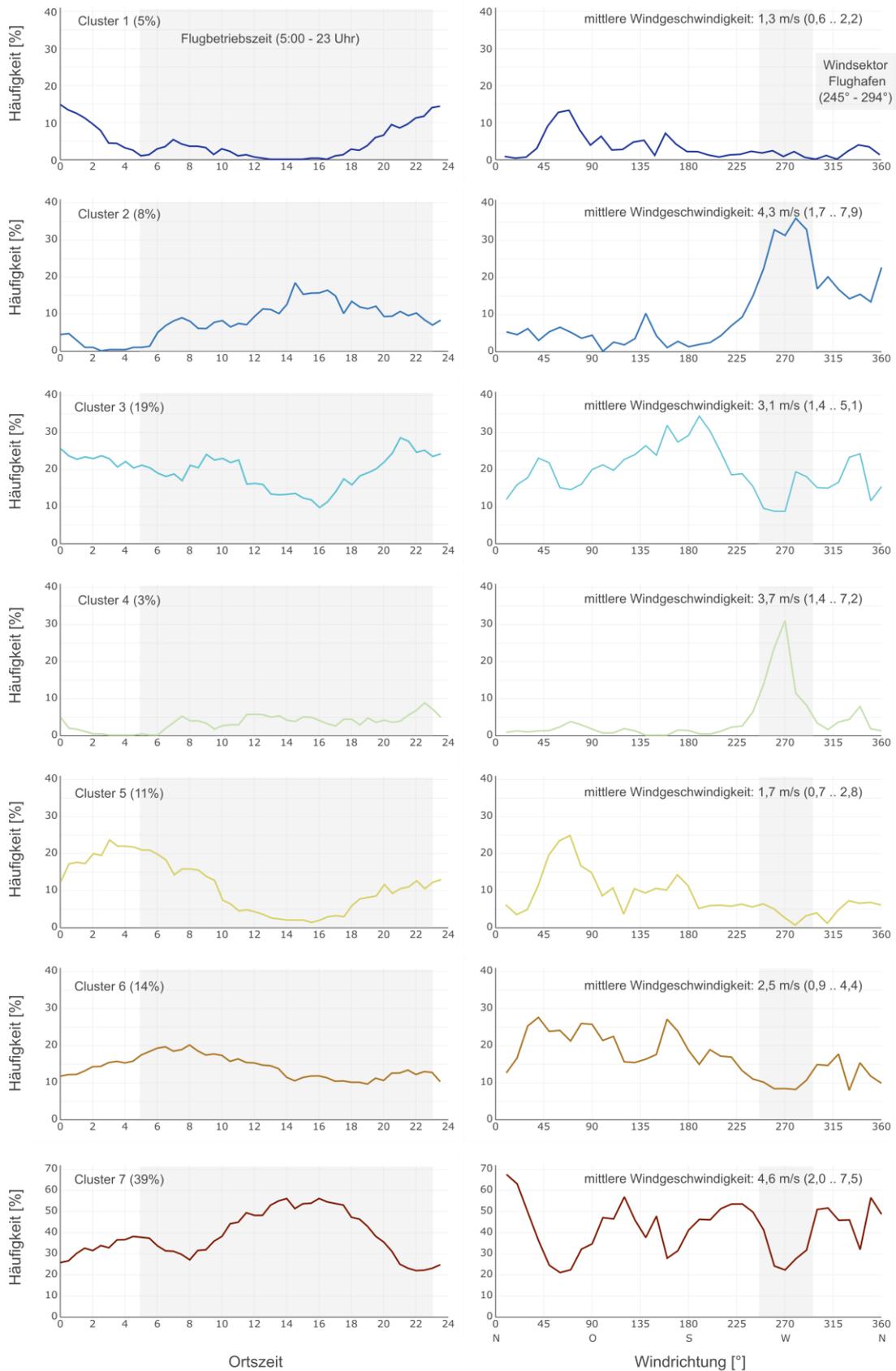


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Cluster je nach Tageszeit (links) und Windrichtung (rechts). Die grau hinterlegten Bereiche markieren die Betriebszeit des Flughafens (links) und den Windrichtungssektor Flughafen (rechts). Zusätzlich sind in jeder Grafik die gesamte Auftrittshäufigkeit des Clusters (links) sowie der Mittelwert und das 10. bzw. 90. Perzentil der Windgeschwindigkeit während des Clusters (rechts) als Zahlenwerte angegeben.

Anhang

1 Definition unterschiedlicher Belastungssituationen

1. Belastung unter Einfluss des Flugbetriebs:

Hierfür wurden alle Messwerte herangezogen, die zwischen 5 und 23 Uhr Ortszeit (Betriebszeit des Flughafens) sowie bei Wind aus Richtung des Flughafengeländes (Windsektor siehe Tab. 4) erhoben wurden. Unter diesen Bedingungen ist am Standort Neu-Isenburg ein Einfluss des Flugbetriebs zu erwarten. Die Bezeichnung „unter Einfluss des Flugbetriebs“ ist hierbei weit gefasst und schließt alle Prozesse des Flugbetriebs auf dem Flughafengelände (z.B. Start, Landung, Rollen, Abfertigung), sowie in dessen unmittelbarer Nähe (z.B. startende und landende Flugzeuge auf niedrigen Flughöhen) ein.

2. Belastung ohne Einfluss des Flugbetriebs, tagsüber:

Hierfür wurden alle Messwerte herangezogen, die zwischen 5 und 23 Uhr Ortszeit sowie bei Wind nicht aus Richtung des Flughafengeländes (d.h. außerhalb des Windsektors siehe Tab. 4) erhoben wurden. Unter diesen Bedingungen ist am Standort Neu-Isenburg kein wesentlicher Einfluss durch den Flugbetrieb zu erwarten. Die Belastung kann als standorttypischer Hintergrund während des Tages gesehen werden.

3. Belastung ohne Einfluss des Flugbetriebs, nachts:

Hierfür wurden alle Messwerte herangezogen, die zwischen 0 und 5 Uhr Ortszeit erhoben wurden¹. Für die Windrichtung wurde keine Einschränkung vorgenommen. Unter diesen Bedingungen ist am Standort Neu-Isenburg wegen des Nachtflugverbots am Frankfurter Flughafen kein Einfluss durch den Flugbetrieb zu erwarten. Die Belastung kann als standorttypischer nächtlicher Hintergrund gesehen werden.

Tabelle 4: Bezeichnungen unterschiedlicher Belastungssituationen an den Standorten Neu-Isenburg, Raunheim und Frankfurt-Schwanheim und die zugehörigen angewandten Bedingungen.

Bezeichnung	Bedingungen	
unter Einfluss des Flugbetriebs (FB)	während Flugbetriebszeit (5:00 – 23:00 Uhr Ortszeit), Windrichtung innerhalb des Windrichtungssektors:	
	Neu-Isenburg	245° bis 294°
	Schwanheim	145° bis 224°
	Raunheim	35° bis 124°
ohne Einfluss des Flugbetriebs (FB), tagsüber	während Flugbetriebszeit (5:00 – 23:00 Uhr Ortszeit), Windrichtung nicht innerhalb des Windrichtungssektors	
ohne Einfluss des Flugbetriebs (FB), nachts	außerhalb Flugbetriebszeit (0:00 – 5:00 Uhr Ortszeit), keine Einschränkung bezüglich der Windrichtung	

Für die hier verwendeten Windrichtungsbereiche wurde die geografische Lage der Messstelle in Bezug auf das gesamte Flughafengelände und tiefliegende An- und Abfluglinien in Betracht gezogen. Zusätzlich wurde die mittlere Partikelanzahlkonzentration im für Emissionen aus dem Flugbetrieb typischen Bereich von 10 – 30 nm während und in Abwesenheit des Flugbetriebs in Abhängigkeit der

¹ Die Stunde zwischen 23 Uhr und Mitternacht wurde als „Abklingzeit“ nach Betriebsschluss des Flughafens nicht in die Betrachtung einbezogen.

Windrichtung einbezogen (Abb. 2). Mit Hilfe des Vergleichs der windrichtungsabhängigen Partikelanzahlkonzentration während und in Abwesenheit des Flugbetriebs können potentiell beeinflusste Windrichtungsbereiche identifiziert werden. Die Definition von Windrichtungsbereichen ist notwendig um den Einfluss des Flugbetriebs auf die Partikelanzahlkonzentration an der betreffenden Messstelle abschätzen zu können. Zur Einschätzung der übergeordneten Windverhältnisse werden die Winddaten der Messstation des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Frankfurt (DWD Climate Data Center, Stations-ID 1420) verwendet.

2 Hintergrund zu ultrafeinen Partikeln:

Als ultrafeine Partikel (UFP) beziehungsweise Ultrafeinstaub werden alle Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 100 Nanometer (nm) bezeichnet. UFP sind damit die kleinsten festen und flüssigen Teilchen in unserer Luft. Diese besonders kleinen Feinstaubpartikel stellen ein potentielles gesundheitliches Risiko dar. Anders als größere Feinstaubpartikel können sie aufgrund ihrer geringen Größe sehr tief in die Lunge eindringen und in den Blutkreislauf gelangen.

Die Überwachung der Konzentration ultrafeiner Partikel ist derzeit nicht gesetzlich vorgeschrieben und es existieren keine gesetzlichen Grenz- oder Zielwerte, die eingehalten werden müssen. Dennoch empfiehlt die Weltgesundheitsorganisation (WHO) die Erfassung der UFP-Konzentration, nicht zuletzt um damit die Untersuchung möglicher gesundheitlicher Auswirkungen zu erlauben.

Die Bestimmung der Partikelanzahl-Größenverteilung mit Hilfe eines Mobilitätspartikelgrößenpektrometers im Größenbereich von 10 – 500 nm (Model TSI 3938) erfolgt auf Grundlage der CEN/TS 17434:2020. Die hier dargestellten Ergebnisse umfassen deshalb sowohl ultrafeine als auch größere Partikel. Es wird daher der Begriff Partikelanzahlkonzentration genutzt. Da die Partikelkonzentration meist durch die Anzahl ultrafeiner Partikel dominiert wird, werden die Begriffe UFP-Konzentration und Partikelkonzentration häufig synonym verwendet.

Das Sondermessprogramm „Ultrafeine Partikel“ des HLNUG wird durch das Forum Flughafen und Region (FFR) finanziell unterstützt.

3 Weitere Informationen:

HLNUG Sondermessprogramm UFP: <https://www.hlnug.de/?id=14862>

HLNUG Messnetzberichte:

<https://www.hlnug.de/themen/luft/luftqualitaet/luftmessnetz/messnetzberichte>

aktuelle Messwerte des HLNUG: <https://www.hlnug.de/messwerte/datenportal>

Studie des Forum Flughafen und Region: <https://www.ultrafeinstaub-studie.de/>

WHO Air quality guidelines: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

Rivas et al., 2020: Source apportionment of particle number size distribution in urban background and traffic stations in four European cities, Environment International, Volume 135, 2020, 105345, ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105345>

Gesetzliche Grundlagen, 39. BImSchV: https://www.gesetze-im-internet.de/bimsv_39/