



FACHBEREICH 11 GEOWISSENSCHAFTEN
INSTITUT FÜR ATMOSPHERE UND UMWELT

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen
Grades Master of Science (M.Sc.)

Einfluss von Flugzeugemissionen auf die bodennahe Konzentration von Ultrafeinstaubpartikeln

Jannis Freund
Studiengang: M. Sc. Meteorologie
Matrikelnummer: 4870058

Frankfurt am Main
13. März 2019

Betreuer: Prof. Dr. J. Curtius und Dr. D. Rose

Gesetzt am 13. März 2019 mit L^AT_EX.

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe. Ich habe die Regeln der wissenschaftlichen Praxis eingehalten.

Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen.

Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Frankfurt am Main, den 13. März 2019,

(Jannis Freund)

Zusammenfassung

Ultrafeinstaubpartikel, im Folgenden UFP genannt, sind eine Untergruppe der Aerosole mit einem Durchmesser kleiner als 100 nm. Als Teilmenge des Feinstaubes können UFP schädlich für die menschliche Gesundheit sein und rücken deshalb zunehmend in den Fokus der Forschung. Einige Studien konnten in den letzten Jahren stark erhöhte UFP-Konzentrationen in der Umgebung von Flughäfen beobachten. Unter anderem wurden Flugzeugturbinen als Hauptquellen identifiziert. Es ist nicht endgültig geklärt, wo exakt die meisten Emissionen im Flughafenbetrieb entstehen. Als Thesen stehen der Rollverkehr und die Abwicklung an den Flughafengates im Raum. Vermutet wird, dass diese Emissionen horizontal transportiert werden und als Immissionen in Wohngebieten messbar sind.

Landeanflüge wurden in der Öffentlichkeit ebenfalls für erhöhte bodennahe UFP-Belastungen in der weiteren Umgebung des Frankfurter Flughafens verantwortlich gemacht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden mit einem tragbaren Partikelzähler Messungen durchgeführt, um dieser Behauptung nachzugehen. Die Messdauer betrug jeweils maximal drei Stunden und es wurde an sechs Standorten, in bis zu sechs Kilometern Entfernung vom Flughafen Frankfurt, gemessen.

In der näheren Umgebung des Flughafens tragen Emissionen von Überflügen zu einer erhöhten Hintergrundkonzentration bei; dieser Beitrag kann aber mit den durchgeführten Messungen nur schwer quantifiziert werden. In einem Fall wurde eine Verdopplung der Hintergrundkonzentration berechnet; für zuverlässige Aussagen ist ein wesentlich größerer Datensatz notwendig.

Eine stets gültige Korrelation zwischen Überflügen und erhöhten Konzentrationen konnte eindeutig ausgeschlossen werden. Für weniger als ein Fünftel der Konzentrationsanstiege war eine Zuordnung zu Überflugereignissen möglich, und bei nur einer Messung war die Kausalität eindeutig. Für ca. ein Drittel der gezählten Überflüge konnte ein Einfluss auf die UFP-Konzentration in Form eines starken Anstieges definitiv ausgeschlossen werden. Die Anzahl der deutlichen UFP-Anstiege ist meistens kleiner als die Hälfte der Anzahl der gezählten Überflüge.

Mit zunehmender Flughöhe sind UFP-Anstiege durch Überflugereignisse schwer nachweisbar. Die Wetterbedingungen und die Windrichtung wurden in mehreren Fällen als dominierender Faktor der UFP-Konzentration identifiziert. Überflugereignisse können in unmittelbarer Nähe die UFP-Konzentration dominieren; dieser Effekt verringert sich mit zunehmender Entfernung.

Es wurde mit nur einem Partikelzähler gearbeitet und es wurden keine Winddaten vor Ort gemessen. Dies und weitere Probleme schränken die gefundenen Erkenntnisse ein, weshalb weitere ausführliche Forschung ausdrücklich zu empfehlen ist.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	iii
Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Aerosol und Feinstaub	1
1.2 Flughäfen und Flugzeuge als Emittenten	5
1.3 Zielsetzung	9
2 Methodik	11
2.1 Flugverkehr und Auswahl der Messorte	11
2.1.1 Landing-Take-Off-Zyklus	11
2.1.2 Luftfahrzeuggruppen	12
2.1.3 Flughafen Frankfurt und Betriebsrichtungen	12
2.1.4 Auswahl der Messorte	14
2.2 Messgeräte und Vergleich	21
2.2.1 Tragbare CPCs	22
2.2.2 SMPS	23
2.2.3 Vergleich CPCs	24
2.3 Durchführung der Messungen	28
2.3.1 Überflug-Log	29
2.3.2 Winddaten	29
2.4 Berechnungen und Theorie	29
2.4.1 Nebengrößen	30
2.4.2 Überflüge ohne folgendes Maximum (KFM)	31
2.4.3 Identifikation Lokaler Maxima (IM)	32
2.4.4 Zuordnung Lokaler Maxima (IMFZ)	34
3 Messungen	35
3.1 Experiment 1: Im Taubengrund A	35
3.2 Experiment 2: Waldsee Start	37
3.3 Experiment 3: Waldsee Landung	40
3.4 Experiment 4: DFS-Turm	43
3.5 Experiment 5: Im Taubengrund B	47
3.6 Experiment 6: Kapelle	50
3.7 Experiment 7: Flörsheimer Feld	54
3.8 Experiment 8: Isenburger Schneise	58

4 Diskussion	63
4.1 Zusammenfassung der Messungen	63
4.2 Thesendiskussion	64
4.2.1 Flughafen als UFP-Quelle	64
4.2.2 Überflüge als UFP-Quelle	65
4.2.3 Randbedingungen für Nachweise	66
4.3 Schwächen	67
4.4 Einordnung und Schlussfolgerung	70
4.5 Ausblick und Maßnahmen	71
Literaturverzeichnis	73
Abbildungsverzeichnis	79
Tabellenverzeichnis	83

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Abkürzung
BR	Betriebsrichtung
CPC	Particle Counter (Partikelzähler)
DFS	Deutsche Flugsicherung
DMA	Differenzieller Mobilitätsanalysator
DWD	Deutscher Wetterdienst
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
HEPA	High Efficiency Particulate Air filter
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
ICAO	International Civil Aviation Organization
IM	Identifizierte Maxima
IMFZ	Identifizierte Maxima + Flugzeug
KFM	Kein folgendes Maximum
LTO	Landing-Takeoff-Zyklus
PM	Particulate Matter
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
UBA	Umweltbundesamt
UFP	Ultrafeinstaubpartikel

1 Einleitung

Der moderne Lebensstil unserer Gesellschaft, geprägt von Globalisierung und neuen Technologien, hat zu erheblichen Belastungen von Klima und Umwelt geführt. Ein wichtiges Thema, speziell in Bezug auf die menschliche Gesundheit, ist hier die lokale Belastung mit *Feinstaub*, insbesondere in dicht bevölkerten Regionen. Deshalb ist Feinstaub seit vielen Jahren ein Diskussionsthema, sowohl in der Öffentlichkeit, als auch in der wissenschaftlichen Gemeinde [World Health Organization, 2006]. Auswirkungen des Feinstaubes auf Klima und menschliche Gesundheit sind ausführlich beschrieben, so zum Beispiel durch [Heal et al., 2012] und [Beelen et al., 2014].

1.1 Aerosol und Feinstaub

Aerosole sind definiert als eine Suspension aus festen und flüssigen, schwebenden Partikeln in einem Gas. Aerosole werden von verschiedenen natürlichen und anthropogenen Prozessen direkt emittiert (Primäraerosol) oder entstehen durch chemische Prozesse (Sekundäraerosol). Aerosole treten in Größenordnungen von wenigen nm bis viele μm auf [Seinfeld and Pandis, 2016]. Eine Teilmenge von Aerosol ist der wissenschaftlich nicht exakt definierte Feinstaub, der im Deutschen als Synonym für den Begriff PM_{10} aus dem 1987 erschienenen *National Air Quality Standard for Particulate Matter (PM-Standard)* der US-amerikanischen *Environmental Protection Agency (EPA)* verwendet wird. Im Sprachgebrauch wird Feinstaub oft in Kongruenz mit „schlechtem“ und gesundheitsschädlichem Anteil von Aerosolen verwendet, obwohl Feinstaub messtechnisch nur über die Partikelgröße definiert ist und nicht zwischen schädlichen und nicht schädlichen Partikeln unterschieden wird.

Der Begriff Feinstaub wird vom Umweltbundesamt (UBA) folgendermaßen erläutert: „*Feinstaub besteht aus einem komplexen Gemisch fester und flüssiger Partikel und wird abhängig von deren Größe in unterschiedliche Fraktionen eingeteilt. Unterschieden werden PM_{10} (PM, particulate matter) mit einem maximalen Durchmesser von 10 Mikrometern (μm), $PM_{2,5}$ (mit einem maximalen Durchmesser von 2,5 μm) und ultrafeine Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 0,1 μm .*“ [Umweltbundesamt, 2019] Eine schematische Darstellung der verschiedenen Stau-

barten ist in Abb. 1.1 zu sehen.

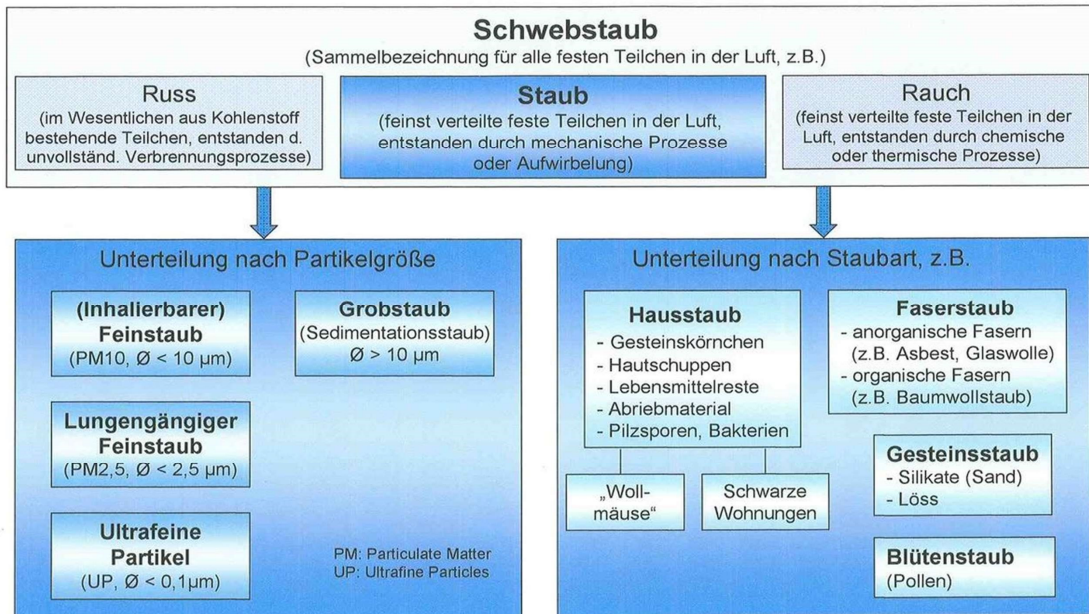


Abb. 1.1. Definition und Einteilung von Stäuben nach Partikelgröße und Staubart ©[Wissen, 2005].

Obwohl diese Definition weit verbreitet ist, ist sie lediglich eine Vereinfachung eines komplizierteren Sachverhalts. Eine messtechnisch korrekte Definition von Feinstaub liefert die DIN EN 481 [DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1993]. In dieser werden PM₁₀ als thorakale/inhalierbare luftgetragene Partikel definiert, von denen 50 % kleiner als 10 µm sind. Die Funktionsweise des Atemtrakts des menschlichen Körpers wird mit einer definierten Abscheidungsfunktion nachempfunden, wie in Abb. 1.2 als thorakale Konvention zu sehen ist. Diese Funktion hängt wiederum von der einatembaren Fraktion der gemessenen Partikel ab. Mit der gleichen Methodik wird PM 2,5 als alveolengängiger Feinstaub definiert.

Nach Bekanntwerden der schädlichen Einflüsse von einer Teilmenge des Feinstaubes und anderen Schadstoffen auf Mensch und Umwelt wurden in Anlehnung an das Dokument der Amerikanischen EPA europaweit Grenzwerte definiert, sowie ver-

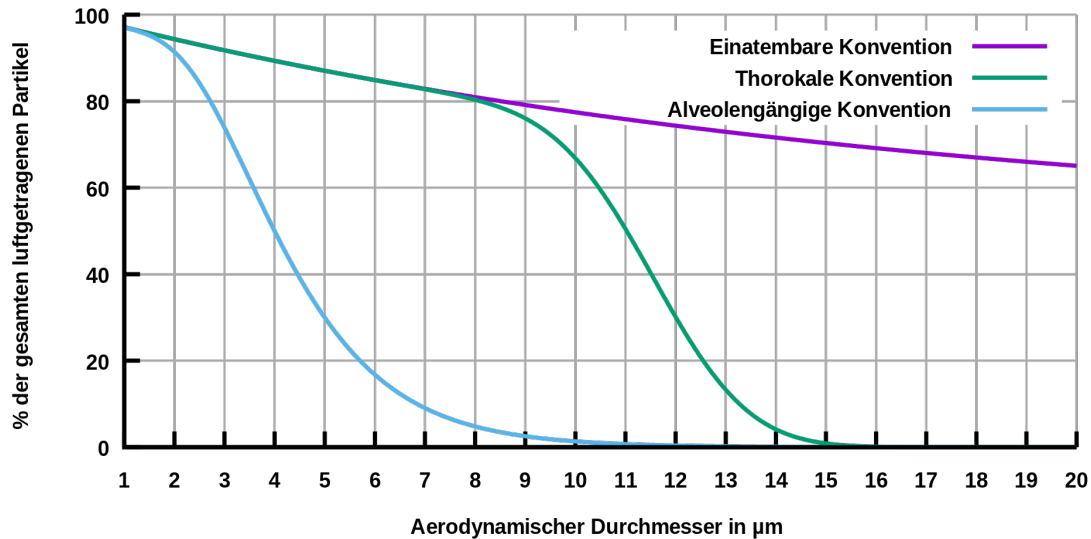


Abb. 1.2. Konventionswerte für einatembare Fraktion, thorakale Fraktion und alveolengängige Fraktion als Funktion des aerodynamischen Durchmessers gemäß DIN EN 481.

bindliche Regeln aufgestellt, um die Einhaltung dieser Grenzwerte zu garantieren [Europäische Union, 2008]. Auf dieser Grundlage wurde ein flächendeckendes Feinstaubmessnetz eingeführt, welches die weitere Erforschung von Feinstaub und dessen Wirkung auf Umwelt und Gesundheit stark förderte.

Eine Teilmenge des Feinstaubs ist der *Ultrafeinstaub*, auch *Ultrafeinstaubpartikel (UFP)* genannt. Diese Partikel rücken zunehmend in den Forschungsfokus. Meist werden sie als Partikel kleiner als $0,1 \mu\text{m}$ definiert; diese Grenzgröße ist jedoch noch umstritten. Eine Expertenkommission aus den USA argumentiert aus wissenschaftlichen Gründen für einen Wert zwischen $0,2$ bis $0,5 \mu\text{m}$ [Baldauf et al., 2016]. UFP stammen aus anthropogenen sowie natürlichen Quellen und haben eine große Relevanz in verschiedenen Prozessen der Atmosphäre und Biologie. Sie sind meist zeitlich, sowie örtlich, hoch variabel und schwer von anderen Schadstoffen zu trennen [Baldauf et al., 2016]. Auch Gesundheitsschäden durch UFP sind bereits nachgewie-

sen [Chen et al., 2016].

Als Teilmenge des Feinstaubes sind UFP in den gesetzlichen Regelungen zwar einbezogen, aber PM_{10} und $PM_{2,5}$ werden als Massenkonzentration gemessen. Diese Art der Messung eignet sich nicht für UFP, da die Größe und Oberfläche wichtigere Eigenschaften als die Masse sind. In Abb. 1.3 ist eine typische Partikelverteilung logarithmisch und normalisiert nach Anzahlkonzentration, Oberfläche und Masse aufgetragen. Außerdem sind die Grenzen von Nanopartikeln (50 nm), UFP (100 nm), $PM_{0,5}$, $PM_{2,5}$, PM_{10} sowie die verschiedenen Partikelmoden eingezeichnet.

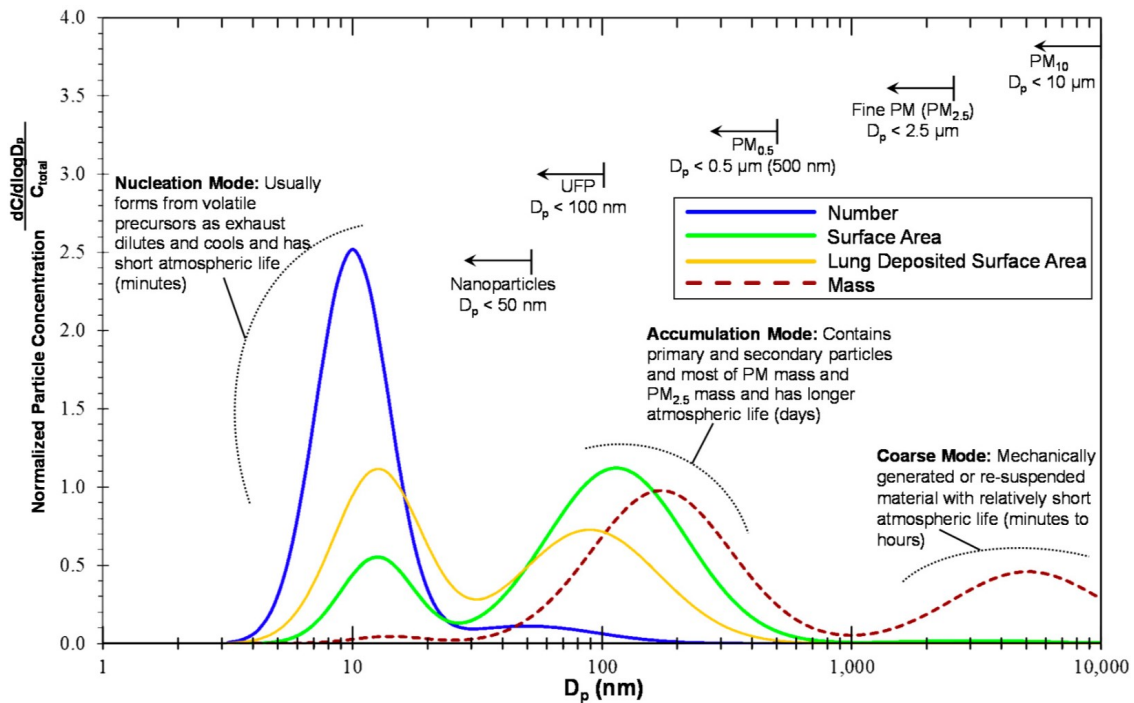


Abb. 1.3. Trimodale Partikelgrößenverteilungen mit verschiedenen Metriken (Anzahl, Oberfläche, Lungendeposition und Masse) von [Baldauf et al., 2016]. D_p ist der Partikeldurchmesser.

Es zeigt sich deutlich, dass die Fraktion der kleinen Partikel < 100 nm einen geringeren Beitrag zur Masse leistet, als größere Partikel. Gleichzeitig sind im Größenbereich der kleinen Partikel Oberfläche, Anzahl und (im medizinischen Kontext) die Lungendeposition von großer Bedeutung. Während ein Grenzwert auf Basis der Massenkonzentration für diverse Anwendungen berechtigt ist, eignet er sich nicht optimal

dazu, eine Belastung durch UFP abzubilden. Als bessere Metrik wird deshalb in der Forschung der UFP im Allgemeinen die *Partikelanzahlkonzentration* verwendet.

1.2 Flughäfen und Flugzeuge als Emittenten

In Deutschland sind die größten Quellen für anthropogen verursachten Feinstaub der Verkehr, sowie Industrie und Landwirtschaft. Flughäfen wurde in Folge des Aufbaus des deutschland- und europaweiten Messnetzes als eine von vielen Schadstoffquellen identifiziert [Gezondheidsraad Health Council of the Netherlands, 1999]. In der urban geprägten Umgebung des Rhein-Main-Gebietes stach der Flughafen bislang nicht als Extremquelle hervor [Rose and Jacobi, 2018].

Bisher ist die lokale Verteilung von UFP auf globalen Skalen noch nicht ausreichend erforscht. Es konnte aber festgestellt werden, dass stark erhöhte Partikelkonzentrationen in der Umgebung von Flughäfen, detektierbar sind. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn der Wind aus Richtung der Flughäfen weht [Hudda et al., 2014].

In verschiedenen Studien wurden Flughäfen als wahrscheinlichste und signifikante Quelle von UFP identifiziert. 2014 veröffentlichte [Hudda et al., 2014] eine Studie der Umgebung des Flughafens Los Angeles. In Abb. 1.4 ist die erhöhte Partikelanzahl in der Abwindfahne des Flughafens von Los Angeles deutlich zu erkennen. Das Maximum der Partikelanzahl verschiebt sich deutlich mit der Windrichtung und deutet auf den Flughafen als Quelle hin.

In der Studie wird weiterhin vermutet, dass Partikelemissionen von Flughäfen bislang stark unterschätzt wurden. Die Datenlage verbleibt aufgrund mangelnder Forschung unzureichend und die Autoren fordern zu weiterer Forschung auf [Hudda et al., 2014]. Die Tatsache, dass das Thema Flughafen/Flugverkehr Emissionen auch nicht im Review des UFP-Workshop 2015 der EPA der USA [Baldauf et al., 2016] auftaucht, ist ein Indikator dafür, dass das Thema noch nicht im Fokus liegt.

Da viele Großstädte über einen Flughafen in unmittelbarer Nähe verfügen, wären überproportional viele Menschen diesen Partikelkonzentrationen ausgesetzt.

In der Folge wurde von [Keuken et al., 2015] eine Studie veröffentlicht, die ebenfalls eine erhöhte UFP-Konzentration aus Richtung des Flughafens Schiphol in Amsterdam nachweisen konnte.

Abb. 1.5 zeigt den Flughafen Schiphol bei Amsterdam und eine östlich gelegene Messstation. Tagsüber sind deutlich erhöhte Partikelanzahlen für Winde aus Richtung des

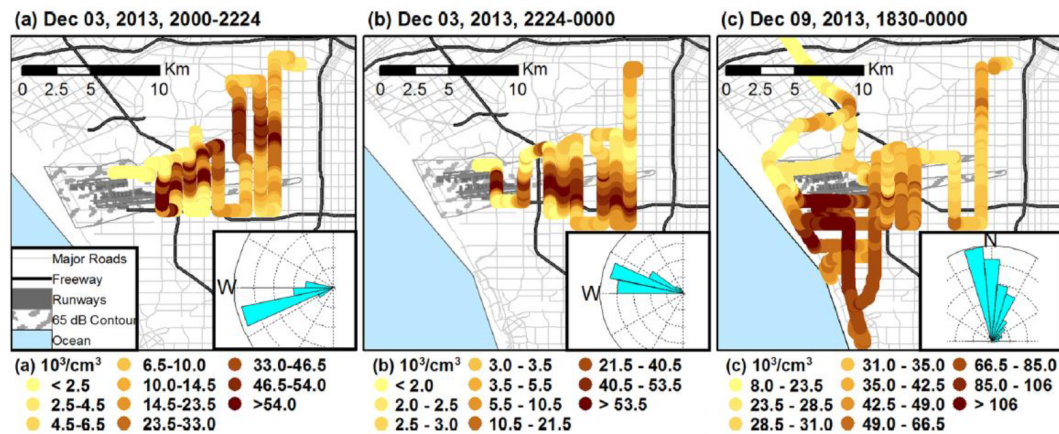


Abb. 1.4. Partikelanzahlverteilungen am Flughafen von Los Angeles (USA) von [Hudda et al., 2014]. In der Windfahne des Flughafens sind erhöhte Konzentrationen zu sehen.

Flughafens zu sehen. Nachts sind die Werte aus allen Richtungen sehr niedrig. Die EC^1 -Konzentration tendiert zu niedrigeren Werten aus Richtung des Flughafens.

Zu Zeiten, in denen der Wind tagsüber aus Richtung des Flughafens wehte, ermittelte [Keuken et al., 2015] ein signifikantes Maximum der Partikelanzahl bei einer Größe zwischen 20 bis 30 nm. Zu anderen Zeiten und Windrichtungen wurden weniger Partikel gemessen und das Maximum war zu größeren Partikeldurchmessern verschoben. Als Quelle der UFP wurden startende, landende und wartende Flugzeuge identifiziert. [Keuken et al., 2015] betont die Notwendigkeit weiterer Forschung bezüglich UFP und deren Einfluss auf Personen.

Die Ergebnisse der Studie am Flughafen Schiphol konnten bei den zwei Messstationen des *Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG)* in der unmittelbaren Umgebung des Flughafen Frankfurts weitgehend reproduziert werden. Die Windrichtungsabhängigkeit und Partikelgrößenverteilung zu verschiedenen Tageszeiten und Wetterlagen sind ähnlich denen des Flughafens Schiphol. Die Windrosen der Stationen Raunheim und Schwanheim sind in Abb. 1.6 zu sehen. Die linke Abbildung ist um die Station Raunheim im Osten des Flughafengeländes zentriert. Die rechte Abbildung ist um die Station Schwanheim im Norden des Flughafengeländes zentriert. Beide Abbildungen weisen auf den Flughafen als Quelle hin [Rose and Jacobi, 2018].

¹EC = elementarer Kohlenstoff. Dieser wurde in [Keuken et al., 2015] nicht direkt gemessen sondern aus BC = Schwarzer Kohlenstoff Messungen errechnet. Weitere Erläuterung zu EC und BC: [Petzold et al., 2013]

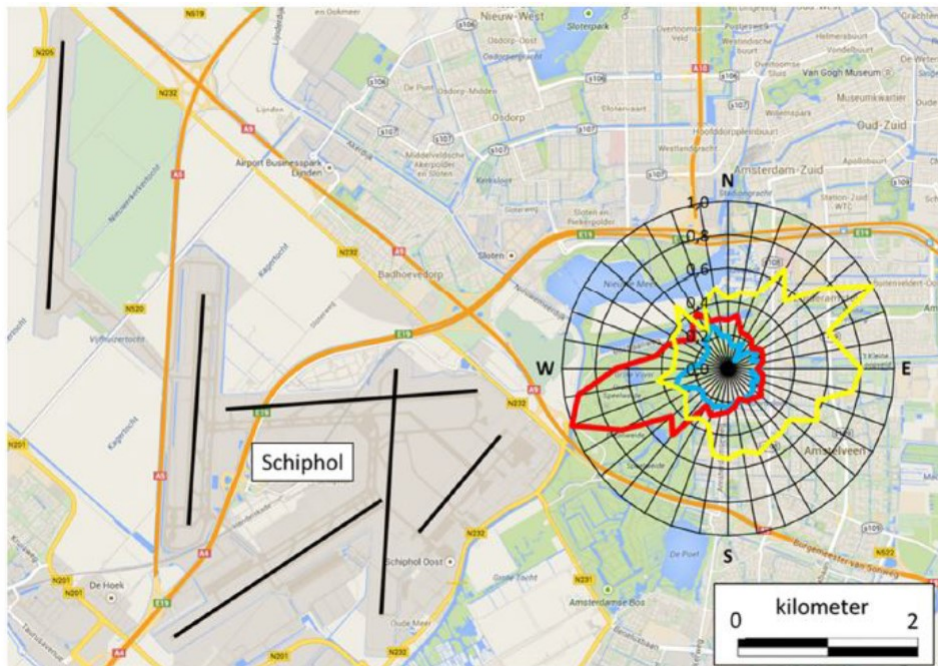


Abb. 1.5. Normalisierte Belastungsrose von elementarem Kohlenstoff (EC) und Partikelanzahl (PNC) bei der Messstation Adamse Bos von [Keuken et al., 2015]: EC alle Zeiten in gelb, PNC am Tag in rot und Nachtstunden in blau ©Google Maps. PNC aus Richtung des Flughafens während der Tagstunden sind deutlich zu erkennen.

Als Ursprung von stark erhöhten UFP-Konzentrationen wurden Triebwerke und Hilfstriebwerke als Emittenten identifiziert [Stacey, 2019], [WESTERDAHL et al., 2008], [ACI Europe, 2018]. Die *International Civil Aviation Organization (ICAO)* hat für leistungsstarke Triebwerke, wie sie im öffentlichen Luftverkehr meist verwendet werden, Zulassungsbedingungen für Schadstoffemissionen, namentlich Ruß, Stickoxide, Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid erlassen [ICAO, 2008]. Turbinenabgasmessungen sind für diese Schadstoffe standardisiert, aber nicht für UFP. Die exakte Messung von UFP aus Triebwerken bringt viele technische Schwierigkeiten mit sich, wurde jedoch in einigen Studien differenziert untersucht [Lobo et al., 2015], [Yu et al., 2017], [Durdina et al., 2014], [Abegglen et al., 2015], [Durdina et al., 2014]. Die Verbrennung in Turbinen ist hocheffizient, die genauen Abgase variieren aber stark nach Schubeinstellung, Modell und Treibstoff [Stacey, 2019]. Unterschiedliche Methodiken, Messgeräte und Messorte führen zu variierenden Ergebnissen [Stacey, 2019].

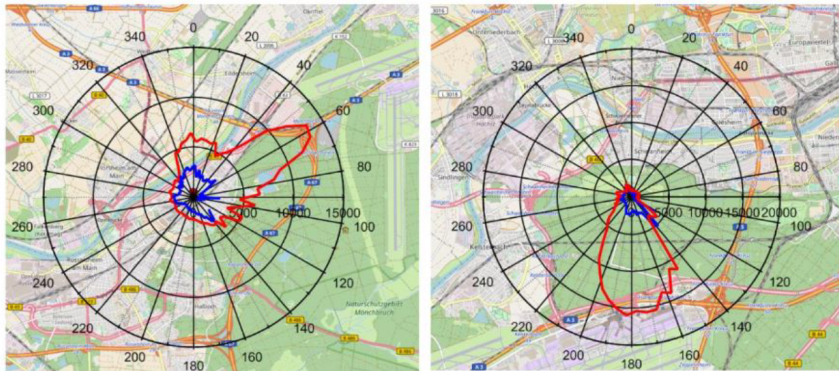


Abb. 1.6. Windrichtungsabhängige Auswertung der Gesamtkonzentration aller Partikel zwischen 10 nm bis 30 nm im Durchmesser in Raunheim (links) und in Frankfurt-Schwanheim (rechts) von [Rose and Jacobi, 2018]. Dargestellt ist jeweils die mittlere Anzahlkonzentration am Tag (rot) und nachts (blau) für Zeiten, an denen der Wind aus der angegebenen Richtung wehte. Die Achsenskalierung ist in Partikel pro cm^3 angegeben. Beide Stationen weisen auf den Flughafen als UFP-Quelle hin.

[Stacey, 2019] hebt ebenfalls die mangelnde Datenlage zu UFP an Flughäfen hervor.

Aufmerksamkeit aus Politik und Öffentlichkeit haben das Thema UFP in der Umgebung des Frankfurter Flughafens auf die Agenda des HLNUG gesetzt.

Bisherige Forschungen zur UFP-Belastung in der Umgebung von Flughäfen vernachlässigen den Einfluss von Landeanflügen auf die lokale Luftqualität oder behandeln Flughafen und Landeanflüge als ein Gesamtsystem. In der Öffentlichkeit wurden Landeanflüge über Wohngebieten wiederholt als Gefahr für die Gesundheit der Bevölkerung dargestellt. Es wurde behauptet, einen Kausalzusammenhang zwischen Überflugereignissen und Spitzenwerten in der UFP-Konzentration beobachtet zu haben [Gisela Kirschstein, 2018]. Messungen zur Quantifizierung der bodennahen UFP-Belastung durch Überflüge wurden bisher jedoch nur vereinzelt durchgeführt. Es ist nicht belegt, ob Überflüge, bodennahe Emissionen des Flughafens oder andere Quellen die UFP-Belastung in den Wohngebieten verursachen.

Hoher Schub der Triebwerke wird mit einer maximalen Anzahl der Partikel in einer Größenordnung von 30 bis 90 nm in Verbindung gebracht und niedriger Schub mit einem Partikelmaximum in der Größe 20 bis 30 nm [Stacey, 2019]. Der Übergang ist fließend. Dies begründet die These, dass Landeanflug und Rollverkehr der Flugzeuge,

sowie Hilfstriebwerke zur Stromerzeugung für den Hauptteil der UFP verantwortlich sein könnten.

Aufgrund der speziellen Vorgaben zur Betriebsrichtung liegen Einflugschneise und Abwind des Flughafens meist im selben Richtungsvektor, was eine Signaltrennung der UFP von Flughafen und Anflug kompliziert gestaltet. Zwar lässt sich der Kerosinverbrauch der Flugzeuge quantifizieren und der Gesamteintrag in die meteorologische Grenzschicht unter diversen Annahmen berechnen; die tatsächliche Ausbreitung der Emissionen von Flugzeugen im Landeanflug ist aufgrund der Kombination einer oft turbulenten Grenzschicht und Wirbelschleppen jedoch sehr komplex.

Wirbelschleppen sind die hinter Flugzeugen generierten Turbulenzen. [Unterstrasser et al., 2014] hat berechnet, dass ein Flugzeug, ähnlich einer Boeing 747, in der freien Atmosphäre eine Abgasfahne mit 450 m Vertikalversatz Richtung Boden generieren kann, allerdings gibt Fleuti an: „Emissionen, die oberhalb (300 m) ausgestossen werden, werden nicht mehr direkt am Boden immissionswirksam, da sie rasch sehr großflächig verteilt, verdünnt und umgewandelt werden. So sind die Emissionen, die über 300 m ausgestossen werden, auf dem Boden praktisch nicht mehr messbar.“ [Peter M. et al., 2012]. Das Wissen über die Ausbreitung von Wirbelschleppen in Bodennähe ist nach aktuellem Forschungsstand begrenzt.

1.3 Zielsetzung

In der Umgebung des Frankfurter Flughafens sind bis 2018 lediglich zwei Messstationen zur Messung von UFP vorhanden. Mitte des Jahres 2018 wurde eine weitere mobile Messstation eingerichtet. Wie in den vorangehenden Abschnitten erläutert, sind weitergehende Messungen an mehreren Orten zur allgemeinen UFP-Konzentration, zur Quellenzuordnung und den Vorgängen notwendig. Speziell der Einfluss von Landungsüberflügen auf die UFP-Konzentration steht bei dieser Arbeit im Fokus. Ein Kausalzusammenhang zwischen Überflugereignissen und erhöhten UFP-Belastungen sowie punktuellen Spitzenwerten ist zu untersuchen. Aus der mangelnden Datenlage zu UFP in der Umgebung des Frankfurter Flughafens und den zur Verfügung stehenden Mitteln ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Bestätigen weitere Messstandorte im Umkreis des Flughafens die bisherige These des Flughafens als Quelle von UFP?

- Sind einzelne Überflüge, speziell Landungsüberflüge, im weiteren Umkreis des Flughafens anhand erhöhter UFP-Konzentration nachweisbar? Ist das Grundniveau der UFP-Konzentration erhöht und/oder zeigen sich Spitzenwerte nach einem Überflug?
- Unter welchen Randbedingungen ist ein Nachweis zum Einfluss von Überflügen auf die UFP-Konzentration möglich oder nicht möglich? Bis zu welcher Überflughöhe sind UFP-Emissionen am Boden als Immissionen messbar? Welche Faktoren beeinflussen die zu messende UFP-Konzentration?

2 Methodik

2.1 Flugverkehr und Auswahl der Messorte

2.1.1 Landing-Take-Off-Zyklus

Der Bewegungszyklus von Flugzeugen an einem Flughafen, der sogenannte *Landing-Take-Off-Zyklus (LTO)* kann in drei Abschnitte aufgeteilt werden. Dieser ist in Abb. 2.1 zu sehen. Er besteht aus:

- Startvorgang: Abheben und Steigflug
- Landevorgang: Anflug in einem *Anflugvektor* auch *Gleitlinie* genannt
- Taxiing: Rollverkehr auf dem Flughafen

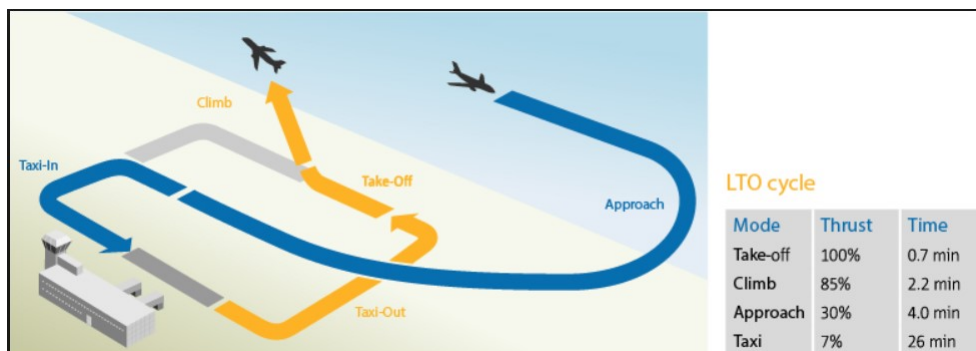


Abb. 2.1. LTO Zyklus für Flugzeuge mit dazugehöriger Schubkraft (Thrust) und Verweildauer (Time) von [Yunos et al., 2017].

Der Startvorgang ist mit hohem Schub der Triebwerke verbunden. Der Start wird mit 100 % Schubkraft durchgeführt und der darauf folgende Steigflug mit 85 % Schubkraft. Durch den steilen Steigflug beträgt die Verweilzeit startender Flugzeuge in der meteorologischen Grenzschicht ca. 3 Minuten. Beim Landeanflug operieren die Triebwerke mit niedrigen Schubeinstellungen (30 %). Die Verweilzeit eines anfliegenden Flugzeugs in der meteorologischen Grenzschicht beträgt ca. 4 Minuten. Der Emissionsausstoß in der meteorologischen Grenzschicht ist horizontal breiter verteilt als

bei einem Startvorgang. Der Rollverkehr auf dem Gelände des Flughafens wird mit minimalem Schub ausgeführt (7 %) und dauert länger als Start und Landevorgang. In den Haltepositionen werden oft Hilfstriebwerke und Dieselgeneratoren verwendet, um die Flugzeuge mit Strom zu versorgen.

2.1.2 Luftfahrzeuggruppen

Tab. 2.1. Ausschnitt der Tabelle von Luftfahrzeuggruppen [Probst W., 2009]

Gruppe	Definition
S4	Strahlflugzeuge mit einer Höchststartmasse über 100 t
S5.1	Strahlflugzeuge mit einer Höchststartmasse bis 50 t
S5.2	Strahlflugzeuge mit einer Höchststartmasse über 50 t bis 120 t und einem Triebwerks-Nebenstrom-Verhältnis größer als 3
S5.3	Strahlflugzeuge mit einer Höchststartmasse über 50 t bis 120 t und einem Triebwerks-Nebenstrom-Verhältnis bis 3
S6.1	Strahlflugzeuge mit zwei Triebwerken und einer Höchststartmasse über 120 t
S6.2	Strahlflugzeuge mit drei oder vier Triebwerken und einer Höchststartmasse über 120 t bis 300 t...
S6.3	Luftfahrzeuge des Flugzeugmusters A340
S7	Strahlflugzeuge mit drei oder vier Triebwerken und einer Höchststartmasse über 300 t bis 500 t...
S8	Strahlflugzeuge mit drei oder vier Triebwerken und einer Höchststartmasse über 500 t...

Für viele Anwendungen ist es sinnvoll, verschiedene Luftfahrzeuggruppen zu klassifizieren. Einzelne Luftfahrzeuggruppen werden anhand ihrer Höchststartmasse und Leistung klassifiziert [Probst W., 2009]. In dieser Masterarbeit wurden alle Überfluggereignisse von Flugzeugen der Gruppe S6 oder höher separat gekennzeichnet, da von diesen erhöhte Emissionen zu erwarten sind.

2.1.3 Flughafen Frankfurt und Betriebsrichtungen

In Abb. 2.2 sind die Start- und Landebahnen und die vorherrschenden Windrichtungen des Frankfurter Flughafens zu sehen. Abb. 2.3 zeigt die Lärmkarte der Umgebung des Frankfurter Flughafens mit eingezeichneten Lärmminderungsstrecken.

Der Flughafen Frankfurt liegt im Südwesten des Stadtgebiets Frankfurt. In der weiteren Umgebung des Flughafens, zentral in der Rhein-Main-Region gelegen, befinden sich einige Industrie- und Wohngebiete. Das Gelände ist größtenteils von Wald um-

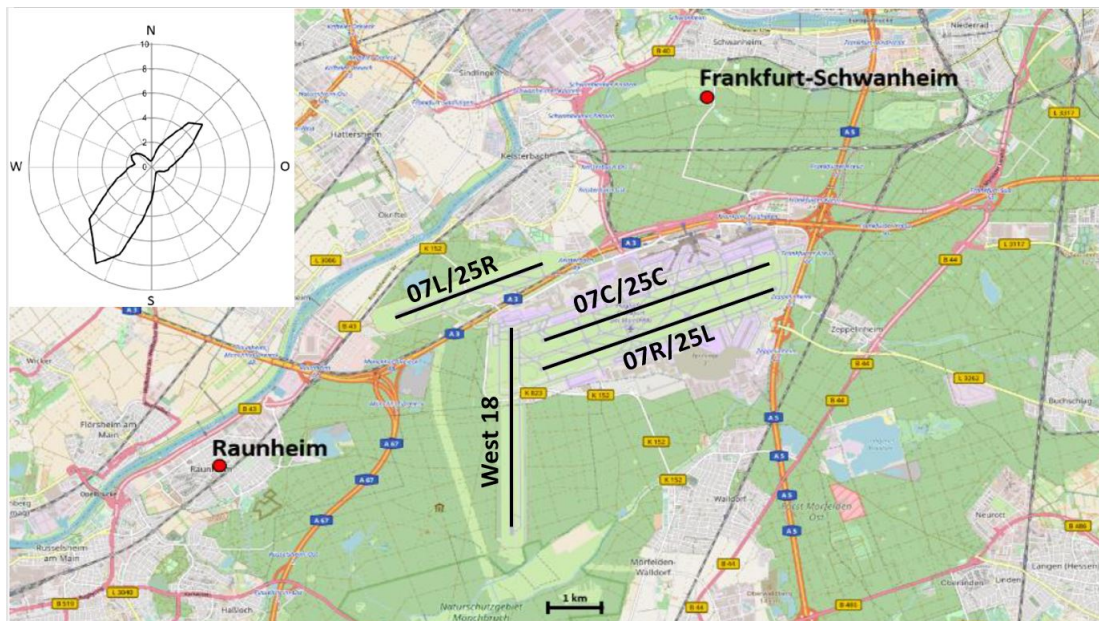


Abb. 2.2. Der Frankfurter Flughafen von [Rose and Jacobi, 2018] mit Landebahnen. Rote Punkte sind Messstationen des HLNUG. Die Windrose zeigt die Hauptwindrichtungen des Jahres 2017. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.

geben. Im Norden befindet sich die Bundesautobahn A3 und im Osten die Bundesautobahn A5. Aufgrund der unmittelbaren Nähe der Autobahnen und vieler anderer Zufahrtsstraßen zum Betriebsgelände des Flughafens sind alle Feldmessungen im weiteren Umkreis zwangsläufig eine Superposition von Straßen- und Luftverkehr.

Der Flughafen besitzt in Ost-West Richtung zwei große Start- und Landebahnen 07C/25C und 07R/25L und eine reine Landebahn (Nordwest 07L/25R). Die Startbahn West 18 hat eine Nord-Süd Ausrichtung. Der Beginn einer Landebahn wird als Landeschwelle bezeichnet.

„Um mit der vorhandenen Start- und Landebahnlänge sicher auszukommen, starten und landen Flugzeuge grundsätzlich gegen den Wind. Je stärker der Gegenwind ist, desto kürzer ist die Beschleunigungs- oder Abbremsstrecke auf der Bahn. Rückenwind hingegen verlängert diese Strecken und wird ab einer bestimmten Stärke zum Sicherheitsrisiko. Auf den drei Parallelbahnen finden deshalb in Abhängigkeit von der vorherrschenden Windrichtung und Windstärke Wechsel der Start- und Landerichtung, der sogenannten Betriebsrichtung (BR), statt:

- *Wind aus Osten: BR07 (entspr. 70° Kompasskurs) bzw. ‚Ostbetrieb‘, Flugrichtung von Westen nach Osten*

- *Wind aus Westen: BR25 (entspr. 250° Kompasskurs) bzw. ‚Westbetrieb‘, Flugrichtung von Osten nach Westen*

Die Startbahn 18 (entsprechend 180° Kompasskurs) kann weitgehend unabhängig von der jeweiligen Betriebsrichtung des Parallelbahnsystems genutzt werden.“ [Fraport AG, 2019]

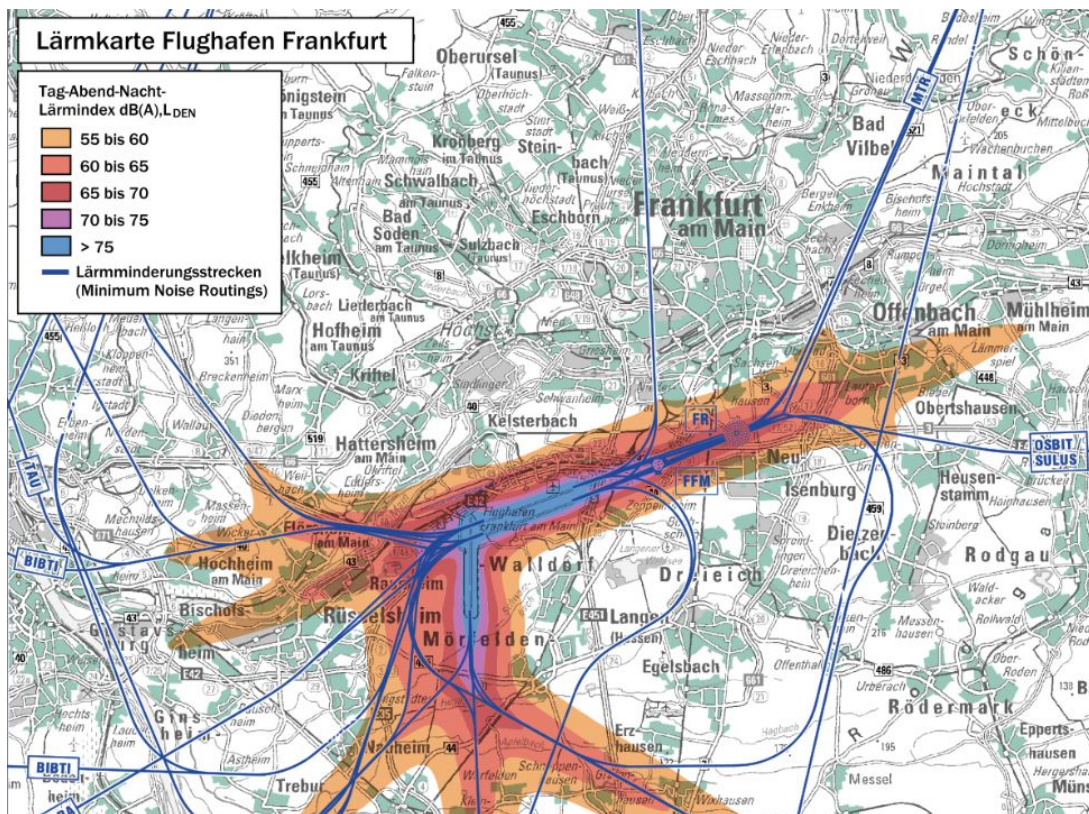


Abb. 2.3. Der Frankfurter Flughafen mit Lärmkarte und Lärminderungsstrecken von [Alexrk2, 2016].

Betriebsrichtung West (BR25) wird öfter verwendet, weil die Hauptwindrichtung am Frankfurter Flughafen Westwind ist. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten wird Betriebsrichtung West bevorzugt, um weniger Wohngebiete mit Lärm zu belasten.

2.1.4 Auswahl der Messorte

Bei der Wahl der Messorte sind folgende Faktoren zu berücksichtigen:

- Die Messorte sollten möglichst verschiedene Entfernungen zum Flughafen abdecken, und dabei unterhalb der Flugrouten liegen.

- Bei jeder Messung sind die Wetterverhältnisse zu beachten. Es wurde nur bei klaren Sichtverhältnissen, und nie bei Regen, gemessen. Windrichtung und Betriebsrichtung müssen beachtet werden.
- Um in einer gut durchmischten Luftmasse zu messen, sollte offenes Gelände bevorzugt werden. Der Frankfurter Flughafen ist zu weiten Teilen von Wald umgeben, was die möglichen Messorte stark einschränkt. Eng bebaute Wohngebiete, Industriegebiete und nicht zugängliches Privatgelände begrenzen die Möglichkeiten.
- Eine Nähe zu viel befahrenen Straßen muss möglichst vermieden werden. Die direkt am Flughafen entlangführenden Autobahnen könnten ein Störfaktor sein.



Abb. 2.4. Der Frankfurter Flughafen aus dem ersten Zwischenbericht des HLNUG zu UFP von [Rose and Jacobi, 2018] mit den Messstationen des HLNUG (rot) und den Messorten dieser Masterarbeit (schwarz). Die Winddaten wurden an der DWD Station in der Nähe des Messortes DFS-Turm (schwarz-blau) gemessen. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.

Die Auswahl der Messorte, anhand der Faktoren, stellte eine große Herausforderung dar. Es wurde gezielt nach Orten gesucht, an denen eine hohe UFP-Konzentration durch Überflüge zu erwarten sei. Aus den Anforderungen und den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten ergaben sich nach intensiver Suche die in Abb. 2.4 gezeigten Messtandorte. Je nach Windrichtung und Betriebsrichtung eigneten sich unterschiedliche Messtandorte. Da nur ein Messgerät zur Verfügung stand, wurde im Rahmen

der Umstände der am besten geeignete Standort gewählt oder auf andere Wetterbedingungen gewartet. Das Kartenmaterial stammt von [Openstreetmap-Mitwirkende, 2019] und die Überflughöhen sind von einer interaktiven Karte der [Fraport AG, 2015] abgerufen.

Taubengrund A+B

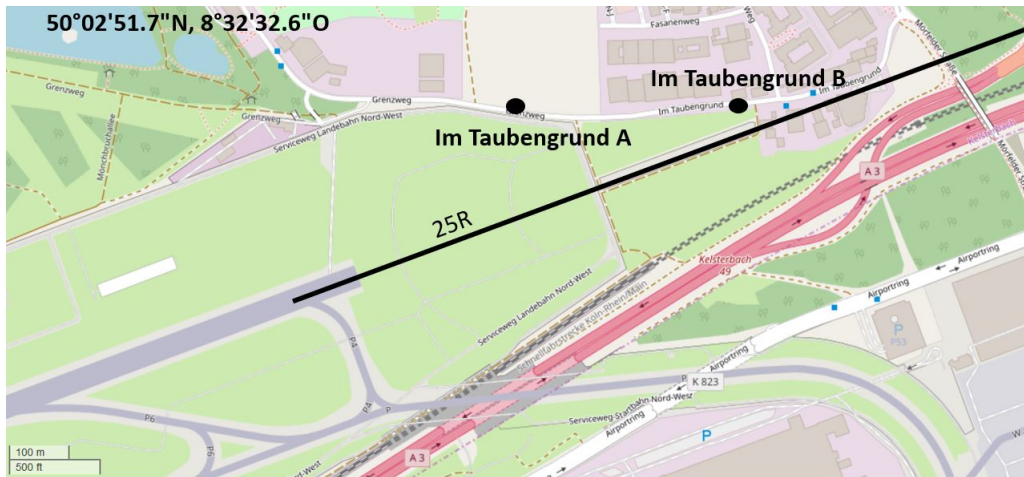


Abb. 2.5. Die Messorte Taubengrund A und B mit Gleitlinie 25R der Nordwestlandebahn. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.

Der Standort Taubengrund liegt direkt angrenzend an das Flughafengelände nord-östlich der Nordwest Landebahn. In Abbildung 2.5 ist die genaue Platzierung zu erkennen.

- Taubengrund A: Gemessen wurde am nördlichen Straßenrand des Grenzweges. Im Norden liegt offenes Feld. Im Westen und Osten sind in einiger Entfernung Gewerbe angesiedelt. Landeanflüge aus Westen sind aus dieser Position sichtbar. Landeanflüge aus Osten sind in dieser Position nicht sichtbar.
- Taubengrund B: Gemessen wurde am südlichen Straßenrand von Im Taubengrund. Im Norden grenzt Gewerbe an, im Süden befindet sich ein kleines hochgewachsenes Feld, welches direkt unter der Einfugschneise der Nordwest Landebahn liegt. Horizontale Distanz zur Gleitlinie ist ca. 40 m. Überflughöhe ist ca. 50 bis 60 m relativ zur Landeschwelle.

Das Messgerät wurde auf dem Dach des Autos platziert. Möglicher Störfaktor ist der Straßenverkehr, welcher hauptsächlich durch Lastkraftwagen geprägt ist.

Waldsee

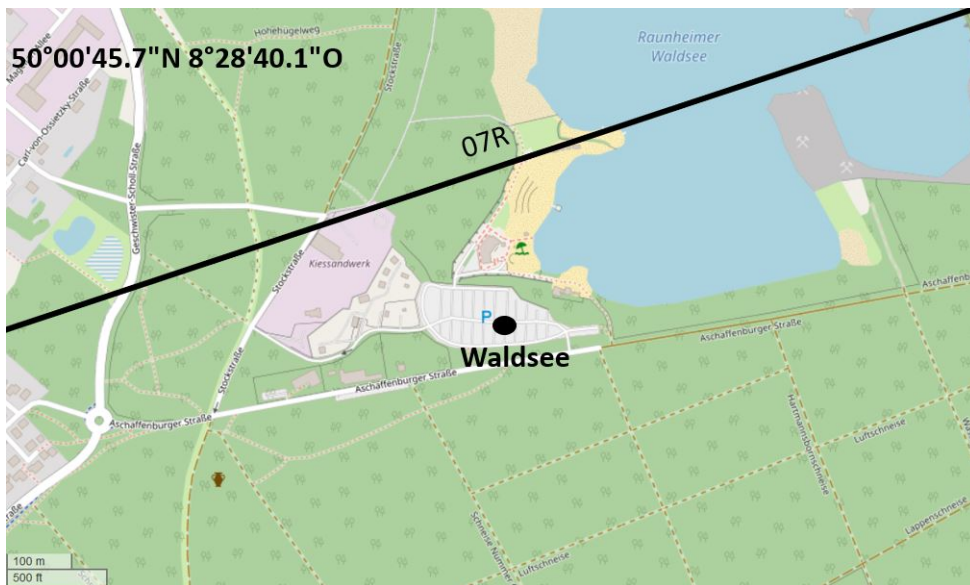


Abb. 2.6. Der Messort Waldsee mit Gleitlinie zur Landebahn 07R Süd. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.

Der Parkplatz des Raunheimer Waldsees ist die größte zugängliche Freifläche in der näheren Umgebung. Er liegt ca. 4 km Ost-Südost vom Flughafen entfernt. Das Auto wurde mittig auf dem Parkplatz platziert, um Abstand zu den umliegenden Bäumen zu gewährleisten. Das Messgerät wurde auf dem Auto platziert. Bei Ostbetrieb passieren Flugzeuge im Landeanflug auf die Landebahn 07R den Messort ca. 200 m nördlich in ca. 250 bis 270 m Höhe relativ zur Landeschwelle. Flugzeuge im Anflug auf die Nordwestlandebahn 07L/25R sind mit über 2 km Entfernung im Norden hinter den Bäumen zu erkennen.

Bei Westbetrieb biegen die Flugzeuge nach dem Start vor dem direkten Überflug des Standortes nach Süden und Norden ab. Die südlichen Flugzeuge sind in ca. 1,5 km Entfernung gut sichtbar. Die nördlichen sind in ca. 2 km Entfernung hinter Bäumen schwer sichtbar. Die Flughöhe der startenden Flugzeuge variiert stark.

Mögliche Störfaktoren sind das westlich gelegene Kiessandwerk sowie mit dem PKW anreisende Waldsee-Besucher.

DFS-Turm

Dieser Parkplatz liegt direkt an der Westgrenze des Flughafengeländes zwischen Zaun und Airporttring, südlich eines Turmes der Deutschen Flugsicherung (DFS).

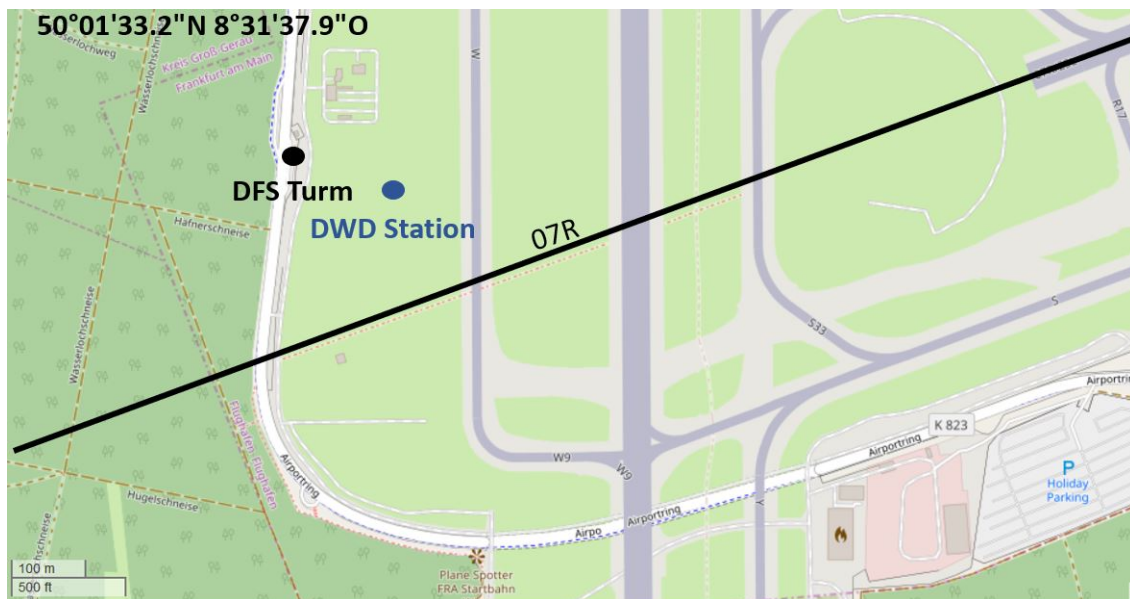


Abb. 2.7. Der Messort DFS-Turm mit Gleitlinie zur Landebahn 07R Süd. Zu sehen ist auch die DWD Station in blau. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.

Im Westen befindet sich Waldgebiet und östlich sind die Landebahnen 07C/25C und 07R/25L in einem Kilometer Entfernung. Die Flugzeuge befinden sich bei Landungsüberflug ca. 70 bis 80 m relativ zur Landeschwelle und ca. 230 m südlich.

Das Gerät wurde auf dem Dach des Autos platziert.

Mögliche Störfaktoren sind die nicht ganz offene Umgebung und der starke PKW- und LKW-Verkehr auf Airporttring und Flughafengelände, sowie die starke Nutzung des Parkplatzes.

Mönchhofkapelle A+B

Die Mönchhofkapelle liegt 2 km westlich der Nordwest Landebahn. Im Osten und Süden liegen ein Gewerbegebiet und das Mönchhof Dreieck. Im Norden verläuft angrenzend der Main. Die Überflughöhe beträgt ca. 110 bis 130 m relativ zur Landeschwelle.

- Mönchhofkapelle A: Der Messort liegt exakt unter der Gleitlinie 07L der Landebahn Nordwest. Das Messgerät wurde leicht erhöht über den Sitzbänken an der Kapelle platziert.
- Mönchhofkapelle B: Der Messort liegt 150m Süd-Südwestlich vom Messort Mönchhofkapelle A entfernt auf einem Hügel angrenzend zum anliegenden Gewerbe. Das Gerät wurde leicht erhöht auf einem Gartentisch platziert.

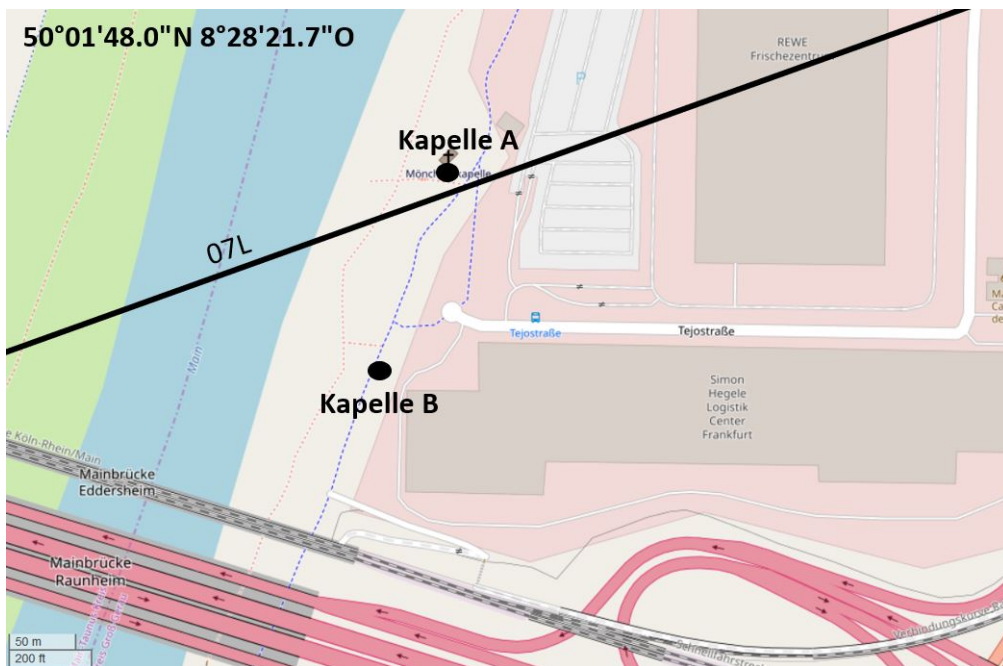


Abb. 2.8. Die Messorte Mönchhofkapelle A und B mit Gleitlinie 07L zur Nordwest Landebahn. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.

Mögliche Störfaktoren sind das angrenzende Gewerbegebiet und die Autobahn.

Flörsheim Feld A+B+C

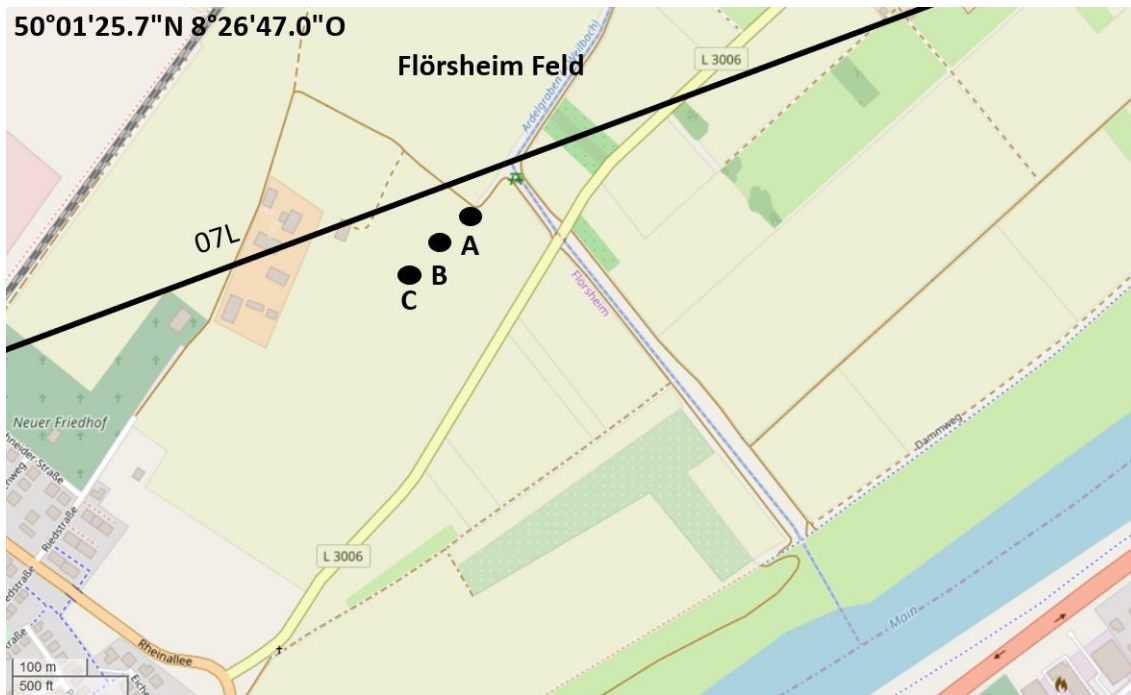


Abb. 2.9. Die Messorte Flörsheimer Feld A,B und C mit Gleitlinie 25L zur Landebahn Nordwest. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.

Die Messorte Flörsheim A, B und C liegen auf freiem Feld ca. 4 km westlich des Flughafengeländes zwischen Flörsheim und Hattersheim Eddersheim. Im Osten befinden sich in ca. 50 m Abstand von Punkt A eine Baumreihe und in einem Kilometer Entfernung die Autobahn A3. Im Westen beginnt in ca. 100 m Entfernung ein Bauernhof und in 500 m Entfernung das Wohngebiet von Flörsheim. Die Gleitlinie 07L zur Landebahn Nordwest verläuft ca. 100 m nördlich von Punkt A. Die Flugzeuge haben eine Überflughöhe von ca. 210 bis 240 m relativ zur Landeschwelle.

Das Messgerät wurde leicht erhöht auf einem Gartentisch platziert. Störfaktor ist an diesem Standort möglicherweise die Autobahn A3.

Isenburger Schneise

Der Parkplatz Isenburger Schneise liegt 6 km nordöstlich des Flughafengeländes. Der Parkplatz besteht aus freiem Feld, durchzogen von einer einzelnen Baumreihe. Der Parkplatz ist von Wald umgeben und im Westen verlaufen Bahngleise, die durch einige Baumreihen vom Parkplatz abgetrennt sind. Im Osten, auch von mehreren

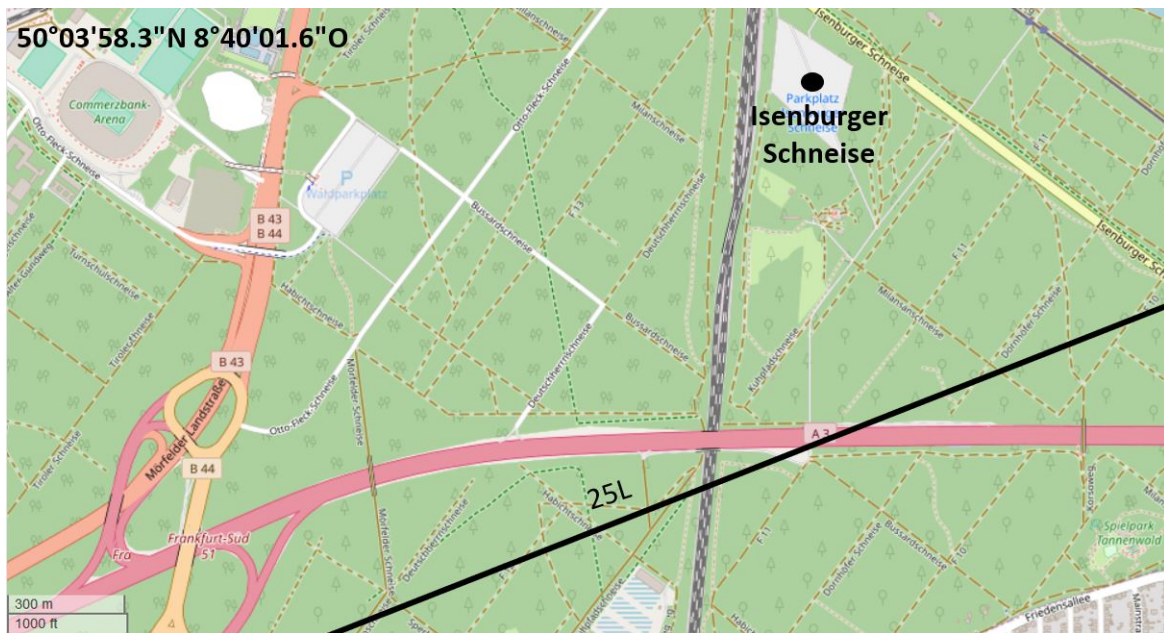


Abb. 2.10. Der Messort Isenburger Schneise mit Gleitlinie 25L zur Landebahn Süd.
©OpenStreetMap-Mitwirkende.

Baumreihen abgetrennt, liegt die Isenburger Schneise. Die Gleitlinie 25L verläuft ca. 950 m südlich zwischen ca. 340 bis 410 m Höhe relativ zur Landeschwelle.

Das Messgerät wurde leicht erhöht auf einem Gartentisch platziert.

Störfaktoren können Straßenverkehr und Zugverkehr sein. Der Messstandort ist durch die Baumreihen gut vor bodennahen anthropogenen Einflüssen isoliert.

2.2 Messgeräte und Vergleich

Für die Masterarbeit hat das HLNUG Messgeräte bereitgestellt. Für die mobilen Messungen standen zwei tragbare Partikelzähler (CPC) zur Verfügung. Für den Vergleich und die Qualitätsüberprüfung stand ein Partikelgrößenpektrometer (SMPS) des HLNUG zur Verfügung.

Alle Partikelzähler haben eine untere Abscheidegrenze bzgl. der Partikelgröße. Diese Grenze ist im allgemeinen die Partikelgröße, von der das Gerät 50 % der Partikel detektieren kann (D_{50}). Größere Partikel werden mit einer größeren Effizienz detektiert bis die maximale Effizienz erreicht ist. Die Grenzgröße (D_{50}) wird im folgenden *Messgrenze* genannt.

2.2.1 Tragbare CPCs

Zur Messung von UFP können tragbare CPC-Geräte verwendet werden. Diese Geräte sind Partikelzähler, die auf der Basis von Kondensation und Laseroptik Partikel in einem definierten Luftdurchfluss zählen. Zur Zählung von Partikeln wird die zu messende Luft in das Gerät eingeleitet. Ein Sättiger erwärmt die Luft und befeuchtet sie mit beispielsweise Isopropanol. Die Luft fließt weiter und wird aktiv gekühlt. Dies hat eine Übersättigung des Isopropanol zur Folge, welches daraufhin an den Partikeln kondensiert. Die so gewachsenen Partikel sind groß genug, um einzeln von einem Photodetektor und einer Laserdiode identifiziert zu werden.

Für die Messungen wurden ein P-Trak 8525 Modell (blau) und ein CPC 3007 Modell (weiß), beide mit ca 30 cm x 14 cm x 14 cm Größe, von der Firma TSI GmbH genutzt. Die Messgeräte sind in Abb. 2.11 zu sehen. Die Geräte gleichen sich in der Handhabung, stammen jedoch aus verschiedenen Preisklassen und bieten unterschiedliche Qualität.



Abb. 2.11. Condensation Particle Counter. P-Trak in blau und CPC 3007 in weiss mit Aerosol Einlass und Batterien ©TSI Incorporated.

Beide CPC Geräte können mit Batterie oder Stromanschluss betrieben werden. Die Geräte können entweder direkt an einen Laptop angeschlossen werden oder Messreihen auf einem internen Speicher ablegen, der zu einem späteren Zeitpunkt ausgelesen werden kann. Die Messgrenzen bzgl. Partikelgröße (D_{50}) der CPCs betragen nach Herstellerangaben beim P-Trak 0,02 bis 1 μm und beim CPC 3007 0,01 bis 1 μm .

Um eine angemessene Zeitauflösung zu garantieren, werden jede Sekunde Werte der Partikelanzahlkonzentration abgespeichert.

Handhabung

Für alle Messungen sind folgende Schritte vor Messbeginn durchzuführen:

- Bei Messung ohne angeschlossenen Computer: Der Log-Mode des CPC ist am Computer auf 3 Stunden Messdauer und die Speicherung der Daten auf 1 Hertz Messfrequenz zu konfigurieren.
- Befeuchtung der Kartusche: Die Kartusche muss ausreichend mit Isopropanol befeuchtet sein, um so lange wie möglich messen zu können.
- Zeiteinstellung: Es ist unerlässlich, die Uhrzeit an den Geräten vor jeder Messung neu einzustellen, da die Uhr bei Ausschalten des Gerätes und zwischen den Messungen mehrere Sekunden bis Minuten Abweichung verursacht.
- Nullmessung: Mit einem HEPA Filter ist eine Nullmessung durchzuführen. Durch den HEPA Filter sind keine vom Gerät zählbaren Partikel im Luftstrom. Das Gerät sollte nach kurzer Zeit 0 Partikel zählen. Dies stellt sicher, dass keine Falschidentifikationen vorkommen.

2.2.2 SMPS

Ein SMPS (Abb. 2.12 links) ist ein Partikelgrößenspektrometer, bei dem zunächst eine Partikelgröße in einem *Differential Mobility Analyzer (DMA)* selektiert und anschliessend in einem CPC gemessen wird. Das Gerät ist in der Lage, in einem Zeitraum weniger Minuten, Partikel aus einem stetigen Luftstrom in Größenklassen (size bins) einzuteilen. Dazu wird das polydisperse Aerosol vor Eintritt in den DMA einfach geladen. Die geladenen Partikel werden durch den DMA geleitet, wo sie einem elektrischen Feld ausgesetzt werden und sich, durch unterschiedliche elektrische Mobilität, die Flugbahnen verschiedener Partikelgrößen separieren. Dies ist in Abb. 2.12 (rechts) zu sehen. Durch einen kleinen Auslass wird monodisperses Aerosol weiter zum CPC geleitet, wo die Zählung erfolgt. Bei den Messungen wurde das SMPS Modell 3938 der Firma TSI GmbH verwendet. Als CPC wurde das Modell 3772 von TSI GmbH mit einer Messgrenze bzgl. Partikelgröße (D_{50}) von $0,01 \mu\text{m}$ und variabler Obergrenze (je nach Aufsatz) verwendet.

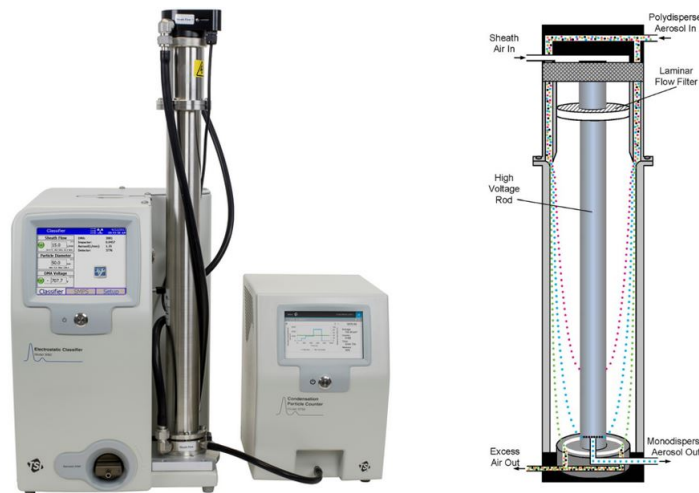


Abb. 2.12. Scanning Mobility Particle Sizer mit DMA links und Funktionsweise eines DMAs rechts. Polydisperes Aerosol wird oben eingeleitet und durch das elektrische Feld und einen schmalen Auslass größenselektiert © TSI Incorporated.

2.2.3 Vergleich CPCs

Allgemein

Zwischen stationären CPCs, wie sie in den Messstationen verwendet werden, und den tragbaren CPCs bestehen hohe Preisunterschiede. Deshalb war es wichtig, die Zähleffizienz der tragbaren CPCs im Vergleich zu einem stationären CPC zu bewerten. Die tragbaren CPCs wurden mit einem stationären CPC direkt verglichen, da keine exakte ausführliche Kalibrierung möglich war. Über den SMPS können spezielle Partikelgrößen in die verschiedenen CPCs eingeleitet werden. Damit war es möglich, die Zähleffizienz der tragbaren CPCs in Relation zum stationären CPC für die einzelnen Größenintervalle zu analysieren. Es war nicht möglich, alle drei Geräte parallel zu testen, weshalb jeweils ein tragbarer CPC parallel mit dem stationären CPC angeschlossen wurde. Der CPC 3772 wurde als Referenzwert angenommen; aber auch dieser stößt bei $0,01 \mu\text{m}$ an seine untere Messgrenze (D_{50}). Der Versuchsaufbau war dabei angeordnet, wie in 2.13 zu sehen ist. Es wird darauf hingewiesen, dass diese Vergleichsmessung mit Salz als Aerosol durchgeführt wird und nicht Aerosole aus der freien Atmosphäre oder Aerosole aus Turbinenabgasen gemessen werden.

Mit einem Aerosolgenerator vom Typ ATM 228 der Topas GmbH wird polydisperes Aerosol aus Wasser mit Speisesalz hergestellt. Nach Trocknung in Silicagel wird das polydisperse Aerosol weitergeleitet und mit sauberer Luft, gefiltert durch einen HEPA Filter, angereichert, um den Luftfluss zu erhöhen. (Das ist notwendig, um

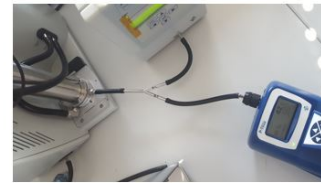
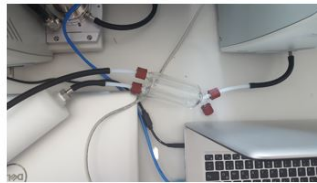
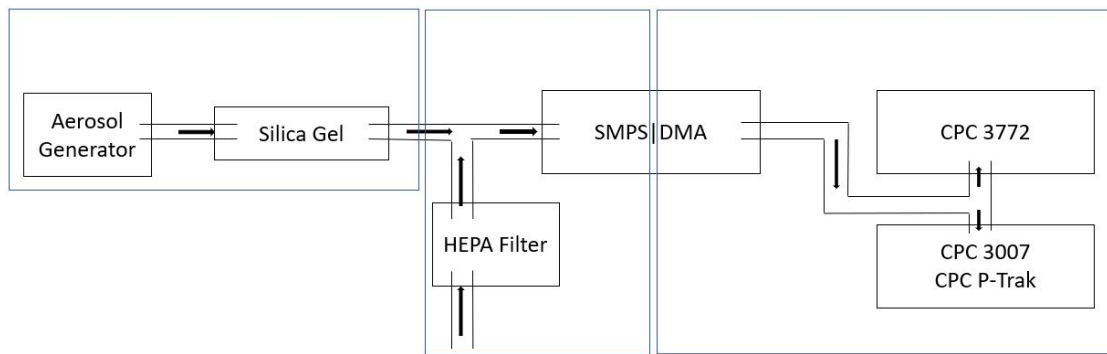


Abb. 2.13. Aufbau der Vergleichsmessung. Die Bilder zeigen die eingezeichneten Abschnitte der oberen Abbildung. Polydisperses Aerosol wird generiert und im SMPS Größenselektiert. Das Monodisperse Aerosol wird anschliessend in den CPCs gezählt.

dem SMPS und den CPCs genügend Luft für optimale Flussraten zur Verfügung zu stellen.) Das polydisperse Aerosol wird im SMPS einfach geladen und im DMA findet die Größenselektion statt. Das resultierende monodisperse Aerosol wird in die parallel angeschlossenen CPCs geleitet. Zwischen DMA und CPC ist auf möglichst kurze und gleichlange Schlauchverbindungen zu achten, um Verluste zu minimieren und anzugleichen.

Ausführung

Zur Gewährleistung einer ausreichend großen Stichprobe für jede im SMPS gewählte Partikelgröße, wird pro Größe 5 Minuten lang gemessen. Um bei 10 nm ausreichend viele Aerosolpartikel zu generieren und durch den SMPS bis zu den CPCs zu leiten, wurde der Aerosolgenerator auf maximalen Betriebsdruck eingestellt. Wegen der Aerosolgeneration und der Messgrenzen der Messgeräte wurden bei kleinsten Größen nur wenige Partikel gezählt. Diese Messungen sind dementsprechend mit größerem Fehler belastet. Bei höheren Partikelgrößen wurden Werte zwischen 1500 bis 3000 cm^{-3} eingestellt. Durch Einstellen des Betriebsdrucks des Aerosolgenerators

und durch kurze Wartezeiten, bis das Signal an den CPCs ankam, konnten relativ stetige Partikelkonzentrationen erreicht werden.

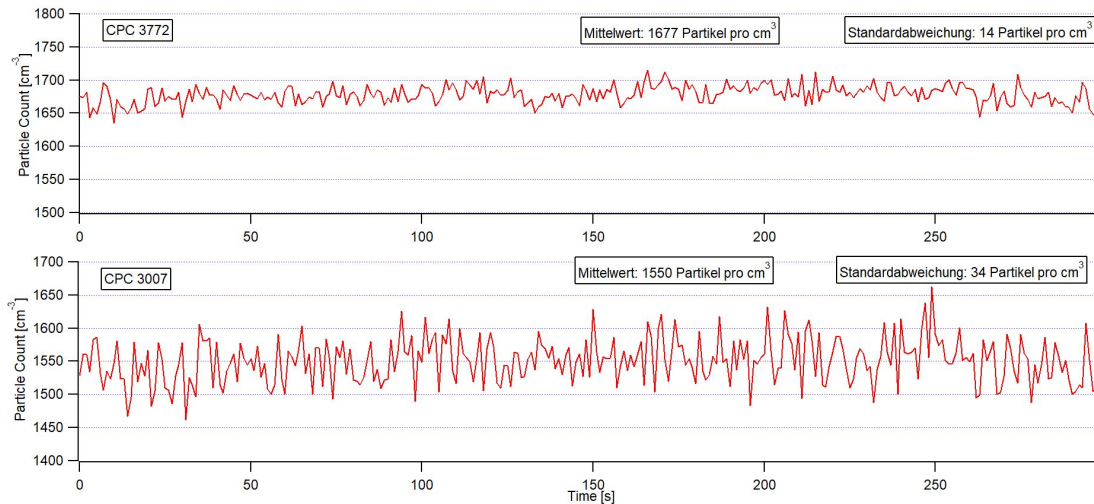


Abb. 2.14. Messreihenbeispiel von CPC 3772 und CPC 3007 für Partikelgröße 40 nm. CPC 3772 hat eine kleinere Standardabweichung.

Als Beispiel sind Messreihen von CPC 3772 und CPC 3007 für eine Partikelgröße von 40 nm in Abb. 2.14 aufgeführt. Die Messreihen sind beide 300 Sekunden (5 Minuten) lang und mit gleichbleibendem Betriebsdruck des Aerosolgenerators parallel zueinander entstanden. CPC 3772 hat einen Mittelwert von 1677 cm^{-3} und eine Standardabweichung von 14 cm^{-3} . CPC 3007 hat einen Mittelwert von 1550 cm^{-3} und eine Standardabweichung von 34 cm^{-3} . Der stationäre und qualitativ hochwertigere CPC 3772 hat erwartungsgemäß eine kleinere Standardabweichung als die Handgeräte. Unter der Annahme, dass der CPC 3772 als optimaler Referenzwert gilt, wurde nun die Effizienz des CPC 3007 berechnet: Der CPC 3007 zählt 92,4 % der Partikel der Größe 40nm.

Die beschriebene Ausführung wurde für beide tragbaren CPCs und Größenselektionen am SMPS von 10 nm-100 nm ausgeführt. CPC 3007 wurde doppelt gemessen, weil die erste Vergleichsmessung in den kleinsten Größen höhere Werte als die des CPC 3772 ergab. Die kleinsten Größenklassen wurden auch mit unterschiedlichen Partikelanzahlen durchgemessen.

Ergebnisse

Bei der Versuchsdurchführung stellte sich heraus, dass der CPC 3007 unter gewissen Umständen in der Größenklasse 10 bis 20 nm, speziell nach Einsetzen einer neuen

Alkoholpatrone, bis zu 15 % über den Werten des CPC 3772 lag. Dieser Effekt wurde lediglich in den ersten Minuten nach Patronenwechsel beobachtet. Vermutet wird homogene Nukleation von Isopropanol Partikeln oder eine nicht registrierte Flutung der Messkammer.

Die prozentuale Zähleffizienz des Vergleichs ist in Abbildung 2.15 visualisiert. Der CPC 3007 misst ca 50 % der Partikel im 10 nm Bereich und erreicht bei 20 nm 90 % der Zähleffizienz im Vergleich zum CPC 3772. Die Zähleffizienz für größere Partikel verbleibt über der Marke von 90 %. Der CPC P-Trak kann die kleinsten Partikel nicht zählen, was mit den Herstellerangaben im Einklang ist. Zwischen 20 bis 30 nm wird die 50 % Zähleffizienz überschritten. Im weiteren Verlauf kann der P-Trak nicht die 80 % Zähleffizienz überschreiten.

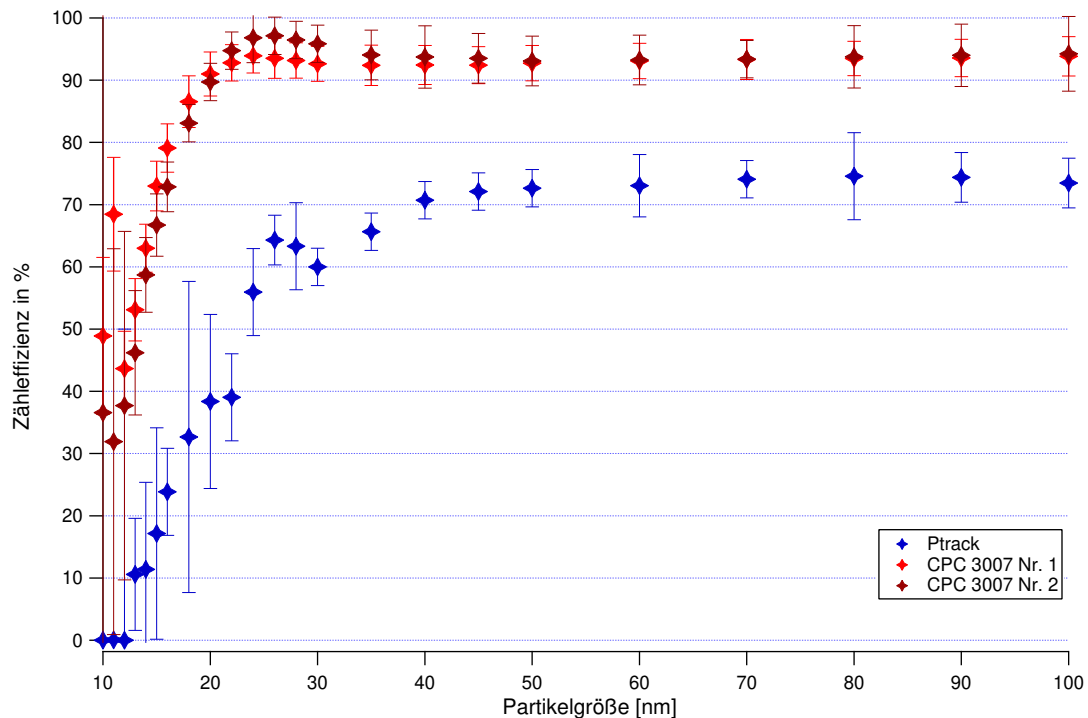


Abb. 2.15. Vergleich des P-Trak und CPC 3007 in Bezug auf einen CPC 3772 für 10 nm bis 100 nm in Prozent. Die Balken geben die Standardabweichung an. Der CPC 3007 erreicht über 90 % Zähleffizienz und der P-Trak zwischen 70 bis 80 % Zähleffizienz im Vergleich zu einem CPC 3772.

Abbildung 2.15 zeigt deutlich, dass die Zähleffizienz des P-Trak weit hinter der des CPC 3007 zurückbleibt. Der CPC P-Trak unterschätzt die Partikelanzahlkonzentrationen um ca 30%. Der signifikante Unterschied zwischen den Geräten verhindert

eine belastbare Vergleichbarkeit der Daten beider Geräte bei Feldmessungen. Aus diesem Grund wurde entschieden, lediglich den CPC 3007 für die Feldmessungen zu verwenden. Hierdurch waren gleichzeitige Feldmessungen an verschiedenen Orten für diese Masterarbeit nicht möglich. Ein zweites Messgerät des selben Typs stand nicht zur Verfügung.

2.3 Durchführung der Messungen

Die Messungen wurden zu verschiedenen Tageszeiten, meist am Vor- oder Nachmittag durchgeführt. Je nach Messort und Zugänglichkeit mit dem Auto wurde der CPC auf dem Autodach (Höhe ca. 2 m) oder einem kleinen Tisch (ca. 1,40 m) platziert, wie in Abb. 2.16 zu sehen ist.



Abb. 2.16. Beispiele zur Platzierung des CPC. Auf dem Autodach (links) oder auf dem Gartentisch (rechts).

Die Messungen wurden bis zu 3 Stunden am Stück durchgeführt. Limitierende Faktoren waren die Alkoholkartusche, die Batteriekapazität und die Speicherfähigkeit des CPCs. Verkürzte Messungen entstanden bei einsetzendem Regen, Wechsel der Betriebsrichtung und flexiblen Standortwechseln. Das Gerät ist entsprechend der oben beschriebenen Handhabung vorzubereiten, danach wird der Log-Mode des Geräts aktiviert und die Messung gestartet.

2.3.1 Überflug-Log

Zum Abgleichen der Überflugereignisse mit den Messdaten war es erforderlich, die Überflugereignisse zu notieren. Dabei stellte sich die Schwierigkeit, dass an jedem Messort der genaue Zeitpunkt zum Loggen des Ereignisses individuell bestimmt werden musste. So wurde bei Messorten, die direkt unterhalb der Flugzeugroute lagen, möglichst exakt der Zeitpunkt gewählt, als das Flugzeug genau über dem Messgerät war. Bei horizontal versetzten Flugrouten wurde ein Referenzpunkt gewählt, um in der gedachten Verlängerung der Sichtlinie zum Referenzpunkt das Überflugereignis zu loggen. Die Wahl dieses Referenzpunktes geschah zufällig und den Gegebenheiten am jeweiligen Messort entsprechend. Wird für alle Überflugereignisse während einer Messung der selbe Referenzpunkt eingehalten und bleibt die Sichtlinie die Gleiche, ist die Stetigkeit der Überflug-Logs garantiert. Verschiebungen ergeben sich lediglich in der möglichen Signaldauer bis zum Messgerät. Für die exakte zeitliche Aufnahme der Überflugereignisse wurde die App Timestamp aus dem Google Play Store verwendet.

2.3.2 Winddaten

Um die Messreihen mit den meteorologischen Bedingungen kombiniert zu visualisieren wurden zehnmündige Mittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung des DWD der Messstation am Frankfurter Flughafen verwendet [DWD, 2019]. Der Messort ist in Abb. 2.4 und Abb. 2.7 zu sehen. Die verwendeten Winddaten wurden je nach Messort der Partikelkonzentration in großer Entfernung aufgenommen und sind deshalb nicht als exakte Referenz, sondern als Tendenz zu betrachten.

2.4 Berechnungen und Theorie

Um den Einfluss von Überflugereignissen auf die lokale Anzahlkonzentration von UFP zu erforschen bieten sich viele Herangehensweisen. Ein Überflugereignis könnte sowohl eine erhöhte Grundkonzentration, als auch zeitlich begrenzte Konzentrationsmaxima verursachen. Eine erhöhte Grundkonzentration kann mit den Mittelwerten der Messreihe belegt werden. Für die Konzentrationsmaxima wird in dieser Arbeit geprüft, ob ein Kausalzusammenhang zwischen zeitlich begrenzten Spitzenwerten und Überflugereignissen besteht. Dazu werden zwei Ansätze durchgeführt:

- Identifikation der Überflugereignisse (*Überflüge gezählt*). Danach Identifikation der Überflüge, die (definitiv) keine stark erhöhte Anzahlkonzentration in

einem darauf folgenden Zeitintervall ausgelöst haben (*KFM = Kein folgendes Maximum*).

- Identifikation lokaler Maxima (*IM = Identifizierte Maxima*) in der Anzahlkonzentration. Danach der Versuch, die identifizierten Maxima einem vorangehenden Überflugereignis zuzuordnen (*IMFZ = Identifizierte Maxima + Flugzeug*).

2.4.1 Nebengrößen

Für spätere Berechnungen und diverse Annahmen, die getroffen werden müssen, ist es sinnvoll, zunächst einige Nebengrößen zu diskutieren.

Flugzeit bis Landung

Für die spätere Zuordnung der Flugzeuge zu den Überflugereignissen, basierend auf Daten des Frankfurter Flughafens, ist es notwendig, die Flugzeit von Überflug bis Landung zu kennen. Diese Flugzeit variiert je nach Messort und Flugzeug. Eine exakte Angabe der Zeit ist hier nicht möglich, da auch die vorhandenen Daten verschiedener Institutionen (Flughafen, Lärmmessung) nicht exakt übereinstimmen. Unter Sichtung der eigenen Überflug-Logs und der Daten des Flughafens wurde die ungefähre Zeit bis zur Landung für jeden Messort bestimmt.

Zeitraum zwischen Überflügen

Für die Zuordnung einzelner lokaler Maxima der Partikelkonzentration zu dazugehörigen Überflugereignissen ist es wichtig, die Zeit zwischen einzelnen Überflügen zu kennen. Die Mindestzeit zwischen einzelnen Überflügen für jede individuelle Messung ist speziell hervorzuheben. Als Beispiel können, bei einer Mindestzeit von zwei Minuten zwischen Überflügen, zwei aufeinanderfolgende Maxima im Abstand von einer Minute nicht beide eindeutig dem gleichen Flugzeug zugeordnet werden.

Die Zeit zwischen Überflügen variiert stark, liegt jedoch meist zwischen 1 bis 2 min. Diese Variabilität erschwert die Zuordnung lokaler Maxima zu Überflügen erheblich, da keine Standard Annahme getroffen werden kann. Die Mindestzeit zwischen zwei Überflügen liegt meist bei ca. einer Minute.

Zeitraum Überflug bis Maximum

Um Lokale Maxima und Überflugereignisse einander zuordnen zu können, wird ein Maß der Transportgeschwindigkeit der UFP von der Flugzeugturbine bis zur Messung

am Boden mit dem CPC benötigt. Die Literatur bietet hier bisher keine zuverlässigen Aussagen.

Die Transportdauer der Abgasfahne bis zum Boden wird von vielen Variablen beeinflusst. Horizontalwind, Stabilität und Entwicklung der Grenzschicht sind schwer abschätzbare atmosphärische Faktoren. Individuelle Unterschiede im Anflug, sowie der verschiedenen Flugzeugtypen erschweren allgemeingültige Annahmen weiter.

[Unterstrasser et al., 2014] hat berechnet, dass ein Flugzeug ähnlich einer Boeing 747, in der freien Atmosphäre eine Abgaswolke hinterlässt, die nach 3 Minuten ca. 450 m Vertikalversatz in Richtung Boden hat. Für eine konvektive Grenzschicht während der Mittagsstunden in Los Angeles (USA) hat [Riley et al., 2016] für ein Flugzeug in 500 m Höhe eine Transportdauer bis zum Boden von 3-8 min berechnet.

Bedingt durch den Mangel an Referenzwerten wurde versucht, die Transportdauer von Überflug bis zum lokalen Maximum der Anzahlkonzentration, anhand von starken Maxima und isolierten vorangehenden Überflügen, individuell für jede Messreihe empirisch abzuschätzen. Dem geht zwangsweise eine ursprüngliche Annahme von Kausalität zwischen gewähltem Maximum und Überflug voraus. Diese Abschätzung ist aufgrund der vielen beeinflussenden Faktoren unsicher und störanfällig.

2.4.2 Überflüge ohne folgendes Maximum (KFM)

Die sicherste verwendete Methode ist das Ausschließen einer erhöhten Partikelanzahlkonzentration nach einem Überflugereignis: Es findet sich kein folgendes Maximum (KFM) nach einem Überflug. Dazu wurden konservative Annahmen getroffen:

$$N_{t_{\ddot{u}}} * 1.1 > N_{t_{\ddot{u}+1}, \dots, t_{\ddot{u}+301}} \quad (2.1)$$

$$\text{Überflug}(t_{\ddot{u}}) \Rightarrow \text{Kein folgendes Maximum} \quad (2.2)$$

Wenn nach einem Überflugereignis zum Zeitpunkt $t_{\ddot{u}}$ die aktuelle Partikelanzahl $N(t_{\ddot{u}})$ in den folgenden 5 Minuten nicht um 10 % überschritten wird, hat das Flugzeug kein lokales Maximum verursacht.

Oft überschritten einzelne Werte den Schwellenwert um einen kleinen Betrag. Unter der Annahme, dass eine erhöhte Partikelanzahlkonzentration, ausgelöst durch ein Flugzeug, länger als 10 Sekunden dauert, wurde die Regel abgeschwächt. Es wurden 10 Überschreitungen des Maximalwertes $N(t_{\ddot{u}}) + 10\%$ während des Zeitraums zugelassen. Das dient dazu, den Datensatz um einzelne ausreißende Werte zu bereinigen.

Diese Methode bildet ab, welche Überflüge definitiv nicht durch Spitzenwerte in der Messreihe als UFP-Quellen nachweisbar sind und ist somit die sicherste, konservativste und strengste Nachweisgrenze zur Relation von Überflügen zu UFP-Konzentrationen dieser Masterarbeit. Auch hier sind Falschidentifikationen durch erhöhte Werte aus anderen Quellen nach einem Überflugereignis möglich.

2.4.3 Identifikation Lokaler Maxima (IM)

Die Identifikation signifikanter lokaler Maxima in den Messreihen der Anzahlkonzentration ist eine große Herausforderung. Ziel ist es, eindeutige, starke Signale aus externen Quellen von kleineren natürlichen Schwankungen und Störungen zu trennen. Eine eindeutige Isolierung ist in der freien Atmosphäre nicht möglich, daher werden mehrere Schwellenwerte (S) für eine mathematische Identifikation und eine händische Methode mit visuellem Ansatz zur Identifikation eingeführt. Werden in einer Messreihe weniger Maxima als Überflüge identifiziert, ist dies ein Beweis dafür, dass an der gemessenen Stelle und unter den meteorologischen Bedingungen nicht alle Überflüge durch Spitzenwerte in der Anzahlkonzentration nachweisbar sind.

Mathematischer Ansatz

Für den mathematischen Ansatz bieten sich Schwellenwerte (S) zur Identifikation lokaler Maxima an. Es wurden folgende Schwellenwerte ausgewählt:

- $M_{+30\%}$: gleitender zentrierter Mittelwert über 10 Minuten + 30 %
- P_{90} : gleitendes zentriertes 90. Perzentil über 10 Minuten
- P_{95} : gleitendes zentriertes 95. Perzentil über 10 Minuten

Zu jedem Zeitpunkt t_i wird der Beginn eines lokalen Maximums definiert, wenn die Differenz von $S(t)$ und $N(t)$ einen Nulldurchgang von positiven zu negativen Werten hat. Dieser Vorgang wurde für alle Schwellenwerte $S = M_{+30\%}, P_{90}, P_{95}$ einzeln durchgeführt. Dazu ist ein Beispiel in Abb. 2.17 zu sehen. Lokale Maxima sind in den Abbildungen der Messergebnisse als farbige Dreiecke, wie in Abb. 2.17, zu sehen.

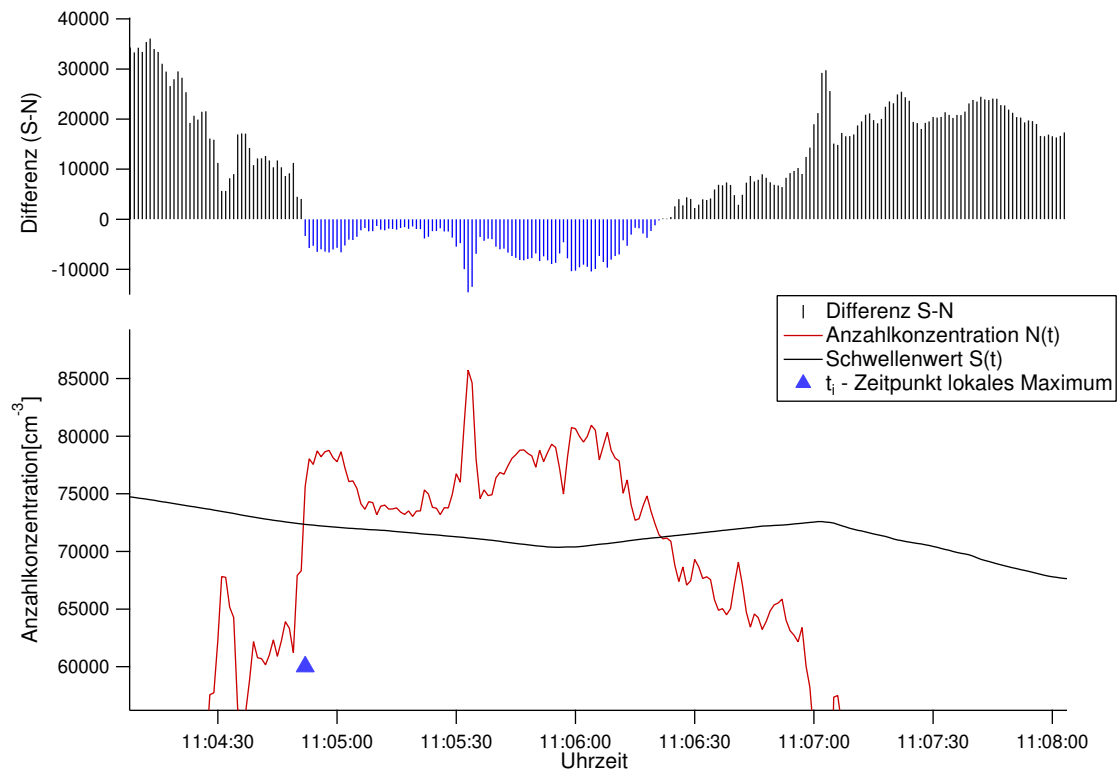


Abb. 2.17. Visualisierung der Definition eines lokalen Maximums. Der Nulldurchgang der Differenz des Schwellenwertes (S)= $M_{+30\%}$ und der Anzahlkonzentration (N) von positiven zu negativen Werten markiert den Zeitpunkt t_i , für den ein lokales Maximum deklariert wird.

$$S_{t_{i-1}} - N_{t_{i-1}} > 0 \quad (2.3)$$

und

$$S_{t_i} - N_{t_i} < 0 \quad (2.4)$$

$$t_i \Rightarrow \text{lokales Maximum}$$

Weiterhin wurden folgende Randbedingungen forciert, um Mehrfachidentifikationen in kurzen Zeitintervallen zu verhindern und kleine Schwankungen effizienter zu ignorieren:

- Ein Maximum kann nur als solches identifiziert werden, wenn die Partikelanzahl zum Zeitpunkt der Identifikation in der Messreihe größer als der Mittelwert der gesamten Messreihe ist.

$$N_{t_i} > \overline{N(t)} \quad (2.5)$$

- Ist ein Maximum identifiziert, kann in den folgenden 60 Sekunden kein weiteres Maximum gezählt werden. Dies resultiert aus der vorher diskutierten Mindestzeit zwischen Überflügen.

$$t_i \Rightarrow \text{lokales Maximum} \quad (2.6)$$

$$t_{i+1}, \dots, t_{i+60} \not\Rightarrow \text{lokales Maximum} \quad (2.7)$$

Es ist anzumerken, dass nach dieser Methode jedes lokale Maximum zeitlich auf seinen Anfang und nicht auf seinen höchsten Wert definiert wird.

Visueller Ansatz

Die komplette Messreihe wurde mit einem gleitenden zentrierten Mittel über 60 Sekunden geglättet. Danach wurden die Zeitpunkte gut sichtbarer lokaler Maxima händisch definiert. Bei dieser Methode wurde jedes lokale Maximum auf den Zeitpunkt des tatsächlichen Hochpunktes definiert.

2.4.4 Zuordnung Lokaler Maxima (IMFZ)

Um die lokalen Maxima Überflugereignissen zuzuordnen, wurde mit einer Abschätzung des Zeitraums von Überflug bis Maximum ein Zeitfenster individuell für jede Messreihe definiert. Lag ein Überflugereignis vor dem lokalen Maximum in diesem Zeitfenster, wurde das Maximum als zugeordnet gewertet.

Ist für ein Experiment keine Abschätzung des Zeitfensters möglich gewesen, wurde gänzlich auf die Zuordnung verzichtet.

Das Zeitfenster für die Zuordnung der lokalen Maxima über den visuellen Ansatz ist jeweils 20 Sekunden nach hinten verschoben, um den Unterschied zwischen Beginn des Maximums und Hochpunkt des Maximums zu berücksichtigen.

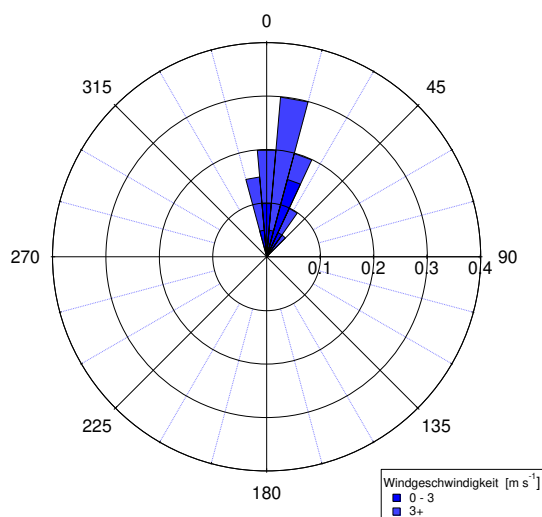
Zugeordnete lokale Maxima sind ein Indiz dafür, dass ein Maximum durch ein Überflugereignis ausgelöst wurde. Da der Zeitraum dieser Zuordnung nur eine Abschätzung ist und andere Quellen nicht ausgeschlossen sind, ist es eine Vorgehensweise mit Schwächen.

3 Messungen

Im folgenden Kapitel werden ausgewählte Messungen präsentiert. Nicht jede Kombination aus Betriebsrichtungen und Wetterverhältnissen wurde gemessen. Teilweise war es aufgrund der Wetterverhältnisse oder mangelnder Zeit zu den gegebenen Verhältnissen nicht möglich oder nicht sinnvoll, einzelne Kombinationen zu messen. Die Reihenfolge der Experimente wurde gewählt, um fortschreitend besseres Verständnis zu entwickeln und neue Aspekte einzubringen.

3.1 Experiment 1: Im Taubengrund A

Vereinzelte Sondierungsmessungen vor der Masterarbeit deuten darauf hin, dass im Industriegebiet Kelsterbach, nördlich des Flughafens hohe Partikelkonzentrationen zu verzeichnen sind. Abbildung 2.5 zeigt den exakten Messort. Die Flugzeuge sind von dieser Position aus nicht zu erkennen.



Tab. 3.1. Allgemeine Informationen

Information	Daten
Datum	03. Sept. 2018
Uhrzeit	11 - 14 Uhr
Messdauer	03:00:0h
Betriebsrichtung	Ost (-)
Überflughöhe	-
Horiz. Dist. zu Gleitlinie	-
Dist. zu Landeschwelle	3,15 km
Flugzeit bis Landung	-

Abb. 3.1. Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.

Die vorherrschende Windrichtung ist Nord-Nordost wie in Abbildung 3.1 zu sehen. Allgemeine Informationen sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Während der Messung zäh-

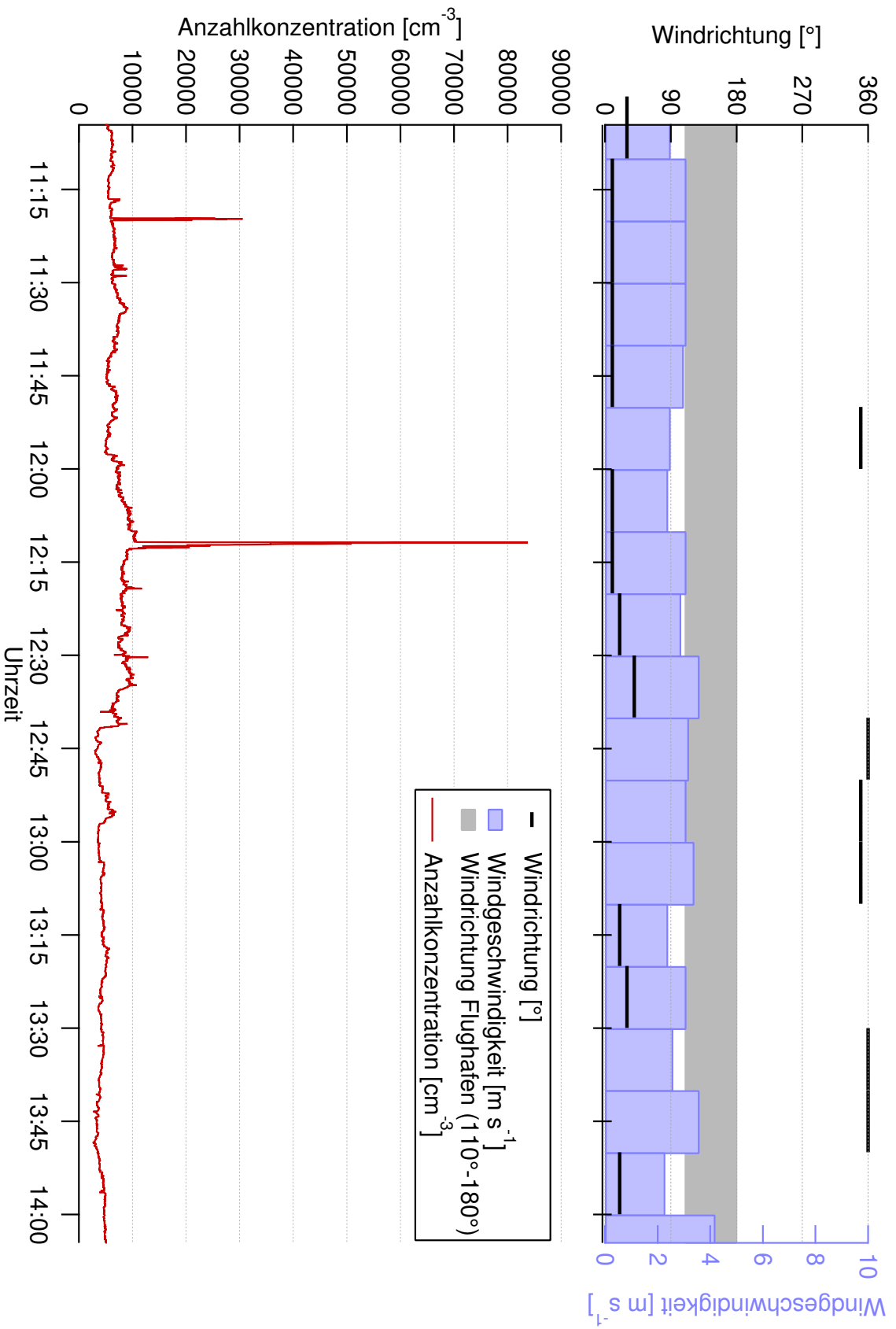


Abb. 3.2. Experiment 1: Im Taubengrund A. Die obere Abbildung zeigt die 10-Minuten Mittel der Winddaten der DWD Messstation am Flughafen. Liegt die Windrichtung im hellgrauen Balken, kommt der Wind aus Richtung des Flughafens. Die untere Abbildung zeigt die gemessene Anzahlkonzentration.

Tab. 3.2. Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugeignisse ohne folgendes Maximum (5 min).

Information	Daten
Lufttemperatur	23 °C
mittlere Windgeschwindigkeit	2,9 m s ⁻¹
Anzahlkonzentration Mittelwert	5973 cm ⁻³
Anzahlkonzentration Standardabweichung	2960 cm ⁻³
Anzahl Überflüge (Fraport)	-
Anzahl Überflüge (gezählt)	-
-davon KFM	-
Anzahl S6+	-

len die Daten des Flughafens 74 Flugbewegungen auf der Landebahn Nordwest. Der Mittelwert der gesamten Messung liegt bei ca. 6 000 cm⁻³ und die Standardabweichung bei ca. 3 000 cm⁻³. Der Mittelwert ist der niedrigste in dieser Arbeit. Zwei Maxima sind deutlich zu erkennen. Es herrscht wenig Kfz-Verkehr (oft länger als 3 Minuten). In regelmäßigen Abständen passieren einzelne LKW den Messort.

Beurteilung

Diese Messung zeigt niedrige UFP-Konzentrationen, wie sie bei Wind aus offenem und freiem Gelände ohne Störfaktoren gemessen werden. Einzelne PKW und LKW haben keinen sichtbaren starken Einfluss auf die UFP-Konzentration. Es ist anzunehmen, dass das erste hohe lokale Maximum um 11:19 Uhr auf einen vorbeilaufenden Raucher zurückzuführen ist. Das zweite hohe lokale Maximum um 12:11 Uhr ist auf kein notiertes Ereignis zurückzuführen und bleibt unerklärt.

3.2 Experiment 2: Waldsee Start

Abbildung 2.6 zeigt den exakten Messort. Die Betriebsrichtung war während der gesamten Messreihe West. Es wurden startende Flugzeuge der Startbahn 25C auf Sicht am nächsten Punkt zum Messort geloggt. Aufgrund der individuellen Flugrouten konnte kein exakter Referenzpunkt festgelegt werden. 64 Autobewegungen wurden während der Messung in unmittelbarer Nähe gezählt. Die Autos parkten in mindestens ca. 20 m Abstand zum Messstandort.

Wie in Abbildung 3.3 zu sehen ist, ist die Hauptwindrichtung Süd-West. Während der Messung wurde vereinzelt Wind aus Westen wahrgenommen. Allgemeine Infor-

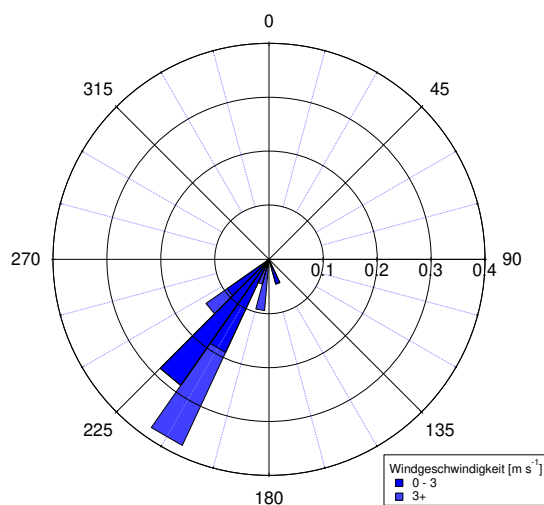


Abb. 3.3. Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.

Tab. 3.3. Allgemeine Informationen

Information	Daten
Datum	12. Sept. 2018
Uhrzeit	9 - 12 Uhr
Dauer	03:00:00 h
Betriebsrichtung	West (Start)
Überflughöhe	-
Horiz. Dist. zu Gleitlinie	-
Dist. zu Landeschwelle	-
Flugzeit bis Landung	-

mationen sind in Tabelle 3.3 aufgelistet. Die Messung ergab einen Mittelwert von ca. $9\,000\text{ cm}^{-3}$, eine Standardabweichung von ca. $1\,800\text{ cm}^{-3}$. Abbildung 3.4 zeigt die UFP-Konzentration und dazugehörige Winddaten. Die UFP-Konzentration weist eine leicht abnehmende Tendenz ohne hohe kurzzeitige Spitzen auf. Die Autobewegungen verursachen keine extremen Ausschläge.

Beurteilung

Die Messung erreicht zu keinem Zeitpunkt hohe Partikelanzahlen, wie sie mit Überflugeignissen assoziiert werden, obwohl 22 Flugbewegungen der Flugzeuggruppe S6

Tab. 3.4. Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugeignisse ohne folgendes Maximum (5 min).

Information	Daten
Lufttemperatur	22 ° - 27 °C
mittlere Windgeschwindigkeit	2,9 m s^{-1}
Anzahlkonzentration Mittelwert	9039 cm^{-3}
Anzahlkonzentration Standardabweichung	1850 cm^{-3}
Anzahl Überflüge (Fraport)	60
Anzahl Überflüge (gezählt)	56
-davon KFM	-
Anzahl S6+	22

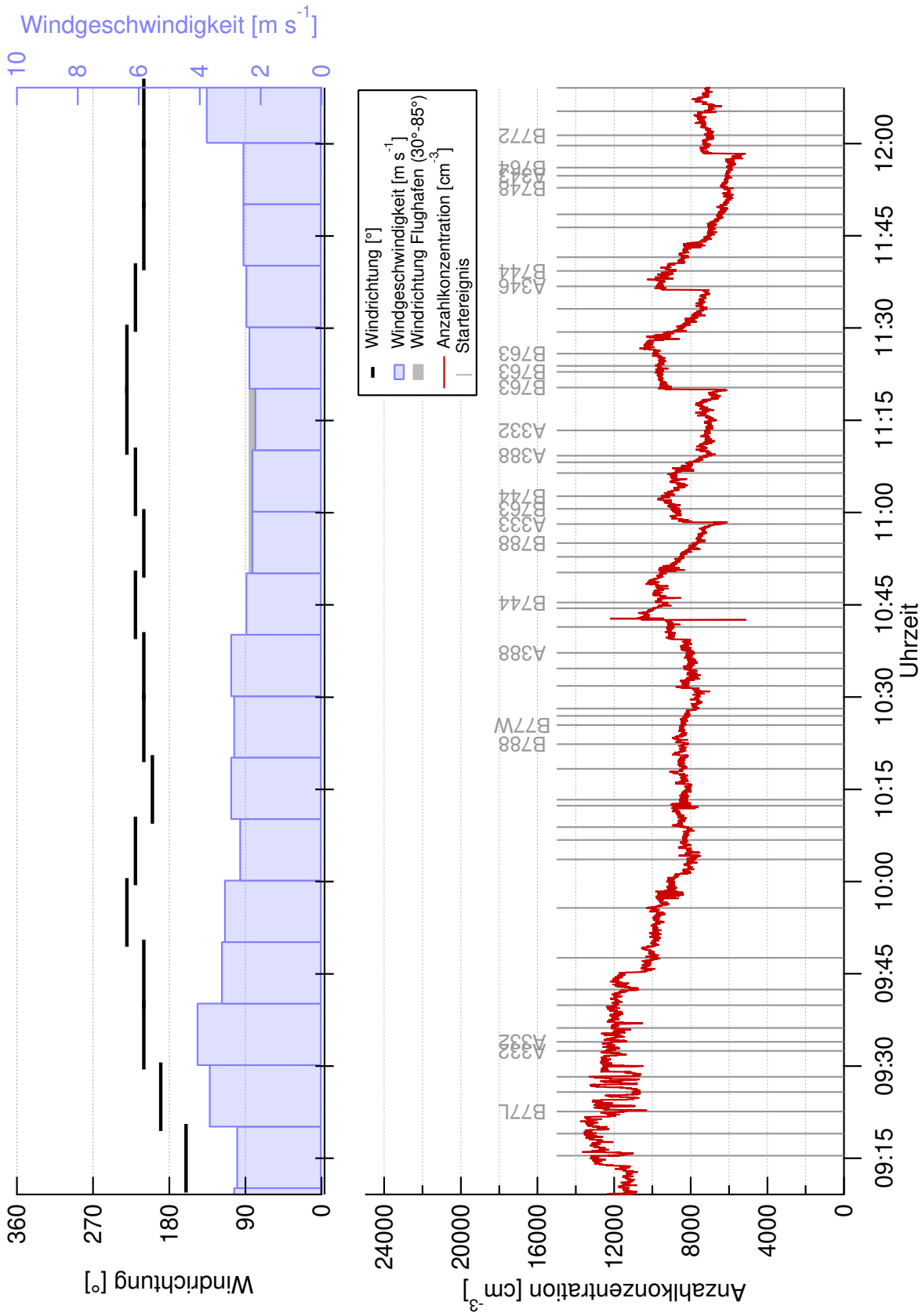


Abb. 3.4. Experiment 2: Waldsee Start. Zu lesen wie Abb 3.2. Jeder vertikale graue Balken in der unteren Abbildung repräsentiert ein Flugereignis (In diesem Fall nur Startereignisse). Bei Ereignissen von Flugzeugen der Gruppe S6 oder größer (S6+) steht der Flugzeugtyp über dem Balken.

oder größer verzeichnet wurden (S6+). Die Emissionen der startenden Flugzeuge, die alle östlich des Messortes gesichtet wurden, erreichen möglicherweise aufgrund des Windes das Messgerät nicht. Leichte Ausschläge könnten durch die Windrichtung aus Westen verursacht werden, wo sich das Kieswerk befindet.

3.3 Experiment 3: Waldsee Landung

Abbildung 2.6 zeigt den exakten Messort. Zu Beginn der Messung herrschte Betriebsrichtung Ost. Um 12:27 Uhr wurde der letzte Landungsüberflug registriert, danach wurde die Betriebsrichtung auf West gewechselt und um 12:55 Uhr der erste Start registriert. Es wurden landende Flugzeuge der Landebahn 07R auf Sicht am nächsten Punkt zum Messort geloggt.

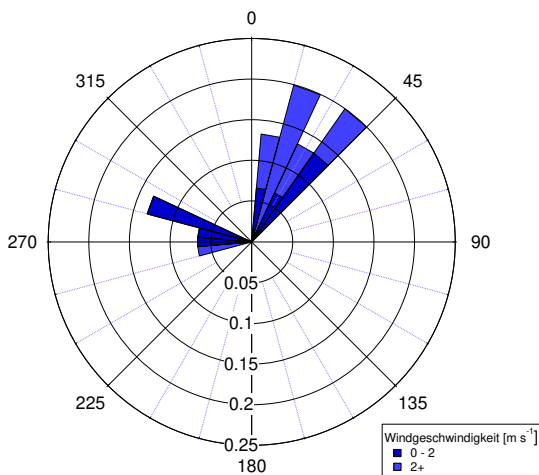


Abb. 3.5. Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.

Tab. 3.5. Allgemeine Informationen

Information	Daten
Datum	14. Sept. 2018
Uhrzeit	10:45 - 13:00 Uhr
Dauer	02:15:47 h
Betriebsrichtung	Ost (Landung)
Überflughöhe	250 - 270 m
Horiz. Dist. zu Gleitlinie	200 m
Dist. zu Landeschwelle	4,6 km
Flugzeit bis Landung	01:05 min

In Abbildung 3.3 sind die Winddaten der DWD Station zu sehen. Diese Daten zeigen eine Hauptwindrichtung aus Nordost und Windkomponenten aus Westen. Allgemeine Informationen sind in Tabelle 3.5 zu sehen. Es wurden 34 Überflüge Richtung Landebahn Süd 07R gezählt. Es wurden 4 Autobewegungen in unmittelbarer Nähe gezählt.

Die Mindestzeit zwischen den Überflügen beträgt 1:15 min und die Dauer von Überflugeignis zur Landung beträgt ca 1:05 min. Die Messung hat einen Mittelwert von ca. $45\,600\text{ cm}^{-3}$, eine Standardabweichung von ca. $16\,900\text{ cm}^{-3}$. Abbildung 3.6 zeigt

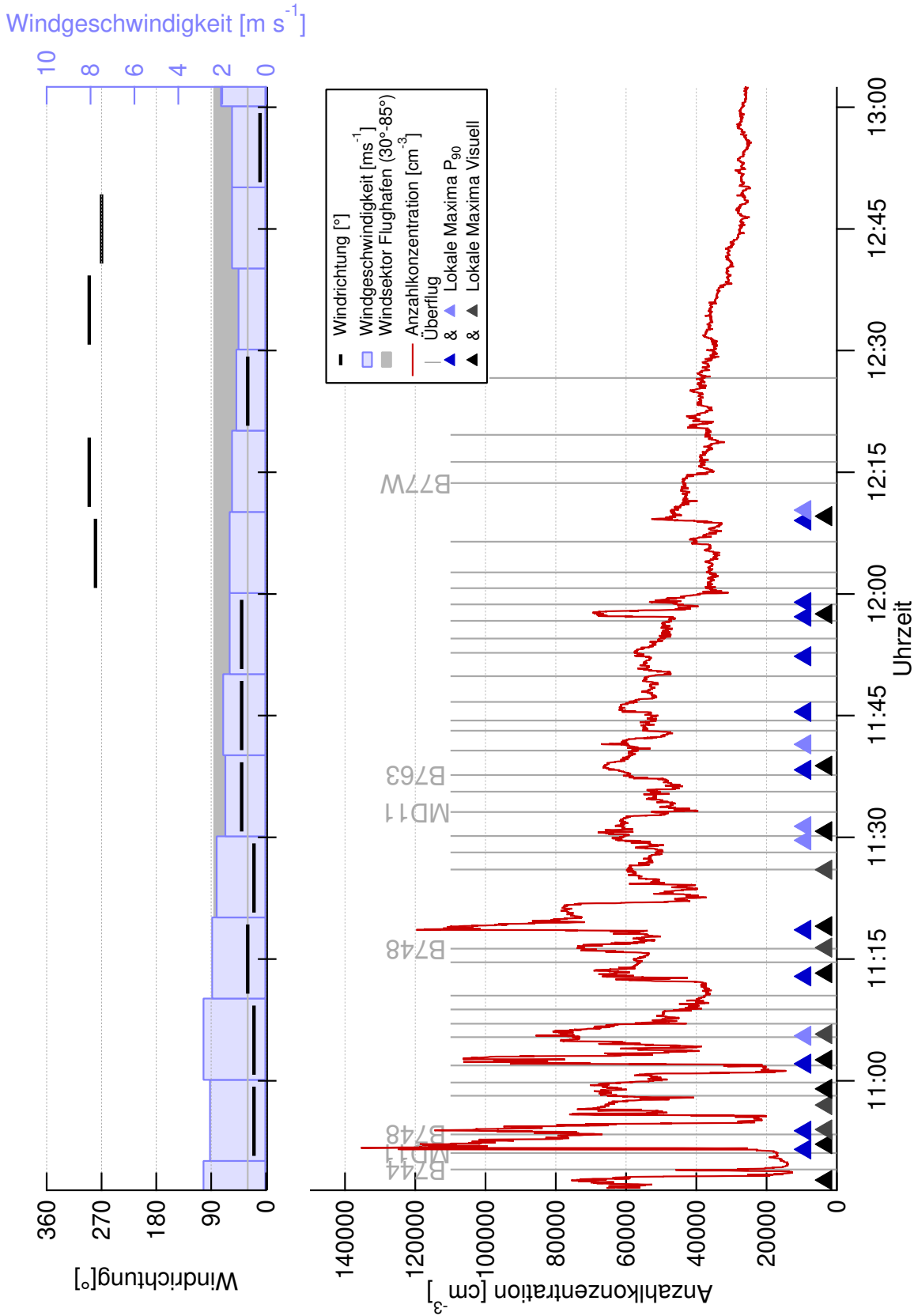


Abb. 3.6. Experiment 3: Waldsee Landung. In der oberen Abbildung sind die Windgeschwindigkeit (Balken, hellblau) und Windrichtung (Querstriche, schwarz) der DWD Messstation zu sehen. Liegt die Windrichtung im grauen Balken, kommt der Wind aus Richtung des Flughafens. Die Untere Abbildung zeigt die Anzahlkonzentration (rot), Überflugereignisse (Vertikalstriche, grau), identifizierte lok. Maxima ohne Zuordnung (Dreiecke, hell) und zugeordnete lok. Maxima (Dreiecke, dunkel).

Tab. 3.6. Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugereignisse ohne folgendes Maximum (5 min).

Information	Daten
Lufttemperatur	22 °C
mittlere Windgeschwindigkeit	2 m s ⁻¹
Anzahlkonzentration Mittelwert	45609 cm ⁻³
Anzahlkonzentration Standardabweichung	16922 cm ⁻³
Anzahl Überflüge (Fraport)	34
Anzahl Überflüge (gezählt)	34
-davon KFM	10 (29,4 %)
Anzahl S6+	7

die UFP-Konzentration und dazugehörige Winddaten.

In der ersten Stunde der Messung ist die Partikelanzahl sehr volatil mit hohen Werten und extremen Ausschlägen. Zu Beginn der Messreihe fallen die Werte bis unter 20 000 und verbleiben in der restlichen Messreihe über dieser Grenze. Im weiteren Verlauf nimmt die Anzahlkonzentration tendenziell ab. In der letzten Stunde ist die Abnahme bis auf vereinzelte Ausnahmen fast stetig. Dies weist auf eine anfängliche Steigerung der Hintergrundkonzentration hin. Ab 11:20 Uhr finden regelmäßig Überflüge (auch von Großflugzeugen S6+) statt, ohne extreme UFP-Steigerungen auszulösen.

In Tabelle 3.7 sind die identifizierten Maxima und Zuordnungen aufgelistet. Die Methoden P₉₀ und Visuell sind in Abbildung 3.6 als Dreiecke individuell abgebildet. Unter der Annahme, dass jedes lokale Maximum durch ein Flugzeug ausgelöst wird, weist P₉₀ mit 47,1 % die höchste Trefferquote auf. Mit 32,4 % aller Überflugereignisse einem lokalen Maximum zugeordnet, hat auch hier die Methode P₉₀ den höchsten Wert.

Zehn Überflugereignisse (29.4 %) zeigen kein dezidiertes Signal (KFM) in der UFP-Konzentration bis 5 Minuten nach Überflug.

Beurteilung

Die Schwankung der UFP-Konzentration weist auf eine nichtstetige Quelle hin. Diese Quelle könnten UFP aus Überflugereignissen sein. Ursache für diesen Unterschied

Tab. 3.7. Identifizierte lokale Maxima und Zuordnungen nach Methode. Die Zuordnungen beziehen sich auf einen Zeitraum von 2 min - 3 min vor Maximum. Die Procente sind in Bezug auf die gezählten Überflüge angegeben (Anzahl: 34).

Methode	Maxima		Zugeordnet	
	Anzahl	Prozent[%]	Anzahl	Prozent[%]
M _{+30%}	9	26.5	8	23.5
P ₉₀	16	47.1	11	32.4
P ₉₅	12	35.3	9	26.5
Visuell	15	44.1	9	26.5

könnte ebenfalls die Entwicklung der Grenzschicht sein. Die Entwicklung der Hintergrundbelastung (zunächst wachsend, dann abfallend) ist nicht eindeutig auf Überflüge zurückzuführen und könnte sowohl den Flughafen, als auch die Überflüge als Quelle haben. Der Unterschied der Ausschläge vor und nach 11:30 Uhr ist hervorzuheben. Nach 11:30 Uhr werden keine extremen Ausschläge, wie sie vor 11:30 Uhr zu sehen sind, gemessen.

Drei der vier höchsten Ausschläge folgen auf Überflüge von Großflugzeugen (S6+). Wird angenommen, dass die lokalen Maxima der UFP von Überflügen ausgelöst werden und die Emissionen von B748 um 10:53 Uhr in weniger als 8 Minuten am Messgerät angekommen sein müssten, folgt daraus, dass ein Flugzeug einer kleineren Größenklasse oder eine andere Quelle ein vergleichbar intensives Maximum (11:02 Uhr) hervorgerufen haben muss. Die Exposition des Messgeräts zur Abgasfahne kann unterschiedliche UFP-Konzentrationen zur Folge haben, je nachdem, ob das Zentrum der Abgasfahne das Messgerät passiert oder nicht.

Ca. ein Drittel der Überflüge haben keinen messbaren Effekt in Form von Konzentrationsspitzen in der UFP-Konzentration verursacht. Unter der Annahme, dass jedes identifizierte lokale Maximum durch ein Überflugereignis ausgelöst wurde, liegt der Wert (mit höchstens 47,1 %) unter 50%. Eine eindeutige Steigerung der mittleren UFP-Konzentration im Verlauf von schnell aufeinander folgenden Überflugereignissen kann nicht beobachtet werden.

3.4 Experiment 4: DFS-Turm

Abbildung 2.7 zeigt den exakten Messort. Während der gesamten Messung herrschte Betriebsrichtung Ost. Es wurden landende Flugzeuge der Landebahn 07R auf Sicht

am nächsten Punkt zum Messort geloggt. Es herrschte starker Verkehr auf dem Airportring und dem Flughafengelände, der Parkplatz wurde regelmäßig befahren.

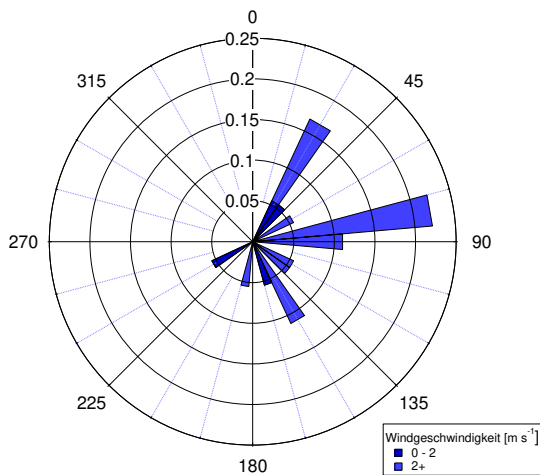


Abb. 3.7. Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.

Tab. 3.8. Allgemeine Informationen

Information	Daten
Datum	05. Sept. 2018
Uhrzeit	14:20 - 17:20 Uhr
Dauer	03:00:00 h
Betriebsrichtung	Ost (Landung)
Überflughöhe	70 - 80 m
Horiz. Dist. zu Gleitlinie	230 m
Dist. zu Landeschwelle	1 km
Flugzeit bis Landung	20 s

Tab. 3.9. Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflüge ohne folgendes Maximum (5 min).

Information	Daten
Lufttemperatur	28 °-30 °C
mittlere Windgeschwindigkeit	2,4 m s ⁻¹
Anzahlkonzentration Mittelwert	16231 cm ⁻³
Anzahlkonzentration Standardabweichung	12047 cm ⁻³
Anzahl Überflüge (Fraport)	76
Anzahl Überflüge (gezählt)	75
-davon KFM	7 (9,3 %)
Anzahl S6+	17

In Abbildung 3.7 sind die Winddaten der Messtation des DWD zu sehen. Die Daten zeigen wechselnde Windrichtungen mit einer Tendenz in Richtung Nordost. Allgemeine Informationen sind in Tabelle 3.8 zu sehen. Es wurden 75 Überflüge Richtung Landebahn Süd 07R und 73 Starts auf der Startbahn West gezählt. Es wurden 324 LKW auf dem Airportring und auf dem Flughafengelände gezählt.

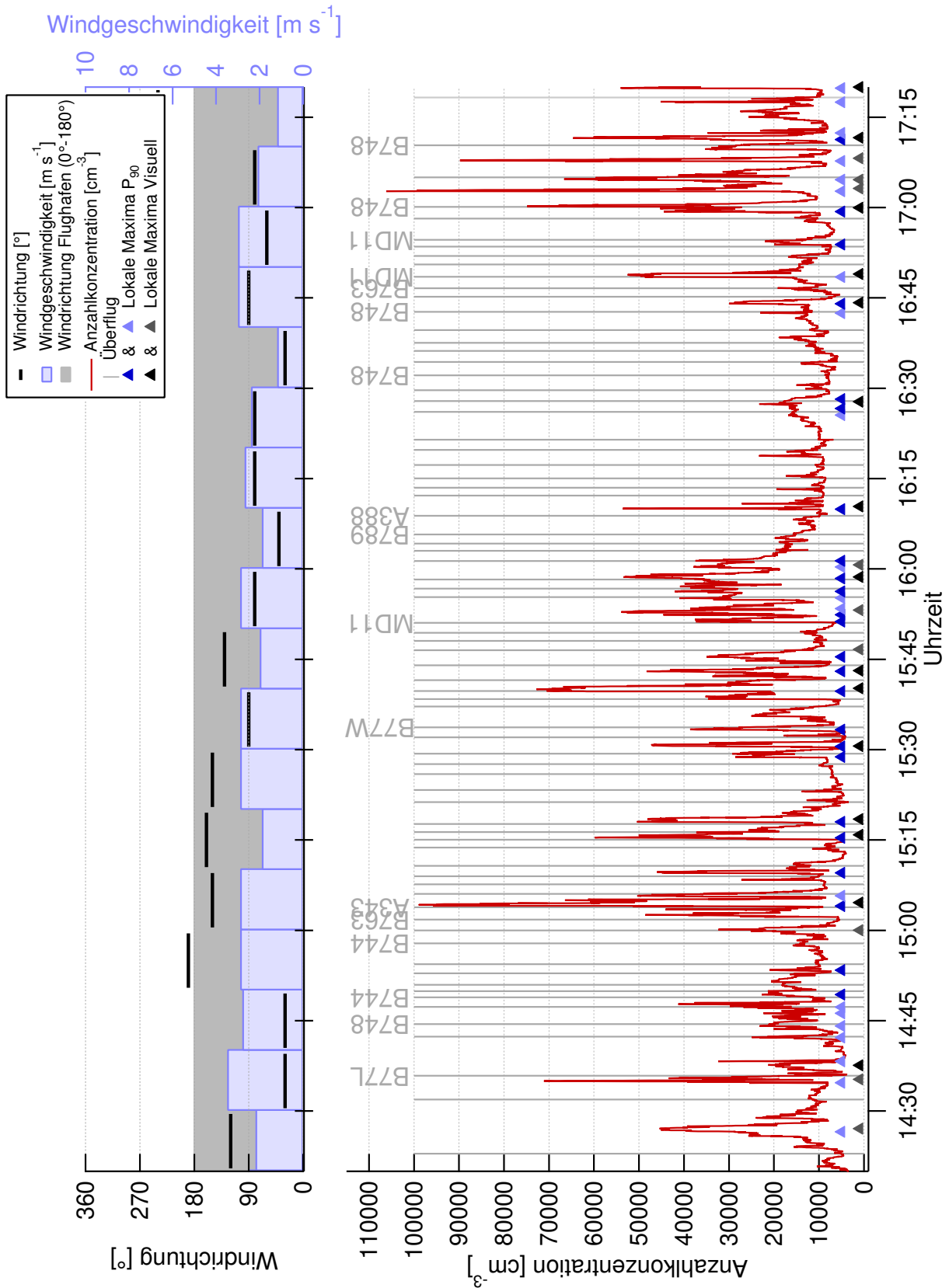


Abb. 3.8. Experiment 4: DFS-Turm. Zu lesen wie Abb. 3.6.

Um 15:03 und 16:55 Uhr fuhren Flugzeuge auf dem Flughafengelände entlang der Nord-Süd-Achse, die sich nicht, wie alle anderen Flugzeuge zum Start positionierten, sondern lediglich vorbeifuhren. Die genaue Bahn konnte nicht identifiziert werden. Von 17:05 bis 17:09 Uhr parkte ein LKW ca 5 m entfernt mit laufendem Motor.

Die Mindestzeit zwischen Überflügen betrug ca. 1 min und die Dauer eines Überflugeignis bis zur Landung beträgt ca. 20 s. Die Messung hat einen Mittelwert von ca. $16\,200\text{ cm}^{-3}$, eine Standardabweichung von ca. $12\,000\text{ cm}^{-3}$. Abbildung 3.8 zeigt die UFP-Konzentration und dazugehörige Winddaten.

Die UFP-Konzentration zeigt viele Ausschläge $>40\,000\text{ cm}^{-3}$ und fällt regelmäßig unter $10\,000\text{ cm}^{-3}$, was deshalb als Hintergrundkonzentration angenommen werden kann. Zwischen 16:15 bis 16:45 Uhr sind im Vergleich zum Rest der Messreihe weniger lokale Maxima identifiziert, obwohl durchgehend regelmäßiger Flugverkehr herrscht. Zwischen 15:00 bis 16:00 Uhr und nach 17 Uhr sind die meisten und stärksten Maxima identifiziert. Die höchsten Maxima um 15:04 Uhr und 17:02 Uhr sind kurz nach den parallel vorbeifahrenden Flugzeugen aufgezeichnet.

In Tabelle 3.10 sind die identifizierten Maxima und Zuordnungen aufgelistet. Die Methoden P_{90} und Visuell sind in Abbildung 3.8 als Dreiecke individuell abgebildet. Unter der Annahme, dass jedes lokale Maxima durch ein Flugzeug ausgelöst wird, weist $M_{+30\%}$ mit 73.3% die höchste Trefferquote auf. Mit 47,6% aller Überflugeignisse einem lokalen Maximum zugeordnet, hat auch hier die Methode $M_{+30\%}$ den höchsten Wert.

Sieben Überflugeignisse (9,3%) zeigen kein dezidiertes Signal (KFM) in der UFP-Konzentration bis 5 Minuten nach Überflug.

Tab. 3.10. Identifizierte lokale Maxima und Zuordnungen nach Methode. Die Zuordnungen beziehen sich auf einen Zeitraum von 0 min - 1:30 min vor Maximum. Die Prozente sind in Bezug auf die gezählten Überflüge angegeben (Anzahl: 75).

Methode	Maxima		Zugeordnet	
	Anzahl	Prozent[%]	Anzahl	Prozent[%]
$M_{+30\%}$	55	73.3	35	46.7
P_{90}	44	58.7	24	32.0
P_{95}	29	38.7	17	22.7
Visuell	24	32.0	14	18.7

Beurteilung

Die starke Fluktuation der UFP-Konzentration weist auf eine nichtstetige Quelle hin. Diese Quelle könnten UFP aus Überflugereignissen und Startereignissen sein. Starke Entwicklung der Grenzschicht kann um diese Uhrzeit ausgeschlossen werden.

Der Messort befindet sich südöstlich des Flughafengeländes. Die Flughafengates als Hauptverkehrspunkt liegen nordöstlich und die Windrichtungen sind nicht stetig. Es erscheint möglich, dass saubere Luft vom freien und wenig befahrenen Gelände südlich des Flughafens die niedrige Hintergrundbelastung begründet. Bei so niedrigen Überflughöhen kurz vor Beginn des Flughafengeländes wurden höhere Extremwerte erwartet. Es wird vermutet, dass meist nicht die Luftpakete mit dem Hauptteil der Turbinenemissionen am Messgerät ankamen.

Flugzeuge großer Größenklasse (S6+) fallen nicht individuell als verstärkte Quellen in der Messreihe auf.

Weniger als 10 % der Überflüge haben keinen messbaren Effekt in der UFP-Konzentration hinterlassen. Unter der Annahme, dass jedes identifizierte lokale Maximum durch ein Überflugereignis ausgelöst wurde, liegt der Wert mit maximal (73.3%) in einem Bereich, der einen möglichen Zusammenhang von Überflügen und hohen Partikelkonzentration rechtfertigt. Dies ist jedoch aufgrund der sicher vorhandenen anderen Quellen (73 Starts) zu relativieren, da somit die Anzahl der Flugbewegungen auf 148 steigt und lediglich 37% davon Maxima verursacht hätten.

3.5 Experiment 5: Im Taubengrund B

Abbildung 2.5 zeigt den exakten Messort. Während der gesamten Messung herrschte Betriebsrichtung West. Es wurden landende Flugzeuge der Landebahn 25R auf Sicht direkt beim Überflug geloggt. Es herrschte leichter Kfz-Verkehr, hauptsächlich bestehend aus LKW.

In Abbildung 3.9 sind die Winddaten der Messstation des DWD zu sehen. Die Daten zeigen keine Hauptwindrichtung. Die wahrgenommene Windrichtung konnte vor Ort an einer Flagge identifiziert werden. Anfängliche Windrichtung war Nord. Diese drehte 10:55 Uhr auf Süd.

Allgemeine Informationen sind in Tabelle 3.11 zu sehen. Es wurden 23 Überflüge Richtung Landebahn Nordwest 25R gezählt. Kfz-Verkehr wurde nicht aufgezeichnet,

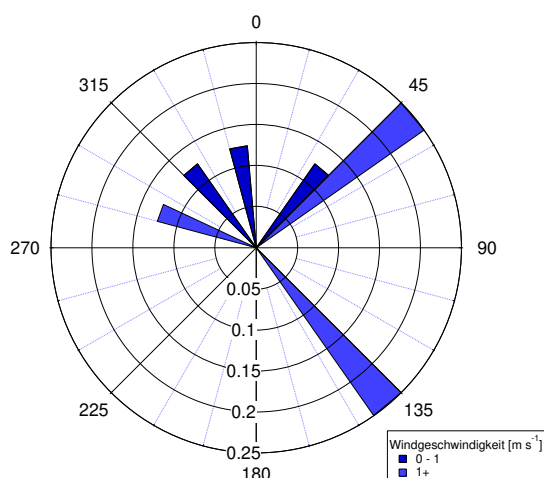


Abb. 3.9. Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.

war jedoch gering.

Die Mindestzeit zwischen Überflügen beträgt 1:30 min und die Dauer von Überflügeignis zu Landung beträgt ca. 15 s. Die Messung hat einen Mittelwert von $88\,800\text{ cm}^{-3}$, eine Standardabweichung von $64\,086\text{ cm}^{-3}$. Abbildung 3.10 zeigt die UFP-Konzentration und dazugehörige Winddaten.

Die Messreihe zeigt wenige lokale Maxima und ist hauptsächlich durch eine Veränderung der Hintergrundkonzentration gekennzeichnet. Diese beginnt bei ca. 20 000

Tab. 3.12. Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflügeignisse ohne folgendes Maximum (5 min).

Information	Daten
Lufttemperatur	11 °-14 °C
mittlere Windgeschwindigkeit	1 m s ⁻¹
Anzahlkonzentration Mittelwert	88800 cm ⁻³
Anzahlkonzentration Standardabweichung	64086 cm ⁻³
Anzahl Überflüge (Fraport)	23
Anzahl Überflüge (gezählt)	23
-davon KFM	8 (34,8 %)
Anzahl S6+	4

Tab. 3.11. Allgemeine Informationen

Information	Daten
Datum	07. Nov. 2018
Uhrzeit	10:30 - 11:30 Uhr
Dauer	01:06:29 h
Betriebsrichtung	West (Landung)
Überflughöhe	50-60 m
Horiz. Dist. zu Gleitlinie	40 m
Dist. zu Landeschwelle	730 m
Flugzeit bis Landung	15 s

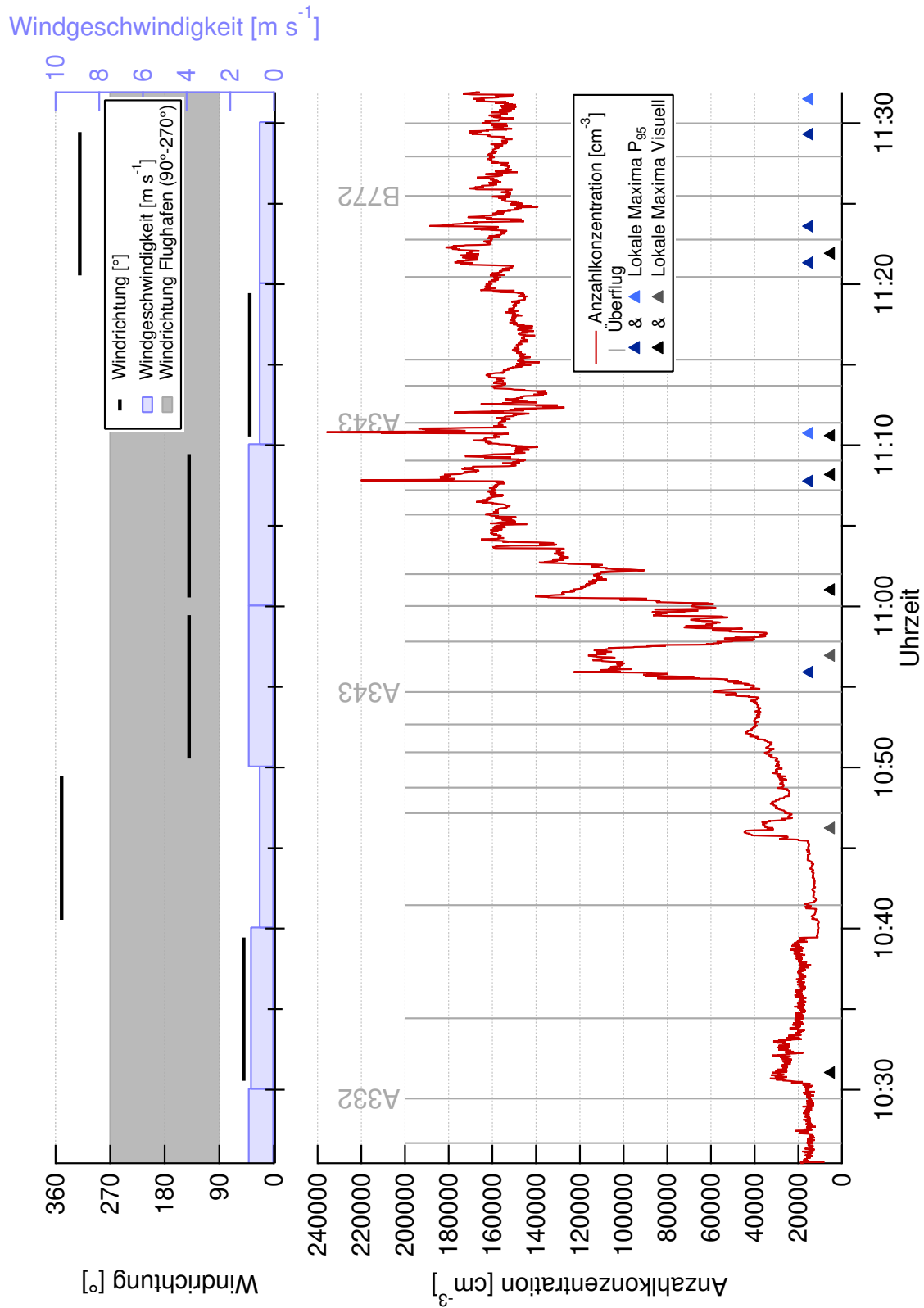


Abb. 3.10. Experiment 5: Im Taubengrund B. Zu lesen wie Abb. 3.6.

cm^{-3} , steigert sich bis 11:45 Uhr auf ca. 40 000 cm^{-3} und erreicht im folgenden Verlauf ca. 160 000 cm^{-3} . Der A332 um 10:29 Uhr und A343 um 10:54 Uhr werden von lokalen Maxima gefolgt. Um 10:56 Uhr, 11:07 Uhr und 11:11 Uhr sind die signifikantesten Maxima zu erkennen.

In Tabelle 3.13 sind die identifizierten Maxima und Zuordnungen aufgelistet. Die Methoden P_{95} und Visuell sind in Abbildung 3.10 als Dreiecke individuell abgebildet. Unter der Annahme, dass jedes lokale Maximum durch ein Flugzeug ausgelöst wird, weist P_{90} mit 47,8 % die höchste Trefferquote auf. Mit 39,1 % aller Überflugereignisse einem lokalen Maximum zugeordnet, hat auch hier die Methode P_{90} den höchsten Wert.

Acht Überflugereignisse (34,8 %) zeigen kein dezidiertes Signal (KFM) in der UFP-Konzentration bis 5 Minuten nach Überflug.

Tab. 3.13. Identifizierte lokale Maxima und Zuordnungen nach Methode. Die Zuordnungen beziehen sich auf einen Zeitraum von 0 min - 1:30 min vor Maximum. Die Prozente sind in Bezug auf die gezählten Überflüge angegeben (Anzahl: 23).

Methode	Maxima		Zugeordnet	
	Anzahl	Prozent[%]	Anzahl	Prozent[%]
$M_{+30\%}$	3	13.0	2	8.7
P_{90}	11	47.8	9	39.1
P_{95}	7	30.4	5	21.7
Visuell	12	52.2	5	21.7

Beurteilung

Es herrschen niedrige Windgeschwindigkeiten und der Messort befindet sich direkt unterhalb der einfliegenden Flugzeuge, kurz vor der Landung. Die einzelnen Überflugereignisse sind nach Tabelle 3.13 trotz der unmittelbaren Nähe nicht eindeutig in der UFP-Konzentration nachvollziehbar. Die UFP-Konzentration scheint durch andere Faktoren und Quellen bestimmt zu sein.

3.6 Experiment 6: Kapelle

Abbildung 2.8 zeigt die exakten Messorte. Während der gesamten Messung herrschte Betriebsrichtung Ost. Es wurden landende Flugzeuge der Landebahn 07L auf Sicht

direkt beim Überflug geloggt. Während der Messung wurde der Messort von Kapelle A zu Kapelle B gewechselt. Dies ist in den Messdaten durch einen schwarzen Balken kenntlich gemacht.

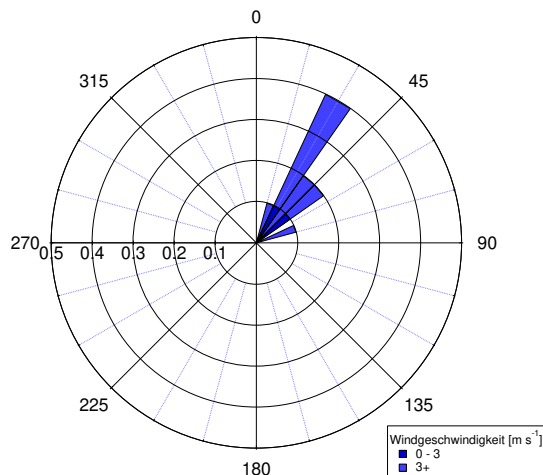


Abb. 3.11. Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.

In Abbildung 3.11 sind die Winddaten der Messstation des DWD zu sehen. Die Daten zeigen als Hauptwindrichtung Nordost. Wahrgenommener Wind war Ost-Nordost.

Allgemeine Informationen sind in Tabelle 3.14 zu sehen. Es wurden 17 Überflüge Richtung Landebahn Nordwest 07L gezählt. Kfz-Verkehr ist direkt an den Messorten nicht möglich.

Die Mindestzeit zwischen Überflügen beträgt 2:02 min und die Dauer von Überflüge ereignis zu Landung beträgt ca. 30 s.

Die gesamte Messung hat einen Mittelwert von ca. $16\,800\text{ cm}^{-3}$, eine Standardabweichung von ca. $21\,900\text{ cm}^{-3}$. Der Mittelwert der Messung am Standort Kappelle B ist ca. doppelt so hoch wie der Mittelwert von Standort Kapelle A. Die Standardabweichung für Messungen am Standort Kapelle B ist um ein Vielfaches erhöht. Abbildung 3.12 zeigt die UFP-Konzentration und dazugehörige Winddaten.

In dieser Messreihe können UFP-Überflugprofile eindeutig für einzelne Überflüge identifiziert werden. Die Messreihe beginnt mit einer Hintergrundkonzentration von ca. $10\,000\text{ cm}^{-3}$ und ist am Ort Kapelle A nicht von Überflüge ereignissen beeinflusst.

Tab. 3.14. Allgemeine Informationen

Information	Daten
Datum	06. Nov. 2018
Uhrzeit	13:00 - 14:45 Uhr
Dauer	01:41:27 h
Betriebsrichtung	Ost (Landung)
Überflughöhe	110 - 130 m
Horiz. Dist. zu Gleitlinie	0 - 130 m
Distanz zu Landeschwelle	2 km
Flugzeit bis Landung	30 s

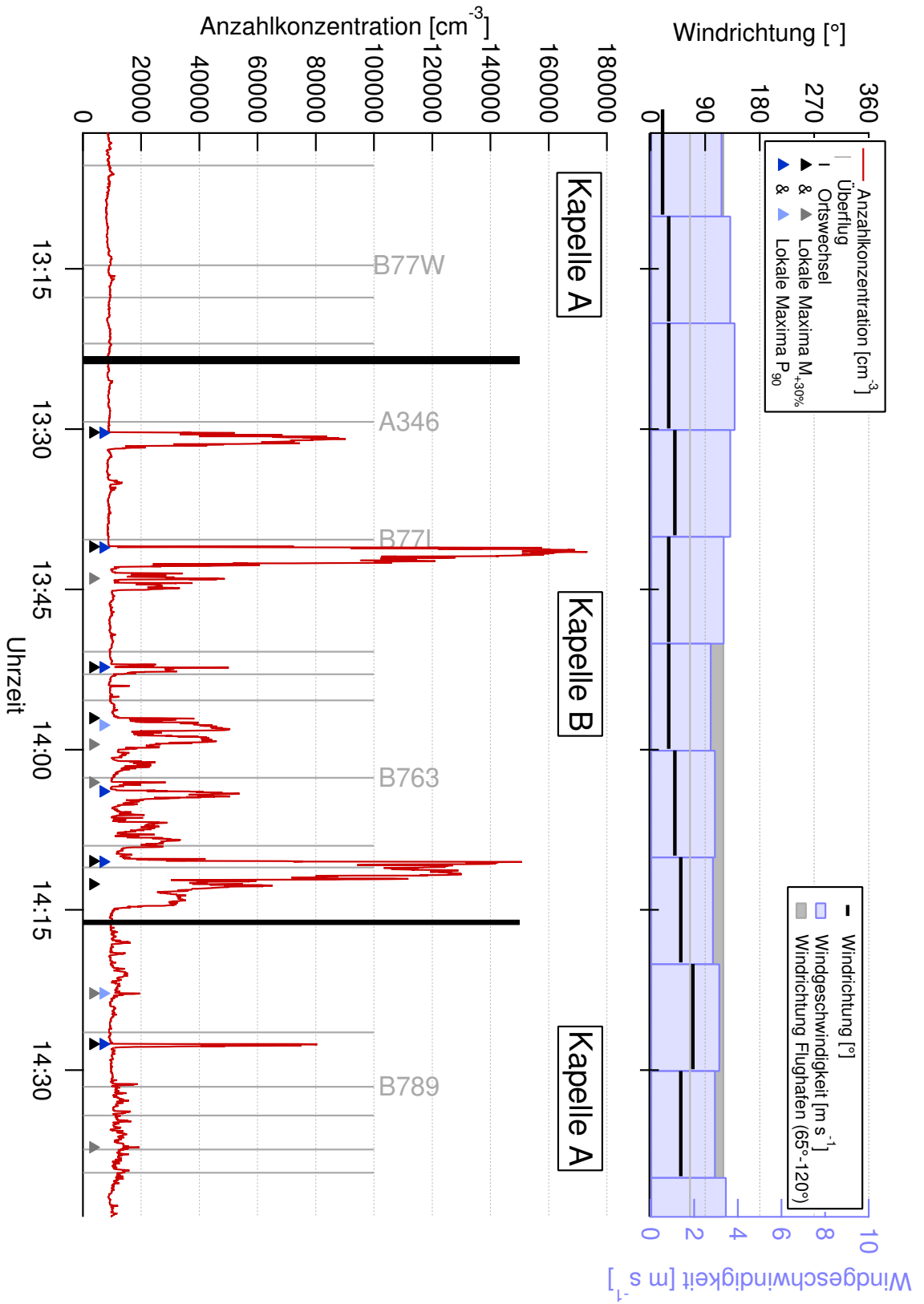


Abb. 3.12. Experiment 6: Kapelle. Zu lesen wie Abb. 3.6.

Tab. 3.15. Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugereignisse ohne folgendes Maximum (5 min).

Information	Daten	
Lufttemperatur	13 °C	
mittlere Windgeschwindigkeit	3,4 m s ⁻¹	
Anzahl Überflüge (Fraport)	19	
Anzahl Überflüge (gezählt)	17	
-davon KFM	6 (35,3 %)	
Anzahl S6+	5	
Anzahlkonz. Mittelwert	Gesamt	16800 cm ⁻³
	Kapelle A	10400 cm ⁻³
	Kapelle B	22900 cm ⁻³
Anzahlkonz. Standardabw.	Gesamt	21879 cm ⁻³
	Kapelle A	4100 cm ⁻³
	Kapelle B	28978 cm ⁻³

Nach Wechsel zum Messort Kapelle B sind nach Überflügen unter anderem individuelle, stark ausgeprägte lokale Maxima zu erkennen (13:30 Uhr, 13:41 Uhr, 14:11 Uhr). Nach Rückkehr zu Messort Kapelle A sind bis auf eine Ausnahme keine extremen UFP-Ausschläge gemessen worden.

Das Maximum um 13:30 Uhr beginnt 58 s nach Überflug und dauert 1:35 min an. Das Maximum um 13:41 Uhr beginnt 40 s nach Überflug und dauert 2:00 min an. Beide Maxima weisen eine einseitige Kopf-Schulter-Formation auf und auf das Maximum um 13:41 Uhr folgen unmittelbar kleine weitere Maxima. Für eine Analyse der Profileigenschaften nach einem Überflug konnten während der gesamten Masterarbeit nicht genügend eindeutige UFP-Profile isoliert werden. Beide Maxima wurden vom charakteristischen Geräusch von Wirbelschleppen begleitet.

In Tabelle 3.16 sind die identifizierten Maxima und Zuordnungen aufgelistet. Die Methoden P_{90} und $M_{+30\%}$ sind in Abbildung 3.12 als Dreiecke individuell abgebildet. Unter der Annahme, dass jedes lokale Maximum durch ein Flugzeug ausgelöst wird, weist $M_{+30\%}$ mit 70,6 % die höchste Trefferquote auf. Mit 41,2 % aller Überflugereignisse einem lokalen Maximum zugeordnet, hat auch hier die Methode $M_{+30\%}$ den höchsten Wert. Bei Standort Kapelle A sind Überflüge fast nicht nachweisbar, während bei Standort Kapelle B über 50 % der Überflüge ein Maximum verursachen.

Sechs Überflugereignisse (35,3 %) zeigen kein dezidiertes Signal (KFM) in der UFP-Konzentration bis 5 Minuten nach Überflug.

Tab. 3.16. Identifizierte lokale Maxima und Zuordnungen nach Methode. Die Zuordnungen beziehen sich auf einen Zeitraum von 0:30 min - 1:30 min vor Maximum. Die Prozente sind in Bezug auf die gezählten Überflüge angegeben.

	Methode	Maxima		Zugeordnet	
		Anzahl	Prozent[%]	Anzahl	Prozent[%]
Gesamt Überflüge:17	M _{+30%}	12	70.6	7	41.2
	P ₉₀	8	47.1	6	35.3
	P ₉₅	9	52.9	6	35.3
	Visuell	7	41.2	6	35.3
Kapelle A Überflüge: 9	M _{+30%}	3	33,3	1	11,1
	P ₉₀	2	22,2	1	11,1
	P ₉₅	3	33,3	1	11,1
	Visuell	1	11,1	1	11,1
Kapelle B Überflüge: 8	M _{+30%}	9	112,5	6	75
	P ₉₀	6	75	5	62,5
	P ₉₅	6	75	5	62,5
	Visuell	6	75	5	62,5

Beurteilung

Diese Messreihe zeigt das grundlegende Problem der einzelnen lokalen Messung von UFP-Konzentrationen zur Identifikation von Überflügen. Der Ortswechsel macht deutlich, dass leicht veränderte Platzierung radikal verschiedene Messergebnisse erzeugt. Für diese spezielle Messung mit Maxima, die eindeutig auf Flugzeuge zurückzuführen sind, ist der Mittelwert der Anzahlkonzentration auf das Doppelte gestiegen. Trotz der eindeutig sichtbaren UFP-Überflugprofile konnte für ein Drittel der Überflüge kein Signal in den folgenden 5 Minuten gemessen werden.

3.7 Experiment 7: Flörsheimer Feld

Abbildung 2.9 zeigt die exakten Messorte. Während der gesamten Messung herrschte Betriebsrichtung Ost. Es wurden landende Flugzeuge der Landebahn 07L auf Sicht direkt beim Überflug geloggt. Die Temperatur während der Messung war abnehmend zwischen 12° bis 9°C. Das Messgerät ist ausgelegt für eine Minimaltemperatur von 10°C, die Messung fand also im Grenzbereich statt. Während der Messung wurde der

Messort von Feld A zu Feld B zu Feld C gewechselt. Dies ist in den Messdaten durch einen schwarzen Balken kenntlich gemacht. Auf der A3 war an diesem Nachmittag im späteren Verlauf Stau.

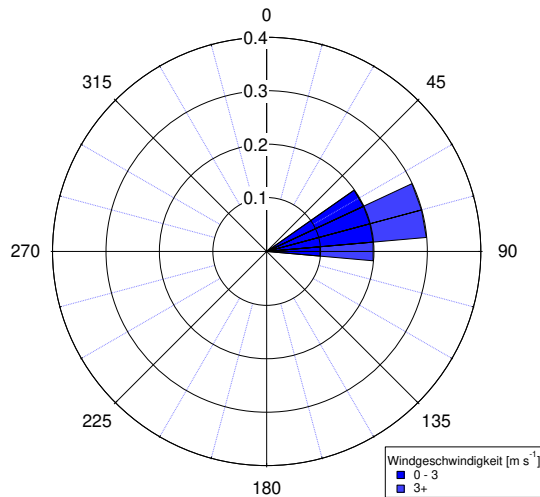


Abb. 3.13. Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.

Tab. 3.17. Allgemeine Informationen

Information	Daten
Datum	16. Nov. 2018
Uhrzeit	14:50 - 16:30 Uhr
Dauer	01:34:51 h
Betriebsrichtung	Ost (Landung)
Überflughöhe	210 -240 m
Horiz. Dist. zu Gleitlinie	90 m
Dist. zu Landeschwelle	4 km
Flugzeit bis Landung	55 s

Tab. 3.18. Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugereignisse ohne folgendes Maximum (5 min).

Information	Daten
Lufttemperatur	9 °-12 °C
mittlere Windgeschwindigkeit	2,7 m s ⁻¹
Anzahlkonzentration Mittelwert	52177 cm ⁻³
Anzahlkonzentration Standardabweichung	26844 cm ⁻³
Anzahl Überflüge (Fraport)	48
Anzahl Überflüge (gezählt)	48
-davon KFM	17 (35,4 %)
Anzahl S6+	2

In Abbildung 3.13 sind die Winddaten der Messstation des DWD zu sehen. Die Daten zeigen als Hauptwindrichtung Ost-Nordost.

Allgemeine Informationen sind in Tabelle 3.17 zu sehen. Es wurden 48 Überflüge Richtung Landebahn Nordwest 07L gezählt. Kfz-Verkehr ist direkt an den Messor-

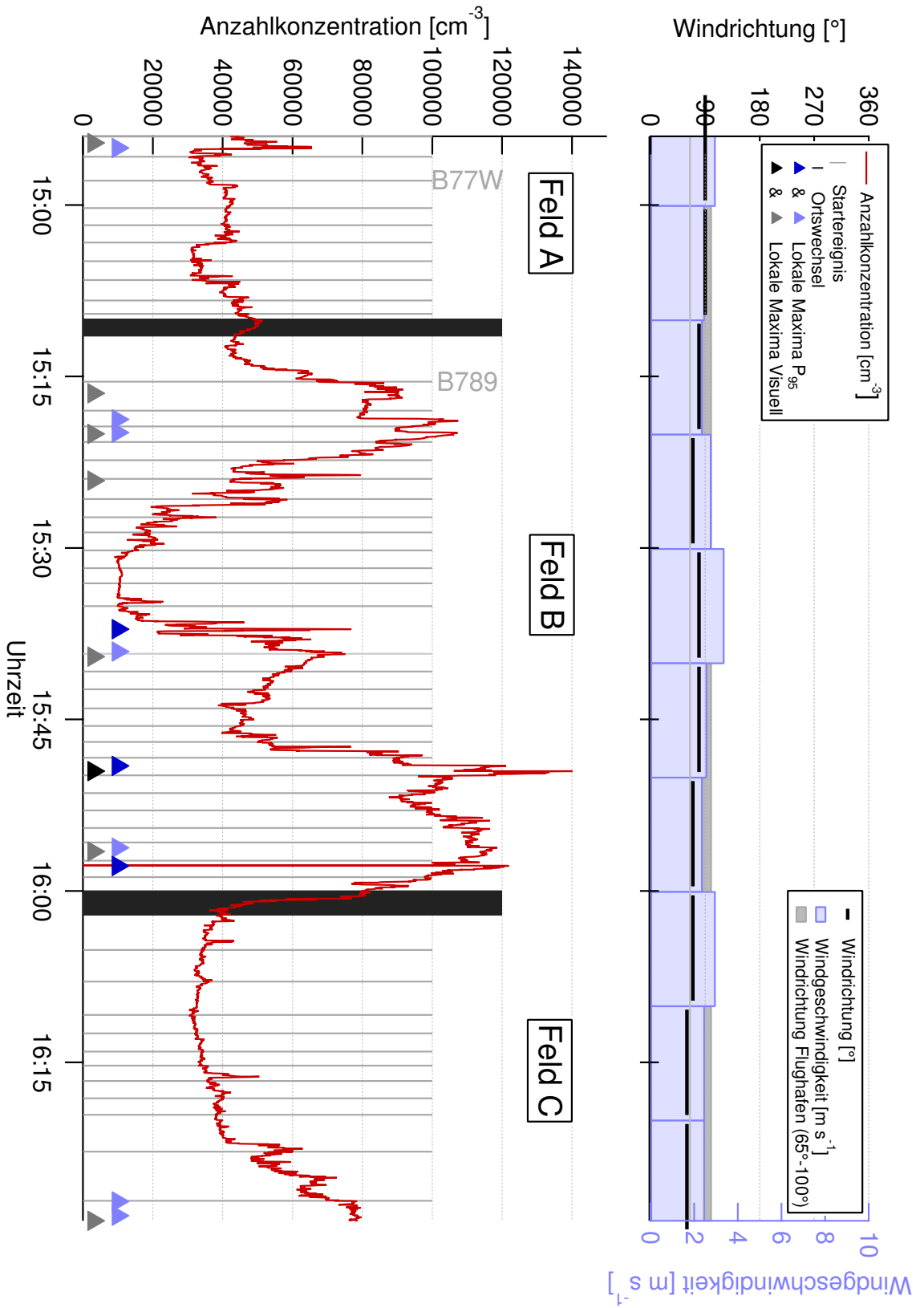


Abb. 3.14. Experiment 7: Flörheimer Feld. Zu lesen wie Abb. 3.6.

ten nicht möglich.

Die Mindestzeit zwischen Überflügen beträgt 1:08 min und die Dauer von Überflugeignis zu Landung beträgt ca. 55 s. Die Messung hat einen Mittelwert von ca. $52\,200\text{ cm}^{-3}$, eine Standardabweichung von ca. $26\,800\text{ cm}^{-3}$. Abbildung 3.14 zeigt die UFP-Konzentration und dazugehörige Winddaten.

Die Messreihe zeigt vereinzelte Maxima vor einer schwankenden Hintergrundkonzentration. Die Hintergrundkonzentration zeigt drei Hochpunkte um 15:20 Uhr, 15:40 Uhr und um 15:50 Uhr. Um 15:47 Uhr wurde eine Nullmessung durchgeführt.

In Tabelle 3.19 sind die identifizierten Maxima und Zuordnungen aufgelistet. Die Methoden P_{95} und Visuell sind in Abbildung 3.14 als Dreiecke individuell abgebildet. Unter der Annahme, dass jedes lokale Maximum durch ein Flugzeug ausgelöst wird, weist P_{90} mit 22,9 % die höchste Trefferquote auf. Mit 8,3 % aller Überflugeignisse einem lokalen Maximum zugeordnet, haben die Methoden $M_{+30\%}$ und P_{90} die höchsten Werte.

17 Überflugeignisse (35,4 %) zeigen kein dezidiertes Signal (KFM) in der UFP-Konzentration bis 5 Minuten nach Überflug.

Tab. 3.19. Identifizierte lokale Maxima und Zuordnungen nach Methode. Die Zuordnungen beziehen sich auf einen Zeitraum von 2:00 min - 3:00 min vor Maximum. Die Prozente sind in Bezug auf die gezählten Überflüge angegeben (Anzahl: 48).

Methode	Maxima		Zugeordnet	
	Anzahl	Prozent[%]	Anzahl	Prozent[%]
$M_{+30\%}$	10	20.8	4	8.3
P_{90}	11	22.9	4	8.3
P_{95}	10	20.8	3	6.3
Visuell	8	16.7	1	2.1

Beurteilung

Die UFP-Konzentrationen an den Standorten zeigen eine variable Hintergrundkonzentration. Starke lokale Maxima sind an diesen Standorten lediglich am Anfang und am Ende zu verzeichnen. Die Messung am Standort Feld B weist sehr breite lokale

Maxima auf, die teilweise unabhängig von Überflugeignissen auf eine andere Quelle schließen lassen. Der signifikante Unterschied der gemessenen Daten, bei nur ca. 100 m Abstand der Messorte voneinander, ist auffällig.

Ca. ein Drittel der Überflüge ist ohne dezidiertes Signal nach 5 Minuten; und die Anzahl der Maxima ist kleiner als ein Viertel der gezählten Überflüge. Starke Anstiege der UFP-Konzentration durch Überflüge sind deshalb an dieser Stelle, und unter diesen Bedingungen, direkt unter der Einfugschneise, nicht nachweisbar. Die hohen Hintergrundkonzentrationen können nicht eindeutig Überflügen zugeordnet werden und könnten vom Flughafen stammen, da in dessen Windfahne gemessen wurde.

3.8 Experiment 8: Isenburger Schneise

Abbildung 2.10 zeigt den exakten Messort. Während der gesamten Messung herrschte Betriebsrichtung West. Es wurden landende Flugzeuge der Landebahn 25L auf Sicht in einiger Entfernung südlich geloggt. Die wahrgenommene Windrichtung war ähnlich der Messdaten Süd, mit einzelnen minutenlangen Intervallen von Windrichtung West ab 14:30 Uhr.

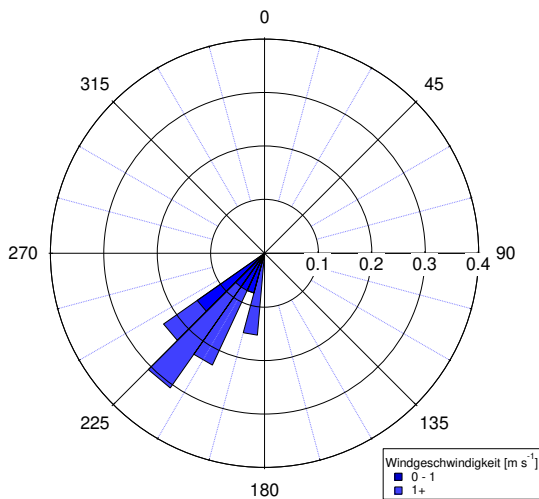


Abb. 3.15. Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.

Tab. 3.20. Allgemeine Informationen

Information	Daten
Datum	07. November 2018
Uhrzeit	13:15 - 15:15 Uhr
Dauer	02:01:22 h
Betriebsrichtung	West (Landung)
Überflughöhe	340 -410 m
Horiz. Dist. zu Gleitlinie	950 m
Dist. zu Landeschwelle	6,5 km
Flugzeit bis Landung	1:35 min

In Abbildung 3.15 sind die Winddaten der Messstation des DWD zu sehen. Die Daten zeigen als Hauptwindrichtung Süd-Südwest.

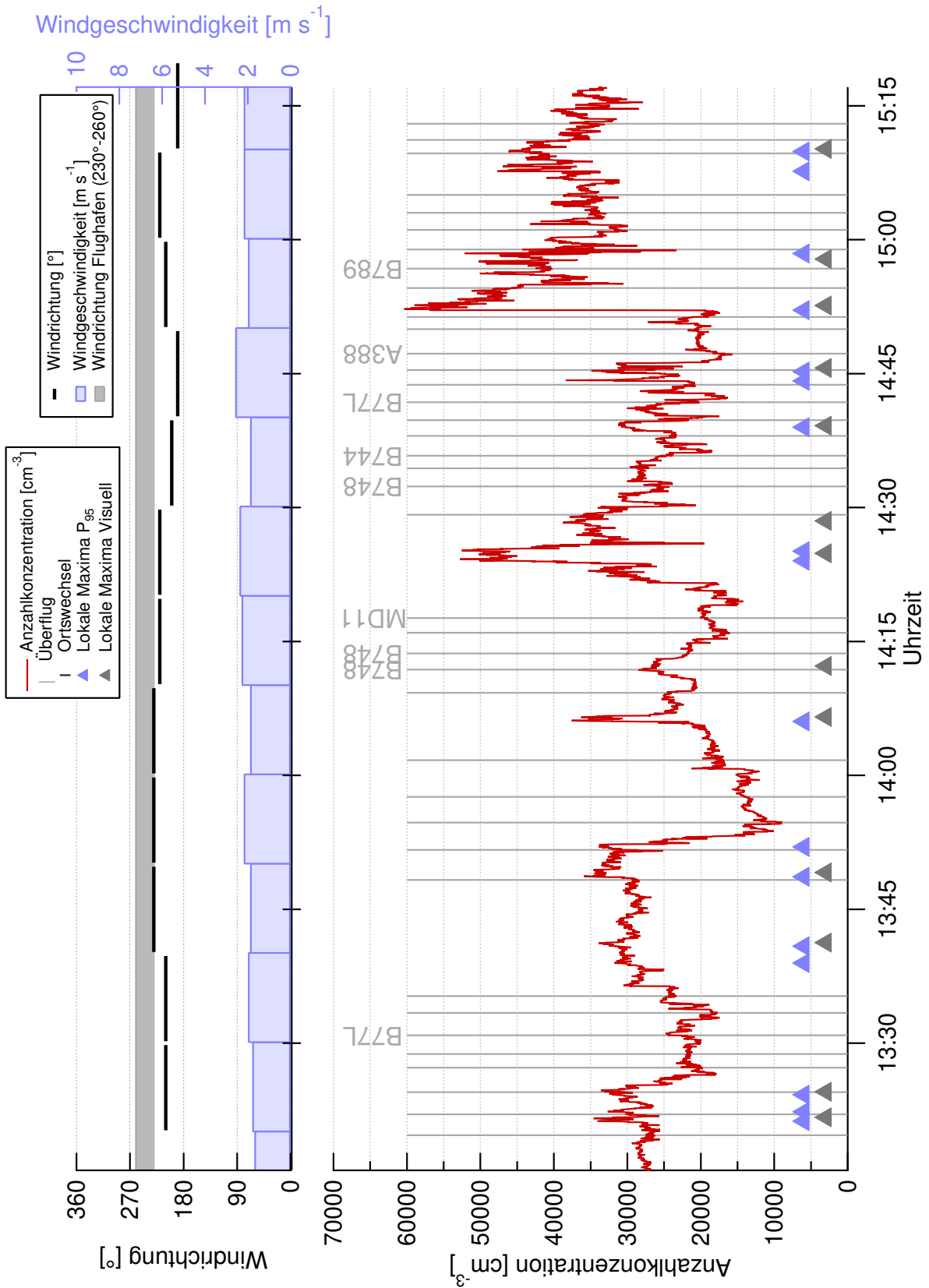


Abb. 3.16. Experiment 8: Isenburger Schneise. Zu lesen wie Abb. 3.6.

Tab. 3.21. Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugereignisse ohne folgendes Maximum (5 min).

Information	Daten
Lufttemperatur	9 °-12 °C
mittlere Windgeschwindigkeit	2,1 m s ⁻¹
Anzahlkonzentration Mittelwert	27737 cm ⁻³
Anzahlkonzentration Standardabweichung	8565 cm ⁻³
Anzahl Überflüge (Fraport)	40
Anzahl Überflüge (gezählt)	39
-davon KFM	14 (35,9 %)
Anzahl S6+	9

Allgemeine Informationen sind in Tabelle 3.20 zu sehen. Es wurden 39 Überflüge Richtung Landebahn Süd 25L gezählt. Kfz-Verkehr ist direkt am Messort nicht möglich.

Die Mindestzeit zwischen Überflügen beträgt 1:22 min und die Dauer von Überflugereignis zu Landung beträgt ca. 1:35 min. Die Messung hat einen Mittelwert von ca. 27 700 cm⁻³, eine Standardabweichung von ca. 8 600 cm⁻³. Abbildung 3.16 zeigt die UFP-Konzentration und dazugehörige Winddaten.

Die Messreihe hat eine steigende Tendenz mit Ausschlägen nach unten und oben. Flugaktivität ist ab 14:30 Uhr stark erhöht, im Vergleich zu Beginn der Messung, und enthält Großflugzeug Überflugereignisse (S6+). Um 14:52 Uhr zeigt sich ein starker instantaner Anstieg mit einem Maximum von ca. 60 400 cm⁻³.

In Tabelle 3.22 sind die identifizierten Maxima und Zuordnungen aufgelistet. Die Methoden P₉₅ und Visuell sind in Abbildung 3.16 als Dreiecke individuell abgebildet. Unter der Annahme, dass jedes lokale Maximum durch ein Flugzeug ausgelöst wird, weist P₉₀ mit 61,5 % die höchste Trefferquote auf. Zuordnungen über zurückliegende Zeitfenster wurden nicht durchgeführt, weil ein Zeitfenster nicht sinnvoll abgeschätzt werden konnte wird jedoch als >4:00 min angenommen.

14 Überflugereignisse (35,9 %) zeigen kein dezidiertes Signal in der UFP-Konzentration bis 5 Minuten nach Überflug.

Tab. 3.22. Identifizierte lokale Maxima und Zuordnungen nach Methode. Zuordnungen wurden für diese Messung nicht durchgeführt, da die Abschätzung der Transportdauer zu ungenau ist (>4 min). Die Procente sind in Bezug auf die gezählten Überflüge angegeben (Anzahl: 39).

Methode	Maxima		Zugeordnet	
	Anzahl	Prozent[%]	Anzahl	Prozent[%]
M _{+30%}	9	23.1	-	-
P ₉₀	24	61.5	-	-
P ₉₅	17	43.6	-	-
Visuell	13	33.3	-	-

Beurteilung

Die Messreihe hat eine erhöhte, aber nicht extrem hohe, Hintergrundbelastung. Mit einer angenommenen Transportzeit des Signals von Überflug bis Messung von $>4:00$ min und einer Mindestzeit zwischen Überflügen von 1:22 min, sowie der vertikalen und horizontalen Entfernung der Überflüge, sind starke lokale Maxima seltener zu verzeichnen und zunehmend schwerer von anderen Quellen und natürlichen Schwankungen zu trennen. Auch durch vorangeschrittene Diffusion verwischt die Grenze zwischen Überflugereignis und Hintergrundbelastung zunehmend. Auch die für kürzere Transportzeiten zuverlässige Vorgehensweise, kein Signal nach 5 Minuten gemessen zu haben, verliert an dieser Stelle an Aussagekraft.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die steigende Tendenz zu erklären:

- Veränderte Windverhältnisse erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass die Abgasfahne der Flugzeuge im Süden am Messgerät ankommt.
- Die wahrgenommenen Windrichtungsänderungen aus Westen tragen belastete Luftpakete vom Flughafen zum Messgerät.
- Die gesteigerte Flugaktivität. Diese Erklärung erscheint unwahrscheinlich, da eine eher stetige Steigerung der Hintergrundkonzentration oder eindeutige lokale Maxima in diesem Fall zu erwarten wären.
- Hintergrundbelastung und unbekannte Quelle (z.B. Gewerbegebiet Neu-Isenburg).

4 Diskussion

Die Beurteilung der einzelnen Experimente ist, aufgrund der Masse an Daten, direkt den einzelnen Experimenten angehängt. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Experimente zusammen diskutiert.

4.1 Zusammenfassung der Messungen

Experiment 1 (3.1) zeigt niedrige Hintergrundbelastung nördlich des Flughafengeländes durch Nordwind mit einem Mittelwert von ca. $6\,000\text{ cm}^{-3}$ und einen einmaligen Rauchereinfluss. Experiment 2 (3.2) zeigt leicht höhere Belastung am Raunheimer Waldsee als Experiment 1 (3.1) mit einem Mittelwert von ca. $9\,000\text{ cm}^{-3}$ bei startenden Flugzeugen, die östlich des Messortes aufsteigen und vor Überflug abdrehen. Experiment 3 (3.3) zeigt Landungsüberflüge am Raunheimer Waldsee mit einem Mittelwert von ca. $45\,600\text{ cm}^{-3}$. Es werden einige lokale Maxima identifiziert und zugeordnet; die Quelle der Konzentrationen könnten jedoch sowohl der Flughafen, als auch die Überflüge sein.

Experiment 4 (3.4) zeigt eine niedrige Hintergrundbelastung ($<10\,000\text{ cm}^{-3}$) und zahlreiche lokale Maxima mittlerer Intensität am Airportring im Südwesten des Flughafens. Dies weist auf eine natürliche Hintergrundbelastung vom südlichen Flughafengelände mit Maxima, ausgelöst durch Flugereignisse oder andere Quellen, hin. Experiment 5 (3.5) zeigt wenige lokale Maxima, aber eine dominante Hintergrundkonzentration, die während der Messreihe stark zunimmt ($>140\,000\text{ cm}^{-3}$) und die höchsten dauerhaft gemessenen UFP-Konzentrationen misst.

Experiment 6 (3.6) zeigt an der Mönchhofkapelle, bei niedriger Hintergrundkonzentration (ca. $10\,000\text{ cm}^{-3}$), eindeutig einzelne UFP-Profile von starker Ausprägung und eine Verdopplung des Mittelwertes durch Überflugereignisse. Es wird ebenfalls gezeigt, dass Ortsänderungen des Messgerätes (ca. 150 m) die gemessenen Ergebnisse extrem beeinflussen. Experiment 7 (3.7) rückt im Flörsheimer Feld wieder eine domi-

nante Hintergrundbelastung in den Fokus: Die hohe UFP-Belastung ($>100\,000\text{ cm}^{-3}$) scheint durch andere Quellen als direkte punktuelle Emissionen der überfliegenden Flugzeuge bestimmt zu sein und könnte vom Flughafen stammen.

Experiment 8 (3.8) an der Isenburger Schneise in 950 m Entfernung zur Einflugschneise und der höchsten Überflughöhe dieser Masterarbeit zeigt, mit einem Mittelwert von ca. $27\,700\text{ cm}^{-3}$, erhöhte Werte, aber wenige intensive lokale Maxima. Die Werte bleiben unterhalb der für viele andere Überflugereignisse gemessenen Werte. Die Schwierigkeiten exakter Zuordnung (Distanz, Wind, Hintergrund, Diffusion) werden erwähnt.

4.2 Thesendiskussion

4.2.1 Flughafen als UFP-Quelle

These 1: Bestätigen weitere Messstandorte im Umfeld des Flughafens die bisherige These des Flughafens als Quelle von UFP?

Die durchgeführten Messungen lieferten weitere Indizien dafür, dass der Flughafen eine signifikante UFP-Quelle darstellt. Aufgrund einer fehlenden direkten Windmessung, der begrenzten Messdauer und durch das Nutzen nur eines Messgerätes, sollten die Messdaten weiter validiert werden, um eine belastbare Aussage zu treffen. In der Nähe der Flughafengates am Messort „Im Taubengrund“ wurden extrem hohe dauerhafte UFP-Konzentrationen von ca. $160\,000\text{ cm}^{-3}$ gemessen, die auf erhebliche und stetige UFP-Quellen in der näheren Umgebung hinweisen. Bei Messungen mit Wind nicht vom Flughafen kommend und ohne Landungsüberflüge, konnten geringe Belastungen ($<10\,000\text{ cm}^{-3}$) gemessen werden. Dies ist in den Experimenten 1 und 2 zu sehen. Experiment 7 im Flörsheimer Feld hat erhöhte Konzentrationen, unabhängig von Überflügen und Wind aus Richtung des Flughafens. Die restlichen gezeigten Experimente haben alle zeitweise Windkomponenten aus Richtung des Flughafens. Ein starker Einfluss von Kfz-Verkehr auf die UFP-Konzentration ist in den Messergebnissen nicht sichtbar. Andere mögliche signifikante Quellen konnten nicht identifiziert werden.

4.2.2 Überflüge als UFP-Quelle

These 2: Sind einzelne Überflüge, speziell Landungsüberflüge, im weiteren Umkreis des Flughafens anhand der UFP-Konzentration nachweisbar?

Unter sehr beschränkten Bedingungen sind einzelne Landungsüberflüge nachweisbar, wie in Experiment 6 zu sehen. Für alle Experimente, außer Experiment 4, konnten ca. ein Drittel der Überflüge explizit nicht durch gestiegene UFP-Konzentrationen nachgewiesen werden (für Experiment 9 gilt diese Berechnung nur bedingt). Mit den angewandten Methoden der Zuordnung, konnten nie mehr als die Hälfte der Maxima Überflügen zugeordnet werden. Die Anzahl der identifizierten Maxima ist in nur 6 von 24 Fällen größer als 50 % der Anzahl der Überflüge.

Viele lokale Maxima, in Kontrast zu einer stetigen Hintergrundbelastung, legen eine Korrelation zwischen Flugzeugbewegungen und UFP-Konzentration in unmittelbarer Umgebung des Flughafens nahe. Diese Korrelation wird jedoch von anderen Faktoren, welche die Ausbreitung der Emissionen beeinflussen, sowie möglichen anderen UFP-Quellen abgeschwächt. Sogar in unmittelbarer Umgebung des Flughafens ist keine eins zu eins Korrelation zwischen Überflügen und UFP Extremereignissen nachweisbar (Experiment 4 und 5). Mit zunehmender Distanz scheinen sich die Emissionen entweder in die Hintergrundkonzentration einzubetten oder höchstens vereinzelt am Boden anzukommen (Experiment 8).

Dauerhaft erhöhte UFP-Konzentrationen in einiger Entfernung des Flughafens (Experimente 3, 7 und 8) könnten sowohl von Überflügen, als auch durch Horizontaltransport verursacht werden. Dies hängt stark von den individuellen Bedingungen der meteorologischen Grenzschicht ab. In Experiment 6 haben durch Überflüge ausgelöste Maxima eine Verdopplung der mittleren Anzahlkonzentration (ca. $23\,000\text{ cm}^{-3}$) verursacht. In den anderen Fällen ist eine Quellenzuordnung oder eine Trennung der Anteile von Flughafen und Überflügen nicht möglich. Die Ursache dafür liegt in den Vorgaben zur Betriebsrichtung. Landende Flugzeuge nähern sich meist entgegen der Windrichtung dem Flughafen an. Daher durchfliegen sie in den meisten Fällen die Abwindfahne des Flughafens. Eine exakte Zuordnung der gemessenen Werte zu einer Quelle ist ohne exakte Informationen zur Ausbreitung der Emission und des Windfeldes nicht durchführbar.

4.2.3 Randbedingungen für Nachweise

Unter welchen Randbedingungen ist ein Nachweis zum Einfluss von Überflügen auf die UFP-Konzentration möglich oder nicht möglich? Bis zu welcher Überflughöhe sind UFP-Emissionen am Boden als Immissionen messbar? Welche Faktoren beeinflussen die zu messende UFP-Konzentration?

Eine lange Zeitspanne zwischen einzelnen Überflügen, niedrige Hintergrundbelastung, Positionierung des Messgerätes an Standorten mit niedriger Überflughöhe und optimale, gleichbleibende Windbedingungen, begünstigen die Zuordnung von Maxima zu Überflügen. Dies ist in Experiment 4 und 6 zu sehen. Große Überflughöhen und große Distanz zur Gleitlinie erschweren das Trennen von Hintergrundbelastung und Eintrag durch Flugzeuge, vermutlich durch vorangeschrittene Diffusion und die oben genannte Problematik der Betriebsrichtungen.

Als Gründe für die variable Nachweisbarkeit von Überflügen, auch bei niedriger Hintergrundbelastung, werden hauptsächlich die starke Abhängigkeit von Windfeld, Turbulenz der Grenzschicht und Diffusion vermutet. Es ist bekannt, dass Flugzeugturbinen hohe UFP-Konzentrationen generieren [Lobo et al., 2015]; und die Ausbreitung der Abgasfahnen von Flugzeugen wurde von [Unterstrasser et al., 2014] für die freie Atmosphäre untersucht. Der Einfluss der oben genannten Faktoren und die Interaktion von Abgasfahnen mit dem Boden sind weiterhin kaum erforscht.

Es ist anzunehmen, dass mit zunehmender Überflughöhe die Emissionen seltener als dedizierte Maxima am Boden messbar sind, sich bis zu einer gewissen Höhe in die Hintergrundkonzentration am Boden einbetten und schließlich keinen messbaren Effekt auf die bodennahe UFP-Konzentration haben. Diese Höhe wird in Ausbreitungsrechnungen und in vielen Anwendungen für Emissionen aktuell bei ca. 300 m über Boden angenommen [Peter M. et al., 2012].

Experiment 8 zeigt bei einer Überflughöhe zwischen ca. 350 bis 400 m nur vereinzelte deutliche Maxima. Aufgrund der Windrichtung ist zu vermuten, dass diese Extremwerte aus kleinerer Überflughöhe an das Messgerät gelangen, oder aus anderen Quellen stammen. Die Intensität der Maxima ist ebenfalls nicht vergleichbar mit der Ausprägung der in kurzer Entfernung vom Flughafen gemessenen Maxima. Bei niedrigeren Überflughöhen an anderen Messorten war oft ebenfalls keine erhöhte UFP-Konzentration messbar.

Der angenommene Wert von 300 m über dem Boden, bis zu dem Emissionen als

bodennahe Immissionen messbar sind, erscheint gerechtfertigt. Ein solcher statistischer Richtwert schließt allerdings Einzelfälle bei denen 300 m Vertikaltransport übertroffen werden explizit nicht aus. Für eine bessere empirische Festlegung dieser Grenzhöhe reicht die aktuelle Datenlage nicht aus. Um einen Datensatz von ausreichender Größe und den nötigen Informationen zu generieren, wären extrem viele Ressourcen und finanzielle Mittel notwendig. Aus Gründen der Verhältnismäßigkeit sind Ausbreitungsrechnungen das zu bevorzugende Mittel.

4.3 Schwächen

In diesem Kapitel werden die Grenzen der für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Möglichkeiten aufgezeigt und diskutiert.

Emissionsausbreitung

Das größte Problem ist die Komplexität der Emissionsausbreitung. Die Ausbreitung der Emissionen ist von den Randbedingungen in der meteorologischen Grenzschicht abhängig. Die Grenzschicht wird stark von vielen Faktoren, darunter Sonneneinstrahlung, Windfeld und Turbulenz, beeinflusst. Dadurch ist die genaue Ausbreitung der Emissionen eines einzelnen Überflugeignisses niemals exakt bekannt. Auch Ausbreitungsmodelle können nur statistische Aussagen, gemittelt über viele Überflugeignisse, treffen, weil:

- der genaue Zustand der meteorologischen Grenzschicht niemals exakt bekannt ist, um diese Randbedingungen in ein Modell einzuspeisen.
- Turbulenzberechnung nicht analytisch lösbar ist.

In Modellen wird versucht, diese Probleme durch Parametrisierungen und Annahmen zu lösen. Der Arbeitsaufwand und Rechenaufwand für eine exakte Berechnung einer einzelnen Abgasfahne in einer real bestehenden Grenzschicht wäre außerdem enorm und wahrscheinlich nicht verhältnismäßig.

Zum Zeitpunkt der Messungen ist die genaue Ausbreitung der Emissionen nicht bekannt. Es kann also nicht exakt bestimmt werden, ob die gemessene Luft aus der Gleitlinie des Flugzeugs, vom Flughafen oder einer anderen Quelle stammt. Abhilfe kann hier eine direkte Windmessung vor Ort leisten.

Winddaten

Der Zustand der meteorologischen Grenzschicht während der Messung ist zwar nicht bekannt, liegen Gleitlinie und Flughafen allerdings in verschiedenen Richtungen, kann eine Windmessung einen Überblick verschaffen und eine Quellenzuordnung ermöglichen. In dieser Arbeit war es nicht möglich, den Wind vor Ort zu loggen. Dieser Umstand stellte sich als Problem heraus, da am Ort der Messung die wahrgenommenen Windverhältnisse oft von Messungen an den kilometerweit entfernten Messstationen abweichen. Das Windfeld in der offenen Atmosphäre ist oft großflächig gleichmäßig; dies trifft aber nicht immer auf bodennahe Winde zu. Messorte, welche nicht auf komplett offenem Gelände sind, verstärken diesen Effekt.

Örtliche Beschränkung

Die Umgebung des Frankfurter Flughafens ist in vielen Fällen nicht frei zugänglich oder eine Messung ist durch Störfaktoren vor Ort nicht möglich. Das begrenzt die möglichen Messorte. Ideal wäre ein Flughafen, der kilometerweit von freiem Feld umgeben ist. In so einer Umgebung könnte man ein engmaschiges Messnetz etablieren. In der Umgebung des Frankfurter Flughafens bieten sich jedoch oft nur einzelne Messorte in einem Umkreis von mehreren Kilometern an. Diese Wahl der Messorte ist zwangsläufig ein Kompromiss aus Anforderungen an einen Messort und Verfügbarkeit. Die örtlichen Beschränkungen der gewählten Messorte stellen ebenfalls ein Problem dar: Ist das Windfeld zum Zeitpunkt der Messung in einem Zustand der etwaige Emissionen knapp am Messgerät vorbei transportiert, kann keine Anpassung des Messortes um wenige Meter geschehen. Lösungen hierfür wären ein engmaschiges Messnetz in einer Messkampagne oder Langzeitmessungen, wobei auch dafür eine Verhältnismäßigkeit bewertet werden muss.

Zeitliche Begrenzung

Die zeitliche Begrenzung der Messungen ist eine offensichtliche Schwäche der Vorgehensweise. Die Begrenzung verursacht eine Momentaufnahme der Situation vor Ort. Sind aus irgendeinem Grund die Windverhältnisse während der Messung außergewöhnlich, ist die Messung nicht repräsentativ für diesen Messort. Vereinzelt, zeitlich begrenzte, Messungen sind aufgrund der Variabilität der meteorologischen Grenzschicht somit nur eine Sondiermessung. Mit einem CPC 3007 sind leider keine Langzeitmessungen durchführbar, da er dafür nicht konzipiert wurde. Langzeitmessungen können wesentlich verlässlichere Aussagen zur Statistik von Überflieger-

eignissen generieren. In Kombination mit Windmessungen vor Ort kann vermutlich auch eine Quellenzuordnung der UFP-Imissionen durchgeführt werden. Dies ist allerdings auch mit einem erheblichen Ressourcenaufwand verbunden.

Gleichzeitigkeit von Messungen

Wie in Experiment 6 (3.6) zu sehen ist, können bereits Ortswechsel mit kleiner Distanz stark unterschiedliche Messergebnisse verursachen. Es kann also von Vorteil sein, mit mehreren Geräten gleichzeitig in einem näheren Umkreis zu messen, um die Ausbreitung der UFP besser abzubilden. Solche Messungen könnten auch eine bessere Trennung von Flughafenabwind und Emissionen der Überflüge ermöglichen. Es konnten keine gleichzeitigen Messungen mit mehreren Geräten durchgeführt werden, da nur ein Gerät zur Verfügung stand.

Maxima Identifikation

Die Identifikation von Maxima, wie sie hier definiert und angewandt wurde, ist subjektiven Kriterien unterlegen. Da es keine klaren Referenzwerte gibt, welches Signal als Hintergrund zu werten ist und welche Abweichungen auf natürliche Schwankungen zurückzuführen sind, mussten Schwellenwerte zur Identifikation von klaren Maxima festgelegt werden. Diese orientieren sich zwar an gängigen statistischen Größen (Mittelwert und Perzentil), können aber willkürlich festgelegt werden, was unterschiedliche Ergebnisse zur Folge hat. Es wurde eine Auswahl verschiedener Schwellenwerte verwendet, um dieses Problem zu verdeutlichen und zu beschränken.

Maxima Zuordnung

Auf dem oben genannten Problem der Emissionsausbreitung basiert auch die Schwäche der Zuordnung von Maxima zu Überflügen. Der Flughafen Frankfurt hat einen intensiven Flugverkehr mit Flugzeugen, die oft in einem zeitlichen Abstand von weniger als zwei Minuten aufeinander folgen. In dieser Arbeit wurde ein Zeitfenster zur Zuordnung eines Maximas nach einem Überflug grob abgeschätzt. Ohne exakte Informationen zur Emissionsausbreitung in der Grenzschicht, ist dieses Zeitfenster nur schwer verifizierbar. Mit zunehmendem Abstand zum Flughafen und steigender Überflughöhe, übertrifft die Transportdauer von Emissionen zwangsläufig den zeitlichen Abstand zwischen Überflügen. Wird das Zeitfenster deutlich länger als die

Zeit zwischen Überflügen, ist die Quellenzuordnung eines Maximums nicht eindeutig. Dasselbe gilt für ein Zeitfenster, welches durch Distanz zwischen Überflug und Messort, zeitlich weit vom Überflugereignis getrennt ist.

4.4 Einordnung und Schlussfolgerung

Gute Zusammenfassungen des aktuellen Wissensstandes bieten [Stacey, 2019] und [ACI Europe, 2018]. Bekannt ist, dass UFP-Konzentrationen in der Umgebung von Flughäfen stark erhöht sein können und UFP-Messungen extrem stark durch Wetterbedingungen, Messmethode und Messort beeinflusst werden. Dies konnte in dieser Arbeit bestätigt werden.

Starts, Landungen und Bodenbewegungen auf Flughäfen, sowie Ausrüstung zur Stromversorgung der Flugzeuge, sind als Quellen von UFP bekannt [Stacey, 2019]. Nach aktuellem Kenntnisstand sind Emissionen oberhalb von 300 m über Boden kaum als bodennahe Immissionen messbar [Peter M. et al., 2012]. Landungsüberflüge wurden vorher noch nicht in mehreren Kilometern Entfernung zu Flughäfen explizit erforscht. In dieser Arbeit konnten, unter dafür perfekten Bedingungen, vereinzelt stark erhöhte UFP-Konzentrationen durch Überflüge bei einer Überflughöhe kleiner als 300 m explizit nachgewiesen werden. Bei höheren Überflügen war dies nicht möglich.

Einzelne Überflüge verursachen kurzzeitig starke Anstiege der Partikelkonzentration; in den meisten Fällen konnten Anstiege in der Partikelkonzentration aber nicht direkt auf Überflüge zurückgeführt werden. Es konnte nicht ermittelt werden, ob es sich um Horizontaltransport von tieferen Flughöhen bei vorangeschrittenem Landeanflug oder andere Quellen handelt. Da meistens keine den Überflügen entsprechend regelmäßigen Anstiege der UFP-Konzentration gemessen wurden, werden andere Ursachen vermutet. Die Gesamtanzahl der UFP-Konzentrationsanstiege betrug meistens weniger als die Hälfte der gezählten Überflüge. Dies widerspricht einer immer gültigen Korrelation zwischen Partikelkonzentration an einem Ort und Überflügen. Die UFP-Emissionen der Überflugereignisse scheinen sich mit der Hintergrundkonzentration zu vermischen und einen leichten Anstieg der mittleren Hintergrundkonzentration zu verursachen.

In mehreren Kilometern Distanz zum Flughafen sind Extremwerte, ausgelöst durch Überflüge, an einzelnen Orten durch die komplexe Emissionsausbreitung aber selten. In 4 km Entfernung zum Flughafen ist eine Zuordnung der UFP-Anstiege zu Überflügen kaum möglich. Auch die Hintergrundkonzentration scheint meistens von anderen Faktoren dominiert zu sein. Dies spricht dafür, dass der Einfluss von Über-

flügen auf die bodennahe UFP-Konzentration in Entfernungen, größer als 4 km zum Flughafen, wesentlich kleiner ist, und bestätigt damit den aktuellen Wissensstand zur Emissionsausbreitung.

4.5 Ausblick und Maßnahmen

Die Forschung zu UFP insbesondere an Flughäfen steht noch am Anfang. Es konnten zwar viele Daten zu Überflugereignissen an verschiedenen Orten gesammelt werden, für ein vollständiges Bild von UFP-Konzentrationen in der Umgebung von Flughäfen muss noch viel Forschung durchgeführt werden. Für ein besseres Verständnis bieten sich Langzeitmessungen und Messungen an mehreren Orten im Umkreis des Flughafens an.

Wichtig ist, dass an diesen Standorten neben UFP-Anzahl auch andere Werte wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Partikelgrößenverteilungen gemessen werden. Um einzelne Überflugereignisse zu verstehen, wäre es möglich, Messkampagnen auf offenem Feld mit einem gleichmäßig verteilten Messnetz, bestehend aus vielen CPCs, durchzuführen. Solche Messkampagnen wären allerdings mit großem Aufwand und extremen Kosten verbunden, weshalb hochaufgelöste Ausbreitungsrechnungen hier die bessere Wahl sein könnten. Auch hierfür ist zu prüfen, ob das Verständnis von einzelnen Überflugereignissen und deren Emissionsausbreitungen den Kostenaufwand rechtfertigt.

Folgende weitere Forschungsfragen zu UFP an Flughäfen wurden von [Stacey, 2019] erst kürzlich herausgearbeitet:

- Weitere Forschung zur Partikelgrößenverteilung von startenden und landenden Flugzeugen
- Chemische und Physikalische Analyse von Turbinenabgasen
- Korrelation von UFP und anderen Schadstoffen
- Partikelgrößenverteilung in verschiedenen Abständen von der Quelle
- Korrelation von UFP, Partikelgrößenverteilung und deren Einfluss auf die menschliche Gesundheit

Um zukünftig sinnvolle Regularien zur Verringerung von UFP-Emissionen an Flughäfen zu entwickeln, müssen die Quellen und deren Anteil an der UFP-Belastung

noch weiter erforscht werden. Die chemische Analyse der UFP kann helfen, die verschiedenen Quellen und deren Auswirkung auf die UFP-Konzentration und deren Schädlichkeit zu bewerten. Es wird ebenfalls auf mangelnde Standardisierungen bei den aktuellen Messmethoden hingewiesen. Dieser Mangel erschwert den Vergleich verschiedener Studien [Stacey, 2019].

Als Maßnahmen zur Verringerung von UFP-Emissionen an Flughäfen bieten sich viele Ansätze, von denen einige schon angewendet werden:

- Verbesserte Treibstoffe
- Kürzere Triebwerkslaufzeiten am Boden
- Reduktion von Flugzeugwartezeiten auf den Startbahnen
- Effiziente Flugzeugabwicklung
- Begrenzte Nutzung von bodengebundenen UFP-Quellen an Flughäfen (z.B. Dieselgeneratoren)
- Begrenzter Betrieb der Flugzeugklimaanlagen an den Gates

Diese präventiven Maßnahmen können schon heute helfen, schädliche Belastungen zu minimieren und bieten auch in Bezug auf Ressourceneffizienz und Wahrnehmung in der Öffentlichkeit Vorteile für die Betreiber.

Literaturverzeichnis

- [Abegglen et al., 2015] Abegglen, M., Durdina, L., Brem, B. T., Wang, J., Rindlisbacher, T., Corbin, J. C., Lohmann, U., and Sierau, B. (2015). Effective density and mass–mobility exponents of particulate matter in aircraft turbine exhaust: Dependence on engine thrust and particle size. *Journal of Aerosol Science*, 88:135–147.
- [ACI Europe, 2018] ACI Europe (2018). Ultrafine Particles at Airports: Current understanding of ultrafine particle emissions and concentrations at airports in 2018. <https://www.aci-europe.org/policy/position-papers.html?view=group&group=1&id=7>, abgerufen am 11.03.2019.
- [Alexrk2, 2016] Alexrk2 (2016). Datei:Laermkarte_Flughafen_Frankfurt_am_Main.png. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LÃ¤rmkarte_Flughafen_Frankfurt_am_Main.png, abgerufen am 11.03.2019. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>.
- [Baldauf et al., 2016] Baldauf, R. W., Devlin, R. B., Gehr, P., Giannelli, R., Hassett-Sipple, B., Jung, H., Martini, G., McDonald, J., Sacks, J. D., and Walker, K. (2016). Ultrafine Particle Metrics and Research Considerations: Review of the 2015 UFP Workshop. *International journal of environmental research and public health*, 13(11).
- [Beelen et al., 2014] Beelen, R., Raaschou-Nielsen, O., Stafoggia, M., Andersen, Z. J., Weinmayr, G., Hoffmann, B., Wolf, K., Samoli, E., Fischer, P., Nieuwenhuijsen, M., Vineis, P., Xun, W. W., Katsouyanni, K., Dimakopoulou, K., Oudin, A., Forsberg, B., Modig, L., Havulinna, A. S., Lanki, T., Turunen, A., Oftedal, B., Nystad, W., Nafstad, P., de Faire, U., Pedersen, N. L., Östenson, C.-G., Fratiglioni, L., Penell, J., Korek, M., Pershagen, G., Eriksen, K. T., Overvad, K., Ellermann, T., Eeftens, M., Peeters, P. H., Meliefste, K., Wang, M., Bueno-de Mesquita, B., Sugiri, D., Krämer, U., Heinrich, J., de Hoogh, K., Key, T., Peters, A., Hampel, R., Concin, H., Nagel, G., Ineichen, A., Schaffner, E., Probst-Hensch, N., Künzli, N., Schindler, C., Schikowski, T., Adam, M., Phuleria, H., Vilier, A., Clavel-Chapelon, F., Declercq, C., Gironi, S., Krogh, V., Tsai, M.-Y., Ricceri, F.,

- Sacerdote, C., Galassi, C., Migliore, E., Ranzi, A., Cesaroni, G., Badaloni, C., Forastiere, F., Tamayo, I., Amiano, P., Dorronsoro, M., Katsoulis, M., Trichopoulou, A., Brunekreef, B., and Hoek, G. (2014). Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *The Lancet*, 383(9919):785–795.
- [Chen et al., 2016] Chen, R., Hu, B., Liu, Y., Xu, J., Yang, G., Xu, D., and Chen, C. (2016). Beyond PM_{2.5}: The role of ultrafine particles on adverse health effects of air pollution. *Biochimica et biophysica acta*, 1860(12):2844–2855.
- [DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1993] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1993). DIN EN 481: Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel.
- [Durdina et al., 2014] Durdina, L., Brem, B. T., Abegglen, M., Lobo, P., Rindlisbacher, T., Thomson, K. A., Smallwood, G. J., Hagen, D. E., Sierau, B., and Wang, J. (2014). Determination of PM mass emissions from an aircraft turbine engine using particle effective density. *Atmospheric Environment*, 99:500–507.
- [DWD, 2019] DWD (2019). 10 Minuten Mittelwerte aus dem Archiv des DWD. ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/10_minutes/wind/recent, abgerufen am 11.03.2019. Copyright Deutscher Wetterdienst.
- [Europäische Union, 2008] Europäische Union (2008). *Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa*, volume 51.2008,152 of *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L*. Amt für Amtliche Veröff. der Europ. Gemeinschaften, Luxemburg.
- [Fraport AG, 2015] Fraport AG (2015). Interaktive karte von flugrouten und lärmmissionen am frankfurter flughafen. http://framap.fraport.de/aimport/ISFL/Modul_Gis/main.aspx?AID=ISFL2&STY=6, abgerufen am 11.03.2019. Copyright Fraport AG.
- [Fraport AG, 2019] Fraport AG (2019). Betriebsrichtung. <https://www.fraport.de/content/fraport/de/nachbarschaft-region/flugverfahren/betriebsrichtung.html>, aberufen am 11.03.2019. Copyright Fraport AG.

- [Gezondheidsraad Health Council of the Netherlands, 1999] Gezondheidsraad Health Council of the Netherlands (1999). *Public health impact of large airports*. Health Council of the Netherlands, The Hague.
- [Gisela Kirschstein, 2018] Gisela Kirschstein (09. April 2018). Ultrafeinstaubschleuder Flughafen? *Rhein-Zeitung*, 2018(82):31.
- [Heal et al., 2012] Heal, M. R., Kumar, P., and Harrison, R. M. (2012). Particles, air quality, policy and health. *Chemical Society reviews*, 41(19):6606–6630.
- [Hudda et al., 2014] Hudda, N., Gould, T., Hartin, K., Larson, T. V., and Fruin, S. A. (2014). Emissions from an international airport increase particle number concentrations 4-fold at 10 km downwind. *Environmental science & technology*, 48(12):6628–6635.
- [ICAO, 2008] ICAO (2008). *Environmental protection*, volume Annex 16 of *Convention on International Civil Aviation*. International Civil Aviation Organization, Montréal, 3rd ed. edition.
- [Keuken et al., 2015] Keuken, M. P., Moerman, M., Zandveld, P., Henzing, J. S., and Hoek, G. (2015). Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands). *Atmospheric Environment*, 104:132–142.
- [Lobo et al., 2015] Lobo, P., Durdina, L., Smallwood, G. J., Rindlisbacher, T., Siegerist, F., Black, E. A., Yu, Z., Mensah, A. A., Hagen, D. E., Miake-Lye, R. C., Thomson, K. A., Brem, B. T., Corbin, J. C., Abegglen, M., Sierau, B., Whitefield, P. D., and Wang, J. (2015). Measurement of Aircraft Engine Non-Volatile PM Emissions: Results of the Aviation-Particle Regulatory Instrumentation Demonstration Experiment (A-PRIDE) 4 Campaign. *Aerosol Science and Technology*, 49(7):472–484.
- [Openstreetmap-Mitwirkende, 2019] Openstreetmap-Mitwirkende (2019). www.openstreetmap.org, www.openstreetmap.org/copyright, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>, zuletzt abgerufen am 11.03.2019.
- [Peter M. et al., 2012] Peter M., Bertschmann-Aeppli D.: Zandonella R., Infrass, M., Lieb Ch., Suter S., and Ecoplan (2012). Integration des Luftverkehrs in die Transportrechnung , Studie im Auftrag des BFS und des

- ARE. https://aragge.ch/wp-content/uploads/2018/04/CH_OFS_20120502_Trafic_aerien_et_couts_transport_de-fr-it.pdf, abgerufen am 11.03.2019.
- [Petzold et al., 2013] Petzold, A., Ogren, J. A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S.-M., Baltensperger, U., Holzer-Popp, T., Kinne, S., Pappalardo, G., Sugimoto, N., Wehrli, C., Wiedensohler, A., and Zhang, X.-Y. (2013). Recommendations for reporting "black carbon" measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(16):8365–8379.
- [Probst W., 2009] Probst W. (2009). AzB 2008 Das neue Verfahren zur Berechnung von Fluglärm. http://www.oedal.at/images/downloads/probst_17.11.2009.pdf, abgerufen am 11.03.2019. Copyright Datakustik GmbH.
- [Riley et al., 2016] Riley, E. A., Gould, T., Hartin, K., Fruin, S. A., Simpson, C. D., Yost, M. G., and Larson, T. (2016). Ultrafine particle size as a tracer for aircraft turbine emissions. *Atmospheric Environment*, 139:20–29.
- [Rose and Jacobi, 2018] Rose and Jacobi (2018). Erster Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt.
- [Seinfeld and Pandis, 2016] Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*. Wiley, Hoboken, New Jersey, 3rd edition edition.
- [Stacey, 2019] Stacey, B. (2019). Measurement of ultrafine particles at airports: A review. *Atmospheric Environment*, 198:463–477.
- [Umweltbundesamt, 2019] Umweltbundesamt (2019). Feinstaub. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschaedstoffe/feinstaub>, abgerufen am 11.03.2019.
- [Unterstrasser et al., 2014] Unterstrasser, S., Paoli, R., Sölch, I., Kühnlein, C., and Gerz, T. (2014). Dimension of aircraft exhaust plumes at cruise conditions: effect of wake vortices. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(5):2713–2733.
- [WESTERDAHL et al., 2008] WESTERDAHL, D., FRUIN, S., FINE, P., and SIOUTAS, C. (2008). The Los Angeles International Airport as a source of ultrafine particles and other pollutants to nearby communities. *Atmospheric Environment*, 42(13):3143–3155.

- [Wissen, 2005] Wissen (2005). Datei:Wohnges staub definition.jpg. http://www.wissenwiki.de/Datei:Wohnges_staub_definition.jpg, abgerufen am 11.03.2019. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>.
- [World Health Organization, 2006] World Health Organization (2006). *WHO Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide: Global Assessment 2005 : Summary of Risk Assessment*. World Health Organization.
- [Yu et al., 2017] Yu, Z., Liscinsky, D. S., Fortner, E. C., Yacovitch, T. I., Croteau, P., Herndon, S. C., and Miake-Lye, R. C. (2017). Evaluation of PM emissions from two in-service gas turbine general aviation aircraft engines. *Atmospheric Environment*, 160:9–18.
- [Yunos et al., 2017] Yunos, S. N. M. M., Ghafir, M. F. A., and Wahab, A. A. (2017). Aircraft LTO emissions regulations and implementations at European airports. AIP Conference Proceedings, page 020006. 10.1063/1.4981147.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Definition und Einteilung von Stäuben nach Partikelgröße und Staubart ©[Wissen, 2005].	2
1.2	Konventionswerte für einatembare Fraktion, thorakale Fraktion und alveolengängige Fraktion als Funktion des aerodynamischen Durchmessers gemäß DIN EN 481.	3
1.3	Trimodale Partikelgrößenverteilungen mit verschiedenen Metriken (Anzahl, Oberfläche, Lungendeposition und Masse) von [Baldauf et al., 2016]. D_p ist der Partikeldurchmesser.	4
1.4	Partikelanzahlverteilungen am Flughafen von Los Angeles (USA) von [Hudda et al., 2014]. In der Windfahne des Flughafens sind erhöhte Konzentrationen zu sehen.	6
1.5	Normalisierte Belastungsrose von elementarem Kohlenstoff (EC) und Partikelanzahl (PNC) bei der Messstation Adamse Bos von [Keuken et al., 2015]: EC alle Zeiten in gelb, PNC am Tag in rot und Nachtstunden in blau ©Google Maps. PNC aus Richtung des Flughafen während der Tagstunden sind deutlich zu erkennen.	7
1.6	Windrichtungsabhängige Auswertung der Gesamtkonzentration aller Partikel zwischen 10 nm bis 30 nm im Durchmesser in Raunheim (links) und in Frankfurt-Schwanheim (rechts) von [Rose and Jacobi, 2018]. Dargestellt ist jeweils die mittlere Anzahlkonzentration am Tag (rot) und nachts (blau) für Zeiten, an denen der Wind aus der angegebenen Richtung wehte. Die Achsenskalierung ist in Partikel pro cm^3 angegeben. Beide Stationen weisen auf den Flughafen als UFP-Quelle hin.	8
2.1	LTO Zyklus für Flugzeuge mit dazugehöriger Schubkraft (Thrust) und Verweildauer (Time) von [Yunos et al., 2017].	11
2.2	Der Frankfurter Flughafen von [Rose and Jacobi, 2018] mit Landebahnen. Rote Punkte sind Messstationen des HLNUG. Die Windrose zeigt die Hauptwindrichtungen des Jahres 2017. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.	13

2.3	Der Frankfurter Flughafen mit Lärmkarte und Lärmminderungsstrecken von [Alexrk2, 2016].	14
2.4	Der Frankfurter Flughafen aus dem ersten Zwischenbericht des HLNUG zu UFP von [Rose and Jacobi, 2018] mit den Messstationen des HLNUG (rot) und den Messorten dieser Masterarbeit (schwarz). Die Winddaten wurden an der DWD Station in der Nähe des Messortes DFS-Turm (schwarz-blau) gemessen. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.	15
2.5	Die Messorte Taubengrund A und B mit Gleitlinie 25R der Nordwestlandebahn. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.	16
2.6	Der Messort Waldsee mit Gleitlinie zur Landebahn 07R Süd. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.	17
2.7	Der Messort DFS-Turm mit Gleitlinie zur Landebahn 07R Süd. Zu sehen ist auch die DWD Station in blau. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.	18
2.8	Die Messorte Mönchhofkapelle A und B mit Gleitlinie 07L zur Nordwest Landebahn. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.	19
2.9	Die Messorte Flörsheimer Feld A,B und C mit Gleitlinie 25L zur Landebahn Nordwest. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.	20
2.10	Der Messort Isenburger Schneise mit Gleitlinie 25L zur Landebahn Süd. ©OpenStreetMap-Mitwirkende.	21
2.11	Condensation Particle Counter. P-Trak in blau und CPC 3007 in weiss mit Aerosol Einlass und Batterien ©TSI Incorporated.	22
2.12	Scanning Mobility Particle Sizer mit DMA links und Funktionsweise eines DMAs rechts. Polydisperses Aerosol wird oben eingeleitet und durch das elektrische Feld und einen schmalen Auslass größenselektiert ©TSI Incorporated.	24
2.13	Aufbau der Vergleichsmessung. Die Bilder zeigen die eingezeichneten Abschnitte der oberen Abbildung. Polydisperses Aeerosol wird generiert und im SMPS Größenselektiert. Das Monodisperse Aerosol wird anschliessend in den CPCs gezählt.	25
2.14	Messreihenbeispiel von CPC 3772 und CPC 3007 für Partikelgröße 40 nm. CPC 3772 hat eine kleinere Standardabweichung.	26
2.15	Vergleich des P-Trak und CPC 3007 in Bezug auf einen CPC 3772 für 10 nm bis 100 nm in Prozent. Die Balken geben die Standardabweichung an. Der CPC 3007 erreicht über 90 % Zähleffizienz und der P-Trak zwischen 70 bis 80 % Zähleffizienz im Vergleich zu einem CPC 3772.	27

2.16	Beispiele zur Platzierung des CPC. Auf dem Autodach (links) oder auf dem Gartentisch (rechts).	28
2.17	Visualisierung der Definition eines lokalen Maximums . Der Nulldurchgang der Differenz des Schwellenwertes $(S)=M_{+30\%}$ und der Anzahlkonzentration (N) von positiven zu negativen Werten markiert den Zeitpunkt t_i , für den ein lokales Maximum deklariert wird.	33
3.1	Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.	35
3.2	Experiment 1: Im Taubengrund A. Die obere Abbildung zeigt die 10-Minuten Mittel der Winddaten der DWD Messstation am Flughafen. Liegt die Windrichtung im hellgrauen Balken, kommt der Wind aus Richtung des Flughafens. Die untere Abbildung zeigt die gemessene Anzahlkonzentration.	36
3.3	Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.	38
3.4	Experiment 2: Waldsee Start. Zu lesen wie Abb 3.2. Jeder vertikale graue Balken in der unteren Abbildung repräsentiert ein Flugereignis (In diesem Fall nur Startereignisse). Bei Ereignisses von Flugzeugen der Gruppe S6 oder größer (S6+) steht der Flugzeugtyp über dem Balken.	39
3.5	Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.	40
3.6	Experiment 3: Waldsee Landung. In der oberen Abbildung sind die Windgeschwindigkeit (Balken, hellblau) und Windrichtung (Querstriche, schwarz) der DWD Messstation zu sehen. Liegt die Windrichtung im grauen Balken, kommt der Wind aus Richtung des Flughafens. Die Untere Abbildung zeigt die Anzahlkonzentration (rot), Überflugeignisse (Vertikalstriche, grau), identifizierte lok. Maxima ohne Zuordnung (Dreiecke, hell) und zugeordnete lok. Maxima (Dreiecke, dunkel).	41
3.7	Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.	44
3.8	Experiment 4: DFS-Turm. Zu lesen wie Abb. 3.6.	45
3.9	Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.	48

3.10 Experiment 5: Im Taubengrund B. Zu lesen wie Abb. 3.6.	49
3.11 Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.	51
3.12 Experiment 6: Kapelle. Zu lesen wie Abb. 3.6.	52
3.13 Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.	55
3.14 Experiment 7: Flörsheimer Feld. Zu lesen wie Abb. 3.6.	56
3.15 Häufigkeitsverteilung der Windrichtung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten.	58
3.16 Experiment 8: Isenburger Schneise. Zu lesen wie Abb. 3.6.	59

Tabellenverzeichnis

2.1	Ausschnitt der Tabelle von Luftfahrzeuggruppen [Probst W., 2009]	12
3.1	Allgemeine Informationen	35
3.2	Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugereignisse ohne folgendes Maximum (5 min).	37
3.3	Allgemeine Informationen	38
3.4	Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugereignisse ohne folgendes Maximum (5 min).	38
3.5	Allgemeine Informationen	40
3.6	Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugereignisse ohne folgendes Maximum (5 min).	42
3.7	Identifizierte lokale Maxima und Zuordnungen nach Methode. Die Zuordnungen beziehen sich auf einen Zeitraum von 2 min - 3 min vor Maximum. Die Prozente sind in Bezug auf die gezählten Überflüge angegeben (Anzahl: 34).	43
3.8	Allgemeine Informationen	44
3.9	Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugereignisse ohne folgendes Maximum (5 min).	44
3.10	Identifizierte lokale Maxima und Zuordnungen nach Methode. Die Zuordnungen beziehen sich auf einen Zeitraum von 0 min - 1:30 min vor Maximum. Die Prozente sind in Bezug auf die gezählten Überflüge angegeben (Anzahl: 75).	46
3.11	Allgemeine Informationen	48
3.12	Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugereignisse ohne folgendes Maximum (5 min).	48
3.13	Identifizierte lokale Maxima und Zuordnungen nach Methode. Die Zuordnungen beziehen sich auf einen Zeitraum von 0 min - 1:30 min vor Maximum. Die Prozente sind in Bezug auf die gezählten Überflüge angegeben (Anzahl: 23).	50
3.14	Allgemeine Informationen	51

3.15 Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugeignisse ohne folgendes Maximum (5 min).	53
3.16 Identifizierte lokale Maxima und Zuordnungen nach Methode. Die Zuordnungen beziehen sich auf einen Zeitraum von 0:30 min - 1:30 min vor Maximum. Die Prozente sind in Bezug auf die gezählten Überflüge angegeben.	54
3.17 Allgemeine Informationen	55
3.18 Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugeignisse ohne folgendes Maximum (5 min).	55
3.19 Identifizierte lokale Maxima und Zuordnungen nach Methode. Die Zuordnungen beziehen sich auf einen Zeitraum von 2:00 min - 3:00 min vor Maximum. Die Prozente sind in Bezug auf die gezählten Überflüge angegeben (Anzahl: 48).	57
3.20 Allgemeine Informationen	58
3.21 Zusammenfassung der Messergebnisse. KFM ist die Summe der Überflugeignisse ohne folgendes Maximum (5 min).	60
3.22 Identifizierte lokale Maxima und Zuordnungen nach Methode. Zuordnungen wurden für diese Messung nicht durchgeführt, da die Abschätzung der Transportdauer zu ungenau ist (>4 min). Die Prozente sind in Bezug auf die gezählten Überflüge angegeben (Anzahl: 39).	61