



Hochschule **RheinMain**
University of Applied Sciences
Wiesbaden Rüsselsheim

Fachbereich Ingenieurwissenschaften
Studiengang Bio- und Umwelttechnik (M. Eng.)

M A S T E R A R B E I T

**Einfluss von Überflügen auf die Ultrafeinstaubkonzentration am
Boden anhand Daten der Messstationen Frankfurt-Sachsenhausen und
Frankfurt-Oberrad**

26. Mai 2020

Name: Christian Maron

Matrikelnummer: 682286

Referent: Herr Prof. Dr. Friedhelm Schönfeld

Korreferent: Herr Prof. Dr. Thomas Schmid

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Texte, Gedankengänge, Konzepte usw. in meinen Ausführungen habe ich als solche eindeutig gekennzeichnet und mit vollständigen Verweisen auf die jeweilige Urheberschaft und Quelle versehen. Alle weiteren Inhalte wie Textteile, Abbildungen, Tabellen etc. ohne entsprechende Verweise stammen im urheberrechtlichen Sinn von mir. Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt. Mir ist bekannt, dass ein Täuschungsversuch vorliegt, wenn sich eine der vorstehenden Versicherungen als unrichtig erweist.

Wiesbaden, 26.05.2020, C. Meier

Ort, Datum und Unterschrift Verfasser/In

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen Menschen danken, die mich in der letzten Zeit auf ganz unterschiedliche Art und Weise unterstützt haben.

Zunächst möchte ich Ihnen, Herr Prof. Dr. Schönfeld, für die fachliche Beratung und Unterstützung dieser Arbeit recht herzlich danken. Durch die Erstbetreuung meiner Bachelor- und nun auch meiner Masterarbeit haben Sie mir den Weg ins Berufsleben geebnet und meine Begeisterung für das Arbeiten an wissenschaftlichen Themen gefestigt. Zudem danke ich Ihnen sehr für die Möglichkeit an themenbezogenen Projekten mitzuwirken. Die Zusammenarbeit mit Ihnen war sowohl auf fachlicher als auch auf persönlicher Ebene stets sehr angenehm und ich fühlte mich zu jeder Zeit sehr gut betreut.

Für die Vermittlung und Zweitbetreuung meiner Masterarbeit möchte ich Ihnen, Herr Prof. Dr. Schmid, recht herzlich danken. Die Zusammenarbeit mit Ihnen und Ihren Kolleginnen und Kollegen im Amt hat mir große Freude bereitet und ich fühlte mich stets sehr gut aufgehoben. Auch für die damit verbundenen Einblicke in die verschiedenen Arbeitsbereiche des HLNUGs bin ich Ihnen sehr dankbar.

Dies bringt mich zu den nächsten zwei Personen, denen ich zu besonderem Dank verpflichtet bin. Diana, Dir möchte ich für die fachliche Unterstützung, die ich jederzeit in Anspruch nehmen durfte, und die Einbindung in Eure Arbeiten herzlich danken. Danke dafür, dass Du immer ein offenes Ohr hattest und mir bei der Findung und Beantwortung neuer Fragestellungen mit Rat und Tat zur Seite standst. Jeder, dessen Abschlussarbeit von Dir betreut wird, kann sich glücklich schätzen. Mach weiter so! Florian, Dir möchte ich ebenfalls für die fachliche Unterstützung, insbesondere für die Einarbeitung in R sehr danken. Du hast damit in mir eine Begeisterung hervorgerufen, welcher ich versuchen werde, auch in Zukunft weiter nachzugehen. Ich habe viel von Euch lernen dürfen und fühlte mich auch auf persönlicher Ebene stets sehr wohl bei Euch!

Als nächstes möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die mich trotz meiner häufigen physischen Abwesenheit nicht vergessen haben und mich in Zeiten der Corona-Krise mit chaosartigen Gruppenvideoanrufen zum Lachen gebracht und bei Laune gehalten haben.

Meinen Eltern und beiden Schwestern möchte ich für so vieles danken, was hier nicht alles hinpasst. Mum und Dad, ich danke Euch für Eure mentale Unterstützung, für Eure guten Rat-

schläge in schwierigen Zeiten und für die vielen schönen Videoanrufe, aber auch für Eure Geduld, Eure Entspantheit und Euer Verständnis dafür, dass wir in letzter Zeit nicht so oft bei Euch sein konnten. Zudem danke ich Euch für Eure Korrekturen und Anmerkungen, die der Verständlichkeit meiner Arbeit zugutekamen. Anne und Juli, Euch danke ich sehr für die entspannten Telefonate, die gelegentliche spielerische Ablenkung und für das Gefühl zu wissen, dass wir jederzeit wieder „Wir Drei“ sein können! Euch als Familie kann man sich nur wünschen und ich bin froh ein Teil der „Füchse“ sein zu dürfen.

Zum Schluss möchte ich mich bei den zwei Menschen bedanken, die mich in letzter Zeit rund um die Uhr aushalten mussten. Jana, was Du in letzter Zeit alles für mich getan hast, kann ich nicht in Worte fassen. Was ich Dir aber sagen kann, ist, dass ich sehr glücklich darüber bin, Dich an meiner Seite zu wissen, egal was passiert und dass ich mich immer auf Dich verlassen kann. Du hast mir in der letzten Zeit immer wieder Mut zugesprochen, hast mir gezeigt, wie wichtig es ist, auch mal eine Pause einzulegen, hast mir den nötigen Freiraum verschafft und warst immer für mich da. Dafür möchte ich Dir von ganzem Herzen danken! Darüber hinaus bin ich sehr glücklich über unsere gemeinsame kleine Tochter Amelie, die mir jeden Tag ein Lächeln ins Gesicht zaubert; die mich manchmal zum Lachen, manchmal an den Rand der Verzweiflung bringt; die mich jeden Morgen um 6 Uhr liebevoll weckt; die mich auf meinen Spaziergängen begleitet; die mich jeden Tag von der Arbeit abgehalten hat, um mir immer wieder aufs Neue zu zeigen, was im Leben wirklich wichtig ist. Ich danke Dir, liebe Amelie, für die wundervolle Zeit mit Dir und freue mich auf die gemeinsame Zeit, die uns noch bevorsteht.

Ich wünsche allen eine gesunde und unbeschwerte Zeit!

Herzlichst

Christian

Zusammenfassung

Ultrafeine Partikel (kurz: UFP) sind eine Teilmenge der in der Luft enthaltenen Aerosolpartikel und stellen aufgrund ihrer geringen Partikelgröße (≤ 100 Nanometer) ein potenzielles Gesundheitsrisiko für den Menschen dar. Es wurde festgestellt, dass in den Abgasen von Flugzeugturbinen erhebliche Mengen an UFP enthalten sind, weshalb vor allem Großflughäfen in den Fokus gegenwärtiger Forschungen gerückt sind. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie betreibt seit 2015 ein UFP-Messnetz rund um den Flughafen Frankfurt, mit dem es die UFP-Belastung in der Rhein-Main-Region untersucht. Die Messungen zeigten bereits, dass auf dem Flughafengelände und entlang der Anflugrouten emittierte Partikel zu einer bedeutenden Erhöhung der bodennahen UFP-Konzentration führen. In der vorliegenden Arbeit wurde nun anhand von Messungen über neun Monate genauer untersucht inwiefern die UFP-Konzentration an beiden Standorten Frankfurt-Sachsenhausen und Frankfurt-Oberrad vom Flugbetrieb und insbesondere von Überflügen beeinflusst wird.

Bei beiden Standorten konnten bei Wind aus Richtung des Flughafens erhöhte UFP-Konzentrationen beobachtet werden. Sie lagen dann in Sachsenhausen ca. 70 % und in Oberrad ca. 50 % über der durchschnittlichen Hintergrundkonzentration. Außerdem konnte für diesen Windsektor ein positiver statistischer Zusammenhang zwischen UFP-Konzentration und Landefrequenz gezeigt werden. Als eine Hauptquelle wurden die auf der Center- und Südbahn landenden Flugzeuge mit einer Flughöhe bis zu 200 – 300 m identifiziert. Anhand der Daten aus Sachsenhausen und Oberrad allein kann jedoch nicht abgeschätzt werden, in welchem Verhältnis der Beitrag der Landeanflüge zum Beitrag der Emissionen auf dem Flughafengelände steht. An keinem der beiden Standorte gab es Hinweise darauf, dass die direkten Überflüge, die sich im Anflug auf die Landebahn Nordwest befinden, einen bedeutenden Einfluss auf die dortige bodennahe UFP-Konzentration haben. Ein Einfluss von gestarteten Flugzeugen konnte nicht festgestellt werden, allerdings war die Datengrundlage hierfür unzureichend, sodass ein möglicher Einfluss nicht ausgeschlossen werden kann.

Diese Ergebnisse bestätigen die bisherigen Erkenntnisse, dass vor allem landende Flugzeuge in tieferen Flughöhen (< 400 m) eine relevante UFP-Quelle für bodennahe Immissionen darstellen. Dabei sind jene Regionen beeinflusst, die sich auf der windabgewandten Seite der Anflugrouten oder des Flughafengeländes befinden. Des Weiteren konnte ein signifikanter Einfluss des Flugbetriebs bis zu einer Entfernung von ca. 11 km in nordöstlicher Richtung, repräsentiert durch den Standort Oberrad, bestätigt werden. Insgesamt tragen die Erkenntnisse dazu bei, das Einflussgebiet des Flugbetriebs auf die UFP-Konzentration im entfernteren Umkreis des Frankfurter Flughafens besser abschätzen zu können.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	i
Danksagung.....	ii
Zusammenfassung	iv
1 Einleitung.....	1
1.1 Aerosolpartikel.....	2
1.1.1 Entstehung, Quellen und Größenverteilung	2
1.1.2 Gesundheitsrelevanz	5
1.2 UFP in Zusammenhang mit Flugzeugen.....	8
1.3 Einflüsse auf die Schadstoffausbreitung	10
1.3.1 Windrichtung und Windgeschwindigkeit.....	10
1.3.2 Grenzschichtentwicklung	10
1.3.3 Wirbelschleppen	12
1.4 UFP-Messnetz um den Frankfurter Flughafen.....	13
1.5 Zielsetzung	15
2 Material und Methoden.....	16
2.1 Datengrundlage	16
2.1.1 UFP-Messdaten	16
2.1.2 Winddaten.....	21
2.1.3 Flugverkehr und Flugdaten.....	22
2.1.4 Qualitätssicherung der UFP-Messdaten	27
2.1.5 Datentransformation	28
2.2 Statistische Methoden	29
2.2.1 Korrelation.....	29
2.2.2 Kreuzkorrelation	30
2.2.3 R-Studio.....	31
2.3 Methode: Windsektorenanalyse.....	31
2.3.1 Windsektoren für die Betrachtung von Landeanflügen.....	32
2.3.2 Windsektoren für die Betrachtung von Starts.....	33
2.3.3 Datengrundlage der Windsektoren	35
2.3.4 Kreuzkorrelationen der Windsektoren.....	37
2.4 Methode: Tagesanalyse.....	37
3 Ergebnisse	41
3.1 Überblick der Datensätze	41
3.1.1 Häufigkeitsverteilung und Tagesgänge der UFP-Konzentration.....	41
3.1.2 Häufigkeitsverteilung der lokalen Windverhältnisse.....	46
3.1.3 Bahnbelegung und Flugbewegungsfrequenz.....	47
3.2 Einfluss: lokale Windverhältnisse.....	48
3.3 Einfluss: Landungen	51
3.3.1 Emissionsortbestimmung.....	57

3.3.2	Ergebnis: Emissionsortbestimmung	58
3.4	Einfluss: Starts	61
3.5	UFP-Konzentrationsverläufe auf Sekundenbasis.....	65
3.5.1	Vergleich: Morgendlicher Anstieg / Frühster Aufsetzpunkt	65
3.5.2	Einfluss: Wind aus Sektor Flughafen	68
3.5.3	Einfluss: Überflüge.....	70
4	Diskussion und Schlussfolgerung	72
4.1	Allgemeine UFP-Belastung in Sachsenhausen und Oberrad.....	72
4.2	Einfluss von Überflügen	73
4.2.1	Landungen	74
4.2.2	Starts	76
4.2.3	Tagesanalyse.....	77
4.3	Zusammenfassung der Erkenntnisse.....	79
4.4	Abschlussdiskussion	83
5	Ausblick.....	84
	Anhang A: Logbuch	86
	Anhang B: Produktdatenblatt GRIMM CPC	93
	Abbildungsverzeichnis	96
	Tabellenverzeichnis	101
	Literaturverzeichnis	103

1 Einleitung

Das Interesse an Ultrafeinstaub bzw. ultrafeinen Partikeln (UFP) ist in den letzten Jahren sowohl in der Wissenschaft als auch in den Medien deutlich gestiegen. Definiert werden UFP als Partikel mit einem Durchmesser von 100 Nanometer oder weniger (≤ 100 nm). Bei UFP wird häufig die Anzahl an Partikeln pro Kubikzentimeter gemessen, da sie aufgrund ihrer geringen Größe kaum zur Gesamtmasse aller Partikel in der Luft beitragen. Gesetzliche Regelungen oder Vorgaben zu Grenzwerten gibt es für UFP im Gegensatz zu den größeren Feinstaubfraktionen PM_{10} und $PM_{2,5}$, die allgemein auch als Feinstaub bezeichnet werden, bislang noch nicht. Aufgrund ihrer geringen Größe sind UFP besonders lungengängig und werden häufig im Zusammenhang mit enormen Gesundheitsrisiken diskutiert. Erste experimentelle Studien an Tieren und Menschen deuten insbesondere auf gesundheitsgefährdende Effekte der UFP auf Atemwege und das Herz-Kreislauf-System hin (HEI, 2013).

Da UFP vor allem bei Verbrennungsprozessen in großen Mengen entstehen, stellt der Flugbetrieb eine zentrale Quelle von UFP dar. An den Großflughäfen in Los Angeles und Schiphol haben hierzu bereits umfangreiche Datenerhebungen und Untersuchungen stattgefunden die ergaben, dass die im Abwind der Flughäfen liegenden Gebiete von besonders hohen Ultrafeinstaubkonzentrationen betroffen sind (Hudda et al., 2014; Keuken et al., 2015).

Auch am und um den Frankfurter Flughafen, dem größten Flughafen Deutschlands, werden bereits seit 2015 UFP-Messungen seitens des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) im Hinblick auf den Flugbetrieb durchgeführt. Die bisherigen Auswertungen haben gezeigt, dass der Flughafen Frankfurt vor allem für nahe Gebiete im Abwind des Flughafengeländes eine relevante UFP-Quelle darstellt. Des Weiteren zeigen auch die landenden Flugzeuge bei niedrigen Flughöhen (bis etwa 400 m über dem Boden) einen Einfluss auf die bodennahe UFP-Konzentration, wodurch auch entferntere Gebiete (geschätzt bis ca. 7 – 8 km vom Aufsetzpunkt) nahe der Anflugrouten von erhöhten UFP-Konzentrationen betroffen sind. (Rose & Jacobi, 2019)

Aufbauend zu diesen Erkenntnissen soll weiter der Frage nachgegangen werden, bis zu welchen Entfernungen ein Einfluss auf die UFP-Konzentration am Boden durch den allgemeinen Flugbetrieb des Frankfurter Flughafens nachweisbar ist. Insbesondere soll der Einfluss von direkten Überflügen auf die bodennahe UFP-Konzentration überprüft werden. Die Untersuchung dieser Fragestellungen könnte dazu beitragen, das Einflussgebiet des Frankfurter Flughafens

auf die bodennahe UFP-Konzentration besser abschätzen zu können. (Rose & Jacobi, 2019)(Rose & Jacobi, 2019)

In der vorliegenden Arbeit soll der Einfluss des Flugbetriebs¹, insbesondere der Überflüge auf die bodennahe UFP-Konzentration in den nordöstlich vom Frankfurter Flughafen liegenden Stadtteilen Frankfurt-Sachsenhausen und Frankfurt Oberrad, untersucht werden. Hierfür werden unter anderem die Messdaten der vor Ort installierten UFP-Messstationen analysiert.

Vorab werden im Folgenden zunächst einige theoretische Grundlagen erläutert, die für die vorliegende Arbeit von zentraler Bedeutung sind.

1.1 Aerosolpartikel

Die atmosphärische Luft besteht neben Gasen, wie z.B. Stickstoff, Sauerstoff, Argon oder Kohlenstoffdioxid, aus festen, flüssigen und fest-flüssigen Partikeln verschiedener Größe und chemischer Zusammensetzung. Allgemein werden alle in der Luft enthaltenen Partikel auch als Aerosolpartikel bezeichnet. Genauer werden Aerosolpartikel als Gemisch aus festen und flüssigen Partikeln und der umgebenden Luft definiert. (Seinfeld & Pandis, 2006)

1.1.1 Entstehung, Quellen und Größenverteilung

Aerosolpartikel können sowohl durch natürliche als auch anthropogene Prozesse entstehen. Als natürliche Quellen sind beispielhaft Vulkanausbrüche, Sandstürme oder Waldbrände zu nennen (Seinfeld & Pandis, 2006). Anthropogene Quellen lassen sich in stationäre Quellen, wie z.B. industrielle Prozesse, Gebäudeheizungen, Landwirtschaft oder Straßen- und Gebäudebau, und mobile Quellen, wie z.B. PKW, LKW, Lokomotiven, Schiffe oder Flugzeuge, aufteilen (EPA, 2019).

Aerosolpartikel können direkt von einer Quelle emittiert (primäre Partikel) oder aus den Abgasen einer Quelle (z.B. Schwefeloxide, Stickoxide, Ammoniak oder leicht flüchtige Kohlenwasserstoffe) in der Atmosphäre photochemisch gebildet werden (sekundäre Partikel). Die Größe der Partikel reicht dabei von wenigen Nanometern (nm) bis zu einigen Mikrometern (μm). Primäre Partikel aus Verbrennungsprozessen bestehen meist aus Ruß und gelten damit

¹ Zum Einfluss des Flugbetriebs gehören sowohl alle auf dem Flughafengelände stattfindenden Flugzeugabfertigungen als auch alle An- und Abflüge bis zu 914 m Flughöhe (LTO-Zyklen, siehe Abschnitt 1.2).

als „nicht-flüchtig“, gehen also nicht durch Verdunstungsprozesse in die Gasphase über. Sekundäre Partikel bestehen aus den Vorläufergasen, aus denen sie gebildet werden und sind meist „flüchtig“, können also durch Verdunstungsprozesse in die Gasphase übergehen. (EPA, 2019)

Die Größe eines Partikels ist ein sich stetig ändernder Parameter und variiert abhängig von dem jeweiligen Entstehungsprozess und der folgend durchlaufenen atmosphärischen Prozesse. Mit der Partikelgröße ist der aerodynamische Durchmesser eines Partikels gemeint. Der aerodynamische Durchmesser eines Partikels entspricht dem Durchmesser einer Kugel mit einer Dichte von 1 g/cm^3 , welche die gleiche Sinkgeschwindigkeit wie das betrachtete Partikel bei ruhender Luft aufweist (DeCarlo et al., 2004).

Die Partikelgrößenverteilung in der Atmosphäre wird durch verschiedene Moden charakterisiert. In Abb. 1.1 werden die Partikelgrößenverteilungen bezogen auf die Partikelanzahl (oben) und das Partikelvolumen (unten) dargestellt. Wird das Volumen bzw. die Masse der Partikelgrößen betrachtet, liegen zwei Moden vor: die Akkumulationsmode ($0,1 - 2 \mu\text{m}$) und

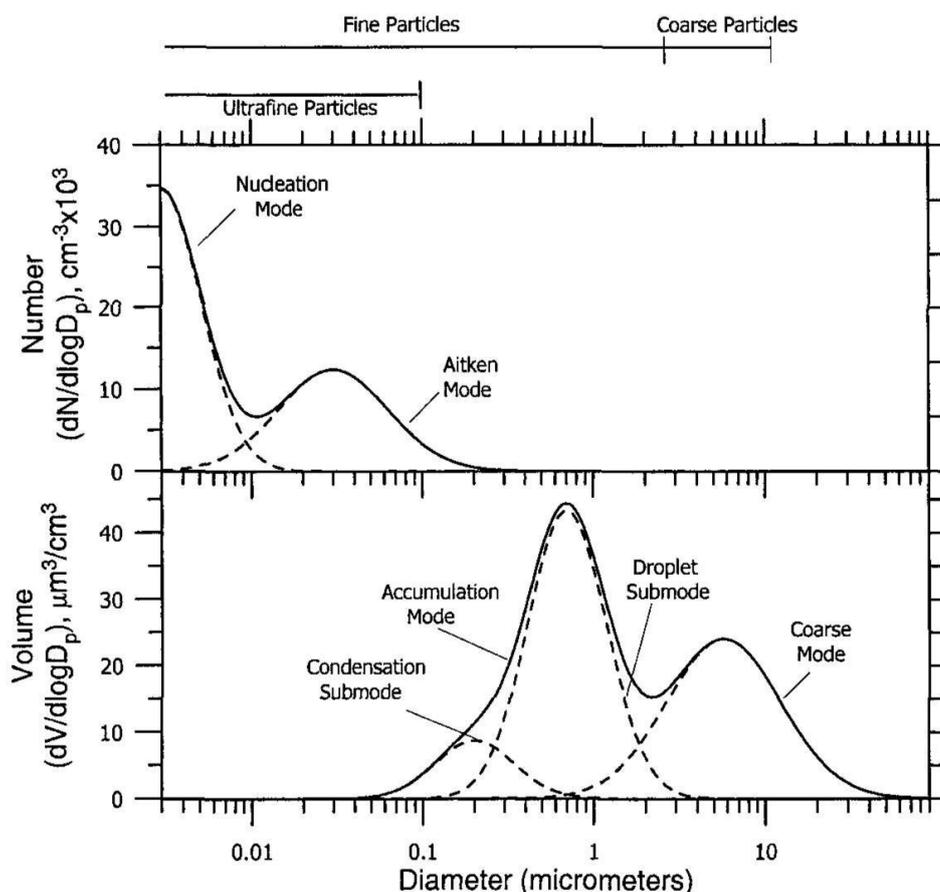


Abb. 1.1: Typische Partikelgrößenverteilungen in der Atmosphäre bezogen auf die Partikelanzahl (obere Kurve) und das Partikelvolumen (untere Kurve) mit verschiedenen Moden. Gezeigt ist die normierte Partikelanzahl bzw. das normierte Partikelvolumen gegen die auf einer logarithmisch eingeteilten Achse aufgetragene Partikelgröße. (Seinfeld & Pandis, 2006)

die Grobmode (2 – 50 μm). Die Akkumulationsmode besteht aus primären Partikeln, kondensierten sekundären Sulfaten, Nitraten und organischen Verbindungen aus der Gasphase und koagulierten Partikeln². Häufig enthält die Akkumulationsmode noch zwei sich überlappende Submoden: die Kondensationsmode und die Tröpfchenmode. Die Kondensationsmode besteht aus primären, durch Koagulation angewachsenen und kondensierten Partikeln. Die Tröpfchensubmode wird durch Wolkenbildung aus Partikeln der Akkumulationsmode gebildet. Partikel der Grobmode werden hauptsächlich durch mechanische Prozesse wie Wind oder Erosion (Staub, Asche, Meersalz, Pollen, etc.) gebildet. (Seinfeld & Pandis, 2006)

Wird statt der Masse die Anzahl der Partikel betrachtet, ergibt sich eine andere Partikelgrößenverteilung mit zwei Moden: die Nukleationsmode (< 10 nm) und die Aitkenmode (10 – 100 nm). Partikel der Nukleationsmode entstehen durch sekundäre Partikelbildung aus Vorläufergasen. Die Aitkenmode besteht aus primären Partikeln, an welche während des Transports durch die Atmosphäre Gase kondensieren und sekundären Partikeln, die durch Koagulations- oder Kondensationsprozesse bereits angewachsen sind. (Seinfeld & Pandis, 2006)

Partikel mit einem Durchmesser von > 0,1 μm nehmen nahezu den gesamten Massenanteil aller Partikelgrößen ein, sind jedoch in ihrer Partikelanzahl verschwindend gering im Vergleich zu Partikelgrößen < 0,1 μm . Umgekehrt tragen Partikel < 0,1 μm zu einem verschwindend geringen Anteil zur Masse aller Partikelgrößen bei (100.000 P/cm³ mit einem Durchmesser von 10 nm haben eine Massenkonzentration von < 0,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Seinfeld & Pandis, 2006). Aus diesem Grund wird die Konzentration von Partikeln > 0,1 μm häufig als Massenkonzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] und von Partikeln < 0,1 μm häufig als Anzahlkonzentration [P/cm³] angegeben (EPA, 2019).

Partikel werden hauptsächlich durch Sedimentations- und Auswaschungsprozesse wieder aus der Atmosphäre entfernt. Größere Partikel sedimentieren aufgrund ihrer höheren Masse schneller als kleinere Partikel und liegen deshalb ab einer Größe von mehreren Mikrometern nur in geringeren Konzentrationen in der atmosphärischen Luft vor. Kommt es zum Niederschlag, lagern sich die Partikel an den gebildeten Tröpfchen an und werden dadurch aus der Luft entfernt. (Seinfeld & Pandis, 2006)

² Aerosolpartikel können sich in der Luft durch Kollision mit anderen Partikeln zu größeren Partikeln verbinden. Dieser Vorgang wird auch Koagulation genannt.

1.1.2 Gesundheitsrelevanz

Die in der atmosphärischen Luft enthaltenen Partikel können über die Atemwege vom menschlichen Körper aufgenommen werden. Für die gesundheitliche Relevanz dieser Partikel ist vor allem die Partikelgröße und chemische Zusammensetzung maßgebend. Je kleiner die Partikel sind, desto tiefer können sie in den menschlichen Organismus eindringen. Wasserlösliche Partikel können durch Löslichkeitsprozesse wieder aus dem Körper ausgeschieden werden, wohingegen sich unlösliche Partikel an den jeweiligen Depositionsorten ablagern und anreichern können (Birmili, 2006). Demnach stellen vor allem Rußpartikel ein erhöhtes Gesundheitsrisiko aufgrund ihrer geringen Wasserlöslichkeit dar.

Während Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von $10\ \mu\text{m}$ überwiegend in den oberen Atemwegen abgeschieden werden, können etwas kleinere Partikelgrößen mit einem aerodynamischen Durchmesser von $2,5\ \mu\text{m}$ den oberen Atemtrakt passieren und bis zur Lunge vordringen (Newby et al., 2015). Bezüglich dieser Partikelgrößen haben bereits viele Studien einen Zusammenhang zwischen lang anhaltender Expositionsdauer und erhöhten gesundheitlichen Erkrankungsrisiken nachgewiesen, wie z.B. Herz-Kreislauf-Erkrankungen oder Atemwegserkrankungen, welche auch zu einer erhöhten Sterblichkeitsrate führen. In einem Experten-Review der „European Society of Cardiology“ wurden diese und weitere Erkenntnisse der gesundheitlichen Auswirkung von Luftverunreinigungen, insbesondere die von Aerosolpartikeln, ausführlich beschrieben, um die Bevölkerung auf die Gesundheitsrelevanz der Luftqualität aufmerksam zu machen (Newby et al., 2015).

Die US-amerikanische Umweltschutzbehörde Environmental Protection Agency (EPA) hat im Jahr 1987 mit dem *National Air Quality Standard for Particulate Matter* eine definierte Einteilung (PM-Kategorisierung) derjenigen Partikelgrößen vorgenommen, die beim Einatmen nicht oder nur teilweise in den Atemwegen abgeschieden werden und damit ein gesundheitliches Risiko für die Bevölkerung darstellen (EPA, 2019). In der PM-Kategorisierung wurden auf Grundlage des aerodynamischen Durchmessers die Standards PM_{10} (Partikel kleiner als $10\ \mu\text{m}$) und $\text{PM}_{2,5}$ (Partikel kleiner als $2,5\ \mu\text{m}$) definiert³. Bei diesen beiden Standards wird typischerweise die Massenkonzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] der Partikel angegeben.

³ Das Abscheideverhalten der oberen Atemwege wurde als Grundlage für den Standard PM_{10} verwendet. Partikelgrößen kleiner als $1\ \mu\text{m}$ werden zu 100 % nicht mehr zurückgehalten, während Partikelgrößen größer als $15\ \mu\text{m}$ vollständig abgeschieden werden. Partikel der Größe $10\ \mu\text{m}$ werden zu 50 % in den oberen Atemwegen abgeschieden, woraus sich auch die Bezeichnung PM_{10} ableitet. Für den Standard $\text{PM}_{2,5}$ wurde das Abscheideverhalten der Lunge und Alveolen verwendet. Partikelgrößen kleiner als $0,5\ \mu\text{m}$ werden zu 100 % nicht mehr zurückgehalten, während Partikelgrößen größer als $3,5\ \mu\text{m}$ vollständig abgeschieden werden. Partikel der Größe $2,5\ \mu\text{m}$ werden zu 50 % abgeschieden, woraus sich die Bezeichnung $\text{PM}_{2,5}$ ableitet. (EPA (2019))

Für die Standards PM₁₀ und PM_{2,5} wurden mit der Richtlinie 1999/30/EG EU-weit Grenzwerte eingeführt, um die Bevölkerung vor der gesundheitlichen Einwirkung der Partikel zu schützen. In Deutschland ist die Festlegung und Einhaltung der Grenzwerte in der 39. Bundesimmissionsschutzverordnung (39. BImSchV) geregelt. Die Grenzwerte für PM₁₀ und PM_{2,5} werden dort als Massenkonzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] angegeben.

Aufgrund der nachgewiesenen Gesundheitsrelevanz von PM₁₀ und PM_{2,5} stehen aktuell auch kleinere Partikel im Verdacht auf die menschliche Gesundheit einzuwirken. Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von $< 0,1 \mu\text{m}$ bzw. 100 nm gelten als „alveolengängig“ und können dadurch über die Blutbahn bis hin zu Organen, wie Herz oder Gehirn transportiert werden (Birmili, 2006). Eine standardisierte Definition von diesen ultrafeinen Partikeln gibt es bislang noch nicht. In den meisten wissenschaftlichen Untersuchungen werden Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser $< 0,1 \mu\text{m}$ bzw. 100 nm als ultrafeine Partikel (UFP) definiert (Baldauf et al., 2016). Bislang ist noch wenig über die gesundheitliche Wirkung der UFP bekannt, weshalb in diesem Bereich aktuell viel an Forschung stattfindet. Da UFP vor allem bei Verbrennungsprozessen in großer Anzahl emittiert werden, ist eine mögliche Einwirkung auf die menschliche Gesundheit vor allem in Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen oder industriellem Betrieb wahrscheinlich. Erste Studien über die gesundheitliche Auswirkung von UFP nach kurzzeitiger Exposition deuten darauf hin, dass UFP ähnlich auf die menschliche Gesundheit wirken wie die größere Partikelfraktion PM_{2,5} (HEI, 2013; Marowska et al., 2004). Jedoch erschweren eine mangelnde Datengrundlage und fehlende Standards bei der Messung von UFP einen Vergleich der durchgeführten Studien (HEI, 2013). Da die gesundheitliche Relevanz von UFP noch nicht eindeutig geklärt ist, gibt es bislang noch keine gesetzlich geregelten Grenzwerte für UFP.

Aufgrund mangelnder Studien und fehlender Messstandards kann keine allgemeingültige Aussage über „typische“ UFP-Konzentrationen in bestimmten Umgebungen getroffen werden. Das „German Ultrafine Aerosol Network“ (GUAN) hat in einer Langzeit-Studie an 17 Standorten in ganz Deutschland die UFP-Konzentration im Größenbereich von 20 – 800 nm über einen längeren Zeitraum gemessen. Die gewählten Standorte repräsentieren bestimmte Umgebungstypen, wie „Straßenrand“, „städtischer Hintergrund“, „ländlich“ oder „alpin“. In Tab. 1.1 sind die Ergebnisse der durchschnittlichen UFP-Konzentrationen für jeden Standort enthalten. Am Straßenrand liegen hier mit ca. 9.500 – 10.500 P/cm³ im Mittel die höchsten Anzahlkonzentrationen vor. Die mittleren Anzahlkonzentrationen für den Umgebungstyp „städtischer Hintergrund“ variieren von ca. 5.000 – 9.500 P/cm³. In alpinen Gebieten werden im Mittel nur

etwa 1.000 – 2.000 P/cm³ gemessen. Die gesammelten Daten sollen als Grundlage für die Gesundheits- und Klimaforschung in Bezug auf UFP dienen. (Birmili et al., 2016)

Tab. 1.1: Durchschnittliche Partikelanzahlkonzentrationen von Partikeln im Größenbereich 20 – 800 nm an 17 verschiedenen Standorten in Deutschland. Site: Messstandort, Type: Umgebungstyp, Period: Messzeitraum, N: Partikelanzahl in P/cm³, n: Anzahl an Stundenmittelwerten, μ : Mittelwert, σ : Standardabweichung, med: Median, p95: 95-%-Perzentil. (Birmili et al., 2016)

No.	Site	Type	Period	n	$N_{[20;800]}$ in cm ⁻³			
					μ_N	σ_N	med	p95
9	Leipzig-Mitte	roadside	2010–2014	35 400	10 500	6500	9000	22 400
8	Leipzig-Eisenbahnstr.	roadside	2009–2014	43 000	9610	5600	8460	20 000
4	Dresden-Nord	roadside	2009–2014	33 900	9570	5440	8400	19 900
13	Mülheim-Styrum	urban backg.	2009–2014	45 100	9570	5450	8330	20 000
7	Langen	urban backg.	2011–2013	24 800	6490	3840	5740	13 500
2	Augsburg	urban backg.	2009–2014	41 900	7260	5780	5630	17 600
1	Annaberg-Buchholz	urban backg.	2012–2014	22 400	6620	6450	4950	16 800
10	Leipzig-Tropos	urban backg.	2009–2014	49 200	5840	4110	4840	13 000
3	Bösel (Südoldenburg)	rural	2009–2014	46 600	5380	3120	4810	10 900
5	Dresden-Winckelmannstr.	urban backg.	2011–2014	22 400	6290	6130	4710	15 900
11	Leipzig-West	urban backg.	2010–2014	28 600	4960	3210	4210	10 600
12	Melpitz	rural	2009–2014	47 400	4380	3000	3710	9620
16	Waldhof	rural	2009–2014	49 700	3860	2350	3390	8050
14	Neuglobsow	rural	2011–2014	27 000	3270	1840	2940	6590
6	Hohenpeißenberg	rural (mountain)	2009–2014	48 800	2600	1470	2360	5280
15	Schauinsland	rural (mountain)	2009–2014	44 100	1950	1430	1640	4590
17	Zugspitze (Schneef.)	Alpine mount.	2013–2014	39 000	1120	874	886	2780

Im Zusammenhang mit erhöhten UFP-Belastungen in urbanen Gebieten sind vor allem Flughäfen als UFP-Quelle Gegenstand aktueller Forschung, da Flugzeuge große Mengen an UFP emittieren. In den bisher durchgeführten internationalen Studien an Großflughäfen, wie bspw. Los Angeles International Airport, Schiphol, Kopenhagen, Heathrow und weitere wurden bereits hohe UFP-Konzentrationen in der Nähe von Flugzeugemissionen festgestellt (Stacey, 2019). Aktuell werden diesbezüglich auch am Frankfurter Flughafen weitere Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss des Flugbetriebs auf die UFP-Belastung angrenzender Gebiete zu analysieren. Die bisherigen Ergebnisse können Rose und Jacobi (2019) und Rose und Jacobi (2018) entnommen werden.

1.2 UFP in Zusammenhang mit Flugzeugen

Flugzeugemissionen setzen sich aus Abgasen, wie CO₂, H₂O, Kohlenwasserstoffen, CO, NO_x, SO₂ und Ruß zusammen. Diese Abgase werden sowohl in Form von Gasen als auch in Form von Partikeln emittiert (Brasseur et al., 1998). In Abb. 1.2 werden alle Prozesse und Einflüsse von Flugzeugemissionen schematisch dargestellt.

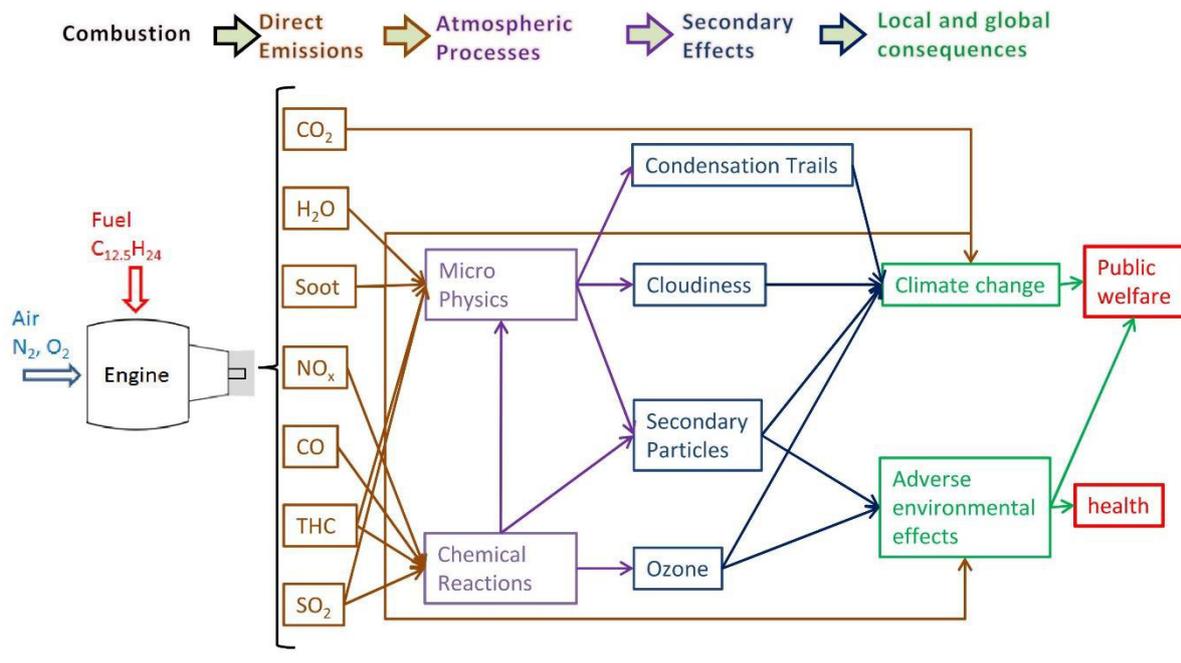


Abb. 1.2: Schematische Darstellung der direkten Schadstoffemissionen von Flugzeugturbinen, deren Folgeprozesse in der Atmosphäre sowie deren lokale und globale Auswirkungen. Soot: Staubpartikel, THC: flüchtige Kohlenwasserstoffe. (Rindlisbacher, 2017)

Die direkt aus den Motoren emittierten nicht-flüchtigen Primärpartikel bestehen hauptsächlich aus Ruß. Die Partikelgrößen liegen dabei hauptsächlich im ultrafeinen Bereich (< 100 nm). Die emittierten Gase der Flugzeugmotoren können durch chemische Reaktionen neue Kleinstpartikel (Sekundärpartikel) bilden oder an bereits bestehenden Partikeln kondensieren. (ICAO, 2019)

Die Anzahl der von Flugzeugturbinen direkt emittierten UFP ist variabel und hängt vor allem von der Motorenleistung der Flugzeugturbinen ab. In Lobo et al. (2015) wurde anhand drei verschiedener Triebwerktypen gezeigt, dass die Anzahl an emittierten nicht-flüchtigen Partikeln pro kg Kerosin je nach Schubkraft variiert und dabei in Billionen- teilweise sogar in Billionenhöhe liegt (Abb. 1.4).

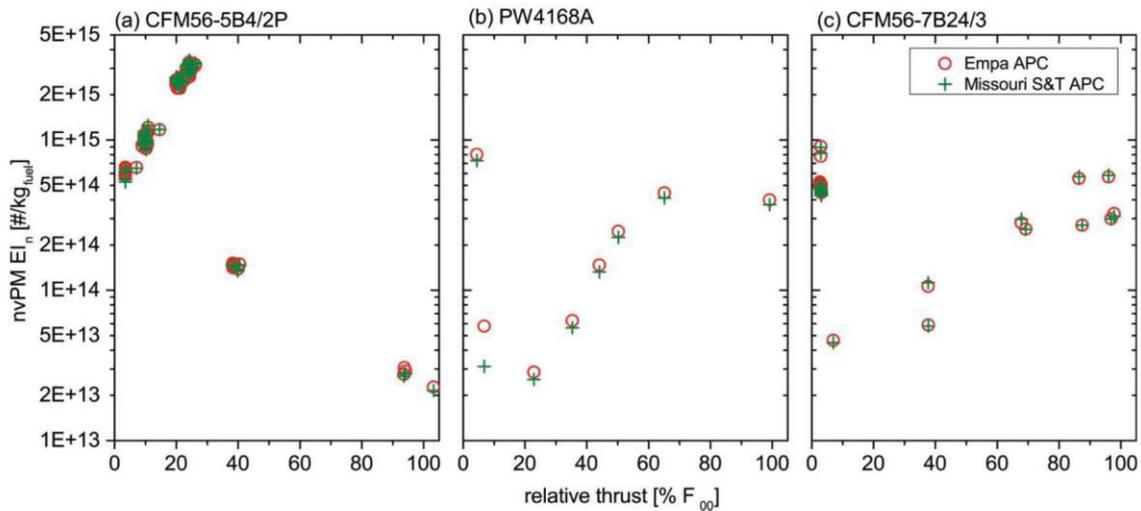


Abb. 1.4: Emittierte Partikelanzahl nicht-flüchtiger Partikel pro kg Kraftstoff in Abhängigkeit der relativen Motorenleistung der Triebwerksmodelle (a) CFM56-5B4/2P, (b) PW4168A und (c) CFM56-7B24/3. Die Messungen wurden von der Missouri University of Science and Technology (Missouri S&T) und der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) durchgeführt. (Lobo et al., 2015)

Damit stellen Flugzeuge eine relevante Quelle für UFP dar, weshalb besonders Gebiete in der Nähe zu Großflughäfen im Verdacht stehen, von einer erhöhten UFP-Belastung durch den Flugbetrieb betroffen zu sein. Vor allem in den Phasen der LTO-Zyklen („Landing-and-Take-Off-Zyklen“) haben Flugzeuge einen messbaren Einfluss auf die Schadstoffbelastung in angrenzenden Ortschaften (ICAO, 2019; Lobo et al., 2015). Die LTO-Zyklen beschreiben alle Zyklen, die ein Flugzeug unterhalb von 914 m Flughöhe (entspricht 3000 ft) durchläuft (Abb. 1.3) (ICAO, 2019).

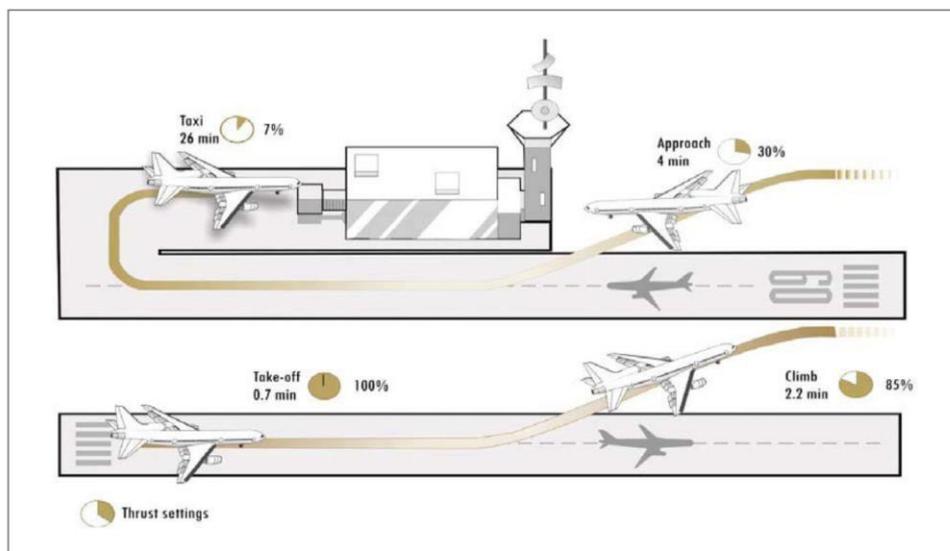


Abb. 1.3: LTO-Zyklen mit Angabe über die durchschnittliche Dauer und der relativen Motorenleistung. Taxi: Rollen, Approach: Landeanflug, Take-off: Start, Climb: Steigflug. (ICAO, 2019)

1.3 Einflüsse auf die Schadstoffausbreitung

In welchem Ausmaß sich emittierte Schadstoffe ausbreiten, hängt sowohl von meteorologischen als auch mechanischen Einwirkungen ab. Bei der Luftreinhaltung ist das Wissen über die Ausbreitung von Schadstoffen essenziell, um die zugehörigen Quellen identifizieren zu können. Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Einflüsse auf die Schadstoffausbreitung von UFP beschrieben.

1.3.1 Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Bei atmosphärischen Schadstoffausbreitungen bestimmt vor allem die Bewegung der schadstoffumgebenden Luftmassen darüber, wohin und wie weit die von einer Quelle emittierten Abgase transportiert werden. Die Bewegung und Ausbreitung eines Luftpakets in der Atmosphäre wird wesentlich durch die vorherrschenden Windverhältnisse beeinflusst. Die lokalen Windverhältnisse werden durch die Windrichtung und Windgeschwindigkeit charakterisiert. Die Windrichtung bestimmt, in welche Richtung die emittierten Schadstoffe von der Quelle aus transportiert werden. Damit eine korrekte Windrichtung festgestellt werden kann, muss eine gewisse Strömung der Luftmassen vorliegen, welche durch die Größe der Windgeschwindigkeit bestimmt wird. Die Windgeschwindigkeit trägt einerseits zum Transport der emittierten Schadstoffe und andererseits zu deren horizontaler und vertikaler Verteilung in der Luft bei. Dabei bewirken hohe Windgeschwindigkeiten eine schnellere und effektivere Verteilung der emittierten Schadstoffe in vertikaler und horizontaler Richtung, was quellennah zu niedrigeren Schadstoffkonzentrationen führt. Bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten (< 1 m/s) verteilen sich die emittierten Schadstoffe nur sehr langsam, wodurch quellennah eher hohe Schadstoffkonzentrationen vorliegen. (Foken, 2006; Seinfeld & Pandis, 2006)

Mit steigender Windgeschwindigkeit nimmt der Einfluss von höher gelegenen Schadstoffquellen auf die Bodenkonzentration zu, da die schadstoffbeladenen Luftmassen bei höheren Windgeschwindigkeiten schneller zum Boden transportiert werden (D. Carslaw et al., 2006).

1.3.2 Grenzschichtentwicklung

Die Schichtung der Luftmassen in der Atmosphäre stellen einen weiteren Einflussfaktor in Bezug auf die Ausbreitung emittierter Luftschadstoffe dar. Die untersten Luftschichten der Troposphäre werden allgemein auch als atmosphärische oder planetare Grenzschicht bezeichnet. Diese atmosphärische Grenzschicht erstreckt sich über Land auf 1 – 2 km Höhe und über Ozeanen auf bis zu 500 m Höhe. Die Grenzschicht wird durch eine stabile Schicht, der sogenannte

Entrainmentzone, über die ein Austausch mit der darüber liegenden freien Atmosphäre stattfindet, begrenzt. Einen wesentlichen Beitrag zur Durchmischung der unteren Luftschichten und damit zur Verteilung der Schadstoffe leisten horizontale und vertikale Turbulenzen, die stark von der Sonneneinstrahlung abhängig sind. Aus dieser Abhängigkeit ergibt sich ein bestimmter Tagesgang der atmosphärischen Grenzschicht, der in Abb. 1.5 dargestellt ist.

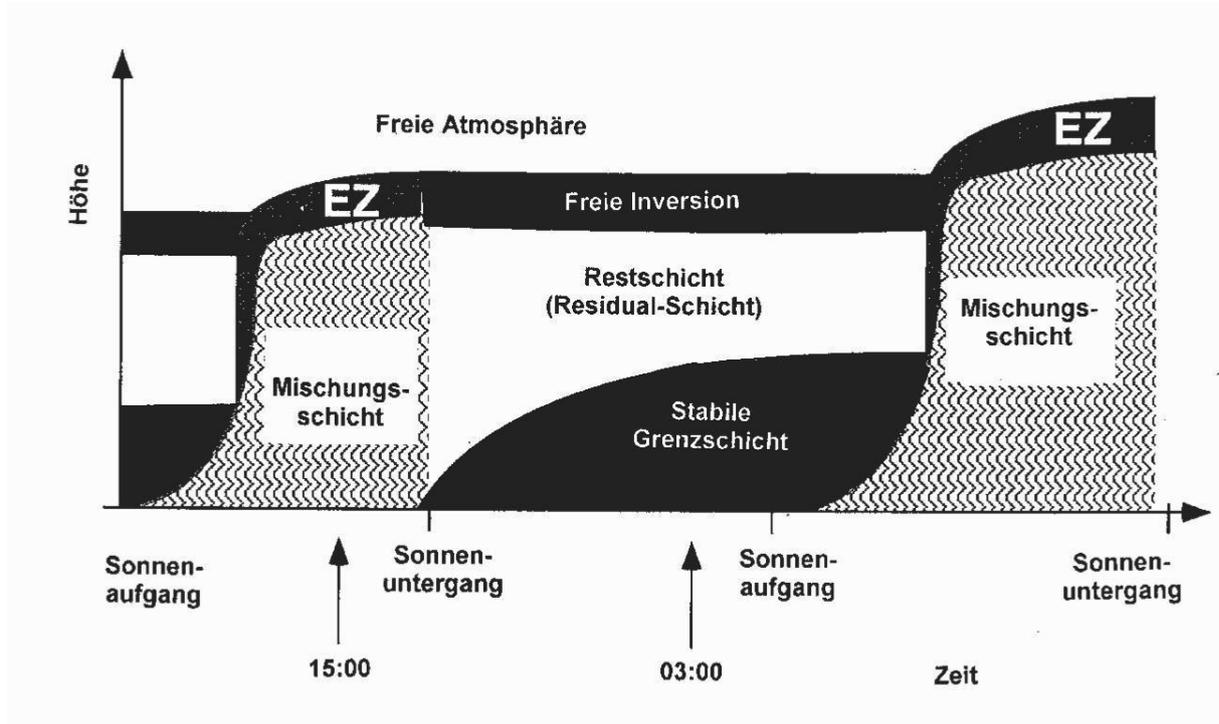


Abb. 1.5: Tagesgang der atmosphärischen Grenzschicht, EZ: „Entrainmentzone“. (Foken, 2006)

Tagsüber erwärmt sich die Grenzschicht durch die Sonneneinstrahlung und es ergibt sich eine durch konvektive Turbulenzen gut durchmischte Luftschicht, die auch Mischungsschicht genannt wird. Ab Sonnenuntergang entwickelt sich nahe am Boden eine stabile Bodengrenzschicht. Die Luftmassen innerhalb dieser stabilen Bodenschicht vermischen sich kaum mit der darüberliegenden Restschicht, sodass die Verteilung der Schadstoffe in der Nacht bis zum frühen Morgen überwiegend auf diesen eingeschränkten Bereich begrenzt ist. Durch die morgendliche Sonneneinstrahlung wird diese Bodengrenzschicht wieder aufgelöst und es bildet sich erneut die Mischungsschicht aus. (Foken, 2006)

Der Einfluss der Grenzschichtentwicklung auf die Schadstoffausbreitung zeigt sich vielerorts in den durchschnittlichen Schadstoffkonzentrationen verkehrsbezogener Emissionen. So

werden morgens zu Berufsverkehrszeiten sehr hohe Konzentrationen gemessen, während am Nachmittag zu Zeiten des Feierabendverkehrs deutlich niedrigere Konzentrationen vorliegen. (Seinfeld & Pandis, 2006)

1.3.3 Wirbelschleppen

Der Auftrieb eines Flugzeugs wird durch die Umströmung der Flügel zwischen Ober- und Unterseite und der dadurch hervorgerufenen Druckdifferenzen erzeugt. An den Flügelspitzen werden dadurch gegensinnig rotierende Wirbel erzeugt, die sich im weiteren Verlauf zu einem langsam absinkenden Wirbelpaar vereinigen, welches auch als Wirbelschleppe bezeichnet wird. Diese Wirbelschleppen sind zunächst in sich stabil und können mehrere hundert Meter in vertikaler Richtung nach unten zurücklegen, ehe sie sich räumlich verteilen und langsam in ungeordnete Turbulenzen zerfallen. Wirbelschleppen stellen für nachfolgende Flugzeuge ein Risiko dar, weshalb festgelegte Mindestabstände zwischen Flugzeugen eingehalten werden müssen. Wie weit die Wirbelschleppen vertikal nach unten verfrachtet werden, hängt in erster Linie von der Stärke der Wirbel und damit vom Gewicht und der Flügelspannweite des Flugzeugs ab. Des Weiteren wird sowohl die vertikale als auch die horizontale Verfrachtung von Wirbelschleppen durch die vorherrschenden Windverhältnisse und weitere meteorologische Parameter beeinflusst. (Böhning, 2006)

Wirbelschleppen von tief fliegenden Flugzeugen können unter bestimmten Voraussetzungen bis zum Boden gelangen und sind dort je nach Stärke noch deutlich spürbar. Im Rhein-Main-Gebiet gab es mehrere Vorfälle, bei denen anerkanntermaßen durch die Kraft der bis zum Boden gelangten Wirbelschleppen Dächer von Wohnhäusern beschädigt wurden (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen, o. D.). Inwiefern Flugzeugemissionen, insbesondere emittierte UFP von startenden oder landenden Flugzeugen durch Wirbelschleppen in tiefere Luftschichten bzw. bis zum Boden verfrachtet werden und die UFP-Belastung beeinflussen, ist bisweilen noch ungeklärt und soll unter anderem Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen sein. Die Literatur bietet dazu grobe Abschätzungen auf Grundlage von Beobachtungen oder Messungen. In Riley et al. (2016) wurde in Los Angeles am Nachmittag ein Teil der Emissionen von Flugzeugen in 500 m Flughöhe nach 3 – 8 Minuten am Boden gemessen. Eine andere Studie hat gezeigt, dass die von den Flugzeugtypen Airbus 340 und Boing 747 erzeugten Wirbelschleppen in der freien Atmosphäre nach 6 Minuten ca. 400 – 550 m in Richtung Boden abgesunken sind (Unterstrasser et al., 2013).

1.4 UFP-Messnetz um den Frankfurter Flughafen

Der Frankfurter Flughafen wird von der Fraport AG betrieben und ist mit mehr als 69 Mio. beförderten Passagieren und 512.115 Flugbewegungen im Jahr 2018 der größte Flughafen Deutschlands und der viertgrößte in Europa (Fraport AG, 2018). Aufgrund der wachsenden Anzahl an Studien über erhöhte UFP-Belastungen rund um Großflughäfen (Los Angeles, Schiphol, etc. (Stacey, 2019)) ist der Flughafen Frankfurt in den letzten Jahren in den Fokus gegenwärtiger Untersuchungen gerückt. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) hat im Jahr 2015 mit der kontinuierlichen Messung von UFP in der ca. 6 km südwestlich vom Flughafen entfernten Stadt Raunheim begonnen (Rose & Jacobi, 2019). Seither hat das HLNUG das UFP-Messnetz rund um den Flughafen um mehrere Messstellen erweitert, um den Einfluss des Flugbetriebs auf die UFP-Belastung der umliegenden Ortschaften genauer untersuchen zu können (Abb. 1.6).

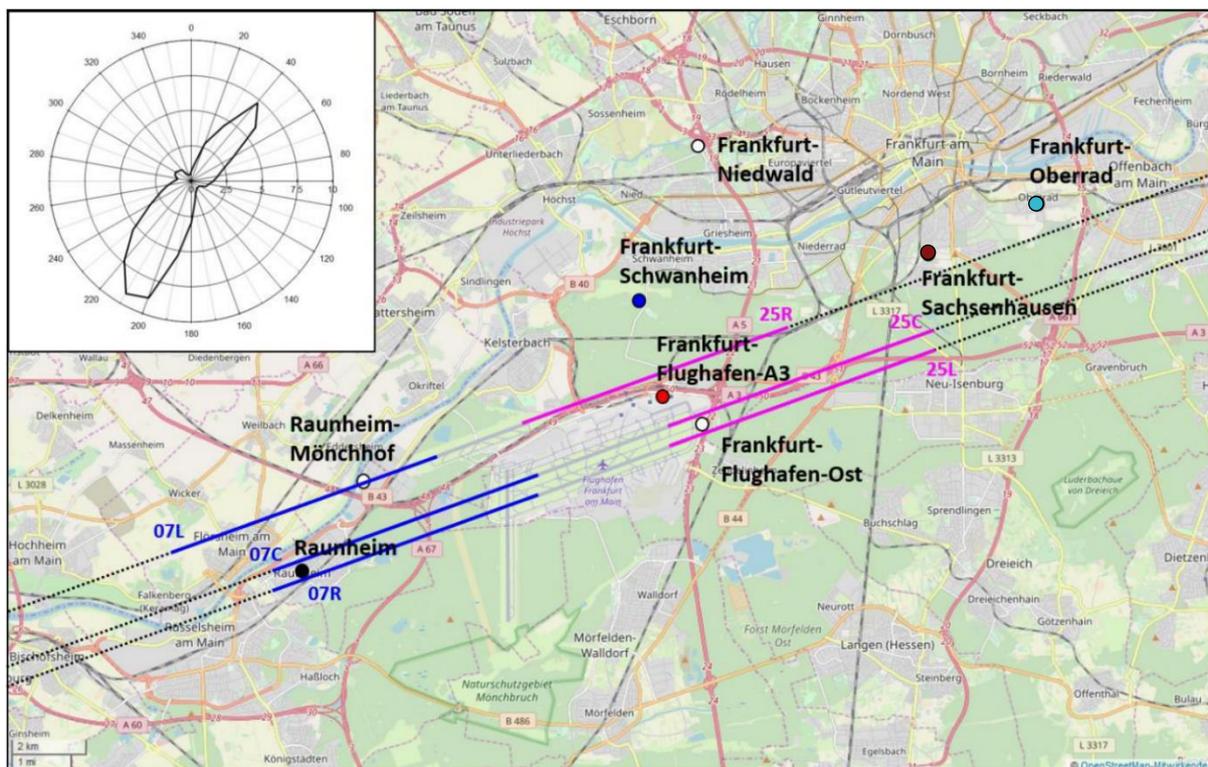


Abb. 1.6: Aktuelle UFP-Messstandorte in näherer Umgebung zum Frankfurter Flughafen, betrieben vom HLNUG. Die eingezeichneten Linien stellen die Anflugrouten der Landebahn Nordwest (07L/25R), Centerbahn (07C/25C), und Südbahn (07R/25L) bei Betriebsrichtung 07/Ost (blau) und 25/West (pink) dar. Die farbige markierten Bereiche der Anflugrouten markieren die Strecke vom jeweiligen Aufsetzpunkt bis zu einer ungefähren Flughöhe von 400 m. Oben links ist die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung für den Zeitraum 09/2017 – 02/2019, gemessen von der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mit der Stations-ID 1420, dargestellt. (© OpenStreetMap-Mitwirkende; Rose & Jacobi, 2019)

Die bisherigen Ergebnisse der langfristigen Untersuchungen wurden in zwei veröffentlichten Zwischenberichten zusammengefasst (Rose & Jacobi, 2018, 2019). Tab. 1.2 zeigt eine Übersicht über alle in Abb. 1.6 dargestellten Messstandorte mit Angaben der gemessenen Partikelgröße, des verwendeten Messgeräts und des Messzeitraums.

Tab. 1.2: Details zu den UFP-Messstandorten aus Abb. 1.6. (Rose and Jacobi 2019)

Standort	Messgröße	Messgerät	Zeitraum
Raunheim	Anzahlkonzentration (2,5 nm – 1 µm)	CPC (Fa. TSI, Model 3776)	seit 09/2015
Raunheim	Anzahlgrößenverteilung (10 nm – 500 nm)	SMPS (Fa. TSI, Model 3938)	seit 09/2017
Frankfurt- Schwanheim	Anzahlgrößenverteilung (10 nm – 500 nm)	SMPS (Fa. TSI, Model 3938)	seit 10/2017
Frankfurt- Flughafen-A3	Anzahlgrößenverteilung (10 nm – 500 nm)	SMPS (Fa. TSI, Model 3938)	08/2018 bis 02/2019
Frankfurt- Sachsenhausen	Anzahlkonzentration (7 nm – 2,2 µm)	CPC (Fa. Grimm, Model EDM 465)	seit 10/2018
Frankfurt- Oberrad	Anzahlkonzentration (7 nm – 2,2 µm)	CPC (Fa. Grimm, Model EDM 465)	seit 03/2019
Frankfurt- Flughafen-Ost	Anzahlgrößenverteilung (10 nm – 500 nm)	SMPS (Fa. TSI, Model 3938)	seit 03/2019
Frankfurt- Niedwald	Anzahlgrößenverteilung (10 nm – 500 nm)	SMPS (Fa. TSI, Model 3938)	seit 04/2019
Raunheim- Mönchhof	Anzahlkonzentration (7 nm – 10 µm)	CPC (Fa. TSI, Model 3750)	vsl. ab 10/2019

Die Auswertung der bisherigen Messergebnisse hat ergeben, dass an allen Messstandorten bei Wind aus Richtung Flughafengelände erhöhte UFP-Konzentrationen gemessen werden. Weiterhin lässt sich ein markanter Tagesgang der UFP-Konzentration bei Wind aus Richtung Flughafengelände feststellen: Die UFP-Konzentration steigt morgens ab 5 Uhr stark an, bleibt tagsüber auf einem hohen Niveau und sinkt spät abends gegen 23 Uhr wieder auf das Nachtkonzentrationsniveau ab. Die Zeiten passen zu den Betriebszeiten des Frankfurter Flughafens (5 – 23 Uhr). Weiterhin deuten die Auswertungen darauf hin, dass Landungsanflüge unterhalb einer Flughöhe von etwa 400 m zu erhöhten UFP-Konzentrationen beitragen. Aufgrund dieser

Zusammenhänge und aufgrund weiterer Auswertungen in den Zwischenberichten lässt sich der Flughafen Frankfurt inklusive der Anflugkorridore unterhalb von 400 m als UFP-Quelle für die umliegende UFP-Belastung identifizieren. (Rose & Jacobi, 2019)

Das neu installierte Messgerät am Standort in Frankfurt-Oberrad soll in Kombination mit dem Messgerät in Frankfurt-Sachsenhausen Aufschluss darüber geben, wie sich die Partikelkonzentration mit zunehmender Entfernung zum Frankfurter Flughafen ändert. Auch der Frage, ob insbesondere Überflüge einen direkten Einfluss auf die bodennahe UFP-Konzentration haben bzw. ab welcher Flughöhe der Landungsüberflüge ein Einfluss auf die bodennahe UFP-Konzentration messbar ist, soll weiter nachgegangen werden. (Rose & Jacobi, 2019)

1.5 Zielsetzung

In dieser Arbeit soll überprüft werden, ob ein Einfluss von Überflügen (gestartete und landende Flugzeuge) auf die bodennahe UFP-Konzentration in Frankfurt-Sachsenhausen und/oder Frankfurt-Oberrad besteht und statistisch nachweisbar ist. Dafür werden die gesammelten Daten der UFP-Messstationen in Frankfurt-Sachsenhausen und Frankfurt-Oberrad, Flugdaten der Fraport AG und Winddaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) erhoben und mit dem Fokus auf folgende Fragestellungen analysiert:

1. Wie hoch ist die allgemeine UFP-Belastung in Frankfurt-Sachsenhausen und Frankfurt-Oberrad zu Tages- und Nachtzeiten? Welchen Einfluss haben Windrichtung und -geschwindigkeit auf die UFP-Konzentration?
2. Existiert ein statistisch nachweisbarer Zusammenhang zwischen der UFP-Konzentration in Frankfurt-Sachsenhausen bzw. Frankfurt-Oberrad und Überflügen bzw. nahen Vorbeiflügen? Wenn ja, unter welchen Bedingungen?
3. Ist zwischen den beiden Messstationen ein zeitlicher Versatz der UFP-Konzentration sichtbar? Lässt sich damit die Hauptquelle der UFP-Immissionen lokalisieren? Wenn ja, unter welchen Bedingungen?
4. Können einzelne direkte Überflüge bestimmten UFP-Konzentrationsspitzen eindeutig zugeordnet werden? Wenn ja, unter welchen Bedingungen?

2 Material und Methoden

Aus den in Abschnitt 1.5 formulierten Fragestellungen werden auf Grundlage der vorliegenden Daten entsprechende Methoden erarbeitet, welche im folgenden Abschnitt erläutert werden.

2.1 Datengrundlage

Für die Untersuchungen des Einflusses von Überflügen auf die bodennahe UFP-Konzentration werden Messwerte der Ultrafeinstaubkonzentrationen für die Standorte Frankfurt-Sachsenhausen und Frankfurt-Oberrad, Messwerte der lokalen Windverhältnisse (Windrichtung und Windgeschwindigkeit) sowie Daten der Flugbewegungen am Frankfurter Flughafen verwendet. Im folgenden Abschnitt wird die Erhebung dieser Daten detailliert beschrieben.

2.1.1 UFP-Messdaten

Am Standort Sachsenhausen und am Standort Oberrad wird jeweils die Gesamtanzahl an UFP in Partikel pro Kubikzentimeter [P/cm^3] mit einem Kondensationspartikelzähler (*engl.*: Condensation-Particle-Counter, kurz: CPC) der Firma GRIMM (Fa. Grimm, Modell EDM 465) sekundlich aufgezeichnet. Die Messzeiten sind in MEZ angegeben. Diese Rohdaten stellen die Basis für alle folgenden Analysen der UFP-Konzentration dar.

Kondensationspartikelzähler (CPC)

Der eingesetzte Kondensationspartikelzähler der Firma GRIMM misst die Gesamtanzahl an Partikeln pro Kubikzentimeter in der Luft in P/cm^3 und kann dabei nach Angaben des Herstellers Partikel im Größenbereich von 4 nm bis 1 μm erfassen. Die Zählraten der kleinsten Partikelgrößen ist in Abb. 2.1 dargestellt. Die Messgeräte erfassen Partikel mit einem Durchmesser von 7 nm zu etwa 50 % und Partikel mit einem Durchmesser von 12 nm zu etwa 90 %. Ab einem Durchmesser von ca. 20 nm werden nahezu alle Partikel vom Messgerät detektiert.

$$\eta(D_p) = A \left(1 - e^{\left(\frac{B-D_p}{C-B} \ln 2 \right)} \right)$$

$$A = 1.003; B = 4.357; C = 6.531$$

$$D_{50} = 6.6 \text{ nm}$$

$$D_{90} = 11.7 \text{ nm}$$

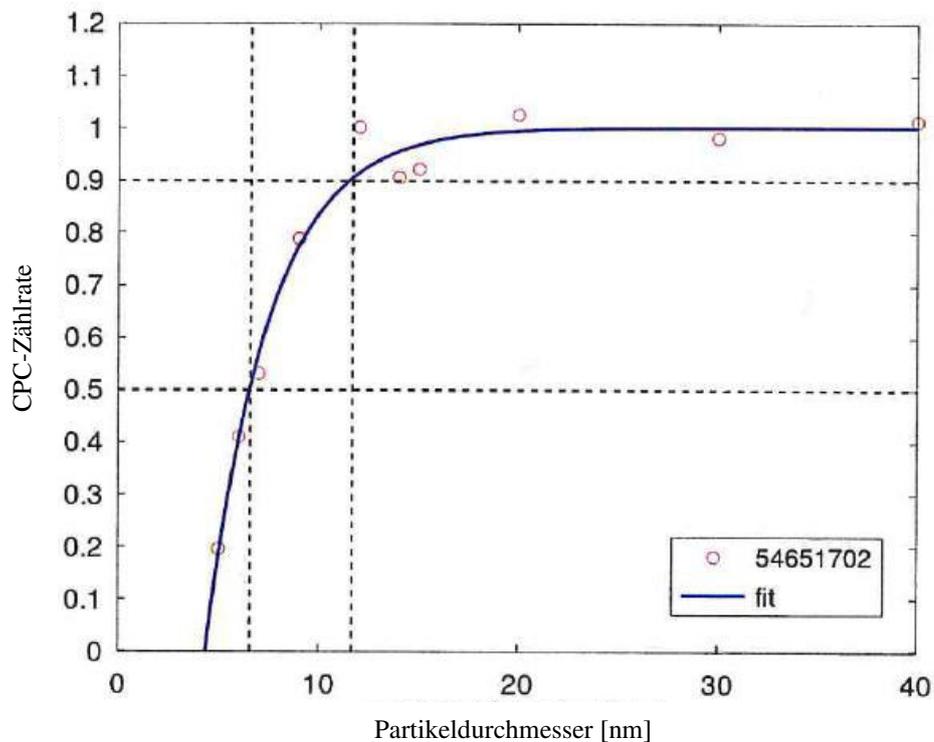


Abb. 2.1: Kalibrierkurve eines der verwendeten CPC-Messgeräte (Modell EDM 465). Die Grafik zeigt die gemessene Zählrate bei definierten Partikelgrößen (rote Kreismarkierungen) und die daraus resultierende Anpassungskurve (blaue Gerade). Über der Grafik ist die Formel der Anpassungskurve, sowie die berechneten Partikeldurchmesser bei einer Zählrate von 50 % (D_{50}) und 90 % (D_{90}) angegeben. (GRIMM Aerosol Technik Ainring GmbH & Co. KG, 2019)

Beim Messvorgang wird über eine Pumpe Luft angesaugt, zum Sättiger weitergeleitet und dort mit gasförmigem n-Butanol befeuchtet. Im Kondensator wird die mit n-Butanol gesättigte Luft abgekühlt, sodass das n-Butanol an den ultrafeinen Partikeln kondensiert. Durch diesen Kondensationsprozess wachsen die ultrafeinen Partikel zu größeren Partikeln heran und können anschließend in der Laser-Optik photometrisch detektiert werden. Weitere Details und Spezifikationen des CPC-Messgeräts können Anhang B: Produktdatenblatt GRIMM CPC entnommen werden.

Standort Sachsenhausen

Das CPC-Messgerät in Sachsenhausen wurde im Oktober 2018 in Betrieb genommen und misst seither sekundlich die Gesamtanzahl an UFP. In Abb. 2.2 ist der Standort der Messstation markiert.

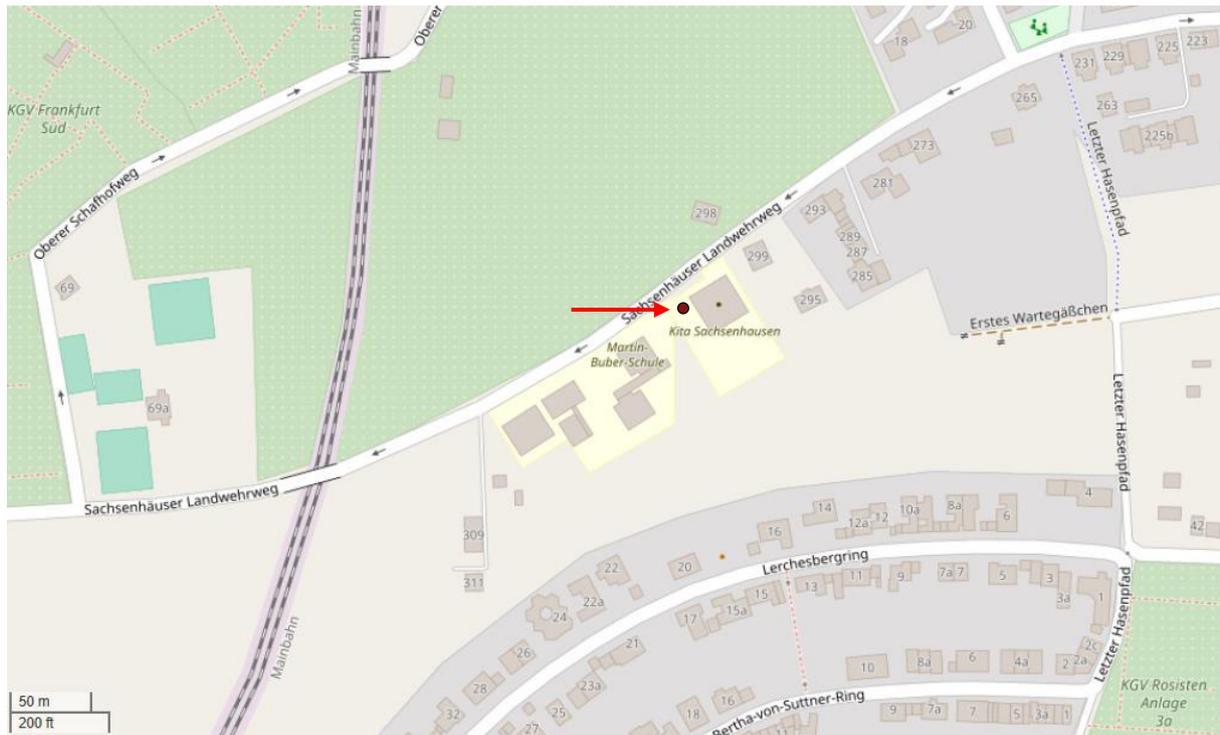


Abb. 2.2: Standort der UFP-Messstation in Sachsenhausen (braune Markierung) (© OpenStreetMap-Mitwirkende)

Die Messstation wurde auf dem Dach einer Pelletheizung zwischen einer KiTa und der Martin-Buber-Schule installiert (Abb. 2.3). Der Auslass des Schornsteins der Pelletheizung ist etwa 10 m über dem Messgerät. Das Gebäude der Pelletheizung liegt in etwa 15 m Entfernung zu einer Einbahnstraße mit Tempolimit 30 km/h. Der Standort ist von Schrebergärten und kleineren Wohnsiedlungen umgeben. Die direkte Entfernung zum Flughafengelände beträgt etwa 7,5 km in südwestlicher Richtung. Die minimale Distanz zwischen der Messstation und der Anflugroute der Landebahn Nordwest beträgt ca. 550 m. Die minimale Distanz zwischen der Messstation und den Anflugrouten der Center- und Südbahn beträgt ca. 2 km und 2,5 km.

Mögliche lokale UFP-Quellen sind vorbeifahrende PKW von Schulpersonal oder Eltern der Kinder, der Schornstein der Pelletheizung, die Küchenabluft der KiTa, Gebäudeheizungen und Gartenarbeiten in den umliegenden Schrebergärten.



Abb. 2.3: UFP-Messstation in Sachsenhausen

Standort Oberrad

Das CPC-Messgerät in Oberrad wurde im März 2019 in Betrieb genommen und misst seither sekundlich die Gesamtanzahl an UFP. In Abb. 2.4 ist der Standort der Messstation markiert.

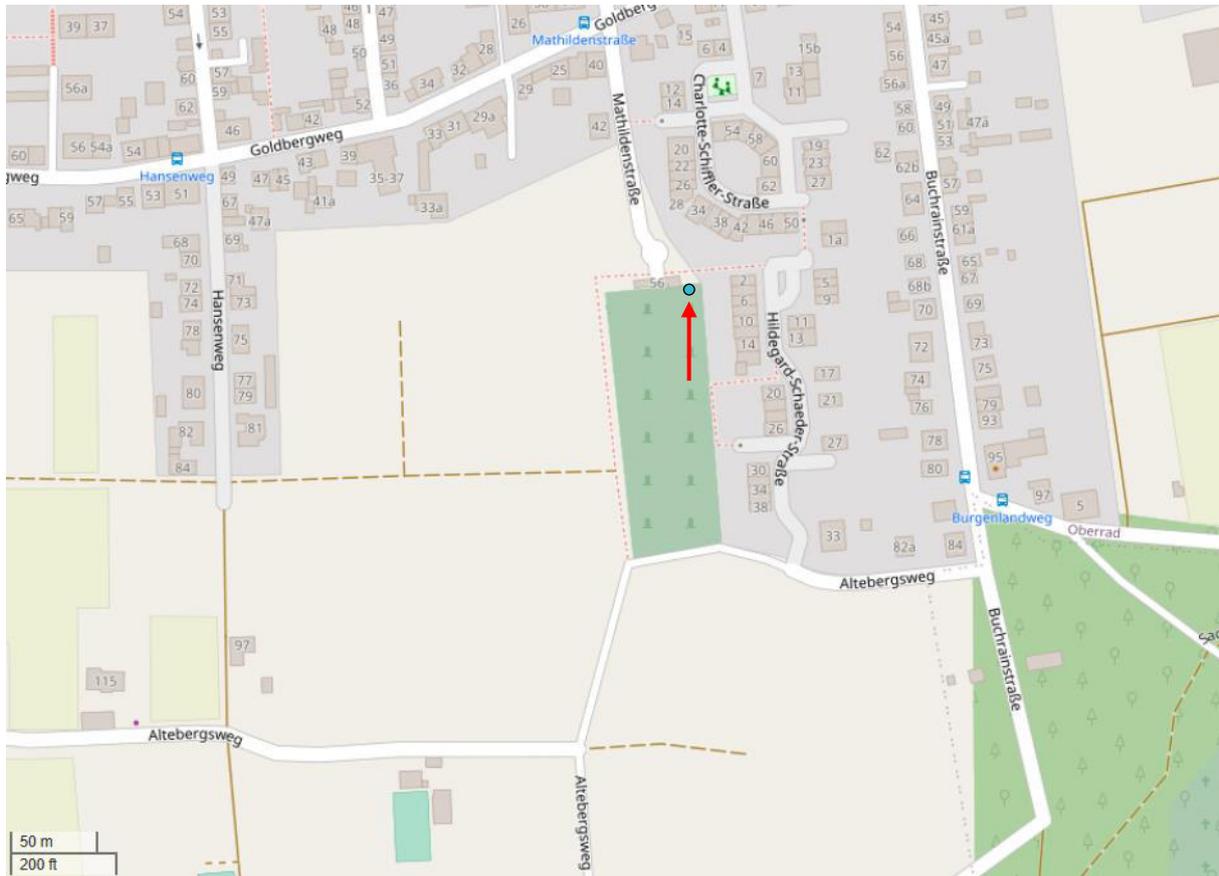


Abb. 2.4: Standort der UFP-Messstation in Oberrad (blaue Markierung) (© OpenStreetMap-Mitwirkende)

Die Messstation wurde auf dem Gelände des südlich von Oberrad gelegenen Alten Friedhofs Oberrad in der Nähe der nördlichen Außenmauer installiert (Abb. 2.5). Der Parkplatz des Friedhofs ist etwa 20 m in nördlicher Richtung von der Messstation entfernt. Östlich angrenzend befinden sich mehrstöckige Häuserreihen mit Gärten, südwestlich des Friedhofs befinden sich Schrebergärten. Direkt neben der Messstation wird von der Stadt Frankfurt und von der Fraport AG jeweils eine eigene Lärmmessstation betrieben. 1,3 km östlich der Messstation verläuft die Autobahn A661 in Nord-Süd-Richtung. Die direkte Entfernung zum Flughafengelände beträgt etwa 10,5 km in südwestlicher Richtung. Die minimale Distanz zwischen der Messstation und der Anflugroute der Landebahn Nordwest beträgt ca. 500 m. Die minimale Distanz zwischen der Messstation und den Anflugrouten der Center- und Südbahn beträgt ca. 1,9 km und 2,4 km.

Mögliche lokale UFP-Quellen sind regelmäßig stattfindende Garten- und Laubarbeiten auf dem Friedhofsgelände, Zigarettenrauch von Passanten, Gebäudeheizungen der angrenzenden Häuserreihen, ankommende oder wegführende PKW und Grill- und Gartenbetrieb der angrenzenden Häuserreihen und Schrebergärten.

Die direkte Entfernung zwischen beiden Messstationen beträgt ca. 3,1 km. Diese Strecke ist annähernd parallel zu den Anflugrouten des Frankfurter Flughafens.



Abb. 2.5: UFP-Messstation in Oberrad

2.1.2 Winddaten

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) betreibt seit Jahren bundesweit mehrere Wetterstationen, die unter anderem auch die Windrichtung und Windgeschwindigkeit messen. In Abb. 2.6 ist der Standort der Wetterstation Frankfurt/Main mit der Stations-ID 1420 dargestellt.



Abb. 2.6: Standort der Wetterstation Frankfurt/Main vom Deutschen Wetterdienst (Stations-ID: 1420, dunkelblaue Markierung) (© OpenStreetMap-Mitwirkende)

Die Station befindet sich auf dem Flughafengelände, östlich der Startbahn West, am Rande eines ausgedehnten Waldgebietes. Diese Station wird nach VDI-Richtlinie 3786 Blatt 2:2016-11 Umweltmeteorologie betrieben. Der Wind wird in ca. 10 m Höhe über dem Boden erfasst. Zur repräsentativen Darstellung der lokalen und regionalen Windverhältnisse eignet sich dieser Messstandort für die folgenden Analysen am besten. Die erfassten Daten von Windrichtung [°] und Windgeschwindigkeit [m/s] liegen in vektorielemittelten 10-Minuten-Mittelwerten vor und sind auf 10er-Grade⁴ gerundet. Die Messzeiten sind in UTC angegeben.

⁴ Die Windrose wird in 36 Richtungssektoren von 10° eingeteilt. Die vollen 10er-Grade stellen dabei die Mitte dieser Richtungssektoren dar. Beispiel: Angabe von 50° beinhaltet Windrichtungen von 45(,0)° bis 54(,9)° (VDI-Richtlinie 3786 Blatt 2:2016-11 Umweltmeteorologie)

2.1.3 Flugverkehr und Flugdaten

Für die Untersuchungen der Einflüsse von Überflügen auf die UFP-Konzentration am Boden ist das Verständnis über den Betrieb, das Bahnsystem und die Verkehrsabwicklung des Frankfurter Flughafens eine Grundvoraussetzung. Der Betrieb eines Flughafens hängt von vielen Faktoren ab, die je nach lokalen Gegebenheiten stark voneinander abweichen können. Mithilfe dieses Wissens können geeignete Methoden zur Untersuchung möglicher Einflüsse des Flugbetriebs auf die UFP-Konzentration in Sachsenhausen und Oberrad ausgewählt und angewandt werden.

Lage des Frankfurter Flughafens

Der Flughafen Frankfurt liegt südwestlich vom Zentrum Frankfurt in ca. 8,5 km Entfernung (Abb. 1.6). Die direkte Umgebung im Nordosten, Südosten und Südwesten des Flughafengeländes besteht überwiegend aus Wald- und Grünflächen. Städte in näherer Umgebung vom Flughafengelände sind Kelsterbach im Nordwesten und Walldorf im Süden. Am östlichen Rand des Flughafengeländes verläuft die A5 in Nord-Süd-Richtung, am nördlichen Rand verläuft die A3 in Ost-West-Richtung.

Bahnensystem

Die Flugzeugabfertigung findet auf insgesamt vier Bahnen statt. In Abb. 2.7 sind die Bahnen des Frankfurter Flughafens mit jeweiliger Bezeichnung dargestellt. Die Abkürzungen der drei parallel zueinander ausgerichteten Bahnen leiten sich aus der Betriebsrichtung (BR) in Grad (Ost: 07, West: 25) und Lage der Bahn aus Sicht der Piloten ab (links/L, mitte/C, rechts/R). Das Parallelbahnsystem, bestehend aus Centerbahn (07C/25C) und Südbahn (07R/25L), ist in 70°/250° Himmelsrichtung ausgerichtet und liegt im Zentrum des Flughafengeländes. Auf diesen Bahnen werden sowohl landende als auch startende Flugzeuge in beide Richtungen abgefertigt. Die Landebahn Nordwest (07L/25R) liegt nordwestlich des Parallelbahnsystems und ist in 70°/250° Himmelsrichtung ausgerichtet. Auf dieser Bahn werden nur landende Flugzeuge in beide Richtungen abgefertigt. Die Startbahn West (18W) befindet sich an der Westgrenze des Flughafens und ist in 180° Himmelsrichtung ausgerichtet. Auf dieser Bahn werden nur startende Flugzeuge Richtung Süden abgefertigt.

Die Großflugzeugtypen Airbus A380, Boeing 747 und MD 11 sind für die Landebahn Nordwest nicht zugelassen (Meyer-Schuchardt, 2012). Die Startbahn West wird unabhängig von der Betriebsrichtung zum Starten genutzt (Fraport AG, o. D.b).

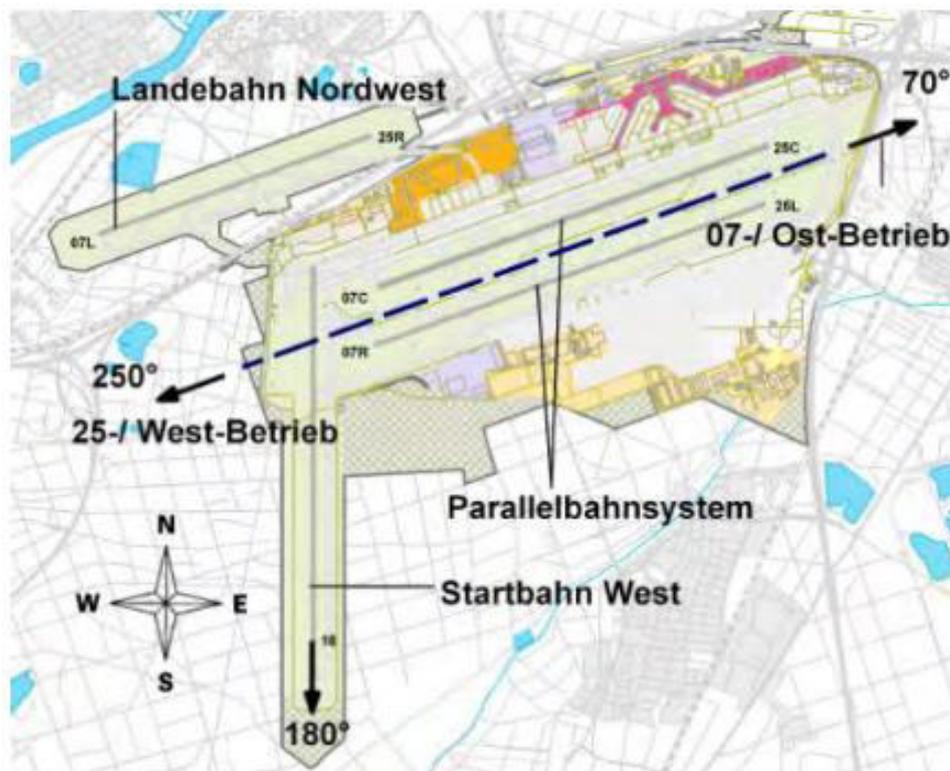


Abb. 2.7: Start- und Landebahnen des Frankfurter Flughafens mit jeweiliger Bezeichnung bei Betriebsrichtung Ost bzw. West . (Fraport AG, 2020a)

Flugzeuge starten und landen grundsätzlich gegen den Wind, weshalb die Betriebsrichtung von den vorherrschenden Windverhältnissen abhängt. Die Betriebsrichtung des Frankfurter Flughafens bezeichnet die Richtung, in die auf den parallel angeordneten Bahnen gestartet und gelandet wird. Bei BR25 starten und landen die Flugzeuge von Ost nach West, bei BR07 starten und landen die Flugzeuge von West nach Ost. Flugzeuge sind in der Lage bei leichtem Rückenwind zu starten bzw. zu landen. Die Windgeschwindigkeit muss dabei aus Sicherheitsgründen unterhalb von 5 Knoten (9 km/h) liegen. Aufgrund der durchschnittlichen lokalen Windverhältnisse ist die Betriebsrichtung West (BR25) die Hauptbetriebsrichtung des Flughafens. Erst, wenn der Wind in östliche Richtungen dreht und die Windgeschwindigkeit größer als 5 Knoten (9 km/h) beträgt, wird die Betriebsrichtung von West nach Ost umgestellt. (Fraport AG, o. D.b)

Betriebszeiten

Der Flugbetrieb am Frankfurter Flughafen beginnt jeden Tag um 5:00 Uhr und endet um 23:00 Uhr (Lokalzeit). Das bedeutet, dass ab 5:00 Uhr Flugzeuge landen bzw. starten dürfen. In der Nacht zwischen 23:00 Uhr und 5:00 Uhr herrscht seit April 2012 ein allgemeines Nachtflugverbot. In den Nachtrandstunden 5:00 Uhr – 6:00 Uhr und 22:00 Uhr – 23:00 Uhr dürfen pro Nacht durchschnittlich 133 planmäßige Flugbewegungen bezogen auf das Kalenderjahr

stattfinden. In besonderen Fällen dürfen Starts und Landungen auch außerhalb der Betriebszeiten stattfinden. Hierzu zählen unter anderem Starts und Landungen zur Durchführung von Funk- und Radarmessungen und Überprüfungsmaßnahmen, Starts und Landungen von Luftfahrzeugen in medizinischen Hilfeleistungs- oder Katastropheneinsätzen, Evakuierungsanflüge und Flüge mit besonderem öffentlichem Interesse. (Meyer-Schuchardt, 2012)

Seit April 2015 wird bei Westbetrieb in den Nachtrandzeiten das Verfahren der „Lärmpausen“ angewandt. Landungen und Starts finden dann alternierend auf verschiedenen Bahnen statt, um damit die Nachtruhe in von Fluglärm betroffenen Orten abwechselnd um eine Stunde zu verlängern (Abb. 2.8).

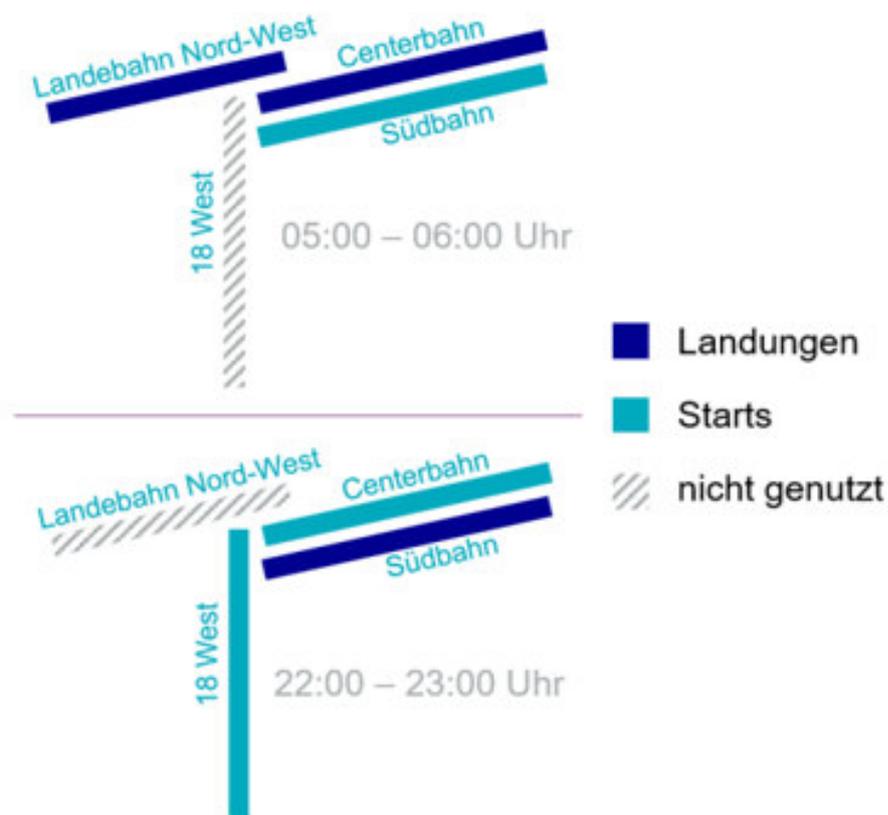


Abb. 2.8: Alternierende Nutzung der Start- und Landebahnen zu Nachtrandzeiten. (Fraport AG, 2015)

Flugrouten

Mit der Betriebsrichtung ändern sich auch die Flugrouten von startenden und landenden Flugzeugen. Die Anflugrouten des Parallelbahnsystems und der Landebahn Nordwest bei BR25 verlaufen südlich der Messstationen in Sachsenhausen und Oberrad (Abb. 2.9, unten). Die Abflugrouten bei BR07 verlaufen nur teilweise entlang dieser Messstationen (Abb. 2.9, oben).

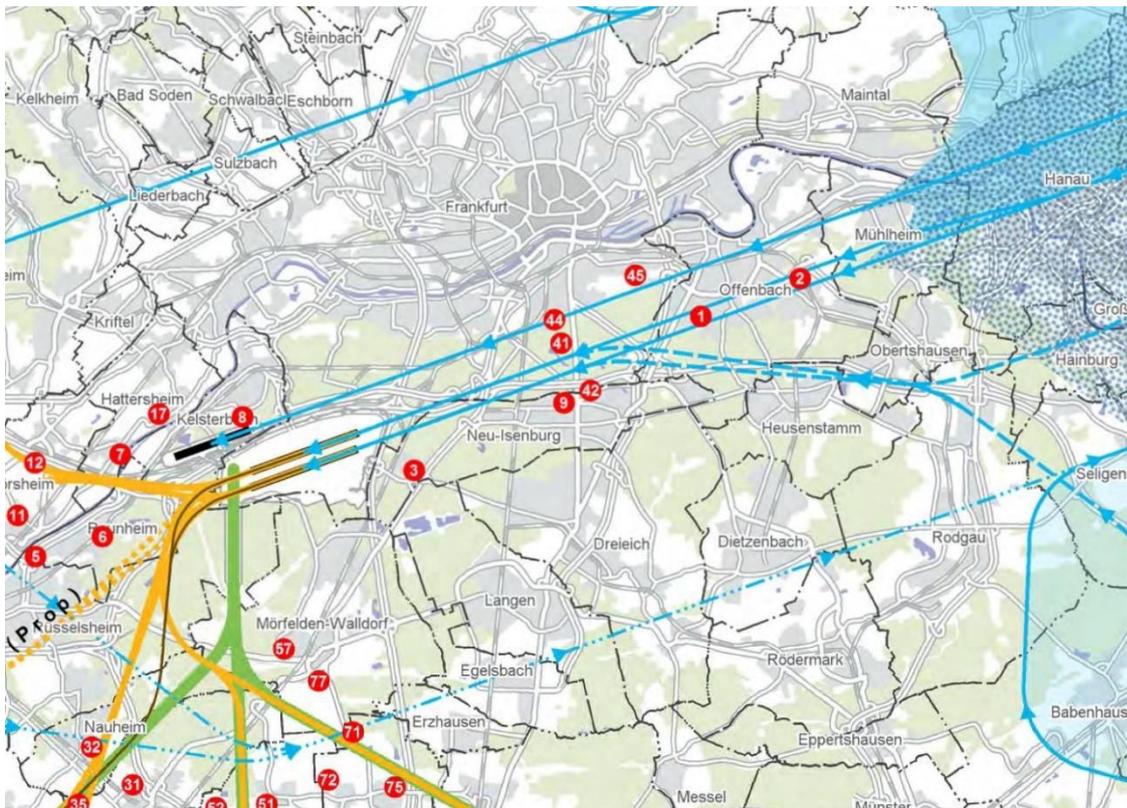
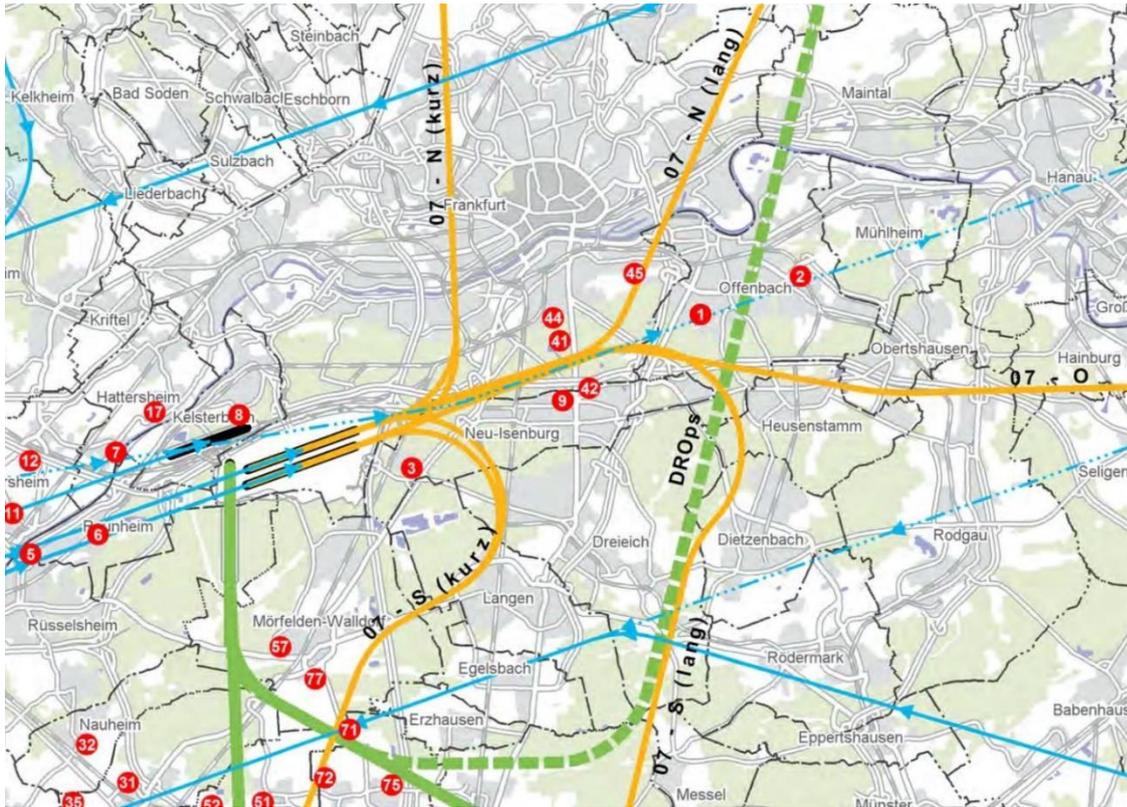


Abb. 2.9: Abflugrouten (70°: gelbe Linien, 180°: grüne Linien) bei BR07 (oben) und Anflugrouten (durchgezogene blaue Linien, Landung in Pfeilrichtung) bei BR25 (unten). Die roten Punktmarkierungen geben Orte von Lärmmessstationen an. Die Markierungen „44“ und „45“ entsprechen in etwa den Standorten der UFP-Messstationen in Sachsenhausen (44) und Oberrad (45). (Fraport AG. 2020a, 2020b)

Die Landebahnen werden von landenden Flugzeugen in einem Anflugwinkel von 3° angesteuert. Seit 2017 dürfen Flugzeuge mit GBAS-Technologie (Ground Based Augmentation System) auf allen Landebahnen in einem Anflugwinkel von 3,2° landen (Fraport AG, o. D.b). Tab. 2.1 zeigt die berechnete Flughöhe der landenden Flugzeuge bei minimaler Entfernung zur jeweiligen Messstation. Die Entfernungen wurden geografisch ermittelt.

Tab. 2.1: Berechnete Flughöhen der landenden Flugzeuge des Parallelbahnsystems und der Landebahn Nordwest je nach Anflugwinkel bei minimaler horizontaler Entfernung zur jeweiligen Messstation.

Bahn	Messstation	minimale Distanz zur Anflugroute	Distanz zum Aufsetzpunkt	Flughöhe (Anflugwinkel: 3°)	Flughöhe (Anflugwinkel: 3,2°)
Parallelbahn-system	Sachsenh.	2 – 2,5 km	8,6 km	ca. 450 m	ca. 480 m
	Oberrad	1,9 – 2,4 km	11,5 km	ca. 600 m	ca. 640 m
Landebahn Nordwest	Sachsenh.	ca. 550 m	11,7 km	ca. 610 m	ca. 650 m
	Oberrad	ca. 500 m	14,8 km	ca. 780 m	ca. 830 m

Flugdaten

Um den Einfluss der Überflüge auf die Bodenkonzentration überprüfen zu können, werden Daten der am Frankfurter Flughafen stattfindenden Flugbewegungen verwendet. Die Daten stammen direkt von der Fraport AG und beinhalten für jede einzelne Flugbewegung folgende Informationen:

- Datum und Uhrzeit [yyyy-mm-dd hh:mm:ss] in Lokalzeit
- Genutzte Bahn mit Angabe der Betriebsrichtung
- Art der Flugbewegung (Start oder Landung)
- Flugzeugtyp
- Lärmklasse

Datum und Uhrzeit bezeichnet bei Starts den Abhebe- und bei Landungen den Aufsetzzeitpunkt der Flugzeuge. Mithilfe des Flugzeugtyps und der Lärmklasse lassen sich Großflugzeuge identifizieren. Anhand dieser Informationen können Einflüsse der Starts und Landungen, der einzelnen Bahnen und der Flugzeugtypen auf die UFP-Konzentration getrennt voneinander betrachtet werden.

2.1.4 Qualitätssicherung der UFP-Messdaten

Die beiden verwendeten CPC-Messgeräte der Firma GRIMM wurden im Oktober 2018 mit den beim Weltkalibrierzentrum für Aerosolphysik (WCCAP, engl: *World Calibration Center for Aerosol Physics*) kalibrierten CPC-Messgeräten verglichen und wiesen eine Genauigkeit von mehr als $\pm 10\%$ auf (Rose & Jacobi, 2019).

Die Messgeräte müssen regelmäßig einer Wartung unterzogen werden, da sich nach längerem Betrieb die Lufteinlässe mit Störstoffen zusetzen können. Für die Reinigung der Lufteinlässe wird die Messung der Messgeräte nicht unterbrochen, wodurch nicht repräsentative Messwerte während der Wartung aufgezeichnet werden können. Eine umfangreichere Wartung seitens des Herstellers, zu der beide Messgeräte ausgebaut wurden, fand in der Zeit vom 21.11.2019 – 12.12.2019 statt. Für diesen Zeitraum liegen folglich keine Messwerte vor.

Logbuch

Für die Plausibilitätsprüfung der aufgezeichneten Messwerte wurde ein Logbuch für beide Messstationen angelegt, in dem Wartungen und andere Besonderheiten dokumentiert sind. Die Messwerte wurden anhand eines Bewertungssystems auf Plausibilität hin bewertet (Tab. 2.2). Messwerte, die während Wartungsarbeiten aufgezeichnet wurden, wurden mit „Flagge 4“ bewertet und in den folgenden Analysen nicht berücksichtigt. Das Logbuch aller vom HLNUG betriebenen Messstationen ist im Anhang A: Logbuch hinterlegt.

Tab. 2.2: Bewertungssystem der CPC-Messdaten.

Flagge	Bedeutung
1	Daten sind plausibel
2	Kommentar/ Korrektur beachten
3	lokale Kontamination
4	Daten verwerfen

Lokale Kontamination

Bisherige Untersuchungen der Messstation in Oberrad haben gezeigt, dass das CPC-Messgerät in Oberrad in unregelmäßigen Abständen tagsüber kurzzeitige UFP-Konzentrationen in Millionenhöhe misst. Nach Informationen der Friedhofsleitung finden auf dem Gelände des

Friedhofs in unregelmäßigen Abständen Garten- und Grünpflegearbeiten statt, bei denen motorisierte Geräte, wie Laubbläser oder Rasenmäher, zum Einsatz kommen. Die Verbrennungsmotoren von Laubbläsern emittieren bei Benutzung große Mengen an UFP (Sanchez, 2019), die vom CPC-Messgerät detektiert werden können. Um eine eindeutige Zuordnung der Konzentrationspeaks außerhalb des Messbereichs zu den Grünpflegearbeiten zu erreichen, wurden die Lärmpegel des neben der UFP-Messstation installierten und von der Stadt Frankfurt betriebenen Lärmmessgeräts analysiert und zeitlich mit der UFP-Konzentration abgeglichen. Hierfür wurden die Lärmpegel der Datenauswertung des Deutschen Fluglärmdienstes (DFLD) verwendet. Bei zeitlicher Übereinstimmung extremer UFP-Konzentrationen und überdurchschnittlich hoher Lärmpegel, die der DFLD nicht als Überflüge definiert, wurden die gemessenen UFP-Werte für die Auswertung in der vorliegenden Arbeit mit „Flagge 3“ bewertet, da es sich hierbei eindeutig um lokale Emissionen handelt.

Die immens hohen UFP-Konzentrationen sind an diesem Standort real, jedoch haben sie keinen Bezug zum aufkommenden Flugverkehr und werden durch sehr lokale Quellen hervorgerufen. Die mit dieser Methode erfassten und mit „Flagge 3“ bewerteten Messwerte werden in dieser Arbeit verworfen, weil hier der Beitrag des Flugverkehrs abgeschätzt werden soll. Die hohen Messwerte würden statistische Werte, wie Mittelwert oder Standardabweichung, im Hinblick auf die Auswertung zum Flugverkehr verfälschen.

2.1.5 Datentransformation

Die CPC-Messgeräte messen die UFP-Konzentration zeitgleich ab dem Zeitpunkt 24.04.2019, 14:40:28 Uhr. In den Analysen werden deshalb alle verfügbaren, in Abschnitt 2.1.1 – 2.1.3 genannten Daten auf den Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020 eingegrenzt. Zudem werden innerhalb dieses Zeitraums nur zeitgleich stattgefundene Messungen beider UFP-Messstationen in den Auswertungen berücksichtigt, wodurch ein Vergleich beider Messstationen ermöglicht wird. Für eine zeitlich korrekte Zuordnung der verschiedenen Datensätze werden alle Messzeiten in Ortszeit umgerechnet. Die Angabe in Ortszeit resultiert aus den Betriebszeiten des Frankfurter Flughafens bzw. generell aus anthropogenen Einflüssen, die sich immer nach der Ortszeit richten.

2.2 Statistische Methoden

Der Zusammenhang zwischen der UFP-Konzentration in Sachsenhausen bzw. Oberrad und dem Flugbetrieb soll in dieser Arbeit statistisch überprüft werden. Für die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen diesen zwei unabhängigen Variablen wird die Korrelation bzw. der Korrelationskoeffizient berechnet. Für den Vergleich zwei diskreter Zeitreihen mit zeitlicher Verschiebung kommt zudem die angepasste Methode der Kreuzkorrelation zum Einsatz. Für diese und weitere statistischen Analysen sowie deren grafische Darstellung wird die Statistik-Software „R-Studio“ verwendet. Im folgenden Abschnitt werden die angewandten statistischen Methoden sowie das Programm R-Studio kurz beschrieben.

2.2.1 Korrelation

Die Beziehung zwischen zwei unabhängigen Variablen kann mathematisch durch die Berechnung der Korrelation bzw. des Korrelationskoeffizienten beschrieben werden. Handelt es sich bei den Variablen (wie in dieser Arbeit) um diskrete Zeitreihen, werden zunächst das arithmetische Mittel gemäß

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i(t)) \quad (1)$$

sowie die Varianz gemäß

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i(t) - \mu)^2 \quad (2)$$

für beide Zeitreihen $x(t)$ und $y(t)$ bestimmt. Die Kovarianz zwischen $x(t)$ und $y(t)$ stellt für sich genommen bereits ein Zusammenhangsmaß zwischen zwei Variablen dar und wird gemäß

$$s_{x,y} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i(t) - \mu_x) \cdot (y_i(t) - \mu_y) \quad (3)$$

berechnet. Jedoch ist die Kovarianz abhängig vom Maßstab der vorliegenden Variablen und deshalb für einen Vergleich ungeeignet (Bortz & Schuster, 2010). Der Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson stellt ein gegenüber Maßstabsveränderungen invariantes Zusammenhangsmaß dar und wird durch Normierung der Kovarianz gemäß

$$r(x, y) = \frac{s_{x,y}}{\sqrt{s_x^2 \cdot s_y^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i(t) - \mu_x) \cdot (y_i(t) - \mu_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i(t) - \mu_x)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i(t) - \mu_y)^2}} \quad (4)$$

berechnet. Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und $+1$ annehmen und gibt dabei an, wie stark bzw. schwach der Zusammenhang zwischen $x(t)$ und $y(t)$ ausgeprägt ist: Nach Blume (1970) kann die Höhe des Korrelationskoeffizienten dabei wie folgt beurteilt werden:

$0 < r < 0,2:$	kein linearer Zusammenhang
$0,2 \leq r < 0,5:$	schwacher linearer Zusammenhang
$0,5 \leq r < 0,75:$	mittelstarker linearer Zusammenhang
$0,75 \leq r < 0,95:$	starker linearer Zusammenhang
$0,95 \leq r \leq 1:$	voller linearer Zusammenhang

2.2.2 Kreuzkorrelation

Im Unterschied zur Korrelation wird bei der Kreuzkorrelation der Zusammenhang zweier Variablen bei einer zeitlichen Verschiebung bestimmt. Wird bspw. ein Signal (hier: UFP) einer Quelle (hier: Flugzeuge) an zwei Orten mit unterschiedlich großer Distanz zur Quelle (hier: Sachsenhausen und Oberrad) erfasst, liegt allein aufgrund der längeren Laufzeit beim entfernteren Messort eine weniger stark ausgeprägte Amplitude zu einem späteren Zeitpunkt vor, als beim näher liegenden Messort. Eine normale Korrelationsberechnung würde diese zwei Zeitreihen direkt miteinander vergleichen und keinen Zusammenhang feststellen. Bei der Methode der Kreuzkorrelation wird eine der Zeitreihen zeitlich auf der x-Achse verschoben und anschließend mit der anderen Zeitreihe verglichen. Die Kreuzkorrelation berechnet also einen Korrelationskoeffizienten für jede zeitliche Verschiebung $\tau = t_2 - t_1$. Mithilfe dieser Methode kann demnach die Verschiebungszeit τ ermittelt werden, bei der die Korrelation der beiden erfassten Signale am größten ausfällt. (Meyer, 2009)

Für die Berechnung des (Kreuz-)Korrelationskoeffizienten werden (3) und (4) gemäß

$$s_{x,y}(\tau) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i(t) - \mu_x) \cdot (y_i(t + \tau) - \mu_y) \quad (5)$$

und

$$r_{x,y}(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i(t) - \mu_x) \cdot (y_i(t + \tau) - \mu_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i(t + \tau) - \mu_x)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i(t + \tau) - \mu_y)^2}} \quad (6)$$

angepasst (Brockwell & Richard, 1991). Die Beurteilung der Kreuzkorrelationskoeffizienten erfolgt analog zu Abschnitt 2.2.1.

2.2.3 R-Studio

Die Programmiersprache „R“ wird allgemein für statistische Auswertungen und Grafikdarstellungen genutzt und gilt als Standardprogramm für statistische Berechnungen vor allem in der Wirtschaft, aber auch in der Wissenschaft (Amirtha, 2014). Aufgrund der vorliegenden Masse an Daten wird ein Statistik-Programm benötigt, das mit „Big-Data“ umgehen kann. Mit R-Studio können riesige Datenmengen problemlos und in kürzester Zeit verarbeitet und grafisch visualisiert werden (R Core Team, 2014). R-Studio bietet die Möglichkeit zusätzliche Online-Pakete mit neuen Funktionen für individuelle Fragestellungen zu nutzen. Für die statistische Datenaufbereitung wurden in der vorliegenden Arbeit unter anderem die Pakete „Tidyverse“ und „ggplot2“ verwendet (Wickham, 2009; Wickham et al., 2019). Einige der in der vorliegenden Arbeit erstellten Grafiken basieren auf Funktionen des Pakets „openair“, welches gezielt für Analysen von Schadstoffausbreitungen geschaffen wurde (D. C. Carslaw, 2015).

2.3 Methode: Windsektorenanalyse

Der mögliche Einfluss vom Frankfurter Flughafen (bodennahe Emissionen auf dem Flughafengelände), sowie von gestarteten und von landenden Flugzeugen auf die UFP-Konzentration in Sachsenhausen und Oberrad soll separat betrachtet werden. Diese Quellen erstrecken sich von den Messstationen aus gesehen über größere Windrichtungsbereiche. Die Windrichtungen werden deshalb in entsprechende Windsektoren eingeteilt. Ziel der Methode ist es, für jeden so eingeteilten Windsektor den durchschnittlichen Tagesverlauf der UFP-Konzentrationen auf Basis von 10-Minuten-Mittelwerten mit dem Tagesverlauf der durchschnittlichen Anzahl an Flugbewegungen pro 10 Minuten zu vergleichen. Durch diese Methode wird ein repräsentativer Tagesgang für jeden Windsektor ermittelt und kann auf mögliche Korrelationen zwischen UFP-Konzentration und Flugbewegungen hin untersucht werden.

Aufgrund der gegensätzlichen Windverhältnisse bei Starts und Landungen über Sachsenhausen und Oberrad und aufgrund des unterschiedlichen Verlaufs der An- und Abflugrouten ist eine gesonderte Einteilung der Windrichtungen in Windsektoren für eine separate Betrachtung von gestarteten und landenden Flugzeugen erforderlich. Da in den Winddaten die Windrichtung in Richtungssektoren von 10° angegeben wird, kann eine Einteilung der Windsektoren nur auf 10° genau erfolgen.

2.3.1 Windsektoren für die Betrachtung von Landeanflügen

Bei der Betrachtung von Landeanflügen werden die Windrichtungen in vier Windsektoren eingeteilt (Abb. 2.10). Die Flugrouten der Landungen bei BR25 sind in Abb. 2.9 dargestellt. Für den Einfluss von Landungen mit Rückenwind wird der Sektor „Ost“ mit dem Bereich $60^\circ - 150^\circ$ definiert. Für den Einfluss von Landungen bei südlichen Windrichtungen wird der Sektor „Süd“ mit dem Bereich $160^\circ - 210^\circ$ definiert. Für den Einfluss des Flughafens wird der Sektor „Flughafen“ mit dem Bereich $220^\circ - 240^\circ$ definiert. Der Teil der Anflugrouten, bei dem sich die landenden Flugzeuge in niedrigen Höhen kurz vor dem Aufsetzpunkt befinden, liegt ebenfalls im Flughafensektor und kann nicht separat betrachtet werden. Der Bereich $250^\circ - 50^\circ$ wird als „Nordsektor“ definiert und ist unbeeinflusst von Flughafen und Landungen. In Abb. 2.11 werden die eingeteilten Windsektoren für die Betrachtung von Landungen auf einer Karte für den Standort Oberrad dargestellt.

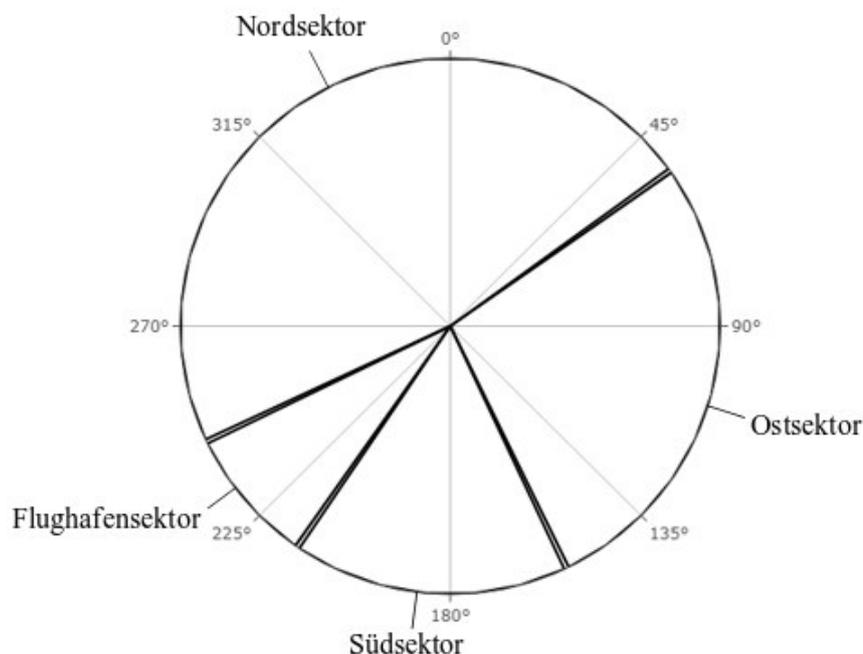


Abb. 2.10: Einteilung der Windrose in vier Windsektoren für die Betrachtung von Landungen. Die Windsektoren sind hier auf 1° genau angegeben.

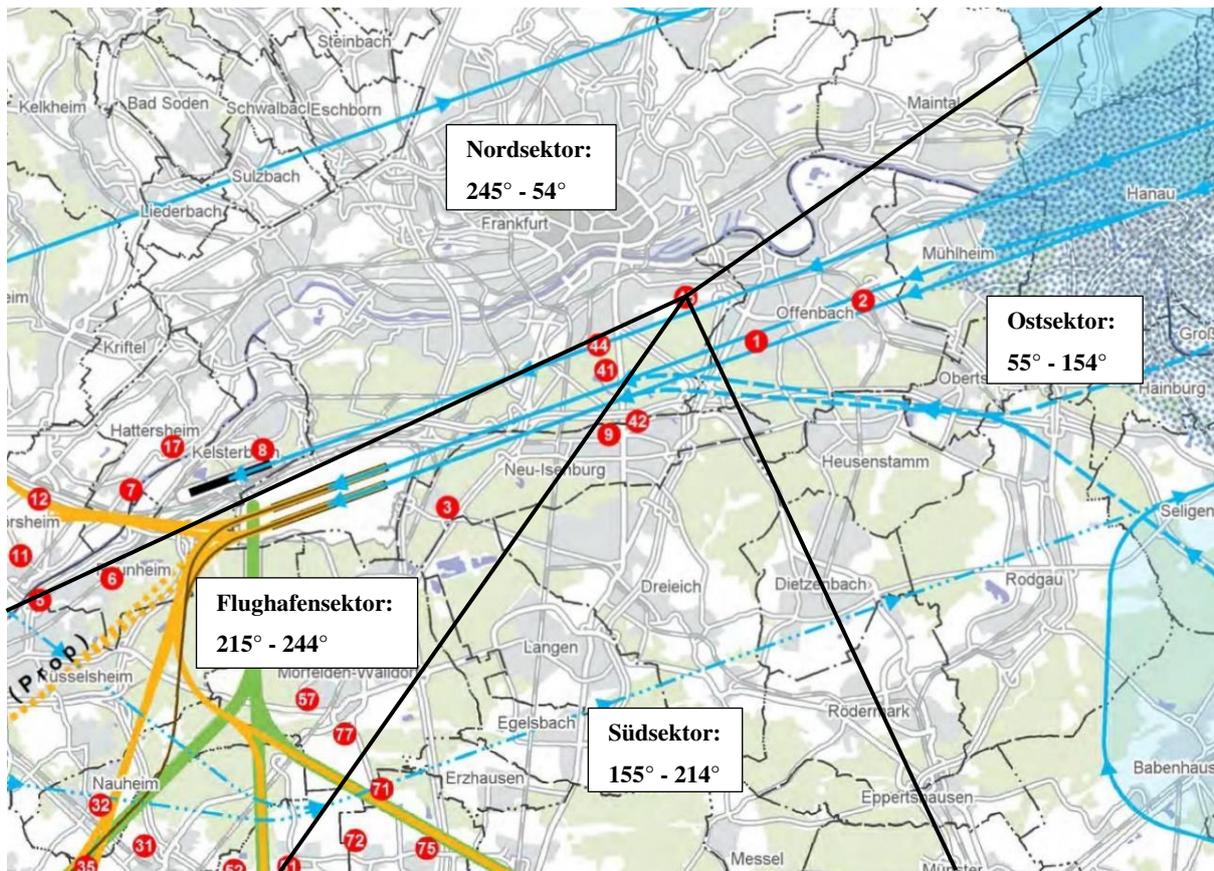


Abb. 2.11: Windsektoren für die Betrachtung von Landungen (schwarze Linien), beispielhaft eingezeichnet für die Messstation in Oberrad. Die Windsektoren sind hier auf 1° genau angegeben. (Andere Kartendetails, siehe: Abb. 2.9)

2.3.2 Windsektoren für die Betrachtung von Starts

Für die Untersuchung von Starts werden die Windrichtungen in vier Windsektoren eingeteilt (Abb. 2.12). Die Flugrouten der Starts bei BR07 sind in Abb. 2.9 dargestellt. Für den Einfluss von gestarteten Flugzeugen der Flugrouten 07 – N (lang) und 07 – O wird der Sektor „Nordost“ mit dem Bereich 30° - 110° definiert. Für den Einfluss von gestarteten Flugzeugen der Flugrouten 07 – N (lang), 07 – O, 07 – S (kurz) und 07 – S (lang) wird der Sektor „Südost“ mit dem Bereich 120° - 210° definiert. Für den Einfluss des Flughafens wird der Sektor „Flughafen“ mit dem Bereich 220° - 240° definiert. Ein Teil der Startflugrouten überschneidet sich mit dem Flughafenesektor und kann nicht separat betrachtet werden. Für den Einfluss von gestarteten Flugzeugen der Flugroute 07 – N (kurz) wird der Sektor „Nordwest“ mit dem Bereich 250° - 20° definiert. In Abb. 2.13 werden die Windsektoren für die Betrachtung von Starts auf einer Karte für den Standort Oberrad dargestellt.

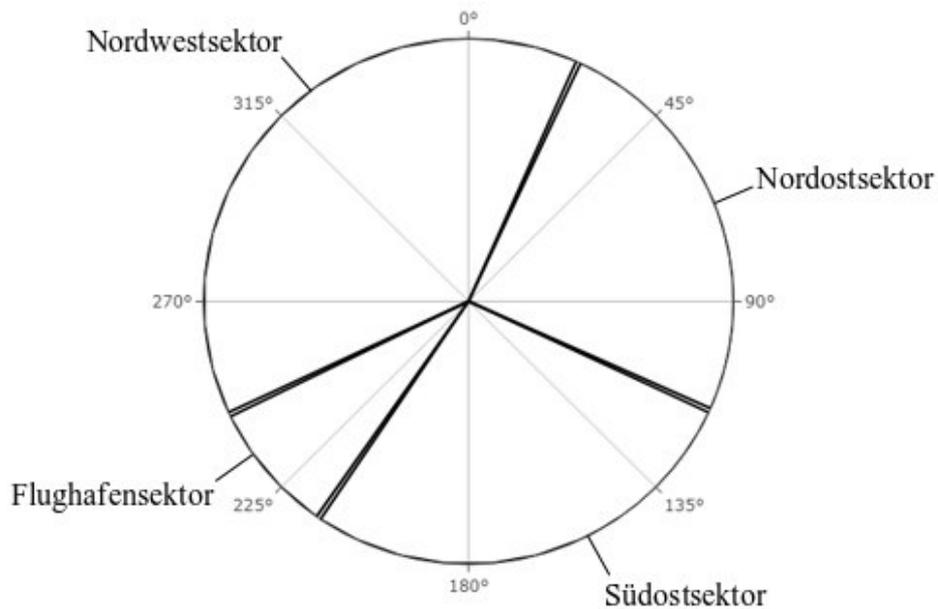


Abb. 2.12: Einteilung der Windrose in vier Windsektoren für die Betrachtung von Starts

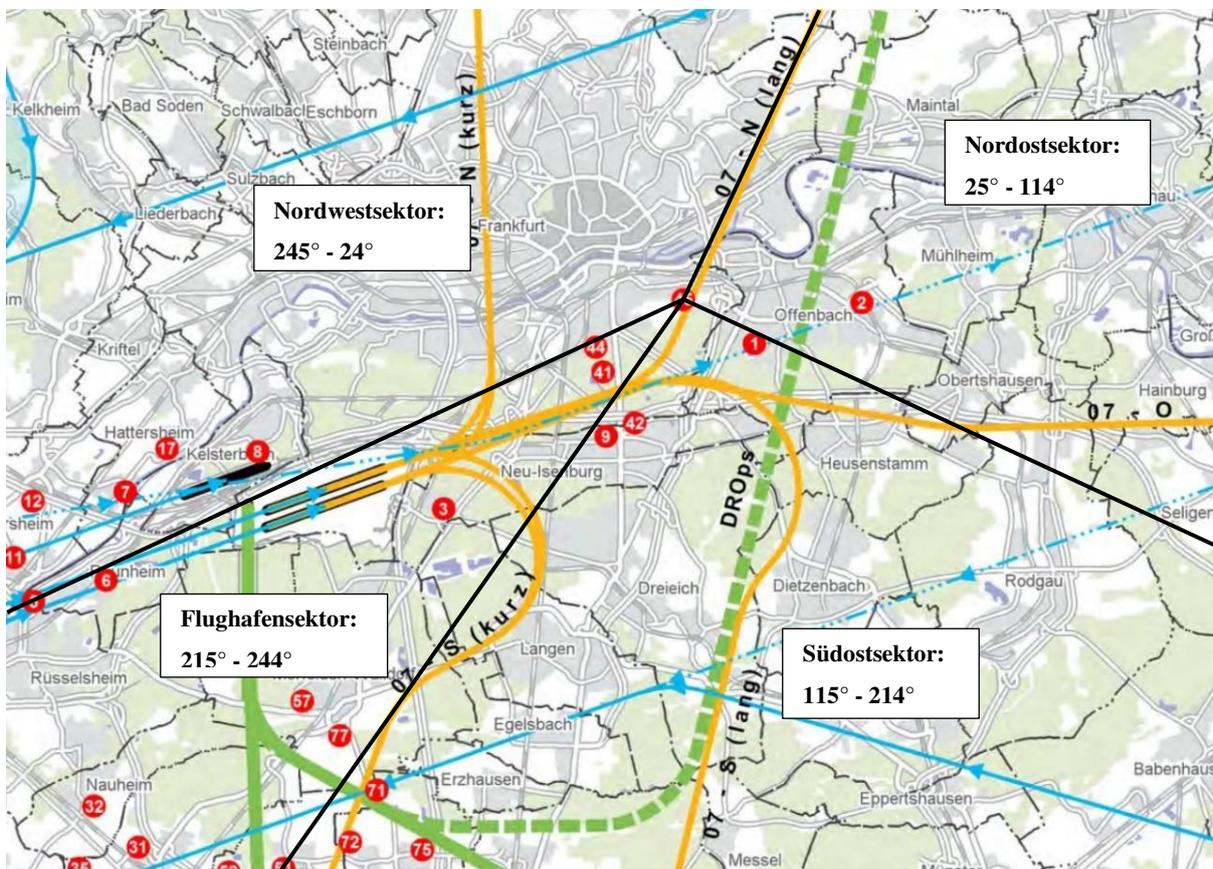


Abb. 2.13: Windsektoren für die Betrachtung von Starts (schwarze Linien), beispielhaft eingezeichnet für die Messstation in Oberrad. Die Windsektoren sind hier auf 1° genau angegeben. (Andere Kartendetails, siehe: Abb. 2.9)

In den Flugdaten der Fraport AG liegen keine Informationen bezüglich der genutzten Flugroute von startenden Flugzeugen vor. Eine genaue Zuordnung von erhöhten UFP-Konzentrationen zu einzelnen Flugrouten ist daher nicht möglich. Die Ergebnisse hierzu können nur eine grobe Abschätzung darüber liefern, ob und inwiefern gestartete Flugzeuge einen Einfluss auf die Bodenkonzentration in Sachsenhausen und Oberrad haben.

2.3.3 Datengrundlage der Windsektoren

Von den CPC-Daten der beiden Messstationen werden alle zeitgleich stattgefundenen Messdaten aus dem betrachteten Messzeitraum ausgewählt und entsprechend der Winddaten jeweils auf 10-Minuten-Mittelwerte⁵ gemittelt. Diese 10-Minuten-Mittelwerte werden zeitlich den Winddaten zugeordnet. Bei den Flugdaten wird die Anzahl an Flugbewegungen auf den verschiedenen Bahnen, getrennt nach Starts und Landungen, pro 10 Minuten bestimmt und zeitlich den anderen Daten zugeordnet. Daraus ergibt sich für jeden 10-min-Mittelwert der UFP-Konzentration eine zugehörige Windrichtung und -geschwindigkeit sowie eine Gesamtanzahl an Starts/Landungen, die innerhalb der zehn Minuten stattgefunden haben.

Um mögliche Konzentrationsanstiege horizontal entfernteren Quellen zuordnen zu können, muss eine stetige Strömung der Luftmassen vorliegen. Aus diesem Grund werden nur 10-min-Mittelwerte berücksichtigt, zu denen die Windgeschwindigkeit ≥ 1 m/s beträgt, um eine Grundströmung der Luft zu garantieren. Bei der Betrachtung des Einflusses von Landungen auf die UFP-Konzentration soll sichergestellt sein, dass gestartete Flugzeuge als Quelle ausgeschlossen sind. Aus diesem Grund werden bei der Windsektorenanalyse von Landungen nur 10-min-Mittelwerte berücksichtigt, innerhalb derer keine Starts bei BR07 und mindestens eine Landung bei BR25 stattgefunden haben. Umgekehrt werden bei der Windsektorenanalyse von Starts nur 10-min-Mittelwerte berücksichtigt, innerhalb derer keine Landungen bei BR25 und mindestens ein Start bei BR07 stattgefunden haben. Durch diese Bedingungen kann der Einfluss von Starts und Landungen separat betrachtet werden. Damit für jeden Sektor auch die durchschnittlichen Nachtkonzentrationen berechnet werden können, werden in den Nachtstunden außerdem noch alle 10-min-Mittelwerte berücksichtigt, zu denen weder Starts noch Landungen bei beliebiger Betriebsrichtung stattgefunden haben, da der Flugbetrieb in den nächtlichen Stunden von 23:00 Uhr bis 5:00 Uhr weitestgehend eingestellt ist.

⁵ Ein 10-min-Mittelwert wird aus allen Sekundenmesswerten innerhalb eines 10-min-Intervalls arithmetisch bestimmt. Die so bestimmten 10-min-Mittelwerte werden mit Endzeitstempel angegeben. Der 10-min-Mittelwert um 13:10:00 Uhr beinhaltet zum Beispiel alle verfügbaren Sekundenmesswerte von 13:00:01 Uhr bis einschließlich 13:10:00 Uhr.

In der Ergebnisdarstellung der Wochengänge der UFP-Konzentration wird sich zeigen, dass sich die Tagesgänge von Montag bis Freitag von den Tagesgängen von Samstag und Sonntag deutlich unterscheiden. Es werden daher nur Messwerte berücksichtigt, die an den Wochentagen Montag bis Freitag stattgefunden haben, um eine Verzerrung der durchschnittlichen Tagesverläufe der einzelnen Windsektoren zu vermeiden.

Zusammenfassend lassen sich folgende Bedingungen für die Berücksichtigung eines 10-min-Mittelwerts bei der Windsektorenanalyse von Starts und Landungen formulieren:

Für Starts und Landungen:

- Windgeschwindigkeit ≥ 1 m/s
- Wochentag = Montag bis Freitag

Für Starts:

- $\sum \text{Landungen(BR25)} = 0$ UND $\sum \text{Starts(BR07)} > 0$
ODER
- $\sum \text{Flugbewegungen} = 0$ (innerhalb des Zeitraums 23:00 Uhr – 5:00 Uhr)

Für Landungen:

- $\sum \text{Landungen(BR25)} > 0$ UND $\sum \text{Starts(BR07)} = 0$
ODER
- $\sum \text{Flugbewegungen} = 0$ (innerhalb des Zeitraums 23:00 Uhr – 5:00 Uhr)

Nach Einteilung in die jeweiligen Windsektoren werden alle Messdaten eines Sektors den jeweiligen 10-Minuten-Intervallen (00:00:00, 00:00:10, 00:00:20, ..., 23:50:00 Uhr) zugeordnet. Anschließend wird jedes 10-min-Intervall gemittelt, um einen mittleren Tagesgang der UFP-Konzentrationen und Start- bzw. Landungszahl zu erhalten. Durch die Einteilung der Uhrzeit in 10-Minuten-Intervalle ergeben sich für jeden Tagesgang insgesamt 144 Mittelwerte, 36 für den Nachtzeitraum (23:00:00 – 05:00:00) und 108 für den Tageszeitraum (05:00:00 – 23:00:00). Jedes 10-Minuten-Intervall soll aus mindestens zehn 10-Minuten-Mittelwerten bestehen, um einen statistisch belastbaren Wert zu erhalten.

Aus diesen Vorgaben ergibt sich für jeden Windsektor eine Mindestanzahl an 10-min-Mittelwerten von 1080 für den Tageszeitraum (5:00 – 23:00 Uhr) und 360 für den Nachtzeitraum (23:00 – 5:00 Uhr). Werden diese Anzahlen unterschritten, entstehen Lücken in den Tagesgängen und es kann keine statistisch belastbare Aussage über den jeweiligen Sektor getroffen werden.

2.3.4 Kreuzkorrelationen der Windsektoren

Die Tagesgänge der einzelnen Windsektoren werden auf Korrelationen zwischen UFP-Konzentration und Anzahl der Flugbewegungen hin analysiert. Hierfür werden die Kreuzkorrelationen zwischen den UFP-Konzentrationen und der Anzahl an Flugbewegungen mit den zugehörigen Zeitverschiebungen (Lags) für jeden Windsektor gemäß (6) mathematisch berechnet.

Die jeweils maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten mit den zugehörigen Zeitverschiebungen werden miteinander verglichen, um festzustellen, wie hoch die einzelnen Korrelationen sind und welcher Windsektor die höchsten Korrelationen zwischen UFP-Konzentration und Anzahl der Flugbewegungen aufweist. Mit der zum maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten zugehörigen Zeitverschiebung zwischen Messstation und Landefrequenz wird die Transportdauer der Partikel und damit die Entfernung der UFP-Quelle bestimmt und geprüft, ob der im jeweiligen Windsektor betrachtete Flugbetrieb (Flughafengelände, Anflüge, Abflüge) als Quelle für erhöhte UFP-Konzentrationen in Frage kommt.

2.4 Methode: Tagesanalyse

Es soll untersucht werden, inwiefern einzelne Überflüge einen direkten Einfluss auf die UFP-Konzentration ausüben. Da die lokalen Windverhältnisse und Zeitpunkte der Überflüge von Tag zu Tag variieren, werden für diese Untersuchung die UFP-Konzentrationen, Flugbewegungen, Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten einzelner Tage auf sekundenbasierter Auflösung analysiert. Der Fokus liegt vor allem auf dem Zeitraum 5 – 6 Uhr morgens, da hier deutlich weniger Störquellen vorhanden sind, die tagsüber eine Zuordnung von Konzentrationsanstiegen zum Flugbetrieb erschweren.

Definition eines Überflugs

Der Begriff Überflug ist wissenschaftlich nicht definiert. In der vorliegenden Arbeit bezeichnet ein Überflug ein Flugzeug, welches den jeweiligen Messstandort „überfliegt“. Dies geschieht bedingt durch den Verlauf der Anflugrouten nicht im Zenit, sondern in horizontaler Entfernung zum Messstandort. Ein Einfluss eines Überflugs auf die UFP-Konzentration ist

dann gegeben, wenn die vom Flugzeug während der Überflugphase emittierten UFP am Boden messbar sind. Die Überflugphase bezeichnet mehr oder weniger den Moment, in dem sich das Flugzeug in minimaler horizontaler Entfernung zum jeweiligen Messstandort befindet.

Es können nur jene Überflüge die UFP-Konzentration am Boden beeinflussen, deren Flugrouten entlang der Messstationen verlaufen. Die Flugdaten der Fraport AG beinhalten keine Information darüber, welche Flugrouten die gestarteten Flugzeuge einschlagen. Eine Einzelanalyse von gestarteten Überflügen ist aus diesem Grund nicht möglich, da nicht alle Startrouten entlang der Messstationen verlaufen. Daher werden bei dieser Methode ausschließlich landende Flugzeuge bei BR25 betrachtet.

Die Anflugroute der Landebahn Nordwest bei BR25 hat mit ca. 500 m den geringsten horizontalen Abstand zu beiden Messstationen. Die sich in der Überflugphase befindlichen Flugzeuge auf dieser Flugroute werden als „direkte Überflüge“ bezeichnet. Die Anflugrouten des Parallelbahnsystems bei BR25 sind horizontal 2 – 2,5 km von den Messstationen entfernt. Die sich in der Überflugphase befindlichen Flugzeuge auf diesen Flugrouten werden deshalb als „entfernte Vorbeiflüge“ bezeichnet.

Zeitpunkt eines Überflugs

Die Flugdaten der Fraport AG beinhalten bezüglich der Landeereignisse den genauen Aufsetzzeitpunkt aller landenden Flugzeuge. Der genaue Zeitpunkt eines Überflugs ist nicht bekannt. Tab. 2.3 zeigt die berechneten zeitlichen Abstände zwischen Überflugereignis und Aufsetzzeitpunkt der landenden Flugzeuge.

Tab. 2.3: Berechnete zeitliche Abstände zwischen Überflugereignissen in Sachsenhausen bzw. Oberrad und Aufsetzzeitpunkt der landenden Flugzeuge auf der jeweiligen Landebahn. Die Flugstrecke entspricht der Distanz, die die Flugzeuge ab minimaler horizontaler Entfernung zur jeweiligen Messstation bis zum Aufsetzpunkt zurücklegen. Für die Berechnungen wurde eine durchschnittliche Landegeschwindigkeit von 250 km/h angenommen.

Landebahn	Messstation	Flugstrecke [m] ⁶	zeitlicher Abstand [s]	zeitlicher Abstand [mm:ss]
Parallelbahnsystem	Sachsenhausen	8.600	124	02:04
	Oberrad	11.500	166	02:46
Landebahn Nordwest	Sachsenhausen	11.700	168	02:48
	Oberrad	14.800	213	03:33

⁶ Strecke vom Aufsetzpunkt entlang der Anflugroute bis zum minimalen horizontalen Abstand zur jeweiligen Messstation

Durch Bildung der Differenz zwischen Aufsetzzeitpunkt und dem errechneten zeitlichen Abstand kann der Zeitpunkt eines Überflugs berechnet werden. Da die Anfluggeschwindigkeit vom jeweiligen Flugzeugmodell und auch von den vorherrschenden Windverhältnissen abhängt, kann der berechnete Zeitpunkt eines Überflugs vom realen Zeitpunkt abweichen.

Morgendlicher Konzentrationsanstieg

Tagsüber ist die UFP-Konzentration starken Schwankungen aufgrund anthropogener Einflüsse, wie Industrie oder Berufsverkehr, unterlegen. In der Nacht stellt sich eine niedrigere und stabilere UFP-Konzentration ein, da sämtliche UFP-Quellen, wie z.B. Industriebetrieb oder Straßenverkehr, abgeschaltet oder zumindest stark reduziert sind. Dieser Nachtzustand hält in der Regel bis ca. 6-7 Uhr morgens an. Der Flugbetrieb stellt nahezu die einzige relevante UFP-Quelle dar, die bereits ab 5 Uhr UFP emittiert, die bei entsprechenden Windverhältnissen an den Messstationen rund um den Flughafen auch gemessen werden (Rose & Jacobi, 2019). Weil in dem Zeitraum von 5 Uhr bis 6 Uhr vergleichsweise wenig andere Quellen aktiv sind, wird der Fokus auf diesen Zeitraum gelegt, um den Einfluss vom Flugbetrieb zu untersuchen.

Mögliche Konzentrationsverläufe in Abhängigkeit der UFP-Quelle

Im Zusammenhang mit dem Flugbetrieb kommen verschiedene UFP-Quellen in Betracht, die einen Konzentrationsanstieg in Sachsenhausen und Oberrad verursachen könnten. Je nach Quelle ist ein für diese Quelle charakteristischer Konzentrationsanstieg zu erwarten. Im Folgenden sind die zu erwartenden Anstiegscharakteristiken von den Quellen „direkte Überflüge“, „entfernte Vorbeiflüge und tiefer fliegende Flugzeuge⁷“ und „Flughafengelände“ beschrieben.

Flugzeugemissionen von direkten Überflügen können durch Wirbelschleppen in tiefere Luftschichten verfrachtet werden. Treffen diese Wirbelschleppen auf den Boden, verteilen sich die Wirbel und die darin enthaltenen Emissionen in horizontaler Richtung. Bei einem Einfluss von direkten Überflügen durch Wirbelschleppen wären folglich Konzentrationsanstiege in Form von kurzzeitigen Peaks, die wenige Minuten nach dem Überflugereignis auftreten, zu erwarten. Die Reichweite und der Ort des Auftreffens von Wirbelschleppen wird durch die aktuellen Windverhältnisse beeinflusst, wodurch einzelne Wirbelschleppen mehr oder weniger zufällig vom Messgerät erfasst werden. Aus diesem Grund müssen die zeitlichen Abstände einzelner Konzentrationspeaks nicht zwangsläufig mit den Landefrequenzen übereinstimmen.

⁷Gemeint sind Flugzeuge, die sich bereits näher am Aufsetzpunkt befinden und damit geringere Flughöhen aufweisen.

Liegt ein Einfluss auf die UFP-Konzentration von entfernteren Vorbeiflügen oder tiefer fliegenden Flugzeugen vor, müssten die emittierten UFP zunächst über die Luft in horizontaler Richtung zu den Messstationen transportiert werden, woraus sich eine Abhängigkeit der UFP-Konzentration von Windrichtung und -geschwindigkeit ergibt. Bezüglich des Konzentrationsanstiegs wäre ein mehr oder weniger kontinuierlicher Anstieg zu erwarten, der je nach Transportdauer der UFP bzw. Windgeschwindigkeit zeitlich nach den Landeereignissen auftritt. Die Höhe des Konzentrationsanstiegs müsste von der Anzahl an Landeereignissen der Anflugrouten abhängen. Ein Einfluss auf die UFP-Konzentration ist, bedingt durch die Lage der Anflugrouten von den Messstationen aus gesehen, nur bei Windrichtungen zwischen 70° und 250° möglich. Je nachdem bei welchen Windrichtungen ein Konzentrationsanstieg vorliegt, wären ein zeitlicher Versatz der Anstiege zwischen Sachsenhausen und Oberrad sowie unterschiedlich stark ausgeprägte Konzentrationsanstiege an beiden Standorten zu erwarten.

Der Flughafen selbst kommt wegen der Flugzeugabfertigung am Boden und sonstigen verkehrsbezogenen bodennahen Quellen ebenfalls als UFP-Quelle in Betracht. Ein Einfluss des Flughafens auf die UFP-Konzentration in Sachsenhausen und Oberrad wäre ausschließlich bei Wind aus Richtung des Flughafengeländes und einer Mindestwindgeschwindigkeit von 1 m/s möglich, da nur so UFP über Luftströmungen zu den Messstationen transportiert werden können. Die Transportdauer vom Flughafengelände bis zur Messstation in Sachsenhausen beträgt bei Wind aus Richtung Flughafengelände und einer konstanten Windgeschwindigkeit von 1 m/s ca. 2 Stunden. Beim Vorliegen solcher Windverhältnisse wäre ein kontinuierlicher Anstieg der Konzentration zu erwarten, welche erst wieder absinkt, wenn entweder der Flugbetrieb eingestellt wird oder der Wind nicht mehr aus Richtung des Flughafengeländes weht. Bei höheren Windgeschwindigkeiten als 1 m/s wäre ein entsprechend früherer Anstieg der UFP-Konzentration zu erwarten.

Es werden einzelne Tage ausgewählt, bei denen im Zeitraum von 5 – 6 Uhr morgens Betriebsrichtung West vorliegt. Es wird überprüft, unter welchen Bedingungen ein Konzentrationsanstieg zwischen 5 Uhr und 6 Uhr zu beobachten ist und welche Charakteristik der jeweilige Anstieg aufweist. Diese Charakteristiken werden mit den oben genannten Erwartungen verglichen und geben möglicherweise Aufschluss über die Art und Herkunft der Quelle. Danach werden auch andere Tageszeiträume betrachtet, um zu prüfen, ob und inwiefern die oben genannten Erwartungen hier zu beobachten sind.

3 Ergebnisse

Die Reihenfolge der hier aufgeführten Ergebnisse wurde in Anlehnung an die in Abschnitt 1.5 aufgelisteten Fragestellungen festgelegt. Aufgrund der umfangreichen Datenmengen wird den Ergebnissen ein Überblick über die Statistik der UFP-Daten, Winddaten und Flugdaten vorangestellt.

3.1 Überblick der Datensätze

Als Einstieg werden für jeden Datensatz (UFP-Messdaten, Winddaten, Flugdaten) verschiedene Übersichtsgrafiken gezeigt.

3.1.1 Häufigkeitsverteilung und Tagesgänge der UFP-Konzentration

Für eine erste Übersicht der UFP-Messdaten werden die Häufigkeitsverteilungen der sekundlich aufgezeichneten Messwerte beider Messstationen im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020 bestimmt. Die UFP-Konzentration ist nicht normalverteilt, der Wertebereich umfasst viele Größenordnungen und die Variabilität der Konzentration ist in hohen Konzentrationsbereichen viel größer als in niedrigen Konzentrationsbereichen. Für eine repräsentative Darstellung der Häufigkeitsverteilungen werden die Daten in logarithmisch äquidistante Klassen zusammengefasst und auf einer logarithmisch eingeteilten Achse aufgetragen. Jede Klasse zeigt die Häufigkeitsanteile der Sekundenmesswerte zu Tages- (5:00:01 Uhr – 23:00:00 Uhr) und Nachtzeiten (23:00:01 Uhr – 5:00:00 Uhr). Die Ergebnisse sind in Abb. 3.1 dargestellt. In Tab. 3.1 sind die zur Abb. 3.1 gehörenden statistischen Größen aufgeführt.

Die Häufigkeitsverteilung zeigt, dass der Großteil der gemessenen UFP-Konzentrationen an den Standorten Sachsenhausen und Oberrad in einem Konzentrationsbereich zwischen 3.000 und 20.000 P/cm³ liegt. Sekundenmesswerte unter 3.000 P/cm³ werden hauptsächlich in der Nacht gemessen, während Sekundenmesswerte über 20.000 P/cm³ hauptsächlich tagsüber gemessen werden. Am Tag weichen sowohl der Mittelwert als auch der Median der beiden Messstationen minimal voneinander ab, was insgesamt auf eine ähnliche Belastung an beiden Orten schließen lässt. Der Median ist bei beiden Standorten geringer als der Mittelwert, was bedeutet, dass die Sekundenmesswerte eher in höhere als niedrigere Messbereiche streuen. Die berechneten mittleren Konzentrationen liegen bei ca. 10.000 P/cm³. Dieser Wert ist verglichen mit den in Birmili et al. (2016) gezeigten mittleren Anzahlkonzentrationen des Umgebungstyps „städtischer Hintergrund“ zwar leicht erhöht, jedoch messen die verwendeten CPC-Messgeräte

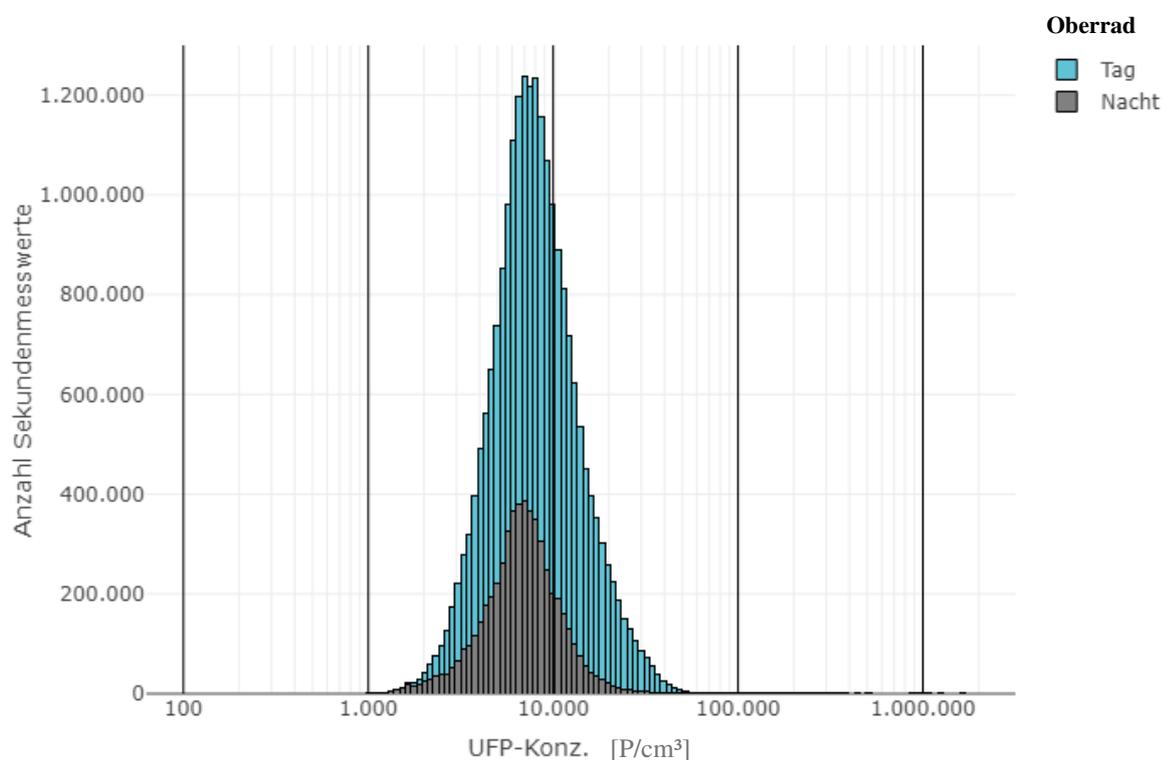
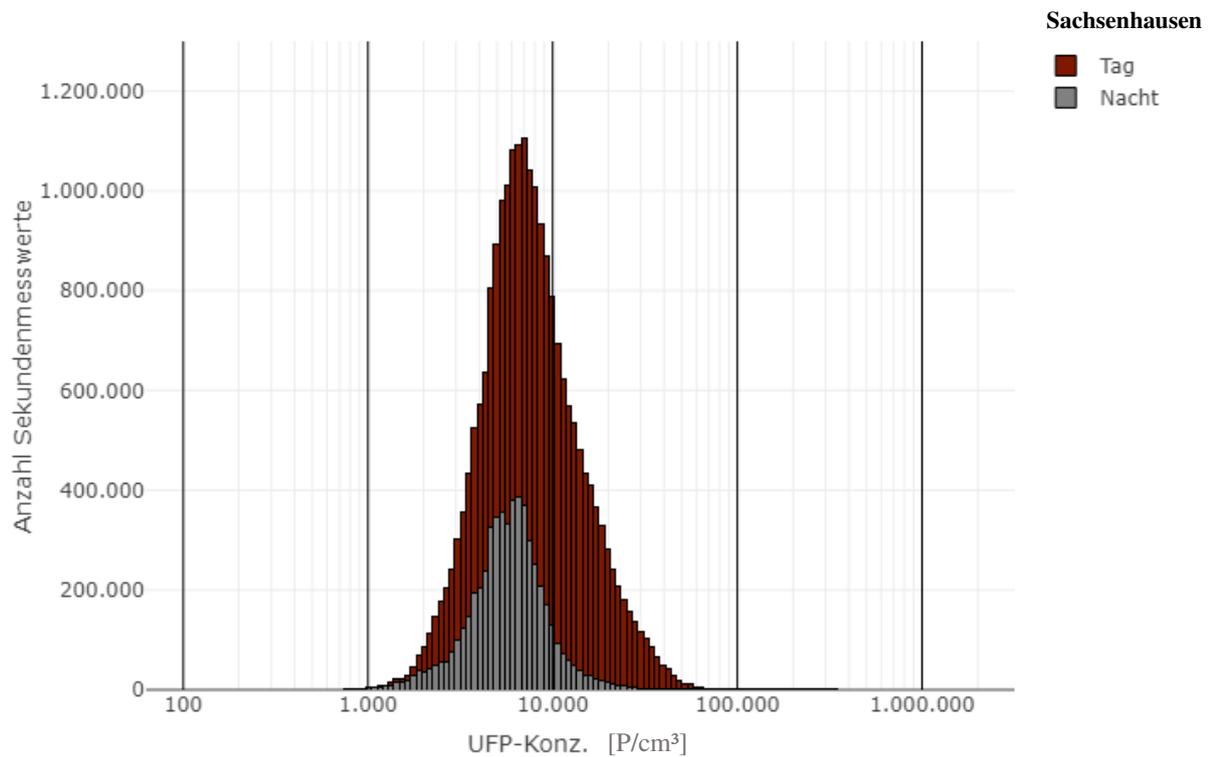


Abb. 3.1: Häufigkeitsverteilung der sekundlich aufgezeichneten UFP-Messwerte im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020 für Sachsenhausen (oben) und Oberrad (unten). Die Messwerte sind in logarithmisch äquidistante Klassen (Bins) eingeteilt und auf einer logarithmisch eingeteilten x-Achse aufgetragen. Die y-Achse gibt die Anzahl der Sekundenmesswerte für jede Klasse an. Der Balken einer jeweiligen Klasse setzt sich zusammen aus dem Anteil der Messwerte zu Tages- (5:00:01 Uhr – 23:00:00 Uhr, bunt) und Nachtzeiten (23:00:01 Uhr – 5:00:00 Uhr, grau).

Tab. 3.1: Statistische Größen der sekundlich aufgezeichneten UFP-Messwerte der Messstationen Sachsenhausen und Oberrad im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020, getrennt nach Tages- (5:00:01 Uhr – 23:00:00 Uhr) und Nachtzeiten (23:00:01 Uhr – 5:00:00 Uhr).

Messstation	Zeitraum	Mittelwert [P/cm ³]	Median [P/cm ³]	St.abw. [P/cm ³]	10-%-Per. [P/cm ³]	90-%-Per. [P/cm ³]
Sachsenh.	Tag	10.268	8.047	8.683	3.768	19.320
	Nacht	6.413	5.800	3.716	3.133	9.815
Oberrad	Tag	10.006	8.220	10.353	4.222	17.580
	Nacht	7.477	6.778	4.091	3.623	11.790

bereits Partikelgrößen ab 4 nm, während der erfasste Partikelgrößenbereich in besagter Studie erst bei 20 nm beginnt. Dies könnte den mittleren Konzentrationsunterschied erklären. Tagsüber ist die Konzentration viel stärkeren Schwankungen unterlegen als nachts, was aus den berechneten Standardabweichungen hervorgeht. In der Nacht ist die mittlere Konzentration in Oberrad um ca. 1.000 P/cm³ gegenüber der in Sachsenhausen erhöht. Die berechneten Perzentile zeigen, dass der Wertebereich der Messwerte in Sachsenhausen verglichen mit Oberrad tagsüber etwas breiter ausgelegt ist. In Oberrad kommen in sehr geringer Anzahl UFP-Konzentrationen in Millionenhöhe vor.

Für die Darstellung des Verlaufs der UFP-Konzentration über den gesamten Messzeitraum wurden aus den Sekundenmesswerten von 00:00:00 – 23:59:59 Uhr die Tagesmittelwerte berechnet. In Abb. 3.2 werden die Tagesmittelwerte der Messstationen Sachsenhausen und Oberrad im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020 in einer Zeitreihe dargestellt.

Die Messzeiträume vom 25.07.2019 – 29.07.2019 und vom 21.11.2019 – 11.12.2019 weisen eine Datenlücke auf. Die Datenlücke im Juli ist auf den Ausfall der Messgeräte aufgrund der hohen Sommertemperaturen zurückzuführen (siehe Logbucheintrag). In der Datenlücke von Ende November bis Mitte Dezember wurden die CPC-Messgeräte einer umfangreichen Wartung unterzogen (siehe Logbucheintrag). Die Tagesmittelwerte der Messstationen Sachsenhausen und Oberrad weichen geringfügig voneinander ab. Die Tagesmittelwerte schwanken von Tag zu Tag um mehrere tausend P/cm³ und insgesamt zwischen 3.000 P/cm³ und 25.000 P/cm³. Die durchschnittliche UFP-Konzentration beider Messstationen liegt vor der umfangreichen Wartung bei ca. 9.000 P/cm³ und ist danach mit ca. 10.600 P/cm³ leicht erhöht. Eventuell wurde durch die Wartung eine genauere Messleistung erzielt, jedoch könnte diese Beobachtung auch zufälliger Natur sein, da im April ebenfalls ähnlich hohe Konzentrationen gemessen wurden.

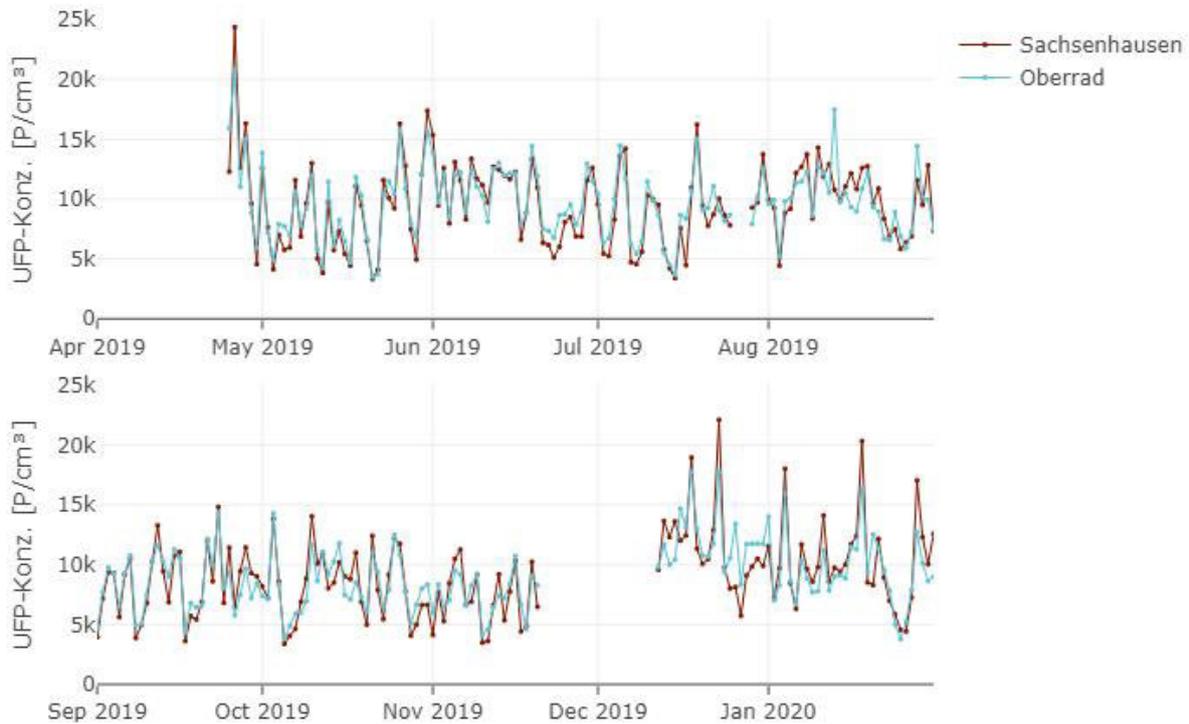


Abb. 3.2: Verlauf der Tagesmittelwerte der UFP-Messstationen Sachsenhausen und Oberrad im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020

Tagesgänge von Schadstoffen aus Verbrennungsmotoren sind in urbanen Gebieten häufig von den Stoßzeiten des Berufsverkehrs geprägt. Die Konzentrationen weisen an Werktagen (Montag – Freitag) morgens und am späten Nachmittag jeweils ein Maximum auf, welche auf den Berufsverkehr zurückzuführen sind. Mögliche Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den einzelnen Wochentagen können durch Wochengänge festgestellt werden. Der mittlere Wochengang der UFP-Konzentration an beiden Standorten ist in Abb. 3.3 dargestellt.

Bei jedem Wochentag weisen die UFP-Konzentrationen an beiden Stationen einen ähnlichen Verlauf auf. Die Tage Montag bis Freitag sind zudem zueinander recht ähnlich, wohingegen der Samstag und der Sonntag jeweils eine eigene Verlaufsstruktur besitzen⁸. In den Nachtzeiten ist die UFP-Konzentration in Oberrad im Schnitt höher als in Sachsenhausen. An den Tagen Montag bis Freitag steigt ab ca. 5:00 Uhr das Grundniveau der Konzentration in Sachsenhausen und kurze Zeit später auch in Oberrad etwa auf das Zwei- bis Dreifache an. Tagsüber schwankt die Konzentration zwischen 9.000 und 15.000 P/cm³ und zeigt gelegentlich erhöhte Konzentrationen in Form von Peaks, die bei Sachsenhausen zum Teil deutlich höher ausfallen. Samstags

⁸ Aufgrund dieses Ergebnisses wurde bei der Methode der Windsektorenanalyse eine weitere Bedingung definiert, siehe Abschnitt 2.3.3

und sonntags erstreckt sich der morgendliche UFP-Anstieg auf einen längeren Zeitraum. Tagsüber ist die UFP-Konzentration ähnlich hoch, wie an den Berufstagen und schwankt eher geringfügig.

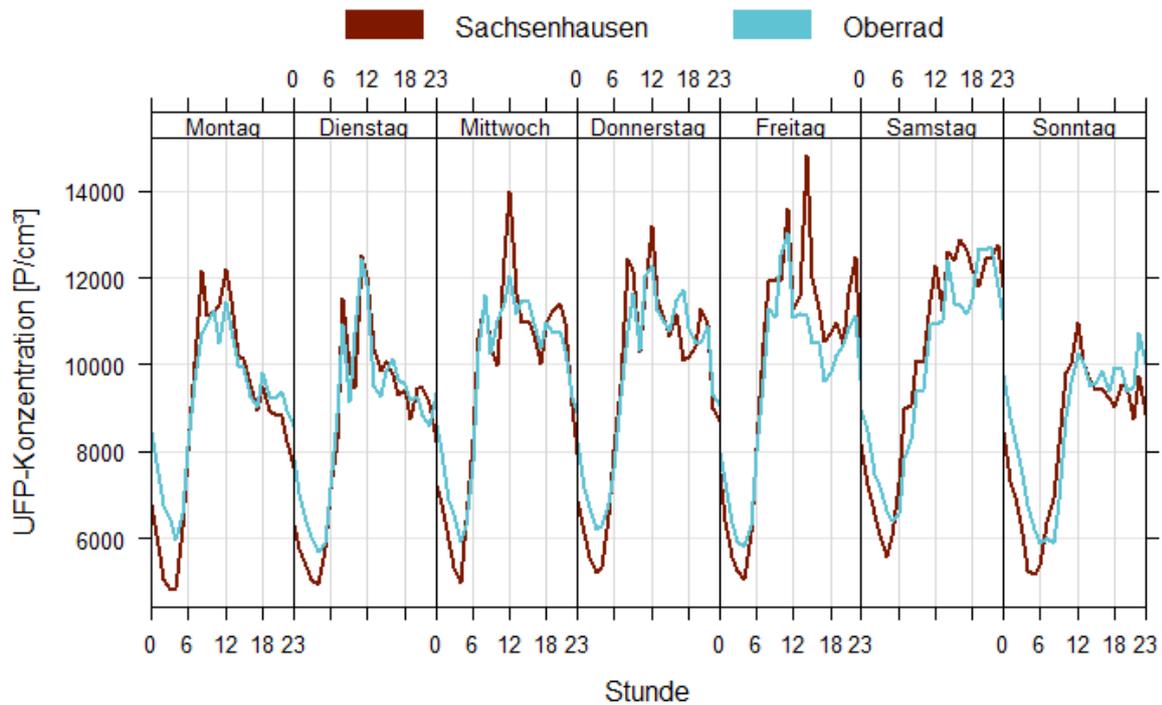


Abb. 3.3: Wochengang der UFP-Konzentration in Sachsenhausen und Oberrad von Montag bis Sonntag im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020

Die UFP-Tagesgänge der Berufstage unterscheiden sich zu den Tagesgängen anderer verkehrsbezogener Schadstoffe, welche häufig morgens und abends zu den Stoßzeiten des Berufsverkehrs jeweils ein Maximum aufweisen. Die UFP-Konzentration steigt hingegen schon um 5:00 Uhr deutlich an und erreicht in den Mittagsstunden immer wieder einzelne Maxima. Die Konzentration sinkt dann lange nach Feierabendverkehr ab ca. 23:00 Uhr wieder ab.

3.1.2 Häufigkeitsverteilung der lokalen Windverhältnisse

Abb. 3.4 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen, kombiniert mit der Windgeschwindigkeit, im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020.

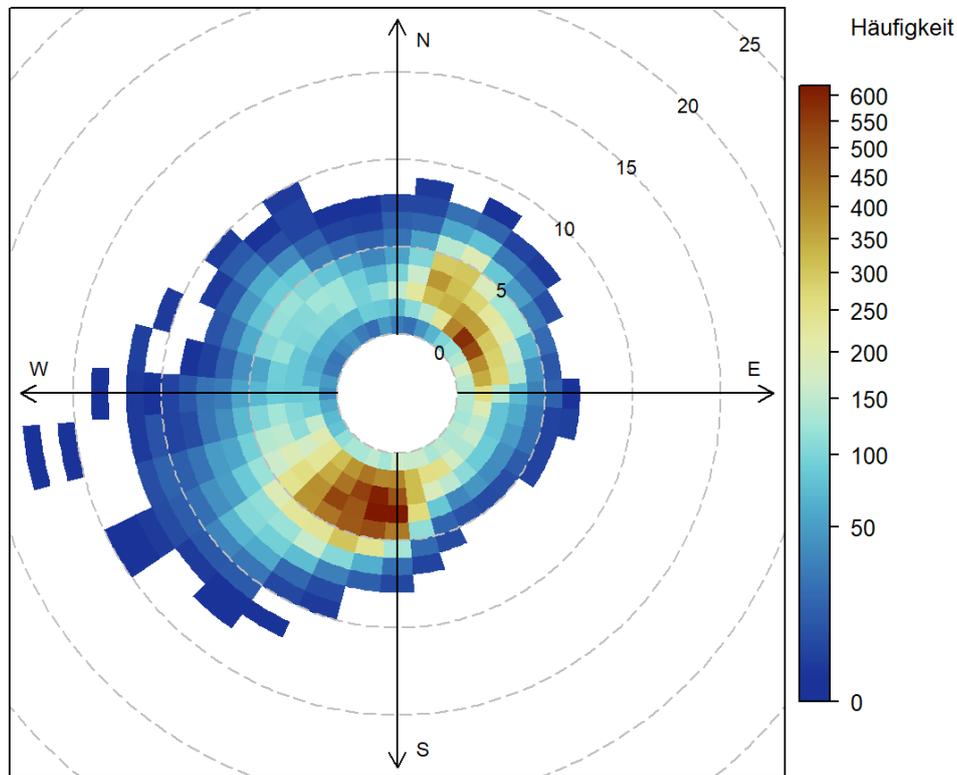


Abb. 3.4: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und -geschwindigkeit. Die Achsen stellen die vier Haupthimmelsrichtungen dar (N: Norden, E: Osten, S: Süden, W: Westen). Die Windgeschwindigkeit wird in radialem Abstand zum Mittelpunkt in m/s angegeben. Die Abgrenzungen der farblich markierten Kästen ergeben sich aus der Einteilung der Windrichtungen in 10er-Grade und der Aufrundung der Windgeschwindigkeit auf ganze Zahlen.

Die lokalen Windverhältnisse werden von südlich- bis südwestlichen Windrichtungen (170° - 220°) bei Windgeschwindigkeiten zwischen 2 – 5 m/s und von nordöstlichen Windrichtungen (20° - 80°) bei Windgeschwindigkeiten zwischen 2 – 5 m/s dominiert. Mittlere Windgeschwindigkeiten mit mehr als 10 m/s kommen sehr selten und nur bei westlich- bis südwestlichen Windrichtungen vor. Die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung deckt sich in guter Näherung mit den langjährigen Durchschnittswerten der Betriebsrichtungsverteilung des Frankfurter Flughafens (70 % Westbetrieb, 30 % Ostbetrieb).

3.1.3 Bahnbelegung und Flugbewegungsfrequenz

Die Anzahl an Starts und Landungen auf jeder Bahn im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020 kann Abb. 3.5 entnommen werden. Die Centerbahn wird zu ca. 80 % als Start- und zu ca. 20 % als Landebahn genutzt. Die Südbahn wird fast ausschließlich für Landungen genutzt. Hier finden vereinzelt auch Starts (< 2 %) statt. Die Landebahn Nordwest wird nur für Landungen

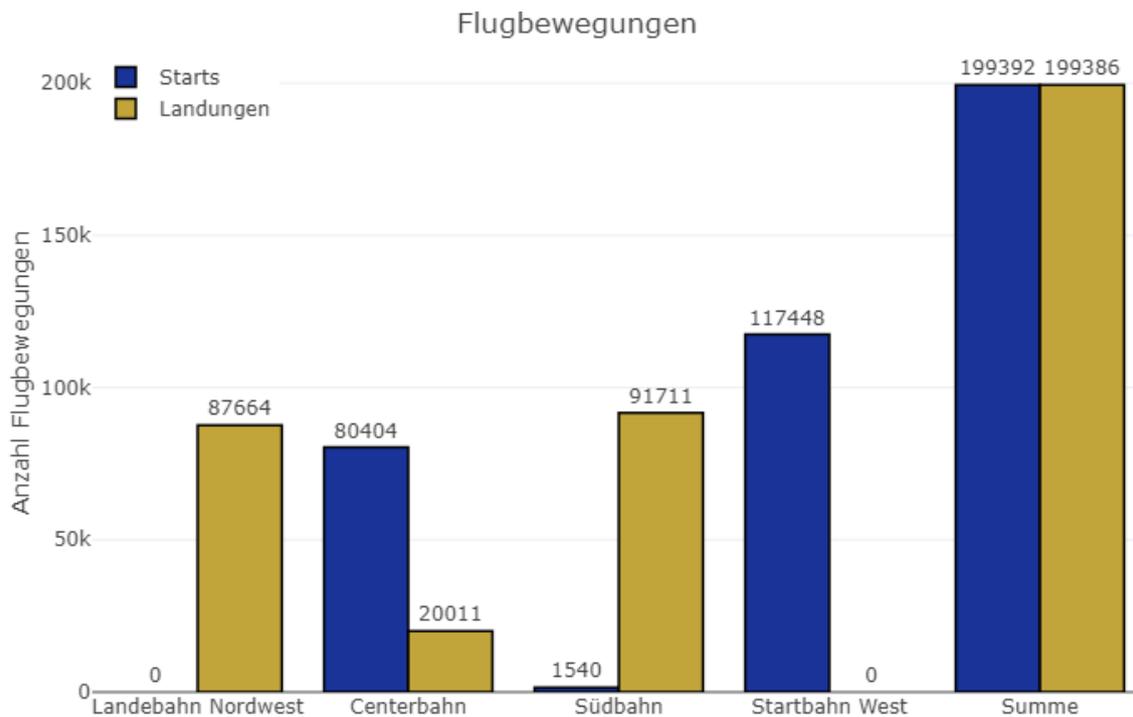


Abb. 3.5: Anzahl der Flugbewegungen jeder Bahn am Frankfurter Flughafen im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020, getrennt nach Starts und Landungen.

genutzt und die Startbahn West nur für Starts. Die Summe von Starts und Landungen ist in etwa gleich.

Der durchschnittliche Tagesgang von Landungen und Starts ist in Abb. 3.6 dargestellt. In den frühen Morgenstunden ab 5:00 Uhr finden zunächst mehr Landungen (zwischen 5 und 6) als Starts (zwischen 2 und 3) statt. Im weiteren Tagesverlauf weisen beide Tagesgänge eine annähernd alternierende Struktur auf. Beide Flugbewegungen schwanken dabei zwischen ca. 4 und 10 Flugbewegungen/10min. Es sind für Landungen vier lokale Maxima mit 8 – 10 Landungen pro 10-min-Intervall zu erkennen. Gegen Ende der Betriebszeit finden verstärkt Starts statt. Zu allen Betriebszeiten finden Starts und Landungen parallel statt. Ab ca. 23:00 Uhr geht

die Anzahl an Flugbewegungen bei Starts und Landungen gegen 0. In der Nacht von 0:00 Uhr – 5:00 Uhr wird bis auf wenige Ausnahmen weder gelandet noch gestartet.

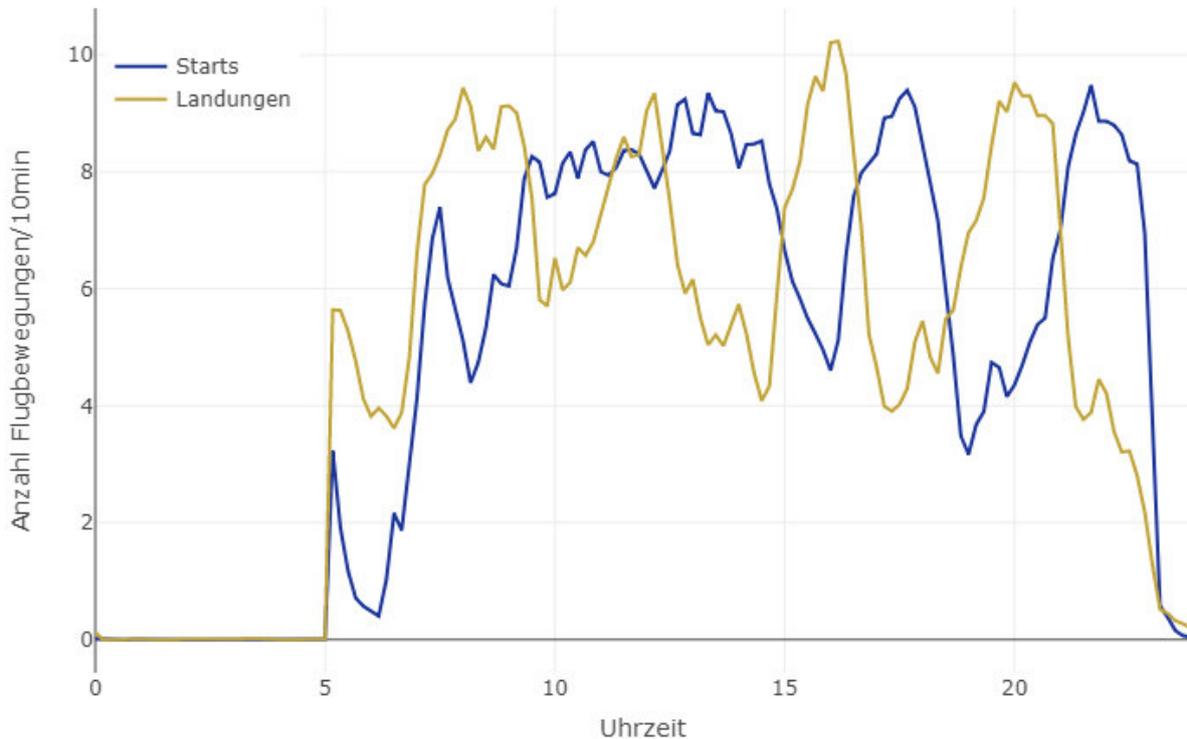


Abb. 3.6: Tagesgänge der Start- und Landefrequenz im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020. Gezeigt ist die durchschnittliche Flugbewegungsanzahl pro 10-min-Intervall.

3.2 Einfluss: lokale Windverhältnisse

Der Einfluss von Windrichtung und Windgeschwindigkeit auf die UFP-Konzentration an beiden Messstandorten ist in vier Polarplots in Abb. 3.7 dargestellt. Die UFP-Sekundenmesswerte beider Messstationen wurden zeitlich den Winddaten zugeordnet. Die Messwerte wurden in Tages- und Nachtwerte (Tag: 5:00:01 – 23:00:00 Uhr, Nacht: 23:00:01 – 5:00:00 Uhr) aufgeteilt und arithmetisch gemittelt, um die durchschnittlichen Tages- und Nachtkonzentrationen zu vergleichen.

Am Tag messen beide Messstationen besonders hohe Konzentrationen, wenn der Wind aus südwestlichen Richtungen mit Geschwindigkeiten zwischen 2 und 10 m/s weht. In Sachsenhausen werden dabei im Schnitt mehr als 20.000 P/cm³ gemessen, in Oberrad zwischen ca. 12.000 und 17.000 P/cm³. Der Bereich der hohen Konzentrationen bei südwestlichen Windrichtungen ist bei beiden Messstationen scharf abgegrenzt und annähernd deckungsgleich. Ein

Teil der hohen Konzentrationen tritt bei Windrichtungen aus dem Bereich des Flughafengeländes auf, der andere bei etwas südlicheren Windrichtungen außerhalb des Flughafengeländes. Die Windgeschwindigkeit hat bei südwestlichen Windrichtungen einen Einfluss auf die UFP-Konzentration dahingehend, dass niedrigere Windgeschwindigkeiten < 3 m/s für geringere Konzentrationen sorgen, während höhere Geschwindigkeiten zu erhöhten Konzentrationen führen.

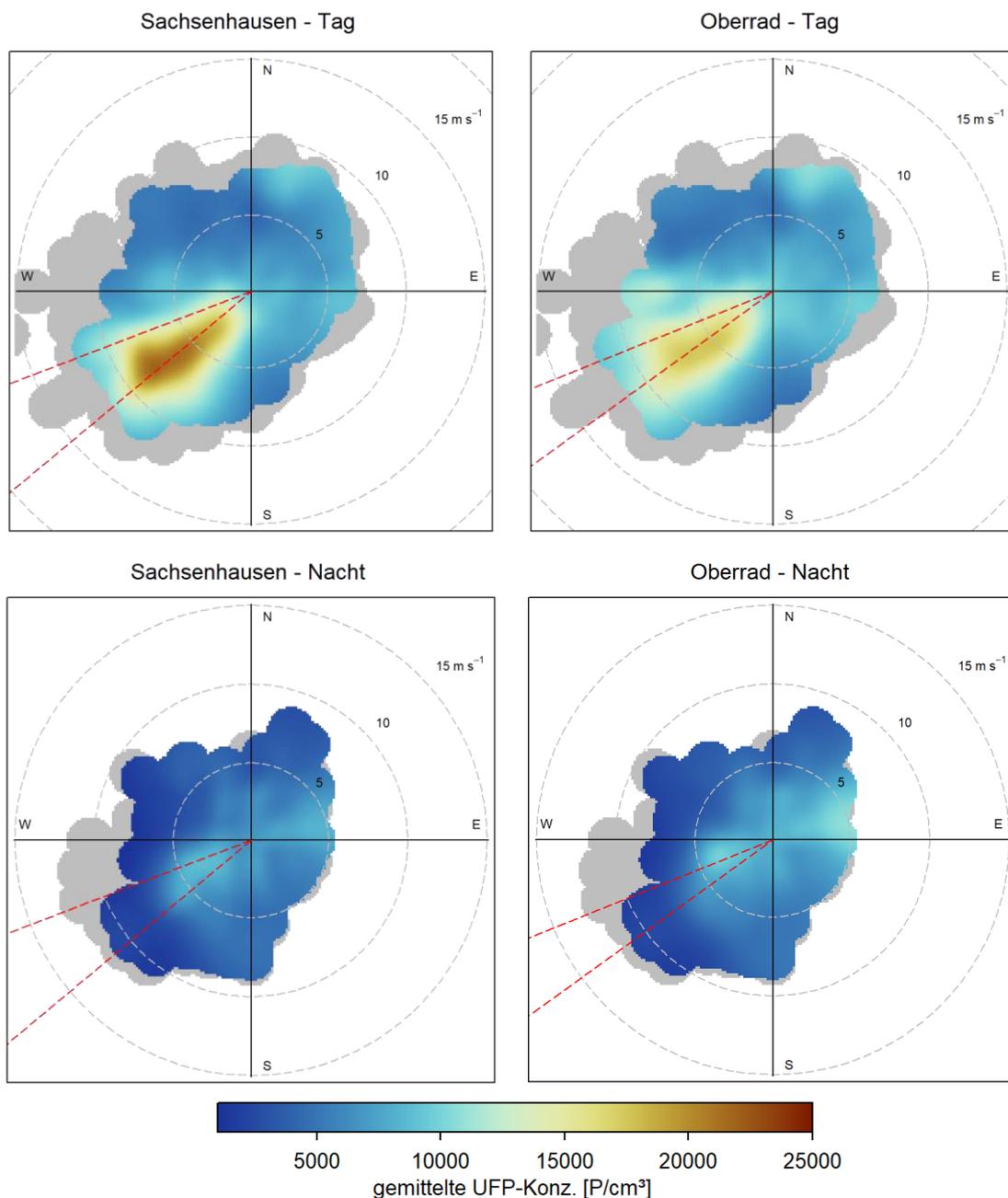


Abb. 3.7: Windabhängige gemittelte UFP-Konzentration zu Tages- (5:00:01 – 23:00:00 Uhr, oben) und Nachtzeiten (23:00:01 – 05:00:00 Uhr, unten) für Sachsenhausen (links) und Oberrad (rechts) in vier Polarplots. Als Datengrundlage wurden alle Sekundenmesswerte im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020 gewählt. Die Achsen stellen die vier Haupthimmelsrichtungen dar (N: Norden, E: Osten, S: Süden, W: Westen). Die Windgeschwindigkeit wird in radialem Abstand zum Mittelpunkt in m/s angegeben. Ausgegraute Bereiche stellen keine repräsentativen Konzentrationen aufgrund einer zu geringen Datengrundlage dar. Die rot-gestrichelten Linien geben vom jeweiligen Messstandort betrachtet die Außengrenzen des Flughafengeländes an.

ren. Erreicht die Windgeschwindigkeit einen höheren Wert als 10 m/s, sinkt die UFP-Konzentration wieder ab. Bei anderen Windrichtungen liegt die UFP-Konzentration zwischen 8.000 und 12.000 P/cm³. Die Windgeschwindigkeit hat hierbei keinen sichtbaren Einfluss auf die UFP-Konzentration.

In der Nacht messen beide Messstationen im Vergleich zum Tag sehr geringe Konzentrationen. Um die Nächte beider Messstandorte besser vergleichen zu können, wurde die Farbskala der UFP-Konzentration entsprechend der niedrigeren Konzentrationen angepasst. Das Ergebnis ist in Abb. 3.8 dargestellt. Bei beiden Messstationen werden bei östlichen Windrichtungen leicht erhöhte Konzentrationen gemessen, die in Oberrad deutlich höher sind als in Sachsenhausen. Eine mögliche Quelle könnte die A661 darstellen, die östlich von Oberrad in Nord-Süd-Richtung in ca. 1,3 km Entfernung zur Messstation Oberrad verläuft. Der südwestliche Sektor ist bei beiden Messstationen leicht erhöht, was möglicherweise auf die nächtlichen Arbeiten auf dem Flughafengelände zurückzuführen ist. Eine weitere Erklärung wäre, dass nach 23 Uhr noch eine bestimmte Zeit erhöhte Konzentrationen vorliegen, ehe diese in der Nacht völlig abgeklungen sind. Höhere Windgeschwindigkeiten führen in der Nacht im Schnitt zu niedrigeren Konzentrationen. Die farbigen Flächen sind in der Nacht kleiner und enger zum Mittelpunkt hin zentriert, als am Tag, was darauf hindeutet, dass nachts im Schnitt niedrigere Windgeschwindigkeiten herrschen als tagsüber.

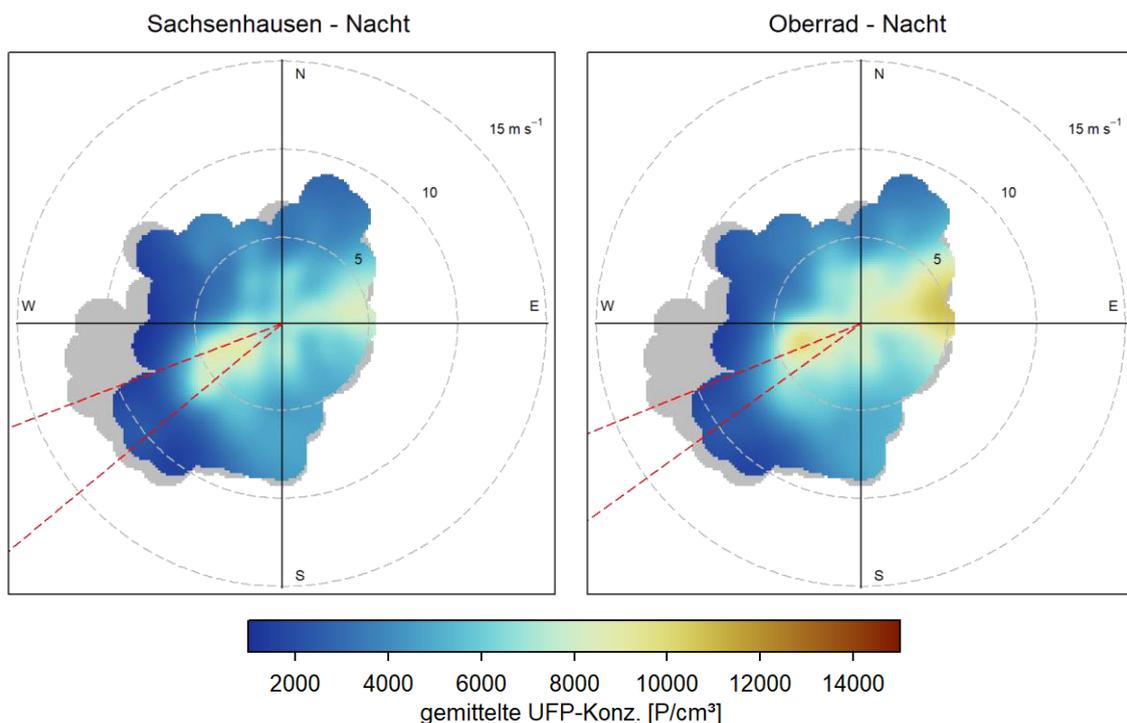


Abb. 3.8: Polarplots der Nachtzeiten aus Abb. 3.7 mit anderer Farbskalierung. Konzentrationsunterschiede kommen so besser zur Geltung.

3.3 Einfluss: Landungen

Insgesamt wurden für den Einfluss von Landungen 25.790 10-min-Mittelwerte berücksichtigt. Diese wurden wie in Abschnitt 2.3 beschrieben den vier Windsektoren für Landungen zugeordnet. Abb. 3.9 zeigt für jeden Windsektor die Gesamtanzahl an 10-min-Mittelwerten der Tages- (5:00 – 23:00 Uhr) und Nachtzeiten (23:00 – 5:00 Uhr). Die Mittelwertanzahl stellt die Datengrundlage für die Tagesgänge der vier Windsektoren dar. Der Südsektor hat mit insgesamt 10.819 berücksichtigten Mittelwerten die höchste Datenmenge, was verglichen mit der Häufigkeitsverteilung der Windrichtung in Abschnitt 3.1.2 und gekoppelt mit der Tatsache, dass bei südlichen Windrichtungen die Betriebsrichtung auf West eingestellt ist, auch zu erwarten ist. Bei östlichen Windrichtungen wird nur bei schwachen Windgeschwindigkeiten in BR25 gelandet, woraus sich die niedrigste Datenmenge für den Ostsektor ergibt. Mithilfe dieser Verteilung lässt sich eine Aussage über die statistische Sicherheit der ermittelten Tagesgänge jedes Windsektors treffen.

In Abb. 3.10 sind die Tagesgänge der UFP-Konzentrationen von den Messstationen Sachsenhausen und Oberrad in Kombination mit der durchschnittlichen Landungsanzahl pro 10 Minuten bei BR25 für jeden Windsektor dargestellt. Es wurde eine einheitliche Skalierung für alle Plots gewählt, um einen direkten Vergleich der einzelnen Tagesgänge zu ermöglichen. In Tab. 3.2 sind die zugehörigen statistischen Größen aufgelistet.

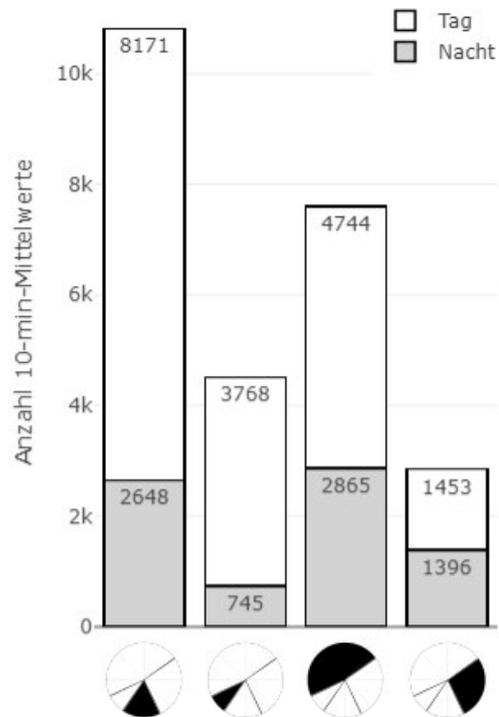


Abb. 3.9: Anzahl der berücksichtigten 10-min-Mittelwerte jedes Windsektors (Landungen), getrennt nach Tag und Nacht.

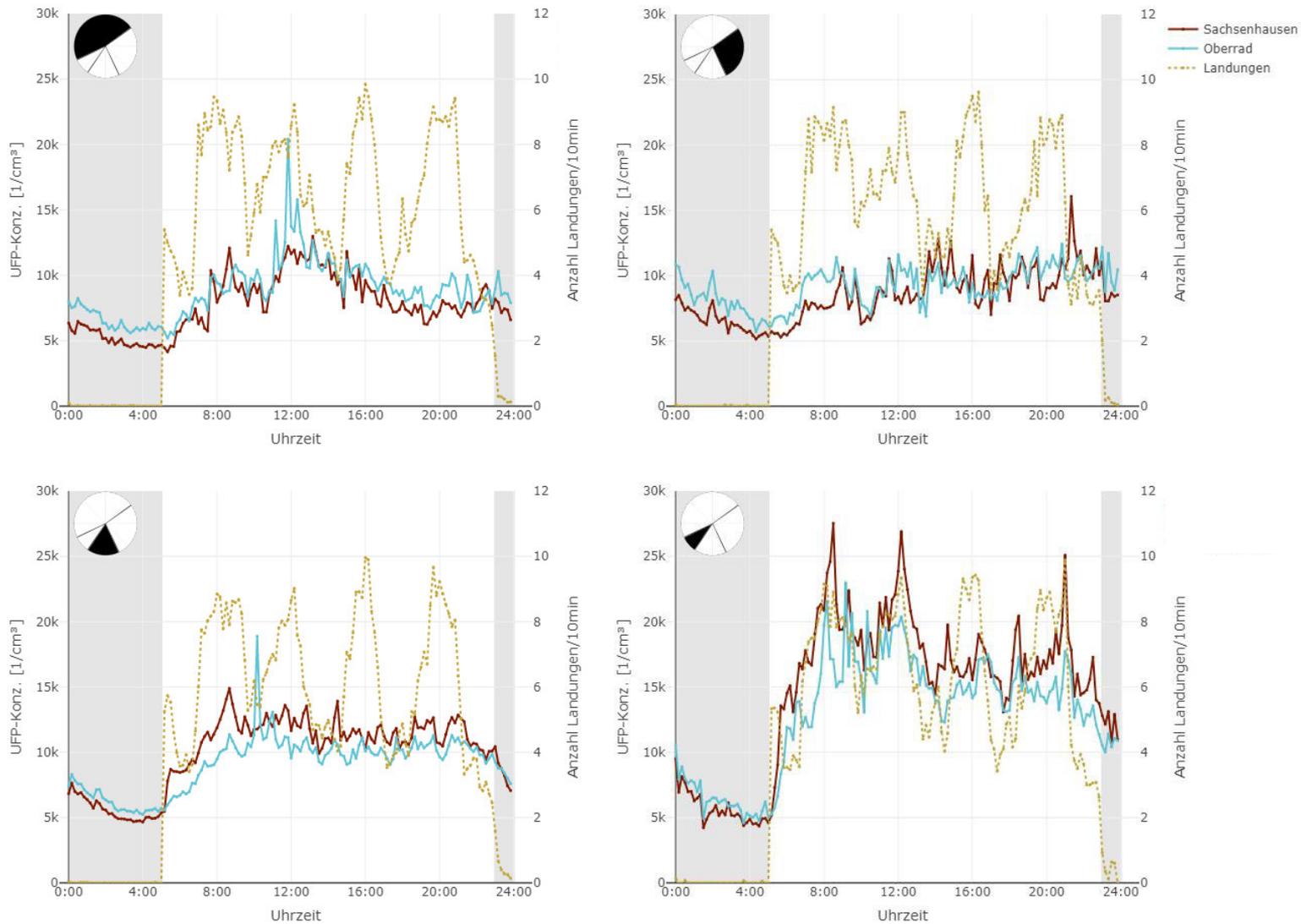


Abb. 3.10: Tagesgänge der UFP-Konzentrationen in Sachsenhausen und Oberrad (linke y-Achse, k: tausend) und der Landungszahl pro 10 Minuten (rechte y-Achse) für jeden Windsektor (Landungen). Der Windsektor ist in jedem Plot oben links dargestellt. Der hell hinterlegte Bereich entspricht den Betriebszeiten des Frankfurter Flughafens (5:00 Uhr – 23:00 Uhr), der grau hinterlegte Bereich entspricht den Zeiten des Nachtflugverbots (23:00 Uhr – 5:00 Uhr).

Tab. 3.2: Statistische Größen der in Abb. 3.10 gezeigten UFP-Konzentrationsverläufe von Sachsenhausen und Oberrad für jeden Windsektor (Landungen), getrennt nach Tag und Nacht. Als Datengrundlage wurden die gemittelten 10-min-Mittelwerte der einzelnen Tagesgänge gewählt.

Messtation	Windsektor	Zeitraum	Mittelwert [P/cm ³]	Median [P/cm ³]	St.abw. [P/cm ³]	Maximum [P/cm ³]	Minimum [P/cm ³]
Sachsenh.	Nord	Tag	8.511	8.181	1.879	12.982	4.148
		Nacht	5.492	5.167	965	7.934	4.482
	Ost	Tag	9.049	9.061	1.910	16.065	5.284
		Nacht	6.791	6.609	1.076	8.655	5.142
	Süd	Tag	11.322	11.469	1.438	14.895	5.467
		Nacht	5.928	5.473	1.225	9.154	4.659
	Flughafen	Tag	17.534	17.143	3.470	27.532	5.170
		Nacht	6.555	5.420	2.524	13.125	4.216
Oberrad	Nord	Tag	9.403	9.246	2.106	20.413	5.194
		Nacht	6.864	6.344	1.120	10.306	5.595
	Ost	Tag	9.481	9.646	1.402	12.423	6.139
		Nacht	8.293	8.175	1.443	11.711	5.694
	Süd	Tag	9.944	10.114	1.578	18.883	5.580
		Nacht	6.543	6.267	1.103	8.773	5.236
	Flughafen	Tag	14.986	14.866	3.002	22.976	5.266
		Nacht	7.010	6.301	1.982	11.424	4.588

Vergleich der Nachtkonzentrationen

Bei allen Windsektoren beginnt die Nacht, bedingt durch das höhere Grundniveau zu Tageszeiten, mit Konzentrationen im Bereich von ca. 10.000 P/cm³. Im weiteren Verlauf der Nacht sinkt die UFP-Konzentration bei beiden Messstandorten kontinuierlich ab und erreicht zwischen 3:00 und 5:00 Uhr einen Tiefststand mit ca. 4.000 – 6000 P/cm³. Bei allen Sektoren werden in Oberrad ab 00:00 Uhr höhere Konzentrationen gemessen als in Sachsenhausen. Die mittlere nächtliche Konzentration in Oberrad ist beim Ostsektor im Vergleich zu den anderen Windsektoren leicht erhöht, in Sachsenhausen sind die mittleren nächtlichen Konzentrationen sowohl beim Ost- als auch beim Flughafensektor im Vergleich zu den anderen Windsektoren leicht erhöht.

Insgesamt ist der Konzentrationsverlauf in der Nacht bei allen Windsektoren sehr ähnlich. Unterschiede bestehen lediglich bei den mittleren Konzentrationen und beim Konzentrationsunterschied zwischen Sachsenhausen und Oberrad.

Vergleich der Tageskonzentrationen

Die Konzentrationsverläufe der Windsektoren zu Tageszeiten unterscheiden sich teilweise sehr stark voneinander. Aus diesem Grund wird jeder Sektor zunächst einzeln betrachtet, um danach auf mögliche Unterschiede und Gemeinsamkeiten untereinander einzugehen.

Beim Nordsektor steigen die UFP-Konzentrationen ab ca. 6:00 Uhr merklich an und überschreiten kurz vor 8:00 Uhr zum ersten Mal einen Wert von 10.000 P/cm³. Gegen Mittag werden Höchstwerte erreicht; bei Oberrad kurzzeitig bis zu 20.000 P/cm³ und bei Sachsenhausen ca. 12.000 P/cm³. Im weiteren Tagesverlauf sinken beide Konzentrationen unter 10.000 P/cm³. Die Konzentrationshöhe beider Messstationen unterscheidet sich über den gesamten Tag nur geringfügig. Oberrad weist überwiegend leicht höhere Konzentrationen im Vergleich zu Sachsenhausen auf.

Beim Ostsektor steigen beide UFP-Konzentrationen kurz vor 7:00 Uhr merklich an, wodurch in Oberrad zum ersten Mal ein Wert von 10.000 P/cm³ überschritten wird. Bis ca. 9:00 Uhr liegen in Oberrad durchgehend höhere Konzentrationen, die zum Teil bis zu 2.500 P/cm³ höher sind, vor. Im weiteren Tagesverlauf sind beide Konzentrationen starken Schwankungen von 6.000 bis 14.000 P/cm³ unterlegen. In Sachsenhausen werden zwischen 21:00 und 22:00 Uhr kurzzeitig ca. 16.000 P/cm³ erreicht.

Beim Südsektor steigt die UFP-Konzentration in Sachsenhausen zwischen 5:00 und 5:30 Uhr von knapp 5.500 P/cm³ auf mehr als 8.500 P/cm³ an. In Oberrad wird dieser Wert, nach einem kontinuierlichen Anstieg, erst nach 7:00 Uhr überschritten. Grundsätzlich ist am Morgen die Konzentration in Sachsenhausen um 1.500 bis 3.800 P/cm³ höher als in Oberrad. Die Verlaufsstruktur beider Konzentrationen ist bis ca. 9:30 Uhr annähernd identisch, obgleich die Konzentrationspeaks in Sachsenhausen stärker ausgeprägt sind. Im weiteren Tagesverlauf liegt in Sachsenhausen überwiegend eine leicht höhere Konzentration im Vergleich zu Oberrad vor. Die Konzentrationswerte schwanken dabei zwischen 9.000 und 14.000 P/cm³, abgesehen von einem Spitzenwert in Oberrad von knapp 19.000 P/cm³ um 10:10 Uhr. Insgesamt sind die Konzentrationen recht stabil und schwanken nur geringfügig im Vergleich zu den anderen Windsektoren.

Beim Flughafensektor steigen beide UFP-Konzentrationen ab ca. 5:00 Uhr stark an. In Sachsenhausen werden mit dem ersten Anstieg über 15.000 P/cm³ erreicht, in Oberrad knapp 14.000 P/cm³. Dem ersten markanten Anstieg folgt ein kurzzeitiges Konzentrationsmaximum zwischen 8:00 und 9:00 Uhr mit ca. 27.500 P/cm³ in Sachsenhausen und ca. 21.500 P/cm³ in Oberrad. Kurz nach 10 Uhr wird ein lokales Minimum erreicht, bei dem die Konzentration in Bezug zum vorherigen Maximum in Sachsenhausen um ca. 11.000 P/cm³ und in Oberrad um ca. 8.500 P/cm³ gesunken ist. Um kurz nach 12:00 Uhr wird ein zweites kurzzeitiges Maximum in ähnlicher Konzentrationshöhe wie der des vorherigen Maximums erreicht. Danach sinken die Konzentrationen wieder auf ein lokales Minimum ab, welches in Sachsenhausen um 14 Uhr

und in Oberrad um 14:30 Uhr erreicht wird. Zwischen 14:00 Uhr und 20:00 Uhr schwanken die Konzentrationen sehr stark. Hierbei sind in Sachsenhausen drei kleinere Maxima zwischen 19.000 und 21.000 P/cm³ vorhanden, während in Oberrad zwei kleinere Maxima mit ca. 17.000 P/cm³ zu verzeichnen sind. Um 21:00 Uhr wird bei beiden Konzentrationen das letzte kurzzeitige Maximum mit ca. 25.000 P/cm³ in Sachsenhausen und knapp 18.000 P/cm³ in Oberrad erreicht. Danach sinken beide Konzentrationen mit kleineren Schwankungen immer weiter ab. Insgesamt sind die Konzentrationsverläufe sehr variabel und erreichen ungewöhnlich hohe Konzentrationen im Vergleich zu den anderen Windsektoren.

Bei den Windsektoren Nord, Ost und Süd liegen annähernd identische mittlere Konzentrationen vor, die charakteristisch für städtische Hintergrundkonzentrationen in dieser Umgebung sind, während der Flughafensektor vergleichsweise hohe Konzentrationen aufweist, die für städtische Hintergrundkonzentrationen eher untypisch und als zu hoch einzustufen sind. Ein sprunghafter Anstieg ab 5:00 Uhr liegt lediglich bei der Konzentration in Sachsenhausen des Südsektors und bei beiden Konzentrationen des Flughafensektors vor. Alle anderen Konzentrationen steigen morgens erst nach 6:00 Uhr kontinuierlich an. Bei allen Konzentrationsverläufen ist nach dem morgendlichen Anstieg um ca. 10:00 Uhr ein kurzzeitiger Konzentrationsabfall zu beobachten.

Vergleich der Konzentrationen mit Landefrequenzen

Die Kurven der durchschnittlichen Landungsanzahl pro 10-min-Intervall sind bei allen Windsektoren sehr ähnlich. Innerhalb der ersten 10 Minuten nach Betriebsbeginn des Flughafens finden im Schnitt zwischen 5 und 6 Landungen statt, welches ein erstes kleines Maximum darstellt. Danach gibt es vier Zeitabschnitte (gegen 8:00 Uhr, 12:00 Uhr, 16:00 Uhr und 20:00 Uhr), in denen zwischen 8 und 10 Landungen pro 10-min-Intervall stattfinden (Maxima) und dazwischen jeweils Zeitabschnitte, in denen zwischen 4 und 7 Landungen pro 10-min-Intervall stattfinden (Minima). Diese alternierende Verlaufsstruktur stimmt in guter Näherung mit dem in Abschnitt 3.1.3 gezeigten Ergebnis überein.

Werden die Landefrequenzen mit den UFP-Konzentrationsverläufen der einzelnen Windsektoren rein visuell verglichen, fällt lediglich beim Flughafensektor ein ähnlicher Verlauf der Kurven auf. Die Kreuzkorrelationen zwischen Sachsenhausen/Oberrad, Sachsenhausen/Landungen und Oberrad/Landungen mit den zugehörigen Zeitverschiebungen wurden für alle Windsektoren berechnet. Tab. 3.3 enthält die jeweils maximalen Kreuzkorrelationskoeffi-

zienten mit zugehöriger Zeitverschiebung für alle Windsektoren. Bei einer positiven Zeitverschiebung wird die zweite Kurve um den angegebenen Wert in positive x-Richtung (nach rechts) verschoben, bei negativer Zeitverschiebung in negative x-Richtung (nach links).

Tab. 3.3: Maximale Kreuzkorrelationskoeffizienten mit zugehöriger zeitlicher Verschiebung für alle Windsektoren (Landungen).

Sektor	Oberrad/Sachsenhausen		Sachsenhausen/Landungen		Oberrad/Landungen	
	$R_{\max}(\tau)$	τ [min]	$R_{\max}(\tau)$	τ [min]	$R_{\max}(\tau)$	τ [min]
Nordsektor	0,8692	+0	0,6957	+50	0,6413	+50
Ostsektor	0,7012	+0	0,6399	+120	0,4982	+150
Südsektor	0,8776	+0	0,8487	+10	0,7573	+60
Flughafensektor	0,9383	+0	0,8708	+20	0,8483	+20

Die berechneten Kreuzkorrelationen sind für alle Vergleiche beim Flughafensektor am höchsten und stehen für einen starken linearen Zusammenhang bei entsprechender Verschiebung. Hier liegt bei den Vergleichen Sachsenhausen/Landungen und Oberrad/Landungen jeweils eine zeitliche Verschiebung von 20 Minuten und passend dazu beim Vergleich Oberrad/Sachsenhausen eine zeitliche Verschiebung von 0 Minuten vor. Nord- und Ostsektor weisen bei den Vergleichen Sachsenhausen/Landungen und Oberrad/Landungen die niedrigsten Korrelationen auf, welche für einen schwachen bis mittelstarken Zusammenhang stehen. Für den Südsektor liegen etwas niedrigere Korrelationen als beim Flughafensektor vor, welche aber ebenfalls für einen starken linearen Zusammenhang stehen.

Der Flughafensektor weist die höchsten Kreuzkorrelationen zwischen UFP-Konzentration und Landungen mit Zeitverschiebungen in einem plausiblen Größenbereich auf. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass bei Wind aus Richtung Flughafen nicht nur der Flughafen bzw. das Flughafengelände selbst eine dominierende UFP-Quelle darstellt, sondern dass hohe UFP-Konzentrationen in großem Maße von den landenden Flugzeugen verursacht werden, da die Konzentrationen mit der Landefrequenz bei entsprechender zeitlicher Verschiebung stark korrelieren. Beim Südsektor bestehen zwar auch vergleichsweise hohe Korrelationen zwischen UFP-Konzentration und Landungen, jedoch liegen beim Südsektor tagsüber viel geringere Konzentrationen mit weniger stark ausgeprägten Konzentrationsspitzen vor als beim Flughafensektor. Möglicherweise ist die Flughöhe der landenden Flugzeuge bei südlichen Richtungen noch zu hoch, als dass die Flugzeuge einen wesentlichen Effekt auf die UFP-Konzentration am Boden

zeigen. Auch der fehlende Beitrag des Flughafengeländes bei südlichen Windrichtungen könnte ein Grund für niedrigere Konzentrationen sein.

Aufgrund dieses Ergebnisses wurde speziell für den Flughafensektor eine weitere Methode zur Lokalisierung der UFP-Quelle formuliert, um eventuell eine Aussage darüber treffen zu können, ab welcher Flughöhe die landenden Flugzeuge einen wesentlichen Effekt auf die UFP-Konzentration am Boden ausüben.

3.3.1 Emissionsortbestimmung

Die Ergebnisse im vorherigen Abschnitt (3.3) legen einen positiven Zusammenhang zwischen landenden Flugzeugen und UFP-Konzentration bei Wind aus Richtung Flughafen (220 – 240 °) nahe. Um diese These zu unterstützen, soll die für die erhöhten Konzentrationen verantwortliche Quelle lokalisiert werden. Damit soll einerseits geprüft werden, ob diese Quelle auf einer oder mehrerer der Anflugrouten lokalisiert werden kann und falls ja, ab welcher Flughöhe die landenden Flugzeuge einen Einfluss auf die bodennahe UFP-Konzentration haben.

Bei dieser Methode wird zunächst vorausgesetzt, dass die zu erhöhten Konzentrationen führenden UFP des Flughafensektors horizontal durch Wind vom Emissionsort zu den Messstationen transportiert werden. Um den genauen Emissionsort zu bestimmen, werden Windrichtung und -geschwindigkeit sowie die Zeitverschiebung zwischen morgens einsetzenden Landungen und Anstieg der UFP-Konzentrationen an den Messstationen benötigt. Mit der Zeitverschiebung und der Windgeschwindigkeit kann die Entfernung des Emissionsorts zur jeweiligen Messstation bestimmt werden. Die Windrichtung gibt an, in welcher Richtung sich der Emissionsort befindet. In Kombination kann so die ungefähre Lage des Emissionsorts bestimmt werden. Statt eines genauen Ortspunktes soll für jede Messstation ein Bereich ermittelt werden, innerhalb dessen sich der Emissionsort für diese Messstation mit hoher Wahrscheinlichkeit befindet.

Die Datengrundlage dieser Methode bilden die 10-min-Mittelwerte von Windrichtung und -geschwindigkeit des Flughafensektors zwischen 5:00 Uhr und 6:00 Uhr. Von diesen beiden Größen werden jeweils der Mittelwert sowie die Standardabweichung berechnet.

Der morgendliche durch den Flugbetrieb bedingte Konzentrationsanstieg ist von anderen Störquellen weitestgehend befreit. Daher ist anzunehmen, dass die zeitlichen Abstände zwischen den ersten Kurvenpeaks den realen Zeitabständen zwischen UFP-Emission der landenden Flugzeuge und UFP-Messung der Messstationen am ehesten entsprechen. Die zeitlichen Ab-

stände zwischen den UFP-Konzentrationen und der Landefrequenz des Flughafensektors werden deshalb in dem Zeitintervall von 5:00 Uhr – 6:00 Uhr aus Abb. 3.10 grafisch ermittelt. Hierfür werden die Zeitpunkte der ersten Maxima ermittelt und daraus die zeitlichen Differenzen bestimmt.

Die berechneten Mittelwerte \pm Standardabweichung der Windparameter ergeben jeweils einen minimalen und einen maximalen Wert. In Kombination mit den zeitlichen Abständen zwischen den UFP-Konzentrationen und der Landefrequenz werden für jede Messstation insgesamt vier Strecken berechnet, deren Endpunkte verbunden jeweils einen Bereich ergeben. Die Strecken sind als Radien und die Windrichtung als Winkel bezogen auf den jeweiligen Messstationort zu betrachten. Aus diesem Grund werden die Endpunkte nicht direkt, sondern radial verbunden, wodurch ein Kreisringsegment als Bereich entsteht. Diese Segmente bilden den Bereich ab, innerhalb dessen mit hoher Wahrscheinlichkeit die verursachende UFP-Quelle liegt. Sollte sich ein Teil einer oder mehrerer Anflugrouten innerhalb dieses Bereichs befinden, kann über trigonometrische Funktionen die Flughöhe der landenden Flugzeuge innerhalb dieses Bereichs ermittelt werden.

3.3.2 Ergebnis: Emissionsortbestimmung

Der Tab. 3.4 sind die berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen der Windparameter aus den 10-min-Mittelwerten des Flughafensektors zwischen 5:00 und 6:00 Uhr zu entnehmen. Die ermittelten zeitlichen Abstände der ersten Maxima zwischen 5:00 und 6:00 Uhr sind Tab. 3.5 zu entnehmen.

Es werden eine minimale und maximale Windgeschwindigkeit bzw. Windrichtung aus den Mittelwerten und der Standardabweichungen der Tab. 3.4 berechnet. Aus der minimalen und maximalen Windgeschwindigkeit werden in Kombination mit den Zeitversätzen der Vergleiche Sachsenhausen/Landungen und Oberrad/Landungen aus Tab. 3.5 für jede Messstation zwei Strecken berechnet, die die minimale bzw. maximale Entfernung des Emissionsorts zur Messstation angeben. Die Ergebnisse sind in Tab. 3.6 angegeben.

Tab. 3.4: Mittelwert und Standardabweichung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit des Flughafensektors. Die Datengrundlage bilden alle 10-min-Mittelwerte des Flughafensektors zwischen 5:00 Uhr und 6:00 Uhr.

Windparameter	Mittelwert	Standardabweichung
Windrichtung	226,8°	7,5 °
Windgeschwindigkeit	3,16 m/s	2,28 m/s

Tab. 3.5: Zeitliche Verschiebungen der ersten Anstiege des Flughafensektors zwischen 5:00 Uhr und 6:00 Uhr, grafisch aus Abb. 3.10 ermittelt.

Vergleich	zeitl. Abstand der ersten Maxima
Sachsenhausen/Landungen	30 min
Oberrad/Landungen	50 min
Oberrad/Sachsenhausen	20 min

Tab. 3.6: Minimum und Maximum der Windrichtung und Windgeschwindigkeit, sowie berechnete Distanzen zwischen Messstation und Emissionsort. wd: Windrichtung, ws: Windgeschwindigkeit, sd: Standardabweichung, lag: Zeitverschiebung, r min/max: minimale/maximale Distanz zwischen Messstation und Emissionsort.

Messstation	wd + sd [°]	wd - sd [°]	ws + sd [m/s]	ws - sd [m/s]	lag [s]	r [m]	
						max.	min.
Sachsenh.	234,3	219,3	5,44	0,88	1.800	9.792	1.584
Oberrad	234,3	219,3	5,44	0,88	3.000	16.320	2.640

Die berechneten minimalen bzw. maximalen Distanzen zwischen Messstation und Emissionsort werden jeweils von der jeweiligen Messstation aus in minimaler und maximaler Windrichtung in die Übersichtskarte der Messstationen (Abb. 1.6) eingezeichnet. Die Endpunkte der Distanzen werden jeweils kreisbogenförmig verbunden. Das Ergebnis der Emissionsortbestimmung ist in Abb. 3.11 dargestellt.

Beide Bereiche zeigen in Richtung Südwesten. In beiden Bereichen befinden sich größere Abschnitte der Anflugrouten des Parallelbahnsystems bei Flughöhen ≤ 400 m. Von der Anflugroute der Landebahn Nordwest befinden sich sehr kurze Abschnitte am äußeren Rand beider Bereiche bei Flughöhen > 400 m. Der bestimmte Bereich von Sachsenhausen ist kleiner als der Bereich von Oberrad, was auf den kürzeren Zeitversatz zwischen Landungen und UFP-Konzentration zurückzuführen ist. Der rot markierte Bereich stellt die Schnittmenge beider Bereiche dar. Innerhalb dieser Schnittmenge befinden sich Abschnitte der Anflugrouten des Parallelbahnsystems. Das Gelände des Frankfurter Flughafens befindet sich außerhalb des rot markierten Bereichs. Die maximalen Flughöhen der landenden Flugzeuge innerhalb des rot markierten Bereichs betragen je nach Anflugwinkel und Anflugroute ca. 240 – 270 m bei der Center- und 200 – 220 m bei der Südbahn (Tab. 3.7).

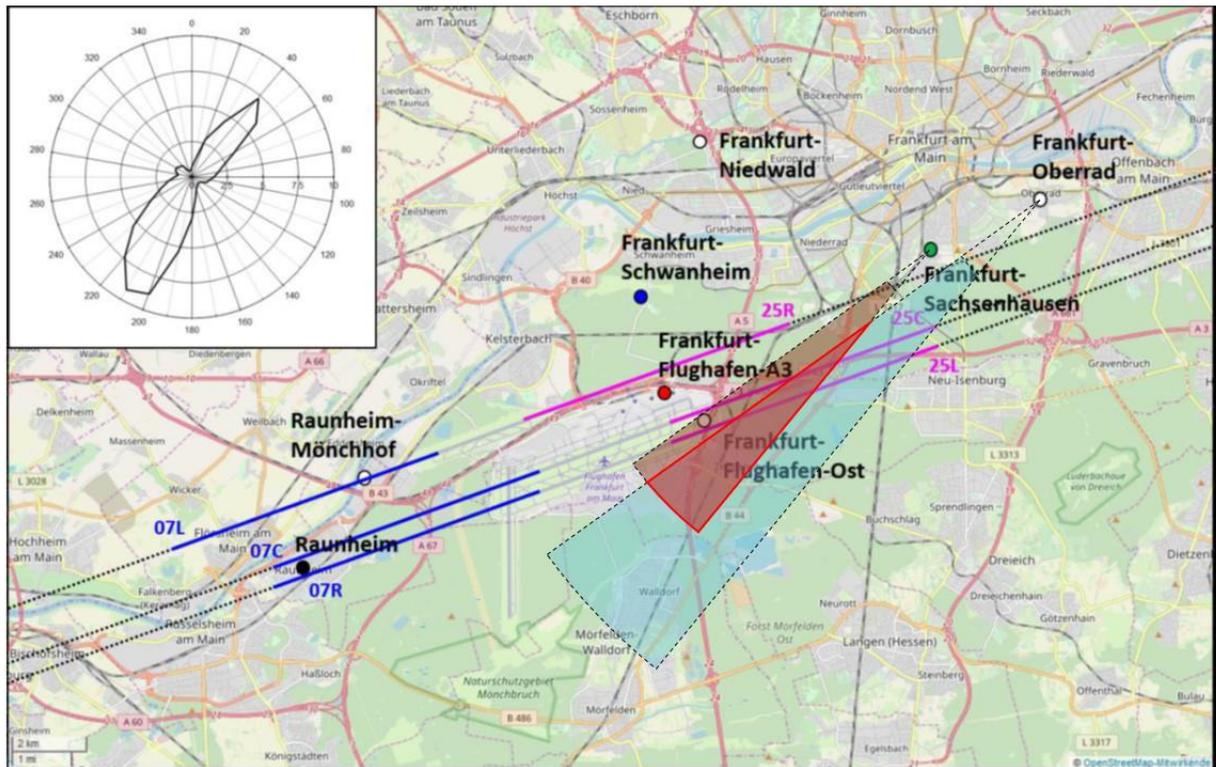


Abb. 3.11: Wahrscheinliche Emissionsbereiche für die Messstationen Sachsenhausen (dunkelroter Bereich) und Oberrad (hellblauer Bereich) bei Wind aus dem Flughafensektor. Die Emissionsbereiche der Messstationen überschneiden sich und bilden einen gemeinsamen Bereich (roter Bereich). (© OpenStreetMap-Mitwirkende; Rose und Jacobi 2019)

Tab. 3.7: Berechnete maximale Flughöhen der landenden Flugzeuge des Parallelbahnsystems bei unterschiedlichen Anflugwinkeln innerhalb des in Abb. 3.11 ermittelten roten Bereichs, getrennt nach Centerbahn und Südbahn

Anflugroute	Anflugwinkel	max. Entfernung zum Aufsetzpunkt	max. Flughöhe
Centerbahn (25C)	3,0°	4700 m	~240 m
	3,2°		~270 m
Südbahn (25L)	3,0°	3900 m	~200 m
	3,2°		~220 m

3.4 Einfluss: Starts

Insgesamt wurden für den Einfluss von Starts 14.201 10-min-Mittelwerte berücksichtigt. Diese wurden wie in Abschnitt 2.3 beschrieben den vier Windsektoren für Starts zugeordnet. Abb. 3.12 zeigt für jeden Windsektor die Gesamtanzahl an 10-min-Mittelwerten der Tages- (5:00 – 23:00 Uhr) und Nachtzeiten (23:00 – 5:00 Uhr). Die Mittelwertanzahl stellt die Datengrundlage für die Tagesgänge der vier Windsektoren dar.

Die Tageszeiträume der Windsektoren „Südost“ und „Flughafen“ bestehen aus weniger als 1080 Mittelwerten (Mindestanzahl für Analyse, siehe Abschnitt 2.3.3). Eine Analyse dieser beiden Windsektoren entfällt daher. Der Nordostsektor hat mit insgesamt 6.874 berücksichtigten Mittelwerten die höchste Datenmenge, was verglichen mit der Häufigkeitsverteilung der Windrichtung in Abschnitt 3.1.2 und gekoppelt mit der Tatsache, dass bei nordöstlichen Windrichtungen die Betriebsrichtung auf Ost eingestellt ist, auch zu erwarten ist.

Da im Tageszeitraum nur Mittelwerte bei Betriebsrichtung Ost berücksichtigt werden, liegen hier verglichen mit den Mittelwertanzahlen der Windsektoren für Landungen deutlich weniger Mittelwerte vor.

In Abb. 3.13 sind die Tagesgänge der UFP-Konzentrationen von den Messstationen Sachsenhausen und Oberrad in Kombination mit der durchschnittlichen Startanzahl pro 10 Minuten bei BR07 für die Windsektoren Nordost und Nordwest dargestellt. Es wurde eine einheitliche Skalierung für alle Plots gewählt, um einen direkten Vergleich der einzelnen Tagesgänge zu ermöglichen. In Tab. 3.8 sind die zugehörigen statistischen Größen aufgelistet.

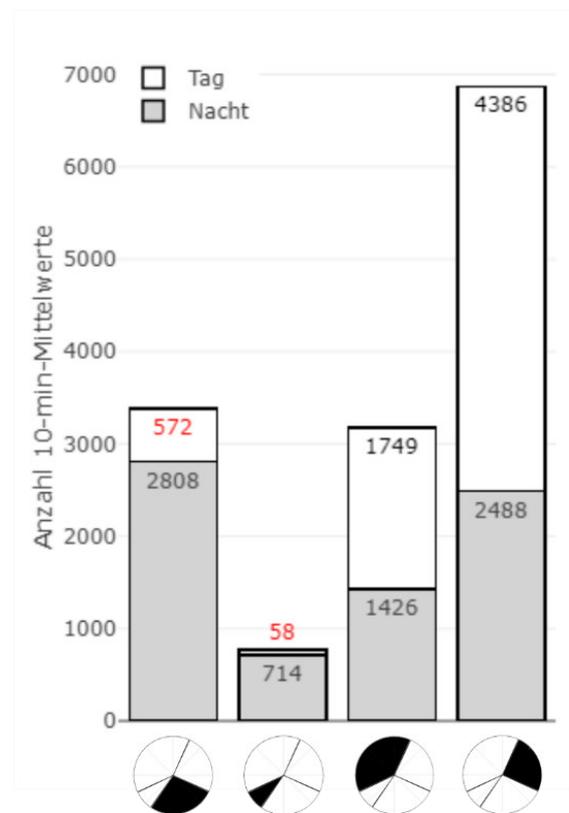


Abb. 3.12: Anzahl der berücksichtigten 10-min-Mittelwerte jedes Windsektors (Starts), getrennt nach Tag und Nacht. Rote Zahlen: Zu geringe Anzahl für Analyse

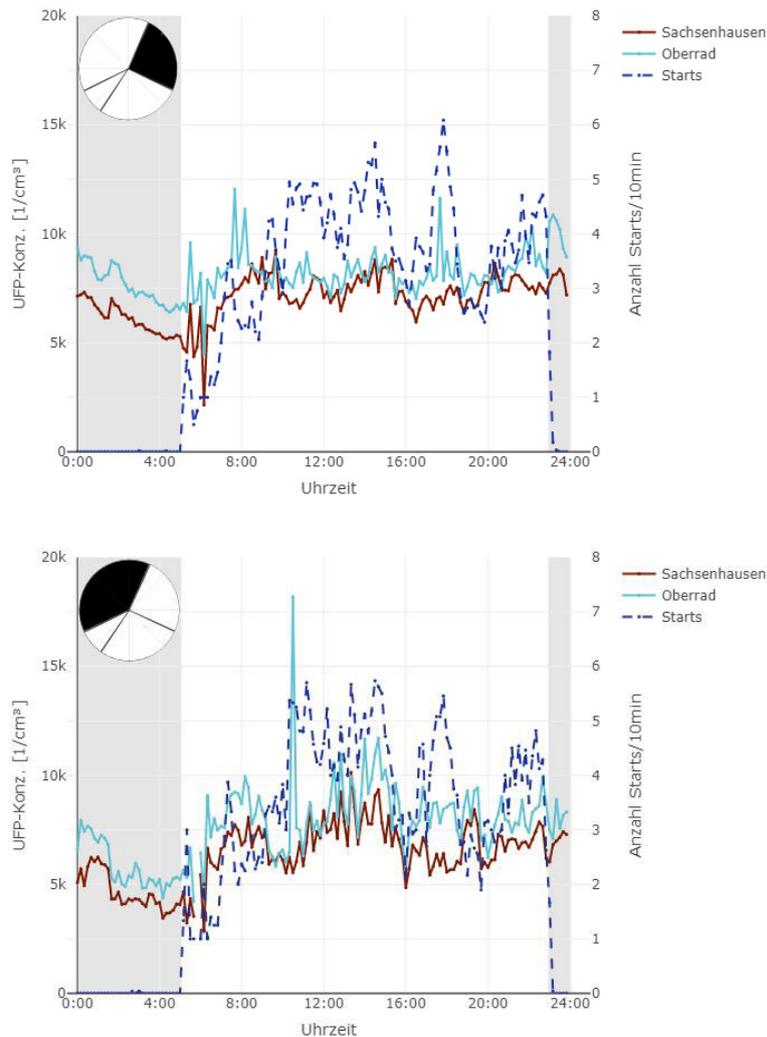


Abb. 3.13: Tagesgänge der UFP-Konzentrationen in Sachsenhausen und Oberrad (linke y-Achse) und der Startanzahl pro 10 Minuten (rechte y-Achse) für die Windsektoren (Starts) Nordost (oben) und Nordwest (unten). Der Windsektor ist in jedem Plot oben links dargestellt. Der hell hinterlegte Bereich entspricht den Betriebszeiten des Frankfurter Flughafens (5:00 Uhr – 23:00 Uhr), der grau hinterlegte Bereich entspricht den Zeiten des Nachtflugverbots (23:00 Uhr – 5:00 Uhr).

Tab. 3.8: Statistische Größen der in Abb. 3.13 gezeigten UFP-Konzentrationsverläufe von Sachsenhausen und Oberrad für die Windsektoren (Starts) Nordost und Nordwest, getrennt nach Tag und Nacht. Als Datengrundlage wurden die gemittelten 10-min-Mittelwerte der einzelnen Tagesgänge gewählt.

Messtation	Windsektor	Zeitraum	Mittelwert [P/cm ³]	Median [P/cm ³]	St.abw. [P/cm ³]	Maximum [P/cm ³]	Minimum [P/cm ³]
Sachsenh.	Nordost	Tag	7.236	7.343	989	9.256	2.152
		Nacht	6.376	6.223	931	8.378	5.174
	Nordwest	Tag	6.783	6.806	1.182	10.138	2.846
		Nacht	5.008	4.432	1.168	7.419	3.450
Oberrad	Nordost	Tag	8.214	8.096	969	12.052	4.517
		Nacht	8.000	7.894	1.182	10.863	6.403
	Nordwest	Tag	8.200	7.976	1.670	18.194	4.212
		Nacht	6.142	5.498	1.255	8.897	4.370

Vergleich der Nachtkonzentrationen

Bei beiden Windsektoren beginnt die Nacht, bedingt durch das höhere Grundniveau zu Tageszeiten, mit Konzentrationen im Bereich von ca. 8.000 – 10.000 P/cm³ in Oberrad und ca. 7.500 P/cm³ in Sachsenhausen. Im weiteren Verlauf der Nacht sinkt die UFP-Konzentration bei beiden Messstandorten kontinuierlich um bis zu 3.000 P/cm³ ab. In Oberrad werden stets höhere Konzentrationen gemessen als in Sachsenhausen. Die mittlere Konzentration ist an beiden Messstandorten beim Nordostsektor mehr als 1.300 P/cm³ höher als beim Nordwestsektor. In Oberrad liegen verglichen mit Sachsenhausen höhere mittlere Konzentrationen vor.

Vergleich der Tageskonzentrationen

Die Kurvenverläufe der Konzentrationen sind bei beiden Windsektoren recht ähnlich. Ab ca. 6:00 Uhr steigt die Konzentration kontinuierlich bis ca. 8:00 Uhr an und verweilt mit kleineren Schwankungen den Rest des Tages auf diesem Niveau. Die Konzentration in Oberrad ist bei beiden Windsektoren überwiegend höher als die in Sachsenhausen. Beim Nordwestsektor fällt der Konzentrationspeak um 10:30 Uhr mit ca. 18.000 P/cm³ auf. Die mittleren Tageskonzentrationen sind im Vergleich zu den Nachtkonzentrationen nur leicht erhöht. Der Nordostsektor unterliegt geringeren Schwankungen als der Nordwestsektor. In Oberrad liegen bei beiden Sektoren annähernd identische mittlere Konzentrationen vor. Beim Nordwestsektor liegt um 5:50 Uhr eine Datenlücke aufgrund zu weniger 10-min-Mittelwerte vor.

Vergleich mit Starts

Der Kurvenverlauf der durchschnittlichen Anzahl an Starts pro 10 Minuten ist bei beiden Windsektoren annähernd identisch und passt auch zu der durchschnittlichen Startfrequenz, die in Abschnitt 3.1.3 gezeigt wurde.

Werden die Startfrequenzen mit den UFP-Konzentrationsverläufen der beiden Windsektoren rein visuell verglichen, fällt kein ähnlicher Verlauf der Kurven auf. Die Kreuzkorrelationen zwischen Sachsenhausen/Oberrad, Sachsenhausen/Starts und Oberrad/Starts mit den zugehörigen Zeitverschiebungen wurden für beide Windsektoren berechnet. Bei einer positiven Zeitverschiebung wird die zweite Funktion/Kurve um den angegebenen Wert in positive x-Richtung (nach rechts) verschoben, bei negativer Zeitverschiebung in negative x-Richtung (nach links). Tab. 3.9 enthält den jeweils maximalen Korrelationskoeffizienten mit zugehöriger Zeitverschiebung für beide Windsektoren.

Tab. 3.9: Maximale Kreuzkorrelationskoeffizienten mit zugehöriger zeitlicher Verschiebung für die Windsektoren (Starts) Nordost und Nordwest.

Windsektor	Oberrad/Sachsenhausen		Sachsenhausen/Starts		Oberrad/Starts	
	$R_{\max}(\tau)$	τ [min]	$R_{\max}(\tau)$	τ [min]	$R_{\max}(\tau)$	τ [min]
Nordost	0,6361	+0	0,6000	+50	0,3384	+50
Nordwest	0,7478	+0	0,7044	+70	0,5982	+10

Die berechnete Korrelation des Nordwestsektors für Sachsenhausen/Starts stellt mit ca. 0,7 bei einer Zeitverschiebung von ca. 70 Minuten die höchste Korrelation zwischen UFP-Konzentration und Startfrequenz dar und deutet auf einen mittelstarken linearen Zusammenhang hin. Im Nordostsektor verläuft die Abflugroute 07-N (lang) am dichtesten an der Messstation Oberrad entlang. Bei einem Einfluss dieser Abflugroute auf die UFP-Konzentration in Oberrad wäre hier eine hohe Korrelation zu erwarten. Hier liegt mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,34 die geringste Korrelation beider Windsektoren vor und weist auf einen schwachen linearen Zusammenhang hin. Jedoch ist zu beachten, dass immer die Summe aller Starts betrachtet wird und nicht nur die auf der Abflugroute 07-N (lang).

Die Ergebnisse der Windsektorenanalyse von Starts haben für keinen Windsektor einen statistisch starken Zusammenhang zwischen der Startfrequenz und der UFP-Konzentration an beiden Messstandorten zeigen können. Für zwei der vier Windsektoren war die Datengrundlage zu gering, als dass diese Sektoren sinnvoll ausgewertet werden konnten. Eine größere Datengrundlage könnte dabei helfen, diese Sektoren ebenfalls zu betrachten und die Statistik der anderen Sektoren zu verbessern. Ob und inwiefern einzelne Abflugrouten einen Effekt auf die Bodenkonzentration ausüben, kann mit der hier vorliegenden Datengrundlage nicht geklärt werden. Hierfür bedarf es an weiteren Untersuchungen und genauen Informationen darüber, welche Abflugroute die gestarteten Flugzeuge nutzen.

3.5 UFP-Konzentrationsverläufe auf Sekundenbasis

Im Folgenden werden Ausschnitte einzelner Tage in einem Subplot gezeigt. Die Auswahl der Tage wurde gezielt nach bestimmten Fragestellungen oder besonderen Vorkommnissen vorgenommen.

3.5.1 Vergleich: Morgendlicher Anstieg / Frühster Aufsetzpunkt

Der unterschiedliche Verlauf der UFP-Konzentrationen zwischen 5 Uhr und 6 Uhr morgens soll anhand von acht Beispieltagen gezeigt werden. Diese Tage können auf Gemeinsamkeiten und/oder Unterschiede hin analysiert werden, um einzelne Bedingungen festzustellen, die einen bestimmten Konzentrationsverlauf begünstigen. Es werden nur Zeitabschnitte gewählt, zu denen die Betriebsrichtung des Flughafens auf West eingestellt ist. Das Ergebnis ist in Abb. 3.14 dargestellt. Es wurde eine einheitliche Skalierung für fast alle Plots gewählt, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Lediglich der Plot vom 29.04.19 hat bei der UFP-Konzentration eine andere Skalierung, da hier vergleichsweise sehr hohe Konzentrationsspitzen im betrachteten Zeitraum vorliegen.

An vier der acht gezeigten Beispieltage (26.04.19, 30.09.19, 25.12.19, 31.01.20) ist ein kontinuierlicher Anstieg der UFP-Konzentration bei beiden Messstationen innerhalb der ersten Betriebsstunde des Frankfurter Flughafens zu beobachten, wobei der Verlauf des Anstiegs an jedem Tag unterschiedlich ist. Der Wind weht bei diesen Beispieltagen konstant aus südwestlichen Richtungen, zum Teil aus Richtung Flughafensektor, bei Windgeschwindigkeiten größer als 1 m/s. Am 26.04.19 und 31.01.20 steigen die UFP-Konzentrationen kurz nachdem der Wind in den Flughafensektor gedreht ist an. Am 30.09.19 weht der Wind ab 4:30 Uhr konstant aus Richtung des Flughafensektors, ein Konzentrationsanstieg findet allerdings erst nach den ersten Landungen statt. Am 25.12.19 verläuft die Windrichtung an der südlichen Grenze des Flughafensektors. Der Konzentrationsanstieg in Oberrad ist hier etwas schwächer ausgeprägt.

An drei anderen Beispieltagen (24.05.19, 10.06.19, 13.09.19) verweilen die UFP-Konzentrationen annähernd auf dem Nachtkonzentrationsniveau. Am 24.05.19 liegt Nordost- bis Ostwind bei niedrigen Windgeschwindigkeiten vor. Die Flugzeuge landen hier folglich bei leichtem Rückenwind. Am 10.06.19 weht der Wind aus südlichen Richtungen bei Windgeschwindigkeiten größer als 1 m/s. Am 13.09.19 liegen sehr niedrige Windgeschwindigkeiten von teilweise unter 1 m/s vor, was zu größeren Schwankungen der erfassten Windrichtung führt.

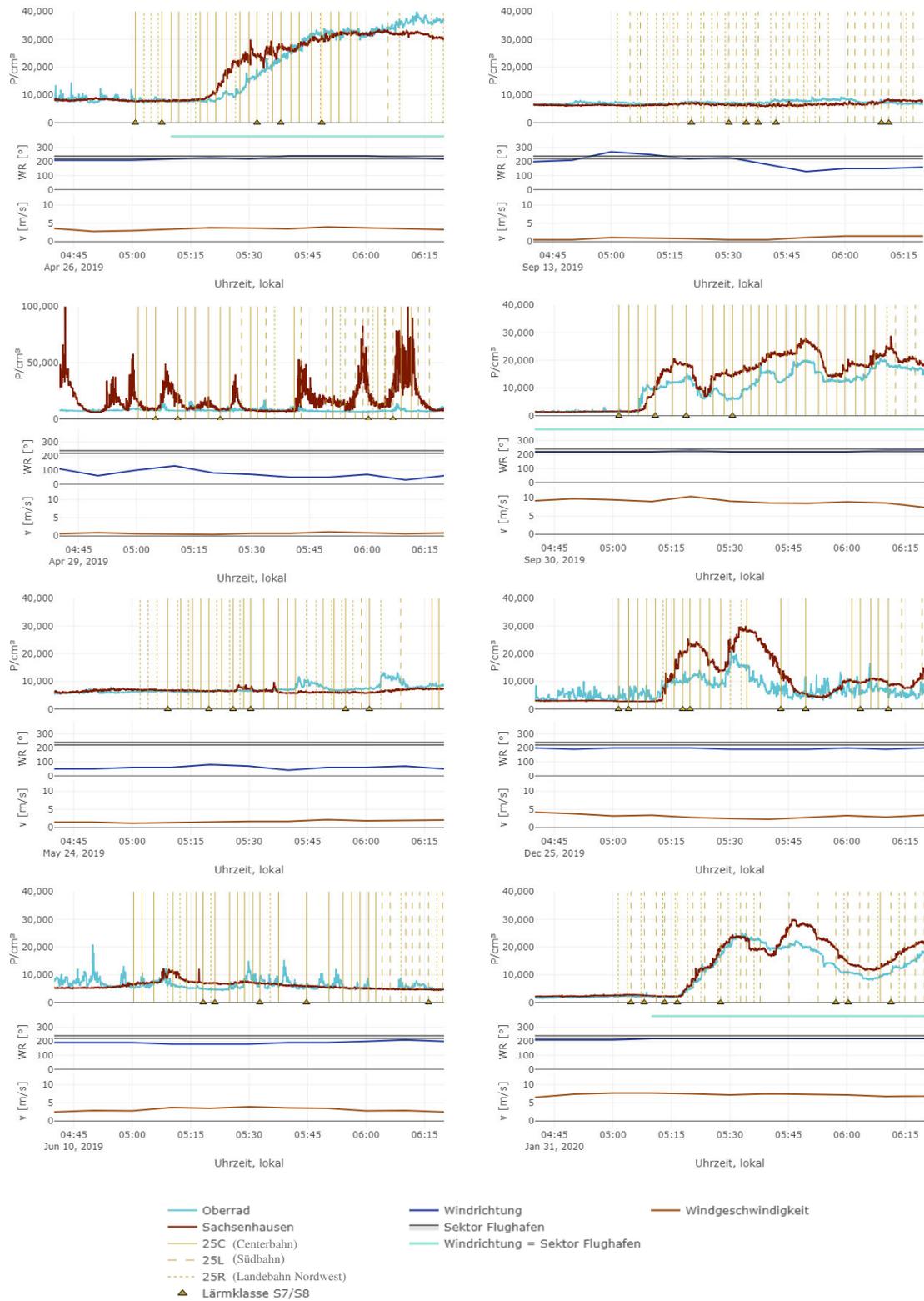


Abb. 3.14: Morgendlicher UFP-Konzentrationsverlauf von acht ausgewählten Tagen. In jedem Subplot werden die UFP-Konzentrationen der Messstationen Sachsenhausen und Oberrad, die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit mit jeweils eigener y-Achse untereinander gegen die Zeit aufgetragen dargestellt. Die Aufsetzzeitpunkte der Landungen auf den jeweiligen Landebahnen werden durch senkrechte Linien bei den UFP-Konzentrationen markiert. Der Flughafensektor ist als Bereich bei der Windrichtung dargestellt. Liegt die Windrichtung innerhalb dieses Bereichs und beträgt die Windgeschwindigkeit währenddessen mindestens 1 m/s, wird das zwischen dem Konzentrationsplot und dem Windrichtungsplot markiert (türkisfarbene Linie).

Am 29.04.19 liegen in Sachsenhausen mehrere kurzzeitige Konzentrationsspitzen mit Konzentrationen bis zu 100.000 P/cm³ vor. Diese treten sowohl vor als auch nach 5:00 Uhr auf. Die erste Landung auf der Landebahn Nordwest findet zwischen 5:30 Uhr und 5:45 Uhr statt. Die Konzentrationsspitzen vor 5:30 Uhr sind also definitiv nicht durch die direkten Überflüge bedingt. Die Windgeschwindigkeit liegt unterhalb von 1 m/s, was zu größeren Schwankungen der erfassten Windrichtung führt.

Landungen finden an allen gezeigten Tagen ab 5:00 Uhr statt. Die Abstände zwischen einzelnen Landungen auf derselben Anflugroute betragen mindestens ca. 2 Minuten. An allen gezeigten Tagen finden im Zeitraum von 5:00 Uhr bis 6:00 Uhr Landungen auf der Landebahn Nordwest (25R) und auf einer der Bahnen des Parallelbahnsystems (25C oder 25L) statt, abgesehen vom 31.09.19, hier wird in diesem Zeitraum nur auf der Centerbahn gelandet. Am 25.12.19 und 31.01.20 liegen kurze Zeitabschnitte von ca. 10 – 20 Minuten vor, innerhalb derer keine Landungen stattfinden.

Aus den gezeigten Beispieltagen in Abb. 3.14 können im Zusammenhang mit dem morgendlichen Anstieg zwischen 5:00 Uhr und 6:00 Uhr folgende Vermutungen abgeleitet werden:

- Sobald der Wind bei Windgeschwindigkeiten größer als 1 m/s in den Flughafensektor dreht, ist nach einer variierenden Zeitverzögerung ein kontinuierlicher Anstieg der UFP-Konzentration bei beiden Messstationen zu beobachten; diese Konzentrationsanstiege sind durch den Flugbetrieb bedingt, können aber keinen einzelnen Landeereignissen zugeordnet werden; möglicherweise resultieren sie aus der Summe der Landungen und/oder der Flugzeugabfertigung auf dem Flughafengelände
- Kurzzeitige Konzentrationsspitzen treten vereinzelt auf; eine grobe Zuordnung zu einzelnen direkten Überflügen wäre im Einzelfall zwar möglich, jedoch können die Konzentrationsspitzen auch durch andere lokalere Quellen hervorgerufen werden
- Flugzeuge, die bei BR25 mit Rückenwind landen, haben keinen messbaren Effekt auf die UFP-Konzentration am Boden
- Bei Windgeschwindigkeiten kleiner 1 m/s hat der Flugbetrieb keinen messbaren Effekt auf die UFP-Konzentration
- Flugpausen haben möglicherweise einen abschwächenden Effekt auf die UFP-Konzentration

Der Einfluss des Flughafensektors auf die UFP-Konzentration soll anhand weiterer Situationen auch für andere Tageszeiten empirisch überprüft werden. Des Weiteren sollen weitere

Situationen mit kurzzeitig auftretenden Konzentrationsspitzen auf mögliche Zusammenhänge mit Überflügen überprüft werden.

3.5.2 Einfluss: Wind aus Sektor Flughafen

Es wird anhand von weiteren Tagessituationen der Einfluss von Wind aus Richtung des Flughafensektors überprüft, um die o.g. Schlussfolgerung für andere Tageszeiten empirisch zu bestätigen oder zu widerlegen. Die Ergebnisse weiterer Tagessituationen sind in Abb. 3.15 dargestellt. Bei den gezeigten Tagesabschnitten geht es primär um den Einfluss von den Windverhältnissen auf die UFP-Konzentrationsverläufe. Aufgrund der dadurch bedingten Auflösung sind in manchen Darstellungen die einzelnen Landeereignisse nicht mehr deutlich erkennbar.

Bei den gezeigten Tagessituationen ist in einigen Fällen auch in späteren Tageszeiträumen ein Anstieg bzw. Abstieg der UFP-Konzentration, sobald der Wind aus Richtung des Flughafensektors weht bzw. aus dem Flughafensektor herausdreht, zu beobachten (27.05.19, 31.05.19, 11.06.19., 15.06.19). Zum Teil liegen auch starke Konzentrationsanstiege bei etwas südlicheren Windrichtungen (ca. 190° - 220°) vor (03.10.19, 04.01.20). Die zeitliche Verschiebung zwischen Wind aus Richtung Flughafensektor und starkem Konzentrationsanstieg ist sehr variabel und reicht von wenigen Minuten bis zu 30 bis 40 Minuten. Es liegen einige Zeitabschnitte vor, innerhalb derer die Konzentration bei anhaltendem Wind aus Richtung Flughafensektor stark absinkt (15.06.19, 03.10.19). Dreht der Wind in Richtung Norden aus dem Flughafensektor heraus, ist dies häufig mit einem starken Rückgang der Konzentration verbunden (11.06.19, 15.06.19, 03.10.19, 04.01.20). Schwankt die Windrichtung um die Grenzen des Flughafensektors, weisen die Konzentrationen häufig eine hohe Varianz auf, wie z.B. am 14.08.2019. Am 23.09.2019 ist trotz mäßigem Wind aus dem Flughafensektor erst nach ca. 2 Stunden ein Konzentrationsanstieg zu beobachten. Manche Tageszeiträume zeigen Phasen mit höherer Landungsdichte, denen in manchen Fällen starke Konzentrationsanstiege folgen (03.10.19, 04.01.20).

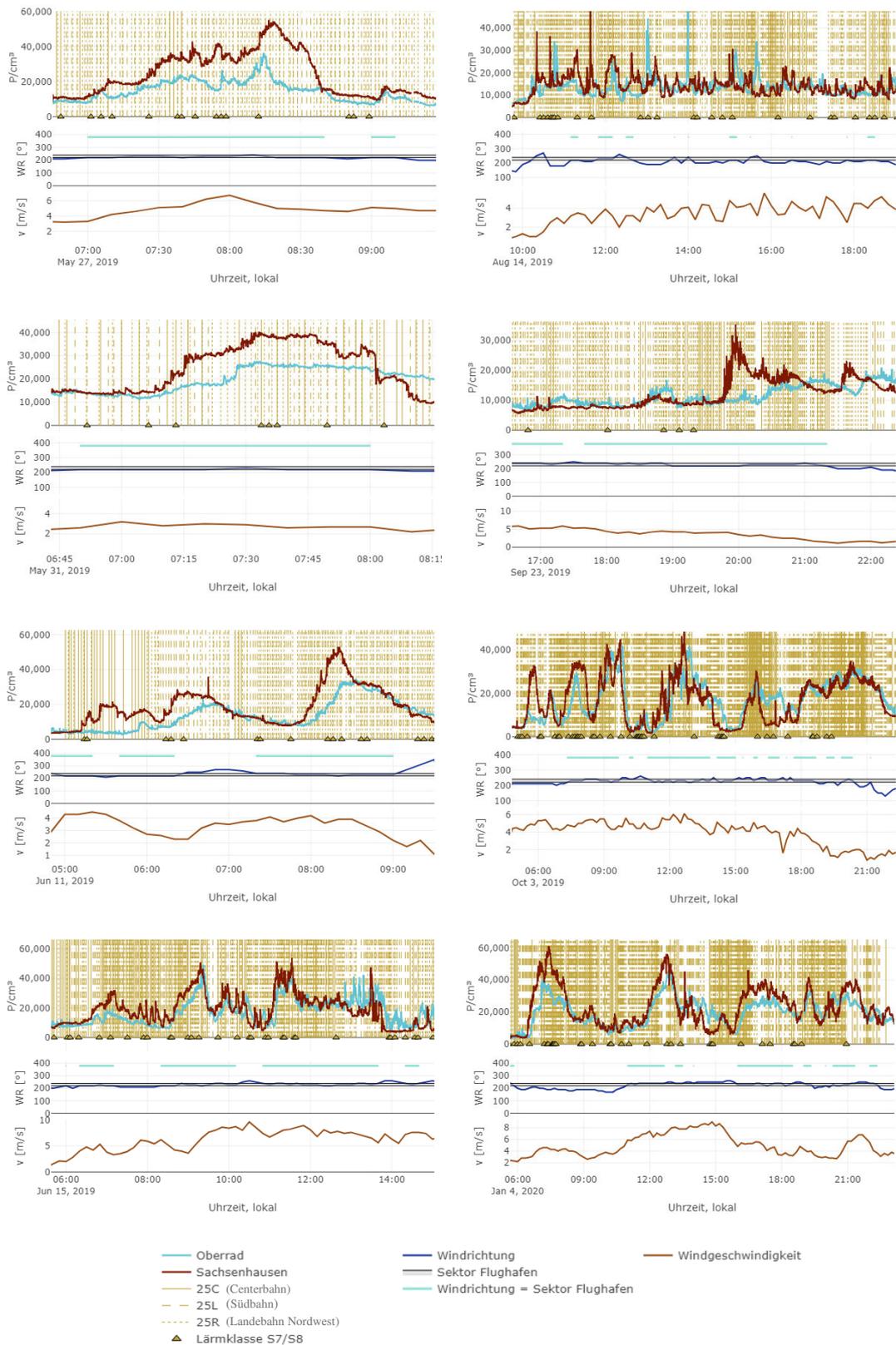


Abb. 3.15: Tagesabschnitte, häufig Wind aus Flughafensektor. In jedem Subplot werden die UFP-Konzentrationen der Messstationen Sachsenhausen und Oberrad, die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit mit jeweils eigener y-Achse untereinander gegen die Zeit aufgetragen dargestellt. Die Aufsetzzeitpunkte der Landungen auf den jeweiligen Landebahnen werden durch senkrechte Linien bei den UFP-Konzentrationen markiert. Der Flughafensektor ist als Bereich bei der Windrichtung dargestellt. Liegt die Windrichtung innerhalb dieses Bereichs und beträgt die Windgeschwindigkeit währenddessen mindestens 1 m/s, wird das zwischen dem Konzentrationsplot und dem Windrichtungsplot markiert (türkisfarbene Linie).

3.5.3 Einfluss: Überflüge

Es wurden weitere Tagesabschnitte ausgewählt, bei denen mindestens eine der beiden Messstationen mehrere kurzzeitige Konzentrationsspitzen aufweist, um mögliche Zusammenhänge mit einzelnen direkten Überflügen zu überprüfen. Die Tagesabschnitte sind in Abb. 3.16 dargestellt. Nach Sichtung der Daten konnte festgestellt werden, dass kurzzeitige Konzentrationsspitzen:

- sehr unregelmäßig auftreten
- in ihrer Konzentrationshöhe stark variieren (von ca. 20.000 P/cm³ bis über 1 Mio P/cm³)
- in ihrer Auftrittshäufigkeit von Tag zu Tag stark variieren (grob: von weniger als 10 bis mehr als 20 pro Messtation)
- in Oberrad deutlich häufiger vorkommen als in Sachsenhausen

Bei den gezeigten Tagesabschnitten treten sowohl in Sachsenhausen als auch in Oberrad kurzzeitige Konzentrationsspitzen auf.

Am 10.05.19 liegen zwischen 7:20 Uhr und 7:30 Uhr viele kurzzeitige Konzentrationspeaks teilweise über 200.000 P/cm³ am Standort Sachsenhausen vor. Innerhalb dieses Zeitfensters sind zwei direkte Überflüge vorhanden. Zwei weitere direkte Überflüge sind kurz vor dem genannten Zeitfenster vorhanden. Die UFP-Konzentration ist vor und nach dem genannten Zeitfenster konstant auf einem niedrigen Niveau. Die genannten Überflüge könnten zeitlich plausibel einzelnen Konzentrationsspitzen zugeordnet werden. Die vielen eng aufeinander folgenden Konzentrationsspitzen in einem Zeitfenster von ca. zehn Minuten deuten jedoch eher auf eine zeitlich begrenzte lokalere UFP-Quelle hin. In Oberrad liegen im selben Zeitraum keine kurzzeitigen Konzentrationsspitzen vor. Am 06.06.19 liegen an beiden Standorten kurzzeitige Konzentrationsspitzen vor. Den ersten zwei Maxima in Oberrad stehen jeweils mehrere direkte Überflüge voran. Innerhalb des Zeitfensters 13:30 Uhr bis ca. 13:45 Uhr liegen mehrere Konzentrationsspitzen zwischen 50.000 und 100.000 P/cm³ in Sachsenhausen vor. Direkte Überflüge sind in diesem Zeitfenster nicht vorhanden. Am 14.06.19 liegen zwischen 13:00 Uhr und 13:10 Uhr Konzentrationsspitzen mit knapp 500.000 P/cm³ in Oberrad vor. Kurz vor dem genannten Zeitfenster liegen drei direkte Überflüge vor. Innerhalb des genannten Zeitfensters liegen zwei direkte Überflüge vor. In Sachsenhausen liegen im selben Zeitraum keine kurzzeitigen Konzentrationsspitzen vor. In den gezeigten Situationen liegen teilweise nach einem direkten Überflugereignis in einem plausiblen zeitlichen Abstand kurzzeitige Konzentrationsspitzen bei einer Messstation vor. Dies ist jedoch eher selten zu beobachten. Häufig verweilt die UFP-Konzentration nach einem direkten Überflug auf einem niedrigen Niveau.

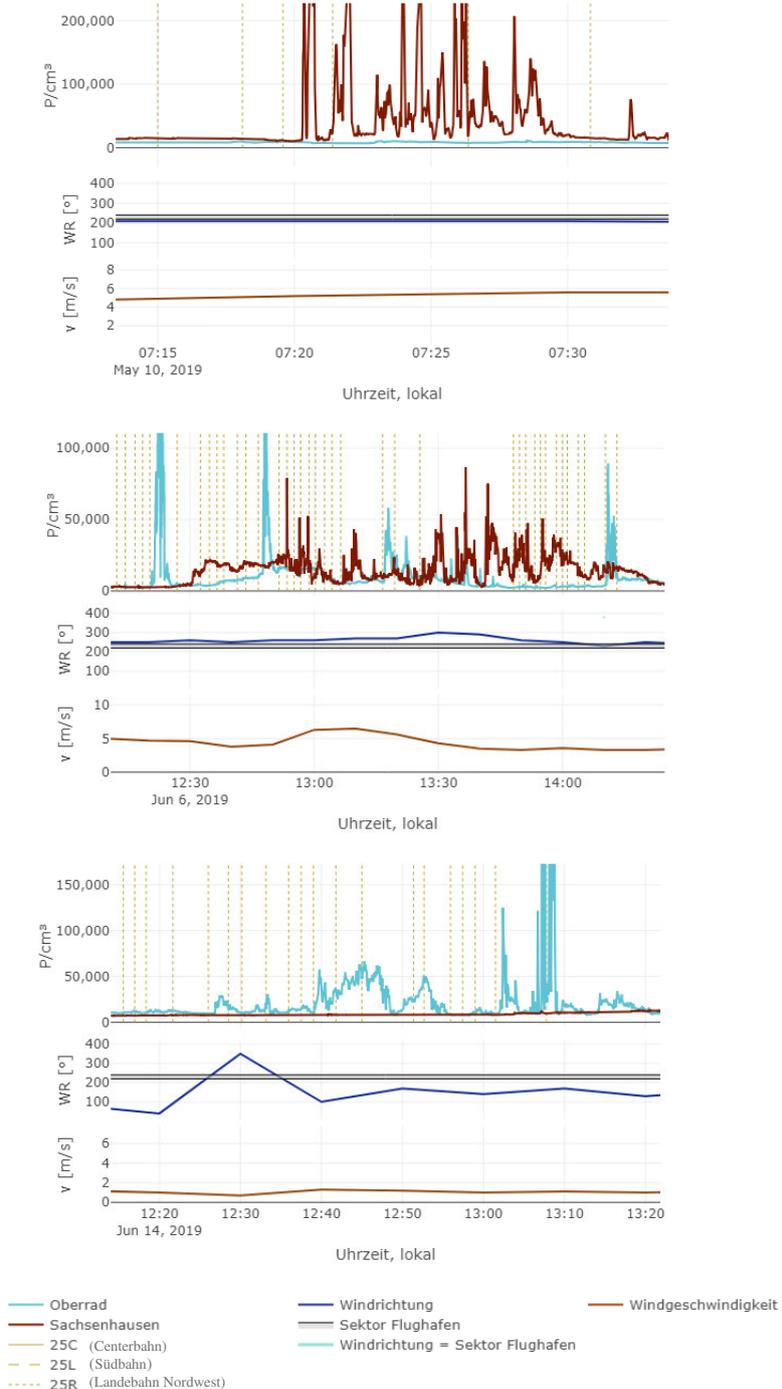


Abb. 3.16: Tagesabschnitte mit kurzzeitigen Konzentrationsspitzen an mindestens einem der beiden Standorte. In jedem Subplot werden die UFP-Konzentrationen der Messstationen Sachsenhausen und Oberrad, die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit mit jeweils eigener y-Achse untereinander gegen die Zeit aufgetragen dargestellt. Die Aufsetzzeitpunkte der Landungen auf der Landebahn Nordwest werden durch senkrechte Linien bei den UFP-Konzentrationen markiert. Die Aufsetzzeitpunkte der anderen Landebahnen sind ausgeblendet. Der Flughafensektor ist als Bereich bei der Windrichtung dargestellt.

4 Diskussion und Schlussfolgerung

Ziel dieser Arbeit ist es zu überprüfen, ob Überflüge einen Einfluss auf die UFP-Konzentrationen am Boden in Sachsenhausen und Oberrad haben. Hierzu wurden UFP-Messdaten, Winddaten und Flugdaten im Zeitraum vom 25.04.19 bis 31.01.20 zusammengeführt und ausgewertet. Die gezeigten Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt zunächst allgemein diskutiert, um dann auf die in der Zielsetzung definierten Fragestellungen einzugehen und diese anhand der gewonnenen Erkenntnisse umfassend zu beantworten.

4.1 Allgemeine UFP-Belastung in Sachsenhausen und Oberrad

Die Ergebnisse der Häufigkeitsverteilung, Tagesmittelwerte und Wochengänge der Messstationen Sachsenhausen und Oberrad sowie die Ergebnisse der Windeinflüsse haben gezeigt, dass an beiden Standorten im Mittel ähnliche UFP-Konzentrationen, Konzentrationsverläufe und Windabhängigkeiten der Konzentrationen vorliegen.

Die mittlere nächtliche UFP-Konzentration ist in Oberrad im Vergleich zu Sachsenhausen leicht erhöht, was möglicherweise auf die lokalen Gegebenheiten zurückzuführen ist. Die Nähe zum Oberrader Ortskern und die Gebäudeheizungen der direkt angrenzenden Wohnhäuser könnten die leicht erhöhten UFP-Konzentrationen in der Nacht am Standort Oberrad gegenüber dem Standort Sachsenhausen erklären. Die Ergebnisse der Windeinflüsse zeigen zudem erhöhte Nachtkonzentrationen in Oberrad bei Ostwind, was durch die in ca. 1,3 km entfernte Autobahn A661 zu erklären sein könnte. Dieser Effekt ist auch bei Sachsenhausen sichtbar, jedoch in deutlich abgeschwächter Form, was auf die höhere Distanz zur Autobahn zurückzuführen sein könnte.

Am Tag liegen im Mittel an beiden Standorten deutlich höhere UFP-Konzentrationen als in der Nacht vor. Die durchschnittlichen Tagesgänge der UFP-Konzentration beider Messstationen sind zueinander sehr ähnlich. In Bezug auf ihre Verlaufsstruktur unterscheiden sie sich jedoch von anderen verkehrsbezogenen Schadstoffen, die zu Berufsverkehrszeiten häufig ein Konzentrationsmaximum aufweisen. Die UFP-Konzentration zeigt auch in den Mittagsstunden mehrere Konzentrationsspitzen und steigt bereits ab 5:00 Uhr morgens an und geht erst zwischen 22:00 Uhr und 23:00 Uhr zurück. Zwar stoßen Kraftfahrzeuge durch ihre Verbrennungsmotoren eine nicht unerhebliche Menge an UFP aus, doch beide Messstandorte sind eher ruhig

gelegen und von stark befahrenen Straßen weiter entfernt. Die Anstiegs- und Abstiegszeiten der UFP-Konzentration um 5:00 Uhr bzw. um 23:00 Uhr stimmen eher mit den Betriebszeiten des Frankfurter Flughafens überein. Flugbewegungen finden zudem konstant über den ganzen Tag verteilt statt, was auch die hohen Konzentrationsspitzen am Tag erklären würde.

Die Ergebnisse der Windabhängigkeit zeigen, dass tagsüber vor allem bei Wind aus Richtung Südwesten sehr hohe Konzentrationen im Mittel bei beiden Standorten gemessen werden. Der scharf abgegrenzte Bereich hoher Konzentrationen bei südwestlichen Windrichtungen ist bei beiden Messstationen in Form und Größe nahezu deckungsgleich, was darauf hindeutet, dass die Ursache hierfür in derselben UFP-Quelle liegt. In Sachsenhausen ist die mittlere Konzentration innerhalb dieses Bereichs im Vergleich zu der mittleren Konzentration in Oberrad deutlich erhöht. Dies lässt darauf schließen, dass die Entfernung der verursachenden UFP-Quelle zu Sachsenhausen geringer ist als die zu Oberrad, da durch längere Transportwege die horizontale und vertikale Verteilung der Partikel zunimmt und folglich weniger Partikel gemessen werden (Foken, 2006; Seinfeld & Pandis, 2006). Bei geringen Windgeschwindigkeiten liegen eher geringere Konzentrationen vor. Dies deutet auf eine entferntere Quelle hin, da der Effekt von lokalen Quellen mit abnehmender Windgeschwindigkeit tendenziell zunimmt (Foken, 2006; Seinfeld & Pandis, 2006). Ein Teil des hohen Konzentrationsbereichs in südwestlicher Richtung liegt in Richtung des Flughafengeländes, der andere südlich des Flughafengeländes. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass ein Teil der hohen Konzentrationen vom Flughafengelände und ein Teil von den landenden Flugzeugen bei niedriger Flughöhe stammen.

Diese Erkenntnisse deuten darauf hin, dass das Flughafengelände inklusive der Anflugkorridore am Tag bei südwestlichen Windrichtungen als dominierende UFP-Quelle für beide Standorte fungiert.

4.2 Einfluss von Überflügen

Um den Einfluss von gestarteten und landenden Flugzeugen auf die UFP-Konzentration in Sachsenhausen und Oberrad bei verschiedenen Windrichtungen untersuchen zu können, wurden die Windrichtungen in Sektoren eingeteilt. Es wurden die Tagesgänge der UFP-Konzentrationen mit den Tagesgängen der Starts bzw. Landungen verglichen, um eine mögliche Abhängigkeit untereinander feststellen zu können.

4.2.1 Landungen

Bei der Windsektorenanalyse der Landungen konnte beim Flughafensektor ($220 - 240^\circ$) ein deutlicher positiver Zusammenhang zwischen UFP-Konzentration und Landefrequenz gezeigt werden. Die UFP-Konzentration steigt bei diesem Windsektor bei beiden Messstationen innerhalb der ersten beiden Betriebsstunden des Frankfurter Flughafens um ca. 10.000 P/cm^3 an, wohingegen bei allen anderen Windsektoren die Konzentrationen kaum bzw. um maximal 3.000 P/cm^3 ansteigen. Bei diesem Windsektor ist die mittlere UFP-Konzentration am Tag mit mehr als 17.000 P/cm^3 in Sachsenhausen und ca. 15.000 P/cm^3 in Oberrad gegenüber dem Gesamtdurchschnitt von ca. 10.000 P/cm^3 deutlich erhöht. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sich eine starke UFP-Quelle südwestlich ($220 - 240^\circ$) der Messstationen befindet, die für einen erhöhten Eintrag an UFP bei Windrichtungen aus dem Flughafensektor sorgt.

Die Verläufe der UFP-Konzentrationen und der Landungen weisen beim Flughafensektor eine ähnliche Charakteristik auf: Die Landungsanzahl pro 10 Minuten weist vier Maxima um 8:00 Uhr, 12:00 Uhr, 16:00 Uhr und 20:00 Uhr auf und entspricht damit in guter Näherung der Gesamtauswertung der Start- und Landefrequenz. Bei der UFP-Konzentration liegen insgesamt drei deutliche Maxima mit einem kurzen zeitlichen Versatz nach 8:00 Uhr, 12:00 Uhr und gegen 21:00 Uhr und drei kleinere Maxima zwischen 15:00 Uhr und 18:00 Uhr vor. Die ersten beiden Maxima sowie das letzte Maximum der UFP-Konzentrationen treten kurz nach den Maxima der Landungen auf, was auf einen positiven Zusammenhang hindeutet. Dieser Zusammenhang wurde durch die Berechnung der Kreuzkorrelation zwischen UFP-Konzentration und Landefrequenz statistisch bestätigt. Der Flughafensektor weist die höchsten Kreuzkorrelationskoeffizienten auf, welche auf einen starken Zusammenhang zwischen UFP-Konzentration und Landungsanzahl pro 10 Minuten schließen lassen. Bei der vorliegenden mittleren Windgeschwindigkeit von ca. 3 m/s dauert der Transport von Partikeln vom Flughafengelände bis zur Messstation Sachsenhausen ca. 40 Minuten. Der berechnete Zeitversatz von 20 Minuten zwischen den UFP-Konzentrationen und Landungen deutet eher auf die näher gelegenen Anflugrouten als Quelle hin. Dass beim Flughafensektor die UFP-Konzentration in Sachsenhausen am Tag viel höher ist als in Oberrad, ist ein weiteres Indiz dafür, dass die UFP von einer entfernten Quelle zu den Messstationen transportiert werden und deckt sich mit den Ergebnissen der Windabhängigkeiten.

Die erkennbaren Maxima der UFP-Konzentrationen im Tagesverlauf beim Flughafensektor sind unterschiedlich ausgeprägt: In den Nachmittagsstunden sind sie deutlich niedriger als in den Morgen- und Abendstunden. Dies kann mit der Grenzschichtentwicklung erklärt werden.

In der Nacht bildet sich in den unteren Luftschichten bis zu 500 m über dem Boden eine stabile Bodenschicht aus, die sich mit den oberhalb liegenden Luftschichten kaum durchmischt. Diese stabile Bodenschicht hält bis zu den frühen Morgenstunden an und wird erst nach Sonnenaufgang durch die Solarstrahlung allmählich aufgelöst (Foken, 2006). UFP, die innerhalb dieser stabilen Bodenschicht emittiert werden, werden weniger mit den oberen Luftschichten durchmischt, was folglich zu höheren UFP-Konzentrationen am Boden führt. Am Nachmittag ist die vertikale Durchmischung der Grenzschicht am größten ausgeprägt, was zu niedrigeren Konzentrationen am Boden führt (Foken, 2006). Mit dem Sonnenuntergang nimmt die vertikale Durchmischung wieder ab und es kommt erneut zur Ausbildung der stabilen Bodenschicht, womit das wiederum stark ausgeprägte Maximum gegen 21:00 Uhr zu erklären ist.

In den anderen drei Windsektoren „Nord“, „Ost“ und „Süd“ zeigt sich kein sichtbarer Zusammenhang zwischen UFP-Konzentration und Landefrequenz. Die mittleren UFP-Konzentrationen am Tag liegen größtenteils unterhalb des Gesamtdurchschnitts von 10.000 P/cm^3 und sind damit typisch für den städtischen Hintergrund (Birmili et al., 2016). Die berechneten Kreuzkorrelationskoeffizienten sprechen zwar teilweise für einen mittelstarken Zusammenhang zwischen UFP-Konzentration und Landefrequenz, jedoch passen die zugehörigen Zeitverschiebungen nicht zu den Landungen als UFP-Quelle. Der mittelstarke Zusammenhang ist vermutlich eher dadurch zu erklären, dass die Verläufe der Konzentrationen und der Landungsanzahl grundsätzlich eine gewisse Ähnlichkeit aufweisen. Tagsüber liegt bei beiden Verläufen im Mittel eine höhere Variabilität vor und nachts ist die Variabilität beider Verläufe im Mittel auf ein Minimum reduziert. Beim Flughafensektor liegen zusätzlich in ähnlichen Zeitabständen ähnlich stark ausgeprägte Anstiege beider Verläufe am Tag vor, wodurch sich eine stärker ausgeprägte Korrelation zwischen UFP-Konzentration und Landefrequenz ergibt.

Aufgrund des starken Zusammenhangs zwischen UFP-Konzentrationen und Landungen bei Wind aus dem Flughafensektor wurde für diesen Sektor versucht, die UFP-Quelle anhand der mittleren Windrichtungen und -geschwindigkeiten kombiniert mit den Zeitverschiebungen zwischen Beginn des Flugbetriebs um 5:00 Uhr und erstem Anstieg der UFP-Konzentration genauer zu lokalisieren. Hierfür wurden für beide Messstationen Emissionsortbereiche ermittelt, innerhalb derer sich die Quelle mit hoher Wahrscheinlichkeit befindet. Die Schnittmenge dieser beiden ermittelten Emissionsortbereiche liegt genau auf den Anflugrouten des Parallelbahnsystems. Dieses Ergebnis bestätigt die Vermutung, dass an diesen beiden Standorten die Mehrheit der eingetragenen UFP nicht vom Flughafengelände und nicht von den landenden Flugzeugen

auf die Landebahn Nordwest stammen, sondern von den landenden Flugzeugen des Parallelbahnsystems.

Die maximale Flughöhe innerhalb des gemeinsamen Emissionsortbereichs beträgt zwischen 200 und 300 m. Nach dieser Auswertung würden folglich landende Flugzeuge bis zu einer Flughöhe von 200 – 300 m einen Einfluss auf die UFP-Konzentration am Boden zeigen. Diese Schlussfolgerung ist jedoch nicht sehr belastbar. Würde der Flughafensektor von 220 – 240° auf 200 – 240° vergrößert werden, würde sich vermutlich ein ähnliches Bild der Kurvenverläufe abzeichnen, jedoch würden sich bei der Emissionsortbestimmung aufgrund der sich ändernden Windrichtungsgrenzen andere maximale Flughöhen ergeben. Eine genaue Aussage, bis zu welcher Höhe die Flugzeuge einen Einfluss auf die UFP-Konzentration zeigen, lässt sich folglich nicht mit hoher Sicherheit treffen. Vielmehr kann festgestellt werden, dass landende Flugzeuge des Parallelbahnsystems bis zu einer Höhe von ca. 300 m mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Einfluss auf die UFP-Konzentration am Boden ausüben. Ob dies auch für höhere Flughöhen gilt, kann auf Grundlage der vorliegenden Daten nicht ausgeschlossen werden.

4.2.2 Starts

Bei der Windsektorenanalyse von Starts lagen nur für den Nordost- sowie für den Nordwestsektor genügend Daten vor, um diese bewerten zu können. Dies liegt darin begründet, dass die lokalen Windverhältnisse von südlichen bis südwestlichen Windrichtungen deutlich dominiert werden und der Flughafen nur bei stärkerem Wind aus Richtung Osten die Betriebsrichtung auf Ost umstellt. Die Datengrundlage des Nordwestsektors ist im Vergleich zum Nordostsektor sehr gering. Der einzelne Konzentrationspeak um 10:30 Uhr ist deshalb kritisch zu betrachten und möglicherweise nicht repräsentativ.

Die Konzentrationsverläufe des Nordwestsektors sind typisch für den städtischen Hintergrund. Tagsüber liegen die mittleren UFP-Konzentrationen unter 9.000 P/cm^3 und sind verglichen mit den mittleren Nachtkonzentrationen nur um ca. $1.000 - 2.000 \text{ P/cm}^3$ erhöht. Dieser leichte Anstieg der mittleren UFP-Konzentration kann durch den allgemeinen städtischen Hintergrund bedingt sein. Insgesamt ist die Verlaufsstruktur beider Konzentrationen zueinander sehr ähnlich und ohne zeitliche Verschiebung, was darauf hindeutet, dass die Quelle jeweils ähnlich weit entfernt ist. Der Nordwestsektor deckt von den Messstationen aus gesehen das Stadtgebiet Frankfurt-Mitte ab, welches von beiden Messstationen etwa gleichweit entfernt liegt. Die etwas höheren Konzentrationen am Mittag und Nachmittag könnten durch den städ-

tischen Betrieb der Stadt Frankfurt bedingt sein. Ein Zusammenhang zwischen der UFP-Konzentration und Starts konnte für diesen Sektor nicht bestätigt werden. Es zeigt sich visuell und auch durch die berechneten Kreuzkorrelationskoeffizienten ein mittelschwacher Zusammenhang zwischen Konzentrationen und Starts. Es ist zu beachten, dass der Nordwestsektor lediglich gestartete Flugzeuge, die die Flugroute 07 – N (kurz) einschlagen, auf einen Einfluss auf die UFP-Konzentration hin untersucht. Der Einfluss dieser Flugzeuge ist aufgrund der großen Entfernung – wenn überhaupt – als sehr gering einzuschätzen.

Der Nordostsektor betrachtet hauptsächlich die gestarteten Flugzeuge der Flugrouten 07 – N (lang), die entlang beider Messstationen verläuft und 07 – O bzw. 07 – S (lang), die entlang der Messstation Sachsenhausen verlaufen. Auch bei diesem Sektor liegen tagsüber nur leicht erhöhte mittlere UFP-Konzentrationen verglichen mit den Nachtkonzentrationen vor. Ein Zusammenhang zwischen der UFP-Konzentration und Starts konnte für diesen Sektor nicht bestätigt werden. Die berechneten Kreuzkorrelationskoeffizienten sind hier noch geringer als beim Nordwestsektor, obwohl durch den sehr nahen Verlauf der Startrouten hier ein Einfluss der Starts am ehesten zu erwarten gewesen wäre. Eine separate Betrachtung der einzelnen Startrouten, welche mit dem vorliegenden Datensatz nicht möglich war, könnte Aufschluss darüber geben, ob und inwiefern die gestarteten Flugzeuge einen Einfluss auf die UFP-Konzentration haben.

Ein Zusammenhang zwischen der UFP-Konzentration und Starts konnte für beide betrachteten Sektoren nicht bestätigt werden. Die berechneten maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten sind als sehr niedrig einzustufen und auch die Verlaufsstrukturen der Konzentrationen und Starts zeigen keinen sichtbaren Zusammenhang. Da für die Betrachtung der Starts insgesamt weniger Daten vorliegen und die gestarteten Flugzeuge verschiedene Flugrouten einschlagen, lässt sich mit diesen Ergebnissen keine sichere Aussage über einen Zusammenhang treffen. Hierfür bedarf es an genaueren Angaben darüber, welche Flugroute die gestarteten Flugzeuge einschlagen sowie an einem längeren zu betrachtenden Zeitraum, um auch eine ausreichende Datengrundlage für die anderen zwei Windsektoren zu erreichen.

4.2.3 Tagesanalyse

Die Ergebnisse der Tagesanalyse haben gezeigt, dass häufig kontinuierliche Konzentrationsanstiege vorliegen, wenn der Wind aus dem Flughafensektor ($220 - 240^\circ$) bzw. etwas südlich des Flughafensektors (bis ca. 200°) mit einer Mindestgeschwindigkeit von 1 m/s weht und der Betrieb des Flughafens bereits begonnen hat. Dies konnte sowohl für die frühen Morgenstunden

zwischen 5:00 Uhr und 6:00 Uhr, als auch für andere Tageszeiten anhand mehrerer Beispiele gezeigt werden. Der kontinuierliche Konzentrationsanstieg deutet auf eine konstante entferntere Quelle hin, deren emittierte UFP über die Luftströmung bei südwestlichen Windrichtungen herantransportiert werden. Das Flughafengelände ist für die gezeigten zeitlichen Abstände zwischen Wind aus Flughafensektor und Konzentrationsanstieg in den meisten Fällen zu weit entfernt, als dass es als Hauptquelle in Frage käme. Der zeitliche Abstand lässt häufig eher die Landungen als Quelle vermuten. Vermutlich bilden die einzelnen Landungen in Summe eine Art Linienquelle, die bei höherer Landefrequenz entsprechend stärker auf die Bodenkonzentration wirkt. Ob auch das Flughafengelände als relevante UFP-Quelle für Sachsenhausen und Oberrad in Frage kommt, kann nicht mit eindeutiger Sicherheit bestätigt werden. Im Falle eines Einflusses wird der Einfluss des Flughafengeländes vom Einfluss der Landungen überlagert und ist daher eher als sekundär einzustufen. Bei Wind aus anderen Richtungen bleibt die Konzentration häufig auf einem niedrigeren Niveau bzw. sinkt wieder auf ein niedrigeres Niveau ab. Vor allem wenn der Wind nach Norden aus dem Flughafensektor herausdreht, sinkt die Konzentration sehr stark ab, da bei diesen Windrichtungen kein Einfluss vom Flugbetrieb mehr möglich ist. Dass bei Windgeschwindigkeiten unter 1 m/s keine wesentlichen Konzentrationsanstiege vorliegen, spricht weiterhin dafür, dass die UFP von entfernteren Quellen stammen, da für den horizontalen Transport von UFP über die Luft eine Grundströmung der Luftmassen vorhanden sein muss (Seinfeld & Pandis, 2006).

Es werden an beiden Standorten vereinzelt auch kurzzeitige Konzentrationsspitzen mit Konzentrationen über 100.000 P/cm^3 gemessen. In den meisten Fällen treten diese kurzzeitigen Konzentrationsspitzen nicht zeitgleich oder zeitversetzt an beiden Messstandorten auf, sondern nur an einem Standort. Diese Konzentrationsspitzen könnten auf sehr lokale UFP-Quellen zurückzuführen sein, die auf den anderen Messstandort keinen Einfluss haben. Hierfür wären in Sachsenhausen die Küchenabluft der KiTa, die Pelletheizung oder die Schrebergärten und in Oberrad die angrenzenden Häuserreihen oder die regelmäßig stattfindende Grünpflege auf dem Friedhof als mögliche lokale UFP-Quellen zu nennen. Auch ein Einfluss der direkten Überflüge (landende Flugzeuge auf die Landebahn Nordwest) durch Wirbelschleppen, der nicht zwangsläufig bei beiden Standorten vorliegen muss, könnte diese kurzzeitigen Konzentrationsspitzen verursachen. Hierfür müsste einer kurzzeitigen Konzentrationsspitze in einem plausiblen zeitlichen Abstand ein direkter Überflug vorangestellt sein. Bei den gezeigten Tagesabschnitten liegen häufig sehr viele direkte Überflüge bei nur wenigen Konzentrationsspitzen vor. Dies lässt darauf schließen, dass ein möglicher Einfluss der direkten Überflüge auf die bodennahe UFP-

Konzentration in den seltensten Fällen besteht. Zum Teil liegen auch kurzzeitige Konzentrationspitzen ohne vorherige direkte Überflüge vor.

Es können mit diesen Ergebnissen keine pauschalen Bedingungen festgelegt werden, zu denen immer ein bestimmter Konzentrationsverlauf vorliegt. An den gezeigten Tagen gibt es Situationen, bei denen keine hohen Konzentrationen bzw. keine kontinuierlichen Konzentrationsanstiege vorliegen, obwohl der Wind aus dem Flughafensektor weht und viele Landeereignisse stattfinden. Des Weiteren führen annähernd gleiche Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten nicht immer zu gleichen oder ähnlichen Konzentrationsverläufen. Zu viele meteorologische und anthropogene Faktoren, die nicht alle erfasst und berücksichtigt werden können, haben Einfluss auf die UFP-Konzentration, um für jede Situation eine korrekte Vorhersage machen zu können.

Die Ergebnisse der Windsektorenanalyse und der Tagesanalyse stehen im Einklang zueinander. Sie deuten insgesamt darauf hin, dass die landenden Flugzeuge des Parallelbahnsystems bei südwestlichen Windrichtungen einen dominierenden Einfluss auf die UFP-Konzentration in Sachsenhausen und Oberrad haben. Des Weiteren ist der Einfluss von direkten Überflügen (landende Flugzeuge auf die Landebahn Nordwest) als eher gering einzuschätzen. Für Flugzeuge, die mit leichtem Rückenwind landen, konnte kein Einfluss auf die Bodenkonzentration festgestellt werden.

4.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Wie hoch ist die allgemeine UFP-Belastung in Frankfurt-Sachsenhausen und Frankfurt-Oberrad zu Tages- und Nachtzeiten? Welchen Einfluss haben Windrichtung und -geschwindigkeit auf die UFP-Konzentration?

Die allgemeinen UFP-Belastungen beider Standorte sind einander sehr ähnlich. Tagsüber liegt bei beiden Standorten im Mittel eine Konzentration von ca. 10.000 P/cm³ vor, was für die Lage der Standorte nicht untypisch ist. In der Nacht liegt in Sachsenhausen eine mittlere Konzentration von ca. 6.400 P/cm³ und in Oberrad eine Konzentration von ca. 7.400 P/cm³ vor. Die um ca. 1.000 P/cm³ höhere Nachtkonzentration in Oberrad könnte durch die an den Friedhof grenzenden Wohnhäuser und die Nähe zur Autobahn A661 zu erklären sein. Gebäudeheizung und Kfz-Verkehr sind relevante UFP-Quellen, die auch in der Nacht aktiv sind. Der Standort Sachsenhausen ist von Wohnsiedlungen und Straßenverkehr weiter entfernt. Die Pelletheizung stellt die einzige relevante UFP-Quelle in der Nähe zur Messstation dar, die auch nachts einen

Einfluss haben könnte. Der Einfluss ist jedoch aufgrund der niedrigeren mittleren Konzentrationen als eher gering einzuschätzen.

Die Windrichtung hat an beiden Standorten einen wesentlichen Einfluss auf die UFP-Konzentration, der sich bei beiden Standorten gleichermaßen äußert. Bei Wind aus südwestlicher Richtung steigt die mittlere UFP-Konzentration am Tag in Sachsenhausen auf ca. 17.000 P/cm³ und in Oberrad auf ca. 15.000 P/cm³ an, was gegenüber dem Gesamtmittel von 10.000 P/cm³ einer um 70 % bzw. 50 % erhöhten UFP-Konzentration entspricht. Diese Windrichtungsabhängigkeit der UFP-Konzentration liegt jedoch nur bei Windgeschwindigkeiten größer als 1 m/s vor. Bei anderen Windrichtungen liegen Konzentrationen vor, die in etwa dem Gesamtmittel von 10.000 P/cm³ entsprechen. Auch die Methode der Tagesanalyse konnte einen Zusammenhang zwischen der UFP-Konzentration und der Windrichtung empirisch bestätigen. Hier steigen bei den gezeigten Tagesabschnitten die Konzentrationen häufig bei Wind aus Richtung des Flughafensektors (220 – 240°) und etwas südlicheren Windrichtungen (200°, 210°) ab einer Geschwindigkeit von mindestens 1 m/s markant an und sinken wieder ab, sobald der Wind aus diesem Bereich herausdreht.

Existiert ein statistisch nachweisbarer Zusammenhang zwischen Überflügen und der UFP-Konzentration in Frankfurt-Sachsenhausen und/oder Frankfurt-Oberrad? Wenn ja, unter welchen Bedingungen?

Durch die Methode der Windsektorenanalyse konnte für beide Standorte ein positiver Zusammenhang zwischen der UFP-Konzentration und der Anzahl an Landungen gezeigt und statistisch belegt werden. Dieser Zusammenhang ist an die Bedingung geknüpft, dass der Wind mit einer Windgeschwindigkeit von mindestens 1 m/s aus Richtung des Flughafensektors (220 – 240°) weht und wurde lediglich für die Wochentage Montag bis Freitag gezeigt. Der Zusammenhang zeigt sich insofern, als dass bei hoher Landungsanzahl kurze Zeit später in Sachsenhausen und wiederum kurze Zeit später in Oberrad die mittlere UFP-Konzentration stark ansteigt und bei geringerer Landungsanzahl entsprechend wieder absinkt. Die berechneten Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen UFP-Konzentrationen und Anzahl an Landungen deuten ebenfalls auf einen starken Zusammenhang hin. Der Effekt ist, vermutlich aufgrund der Grenzschichtentwicklung, am Morgen und am Abend am stärksten ausgeprägt, da hier die Durchmischung der Luft im Vergleich zu Mittags- bis Nachmittagszeiten reduziert ist.

Durch die Methode der Tagesanalyse konnte der Zusammenhang zwischen UFP-Konzentration und Flugbetrieb empirisch bestätigt werden. Hier lagen starke Konzentrationsanstiege

vor allem bei Wind aus Richtung des Flughafensektors ($220 - 240^\circ$) aber auch bei etwas südlicheren Windrichtungen ($200^\circ, 210^\circ$) mit einer Geschwindigkeit von mehr als 1 m/s vor. Bei diesen Windverhältnissen stieg die Konzentration stets ab 5:00 Uhr, also mit Beginn des Flugbetriebs, merklich an. Der zeitliche Abstand zwischen Wind aus südwestlicher Richtung und Konzentrationsanstieg ist sehr variabel und reicht bei den gezeigten Tagesabschnitten von wenigen Minuten bis zu ca. 40 Minuten, was in den meisten Fällen auf die entfernteren landenden Flugzeuge als Hauptquelle hindeutet. Die Konzentrationsanstiege fielen bei einer höheren Landefrequenz zum Teil stärker aus. Am 30.09.19 konnte morgens zwischen 5:00 Uhr und 6:00 Uhr bei Wind aus Richtung Flughafensektor mit einer Geschwindigkeit von 8 – 10 m/s gezeigt werden, dass bei Landungen ausschließlich auf der Centerbahn die UFP-Konzentration an beiden Standorten kontinuierlich um mehrere 1.000 P/cm^3 ansteigt. Die hohe Windgeschwindigkeit in Verbindung mit dem kurzen Zeitversatz von ca. 10 Minuten deutet auf die Anflugroute der Centerbahn als UFP-Quelle hin. Dieser Zusammenhang sollte dann analog auch für die ca. 500 m entfernte, parallel verlaufende Anflugroute der Südbahn gelten. Auf Grundlage dieses Ergebnisses könnte geschlussfolgert werden, dass die kontinuierlichen Konzentrationsanstiege vor allem durch die Anflugrouten des Parallelbahnsystems hervorgerufen werden. Die beiden Anflugrouten könnten als zwei parallele Linienquellen betrachtet werden, die bei entsprechenden Windverhältnissen einen kontinuierlichen Anstieg der UFP-Konzentration in Sachsenhausen und Oberrad verursachen. Dies würde auch im Einklang mit den in der Windsektorenanalyse gezeigten Ergebnissen stehen.

Ist zwischen den beiden Messstationen ein zeitlicher Versatz der UFP-Konzentration sichtbar? Lässt sich damit die Hauptquelle der UFP-Immissionen lokalisieren? Wenn ja, unter welchen Bedingungen?

Bei der Methode der Windsektorenanalyse konnte für den Flughafensektor ein Zusammenhang zwischen UFP-Konzentration und Landungen gezeigt werden. Die ersten Anstiege der Kurven kurz nach 5:00 Uhr zeigen dabei zueinander jeweils einen zeitlichen Versatz. Der zeitliche Versatz beträgt dabei zwischen Landungen und Sachsenhausen 30 Minuten und zwischen Landungen und Oberrad 50 Minuten. Aus diesen zeitlichen Versätzen und den mittleren Windverhältnissen des Flughafensektors wurde für jede Messstation ein Bereich ermittelt, innerhalb dessen sich die für die jeweiligen Konzentrationsanstiege verantwortlichen landenden Flugzeuge mit hoher Wahrscheinlichkeit befinden. Diese beiden ermittelten Bereiche überlappen sich dort, wo sich Abschnitte der Anflugrouten des Parallelbahnsystems befinden, während sich das Flughafengelände und die Anflugroute der Landebahn Nordwest außerhalb dieses Bereichs

befindet. Die auf diesen Abschnitten befindlichen landenden Flugzeuge stellen bei den vorgegebenen Windverhältnissen mit hoher Wahrscheinlichkeit die dominierende UFP-Quelle für Sachsenhausen und Oberrad dar. Die aus den anderen Ergebnissen resultierte Vermutung, dass die markanten Anstiege der UFP-Konzentration durch die landenden Flugzeuge des Parallelbahnsystems bedingt sind, wird von diesem Ergebnis gestützt. Zusätzlich lässt sich grob abschätzen, bis zu welcher Flughöhe die landenden Flugzeuge des Parallelbahnsystems einen Effekt auf die UFP-Konzentration am Boden ausüben. Die ungefähren Flughöhen der landenden Flugzeuge innerhalb des ermittelten überlappten Bereichs reichen bis zu ca. 200 – 300 m. Es kann daher festgestellt werden, dass landende Flugzeuge des Parallelbahnsystems bis zu einer Höhe von ca. 200 – 300 m mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Einfluss auf die UFP-Konzentration in Sachsenhausen und Oberrad ausüben. Ob dies auch für höhere Flughöhen gilt, kann auf Grundlage dieser Methode weder ausgeschlossen noch bestätigt werden. Hierfür bedarf es an weiteren Untersuchungen.

Können einzelne direkte Überflüge bestimmten UFP-Konzentrationsspitzen eindeutig zugeordnet werden? Wenn ja, unter welchen Bedingungen?

In den gezeigten Tagesabschnitten treten vereinzelt und in unregelmäßigen Abständen kurzzeitige UFP-Konzentrationsspitzen bei beiden Messstandorten auf. Vor diesen Konzentrationsspitzen finden meist entweder mehrere oder gar keine direkten Überflüge in einem plausiblen zeitlichen Abstand statt. Zudem liegen bei vielen Zeitfenstern mit mehreren direkten Überflügen keine darauffolgenden kurzzeitigen Konzentrationsspitzen in einem plausiblen zeitlichen Abstand vor. Wird die gesamte Datengrundlage dieser Arbeit betrachtet, sind nur selten kurzzeitige Konzentrationsspitzen in zeitlicher Nähe zu direkten Überflügen zu beobachten.

Das Auftreten von Konzentrationsspitzen ohne jegliche direkten Überflüge zeigt auf, dass auch andere, nicht überflugbezogene UFP-Quellen die Ursache eines solchen Anstiegs darstellen können. Somit könnte in einigen Fällen zwar ein Zusammenhang zwischen direkten Überflügen und folgenden kurzzeitigen Konzentrationsspitzen bestehen, andere lokale Quellen können aber auch dann als Verursacher nicht ausgeschlossen werden. Daher ist es nicht möglich, eine kurzzeitigen Konzentrationsspitze eindeutig einem direkten Überflug als Quelle zuzuordnen.

Insgesamt ist der Einfluss von direkten Überflügen (Landungen auf Landebahn Nordwest) auf die UFP-Konzentration in Sachsenhausen und Oberrad höchstens als sehr gering einzuschätzen.

4.4 Abschlussdiskussion

Die bisherigen Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen dem Flugbetrieb des Frankfurter Flughafens und UFP-Belastung in Sachsenhausen und Oberrad, die das HLNUG in zwei Zwischenberichten zusammengefasst hat, konnten mit den in dieser Arbeit gezeigten Ergebnissen bestätigt und teilweise erweitert werden:

Bei Wind aus Richtung des Flughafens liegen bei beiden Standorten stark erhöhte UFP-Konzentrationen vor, die in Sachsenhausen etwas stärker ausgeprägt sind als in Oberrad. Die landenden Flugzeuge auf den Anflugrouten des Parallelbahnsystems bei BR25 stellen für beide Standorte bei südwestlichen Windrichtungen bis zu einer Flughöhe von 200 – 300 m eine relevante UFP-Quelle dar. Anhand der Daten aus Sachsenhausen und Oberrad allein kann jedoch nicht abgeschätzt werden, in welchem Verhältnis der Beitrag der Landeanflüge zum Beitrag der Emissionen auf dem Flughafengelände steht. Der Einfluss von landenden Flugzeugen auf der Anflugroute der Landebahn Nordwest ist bei beiden Standorten als eher gering einzuschätzen.

Insgesamt tragen die Erkenntnisse dazu bei, das Einflussgebiet des Flugbetriebs auf die UFP-Konzentration im entfernteren Umkreis des Frankfurter Flughafens besser abschätzen zu können.

5 Ausblick

Die gezeigten Ergebnisse deuten einstimmig darauf hin, dass landende Flugzeuge einen messbaren Einfluss auf die UFP-Konzentration in Sachsenhausen und Oberrad haben. Die Partikelgrößenverteilung sowie der Anteil an flüchtigen und nicht-flüchtigen Partikeln wurden an beiden Standorten bislang noch nicht erfasst. Diese Messgrößen könnten dabei helfen, die landenden Flugzeuge als Hauptquelle eindeutig zu identifizieren. Des Weiteren könnte der gezeigte Zusammenhang der UFP-Konzentration mit den Landeanflügen sowie die Abnahme dieses Effekts mit zunehmender Distanz zum Flughafen für andere Standorte rund um den Frankfurter Flughafen überprüft werden, um abschätzen zu können, bis zu welchem Umkreis der Flughafen als relevante UFP-Quelle wirkt und welche Gebiete besonders betroffen sind. Hierfür würden sich zunächst die vom HLNUG betriebenen Messstationen in Frankfurt-Schwanheim und Frankfurt-Niedwald sehr gut eignen, da diese ähnlich wie die Messstationen in Sachsenhausen und Oberrad annähernd in einer Linie zum Flughafen installiert wurden. Diese und weitere Messungen könnten zukünftig für Schadstoffausbreitungsmodelle herangezogen werden, um die UFP-Belastung durch den Flugbetrieb auch in anderen Städten und Gemeinden rund um den Frankfurter Flughafen abschätzen zu können.

Für den Einfluss von gestarteten Überflügen auf die UFP-Konzentration bedarf es an weiteren Untersuchungen, da hierfür die Datengrundlage nicht ausreichend war. Hierfür könnten für Analysen der Messwerte aus Sachsenhausen und Oberrad insbesondere die gestarteten Flugzeuge der Flugroute 07 – N (lang) für nähere Untersuchungen herangezogen werden, da diese Flugroute entlang beider Messstationen verläuft.

Der Corona-Lockdown stellt für den Flugbetrieb des Frankfurter Flughafens ein einschneidendes Ereignis dar. Seit Mitte März 2020 ist die Anzahl an Passagieren und Flugbewegungen pro Tag im Zuge der Corona-Pandemie stark gesunken. In der 16. Kalenderwoche (13.04.20 – 19.04.20) fanden mit ca. 200 Flugbewegungen pro Tag ca. 1.300 Flugbewegungen weniger statt, als unter normalen Umständen üblich ist (Remmert, 2020). Des Weiteren wurde der Betrieb der Landebahn Nordwest ab dem 23.03.2020 eingestellt. Seither wird die Landebahn Nordwest als Abstellfläche für aktuell nicht benötigte Flugzeuge genutzt. Durch diesen einmaligen Ausnahmezustand am Frankfurter Flughafen ist es möglich, anhand der aktuellen Messdaten den allgemeinen Einfluss des Flugbetriebs auf die UFP-Konzentration in den umliegenden Ortschaften zu beziffern. Zudem könnte ein Vergleich der durchschnittlichen UFP-Kon-

zentrationen vor und nach dem Ausfall der Landebahn Nordwest eindeutige Erkenntnisse darüber liefern, ob und inwiefern die direkten Überflüge der Landebahn Nordwest einen Einfluss auf die Bodenkonzentration in Sachsenhausen und Oberrad ausüben.

Diese und weitere Erkenntnisse könnten in Zukunft dazu beitragen, gezielte Maßnahmen zur Reduktion des Eintrags an UFP in urbane Gebiete durch den Flugbetrieb am Frankfurter Flughafen sowie an anderen Großflughäfen weltweit zu formulieren und umzusetzen.

Anhang A: Logbuch

Logbuch der UFP-Messungen

Dieses R-Markdown-Dokument wurde am 2020-05-13 erstellt.

Das Logbuch basiert auf:

//srvflugfaswi002/gruppen/4all.i2/Messnetz/Messprogramme_projekte/Ultrafeinstaub/LaborBuch/Logbuch-UFP.CSV
zuletzt geändert: 2020-05-13 16:43:53, letzter Eintrag durch: fd.

Überblick

Folgende Einträge wurden erfasst:

Personen	fd, Ro
Stationen	RAUNH, SCHWH, FRAA3, SACHS, FRAOST, OBERR, NIEDW, RAUMH, SCHTD, FRIEDB, FRAWST
Instrumente	SMPS, GRIMM_CPC, TSI_CPC

Bedeutung der Flaggen:

Flaggen	Bedeutung
1	Daten sind plausibel
2	Kommentar / Korrektur beachten
3	lokale Kontamination
4	Daten verwerfen

Raunheim

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	SMPS	2017-09-01 00:00:00	NA	1	NA	Messbeginn
fd	SMPS	2020-01-19 08:00:00	2020-01-21 13:00:00	4	NA	kein BuOH
fd	SMPS	2020-03-16 00:00:00	2020-03-16 00:00:00	2	NA	Aufweichung Nachtflugverbot
fd	SMPS	2020-03-19 12:50:00	2020-03-19 13:20:00	4	NA	Wartung Gue

Frankfurt-Schwanheim

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	SMPS	2017-09-28 09:37:00	NA	1	NA	Messbeginn
fd	SMPS	2018-03-19 11:00:00	2018-03-26 09:15:00	4	NA	SMPS mit TD betrieben
fd	SMPS	2020-01-17 10:30:00	2020-01-17 11:00:00	4	NA	Inversion fehlerhaft
fd	SMPS	2020-02-10 09:30:00	2020-02-10 15:50:00	4	NA	Ausfall nach Stromausfall

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	SMPS	2020-03-16 00:00:00	2020-03-16 00:00:00	2	NA	Aufweichung Nachtflugverbot
fd	SMPS	2020-03-16 10:20:00	2020-03-16 10:40:00	3	NA	Lokale Emissionen

Frankfurt-Schwanheim (Thermodenuder)

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	SMPS	2020-02-12 00:00:00	NA	1	NA	Messbeginn
fd	SMPS	2020-02-14 08:00:00	2020-03-24 13:50:00	2	NA	TD in Betrieb
fd	SMPS	2020-03-24 13:55:00	2020-03-25 11:20:00	2	NA	TD aufwachen Betrieb

Frankfurt-Niedwald

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	SMPS	2019-04-25 13:59:00	NA	1	NA	Messbeginn
fd	SMPS	2020-03-16 00:00:00	2020-03-16 00:00:00	2	NA	Aufweichung Nachtflugverbot
fd	SMPS	2020-03-19 17:40:00	2020-03-19 18:10:00	4	NA	Wartung Gue

Frankfurt-Friedberger Landstraße

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	SMPS	2020-04-29 10:00:00	NA	1	NA	Messbeginn

Frankfurt-Flughafen-Ost

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	SMPS	2019-02-25 13:19:00	NA	1	NA	Messbeginn
fd	SMPS	2019-12-28 00:00:00	2019-12-31 00:00:00	4	NA	T_Sat zu hoch
fd	SMPS	2020-03-16 00:00:00	2020-03-16 00:00:00	2	NA	Aufweichung Nachtflugverbot
fd	SMPS	2020-03-26 13:25:00	2020-03-26 14:10:00	4	NA	Wartung Gue
fd	SMPS	2020-04-29 10:00:00	NA	1	NA	Ende der Messungen

Frankfurt-Flughafen-West

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	SMPS	2020-04-29 14:00:00	NA	1	NA	Messbeginn

Frankfurt-Flughafen-A3

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	SMPS	2018-08-02 11:04:00	NA	1	NA	Messbeginn
fd	SMPS	2019-02-25 09:29:00	NA	1	NA	Ende der Messungen
fd	SMPS	2020-03-16 00:00:00	2020-03-16	2	NA	Aufweichung Nachtflugverbot

Frankfurt-Sachsenhausen

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	GRIMM_CPC	2018-09-28 09:53:00	NA	1	NA	Messbeginn
fd	GRIMM_CPC	2019-05-06 10:58:00	2019-05-06 11:07:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2019-05-20 08:40:00	2019-05-20 08:50:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2019-05-27 10:00:00	2019-05-28 11:00:00	4	NA	Kommunikationsproblem
fd	GRIMM_CPC	2019-06-07 09:45:00	2019-06-07 10:05:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2019-07-02 12:23:00	2019-07-02 12:34:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2019-07-25 11:00:00	2019-07-29 12:00:00	4	NA	T_Sat zu hoch, Ausfall
fd	GRIMM_CPC	2019-08-02 08:45:00	2019-08-02 09:00:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2019-08-21 12:17:00	2019-08-21 12:32:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2019-09-17 07:35:00	2019-09-17 08:05:00	3	NA	Lokale Emissionen, Laerm
fd	GRIMM_CPC	2019-10-24 10:44:00	2019-10-24 11:04:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2019-11-18 10:12:00	2019-11-18 10:31:00	2	NA	Wartung? MN
fd	GRIMM_CPC	2019-11-20 13:26:00	NA	1	NA	Ausbau vor Service
fd	GRIMM_CPC	2019-11-20 13:30:00	2019-12-12 16:30:00	4	NA	Geraet im Service
fd	GRIMM_CPC	2019-12-12 16:28:00	NA	1	NA	Einbau nach Service
fd	GRIMM_CPC	2019-12-20 09:45:00	2019-12-20 09:55:00	4	NA	Wartung MN
fd	GRIMM_CPC	2020-01-09 11:30:00	2020-01-09 11:46:00	4	NA	Wartung MN/PF
fd	GRIMM_CPC	2020-01-23 10:20:00	2020-01-23 10:35:00	4	NA	Wartung MN/PF
fd	GRIMM_CPC	2020-03-16 00:00:00	2020-03-16 00:00:00	2	NA	Aufweichung Nachtflugverbot
fd	GRIMM_CPC	2020-03-19 16:00:00	2020-03-19 16:15:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2020-04-09 12:25:00	2020-04-09 12:45:00	4	NA	Wartung Gue

Frankfurt-Oberrad

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	GRIMM_CPC	2019-03-01 01:30:00	NA	1	NA	Messbeginn

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	GRIMM_CPC	2019-03-19 10:42:00	2019-03-19 10:45:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2019-03-22 08:15:00	2019-03-22 09:40:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-04-02 10:13:00	2019-04-02 10:35:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2019-04-08 09:05:00	2019-04-08 11:45:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-04-08 09:10:00	2019-04-08 10:40:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-05-06 08:50:00	2019-05-06 09:10:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-05-06 08:50:00	2019-05-06 12:00:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-05-06 10:20:00	2019-05-06 10:30:00	4	NA	Wartung Gue, Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-05-06 10:28:00	2019-05-06 11:56:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-05-08 08:55:00	2019-05-08 11:00:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-05-20 09:15:00	2019-05-20 09:24:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2019-05-28 10:20:00	2019-05-28 12:00:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-05-29 11:30:00	2019-05-29 11:30:00	2	NA	Wartung Gue, keine Auffaelligkeiten
fd	GRIMM_CPC	2019-06-07 08:15:00	2019-06-07 11:30:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-06-07 10:30:00	2019-06-07 11:00:00	2	NA	Wartung Gue, keine Auffaelligkeiten
fd	GRIMM_CPC	2019-06-19 09:00:00	2019-06-19 09:45:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-06-28 06:00:00	2019-06-28 09:00:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-07-02 11:35:00	2019-07-02 11:45:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2019-07-09 07:30:00	2019-07-09 08:00:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-07-25 11:00:00	2019-07-29 12:00:00	4	NA	T_Sat zu hoch, Ausfall
fd	GRIMM_CPC	2019-08-02 08:00:00	2019-08-02 08:13:00	4	NA	Wartung Gue/fd
fd	GRIMM_CPC	2019-09-06 11:08:00	2019-09-06 14:00:00	4	NA	Kommunikationsprobleme, Neustart Gue

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	GRIMM_CPC	2019-09-18 09:00:00	2019-09-18 12:00:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-10-18 08:55:00	2019-10-18 10:45:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-10-24 11:33:00	2019-10-24 11:47:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2019-11-06 11:25:00	2019-11-06 11:38:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2019-11-08 09:10:00	2019-11-08 09:20:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-11-11 10:05:00	2019-11-11 10:20:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-11-14 11:00:00	2019-11-14 12:00:00	4	NA	Wartung?
fd	GRIMM_CPC	2019-11-18 12:50:00	2019-11-18 15:00:00	2	NA	Wartung?
fd	GRIMM_CPC	2019-11-20 12:50:00	NA	1	NA	Ausbau vor Service
fd	GRIMM_CPC	2019-11-20 13:00:00	2019-12-12 16:00:00	4	NA	Geraet im Service
fd	GRIMM_CPC	2019-12-12 16:00:00	NA	1	NA	Einbau nach Service
fd	GRIMM_CPC	2019-12-18 10:00:00	2019-12-18 10:30:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-12-19 09:50:00	2019-12-19 11:00:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2019-12-20 10:20:00	2019-12-20 10:32:00	4	NA	Wartung
fd	GRIMM_CPC	2020-01-09 10:50:00	2020-01-09 11:05:00	4	NA	Wartung MN/PF
fd	GRIMM_CPC	2020-01-22 07:30:00	2020-01-24 10:00:00	2	NA	keine HK Daten
fd	GRIMM_CPC	2020-01-23 09:35:00	2020-01-23 12:10:00	4	NA	Wartung MN/PF
fd	GRIMM_CPC	2020-02-06 14:30:00	2020-02-07 08:35:00	4	NA	Ausfall nach Abschaltung waehrend Wartung
fd	GRIMM_CPC	2020-02-21 09:30:00	2020-02-21 10:30:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2020-03-16 00:00:00	2020-03-16 00:00:00	2	NA	Aufweichung Nachtflugverbot
fd	GRIMM_CPC	2020-03-19 16:40:00	2020-03-19 16:50:00	4	NA	Wartung Gue
fd	GRIMM_CPC	2020-03-25 11:00:00	2020-03-25 12:30:00	3	NA	Gruenpflege

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	GRIMM_CPC	2020-04-08 19:00:00	2020-04-09 14:00:00	4	NA	Objekt im Einlass, Wartung Gue
Ro	GRIMM_CPC	2020-04-20 09:07:00	2020-04-20 09:12:00	3	NA	Gruenpflege
fd	GRIMM_CPC	2020-04-30 09:00:00	2020-04-30 10:50:00	4	NA	WarmUp nach Stromausfall
fd	GRIMM_CPC	2020-05-08 08:20:00	2020-05-08 10:30:00	3	NA	Gruenpfepe

Raunheim-Mönchhof

ID	Instrument	Beginn	Ende	Flagge	Korrekturfaktor	Kommentar
fd	TSI_CPC	2019-09-01 00:00:00	2019-09-25 11:25:00	4	NA	keine Verduennung, Konz. mglw. zu gering
fd	TSI_CPC	2019-09-19 11:00:00	NA	1	NA	Messbeginn
fd	TSI_CPC	2019-09-25 11:25:00	2019-09-25 11:50:00	4	NA	Einbau Verduennung Faktor 2
fd	TSI_CPC	2019-09-25 11:50:00	2019-10-01 09:55:00	2	2	Verduennung Faktor 2
fd	TSI_CPC	2019-10-01 09:55:00	2019-10-01 10:20:00	4	NA	Einbau Verduennung Faktor 3
fd	TSI_CPC	2019-10-01 10:20:00	NA	2	3	Verduennung Faktor 3
fd	TSI_CPC	2019-10-10 10:30:00	2019-10-10 10:52:00	4	NA	Wartung Gue
fd	TSI_CPC	2019-11-08 11:00:00	2019-11-08 11:07:00	4	NA	Wartung Gue
fd	TSI_CPC	2019-12-30 15:55:00	2020-01-07 12:25:00	4	NA	Leck in Einlassleitung - Konz zu gering
fd	TSI_CPC	2020-02-25 11:15:00	2020-02-25 11:45:00	4	NA	Wartung Gue/fd
fd	TSI_CPC	2020-03-16 00:00:00	2020-03-16 00:00:00	2	NA	Aufweichung Nachtflugverbot

Anhang B: Produktdatenblatt GRIMM CPC

MOBILE ENVIRONMENTAL ULTRAFINE PARTICLE COUNTER EDM 465

The EDM 465 combines the reliable technology of our butanol condensation particle counters with easy handling and flexible application for environmental monitoring due to a compact, robust and mobile weather housing.

The EDM 465 is applicable for short and long-term continuous monitoring of ultrafine particles and enables a real-time data analysis of nanoparticles and meteorological measurement data.

This configuration places the EDM 465 in the leading position of the mobile ultrafine particle monitoring. The EDM 465 is a fit for purpose, state-of-the-art system capable of performing accurate and high-resolution measurements.

FEATURES

- real-time monitoring of ultrafine particles according to CEN TS 16976:2016
- fully automatic 24/7 monitoring system
- low maintenance, 30 days unattended operation, remote access
- energy-efficient sampling with isothermal drying system
- high precision at low and high concentrations
- excellent counting statistics and reproducibility
- low diffusion losses
- versatile data acquisition and communication (data logger with GSM via internet)
- self-test of all optical and pneumatic components for high quality standards
- rinsing air for protecting laser and detector in optical cell
- meteorological sensors
- instrument parameters secured against data loss



APPLICATIONS

- mobile monitoring of ultrafine particles
- traffic emission monitoring
- source identification
- epidemiological health studies
- public site and urban monitoring

CPC

**CEN/TS
16976**

24/7

GPS

real - time

TECHNICAL DATA

SPECIFICATIONS

measurement principle	condensation particle counter
working fluid	n-butanol (n-butyl alcohol)
particle size range	4 nm to 1 µm (pre-impactor)
detection efficiency	$D_{50} = 7$ nm (verified with silver particles), $D_{90} < 14$ nm
max concentration single count mode	150 000 p/cm ³
max concentration photometric mode	10 ⁷ p/cm ³
reproducibility	> 95% for single particle count mode
response time	$t_{\text{rise}} < 5$ s, $t_{\text{fall}} < 5$ s

FUNCTION

sampling and conditioning	1 m sampling pipe with sampling head, isothermal humidity extraction via Nafion membrane, sensor-controlled
diffusion losses	< 30% for smallest relevant particle size of 7 nm
weather housing	stainless steel, powder-coated, thermally isolated, temperature-controlled
climate sensors	wind speed and direction, precipitation, pressure, temperature relative humidity; GPS positioning
pumps	pulse free carbon vane pumps, flow rate of sample air 0.3 L/min
flow control	critical orifice, temperature-stabilized
total flow rate	1.5 L/min, $\leq 5\%$ difference to the nominal flow rate

HANDLING

operation	data logger and netbook integrated in housing for online data, meteorological sensor and GPS position
interfaces	data logger, USB, GSM with SIM card for mobile network
analog input	1 port (0 – 10 V) for auxiliary sensors
power supply	110 – 220 VAC, 50 – 60 Hz
power consumption	100 - 150 W
temperature range	- 20 to + 40°C (-4 to 104°F), RH < 95%,
pressure range	500 – 1100 mbar
dimensions (d x w x h)	housing: 49 x 28 x 65 cm (19.3 x 11 x 25.6 in), total height with sampling pipe and meteorological sensor: 140 cm (55.1 in)
weight	38 kg (83 lbs)

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Typische Partikelgrößenverteilungen in der Atmosphäre bezogen auf die Partikelanzahl (obere Kurve) und das Partikelvolumen (untere Kurve) mit verschiedenen Moden. Gezeigt ist die normierte Partikelanzahl bzw. das normierte Partikelvolumen gegen die auf einer logarithmisch eingeteilten Achse aufgetragene Partikelgröße. (Seinfeld & Pandis, 2006) _____ 3

Abb. 1.2: Schematische Darstellung der direkten Schadstoffemissionen von Flugzeugturbinen, deren Folgeprozesse in der Atmosphäre sowie deren lokale und globale Auswirkungen. Soot: Staubpartikel, THC: flüchtige Kohlenwasserstoffe. (Rindlisbacher, 2017) _____ 8

Abb. 1.3: LTO-Zyklen mit Angabe über die durchschnittliche Dauer und der relativen Motorenleistung. Taxi: Rollen, Approach: Landeanflug, Take-off: Start, Climb: Steigflug. (ICAO, 2019) _____ 9

Abb. 1.4: Emittierte Partikelanzahl nicht-flüchtiger Partikel pro kg Kraftstoff in Abhängigkeit der relativen Motorenleistung der Triebwerksmodelle (a) CFM56-5B4/2P, (b) PW4168A und (c) CFM56-7B24/3. Die Messungen wurden von der Missouri University of Science and Technology (Missouri S&T) und der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) durchgeführt. (Lobo et al., 2015) _____ 9

Abb. 1.5: Tagesgang der atmosphärischen Grenzschicht, EZ: „Entrainmentzone“. (Foken, 2006) _____ 11

Abb. 1.6: Aktuelle UFP-Messstandorte in näherer Umgebung zum Frankfurter Flughafen, betrieben vom HLNUG. Die eingezeichneten Linien stellen die Anflugrouten der Landebahn Nordwest (07L/25R), Centerbahn (07C/25C), und Südbahn (07R/25L) bei Betriebsrichtung 07/Ost (blau) und 25/West (pink) dar. Die farbig markierten Bereiche der Anflugrouten markieren die Strecke vom jeweiligen Aufsetzpunkt bis zu einer ungefähren Flughöhe von 400 m. Oben links ist die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung für den Zeitraum 09/2017 – 02/2019, gemessen von der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mit der Stations-ID 1420, dargestellt. (© OpenStreetMap-Mitwirkende; Rose & Jacobi, 2019) ____ 13

Abb. 2.1: Kalibrierkurve eines der verwendeten CPC-Messgeräte (Modell EDM 465). Die Grafik zeigt die gemessene Zählrate bei definierten Partikelgrößen (rote Kreismarkierungen)

und die daraus resultierende Anpassungskurve (blaue Gerade). Über der Grafik ist die Formel der Anpassungskurve, sowie die berechneten Partikeldurchmesser bei einer Zählrate von 50 % (D_{50}) und 90 % (D_{90}) angegeben. (GRIMM Aerosol Technik Ainring GmbH & Co. KG, 2019)

_____ 17

Abb. 2.2: Standort der UFP-Messstation in Sachsenhausen (braune Markierung) (© OpenStreetMap-Mitwirkende) _____ 18

Abb. 2.3: UFP-Messstation in Sachsenhausen _____ 18

Abb. 2.4: Standort der UFP-Messstation in Oberrad (blaue Markierung) (© OpenStreetMap-Mitwirkende) _____ 19

Abb. 2.5: UFP-Messstation in Oberrad _____ 20

Abb. 2.6: Standort der Wetterstation Frankfurt/Main vom Deutschen Wetterdienst (Stations-ID: 1420, dunkelblaue Markierung) (© OpenStreetMap-Mitwirkende) _____ 21

Abb. 2.7: Start- und Landebahnen des Frankfurter Flughafens mit jeweiliger Bezeichnung bei Betriebsrichtung Ost bzw. West . (Fraport AG, 2020a) _____ 23

Abb. 2.8: Alternierende Nutzung der Start- und Landebahnen zu Nachtrandzeiten. (Fraport AG, 2015) _____ 24

Abb. 2.9: Abflugrouten (70° : gelbe Linien, 180° : grüne Linien) bei BR07 (oben) und Anflugrouten (durchgezogene blaue Linien, Landung in Pfeilrichtung) bei BR25 (unten). Die roten Punktmarkierungen geben Orte von Lärmmessstationen an. Die Markierungen „44“ und „45“ entsprechen in etwa den Standorten der UFP-Messstationen in Sachsenhausen (44) und Oberrad (45). (Fraport AG, 2020a, 2020b) _____ 25

Abb. 2.10: Einteilung der Windrose in vier Windsektoren für die Betrachtung von Landungen. Die Windsektoren sind hier auf 1° genau angegeben. _____ 32

Abb. 2.11: Windsektoren für die Betrachtung von Landungen (schwarze Linien), beispielhaft eingezeichnet für die Messstation in Oberrad. Die Windsektoren sind hier auf 1° genau angegeben. (Andere Kartendetails, siehe: Abb. 2.9) _____ 33

Abb. 2.12: Einteilung der Windrose in vier Windsektoren für die Betrachtung von Starts __ 34

Abb. 2.13: Windsektoren für die Betrachtung von Starts (schwarze Linien), beispielhaft eingezeichnet für die Messstation in Oberrad. Die Windsektoren sind hier auf 1° genau angegeben. (Andere Kartendetails, siehe: Abb. 2.9) _____ 34

Abb. 3.1: Häufigkeitsverteilung der sekundlich aufgezeichneten UFP-Messwerte im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020 für Sachsenhausen (oben) und Oberrad (unten). Die Messwerte sind in logarithmisch äquidistante Klassen (Bins) eingeteilt und auf einer logarithmisch eingeteilten x-Achse aufgetragen. Die y-Achse gibt die Anzahl der Sekundenmesswerte für jede Klasse an. Der Balken einer jeweiligen Klasse setzt sich zusammen aus dem Anteil der Messwerte zu Tages- (5:00:01 Uhr – 23:00:00 Uhr, bunt) und Nachtzeiten (23:00:01 Uhr – 5:00:00 Uhr, grau). _____ 42

Abb. 3.2: Verlauf der Tagesmittelwerte der UFP-Messstationen Sachsenhausen und Oberrad im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020 _____ 44

Abb. 3.3: Wochengang der UFP-Konzentration in Sachsenhausen und Oberrad von Montag bis Sonntag im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020 _____ 45

Abb. 3.4: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und -geschwindigkeit. Die Achsen stellen die vier Haupthimmelsrichtungen dar (N: Norden, E: Osten, S: Süden, W: Westen). Die Windgeschwindigkeit wird in radialem Abstand zum Mittelpunkt in m/s angegeben. Die Abgrenzungen der farblich markierten Kästen ergeben sich aus der Einteilung der Windrichtungen in 10er-Grade und der Aufrundung der Windgeschwindigkeit auf ganze Zahlen. _____ 46

Abb. 3.5: Anzahl der Flugbewegungen jeder Bahn am Frankfurter Flughafen im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020, getrennt nach Starts und Landungen. _____ 47

Abb. 3.6: Tagesgänge der Start- und Landefrequenz im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020. Gezeigt ist die durchschnittliche Flugbewegungsanzahl pro 10-min-Intervall. _____ 48

Abb. 3.7: Windabhängige gemittelte UFP-Konzentration zu Tages- (5:00:01 – 23:00:00 Uhr, oben) und Nachtzeiten (23:00:01 – 05:00:00 Uhr, unten) für Sachsenhausen (links) und Oberrad (rechts) in vier Polarplots. Als Datengrundlage wurden alle Sekundenmesswerte im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020 gewählt. Die Achsen stellen die vier Haupthimmelsrichtungen dar (N: Norden, E: Osten, S: Süden, W: Westen). Die Windgeschwindigkeit wird in radialem Abstand zum Mittelpunkt in m/s angegeben. Ausgegraute Bereiche stellen keine repräsentativen

Konzentrationen aufgrund einer zu geringen Datengrundlage dar. Die rot-gestrichelten Linien geben vom jeweiligen Messstandort betrachtet die Außengrenzen des Flughafengeländes an.

49

Abb. 3.8: Polarplots der Nachtzeiten aus Abb. 3.7 mit anderer Farbskalierung. Konzentrationsunterschiede kommen so besser zur Geltung. _____ 50

Abb. 3.9: Anzahl der berücksichtigten 10-min-Mittelwerte jedes Windsektors (Landungen), getrennt nach Tag und Nacht. _____ 51

Abb. 3.10: Tagesgänge der UFP-Konzentrationen in Sachsenhausen und Oberrad (linke y-Achse, k: tausend) und der Landungsanzahl pro 10 Minuten (rechte y-Achse) für jeden Windsektor (Landungen). Der Windsektor ist in jedem Plot oben links dargestellt. Der hell hinterlegte Bereich entspricht den Betriebszeiten des Frankfurter Flughafens (5:00 Uhr – 23:00 Uhr), der grau hinterlegte Bereich entspricht den Zeiten des Nachtflugverbots (23:00 Uhr – 5:00 Uhr). _____ 52

Abb. 3.11: Wahrscheinliche Emissionsbereiche für die Messstationen Sachsenhausen (dunkelroter Bereich) und Oberrad (hellblauer Bereich) bei Wind aus dem Flughafensektor. Die Emissionsbereiche der Messstationen überschneiden sich und bilden einen gemeinsamen Bereich (roter Bereich). (© OpenStreetMap-Mitwirkende; Rose und Jacobi 2019) _____ 60

Abb. 3.12: Anzahl der berücksichtigten 10-min-Mittelwerte jedes Windsektors (Starts), getrennt nach Tag und Nacht. Rote Zahlen: Zu geringe Anzahl für Analyse _____ 61

Abb. 3.13: Tagesgänge der UFP-Konzentrationen in Sachsenhausen und Oberrad (linke y-Achse) und der Startanzahl pro 10 Minuten (rechte y-Achse) für die Windsektoren (Starts) Nordost (oben) und Nordwest (unten). Der Windsektor ist in jedem Plot oben links dargestellt. Der hell hinterlegte Bereich entspricht den Betriebszeiten des Frankfurter Flughafens (5:00 Uhr – 23:00 Uhr), der grau hinterlegte Bereich entspricht den Zeiten des Nachtflugverbots (23:00 Uhr – 5:00 Uhr). _____ 62

Abb. 3.14: Morgendlicher UFP-Konzentrationsverlauf von acht ausgewählten Tagen. In jedem Subplot werden die UFP-Konzentrationen der Messstationen Sachsenhausen und Oberrad, die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit mit jeweils eigener y-Achse untereinander gegen die Zeit aufgetragen dargestellt. Die Aufsetzzeitpunkte der Landungen auf den jeweiligen Landebahnen werden durch senkrechte Linien bei den UFP-Konzentrationen markiert. Der

Flughafensektor ist als Bereich bei der Windrichtung dargestellt. Liegt die Windrichtung innerhalb dieses Bereichs und beträgt die Windgeschwindigkeit währenddessen mindestens 1 m/s, wird das zwischen dem Konzentrationsplot und dem Windrichtungsplot markiert (türkisfarbene Linie)._____ 66

Abb. 3.15: Tagesabschnitte, häufig Wind aus Flughafensektor. In jedem Subplot werden die UFP-Konzentrationen der Messstationen Sachsenhausen und Oberrad, die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit mit jeweils eigener y-Achse untereinander gegen die Zeit aufgetragen dargestellt. Die Aufsetzzeitpunkte der Landungen auf den jeweiligen Landebahnen werden durch senkrechte Linien bei den UFP-Konzentrationen markiert. Der Flughafensektor ist als Bereich bei der Windrichtung dargestellt. Liegt die Windrichtung innerhalb dieses Bereichs und beträgt die Windgeschwindigkeit währenddessen mindestens 1 m/s, wird das zwischen dem Konzentrationsplot und dem Windrichtungsplot markiert (türkisfarbene Linie)._____ 69

Abb. 3.16: Tagesabschnitte mit kurzzeitigen Konzentrationsspitzen an mindestens einem der beiden Standorte. In jedem Subplot werden die UFP-Konzentrationen der Messstationen Sachsenhausen und Oberrad, die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit mit jeweils eigener y-Achse untereinander gegen die Zeit aufgetragen dargestellt. Die Aufsetzzeitpunkte der Landungen auf der Landebahn Nordwest werden durch senkrechte Linien bei den UFP-Konzentrationen markiert. Die Aufsetzzeitpunkte der anderen Landebahnen sind ausgeblendet. Der Flughafensektor ist als Bereich bei der Windrichtung dargestellt. _____ 71

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1: Durchschnittliche Partikelanzahlkonzentrationen von Partikeln im Größenbereich 20 – 800 nm an 17 verschiedenen Standorten in Deutschland. Site: Messstandort, Type: Umgebungstyp, Period: Messzeitraum, N: Partikelanzahl in P/cm ³ , n: Anzahl an Stundenmittelwerten, μ : Mittelwert, σ : Standardabweichung, med: Median, p95: 95-%-Perzentil. (Birmili et al., 2016)	7
Tab. 1.2: Details zu den UFP-Messstandorten aus Abb. 1.6. (Rose and Jacobi 2019)	14
Tab. 2.1: Berechnete Flughöhen der landenden Flugzeuge des Parallelbahnsystems und der Landebahn Nordwest je nach Anflugwinkel bei minimaler horizontaler Entfernung zur jeweiligen Messstation.	26
Tab. 2.2: Bewertungssystem der CPC-Messdaten.	27
Tab. 2.3: Berechnete zeitliche Abstände zwischen Überflugeignissen in Sachsenhausen bzw. Oberrad und Aufsetzzeitpunkt der landenden Flugzeuge auf der jeweiligen Landebahn. Die Flugstrecke entspricht der Distanz, die die Flugzeuge ab minimaler horizontaler Entfernung zur jeweiligen Messstation bis zum Aufsetzpunkt zurücklegen. Für die Berechnungen wurde eine durchschnittliche Landegeschwindigkeit von 250 km/h angenommen.	38
Tab. 3.1: Statistische Größen der sekundlich aufgezeichneten UFP-Messwerte der Messstationen Sachsenhausen und Oberrad im Zeitraum 25.04.2019 – 31.01.2020, getrennt nach Tages- (5:00:01 Uhr – 23:00:00 Uhr) und Nachtzeiten (23:00:01 Uhr – 5:00:00 Uhr).	43
Tab. 3.2: Statistische Größen der in Abb. 3.10 gezeigten UFP-Konzentrationsverläufe von Sachsenhausen und Oberrad für jeden Windsektor (Landungen), getrennt nach Tag und Nacht. Als Datengrundlage wurden die gemittelten 10-min-Mittelwerte der einzelnen Tagesgänge gewählt.	53
Tab. 3.3: Maximale Kreuzkorrelationskoeffizienten mit zugehöriger zeitlicher Verschiebung für alle Windsektoren (Landungen).	56
Tab. 3.4: Mittelwert und Standardabweichung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit des Flughafensektors. Die Datengrundlage bilden alle 10-min-Mittelwerte des Flughafensektors zwischen 5:00 Uhr und 6:00 Uhr.	58

Tab. 3.5: Zeitliche Verschiebungen der ersten Anstiege des Flughafensektors zwischen 5:00 Uhr und 6:00 Uhr, grafisch aus Abb. 3.10 ermittelt. _____ 59

Tab. 3.6: Minimum und Maximum der Windrichtung und Windgeschwindigkeit, sowie berechnete Distanzen zwischen Messstation und Emissionsort. wd: Windrichtung, ws: Windgeschwindigkeit, sd: Standardabweichung, lag: Zeitverschiebung, r min/max: minimale/maximale Distanz zwischen Messstation und Emissionsort. _____ 59

Tab. 3.7: Berechnete maximale Flughöhen der landenden Flugzeuge des Parallelbahnsystems bei unterschiedlichen Anflugwinkeln innerhalb des in Abb. 3.11 ermittelten roten Bereichs, getrennt nach Centerbahn und Südbahn _____ 60

Tab. 3.8: Statistische Größen der in Abb. 3.13 gezeigten UFP-Konzentrationsverläufe von Sachsenhausen und Oberrad für die Windsektoren (Starts) Nordost und Nordwest, getrennt nach Tag und Nacht. Als Datengrundlage wurden die gemittelten 10-min-Mittelwerte der einzelnen Tagesgänge gewählt. _____ 62

Tab. 3.9: Maximale Kreuzkorrelationskoeffizienten mit zugehöriger zeitlicher Verschiebung für die Windsektoren (Starts) Nordost und Nordwest. _____ 64

Literaturverzeichnis

© OpenStreetMap-Mitwirkende. gemäß CC BY-SA-Lizenz. www.openstreetmap.org/copyright

Amirtha, T. (2014). *How The Rise Of The “R” Computer Language Is Bringing Open Source To Science*. Zugriff am 16. Mai 2020, verfügbar unter <https://www.fastcompany.com/3028381/how-the-rise-of-the-r-computer-language-is-bringing-open-source-to-science>

Baldauf, R. W., Devlin, R. B., Gehr, P., Giannelli, R., Hassett-Sipple, B., Jung, H., Martini, G., McDonald, J., Sacks, J. D. & 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). <https://doi.org/10.3390/ijerph13111054>

Birmili, W. (2006). *Räumlich-zeitliche Verteilung, Eigenschaften und Verhalten ultrafeiner Aerosolpartikel (<100nm) in der Atmosphäre, sowie die Entwicklung von Empfehlungen zu ihrer systematischen Überwachung in Deutschland*. Zugriff am 25. Mai 2020, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3114.pdf>

Birmili, W., Weinhold, K., Rasch, F., Sonntag, A., Sun, J., Merkel, M., Wiedensohler, A., Bastian, S., Schladitz, A., Löschau, G., Cyrys, J., Pitz, M., Gu, J., Kusch, T., Flentje, H., Quass, U., Kaminski, H., Kuhlbusch, T. A. J., Meinhardt, F., . . . Fiebig, M. (2016). Long-term observations of tropospheric particle number size distributions and equivalent black carbon mass concentrations in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN). *Earth System Science Data*, 8(2), 355–382. <https://doi.org/10.5194/essd-8-355-2016>

Blume, J. (1970). *Statistische Methoden für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. VDI-Taschenbücher: Bd. 15. VDI-Verl.

Böhning, P. (2006). *Akustische Lokalisierung von Wirbelschleppen*. Zugriff am 25. Mai 2020, verfügbar unter https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/1662/1/Dokument_22.pdf

Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (7. Aufl.). *Springer-Lehrbuch*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10448295> <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12770-0>

- Brasseur, G. P., Cox, R. A., Hauglustaine, D., Isaksen, I., Lelieveld, J., Lister, D. H., Sausen, R., Schumann, U., Wahner, A. & Wiesen, P. (1998). EUROPEAN SCIENTIFIC ASSESSMENT OF THE ATMOSPHERIC EFFECTS OF AIRCRAFT EMISSIONS.
- Brockwell, P. J. & Richard, D. A. (1991). Time Series: Theory and Methods. *Springer Series in Statistics*(Second Edition).
- Carslaw, D., Beevers, S., Ropkins, K. & Bell, M. (2006). Detecting and quantifying the contribution made by aircraft emissions to ambient concentrations of nitrogen oxides in the vicinity of a large international airport. *Atmospheric Environment*, 40(28), 5424–5434.
<http://eprints.whiterose.ac.uk/2449/>
- Carslaw, D. C. (2015). The openair manual - open-source tools for analysing air pollution data. Manual for version 1.1-4. *King's College London*.
- DeCarlo, P. F., Slowik, J. G., Worsnop, D. R., Davidovits, P. & Jimenez, J. L. (2004). Particle Morphology and Density Characterization by Combined Mobility and Aerodynamic Diameter Measurements. Part 1: Theory. *Aerosol Science and Technology*, 38(12), 1185–1205.
<https://doi.org/10.1080/027868290903907>
- EPA. (2019). *Integrated Science Assessment for Particulate Matter*. Zugriff am 25. Mai 2020, verfügbar unter http://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=539935
- Foken, T. (2006). *Angewandte Meteorologie: Mikrometeorologische Methoden* (Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-38204-1> <https://doi.org/10.1007/978-3-540-38204-1>
- Fraport AG. (2020a). *Ab- und Anflugrouten am Frankfurter Flughafen bei Betriebsrichtung 07 (Ostbetrieb)*. Zugriff am 24. Mai 2020, verfügbar unter https://www.fraport.de/de/misc/binaer/nachbarschaft-region/flugverfahren/routenkarte-ostbetrieb-stand--11-03-2020/_jcr_content.file/flugrouten-ab-dem-11-maerz-20---br07-karte-mit-erlaeuterungen.pdf
- Fraport AG. (2020b). *Ab- und Anflugrouten am Frankfurter Flughafen bei Betriebsrichtung 25 (Westbetrieb)*. Zugriff am 24. Mai 2020, verfügbar unter https://www.fraport.de/de/misc/binaer/nachbarschaft-region/flugverfahren/routenkarte-westbetrieb-stand--11-03-2020/_jcr_content.file/flugrouten-ab-dem-11-maerz-20---br25-karte-mit-erlaeuterungen.pdf

- Fraport AG. (2018). *GRI-Bericht 2018*. Zugriff am 25. Mai 2020, verfügbar unter https://www.fraport.de/de/misc/binaer/unternehmen/verantwortung/publikationen/nachhaltigkeitsberichte/2018/gri-und-nachhaltigkeitsbericht/gri-bericht-2018/_jcr_content.file/gri-bericht-2018_final.pdf
- Fraport AG. (o. D.a). *Lärmpausen*. Zugriff am 17. Mai 2020, verfügbar unter https://www.fraport.de/de/nachbarschaft-region/schallschutzprogramme/aktiver-schallschutz.html#id_tab__nachbarschaft-region_schallschutzprogramme_aktiver-schallschutz_laermpausen__/_nachbarschaft-region_schallschutzprogramme_aktiver-schallschutz_laermpausen__par_content_2_1_col__col_2__expandables_containe__items__expandable_item
- Fraport AG. (o. D.b). *Nachbarschaft & Region*. Zugriff am 24. Mai 2020, verfügbar unter <https://www.fraport.de/de/nachbarschaft-region.html>
- GRIMM Aerosol Technik Ainring GmbH & Co. KG. (2019). *CPC-Kalibrierzertifikat (Modell EDM 465)*.
- HEI (2013). Review Panel on Ultrafine Particles: Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles. HEI Perspective 3. *Health Effects Institute*, Boston, MA.
- Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen. (o. D.). *SCHUTZMASSNAHME Wirbelschleppen*. Zugriff am 22. Mai 2020, verfügbar unter <https://wirtschaft.hessen.de/verkehr/luftverkehr/wirbelschleppen>
- Hudda, N., Gould, T., Hartin, K., Larson, T. V. & 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. <https://doi.org/10.1021/es5001566>
- ICAO. (2019). *2019 Environmental Report: Aviation and Environment*. Zugriff am 25. Mai 2020, verfügbar unter [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20\(1\).pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-F1-WEB%20(1).pdf)
- ICAO. (2016). *Airport air quality manual* (1. Aufl.). *Doc / International Civil Aviation Organization / Englische Ausgabe*: Bd. 9889. International Civil Aviation Organization.
- Keuken, M. P., Moerman, M., Zandveld, P., Henzing, J. S. & 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.015>

- 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. & 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. <https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1047012>
- Marowska, L., Moore, M. R. & Ristovski, Z. D. (2004). Health Impacts of Ultrafine Particles - Desktop Literature Review and Analysis.
- Meyer, M. (2009). Anhang B zum Buch: Signalverarbeitung: Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter.
- Meyer-Schuchardt, N. (2012). *Einschränkungen des Nachtflugverkehrs sowie Betriebsbeschränkungen außerhalb der Nachtzeit für die Zivilluftfahrt am Flughafen Frankfurt*. Zugriff am 24. Mai 2020, verfügbar unter https://www.fraport.de/de/misc/binaer/nachbarschaft-region/dialog/aktuelles/news/2014/einschraenkungen-des-nachtflugverkehrs/_jcr_content.file/5-5_betriebsbeschraenkung.pdf
- Newby, D. E., Mannucci, P. M., Tell, G. S., Baccarelli, A. A., Brook, R. D., Donaldson, K., Forastiere, F., Franchini, M., Franco, O. H., Graham, I., Hoek, G., Hoffmann, B., Hoylaerts, M. F., Künzli, N., Mills, N., Pekkanen, J., Peters, A., Piepoli, M. F., Rajagopalan, S. & Storey, R. F. (2015). Expert position paper on air pollution and cardiovascular disease. *European heart journal*, 36(2), 83-93b. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehu458>
- R Core Team. (2014). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Zugriff am 16. Mai 2020, verfügbar unter <http://www.R-project.org/>
- Remmert, J. (2020). *Flugverkehr in Frankfurt geht weiter stark zurück*. FAZ. Zugriff am 25. Mai 2020, verfügbar unter <https://www.faz.net/aktuell/rhein-main/flugverkehr-in-frankfurt-geht-wegen-corona-stark-zurueck-16704694.html>
- Riley, E. A., Gould, T., Hartin, K., Fruin, S. A., Simpson, C. D., Yost, M. G. & Larson, T. (2016). Ultrafine particle size as a tracer for aircraft turbine emissions. *Atmospheric environment (Oxford, England : 1994)*, 139, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.016>
- Rindlisbacher, T. (11. Mai 2017). *Ultrafine Particles from Aircraft Engines and Precautionary Measures*. Switzerland. Federal Office of Civil Aviation.

- Rose, D. & Jacobi, S. (2019). 2. *Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt*. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Zugriff am 25. Mai 2020, verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige_berichte/ufp/UFP-Zweiter_Zwischenbericht_20190819.pdf
- Rose, D. & Jacobi, S. (2018). 1. *Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt*. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Zugriff am 25. Mai 2020, verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige_berichte/ufp/1._Zwischenbericht_HLNUG_Ultrafeinstaub_final_Korrigendum_20180619.pdf
- Sanchez, B. (2019). PARTICULATE MATTER (PM) AND ULTRAFINE PARTICLE (UFP) MEASURED ON PEDESTRIAN WALKWAYS DURING AND AFTER THE NEARBY USE OF LEAF BLOWERS.
- Seinfeld, J. H. & Pandis, S. N. (2006). *ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS: From Air Pollution to Climate Change*.
- Stacey, B. (2019). Measurement of ultrafine particles at airports: A review. *Atmospheric Environment*, 198, 463–477. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.041>
- Unterstrasser, S., Paoli, R., Sölch, I., Kühnlein, C. & Gerz, T. (2013). Dimension of aircraft exhaust plumes at cruise conditions: effect of wake vortices. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 13(11), 30039–30096. <https://doi.org/10.5194/acpd-13-30039-2013>
- VDI-Richtlinie 3786 Blatt 2:2016-11 Umweltmeteorologie. Meteorologische Messungen Wind.
- Wickham, H. (2009). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* (1. Aufl.). Use R. Springer New York.
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T., Miller, E., Bache, S., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D., Spinu, V., . . . Yutani, H. (2019). Welcome to the Tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>