

BACHELORARBEIT
PROFESSUR FÜR MIKROMETEOROLOGIE, PROF. THOMAS
UNIVERSITÄT BAYREUTH

Untersuchung der Strömungsregime und deren Zusammenhang mit Luftschadstoffkonzentrationen in einer Straßenschlucht mit hoher Verkehrsdichte in der Landeshauptstadt München

SOPHIA RAMER



BETREUER
PROF. DR. CHRISTOPH THOMAS

Erklärung zur Urheberschaft

Hiermit erkläre ich, Sophia Ramer, dass ich die nachstehende Arbeit mit dem Titel "Untersuchung der Strömungsregime und deren Zusammenhang mit Luftschadstoffkonzentrationen in einer Straßenschlucht mit hoher Verkehrsdichte in der Landeshauptstadt München" selbstständig verfasst habe. Es handelt sich dabei um Ergebnisse meiner eigenen Untersuchung. Informationen, die direkt oder indirekt aus anderen Quellen entnommen wurden, sind als solche gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde noch nie einem Prüfungsausschuss vorgelegt.

Ort, Datum: _____

Vorname, Nachname: _____

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die zu dieser Bachelorarbeit beigetragen haben. Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Prof. Dr. Christoph Thomas, ohne welchen diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre, für die fachliche Beratung, den wirklich angenehmen Austausch und sein großes Verständnis. Ein weiterer Dank geht an Dr. Wolfgang Babel für die Unterstützung mit der Programmiersprache R. Danke auch dem Projektteam REINELUFFT für das angenehme Klima und die netten Meetings. Ein weiterer Dank geht an meine Familie und meine Freunde für die Unterstützung und Ermutigung.

Inhaltsangabe

Stickstoffdioxid ist ein Reizgas, welches in hohen Konzentrationen für Lebewesen schädlich ist. Verschiedene Grenzwerte, die von der Europäischen Union festgelegt worden sind, werden in der Landeshauptstadt München in der Landshuter Allee regelmäßig überschritten. Um die Belastung für die Anwohner zu minimieren, werden im Zuge der Pilotstudie *REINELUFFT? – Reinigen neue Luftfiltersysteme von urbanem Stickstoffdioxid?* Luftfiltersysteme installiert, welche Luft ansaugen und von NO₂ reinigen. Diese Arbeit hat mithilfe verschiedener meteorologischer Parameter Strömungsregime in der Straßenschlucht analysiert und ihre Abhängigkeit von verschiedenen Bedingungen, wie der herrschenden Großwetterlage, festgestellt. Auch die Stickstoffdioxidkonzentrationen wurden auf Korrelationen mit unterschiedlichen meteorologischen und zeitlichen Parametern untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass der Wind in der Landshuter Allee kanalisiert wird und nur kaum von der gegebenen Großwetterlage abhängig ist. Trotzdem haben Windrichtung und -geschwindigkeit eine große Rolle auf die NO₂-Konzentration in der vielbefahrenen Straße. Vor allem gilt, dass eine höhere Windgeschwindigkeit zu geringeren Stickstoffdioxidwerten führt. Außerdem bringen Winde die nicht aus der, durch die Kanalisierung resultierenden, Nordrichtung wehen, Luft mit geringerer Schadstoffbelastung mit sich. Höhere Temperaturen bzw. Sommermonate korrelieren mit höheren Stickstoffdioxidkonzentrationen. Gleiches gilt für stabile Wetterlagen in Sommer und Winter. Des Weiteren werden die höchsten NO₂-Konzentrationen hauptsächlich am Nachmittag erfasst, während vor allem nachts die Stickstoffdioxidbelastung in der Landshuter Allee am geringsten ist.

Abstract

Nitrogen dioxide is an irritant gas that is harmful to living organisms in high concentrations. Various limit values set by the European Union are regularly exceeded in the state capital Munich in the Landshuter Allee. In order to minimize the burden on residents, the pilot study REINELUFFT? - Do new air filter systems clean urban nitrogen dioxide? air filter systems are installed, which suck in air and clean it from NO₂. This work used various meteorological parameters to analyze flow regimes in the street canyon and determine their dependence on various conditions, such as the prevailing large-scale weather. Nitrogen dioxide concentrations were also examined for correlations with different meteorological and temporal parameters. It was found that the wind in the Landshuter Allee is channeled and only hardly dependent on the given large-scale weather situation. Nevertheless, wind direction and speed have a major role on the NO₂ concentration in the busy street. In particular, it is true that higher wind speed leads to lower nitrogen dioxide levels. In addition, winds that do not blow from the north direction resulting from channelization bring air with lower pollution levels. Higher temperatures or summer months correlate with higher nitrogen dioxide concentrations. The same applies to stable weather conditions in summer and winter. Furthermore, the highest NO₂ concentrations are mainly recorded in the afternoon, while especially at night the nitrogen dioxide pollution is lowest in the Landshuter Allee.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung zur Urheberschaft	ii
Danksagung	iii
Inhaltsangabe	iv
Abstract	v
1. Einleitung	1
1.1. Stickoxidbelastung in Städten	1
1.2. Pilotstudie REINELUFFT	2
2. Forschungsfragen.....	4
3. Theoretische Grundlagen	5
3.1. Meteorologische Bedingungen in München.....	5
3.2. Stadtmeteorologische Grundlagen	6
3.3. Großwetterlagen.....	9
3.4. Stickoxide und Ozon.....	10
4. Methodik.....	11
4.1. Standort.....	11
4.2. Ultraschallanemometer-Messtechnik.....	12
4.3. Taupunkttemperatur.....	13
4.4. Datenanalyse.....	14
4.4.1. Datensätze	14
4.4.2. Nachbearbeitung der Daten	15
5. Ergebnisse und Diskussion.....	18
5.1. Großwetterlagen	18
5.2. Windrichtung und Windgeschwindigkeit.....	18
5.3. Abhängigkeit der Schadstoffkonzentrationen von zeitlichen und meteorologischen Parametern sowie von der herrschenden Großwetterlage	31
5.4. Bedingungen bei extremer Stickstoffdioxidkonzentration	42
6. Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	45
Quellenverzeichnis	47
Abbildungsverzeichnis	49
Anhang.....	52

1. Einleitung

1.1. Stickoxidbelastung in Städten

Stickoxide (NO_x) führen zu einer Vielzahl negativer Auswirkungen auf die Umwelt. Unter anderem sind sie für die Ozonbildung mitverantwortlich und tragen zur sekundären Feinstaubbelastung bei indem die Gase, in der Atmosphäre oxidieren, wodurch schwerflüchtige Moleküle entstehen, welche durch Ablagerung auf Feinstaubpartikeln deren Gesamtmasse erheblich vergrößern (Dommen, 2017; Umweltbundesamt, 2020). NO_x entsteht hauptsächlich bei Verbrennungsprozessen in Motoren, somit macht der Verkehr ca. 43% der bundesweiten Emissionen aus. Besonders in Städten mit vielbefahrenen Straßen und wenig ausgleichender Grünfläche belasten die anthropogen erhöhten Konzentrationen auch den Menschen direkt (Santiago et al., 2017). Bei hohen Konzentrationen an Stickoxiden lassen sich vermehrt Atemnot, Husten, Bronchitis, steigende Anfälligkeit für Atemwegsinfekte und Lungenfunktionsminderungen nachweisen (Umweltbundesamt, 2020). Daneben können auch Herz-Kreislauf-Erkrankungen, sowie 15 % der Asthmafälle in Deutschland im Jahr 2014 auf die Belastung mit Stickstoffdioxid zurückgeführt werden (Tobollik, 2018). Um die menschliche Gesundheit zu schützen, wurde 2008 ein 1-Stunden-Stickstoffdioxidgrenzwert (NO_2) von $200 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ von der Europäischen Union eingeführt, welcher pro Jahr an einer Messstelle nicht öfter als 18-mal überschritten werden darf. Da Stickoxide in der Atmosphäre auch Schwefeldioxid oxidieren und zu höher oxidierten Verbindungen wie Salpetersäure konvertieren, tragen sie zur Bildung von Saurem Regen und somit auch zur Versauerung von Böden und Gewässern bei (Seinfeld and Pandis, 2012). Deshalb gibt es auch zum Schutz der Vegetation einen Grenzwert von $30 \mu\text{g m}^{-3} \text{NO}_x$ als Jahresmittel. Der Jahresmittelwert für Stickstoffdioxid für die Außenluft beträgt $40 \mu\text{g m}^{-3}$ und wurde von den EU-Mitgliedsstaaten 1999 beschlossen und 2008 bestätigt. Ein weiteres Gas, welches in hohen Konzentrationen zu gesundheitlichen Belastungen führt, ist Ozon. Durch eine erhöhte Aufenthaltsdauer in ozonbelasteter Luft kann es zu Atemwegsbeschwerden, verminderter Lungenfunktion, Tränenreiz und Kopfschmerzen kommen. Deshalb gibt es auch für dieses Reizgas einen EU-Zielwert von $120 \mu\text{g m}^{-3}$ als 8-Stunden-Mittelwert (Umweltbundesamt, 2021b). Laut der Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Luftqualität und saubere Luft für Europa vom 21. Mai 2008 sollen die Schadstoffe direkt an der Quelle

bekämpft werden, effiziente Maßnahmen zur Emissionsminderung ermittelt und auch auf nationaler sowie lokaler Ebene angewendet werden (Umweltbundesamt, 2021b).

1.2. Pilotstudie REINELUFFT

Obwohl die NO_2 -Werte seit 2019 abgenommen haben, wird der allgemeine Jahresgrenzwert von $40 \mu\text{g m}^{-3}$ in der Landshuter Allee in München weiterhin deutlich überschritten (Umweltbundesamt, 2021b). Er liegt 2020 weiterhin bei $54 \mu\text{g m}^{-3}$ und ist damit mit Abstand der höchste Wert deutschlandweit (Umweltbundesamt, 2021a).

Diese Forschungsarbeit ist Teil der Pilotstudie REINELUFFT. In dieser Studie werden aktive Luftreinigungssysteme in der Landshuter Allee in München installiert. Ziel des Projektes ist es festzustellen, ob diese Luftreinigungssysteme effektiv die Außenluft von Stickoxiden reinigen und so eine technische Möglichkeit bieten, die gesetzlichen Grenzwerte besser einzuhalten. Diese wissenschaftliche Arbeit befasst sich mit den grundlegenden Wetter- bzw. Klimatelementen die benötigt werden, um die mikrometeorologischen Bedingungen in der Straßenschlucht zu beschreiben und diese in Abhängigkeit der Großwetterlagen zu charakterisieren. Derartige mikrometeorologischen Bedingungen sind wichtig, weil sie die Durchmischung der atmosphärischen Boden- bzw. Prandtl-Schicht, also der Luft in den untersten 20 m der Troposphäre, und somit die Ausbreitung von Aerosolen und Schadstoffen definieren. Je nach Windstärke, Windrichtung und Turbulenzintensität verhält sich der Transport der Luft und der Abgase differenziert und wirkt sich somit direkt auf die gemessenen Schadstoffkonzentrationen aus: bei hohen Windgeschwindigkeiten kommt es grundsätzlich zu kleinen Turbulenzwirbeln und einer schnellen Expansion von Schadstoffen und somit punktuell geringeren Konzentrationen (Foken, 2016).

Das Verhalten von Strömungsregimen in Straßenschluchten ist und wird weiterhin viel erforscht (Britter and Hanna, 2003; Vardoulakis et al., 2003; Afiq et al., 2012). Der Straßenabschnitt der Landshuter Allee ist kompakt in den Stadtkörper der Großstadt eingebettet. Somit sind einerseits Veränderungen der Luftströmungen verglichen mit Winden im Umland oder über Dächerniveau einzig aufgrund der Stadtmorphologie zu erwarten. Da die Luftströmung weiter von sehr vielen Parametern in der Straße, wie der

Gebäudehöhe, der Straßenbreite, der Dachstrukturen, von Bäumen sowie von anderen Hindernissen, stark abhängig ist, lässt sich das Regime im Untersuchungsgebiet der Landshuter Allee nicht pauschalisieren, sondern nur empirisch ableiten (Gromke and Blocken, 2015; Santiago et al., 2017; Di Sabatino et al., 2018; Kurppa et al., 2018). Diese Thesis soll deshalb als Grundlage für die REINELUFFT Studie das Strömungsregime und die daraus resultierenden Stickstoffdioxid- und Ozonkonzentrationen in der Landshuter Allee in München charakterisieren. Hierfür wird zunächst auf theoretisches Wissen zur Stadtmeteorologie, zu erwähnten Schadstoffen und zu Großwetterlagen eingegangen. Anschließend wird die Methodik inklusive Datenanalyse erläutert. Hierbei werden historisch aufgezeichnete Wetterelemente von zwei nahe gelegenen Standorten in München zur Charakterisierung eines Strömungsregimes genutzt. Dessen Zusammenhang mit Großwetterlagen und Schadstoffkonzentrationen wird analysiert, um letztendlich ein statistisches Vorhersagewerkzeug zu entwickeln, mit welchem auf Grundlage der Wetterlage auf das Strömungsregime und die NO₂- bzw. O₃-Konzentrationen vor der Installation der Luftreinhaltesysteme geschlossen werden kann.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse dieser Analyse werden zum Schluss dieser Arbeit zusammengefasst. Das Ergebnis kann für weitere Forschungsinhalte der REINELUFFT-Studie verwendet werden.

2. Forschungsfragen

Das Ziel dieser Arbeit ist es anhand der historischen Daten zu ermitteln, ob die Schadstoffkonzentrationen mit den gegebenen Großwetterlagen und weiteren meteorologischen Elementen in der Straßenschlucht Landshuter Allee systematisch in Verbindung stehen.

Hierfür befasst sich diese Arbeit mit fünf Forschungsfragen.

- 1) In wie weit sind die Strömungsverhältnisse in der Landshuter Allee von der Großwetterlage abhängig?
- 2) Wie unterscheiden sich die Strömungsverhältnisse in der Landshuter Allee und an der DWD-Messstation München Stadt voneinander bei gleicher Großwetterlage?
- 3) Wie wirken sich Großwetterlage und Strömungsverhältnisse auf die NO_2 -Konzentrationen in der Landshuter Allee aus?
- 4) Wie wirken sich Großwetterlage und Strömungsverhältnisse auf die O_3 -Konzentrationen am Stachus, einer weiteren Messstation nahe der Landshuter Allee (Abbildung 4) aus?
- 5) Welche meteorologischen Parameter und weitere Bedingungen wie Tageszeit, Wochentag, Jahreszeit, Belaubung, Ozonkonzentration, Lufttemperatur und Taupunkttemperatur beeinflussen die NO_2 -Konzentrationen in der Landshuter Allee?

3. Theoretische Grundlagen

3.1. Meteorologische Bedingungen in München

Die Landeshauptstadt Bayerns liegt im Süden des Bundeslands auf 48° 8' nördlicher Breite. Somit liegt München im Übergangsbereich zwischen atlantisch beeinflusstem feuchtem Klima und trockenem Kontinentalklima. Bei einer Stadtklimaanalyse aus dem Jahr 2014 (Funk, 2014), aus welcher die nachfolgenden Informationen entnommen wurden, wurde festgestellt, dass der Raum München im langjährigen Mittel vor allem von West- oder Ostwinden beeinflusst ist. Dabei korrelieren Windgeschwindigkeiten $>5 \text{ m s}^{-1}$ mit Westwetterlagen. Winde mit geringeren Geschwindigkeiten herrschen meist bei Hochdruckwetterlagen und wehen dann aus südlicher oder östlicher Richtung. Diese Hochdruckwetterlagen, besonders wenn sie in Sommermonaten auftreten, führen folglich zu überdurchschnittlich hohen Wärmebelastungen in den Siedlungsräumen und außerdem zu einer mit deutlich mehr Schadstoffen belasteten Luft, da neben den geringen horizontalen Windgeschwindigkeiten auch der vertikale Austausch zwischen den verschiedenen Luftschichten gehemmt ist. Die Windströmung in München wird jedoch nicht nur durch die Großwetterlagen gesteuert, sondern befindet sich auch im Einflussbereich der Alpen (Abbildung 2). Besonders bei nächtlichen, windschwachen Situationen zeigt sich der Einfluss dieser regionalen Windsysteme, da die Strömung aus Süden, Richtung Gebirge, kommt. Kühle Luft strömt nachts in die Stadt, während tagsüber die Strömung in Richtung des Gebirges verläuft. Dieses Phänomen, welches als „Alpines Pumpen“ bezeichnet wird, entsteht durch die tagsüber schnellere Erwärmung der Alpen. Im Gegensatz dazu entstehen nachts im Gebirge große Mengen an Kaltluft, welche in Richtung München abfließen und den Südwind bewirken. Die meteorologischen Bedingungen am Standort der REINELUFFT-Studie sind demnach von synoptischen Strömungen, regionalen Windsystemen und tagesperiodischen Strömungsgeschehen geprägt.

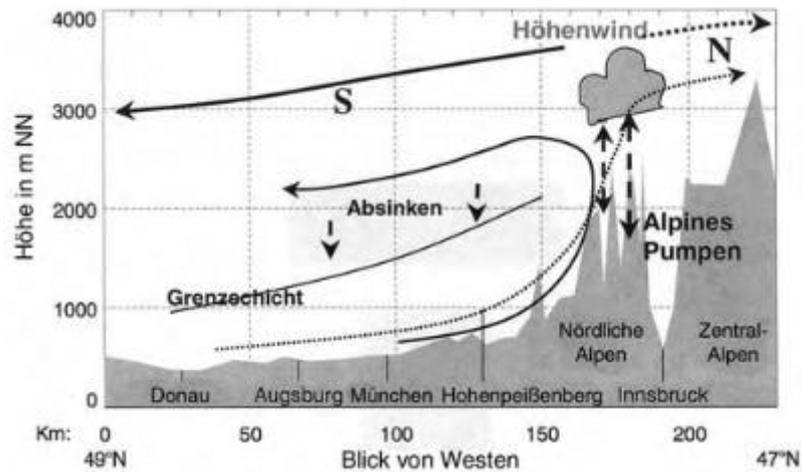


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Strömung bei Alpinem Pumpen im Alpenvorland für zwei Großwetterlagen im 500 hPa Niveau: Südlagen (durchgezogene Linien) und Nordlagen (gepunktete Linien), © (Winkler et al., 2006).

3.2. Stadtmeteorologische Grundlagen

Städte unterscheiden sich in ihrer Energiebilanz, in ihrer Strahlungsbilanz, in ihrem charakteristischem Strömungsfeld und in ihrer Luftqualität vom Umland. Aus diesem Grund hat die WMO 1981 den Begriff Stadtklimatologie eingeführt, welcher beschreibt, dass durch die Bebauung und die Auswirkungen der Gebäude und Bevölkerung das Klima in Städten modifiziert ist (Foken, 2016).

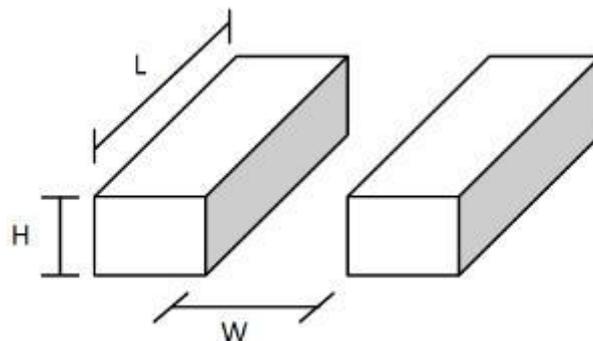


Abbildung 3: Geometrische Straßenschluchten mit Höhe H der Häuser und Breite W der Straße (Afq et al., 2012).

Abgesehen von den modifizierten Strömungsmustern in Städten und besonders in Straßenschluchten, welche für diese Arbeit von größter Relevanz sind, kommt es auch durch die differenzierte Strahlungs- und Energiebilanz zu städtischen Wärmeinseln, also einer erhöhten Temperatur in der Stadt verglichen mit dem Umland (Helbig, 1999). Diese

Temperaturdifferenz ergibt sich durch anthropogene Wärmeproduktion, Schaffung künstlicher Oberflächen mit einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit, geringer Evapotranspiration, welche mit verringerter latenter Wärme einhergeht, eine höhere Absorption aufgrund der Albedo und der Geometrie der städtischen Baukörper und einer erhöhten Gegenstrahlung aufgrund der vermehrten Freisetzung von Gasen und Partikeln in Städten. Der resultierende Effekt einer städtischen Wärmeinsel ist besonders stark bei Hochdruckwetterlagen, im Sommer und in der Nacht. Doch auch die städtische Wärmeinsel ist vom Wind abhängig, da ihr Effekt mit steigender Geschwindigkeit abnimmt. Auf der einen Seite kommt es in Städten zur Zunahme der Böigkeit. Auf der anderen Seite sind Windgeschwindigkeiten verglichen mit Strömungsgeschwindigkeiten auf dem Land im Mittel bis zu 30% geringer, weil die erhöhte Bodenrauigkeit in der Stadt die Strömung abbremst (Helbig, 1999). Es kommt zum häufigeren Auftreten von Windstillen und einer erhöhten Häufigkeit an Schwachwindstunden. Wenn der atmosphärische Austausch niedrig ist, kommt es in Straßenschluchten zur Überwärmung und zur Luftqualitätsminderung (Buccolieri and Hang, 2019). Solche Straßenschluchten oder Canyons werden meist durch ihr Verhältnis Höhe der Gebäude H durch die Breite der Straße W (Abbildung 3) definiert, welches auch maßgeblich Einfluss auf die Winde und Strömungen in der Straße hat (Vardoulakis et al., 2003). Der differenzierte Effekt der Windrichtung über Dachniveau auf diese Strömungen wird im folgenden Absatz im Zusammenhang mit der Schadstoffausbreitung diskutiert. In Folge der Kanalisierung des Windes in Canyons kommt es innerhalb der Straßenschlucht zu einer starken Beeinflussung der Windrichtung (Kuttler, 2004). Ausbreitungsvorgänge in der Atmosphäre werden maßgeblich durch turbulente Vorgänge beeinflusst, welche in Städten vermehrt auftreten. Turbulenz bezeichnet den Gegensatz zu einem laminaren Strömungszustand und ist charakterisiert durch die Bildung und den Zerfall von Wirbeln in einem Fluid. Die in der Atmosphäre stets herrschenden turbulenten Strömungen bewirken den Ausgleich von Luftdruck- oder Lufttemperaturdifferenzen. Während Strahlungswetterlagen ist der Wärmeinseleffekt deutlich höher und infolgedessen die thermische Turbulenz erhöht. Durch diese größere turbulente Strömung kann es dazu kommen, dass die Windgeschwindigkeiten in der Stadt höher sind als im Umland (Kuttler, 2004).

In Städten werden mehr Schadstoffe freigesetzt, wodurch die Lufthygiene negativ beeinflusst wird. Entscheidend für Schadstoffkonzentrationen in Straßenschluchten ist

deren Belüftung, denn bei reduzierten Windgeschwindigkeiten werden beispielsweise Abgase durch den Verkehr in Straßenschluchten viel schlechter verteilt und verdünnt (Kuttler, 2004). Die für die Belüftung benötigten Strömungsverhältnisse sind abhängig von dem Höhen- und Breitenverhältnis der Straße, der Richtung des Straßenverlaufs verglichen mit der Hauptwindrichtung, der Variabilität der begrenzenden Gebäude in ihrer Höhe und Dachneigung sowie von Bäumen und anderen wesentlichen Hindernissen im Canyon. Das Verhältnis der Gebäudehöhe zu der Straßenbreite und die Anströmrichtung haben dabei den größten Einfluss. Wenn das Verhältnis Höhe H /Breite W kleiner als 0,8 ist und die Hauptwindrichtung mit dem Straßenverlauf erfolgt, sind die Straßen ausreichend belüftet. Bei Queranströmung des Windes und größerem Verhältnis H/W nehmen die Schadstoffkonzentrationen in der durchgängig bebauten Straßenschlucht zu. Durch diese rechtwinklige Anströmung kommt es auf der Luv-Seite der Straße zu einer abwärts gerichteten Strömung, in Bodennähe zu einer Strömung entgegen der Überdachwindrichtung und auf der Lee-Seite zu einer aufwärts gerichteten Strömung. Es entsteht ein sogenannter Leewirbel. Dieser ist stark abhängig von der Windgeschwindigkeit über den Gebäuden (Vardoulakis et al., 2003) und dem Höhen-Breiten-Verhältnis der Straße und nimmt eine große Rolle bei der Belüftung ein. Zum einen unterscheiden sich die Schadstoffkonzentrationen auf der Luv- und der Lee-Seite der Straße voneinander. Zum anderen sind die Windgeschwindigkeiten in Bodennähe geringer, wodurch die Emissionen des Verkehrs in Straßenmitte nicht so gut verteilt werden. Hinzu kommt, dass diese Schadstoffe durch den Wirbel länger in der Straßenschlucht verweilen. Verschiedene Studien zeigen höhere Konzentrationen an Schadstoffen in Verbindung mit einem größeren Höhe-Breite-Verhältnis eines Canyons (Helbig, 1999; Kuttler, 2004; Afiq et al., 2012; Kuttler, 2013). Die windinduzierten Strömungsmuster in Straßenschluchten, die durch mikroskalige meteorologische Prozesse dominiert werden, sind demnach entscheidend für die Ansammlung von Schadstoffen (Afiq et al., 2012).

3.3. Großwetterlagen

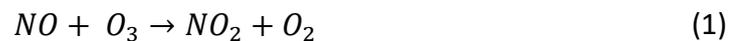
Für den europäischen Raum sind 29 Großwetterlagen nach HESS und BREZOWSKY definiert. Demnach gibt es eine Klassifizierung in die drei Zirkulationsformen zonal, meridional und gemischt, welche wiederum in die bereits erwähnten 29 Zirkulationstypen unterteilt sind. Diese sind durch die Lage von Drucksystemen und Frontalzonen über Europa definiert. Hinzu kommen Aussagen über die Richtung der Luftmassen und den Charakter der Wetterlage über Mitteleuropa, welcher abhängig vom herrschenden Drucksystem antizyklonal oder zyklonal ist. Die in dieser Arbeit relevanten Großwetterlagen sind in Tabelle 1 aufgelistet (Werner and Gerstengabe, 2010).

Tabelle 1: Einteilung der acht häufigsten Wetterlagen im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016 in Zirkulationsform und Großwettertyp.

Zirkulationsform	Abkürzung	Beschreibung Großwetterlage	Großwettertyp	Häufigkeit des Auftretens im Untersuchungszeitraum
zonal	Wa	Westlage über Mitteleuropa überwiegend antizyklonal	West	73 Tage
	Wz	Westlage über Mitteleuropa überwiegend zyklonal	West	52 Tage
gemischt	SWa	Südwestlage über Mitteleuropa überwiegend antizyklonal	Südwest	28 Tage
	NWa	Nordwestlage über Mitteleuropa überwiegend antizyklonal	Nordwest	26 Tage
	HM	Hoch Mitteleuropa	Hoch Mitteleuropa	42 Tage
meridional	TrM	Trog Mitteleuropa	Nord	41 Tage
	TrW	Trog Westeuropa	Süd	39 Tage
	HFz	Hoch Fennoskandien über Mitteleuropa überwiegend zyklonal	Ost	21 Tage

3.4. Stickoxide und Ozon

Stickstoffdioxid und Ozon sind Reizgase, die die Gesundheit der Menschen beeinträchtigen. Stickstoffdioxid (NO_2) entsteht in der Luft aus Stickstoffmonoxid (NO). Dieses wird durch Verbrennungsprozesse freigesetzt und oxidiert zu NO_2 , welches gesundheitsschädlicher als NO ist. Die Oxidation durch Ozon (O_3) läuft sehr schnell ab. Ozon-Konzentrationen werden einerseits durch atmosphärische Austauschprozesse bestimmt, andererseits durch die Stickstoffdioxidkonzentrationen und die verfügbare Lichtenergie. Bei turbulenten Verhältnissen wird viel Ozon eingemischt.



Zwischen Ozon, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid besteht ein photostationäres Gleichgewicht, wie aus Gleichungen 1) - 3) ersichtlich wird (Jacob, 1999; Seinfeld and Pandis, 2012). Während die Stickoxide durch die anthropogenen Emissionen in Stadtzentren erhöht sind, sind die Konzentrationen von Ozon aufgrund des Abbaus durch die verkehrsbedingten Stickoxide niedriger als in Vorstädten (Theakston, 2000).

4. Methodik

4.1. Standort

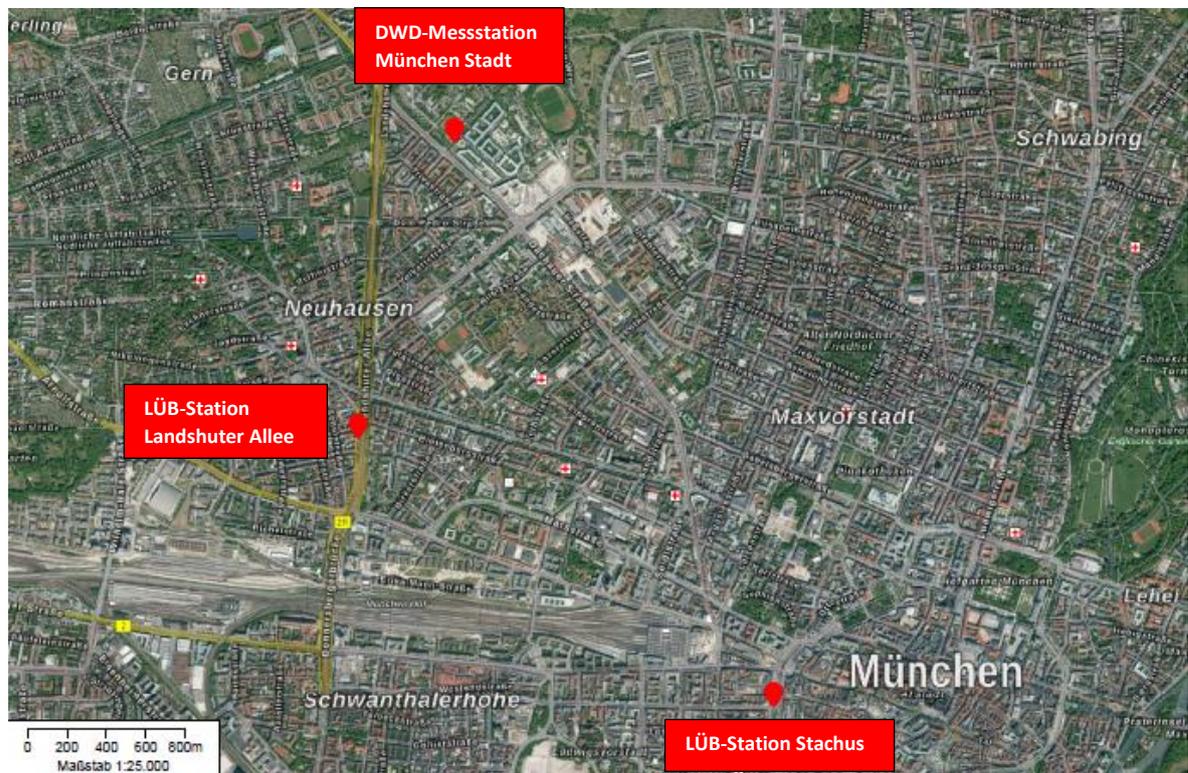


Abbildung 4: Standorte der Messstationen im Stadtbild München. © Bayerische Vermessungsverwaltung 2021, geoportal.bayern.de

Die Pilotstudie REINELUFFT befasst sich hauptsächlich mit einem Straßenabschnitt der Landshuter Allee in München (Abbildung 4, Anhang Abbildung A 1), welche Nord-Süd gerichtet ist. Dieser relevante Abschnitt befindet sich im südlichen Teil der Allee. Dort ist die Straße 53 m breit und charakterisiert durch eine achtspurige Fahrbahn mit zwei Baumreihen zwischen den jeweils zwei äußeren Fahrspuren und den 4 mittleren (Anhang Abbildung A 2). Eine weitere Baumreihe befindet sich zwischen der westlichen Spur bzw. den Parkbuchten neben der Fahrbahn und den ungefähr 15 m hohen Gebäuden mit anschließendem Fußgänger- und Radweg (Abbildung 5). Für die Straßenschlucht ergibt sich damit ein Quotient von Höhe der Gebäude zu Breite der Straße von unter 0,3. In diesem Abschnitt der Allee sollen die Luftreinigungssysteme installiert werden. Des Weiteren befindet sich in diesem Abschnitt die LÜB-Station des Landesamtes für Umwelt Bayern (LfU) zwischen dem westlichen Fahrstreifen und dem Rad- und Fußgängerweg zwischen Bäumen der äußeren Reihe (48,149556 N / 11,536556 E). Auf dieser LÜB-Station sind drei

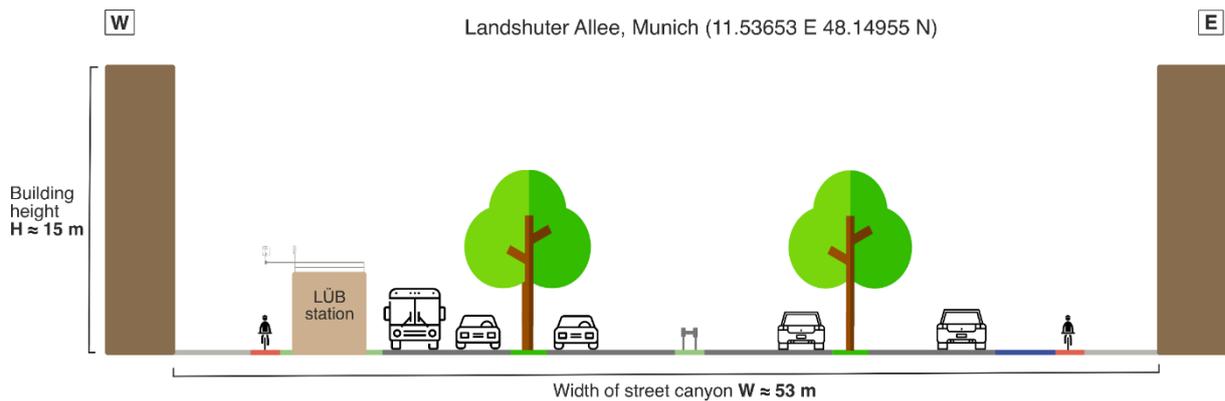


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Straßenschlucht Landshuter Allee auf Höhe der LÜB Station. © Sophie Arzberger

Ultraschallanemometer angebracht. Eines gehört zu der Messausstattung des LfU, die anderen beiden sind für Forschungszwecke der Universität Bayreuth angebracht (Anhang Abbildung A 3). In dieser Arbeit werden die Daten des LfU-Anemometers verwendet. Dieses stammt von dem Unternehmen *Adolf Thies GmbH & Co. KG* und trägt den Namen *Ultrasonic Anemometer 3D*, Typ 4.383x.2x.xxx. Es ist auf der LÜB-Station Landshuter Allee nahe der Straße in circa 3,5 m Höhe angebracht. An der gleichen Station werden Stickstoffdioxidkonzentrationen durch das LfU gemessen. 2,49 km Luftlinie entfernt an der LÜB Station Stachus (48,13732 N / 11,56481 E) in der Sonnenstraße werden vom LfU Ozonkonzentrationen aufgezeichnet. Ein dritter Standort ist 1000 m Luftlinie von der LÜB Station Landshuter Allee entfernt. Dort in der Helene-Weber-Allee 21 befindet sich eine Niederlassung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) (Anhang Abbildung A 4). An dieser Niederlassung werden sehr viele meteorologische Parameter erfasst, unter anderem Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und verschiedene Feuchte Maße wie die Taupunkttemperatur. Die Messgeräte sind mit einiger Entfernung von Hindernissen angebracht, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen. Deshalb dienen die Daten von diesem Standort als Vergleich und Gegenüberstellung zu den Daten aus der Landshuter Allee.

4.2. Ultraschallanemometer-Messtechnik

Ultraschallanemometer (USA) messen mit Schallwellen, die außerhalb des hörbaren Bereichs liegen (20kHz-40kHz). Das Messgerät besteht aus mehreren gepaarten Transceivern. In der Regel, sowie auch bei den drei USA vor Ort, werden 3 Messstrecken verbaut. Wenn der Wind in Richtung des ausgesendeten Ultraschallimpulses weht, kommt

die Schallwelle am Ende der Messstrecke beschleunigt an. Der Ultraschallimpuls der dann entgegen der Windrichtung ausgesendet wird, kommt verzögert beim anderen Transceiver an. Aus der Differenz der Laufzeiten der Pulse lässt sich anschließend die Windgeschwindigkeit bestimmen. Mit der mittleren Laufzeit des akustischen Luftpulses kann außerdem die Schalltemperatur T_S [K] (Gleichung 4; Kaimal and Gaynor, 1991) bestimmt werden, welche fast identisch mit der virtuellen Temperatur T (Gleichung 5; Kaimal and Gaynor, 1991) ist, weshalb man Ultraschallanemometer ebenfalls nutzt, um diese zu ermitteln (Foken, 2016).

$$T_S = T \left(1 + \frac{0,32e}{p} \right) \quad (4)$$

$$T_v = T (1 + 0,61q) = T \left(1 + \frac{0,38e}{p} \right) \quad (5)$$

Dabei steht e für den Wasserdampfdruck in Luft [hPa], p für den absoluten Luftdruck [hPa] und q für die spezifische Feuchte [kg kg^{-1}] und für diese gilt $q \cong \frac{0,622e}{p}$.

4.3. Taupunkttemperatur

Die Taupunkttemperatur T_d (Gleichung 7; Foken, 2016) erhält man, wenn man ein Luftteilchen isobar bis zur Kondensation abkühlt. Somit beträgt die Luftfeuchtigkeit an diesem Taupunkt 100 %. Der Taupunkt liegt höher, je mehr Wasserdampf die Luft enthält. So kann der Taupunkt der Bestimmung der absoluten Luftfeuchtigkeit dienen. Folglich ist die Taupunkttemperatur ein Maß für den Feuchtegehalt der Luft. Um diese maximale spezifische Feuchte zu berechnen, wird zunächst der Sättigungsdampfdruck $e_s(t)$ [hPa] benötigt, welcher mithilfe der aktuellen Lufttemperatur t [°C] und den Konstanten C_1 , C_2 und C_3 für die Phasen Wasser oder Eis nach der Magnus-Formel (Foken, 2016)

$$e_s(t) = C_1 \cdot \exp\left(\frac{C_2 \cdot t}{C_3 \cdot t}\right) \quad (6)$$

berechnet werden kann. Die Taupunkttemperatur T_d [K] ist weiter abhängig vom Wasserdampfdruck e [hPa], der Temperatur T [K], der spezifischen Gaskonstante für Wasser R_W [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] und der Verdampfungswärme für Wasser $\lambda(t) = 2500827 - 2360 t$ [J kg^{-1}].

$$T_d = \left[\frac{1}{T} - \frac{R_W}{\lambda(t)} \cdot \ln\left(\frac{e}{e_s(t)}\right) \right]^{-1} \quad (7)$$

4.4. Datenanalyse

4.4.1. Datensätze

Die Datensätze, die in dieser Studie analysiert wurden, umfassen den Zeitraum vom 24. Juni 2015 bis zum 12. Dezember 2016. Dieser Zeitraum wurde gewählt, weil das LfU für keinen längeren Zeitraum durchgängig die meteorologischen Parameter Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der LÜB Station Landshuter Allee erfasst hat. Alle weiteren Datensätze wurden auf die Länge dieser Ausgangsdaten angepasst. Die Messwerte der Wetterelemente liegen in halbstündiger Auflösung vor. Dabei stehen die Werte für Windrichtung und -geschwindigkeit für den Mittelwert des Zeitraums, der zu diesem Zeitpunkt endet.

Tabelle 2: Differenzierung der Datensätze.

LfU Anemometer Landshuter Allee = Datensatz 1	24.06.2015 – 12.12.2016 halbstündig	Windrichtung [°] Windgeschwindigkeit [m s ⁻¹]
Deutscher Wetterdienst CDC- OpenData München Stadt = Datensatz 2	24.06.2015 – 12.12.2016 stündig	mittlere Windgeschwindigkeit [m s ⁻¹] mittlere Windrichtung [°] höchste Windspitze [m s ⁻¹] Lufttemperatur in 2m Höhe [°C] Taupunkttemperatur in 2m Höhe [°C]
LfU Landshuter Allee	2015 – 2016 Stundenmittelwerte	NO ₂ -Konzentrationen [µgm ⁻³]
LfU Stachus	2015 – 2016 Stundenmittelwerte	O ₃ -Konzentrationen [µgm ⁻³]
Deutscher Wetterdienst	2015 – 2016 Tageswerte	Großwetterlagen nach Hess & Brezowsky

Die Datensätze des LfU zu Stickstoffdioxidkonzentrationen an der Landshuter Allee und zu Ozonkonzentrationen am Stachus lagen hingegen als Stundenmittelwerte vor und wurden linear interpoliert. Auch dabei sind die Werte für einen Zeitstempel das Mittel aus dem abgeschlossenen Zeitraum.

Im Vergleichsdatensatz des Deutschen Wetterdienstes von der Messstation München Stadt liegen die Parameterdaten (Tabelle 2) ebenfalls stündlich vor (DWD, 2021a).

Die Großwetterlagen sind für jeden Tag archiviert und wurden ebenfalls aus den Daten des Deutschen Wetterdienstes übernommen (DWD, 2021b).

4.4.2. Nachbearbeitung der Daten

Zu Beginn der Analyse mussten die verschiedenen Datensätze (Tabelle 2) in das Datenanalysetool R-Studio eingelesen werden. Diese App ist eine Entwicklungsumgebung und eine Benutzeroberfläche für die statistische Programmiersprache R (Version 4.1.1).

Alle Zeitangaben der Datensätze beziehen sich einheitlich auf die mitteleuropäische Zeit (MEZ) oder umgangssprachlich Winterzeit. Die Daten wurden für den Standort Landshuter Allee auf einer 30-Minuten-Basis aggregiert. Die Datensätze der Stickstoffdioxid- und Ozonkonzentrationen sowie der Großwetterlagen wurden dabei linear interpoliert, um sie an das vom Datensatz 1 gegebene 30-Minuten-Intervall anzupassen. Die Datensätze wurden bei Betrachtung des Standortes München Stadt nur für stündliche Werte analysiert und nur der Datensatz der Großwetterlagen musste darauf angepasst werden. Die Analyse des Strömungsregimes am Standort Landshuter Allee und am Standort München Stadt wurden immer separat durchgeführt. Für Datensatz 1 und Datensatz 2 wurden gleiche Schritte durchgeführt.

Zur Vereinfachung wurden die Windrichtungen in die vier Sektoren „Nord“, „Ost“, „Süd“ und „West“ unterteilt (Tabelle 3). Das Jahr wurde in die Jahreszeiten „Frühling“, „Sommer“, „Herbst“ und „Winter“ unterteilt. Diese Kategorisierung erfolgte nach den Kriterien der meteorologischen Jahreszeiten und umfasst demnach immer drei komplette Monate (Tabelle 4). Um tageszeitliche Änderungen festzustellen, wurde ein Tag in fünf verschiedene Zeiträume eingeteilt, welche sich in den geschätzten Bedingungen Verkehrsaufkommen und Sonnenlichtenergie unterscheiden (Tabelle 5). Da davon auszugehen ist, dass das Verkehrsaufkommen tagesabhängig ist, wurde eine weitere Einteilung in die Faktoren „Arbeitstag“, also von Montag bis Freitag, und „Wochenende“, also Samstag und Sonntag, vorgenommen. Des Weiteren wurde das Jahr nach dem Kriterium unterteilt, ob die Bäume voraussichtlich Blätter tragen oder nicht. Der Faktor

„belaubt“ umfasst Juni bis September und der Faktor „kahl“ die Monate Dezember bis März. Um die mittlere Windrichtung an den zwei Standorten feststellen zu können, wurde die gegebene Windrichtung in Grad zunächst zu Bogenmaß konvertiert und zusammen mit der Windgeschwindigkeit in kartesische Koordinaten umgerechnet. Anschließend konnte aus den Vektoren ein Mittel berechnet werden, welches danach wieder in eine Windrichtung mit Gradangabe umgerechnet werden konnte.

Tabelle 3: Unterteilung der Windrichtungen in frei gewählte Sektoren.

Bezeichnung Windsektor	Windrichtung
Nord	0° - 60°; 320° - 360°
Ost	60° - 120°
Süd	120° - 225°
West	225° - 320°

Tabelle 4: Unterteilung in Jahreszeiten nach meteorologischen Standards.

Bezeichnung Jahreszeiten	Monate
Frühling	März, April, Mai
Sommer	Juni, Juli, August
Herbst	September, Oktober, November
Winter	Dezember, Januar, Februar

Tabelle 5: Unterteilung in Tageszeiträume nach den Faktoren Verkehrsaufkommen und Lichtenergie.

Einteilung	Zeitraum
Tagesbeginn bin geringer Lichtintensität	01:00 Uhr – 05:59 Uhr
Morgendlicher Berufsverkehr	06:00 Uhr – 09:59 Uhr
Mittagszeit mit größter Lichtintensität	10:00 Uhr – 14:59 Uhr
Feierabendverkehr	15:00 Uhr – 18:59 Uhr
Tagesende mit geringer Lichtintensität	19:00 Uhr – 00:59 Uhr

Für beide Standorte wurden danach die Abhängigkeit verschiedener Parameter wie Windgeschwindigkeit und NO₂-Konzentration voneinander untersucht. Vor allem der Einfluss der definierten Kriterien wurde betrachtet. In einem separaten Schritt wurden auch die Großwetterlagen in ihrem Auftreten statistisch unabhängig analysiert.

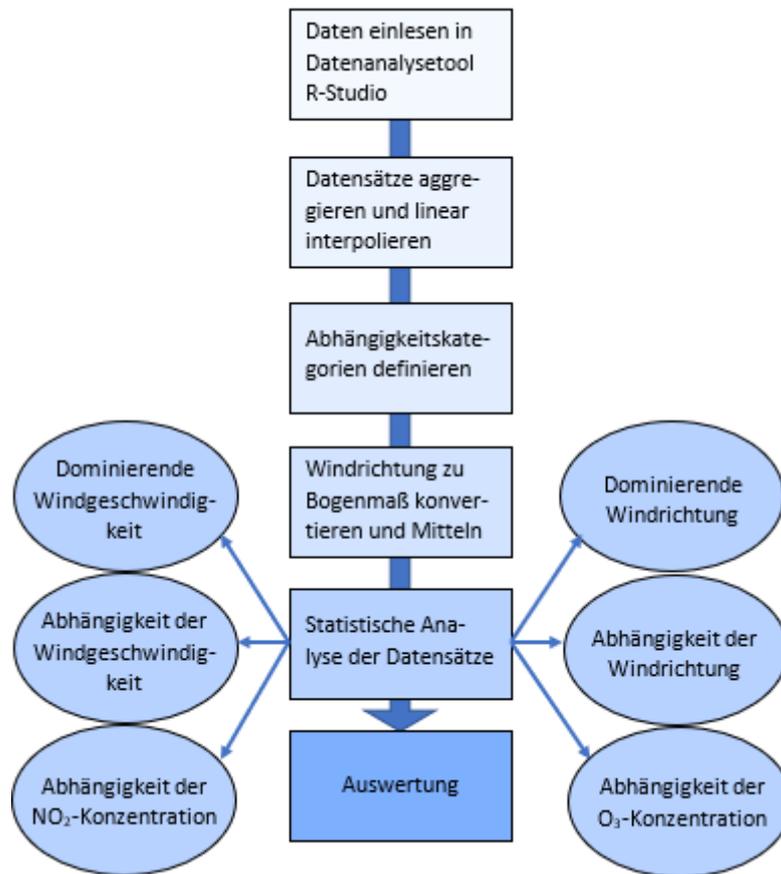


Abbildung 6: Statistisches Vorgehen bei der Analyse der Datensätze.

Das Vorgehen wird mithilfe des Flussdiagrammes (Abbildung 6) graphisch zusammengefasst.

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1. Großwetterlagen

Im erfassten Zeitraum vom 24.06.2015 bis zum 12.12.2016 wurden für Deutschland 24 Großwetterlagen nach HESS und BREZOWSKY erfasst (Anhang Abbildung A 5). Acht von ihnen kamen in diesem Zeitraum an mehr als 20 Tagen vor. Diese lauten in abnehmender Häufigkeit „Wa“ (überwiegend antizyklonale Westlage Mitteleuropa), „Wz“ (überwiegend zyklonale Westlage Mitteleuropa), „HM“ (Hoch Mitteleuropa), „TrM“ (Trog Mitteleuropa), „TrW“ (Trog Westeuropa), „SWa“ (überwiegend antizyklonale Südwestlage), „NWA“ (überwiegend antizyklonale Nordwestlage) und „HFz“ (Hoch Fennoskandien, Mitteleuropa überwiegend zyklonal). Deutschland liegt in diesem Zeitraum somit meistens in einer Westwindwetterzone (Tabelle 1).

Die Abhängigkeit der Strömungsregime und Schadstoffkonzentrationen von der herrschenden Großwetterlage wird im Folgenden untersucht. Dabei ist zu beachten, dass bei diesen Analysen auch Tage, an denen ein Wechsel der Großwetterlage stattgefunden hat, wie stationäre Bedingungen betrachtet werden. Die Differenzen zwischen den Analysen bei stationären Bedingungen, also jeweils ohne den ersten und den letzten Tag einer Großwetterlage, und bei instationären Bedingungen sind so gering, dass in dieser Arbeit alle Tage betrachtet wurden. So musste der Datenpool nicht minimiert werden.

5.2. Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Die Annahme der Dominanz von Westwinden wird mit Abbildung 7 gestützt. An der Messstation München Stadt des Deutschen Wetterdienstes wurden zwischen Juni 2015 und Dezember 2016 am häufigsten Winde aus Westen aufgezeichnet. Da im langjährigen Mittel die zweithäufigste Windrichtung Osten ist, stimmt das Ergebnis mit dem Ergebnis der Stadtklimaanalyse im Jahr 2014 überein (Funk, 2014). Die gemessenen Windgeschwindigkeiten betragen meistens etwa 2 m s^{-1} . Es konnten jedoch auch Windspitzen bis zu 24 m s^{-1} erreicht werden. Im stündlichen Mittel war $11,9 \text{ m s}^{-1}$ der maximale Wert (Anhang Abbildung A 6).

Aus den Messdaten aus der Landshuter Allee lassen sich diese Fakten nicht herauslesen. Abbildung 7 lässt fälschlicherweise darauf schließen, dass in München vorwiegend

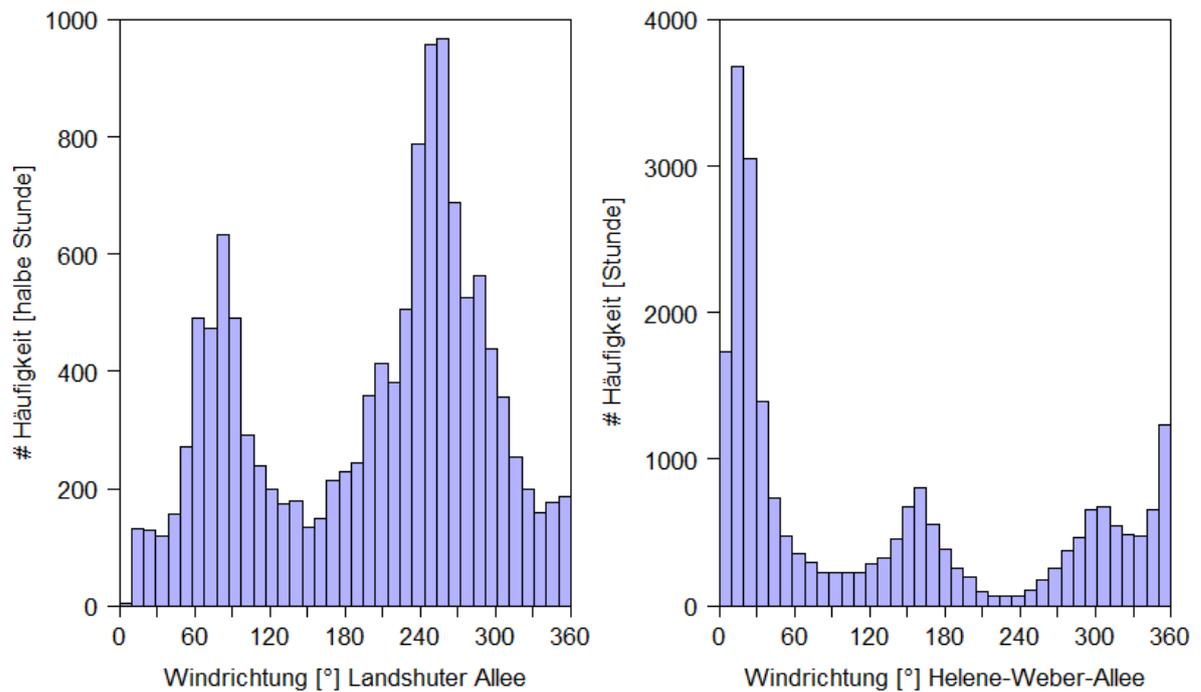


Abbildung 7: Häufigkeitsverteilung der gemessenen Windrichtungen an der DWD-Messtation München Stadt als Stundenmittelwerte (rechts) und der halbstündig gemessenen Windrichtungen an der LÜB-Station Landshuter Allee (links) im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

Nordwinde gefolgt von Südwinden wehen. Das liegt jedoch daran, dass der Wind im Canyon mit dem Verlauf der Straße strömt. Winde aus Westen werden kaum verzeichnet, da dort direkt eine Gebäudereihe steht. Da das Anemometer auch kaum Winde aus östlicher Richtung erfasst, lässt sich darauf schließen, dass sich in der Straßenschlucht Landshuter Allee kein Lee-Wirbel ausbildet. Das lässt sich mit der in Kapitel 3.2 skizzierten Theorie in Einklang bringen, weil das Verhältnis von Straßenbreite zu Gebäudehöhe mit einem Wert von ca. 0,28 viel zu klein ist (Abbildung 5). Bei derart breiten Schluchten mit $H/W < 0,3$ sind die Gebäude so weit voneinander entfernt, dass sie nur als Rauigkeitselemente wirken und die Luft nach der Überwindung des windgerichteten Gebäudes bereits ausreichend absinkt (Vardoulakis et al., 2003). Die gemessenen Winde in der Landshuter Allee erreichten maximale Windgeschwindigkeiten von $4,8 \text{ m s}^{-1}$, wobei der Großteil der Daten jedoch Geschwindigkeiten von unter 2 m s^{-1} belegt (Anhang Abbildung A 7).

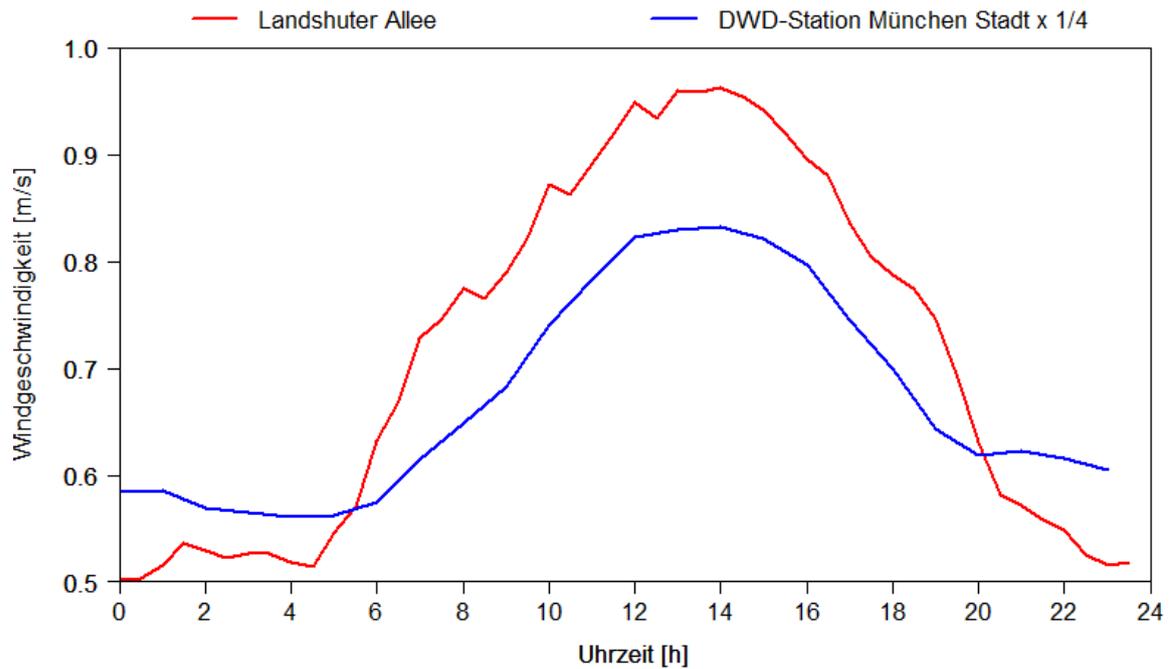


Abbildung 8: Mittlerer Tagesgang der gemessenen Windgeschwindigkeiten an der LÜB-Station Landshuter Allee (rot) und an der DWD-Messstation München Stadt (blau) im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

Dass die Windgeschwindigkeiten sowohl in der Landshuter Allee als auch an der Messstation München Stadt abhängig von der Tageszeit sind, zeigt Abbildung 8. Während nachts die geringsten Windgeschwindigkeiten gemessen werden, steigen die Werte tagsüber an und erreichen am frühen Nachmittag ihr Maximum. Diese höheren Geschwindigkeiten tagsüber als nachts sind ein bekanntes Phänomen. Während zur Mittagszeit die Sonneneinstrahlung am höchsten ist und meist labile Schichtungsverhältnisse vorliegen, kommt es zu Konvektionsprozessen. Grund dafür sind die Turbulenzen, die sich unter diesen Bedingungen stärker entwickeln können. Die Konvektion führt dazu, dass Luftpakete mit geringerer Geschwindigkeit von Bodennähe nach oben und Luftpakete mit höherer Windgeschwindigkeit nach unten transportiert werden. So kommt es zur Zunahme der Windgeschwindigkeit in Bodennähe. Da die bodennahen Schichtungsverhältnisse nachts deutlich stabiler sind, kommt es deutlich weniger zum Luftaustausch der verschiedenen Höhengniveaus. Die Windgeschwindigkeit in der Höhe hat weniger Effekt auf die Luftmassen in Bodennähe. Durch diese thermische und dynamische Entkoppelung kommt es nicht nur in der Landshuter Allee zu einer nächtlichen Abnahme der Windgeschwindigkeit (Hupfer et al., 2005). Außerdem führt die Absorption der kurzwelligeren solaren Strahlung zur Erwärmung städtischer Oberflächen. Je nach Albedo

und Einstrahlwinkel findet dieser Effekt der Temperaturzunahme differenziert statt, sodass sich lokale Druckgradienten im Stadtkörper ausbilden. Die Folge ist erneut eine stärkere Luftströmung (Hupfer et al., 2005).

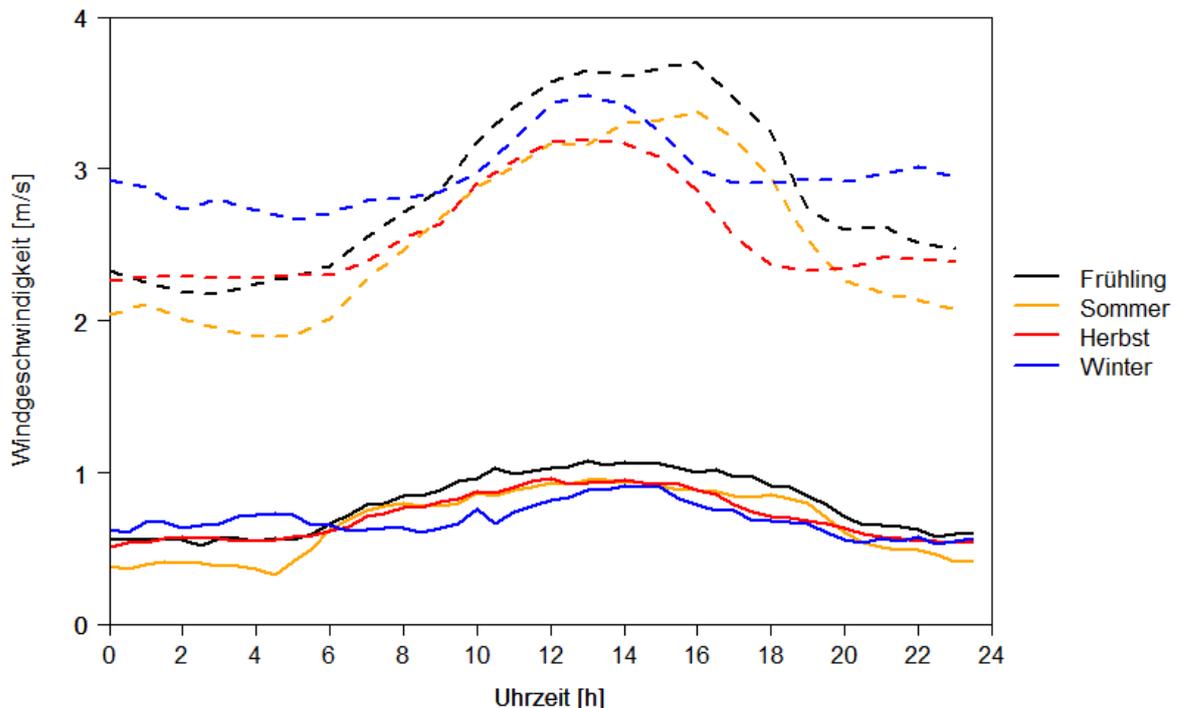


Abbildung 9: Mittlerer Tagesgang der gemessenen Windgeschwindigkeiten an der LÜB-Station Landshuter Allee (Linie durchgezogen) und an der DWD-Messstation München Stadt (Linie gestrichelt) in Abhängigkeit von der Jahreszeit im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

Diesen tageszeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit sieht man auch bei der Betrachtung der Winde in Abhängigkeit von der meteorologischen Jahreszeit (Abbildung 9). Dabei sind die Differenzen der mittleren Geschwindigkeit tagsüber und nachts im Winter geringer als im Sommer. Auch diese Beobachtung ist bereits bekannt (Schüepp and Urfer, 1962; Nolz et al., 2015). Grund dafür ist erneut, dass die deutlich höhere Sonnenenergie im Sommer zu mehr Turbulenzen führt als im Winter zur Mittagszeit und die Temperaturdifferenzen zwischen Tages- und Nachtsituation größer sind. Die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten werden sowohl in der Landshuter Allee als auch in der Helene-Weber-Allee im Frühling zur Mittagszeit verzeichnet. Nachts werden im Mittel die niedrigsten Windgeschwindigkeiten in den Monaten Juni bis August und die höchsten Werte im Winter gemessen. Eine zusammenfassende Darstellung dieser zeitlichen

Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit kann dem Anhang mit Abbildung A 9 und Abbildung A 10.

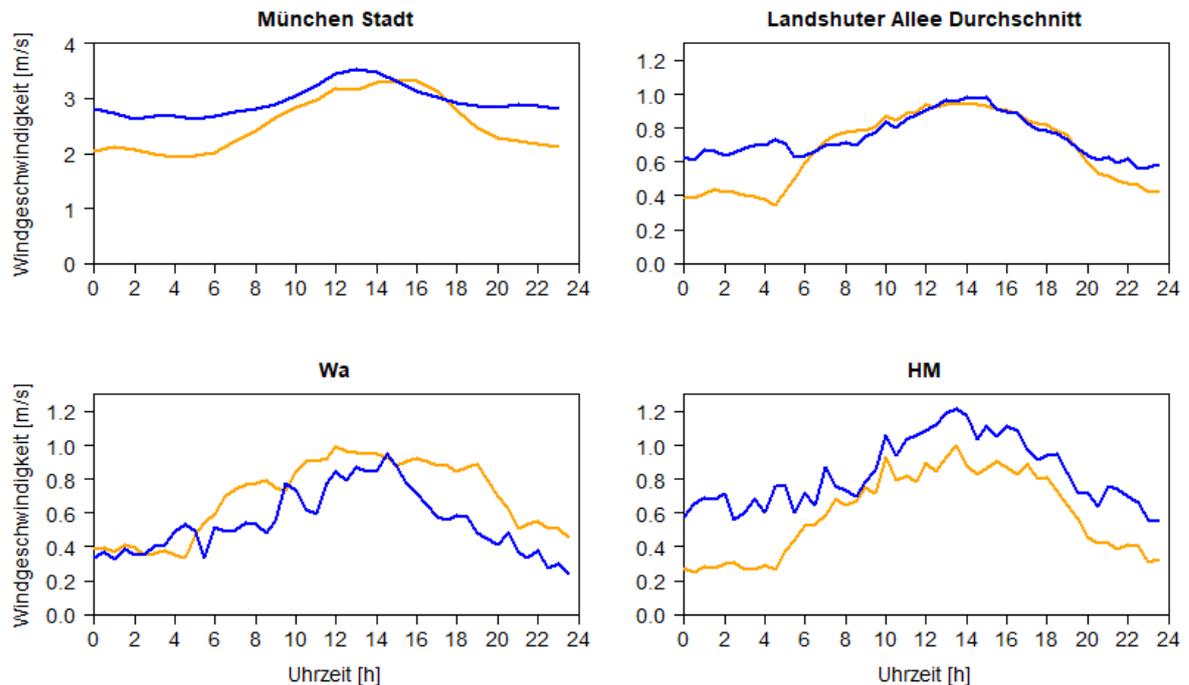


Abbildung 10: Mittlerer Tagesgang der gemessenen Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Belaubung der Bäume (unbelaubt: blau, belaubt: gelb) im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016; o.l.: DWD-Messstation; o.r.: LÜB-Station Landshuter Allee Durchschnitt; u.l.: LÜB-Station Landshuter Allee ausschließlich während der Großwetterlage Wa (Westlage, überwiegend antizyklonal); u.r.: LÜB-Station Landshuter Allee ausschließlich während der Großwetterlage HM (Hoch Mitteleuropa).

Eine plausible Erklärung für die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten im Jahr kann auch die Belaubung der Bäume sein. Vor allem in der Landshuter Allee, wo das Anemometer auf der LÜB-Station zwischen einer Baumreihe angebracht ist, ist ein windbeeinflussender Effekt von der Belaubung der Baumkronen anzunehmen. Stattdessen ist kaum ein Unterschied der Windgeschwindigkeiten zur Mittagszeit zwischen den Monaten Juni bis September, in welchen die Bäume in der Allee Blätter tragen, und Dezember bis März, in welchen die Äste überwiegend kahl sind, zu erkennen (Abbildung 10). Auch der Vergleich der Daten von diesen Zeiträumen am Standort Messstation München Stadt ist sehr gering, wobei die Messgeräte dort exponiert aufgestellt sind, wodurch Einflüsse von Hindernissen auf die Windströmung explizit vermieden werden sollen. Die Differenz der Geschwindigkeit in der Nacht, welche in beiden Graphen zu sehen ist, geht wohl weniger auf den Stand der Vegetation als auf die jahreszeitliche Abhängigkeit zurück (Abbildung 9). Die Wirkung der Großwetterlage hat

wohl einen bedeutenderen Einfluss auf die Windgeschwindigkeit, denn die Abhängigkeit der Belaubung während der Großwetterlage *HM* zeigt zwar, dass im mittleren Tagesgang die Windgeschwindigkeiten bei kahlen Ästen höher sind, doch während der häufigsten Großwetterlage *Wa* ist dieser Effekt nicht zu verzeichnen. Während durch Hochdruck beeinflusster Westlage sind die Windgeschwindigkeiten in der belaubten Zeit sogar im halbstündlichen Mittel bis zu $0,4 \text{ m s}^{-1}$ höher.

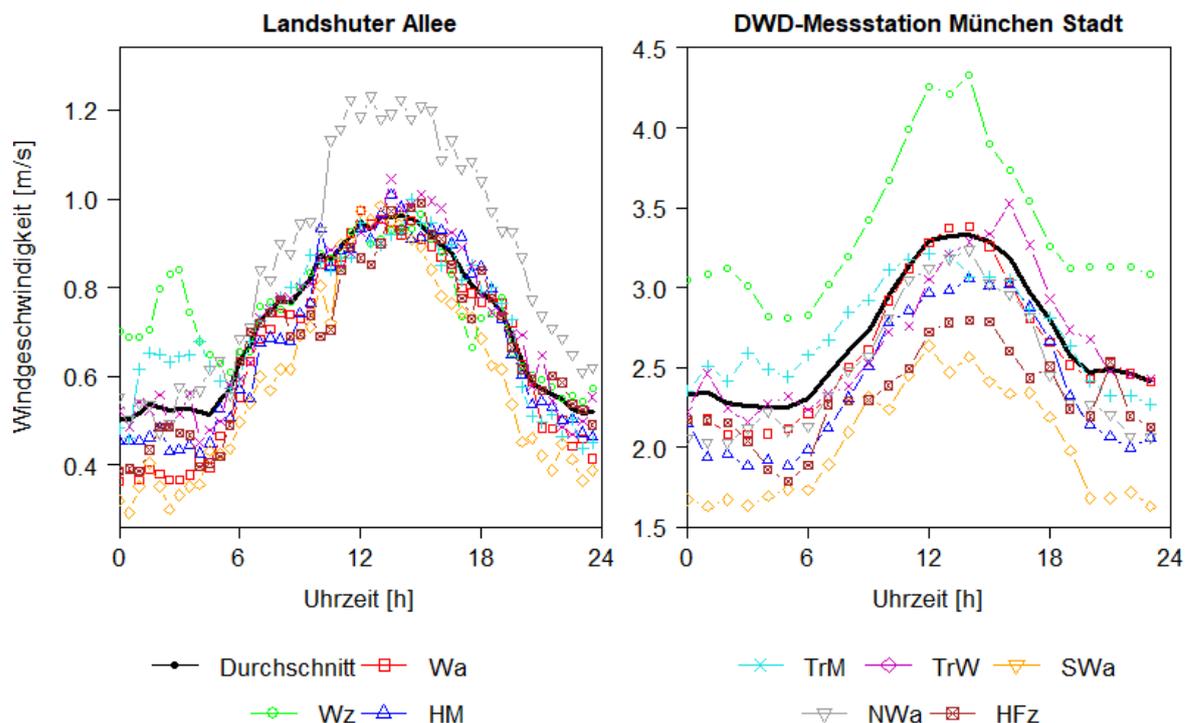


Abbildung 11: Mittlerer Tagesgang der gemessenen Windgeschwindigkeiten an der LÜB-Station Landshuter Allee (links) und an der DWD-Messtation München Stadt (rechts) in Abhängigkeit von der herrschenden Großwetterlage im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

Die mittlere Windgeschwindigkeit wurde auch in Abhängigkeit der vorherrschenden Großwetterlage analysiert. Die Ergebnisse für den Standort Landshuter Allee sind in Abbildung 11 graphisch dargestellt. Demnach sind die Geschwindigkeiten der Winde wieder am frühen Nachmittag am höchsten, im Mittel jedoch deutlich größer während antizyklonaler Nordwestwetterlagen *NWA*. In den frühen Morgenstunden hingegen treten im Mittel die höchsten Werte bei überwiegend zyklonalen Westwetterlagen *Wz* gefolgt von der Wetterlage Trog über Mitteleuropa *TrM* auf. Die langsamsten Strömungen treten besonders nachts aber auch tagsüber während antizyklonaler Südwestwetterlagen *SWa*

auf. Dieses Phänomen ist auch in der Helene-Weber-Allee zu beobachten. Hier liegen die Windgeschwindigkeiten im stündlichen Mittel während antizyklonaler Südwestwetterlagen *SWa* 1 m s^{-1} unter den allgemeinen Tagesmittelwerten. Die Winde während den Wetterlagen Trog über Mitteleuropa *TrM* und überwiegend zyklonaler Westlage *Wz* liegen mit ihrer Geschwindigkeit in den Morgenstunden wieder deutlich über dem Durchschnitt. Im Gegensatz zu den Messdaten aus der Landshuter Allee zeigt sich an diesem exponierten Standort jedoch, dass die Windgeschwindigkeiten während überwiegend zyklonaler Westlage *Wz* im Mittel zu jeder Tageszeit deutlich über dem Durchschnitt liegen und bis zu 2 m s^{-1} größer sind, als die Winde bei antizyklonaler Südwestlage *SWa*.

Diese Abhängigkeit zwischen Großwetterlagen und der Windgeschwindigkeit wird nun aus der phänologischen Sicht betrachtet (Anhang Abbildungen A 48, A 49, A 52, A 53). Denn obgleich die schwachen Winde bis zu 2 m s^{-1} in absoluter Häufigkeit am meisten bei von überwiegend Hochdruck beeinflusster Westlage *Wa* und einem Hoch über Mitteleuropa *HM* gemessen wurden, zeigt sich auch, dass es zwar bei *HM* in 40 Prozent der Fälle zu solchen schwachen Winden kommt, aber in relativer Betrachtung die überwiegend antizyklonale Westlage *Wa* nicht der Grund ist. Die Lage bringt auch häufig schnellere Winde mit sich. Stattdessen kann man für die deutlich seltenere Großwetterlage *NEz* = „Nordostlage, Mitteleuropa überwiegend zyklonal“ davon ausgehen, dass diese zu fast 80% zu Winden mit Geschwindigkeiten unter 2 m s^{-1} führt. Die insgesamt häufigste Wetterlage *Wa* ist ab einer Windgeschwindigkeit von $> 6 \text{ m s}^{-1}$ nicht mehr die absolut vorherrschende Wetterlage, sondern wird von den Wetterlagen West- und Nordwestwetterlage überwiegend antizyklonal *Wz* und *NWz* abgelöst. Vor allem bei der relativen Betrachtungsweise zeigt sich, dass jeweils ungefähr 18% aller Winde während der Wetterlage *NWz* mit mittleren stündlichen Windgeschwindigkeiten von $> 6 \text{ m s}^{-1}$ korrelieren. Die beiden Wetterlagen *Wz* und *NWz* führen zusammen mit der einer südlichen Westlage *WS* in der Landshuter Allee zu den höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten von über $1,5 \text{ m s}^{-1}$.

Die Geschwindigkeit der Winde scheint auch von der Windrichtung abhängig zu sein. Während in der Landshuter Allee die größten Geschwindigkeiten von Südwinden kommen,

bringen an der freien Messstation München Stadt besonders Westwinde die hohen Geschwindigkeiten bis zu 12 m s^{-1} mit sich (Abbildung A 11).

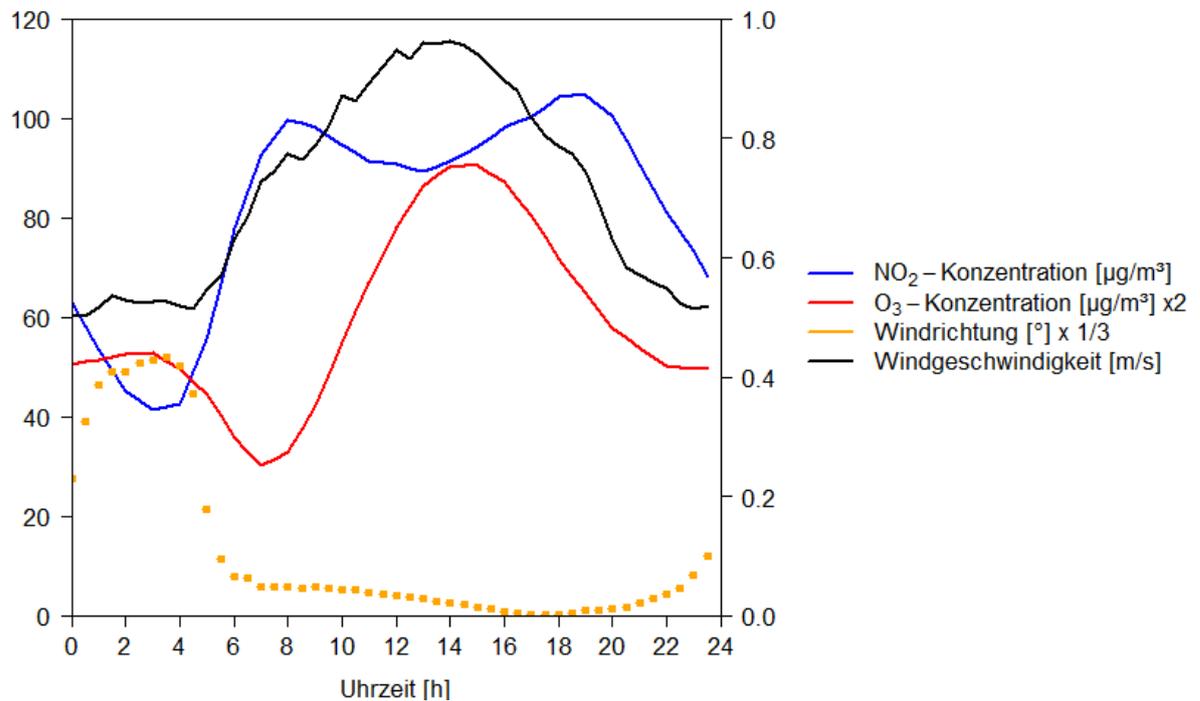


Abbildung 12: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentration, der Ozonkonzentration, der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit in der Landshuter Allee im Messzeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

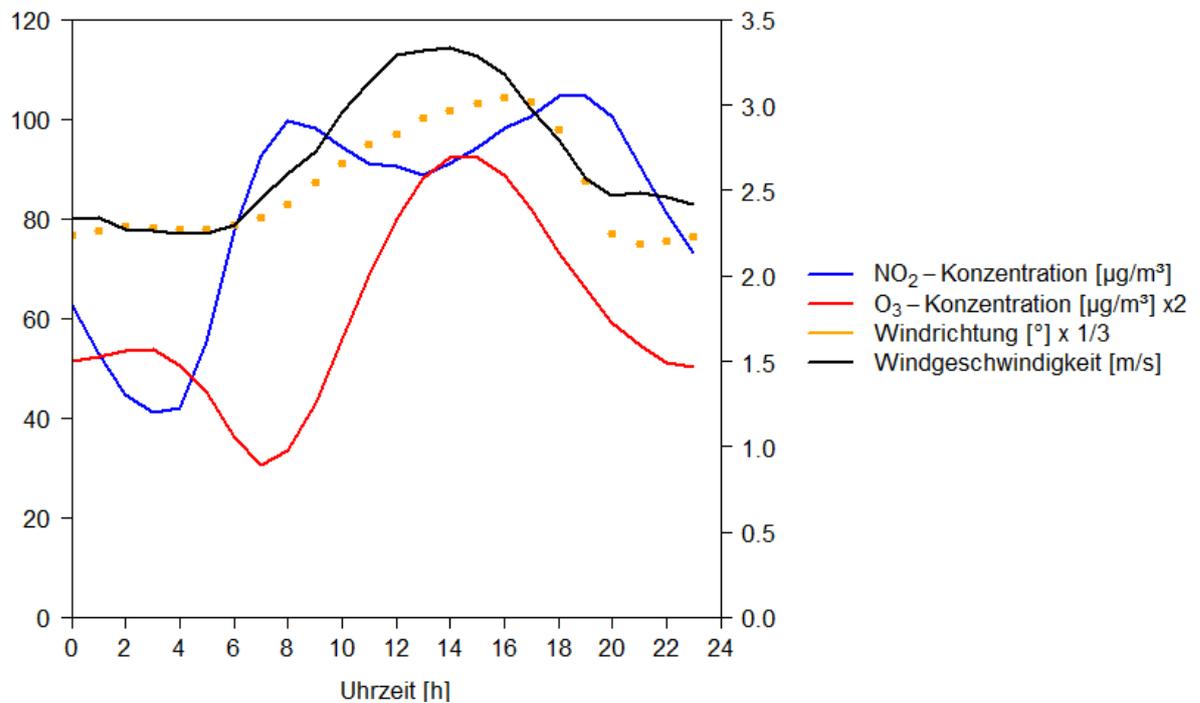


Abbildung 13: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentration, der Ozonkonzentration, der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit in der Helene-Weber-Allee im Messzeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

Die bereits analysierte statistische Ungleichverteilung der Windrichtungen zeigt sich auch bei der Betrachtung des mittleren Tagesverlaufs. Im Mittel der ca. 1,5 Jahre wird die Luft in der Landshuter Allee tagsüber aus Norden an das Anemometer herangetragen. In den frühen Morgenstunden dreht sich die Strömung in der Straßenschlucht um und der Wind weht aus Süden (Abbildung 12). Dem gegenüber wehen die Winde im mittleren Tagesverlauf an der DWD-Niederlassung aus Westen (Abbildung 13). Nachts tendieren sie zu einer südwestlichen Strömung, tagsüber zu einer nordwestlichen Strömung. Ein naheliegender Grund für diese Beobachtung sind die regionalen Windsysteme. So begründet auch Funk (2014) die Verschiebung von westlicher nach südwestlicher Windrichtung von Tag zu Nacht. Durch die Energiedifferenz zwischen Stadt und den Alpen kommt es tagsüber zu einer dem Gebirge zugerichteten Strömung von Nord nach Süd. Die nachts im Gebirge entstehende Kaltluft fließt dann abwärts und wird in München als Südwind registriert.

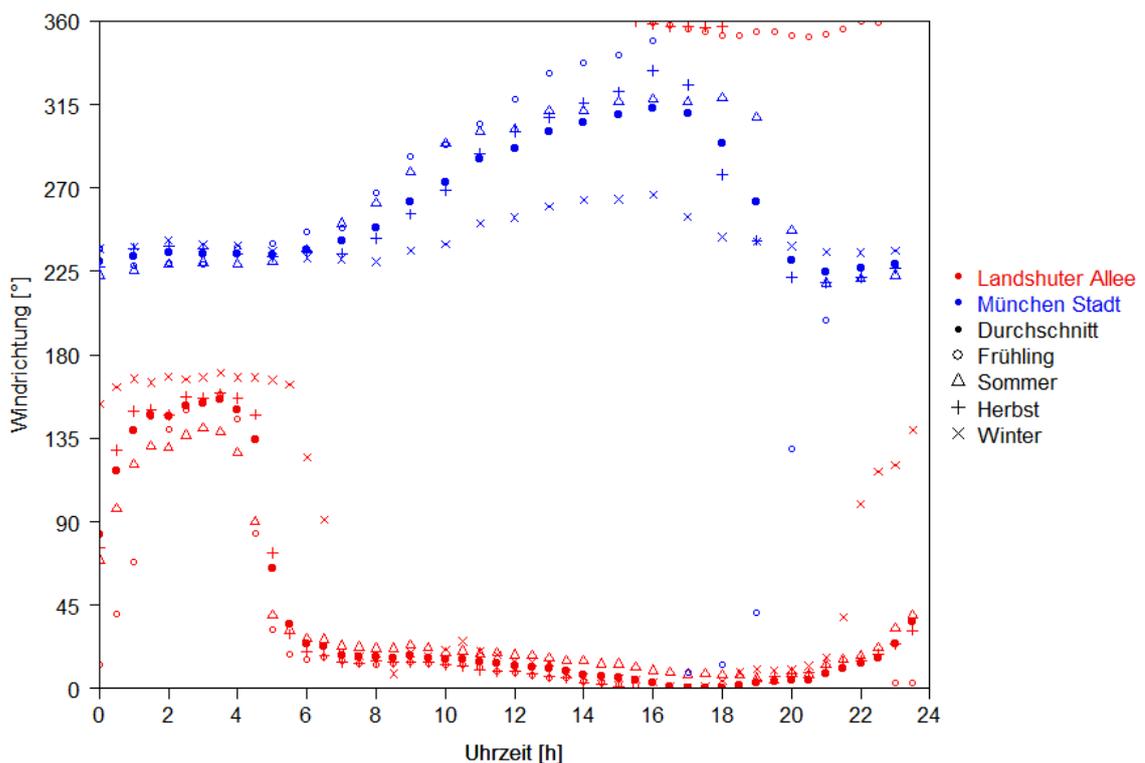


Abbildung 14: Mittlerer Tagesgang der gemessenen Windrichtung an der LÜB-Station Landshuter Allee (rot) und an der DWD-Messstation München Stadt (blau) im Durchschnitt und in Abhängigkeit von der Jahreszeit im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

Der mittlere Tagesgang der Windrichtung ist je nach Jahreszeit differenziert (Abbildung 14). Im Winter, wenn die Nächte länger sind, ist auch der Effekt der Umkehrung der Windrichtung in der Landshuter Allee von Nordwinden tagsüber zu Südwinden nachts erst später am Morgen und früher am Abend zu erkennen. In der Helene-Weber-Allee wirkt sich der winterliche Effekt aus, indem der mittlere Richtungswechsel der Winde am Nachmittag deutlich geringer ausfällt als im Durchschnitt. Dafür scheint es, als würde sich die Windrichtung im Frühling den gesamten Tag über drehen: Nachts weht er aus südwestlicher Richtung, in den Morgenstunden im Mittel aus Westen, mittags aus Norden und am frühen Abend durchaus auch aus südöstlicher Richtung. Der in der Stadtklimaanalyse von 2014 beschriebene Effekt, dass sich die Windrichtung besonders im Sommer aufgrund des tagesperiodischen Strömungsgeschehen, welches von den Alpen beeinflusst wird, von der Tagessituation zur Nachtsituation von Westen nach Südwesten verlagert, zeigt sich sowohl im durchschnittlichen Tagesmittel als auch mit der Abhängigkeit der Windrichtung von der Jahreszeit. Die mittlere Strömungsrichtung im Sommer und auch im Frühling liegt nachts bei ungefähr 225° und tagsüber bei ungefähr 315° .

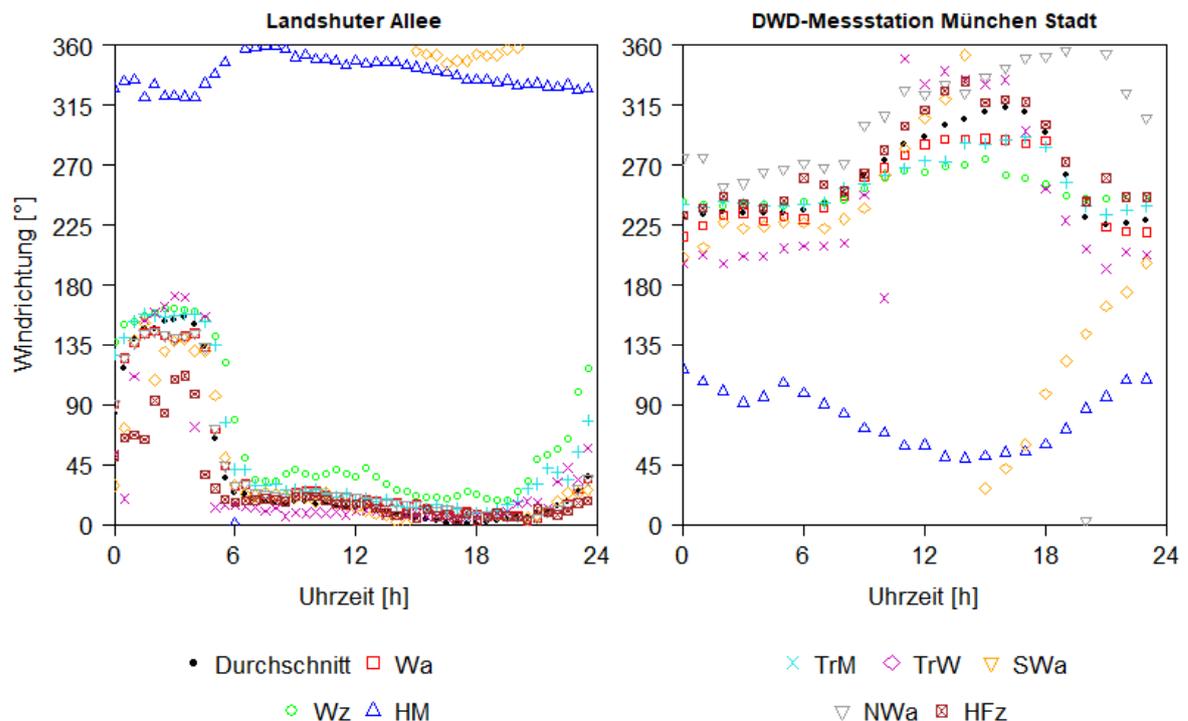


Abbildung 15: Mittlerer Tagesgang der gemessenen Windrichtung an der LÜB-Station Landshuter Allee (links) und an der DWD-Messstation München Stadt (rechts) in Abhängigkeit von der herrschenden Großwetterlage im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

Die Windrichtung kann in ihrer Abhängigkeit von der gegebenen Großwetterlage mit Abbildung 15 analysiert werden. Unabhängig von der Großwetterlage wehen die Winde in der Landshuter Allee im Mittel tagsüber weiterhin aus Norden. Die nächtliche Umkehrung hin zu einer Südströmung ist bei vielen Wetterlagen ebenfalls zu erkennen. Die Wetterlage Hoch über Mitteleuropa *HM* ergibt im Mittel jedoch Winde mit einer deutlicheren Tendenz zu westlicher Richtung als die meisten anderen Großwetterlagen. Diese Wetterlage führt auch am DWD-Messstandort zu einem deutlich anderen Tagesgang bezüglich der Windrichtung als im Durchschnitt aller Wetterlagen. Die mittlere Windrichtung bei einem Hochdruckgebiet über Mitteleuropa *HM* ist Osten. Bei einer überwiegend antizyklonalen Südwestwetterlage *SWa* dreht sich der Wind im Mittel über den ganzen Tag. Die nächtliche Südwestströmung wird am Vormittag zu einer Westströmung, am frühen Nachmittag zu einer Nordströmung, dreht sich am frühen Abend weiter und strömt aus Osten, um dann wieder nachts aus südlicher Richtung zu wehen. Mit phänologischer Betrachtungsweise (Anhang A 46, A 47, A 50, A 51) zeigt sich auch, dass bei Ostwinden in absoluter Häufigkeit meistens ein Hoch über Mitteleuropa gelegen hat, aber auch mit einer relativen Häufigkeit von ca. 50 Prozent führt *HM* zu östlichen Winden. Für beide Graphen kann geschlossen werden, dass es zu Ostwinden eigentlich immer unter dem Einfluss eines Hochdruckgebietes kommt. Im Gegensatz dazu bringen viele überwiegend zyklonal geprägte Wetterlagen Westwinde mit sich. In der Landshuter Allee hingegen korrelieren Westwinde mit antizyklonal geprägten Wetterlagen. Die Unterschiede der Datensätze aus der Landshuter Allee und München Stadt bezüglich der Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten sind in im Anhang in Abbildung A 13 und Abbildung A 14 zusammengefasst.

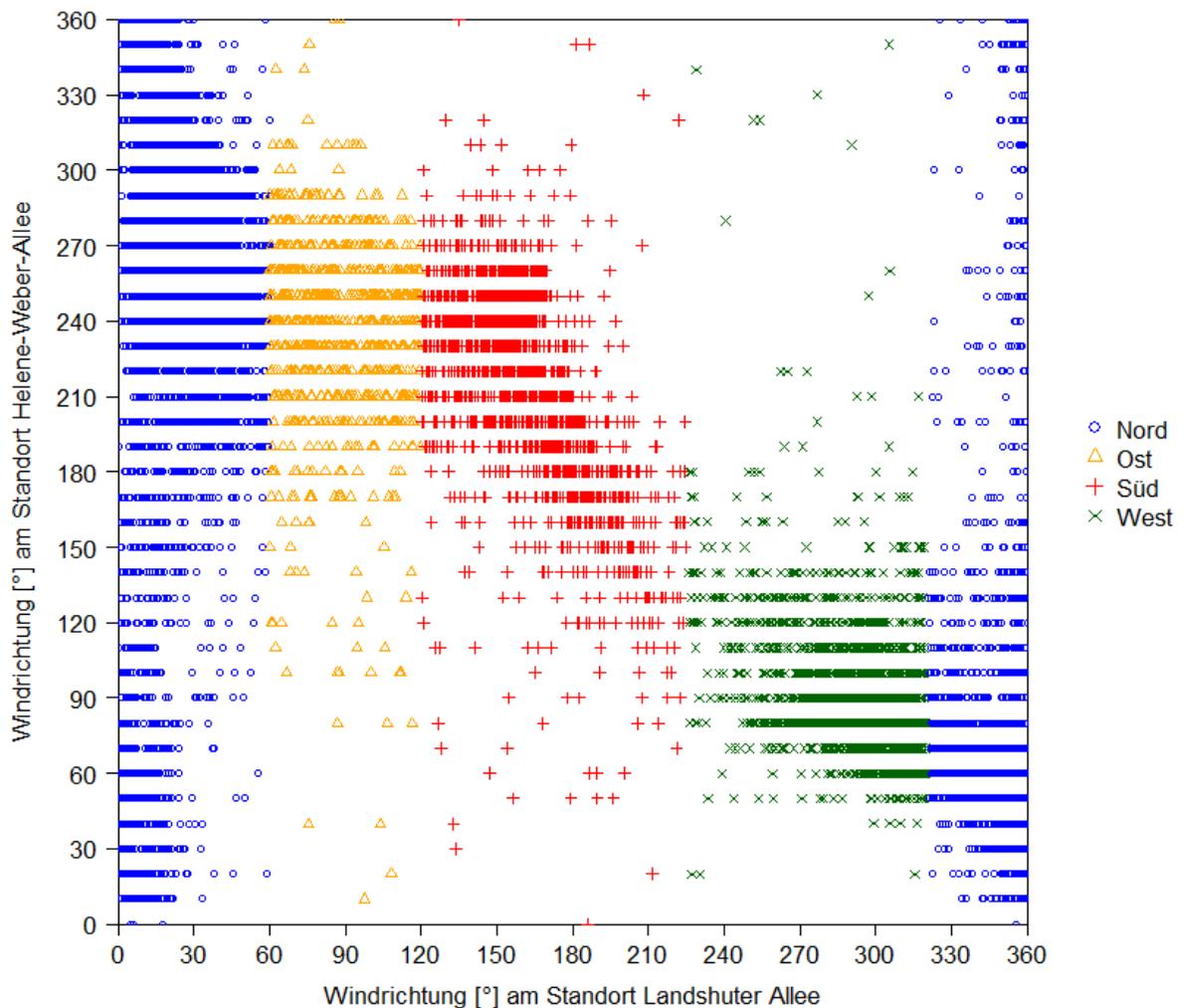


Abbildung 16: Gegenüberstellung der Windrichtung an den beiden Messstandorten zu gleichen Zeitpunkten mit farblicher Kennzeichnung der vier Hauptwindrichtungen nach (Tabelle 3) in der Landshuter Allee.

Die Betrachtung der Parameter Windrichtung und Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der acht häufigsten Großwetterlagen zeigt erneut, dass der Wind meistens aus Norden an das Anemometer auf der LÜB-Station herangetragen wird und nur sehr selten Windgeschwindigkeiten von über 2 m s^{-1} erreicht werden (Anhang A 15 bis A 22). Ausnahmen stellen die Großwetterlagen *Wz* und *HM* dar. Lag Deutschland im Messzeitraum in einer zyklonalen Westwindzone, dann traten in der Landshuter Allee vermehrt Südwinde mit Geschwindigkeiten über $2,4 \text{ m s}^{-1}$ auf. Bei einem Hochdruckgebiet über Mitteleuropa kam es viel häufiger zur Aufzeichnung von Westwinden als bei allen anderen Großwetterlagen. Das scheint zunächst ungewöhnlich, weil sich im Westen der LÜB-Station, auf welcher das Anemometer angebracht ist, nach wenigen Metern die Häuserfront befindet. Jedoch scheint dieser Platz auszureichen, um von Osten angeströmte Luft an den Gebäuden umzukehren und entgegengesetzt zu wehen. Abbildung 16 zeigt,

welche Windrichtung in der Helene-Weber-Allee im Vergleich zur Windrichtung an der LÜB-Station Landshuter Allee gemessen wurden. Man sieht, dass Winde aus westlicher Richtung in der Landshuter Allee tendenziell eigentlich aus östlicher Richtung ankommen und das vom LfU-Anemometer aufgezeichnete Ostwinde am exponierten Standort der DWD-Messstelle eigentlich als (Süd-)Westwinde erfasst werden. Das erklärt auch die phänologische Betrachtungsweise der Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen in Beziehung zu den Großwetterlagen (s.o.). Während Ostwinde am Standort München Stadt meistens unter Hochdruckeinfluss gemessen werden und Westwinde unter zyklonalen Umständen, so dreht sich diese Korrelation in der Landshuter Allee ebenfalls um.

Im Gegensatz zu den Winden in der Landshuter Allee zeigen die Messwerte vom DWD-Messtandort München Stadt, dass die hauptsächliche Windrichtung Westen ist und meist nur Winde bis zu 8 m s^{-1} erreicht werden. Eine Ausnahme ergibt sich wie bereits erwähnt für die Winde während der Großwetterlage *HM*. Während dieser werden hauptsächlich Winde aus Osten aufgezeichnet. Diese Beobachtung der Korrelation von Hochdruckwetterlagen mit Winden aus östlicher (und südlicher) Richtung, wurde bereits 2014 gemacht (Funk, 2014). Auch bei vorwiegend zyklonaler Westlage *Wz* werden an diesem Standort höhere Windgeschwindigkeiten bis ca. 11 m s^{-1} gemessen. Die Wetterlage mit den signifikant differenziertesten Winden ist jedoch die antizyklonale Nordwestwetterlage *NWa*. Bei dieser Großwetterlage werden nicht nur häufiger Ostwinde verzeichnet als im Durchschnitt, sondern sie bringt entweder Winde mit niedrigen Geschwindigkeiten von unter 4 m s^{-1} oder mit sehr hohen Windgeschwindigkeiten von über 9 m s^{-1} bis zu 12 m s^{-1} mit sich. Das besonders Westwetterlagen zu den höchsten Windgeschwindigkeiten führen (Funk, 2014), wird hiermit nun ein zweites Mal belegt.

Diese extreme Differenz wird noch deutlicher, wenn man die Wetterlage bei stationären Bedingungen betrachtet, also die Wetterlage ohne Übergang von oder zu einer anderen Großwetterlage analysiert (Anhang A 23). Bei allen anderen Großwetterlagen führte diese stationäre Betrachtung kaum zu Unterschieden, außer dass bei der Großwetterlage Hoch über Mitteleuropa *HM* in der Landshuter Allee prozentual noch häufiger Westwinde verzeichnet werden.

Bei der Betrachtung der acht häufigsten Wetterlagen sticht die Wetterlage *NWa* zwar mit ihren hohen Geschwindigkeiten heraus, doch die phänologische Betrachtungsweise der

Winde von über 8 m s^{-1} in der Helene-Weber-Allee bzw. von über 2 m s^{-1} in der Landshuter Allee hat bereits gezeigt, dass vor allem die überwiegend zyklonale Nordwestwetterlage NWz mit diesen hohen Windgeschwindigkeiten einhergeht (Anhang Abbildung A 24).

5.3. Abhängigkeit der Schadstoffkonzentrationen von zeitlichen und meteorologischen Parametern sowie von der herrschenden Großwetterlage

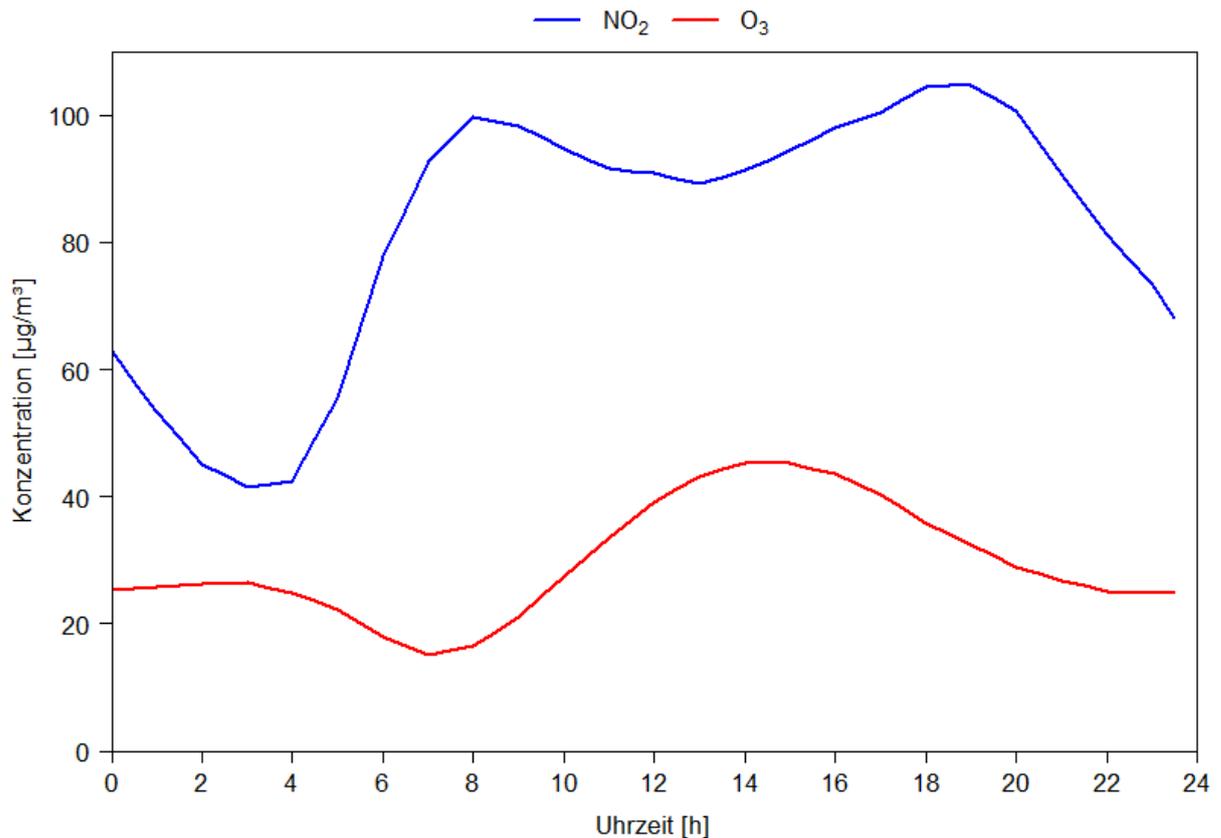


Abbildung 17: Mittlerer Tagesgang der Schadstoffkonzentrationen Stickstoffdioxid an der LÜB-Station Landshuter Allee und Ozon an der LÜB-Station Stachus auf Basis der Daten des LfU im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

Schadstoffkonzentrationen sind tageszeitenabhängig. Die mittlere Veränderung der Konzentrationen von NO₂ und O₃ über 24 Stunden ist in Abbildung 17 dargestellt. Besonders charakteristisch ist die gegenseitige Abhängigkeit der Schadstoffe. Ab circa 4 Uhr morgens beginnen die Stickstoffdioxid-Konzentrationen sehr schnell anzusteigen. Zwischen 8 und 9 Uhr morgens erreichen die Werte ein Maximum, sinken bis zur Mittagszeit wieder leicht ab, um sich dann einem weiteren Maximum um circa 19 Uhr zu nähern. Danach nehmen die NO₂-Werte kontinuierlich ab bis zum nächsten Morgen. Doch selbst die gemittelten

geringsten Stickstoffdioxidkonzentrationen in diesem nächtlichen Zeitraum noch über dem gesetzlich festgelegten Jahresgrenzwert von $40 \mu\text{g m}^{-3}$.

Dem entgegengesetzt nimmt die Ozonkonzentration ab 4 Uhr ab und erreicht ihren Minimalwert um ca. 8 Uhr. Ab dann nimmt die Konzentration des Reizgases bis um ca. 15 Uhr zu und nimmt nach diesem Maximum wieder ab. In der Nacht liegt der O_3 -Wert im Mittel relativ konstant bei ca. $25 \mu\text{g m}^{-3}$, bis er dann ab 4 Uhr des nächsten Tages wieder abnimmt. Der Grund für diesen ausgeprägten Tagesgang wurde in Kapitel 3.4 bereits grob angeschnitten. Ozon wird im Gegensatz zu NO nicht direkt emittiert, sondern durch chemische Reaktionen in der Atmosphäre sekundär gebildet. Die Konzentration ist neben dem Vorkommen von Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen vor allem vom Sonnenlicht abhängig. Die Strahlungsenergie führt zur Spaltung der NO_2 -Moleküle unter anderem in ein Sauerstoffatom, welches weiter reagiert zu Ozon. O_3 reagiert unter dem Vorhandensein von flüchtigen organischen Verbindungen wiederum mit NO, welches ebenfalls bei der Spaltung von NO_2 und durch Verbrennungsprozesse entsteht, sodass es erneut zur Bildung von Stickstoffdioxid und Sauerstoff kommt. Deshalb resultiert der veränderte Sonnenstand im Tagesverlauf in einer Zunahme von Lichtenergie und somit in dem fröhenachmittäglichen Maximum von Ozon und führt dadurch auch zum Absinken der Stickoxidkonzentrationen (Kuttler, 2004; Foken, 2016).

Diese gemittelten Tagesgänge unterliegen einer großen Streuung, wie man anhand von Abbildung A 25 im Anhang dieser Arbeit deutlich erkennen kann. Die Graphen zeigen die Schadstoffkonzentrationen während verschiedener Tageszeiträume. Während zwischen 01:00 Uhr und 05:00 Uhr der Mittelwert der Stickstoffdioxidkonzentration in der Landshuter Allee nur wenige Mikrogramm über dem allgemeinen Jahresgrenzwert von $40 \mu\text{g m}^{-3}$ liegt, sind tagsüber im Mittel mehr als der doppelte Grenzwert zu messen. Bedeutend ist vor allem, dass im Messzeitraum auch der 1-Stunden-Stickstoffdioxidgrenzwert von $200 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ tagsüber mehrmals überschritten wurde, welcher pro Jahr aber nicht öfter als 18-mal überschritten werden darf (Umweltbundesamt, 2021b). Dem gegenüber sind die Ozonkonzentrationen im Zeitraum 06:00 Uhr bis 09:00 Uhr im Mittel am geringsten. Für die Konzentrationen von O_3 am Stachus wird der empfohlene Wert der Weltgesundheitsorganisation von $100 \mu\text{g m}^{-3}$ im 8-Stundenmittel (Umweltbundesamt 2021a) punktuell mehrmals überschritten.

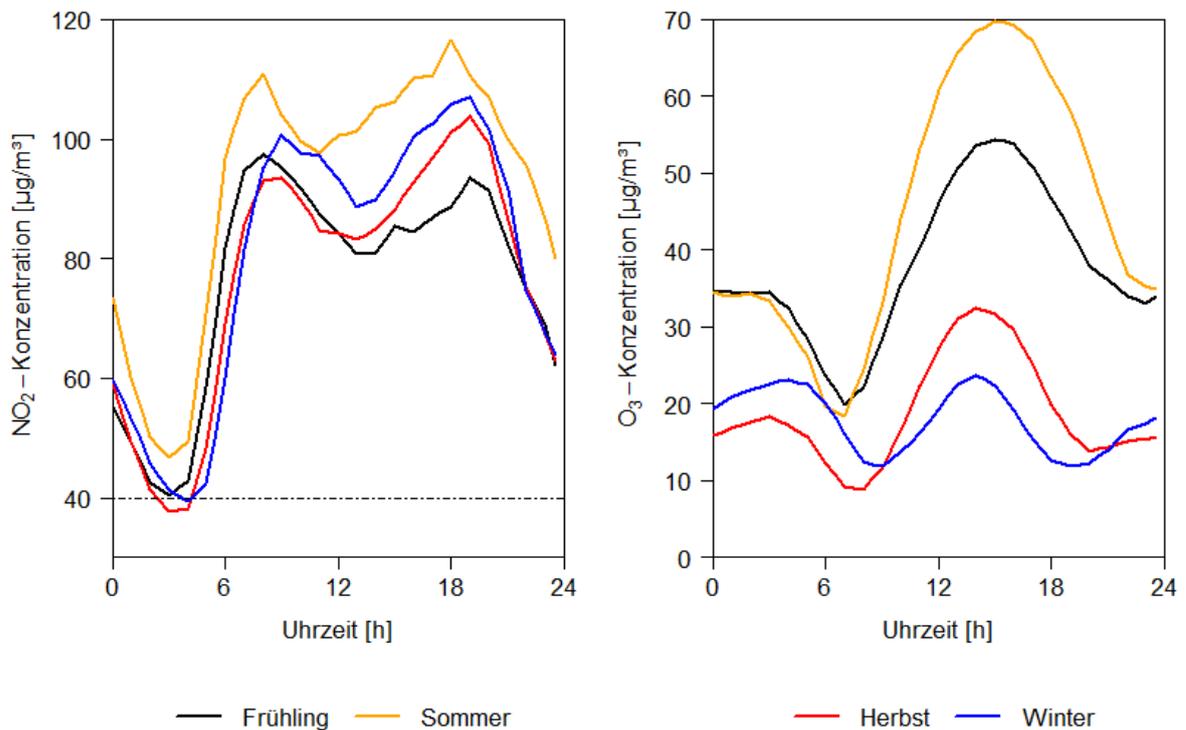


Abbildung 18: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen an der LÜB-Station Landshuter Allee (links) und der Ozonkonzentrationen an der LÜB-Station Stachus (rechts) in Abhängigkeit von der Jahreszeit auf Basis der Daten des LfU im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

Die Abhängigkeit der Sonnenenergie zeigt sich auch in der Differenzierung des Schadstoff-Tagesganges in die verschiedenen meteorologischen Jahreszeiten (Abbildung 18). Während die Ozonkonzentration im Mittel im Winter am Nachmittag nicht größer ist als morgens um 5 Uhr, weil nur wenig Sonnenlichtenergie verfügbar ist, um die NO₂-Moleküle in NO und O zu spalten, erreicht das Maximum im Sommer um 16 Uhr einen zweimal höheren Wert als in der Nacht und im Mittel einen Spitzenwert von 70 µg m⁻³. Da in den Sommermonaten das meiste Sonnenlicht zur Verfügung steht, kann folglich viel Stickstoffdioxid gespalten werden und die resultierenden Sauerstoffatome reagieren mit Sauerstoffmolekülen zu Ozon. Folglich sind die O₃-Konzentrationen zu den (Nach-) Mittagsstunden im Sommer am höchsten, gefolgt von Fröhling, Herbst und zuletzt Winter. Eine Erklärung hierfür sind die häufig im Winter auftretenden stabilen Inversionswetterlagen, welche die Luftqualitätssituation besonders in Talkessellagen verschlechtern, indem sie die vertikale Durchmischung der Luft reduzieren (Kuttler, 2004; Kurppa et al., 2018). Die NO₂-Konzentrationen sind im gemittelten Tagesverlauf im Sommer am höchsten. Darauf folgen Fröhling und Herbst, während im Winter die Werte am geringsten sind. Auch hier zeigt sich wieder die Abhängigkeit der

Stickstoffdioxidkonzentration von der Verfügbarkeit von Ozon. Dass die Schadstoffausbreitung in Sommer und Winter unterschiedlich ist, wurde ebenfalls bereits in anderen Studien festgestellt (Dong et al., 2017). Wie groß auch die Streuung der Schadstoffkonzentrationswerte ist, wird durch Abbildung A 26 deutlich.

Belaubte Bäume tragen zu keiner Verbesserung der Luft bezüglich NO_2 bei (Abbildung A 27), stattdessen hemmen sie die Windgeschwindigkeit (Abbildung 10). Die Abhängigkeit der Stickstoffdioxidkonzentrationen von der Windgeschwindigkeit wird zu einem späteren Zeitpunkt analysiert. Die Abhängigkeit von der Belaubung zeigt jedoch bereits, dass es bei kahlen Bäumen zu geringeren NO_2 -Konzentrationen kommt. Neben dem mechanischen Effekt auf die Windgeschwindigkeit hängt dies auch damit zusammen, dass Bäume Produzenten flüchtiger organischer Verbindungen sind. Je stärker die Belaubung desto mehr freigesetzte Kohlenwasserstoffe. Diese besitzen die Eigenschaft Sauerstoffradikale zu bilden und mit NO zu reagieren, sodass die Konzentration des Produktes Stickstoffdioxid mit der Belaubung ebenfalls zunimmt. Der bereits erforschte negative Effekt der Belaubung auf die Akkumulation von verkehrsbedingten Schadstoffen aufgrund der Blockierung des aerodynamischen Effektes (Gromke and Blocken, 2015; Santiago et al., 2017) konnte im Messzeitraum nicht signifikant nachgewiesen werden.

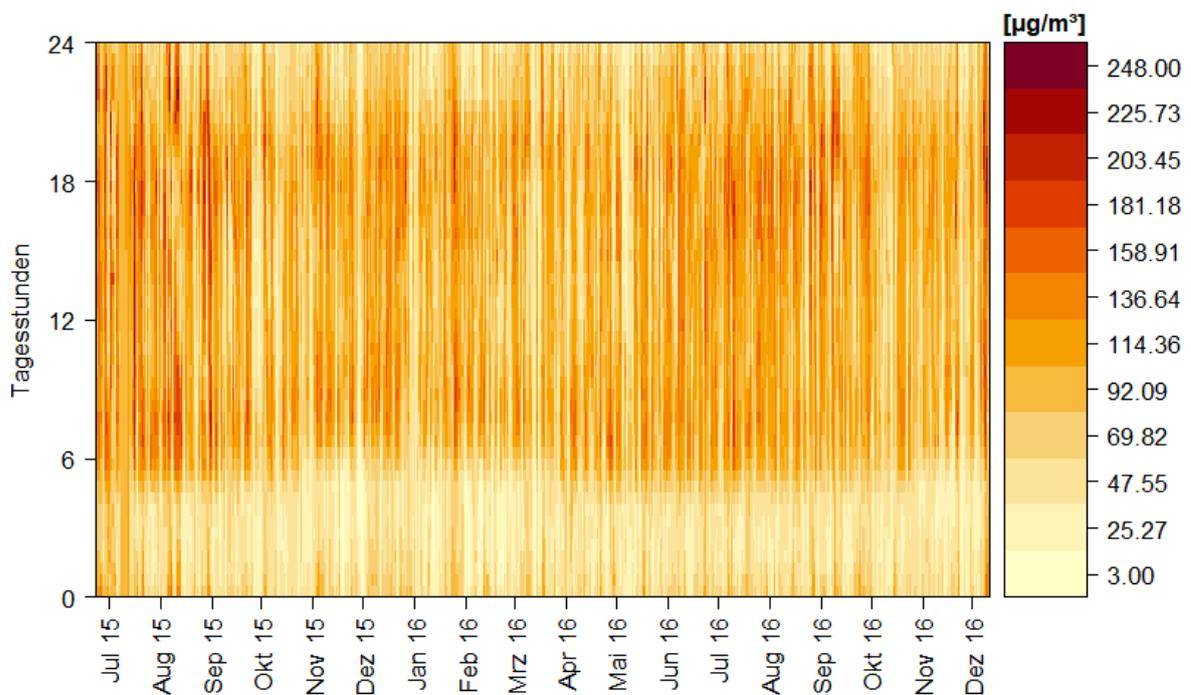


Abbildung 19: Stickstoffdioxid-Konzentrationen in der Landshuter Allee im Tages- und Jahresverlauf im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016 auf Basis der Daten des LfU.

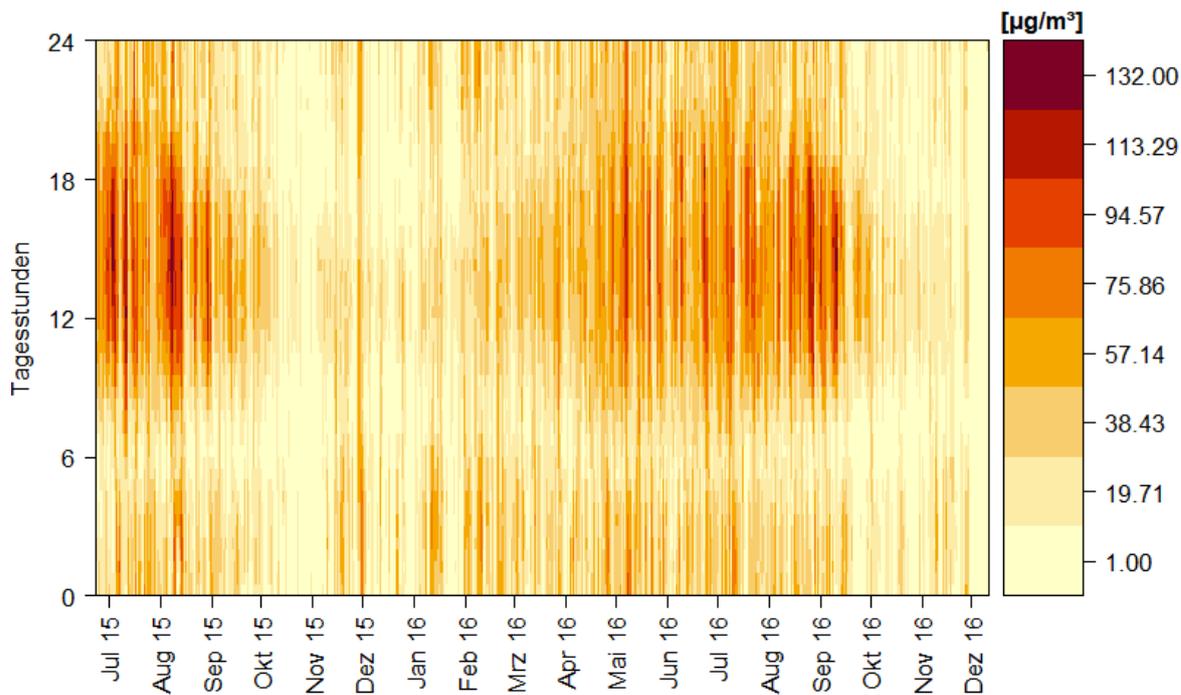


Abbildung 20: Ozon-Konzentrationen am Stachus im Tages- und Jahresverlauf im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016 auf Basis der Daten des LfU.

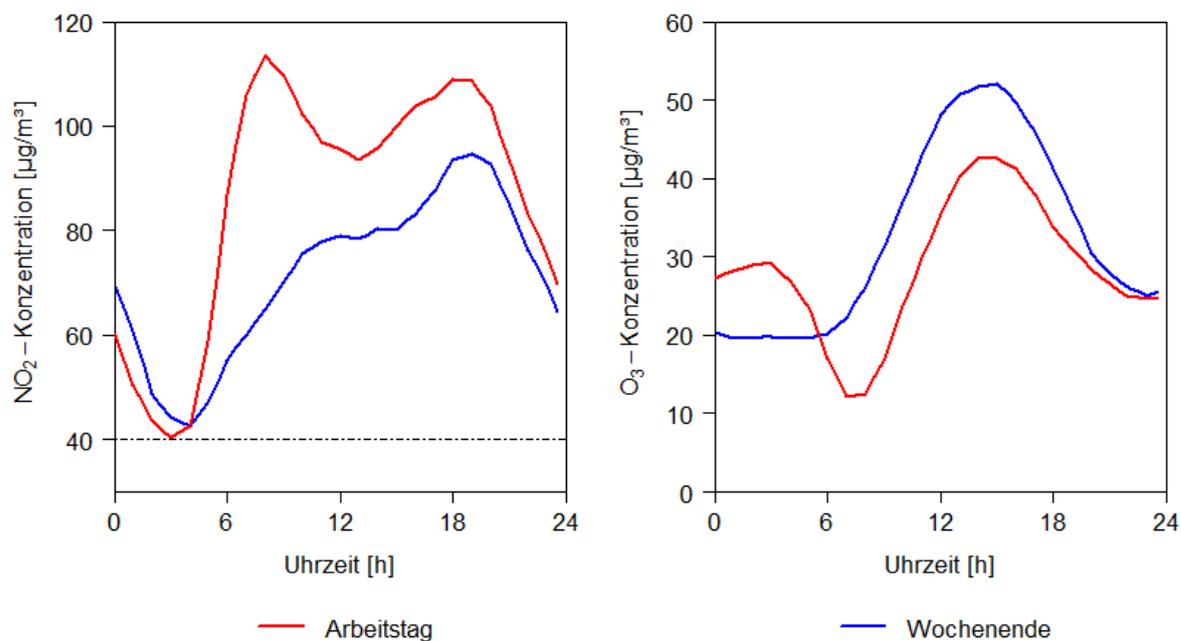


Abbildung 21: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen an der LÜB-Station Landshuter Allee (links) und der Ozonkonzentrationen an der LÜB-Station Stachus (rechts) differenziert in Arbeitstage (Mo, Di, Mi, Do, Fr) und Wochenende (Sa, So) auf Basis der Daten des LfU im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

In den Abbildungen 19 und 20 lassen sich sowohl die tages- als auch die jahresperiodischen Schwankungen der Schadstoffkonzentrationen sind graphisch dargestellt. Da es im Jahresverlauf regelmäßig zu Zeiträumen mit geringeren Schadstoffkonzentrationen kommt, lässt sich die Hypothese aufstellen, dass an den Messstandorten mit sehr hohem Verkehrsaufkommen eine Differenzierung der Wochentage in Arbeitstage und Wochenende festzustellen ist. Abbildung 21 stützt diese Hypothese. Die gemittelten NO₂-Werte am Wochenende unterscheiden sich vom allgemeinen Tagesverlauf (Abbildung 17). Während es an Arbeitstagen zu zwei maximalen Konzentrationswerten morgens um 8 Uhr und abends um 19 Uhr kommt, nehmen die NO₂-Konzentrationen an den Wochenenden ab ca. 04:30 Uhr beinahe kontinuierlich zu, bis sie um ca. 19:30 Uhr ihren maximalen Wert erreichen und in der Nacht wieder abnehmen. Dabei sind die Stickstoffdioxidkonzentrationen im Mittel um 15 - 50 µg m⁻³ geringer als an den Wochentagen Montag bis Freitag. Eine offensichtliche Erklärung ist, dass das Verkehrsaufkommen am Wochenende in den frühen Morgenstunden geringer ist als an den Arbeitstagen und deshalb weniger Stickoxide durch Verbrennungsprozesse in Autos entstehen. Diese These kann im weiteren Verlauf des REINELUFFT-Projektes untersucht werden. In Korrelation zu den geringeren NO₂-Werten am Wochenende sind die Ozonkonzentrationen an den Samstagen und Sonntagen tagsüber um ca. 10 µg m⁻³ erhöht. Außerdem kommt es in den Morgenstunden am Wochenende durch das ausbleibende Maximum an Stickstoffdioxid nicht zum Minimum der Ozonkonzentration.

Die Stickstoffdioxidkonzentrationen in der Landshuter Allee sind im gemittelten Tagesgang auch von der gemessenen Windrichtung abhängig. Vom Anemometer aufgezeichnete Westwinde korrelieren demnach mit deutlich geringeren gemessenen Stickstoffdioxidkonzentrationen an der LÜB-Station (Abbildung 22). Da diese Strömung wie bereits analysiert, nicht der eigentlichen Windrichtung entspricht, zeigt Abbildung 22 auch die Abhängigkeit der NO₂-Konzentration von der gemessenen Windrichtung an der DWD-Messstation München Stadt. Aus dieser Gegenüberstellung kann gefolgert werden, dass bei Ostwinden die Konzentrationen von Stickstoffdioxid viel geringer sind als im Mittel. Auch diese Analyse lässt sich wieder damit erklären, dass in der Landshuter Allee gemessene Strömungen aus westlicher Richtung eigentlich reflektierte Ostwinde sind, so wie sie an der DWD-Messstation auch verzeichnet werden.

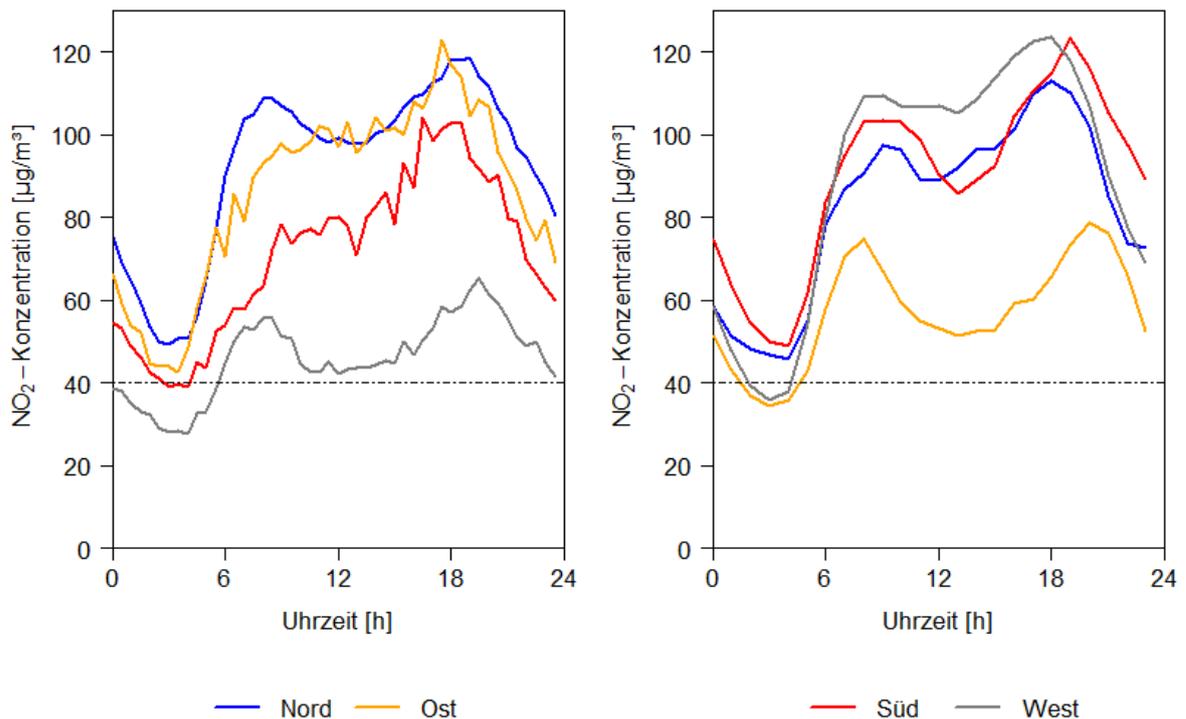


Abbildung 22: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen an der LÜB-Station Landshuter Allee in Abhängigkeit von der Windrichtung in der Landshuter Allee (links) auf Basis der Daten des LfU und in Abhängigkeit von der Windrichtung an der DWD-Messstation München Stadt (rechts) auf Basis der Daten des DWD im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

Die Beziehung zwischen den Stickstoffdioxidkonzentrationen und der Windgeschwindigkeit lässt sich hingegen für beide Windmessstandorte aufstellen. Je höher die Windgeschwindigkeit, desto niedriger im Mittel die gemessenen NO_2 -Konzentrationen. Je geringer die Windgeschwindigkeit, desto schlechter werden die verkehrsbedingten Stickoxide in Canyons verteilt und verdünnt (Abbildung 23). Dieses Ergebnis wurde schon für viele empirische Studien in anderen Großstädten belegt (Britter and Hanna, 2003; Vardoulakis et al., 2003; Kuttler, 2004; Ming et al., 2018).

Die Abhängigkeit der gemessenen NO_2 -Konzentration von der Windgeschwindigkeit wird besonders gut mithilfe von Abbildung A 30 deutlich. In der Landshuter Allee wird der Grenzwert von $40 \mu\text{g m}^{-3}$ im Mittel eingehalten, wenn durch die Straßenschlucht Winde mit einer Geschwindigkeit von über 2 m s^{-1} wehen. Zwar werden auch bei solchen Winden noch vereinzelt viel zu hohe Werte bis $100 \mu\text{g m}^{-3}$ gemessen, doch im Gegensatz dazu werden bei fast windstillen Situationen deutlich häufiger Konzentrationen bis zu $250 \mu\text{g m}^{-3}$ erfasst. Während Abbildung 23 nur gezeigt hat, dass nachts die NO_2 -Konzentration deutlich mit der Windgeschwindigkeit korreliert aber tagsüber die Konzentrationen im Mittel bei Winden

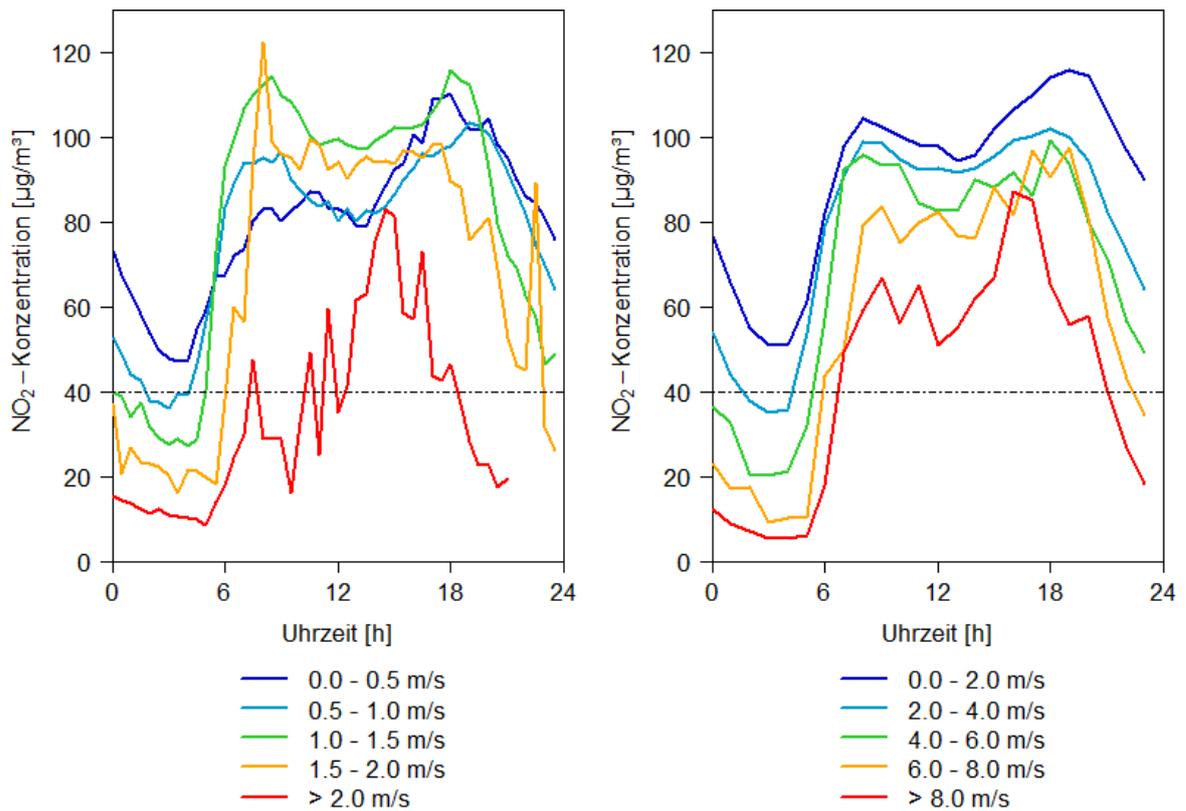


Abbildung 23: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen an der LÜB-Station Landshuter Allee in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit in der Landshuter Allee (links) auf Basis der Daten des LfU in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit an der DWD-Messstation München Stadt (rechts) auf Basis der Daten des DWD im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

zwischen $1 - 2 \text{ m s}^{-1}$ höher sind, als bei sehr windschwachen Situationen, wird durch Abbildung A 30 deutlich, dass die mittlere Konzentration an Stickoxiden an der Messstation am höchsten ist, wenn die Winde eine Geschwindigkeit von $1 - 1,5 \text{ m s}^{-1}$ haben und nicht bei windstillen Situationen.

Dem entgegengesetzt zeigt sich ein etwa linearer Zusammenhang zwischen den Windgeschwindigkeiten in der Umgebung der Landshuter Allee, also den Winden, die nicht in der Straßenschlucht abgebremst werden, und der Stickstoffdioxidkonzentration im Mittel. Je größer die Geschwindigkeit der Winde, desto geringere mittlere Konzentrationen von NO_2 . Und je niedriger die Windgeschwindigkeiten, umso öfter werden Stickstoffdioxidkonzentrationen von über $200 \mu\text{g m}^{-3}$ gemessen. Trotzdem liegt selbst die mittlere NO_2 -Konzentration bei Winden mit einer Geschwindigkeit von größer gleich 8 m s^{-1} noch über den $40 \mu\text{g m}^{-3}$ Jahresgrenzwert.

Sowohl die Beziehung zwischen Windrichtung und NO_2 -Konzentration als auch zwischen Windgeschwindigkeit und Konzentration wurde zusätzlich für die Großwetterlage Wz

untersucht. Einerseits, weil somit der Einfluss der Großwetterlage auf das bisherige Ergebnis ausgeschlossen werden kann, andererseits, weil bei der überwiegend zyklonal beeinflussende Westlage deutlich zwei Windrichtungen dominieren und diese Winde aus Nord und Süd auch unterschiedlich stark sind. Das Ergebnis der Auswertung ist erneut, dass in der Landshuter Allee Nord(ost)winde mit deutlich höheren Stickstoffdioxidkonzentrationen korrelieren als Süd(ost)winde (Abbildung A 31). Hauptsächlich ist es aber wieder die Windgeschwindigkeit von $> 2,0 \text{ m s}^{-1}$ die während dieser Wetterlage im Mittel zu NO_2 -Werten führt, welche unterhalb des Grenzwertes $40 \mu\text{g m}^{-3}$ liegen. Da diese Windgeschwindigkeiten nur mit den Südostwinden einhergehen, ist darauf zu schließen, dass die Windgeschwindigkeit den bedeutenderen Einfluss auf die Schadstoffkonzentration in der Landshuter Allee hat als die Windrichtung.

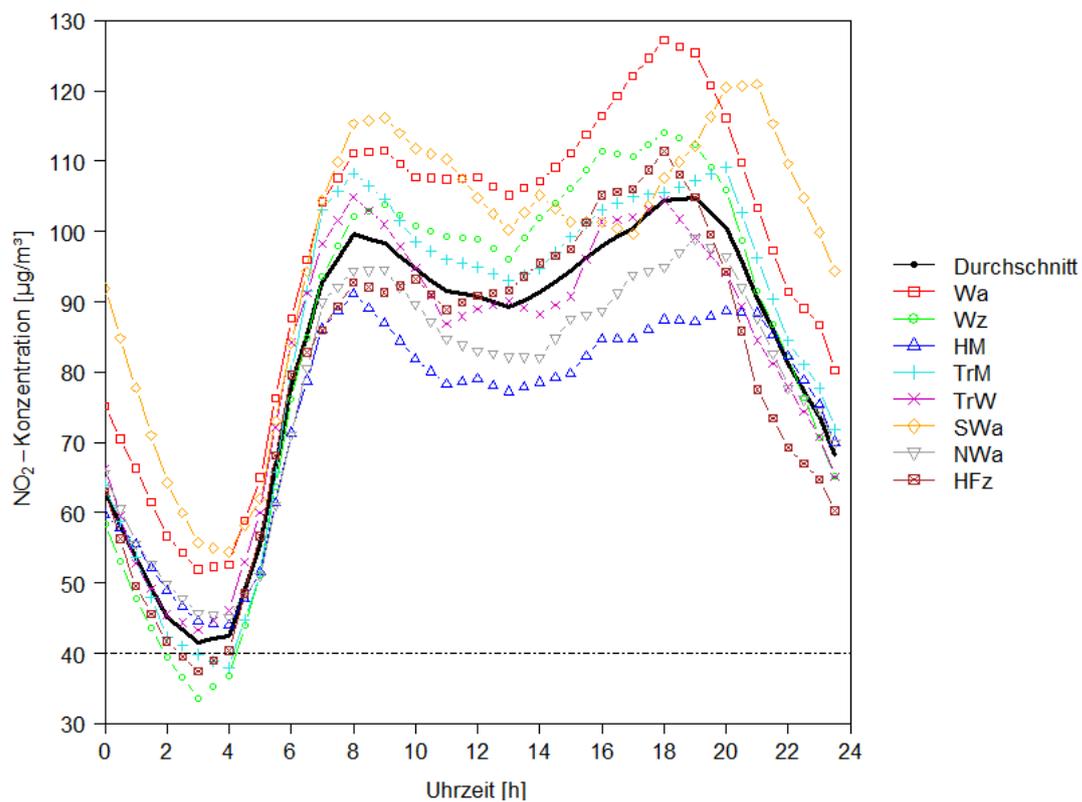


Abbildung 24: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen an der LÜB-Station Landshuter Allee auf Basis der Daten des LfU in Abhängigkeit von der herrschenden Großwetterlage auf Basis der Daten des DWD im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

Abbildung 24 zeigt erneut den mittleren Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentration in der Landshuter Allee, nun in Abhängigkeit der herrschenden Großwetterlage. Besonders

nachts ist die mittlere Konzentration bei der antizyklonalen Südwestwetterlage *SWa* deutlich höher als im Durchschnitt. Um 0 Uhr liegt sie beispielsweise bei knapp über $90 \mu\text{g m}^{-3}$, während das langfristige Mittel knapp über $60 \mu\text{g m}^{-3}$ NO_2 beträgt. Tagsüber führt diese Wetterlage *SWa* auch zu erhöhten Konzentrationen, die Großwetterlage die jedoch zu den höchsten mittleren NO_2 -Werten führt ist die überwiegend durch Hochdruck beeinflusste Westwetterlage *Wa*. Während die zyklonale Westwetterlage *Wz* hingegen auch am Tag mit überdurchschnittlichen Stickstoffdioxidkonzentrationen korreliert, sind bei dieser antizyklonalen Wetterlage die Konzentrationen in den frühen Morgenstunden am geringsten. Eine weitere Großwetterlage die scheinbar nachts zu geringen Stickoxidkonzentrationen führt, ist ein Hoch über Fennoskandien. Wenn direkt über Mitteleuropa ein Hochdruckgebiet liegt, führt dieses tagsüber zu den geringsten Stickoxidkonzentrationen in der Landshuter Allee. Diese Ergebnisse widersprechen sich zunächst mit den Ergebnissen der Stadtklimaanalyse, welche 2014 durchgeführt wurde. In dieser wurde festgestellt, dass Hochdruckwetterlagen, besonders im Sommer, aufgrund der geringen Windgeschwindigkeiten mit denen sie einhergehen, zu einer deutlich schadstoffbelasteteren Luft führen (Funk, 2014).

Diese statistischen mittleren Tagesverläufe haben große (Abbildung A 32). Diese zeigt auch die Tagesverläufe der geringsten und höchsten Konzentrationen, die für eine Großwetterlage erfasst wurden. Selbst wenn also die Großwetterlage und die Uhrzeit gleich sind, kann es zu verschiedenen NO_2 -Konzentrationen kommen. Die Graphik zeigt aber auch, dass es beispielsweise bei dem Hoch über Mitteleuropa zu ziemlich hohen Stickoxidkonzentrationen kommen kann, obwohl sich im mittleren Tageslauf die geringsten Werte ergeben. Das könnte unter anderem daran liegen, dass diese Großwetterlage *HM* in den 1,5 Jahren insgesamt mit den niedrigsten Konzentrationen tagsüber korrelierte. Die im mittleren Tagesgang tagsüber die höchsten Konzentrationen ergebende Wetterlage *Wa* korreliert im Messzeitraum mit den überhaupt höchsten gemessenen Stickstoffdioxidkonzentrationen bis zu $250 \mu\text{g m}^{-3}$. Für diese Analyse wurde nur die instationäre Situation der Großwetterlage, also mit Übergangstagen zwischen zwei verschiedenen Wetterlagen, betrachtet.

Da für die Wetterlage *HM* festgestellt wurde, dass diese in der Landshuter Allee deutlich häufiger zu Winden aus westlicher Richtung führt, wurde in Abbildung A 33 im Anhang

untersucht, ob es zu einem signifikanten Unterschied der NO₂-Konzentration je nach Windrichtung kommt. Das Ergebnis zeigt wie bereits analysiert, dass die Konzentration von NO₂ bei Westwinden deutlich niedriger ist als bei Ostwinden.

Insgesamt zeigt sich, dass die Stickstoffdioxidkonzentration in München nicht nur die Ozonkonzentration beeinflusst, sondern in der Landshuter Allee von der Windgeschwindigkeit in der Straßenschlucht abhängt und auch mit der Windrichtung in Beziehung steht (Abbildung 12). Und dieser Wind ist wiederum ein durch die Stadtmorphologie modifiziertes Ergebnis des Windes in der Umgebung, welcher somit auch in indirekter Beziehung mit den Schadstoffkonzentrationen steht (Abbildung 13).

Dass jedoch all diese Tagesgänge direkt oder indirekt von der Großwetterlage abhängig sind, zeigen im Anhang Abbildung A 34 und Abbildung A 35. Im Mittel kommt es bei der Hochdrucklage über Mitteleuropa *HM* nicht nur vorwiegend zu Nord- sondern auch häufig zu Westwinden. Der Tagesgang der Windgeschwindigkeit ist ausgeprägt, die Stickoxide ziemlich gering konzentriert und dafür ist eine starke Schwankung mit großem Maximum für die Ozonkonzentration ersichtlich. Bei der überwiegend durch Tiefdruckgebiete beeinflussten Westlage *Wz* ist hingegen ein deutlicher Windrichtungswechsel zwischen Nacht und Tag zu erkennen. Dafür ist Tagesgang der Windgeschwindigkeit weniger stark ausgeprägt, da mit den Südwinden nachts auch schnellere Winde einhergehen. Während die Stickstoffdioxidkonzentration im Tagesmittel relativ hoch ist, liegt das mittlere Ozonmaximum bei nur ca. 45 µg m⁻³.

Obwohl in den 1,5 Jahren die höchsten Stickstoffdioxidkonzentrationen während durchschnittlicher Temperaturen gemessen wurden, zeigt sich doch eine lineare Abhängigkeit für NO₂ von der mittleren Temperatur (Anhang Abbildung A 36). Die mittlere NO₂-Konzentration bei Temperaturen über 30° C liegt mit ca. 110 µg m⁻³ mit ungefähr 30 µg über dem Mittelwert der Stickstoffdioxidkonzentrationen bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Auch mit der Zunahme der Taupunkttemperatur zeigt sich eine Zunahme der NO₂-Konzentration (Anhang Abbildung A 37).

Für eine Situation an einem Sommernachmittag bei der Großwetterlage *Wa* (Anhang Abbildung A 38) zeigt sich, dass bei sehr hohen Temperaturen zwar öfter hochkonzentrierte NO₂-Werte gemessen werden, aber dass im Mittel die Stickstoffdioxidkonzentration nicht von der Lufttemperatur abhängig ist. Und auch für die Taupunkttemperatur gilt, dass unter

gleichen Bedingungen (Sommer und Mittagszeit) eine höhere Taupunkttemperatur tendenziell zu geringeren NO₂-Konzentrationen führt.

5.4. Bedingungen bei extremer Stickstoffdioxidkonzentration

Insgesamt lassen sich die im Messzeitraum erfassten NO₂-Daten aufteilen in Konzentrationen, die unter dem Allgemeinen Jahresgrenzwert von 40 µg m⁻³ liegen und Konzentrationen, die über dem 1-Stunden-Stickstoffdioxidschwellenwert von 200 µg m⁻³ liegen.

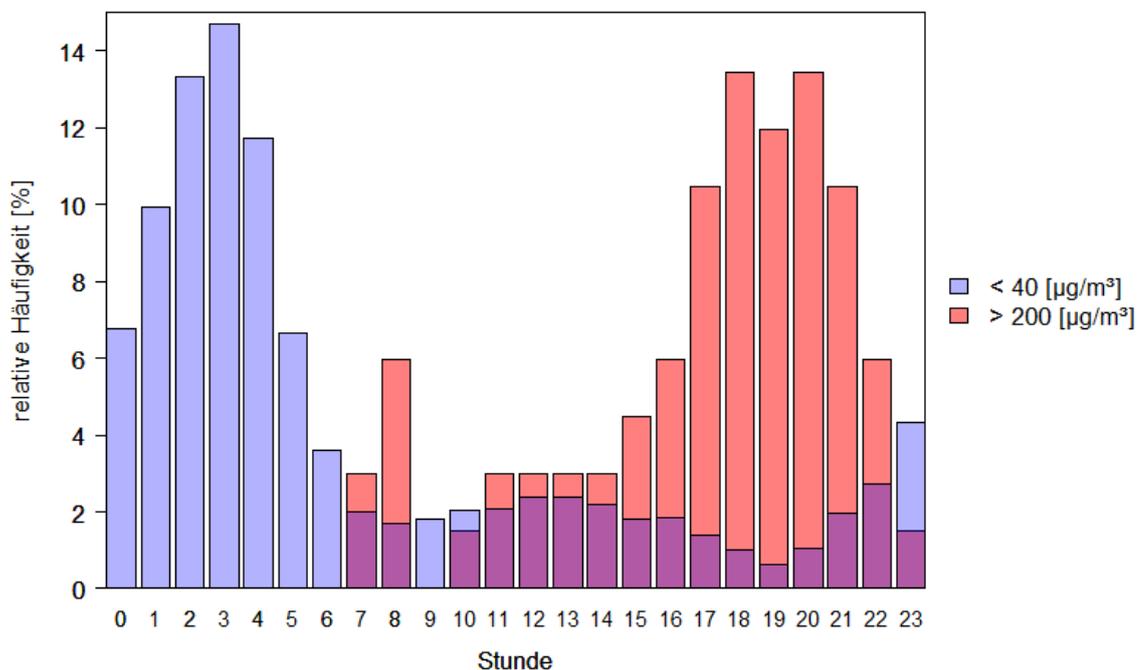


Abbildung 25: Relative Häufigkeitsverteilung der Stickstoffdioxidkonzentrationen < 40 µg m⁻³ und > 200 µg m⁻³ an der LÜB-Station Landshuter Allee in Abhängigkeit von der Uhrzeit im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

Obwohl die mittlere Windgeschwindigkeit im Tagesverlauf großen Einfluss auf die NO₂-Konzentrationen in der Landshuter Allee hat, zeigt Abbildung A 40 im Anhang, dass selbst bei Werten unterhalb des Jahresgrenzwertes von 40 µg m⁻³ die herrschende mittlere Windgeschwindigkeit nicht viel größer ist als die mittlere Geschwindigkeit zu Zeitpunkten, an denen extrem hohe Stickstoffdioxidkonzentrationen über dem 1-Stunden-Grenzwert gemessen wurden. Jedoch ist zu erkennen, dass die niedrigen Konzentrationen mit den gemessenen höchsten Windgeschwindigkeiten in der Landshuter Allee, also besonders die überdurchschnittlichen Windgeschwindigkeiten von über 2 m s⁻¹, einhergehen. Zu Werten

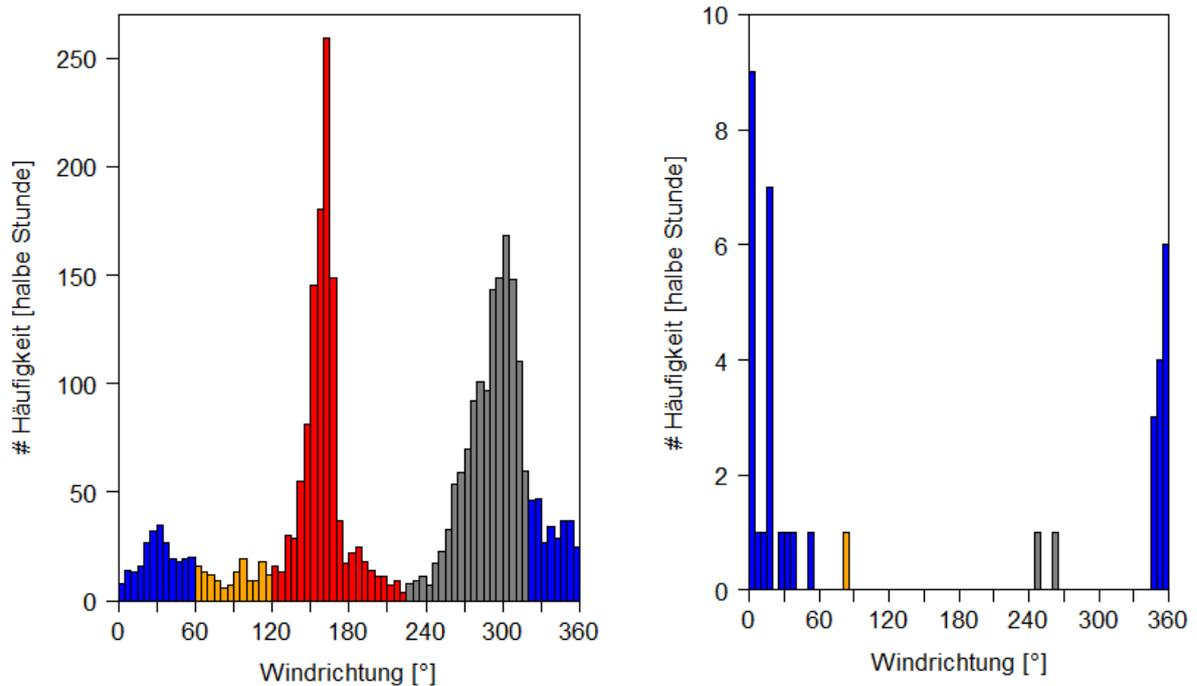


Abbildung 26: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der LÜB-Station Landshuter Allee in Korrelation mit Stickstoffdioxidkonzentrationen < 40 µg m⁻³ (links) und > 200 µg m⁻³ (rechts) im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

über 200 µg m⁻³ kam es nur bei Winden mit einer Geschwindigkeit unter 1,5 m s⁻¹ (Abbildung A 42), während es zu Konzentrationen unter 40 µg m⁻³ bei allen gemessenen Winden kommen konnte (Abbildung A 41). Diese Konzentrationen unter 40 µg m⁻³ wurden vergleichsweise oft gemessen, wenn der Wind aus Süden oder aus Westen an das Anemometer herangetragen wurde (Abbildung 25), also aus Windrichtungen, die verglichen mit Nordströmungen seltener erfasst wurden. Dazu passend wurde die Alarmkonzentration von 200 µg m⁻³ beinahe nur während Nordwinden gemessen. Diese wurde weiter vermehrt in den Sommermonaten der 1,5 Jahre überschritten, nie im Frühling (Anhang Abbildung A 43). Der Grenzwert 40 µg m⁻³ wurde damit korrelierend am seltensten im Juni eingehalten. Konzentrationen unter 40 µg m⁻³ wurden hauptsächlich nachts gemessen und besonders um den Zeitraum 3 Uhr morgens (Abbildung 24). Die Tageszeit, zu der am häufigsten der Stunden-Schwellenwert von 200 µg m⁻³ überschritten wird ist vor allem am Nachmittag und frühen. Im Messzeitraum wurde zwischen 00:00 Uhr und 07:00 Uhr nie der der 1-Stunden-Grenzwert überschritten. Wenn es zu NO₂-Konzentrationen über 200 µg m⁻³ gekommen ist, lag meistens die häufigste Großwetterlage *Wa* vor, während Konzentrationen unter 40 µg m⁻³ vor allem während den Großwetterlagen *HM* und *Wz* gemessen wurden.

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Während die Winde in München an einem relativ exponiert gelegenen Platz mit durchschnittlich $2,7 \text{ m s}^{-1}$ Geschwindigkeit wehen, liegt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit im Untersuchungsraum Landshuter Allee bei gerade mal $0,7 \text{ m s}^{-1}$. Die Windgeschwindigkeit ist nachts tendenziell am geringsten, besonders in den Sommermonaten, und am Nachmittag, besonders im Frühling, am höchsten. Dabei scheint es in der Landshuter Allee keine große Auswirkung zu haben, ob die Äste der Baumreihen kahl oder belaubt sind. Stärkere Gewichtung kann der herrschenden Großwetterlage zugeschrieben werden. Die höchsten Windgeschwindigkeiten kamen an beiden Messstandorten durch den Einfluss zyklonaler Westlagen zustande. An der DWD-Messstation handelte es sich dabei um Westwinde. Die schnellsten Winde wurden in der Landshuter Allee aus südlicher Richtung erfasst. Zu dieser Windrichtung kommt es vor allem in den frühen Morgenstunden, während ansonsten in der Straßenschlucht fast ausschließlich Nordwinde erfasst werden. Die Kanalisation im Canyon spielt eine sehr große Rolle für die Belüftung der Straße. Eine Ausnahmeposition nimmt die Großwetterlage Hochdruck über Mitteleuropa *HM* ein. Diese korreliert im Untersuchungszeitraum am DWD-Messstandort zu 50 % mit Ostwinden, welche oft schwach wehen, und führt in der Landshuter Allee zu Westwinden. Diese Umkehrung der Hauptwindrichtung in der Landshuter Allee tritt, neben der überwiegenden Kanalisierung in eine Nord-Südströmung, auch für Westwinde auf.

Die Konzentrationsverläufe der Schadstoffe NO_2 und O_3 sind im Untersuchungszeitraum tagesperiodisch und direkt voneinander abhängig, aufgrund des photostationären Gleichgewichtes zwischen den Molekülen. Aber obwohl für Ozon aufgrund seiner chemischen Entstehung an Sommernachmittagen die höchsten Werte gemessen werden, sind auch die NO_2 -Konzentrationen tagsüber und im Sommer am höchsten. Vor allem an Arbeitstagen am frühen Abend sind die Werte im Mittel am höchsten, während sie am Wochenende in den frühen Morgenstunden am geringsten sind. Zu den niedrigsten Konzentrationen kommt es vor allem, wenn der Wind in der Landshuter Allee schnellstmöglich weht. Die höchsten Konzentrationen, welche den Stundengrenzwert überschreiten, werden ausschließlich bei Windgeschwindigkeiten unter $1,5 \text{ m s}^{-1}$ gemessen. Der allgemeine Grenzwert von $40 \mu\text{g m}^{-3}$ wird aber auch durchaus bei niedrigen

Windgeschwindigkeiten eingehalten. Auch eine direkte Abhängigkeit der Stickstoffdioxidkonzentration von der Großwetterlage lässt sich nicht ziehen. Vielmehr zeigen beispielsweise die Großwetterlagen *HM* und *Wz* zwar geringe Stickoxidbelastung, jedoch gehen diese Wetterlagen meist mit West- bzw. Südwinden einher, welche in einer unabhängigen Analyse mit niedrigen NO₂-Konzentrationen korrelieren. Ein Anstieg der NO₂-Konzentrationen geht auch nicht signifikant mit einem Anstieg der Luft- oder Taupunkttemperatur einher, sondern ist mehr von den sonstigen Bedingungen abhängig, bei welchen es zu höheren Temperaturen kommt.

Insgesamt kann man davon ausgehen, dass dieser 1,5 Jahre Zeitraum die Bedingungen in der Landshuter Allee statistisch relativ gut ablichtet. Ein Vergleichszeitraum vom 01.01.2017 bis zum 31.12.2020 zeigt jedoch, dass trotz noch höherer gemessener Extremwerte von bis zu 270 µg NO₂ m⁻³ die Stickstoffdioxidkonzentrationen im Mittel eigentlich um 17 µg m⁻³ niedriger sind (Anhang Abbildung A 39). Da sich die Tagesmittel und weiteren statistischen Kenngrößen in dieser Arbeit aus mehr Sommer- als Wintermonaten berechnet haben, kann man davon ausgehen, dass die Stickstoffdioxidkonzentrationen eigentlich etwas geringer sind, so wie im vierjährigen Zeitraum 2017 – 2020.

Diese Arbeit zeigt dennoch deutlich, dass verschiedene meteorologische Parameter Einfluss auf die Reinheit der Luft haben. Die hohen Stickstoffdioxidkonzentrationen in der Landshuter Allee können durch eine bessere Belüftung gesenkt werden. Dabei spielt besonders die Windgeschwindigkeit eine Rolle, welche durchaus von der Großwetterlage beeinflusst wird, sowie auch die Windrichtung. Doch selbst zu den besten Bedingungen für die Luftqualität wird in der Landshuter Allee der Schwellenwert von 40 µg NO₂ m⁻³ nur knapp unterschritten. Stattdessen wird der 1-Stunden-Grenzwert von 200 µg m⁻³ im Untersuchungszeitraum mehrmals überschritten. Die natürlichen Lüftungsbedingungen reichen in der Straßenschlucht nicht aus, um die Gesundheit der Anwohner nicht zu gefährden. Deshalb sollte der beste Schritt zum Wohle der Bürger sein, das Verkehrskonzept in der achtspurigen Straße zu verändern. Wenn die Pilotstudie REINELUFFT mit ihren Filtern bis dahin für niedrigere NO₂-Konzentrationen beitragen kann, ist das ein wichtiger Schritt für die Bewohner der Landshuter Allee.

Quellenverzeichnis

- Afiq, Azwadi and Saqr (2012). Effects of buildings aspect ratio, wind speed and wind direction on flow structure and pollutant dispersion in symmetric street canyons. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 7(2), 158–165.
- Britter, R.E. and Hanna, S.R. (2003). FLOW AND DISPERSION IN URBAN AREAS. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35(1), 469–496.
- Buccolieri, R. and Hang, J. (2019). Recent Advances in Urban Ventilation Assessment and Flow Modelling. *Atmosphere*, 10(3), 144.
- Di Sabatino, S., Buccolieri, R. and Kumar, P. (2018). Spatial Distribution of Air Pollutants in Cities. In: Capello, F. and Gaddi, A.V. (eds.), *Clinical Handbook of Air Pollution-Related Diseases*. Cham: Springer International Publishing, 75–95.
- Dommen, J. (2017). Feinstaub beeinflusst Gesundheit und Klima. *Swiss Medical Forum*, (39).
- Dong, J., Tan, Z., Xiao, Y. and Tu, J. (2017). Seasonal Changing Effect on Airflow and Pollutant Dispersion Characteristics in Urban Street Canyons. <https://www.mdpi.com/2073-4433/8/3/43/htm> (accessed 20 July 2021).
- DWD (2021a). CDC - Climate Data Center: Index of /climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/ (accessed 5 October 2021).
- DWD (2021b). Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Großwetterlage. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/grosswetterlage/grosswetterlage.html> (accessed 5 October 2021).
- Foken, T. (2016). *Angewandte Meteorologie: Mikrometeorologische Methoden*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Funk, D. (2014). *Stadtklimaanalyse Landeshauptstadt München, 2_12_002_München_Klima_Rev00*, GEO-NET Umweltconsulting GmbH. München.
- Gromke, C. and Blocken, B. (2015). Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighborhood scale: Part II: Traffic pollutant concentrations at pedestrian level. *Environmental Pollution*, 196, 176–184.
- Helbig, A. (ed.) (1999). *Stadtklima und Luftreinhaltung: Mit ... 79 Tabellen*. Berlin: Springer.
- Hupfer, P., Kuttler, W., Chmielewski, F.-M. and Pethe, H. (2005). Mikro- und Mesoklima. In: Hupfer, P., Kuttler, W., Chmielewski, F.-M. and Heyer, E. (eds.), *Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie*. Stuttgart: Teubner, 315–369.
- Jacob, D. (1999). *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Princeton: Princeton University Press.

- Kaimal and Gaynor (1991). Another Look at Sonic Thermometry. *Boundary-layer meteorology*, (56), 401–410.
- Kurppa, M., Hellsten, A., Auvinen, M., Raasch, S., Vesala, T. and Järvi, L. (2018). Ventilation and Air Quality in City Blocks Using Large-Eddy Simulation—Urban Planning Perspective. <https://www.mdpi.com/2073-4433/9/2/65/htm#B2-atmosphere-09-00065> (accessed 13 July 2021).
- Kuttler, W. (2004). Beitragsserie: Klimänderung und Klimaschutz.
- Kuttler, W. (2013). *Klimatologie*. Paderborn: Schöningh.
- Ming, T., Fang, W., Peng, C., Cai, C., Richter, R. de, Ahmadi, M.H. and Wen, Y. (2018). Impacts of Traffic Tidal Flow on Pollutant Dispersion in a Non-Uniform Urban Street Canyon. <https://www.mdpi.com/2073-4433/9/3/82/htm> (accessed 13 July 2021).
- Nolz, R., Kammerer, G., Eitzinger, J. and Cepuder, P. (2015). *Referenzverdunstung am Standort Groß-Enzersdorf: Vergleich von Lysimeterdaten und Berechnungen*.
- Santiago, J.-L., Rivas, E., Sanchez, B., Buccolieri, R. and Martin, F. (2017). The Impact of Planting Trees on NO_x Concentrations: The Case of the Plaza de la Cruz Neighborhood in Pamplona (Spain). <https://www.mdpi.com/2073-4433/8/7/131/htm> (accessed 13 July 2021).
- Schüepp, M. and Urfer, C. (1962). Die Windverhältnisse im Davoser Hochtal. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 12(2), 337–349.
- Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. (2012). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. s.l.: Wiley-Interscience.
- Theakston, F. (ed.) (2000). *Air quality guidelines for Europe*. Copenhagen: WHO, Regional Office for Europe.
- Umweltbundesamt (2018). *Nachgefragt: Welche Gesundheitsgefahren bestehen durch langfristige Stickstoffdioxid-Belastung?*, interview with M. Tobollik, 8 March 2018.
- Umweltbundesamt (2020). Stickstoffdioxid-Belastung. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/stickstoffdioxid-belastung#belastung-durch-stickstoffdioxid> (accessed 7 September 2021).
- Umweltbundesamt (2021a). Luftqualität 2020: Nur noch wenige Städte über Stickstoffdioxid-Grenzwert: Corona-Pandemie beeinflusste Luftqualität nur leicht (accessed 31 August 2021).
- Umweltbundesamt (2021b). Stickstoffoxide, Luftschadstoffe im Überblick (accessed 31 August 2021).
- Vardoulakis, S., Fisher, B.E., Pericleous, K. and Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37, 155–182.
- Werner, P.C. and Gerstengabe, F.-W. (2010). *Katalog der Grosswetterlagen Europas: nach Paul Hess und Helmut Brezowsky*. Potsdam.
- Winkler, P., Lugauer, M. and Reitebuch, O. (2006). Alpine Pumping. *promet*, 32.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: LÜB Station Landshuter Allee München, © Anke Nölscher.....	i
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Strömung bei Alpinem Pumpen im Alpenvorland für zwei Großwetterlagen im 500 hPa Niveau: Südlagen (durchgezogene Linien) und Nordlagen (gepunktete Linien), © (Winkler et al., 2006).	6
Abbildung 3: Geometrische Straßenschluchten mit Höhe H der Häuser und Breite W der Straße (Afiq et al., 2012).....	6
Abbildung 4: Standorte der Messstationen im Stadtbild München. © Bayerische Vermessungsverwaltung 2021, geoportal.bayern.de	11
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Straßenschlucht Landshuter Allee auf Höhe der LÜB Station. © Sophie Arzberger	12
Abbildung 6: Statistisches Vorgehen bei der Analyse der Datensätze.....	17
Abbildung 7: Häufigkeitsverteilung der gemessenen Windrichtungen an der DWD-Messstation München Stadt als Stundenmittelwerte (rechts) und der halbstündig gemessenen Windrichtungen an der LÜB-Station Landshuter Allee (links) im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.....	19
Abbildung 8: Mittlerer Tagesgang der gemessenen Windgeschwindigkeiten an der LÜB-Station Landshuter Allee (rot) und an der DWD-Messstation München Stadt (blau) im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.	20
Abbildung 9: Mittlerer Tagesgang der gemessenen Windgeschwindigkeiten an der LÜB-Station Landshuter Allee (Linie durchgezogen) und an der DWD-Messstation München Stadt (Linie gestrichelt) in Abhängigkeit von der Jahreszeit im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.....	21
Abbildung 10: Mittlerer Tagesgang der gemessenen Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Belaubung der Bäume (unbelaubt: blau, belaubt: gelb) im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016; o.l.: DWD-Messstation; o.r.: LÜB-Station Landshuter Allee Durchschnitt; u.l.: LÜB-Station Landshuter Allee ausschließlich während der Großwetterlage Wa (Westlage, überwiegend antizyklonal); u.r.: LÜB-Station Landshuter Allee ausschließlich während der Großwetterlage HM (Hoch Mitteleuropa).	22
Abbildung 11: Mittlerer Tagesgang der gemessenen Windgeschwindigkeiten an der LÜB-Station Landshuter Allee (links) und an der DWD-Messstation München Stadt (rechts) in Abhängigkeit von der herrschenden Großwetterlage im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.....	23

Abbildung 12: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentration, der Ozonkonzentration, der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit in der Landshuter Allee im Messzeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.....	25
Abbildung 13: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentration, der Ozonkonzentration, der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit in der Helene-Weber-Allee im Messzeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.....	25
Abbildung 14: Mittlerer Tagesgang der gemessenen Windrichtung an der LÜB-Station Landshuter Allee (rot) und an der DWD-Messstation München Stadt (blau) im Durchschnitt und in Abhängigkeit von der Jahreszeit im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.....	26
Abbildung 15: Mittlerer Tagesgang der gemessenen Windrichtung an der LÜB-Station Landshuter Allee (links) und an der DWD-Messstation München Stadt (rechts) in Abhängigkeit von der herrschenden Großwetterlage im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.....	27
Abbildung 16: Gegenüberstellung der Windrichtung an den beiden Messstandorten zu gleichen Zeitpunkten mit farblicher Kennzeichnung der vier Hauptwindrichtungen nach (Tabelle 3) in der Landshuter Allee.....	29
Abbildung 17: Mittlerer Tagesgang der Schadstoffkonzentrationen Stickstoffdioxid an der LÜB-Station Landshuter Allee und Ozon an der LÜB-Station Stachus auf Basis der Daten des LfU im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.....	31
Abbildung 18: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen an der LÜB-Station Landshuter Allee (links) und der Ozonkonzentrationen an der LÜB-Station Stachus (rechts) in Abhängigkeit von der Jahreszeit auf Basis der Daten des LfU im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.....	33
Abbildung 19: Stickstoffdioxid-Konzentrationen in der Landshuter Allee im Tages- und Jahresverlauf im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016 auf Basis der Daten des LfU.....	34
Abbildung 20: Ozon-Konzentrationen am Stachus im Tages- und Jahresverlauf im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016 auf Basis der Daten des LfU.....	35
Abbildung 21: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen an der LÜB-Station Landshuter Allee (links) und der Ozonkonzentrationen an der LÜB-Station Stachus (rechts) differenziert in Arbeitstage (Mo, Di, Mi, Do, Fr) und Wochenende (Sa, So) auf Basis der Daten des LfU im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.....	35
Abbildung 22: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen an der LÜB-Station Landshuter Allee in Abhängigkeit von der Windrichtung in der Landshuter Allee (links) auf Basis der Daten des LfU und in Abhängigkeit von der Windrichtung an der DWD-Messstation München Stadt (rechts) auf Basis der Daten des DWD im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.....	37

Abbildung 23: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen an der LÜB-Station Landshuter Allee in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit in der Landshuter Allee (links) auf Basis der Daten des LfU in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit an der DWD-Messstation München Stadt (rechts) auf Basis der Daten des DWD im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016..... 38

Abbildung 24: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen an der LÜB-Station Landshuter Allee auf Basis der Daten des LfU in Abhängigkeit von der herrschenden Großwetterlage auf Basis der Daten des DWD im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016. 39

Abbildung 25: Relative Häufigkeitsverteilung der Stickstoffdioxidkonzentrationen $< 40 \mu\text{g m}^{-3}$ und $> 200 \mu\text{g m}^{-3}$ an der LÜB-Station Landshuter Allee in Abhängigkeit von der Uhrzeit im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016..... 42

Abbildung 26: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der LÜB-Station Landshuter Allee in Korrelation mit Stickstoffdioxidkonzentrationen $< 40 \mu\text{g m}^{-3}$ (links) und $> 200 \mu\text{g m}^{-3}$ (rechts) im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016..... 43

Anhang

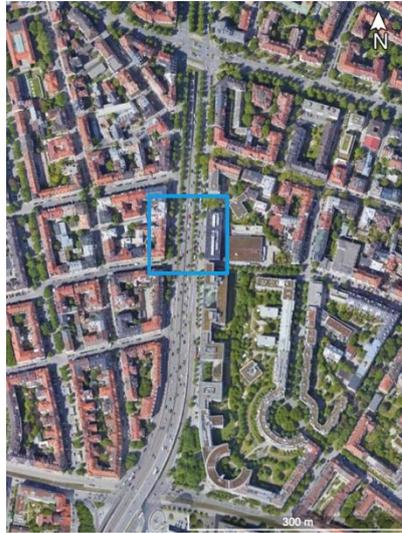


Abbildung A 1: Für Pilotstudie REINELUFFT relevanter Abschnitt der Landshuter Allee, München. Google Earth: © 2021 GeoBasis-DE/BKG, GeoContent, Maxar Technologies Kartendaten © 2021COWI, GeoBasis-DE/BKG, © 2021 Google



Abbildung A 2: Von Gebäuden begrenzte, achtspurige Fahrbahn mit 3 Baumreihen. LfU, © Bayerische Vermessungsverwaltung 2019.



Abbildung A 3: Das relevante Ultraschallanemometer des LfU auf der LÜB-Station nahe der Straße auf ca. 3,5 m.



Abbildung A 4: Niederlassung "München Stadt" des Deutschen Wetterdienstes ©Deutscher Wetterdienst.

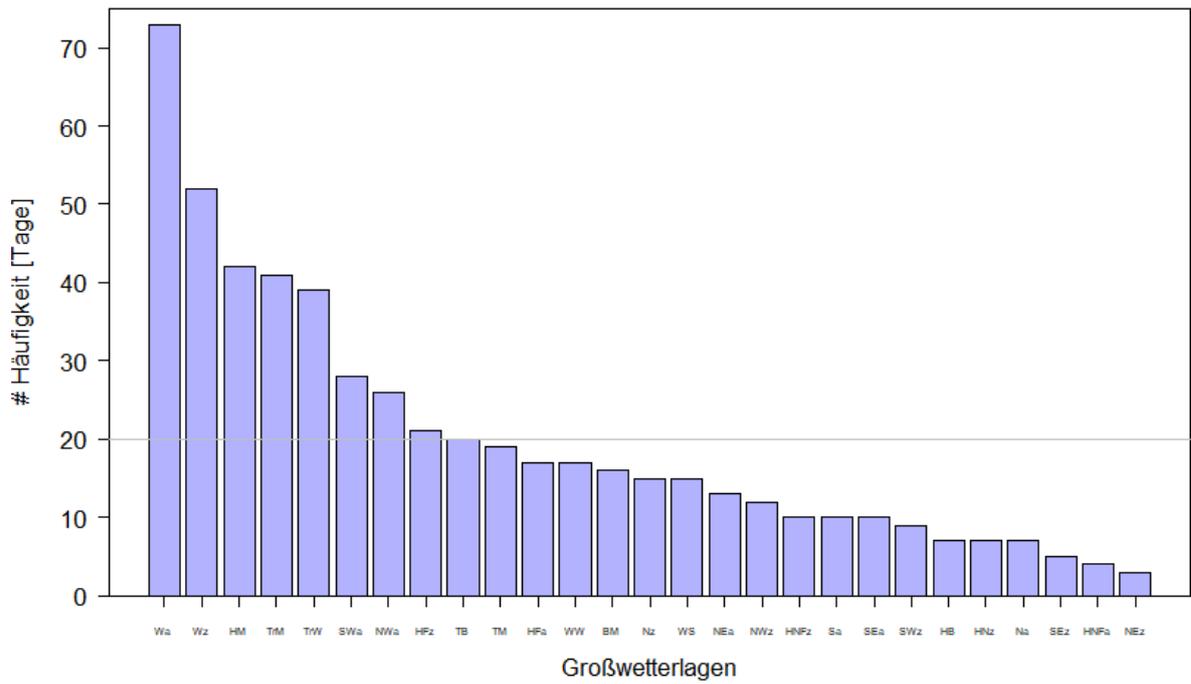


Abbildung A 5: Häufigkeitsverteilung der Großwetterlagen in Europa nach HESS und BREZOWSKY im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

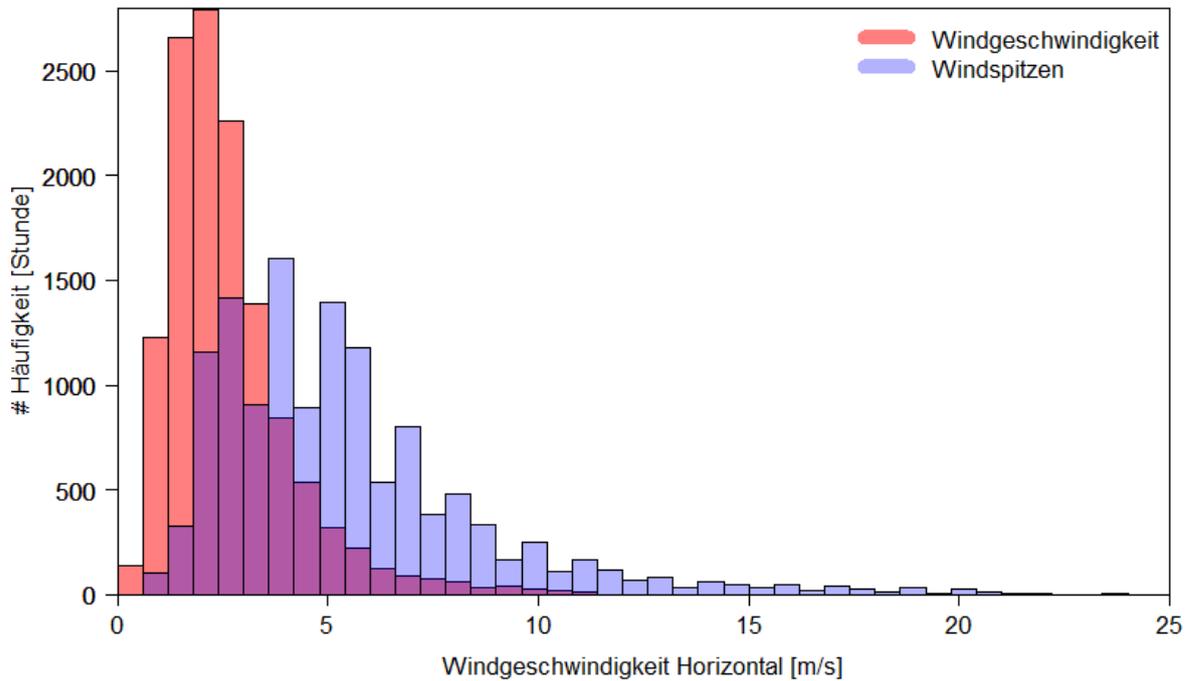


Abbildung A 6: Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Windgeschwindigkeiten als Stundenmittelwerte und der höchsten Windspitzen innerhalb einer Stunde an der DWD-Messtation München Stadt im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

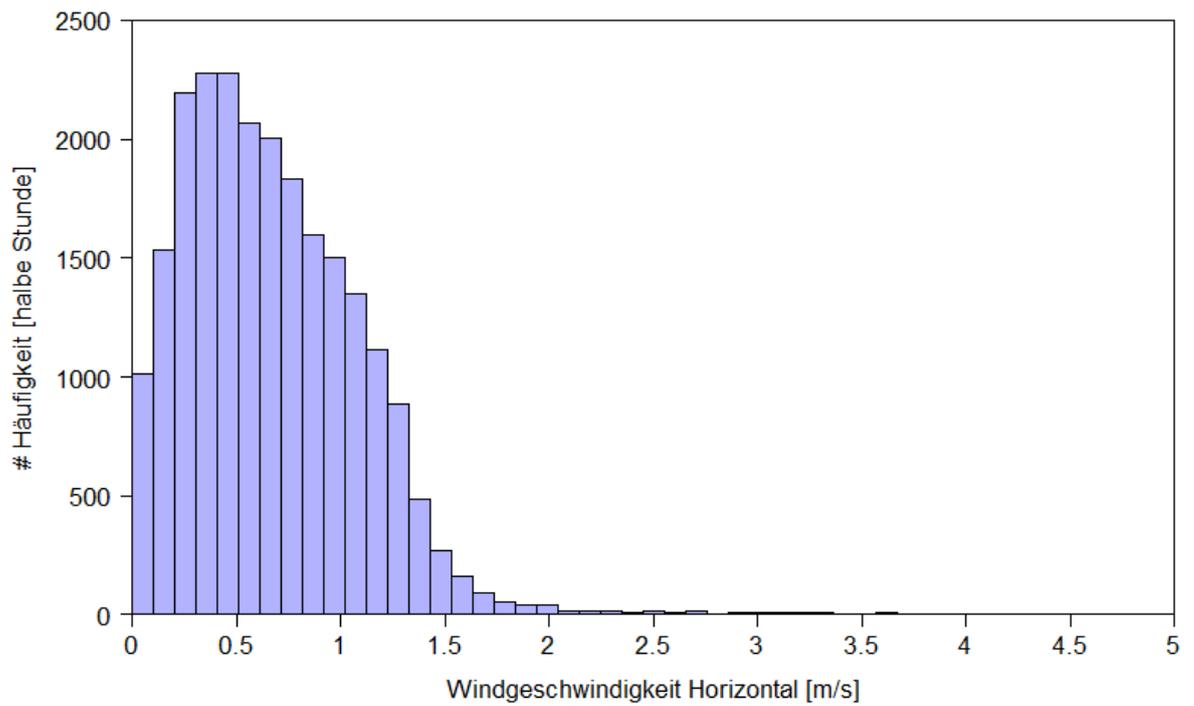


Abbildung A 7: Häufigkeitsverteilung der gemessenen Windgeschwindigkeiten an der LÜB-Station Landshuter Allee im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

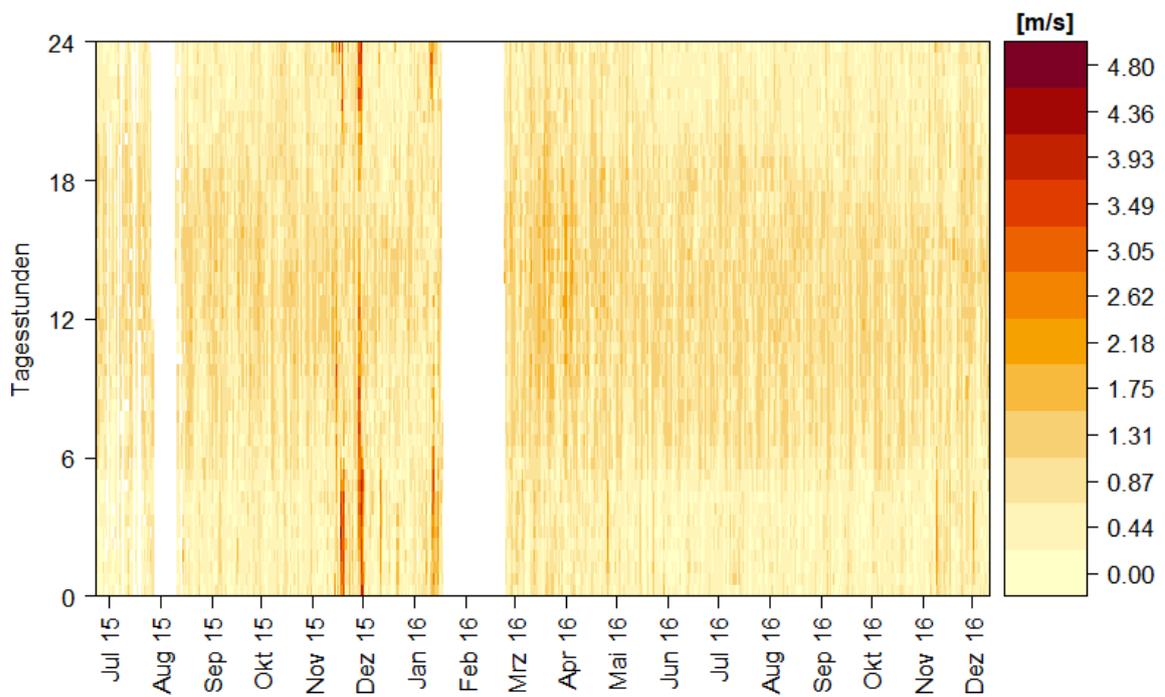


Abbildung A 9: Windgeschwindigkeit in der Landshuter Allee im Tages- und Jahresverlauf im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016 auf Basis der Daten des LfU.

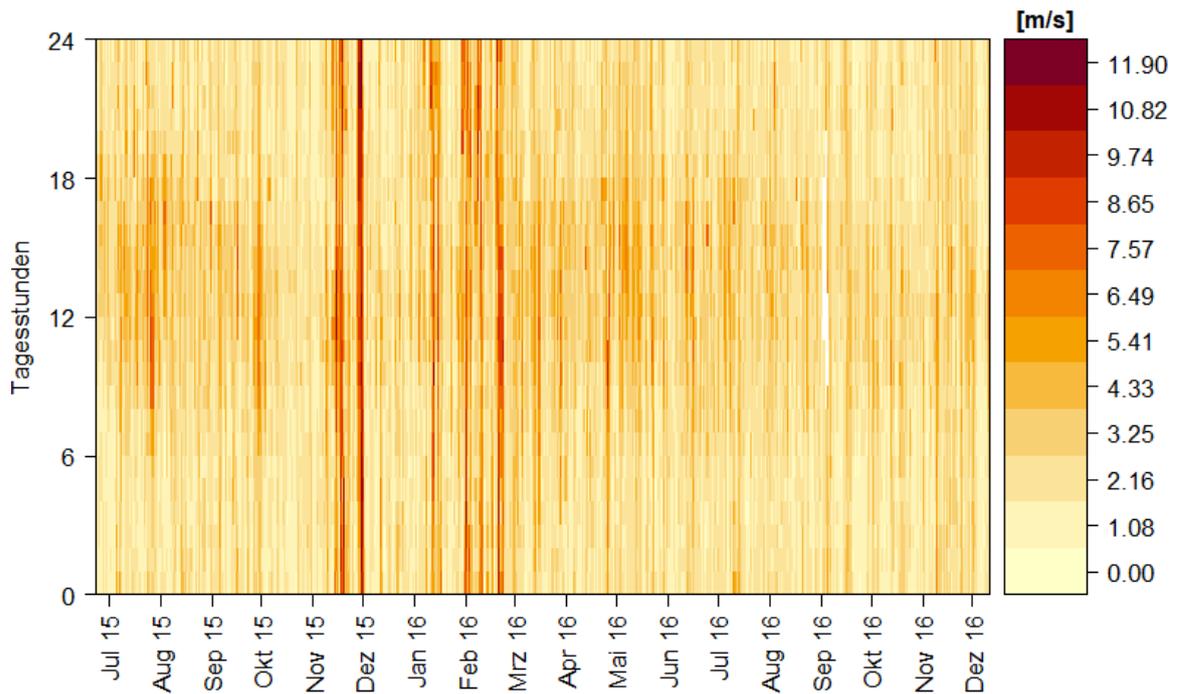


Abbildung A 10: Windgeschwindigkeit in der Helene-Weber-Allee im Tages- und Jahresverlauf im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016 auf Basis der Daten des Deutschen Wetterdienst.

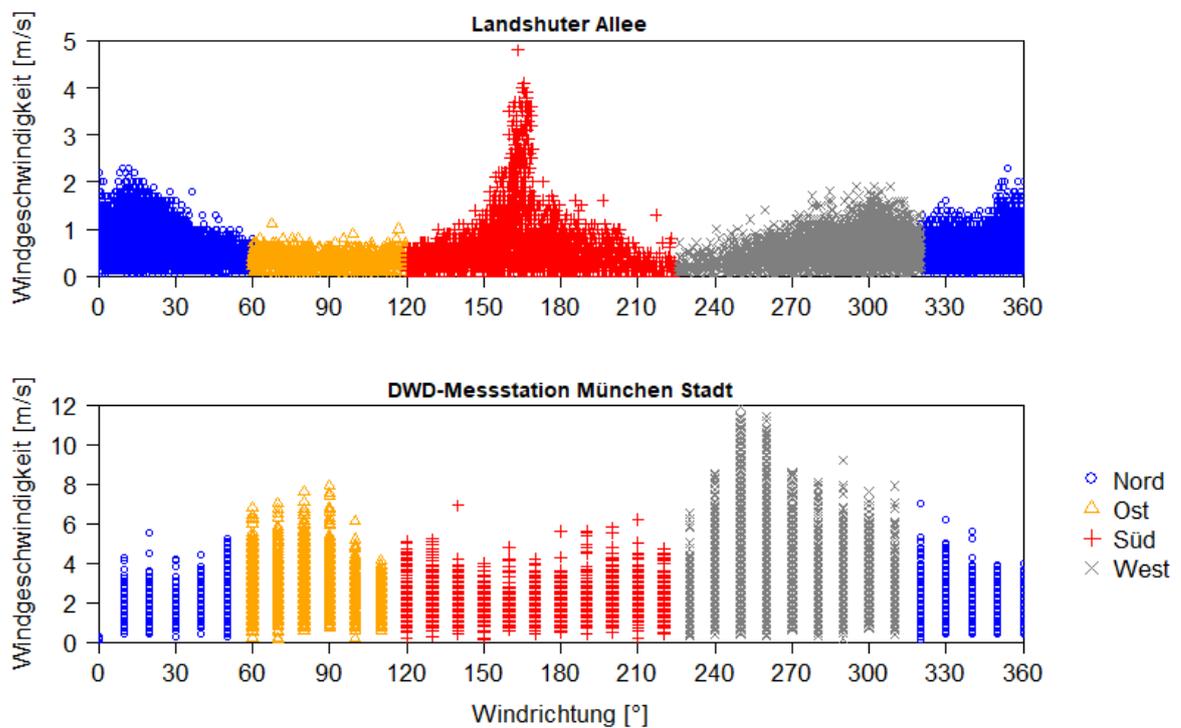


Abbildung A 11: Graphische Darstellung der Abhängigkeit der gemessenen Windgeschwindigkeit an der LÜB-Station Landshuter Allee (oben) und an der DWD-Messtation München Stadt (unten) von der Windrichtung durch Unterteilung in Windsektoren im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

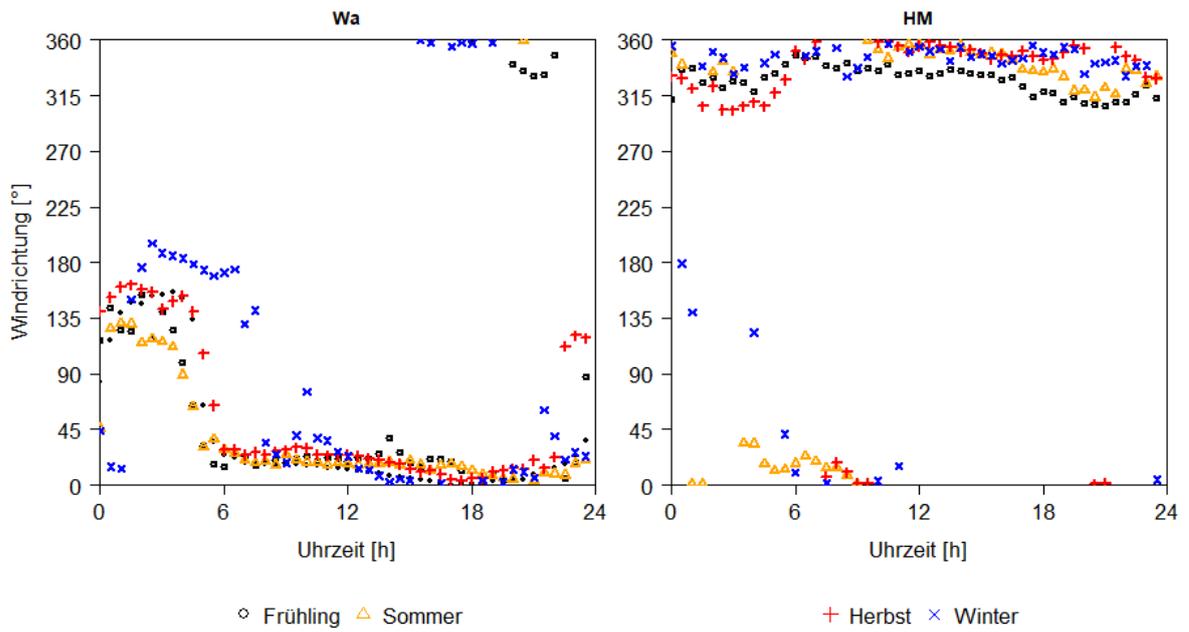


Abbildung A 12: Mittlerer Tagesgang der gemessenen Windrichtung an der LÜB-Station Landshuter Allee in Abhängigkeit von der Jahreszeit im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016; links: ausschließlich während der Großwetterlage Wa (Westlage, überwiegend antizyklonal); rechts: ausschließlich während der Großwetterlage HM (Hoch Mitteleuropa).

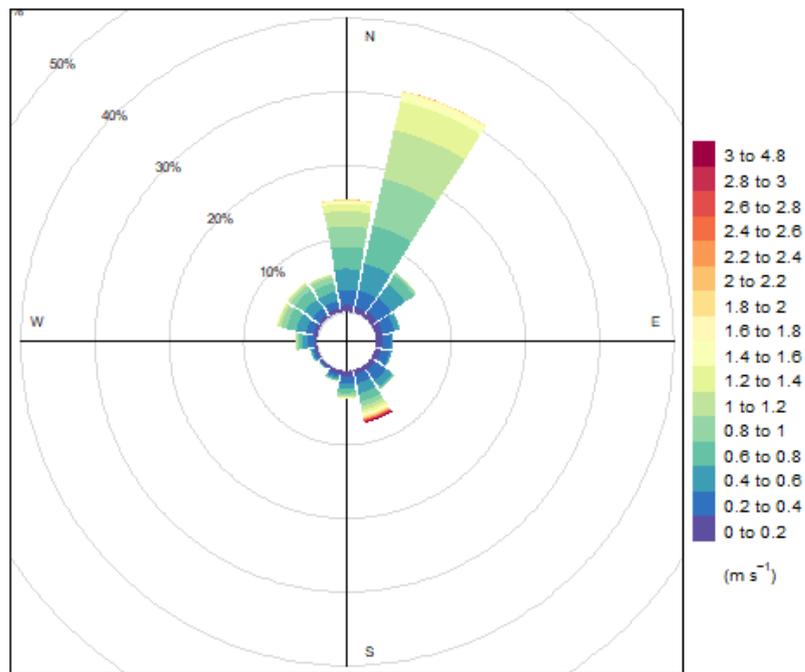


Abbildung A 13: Windrose Landshuter Allee, umfasst alle Daten aus dem Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

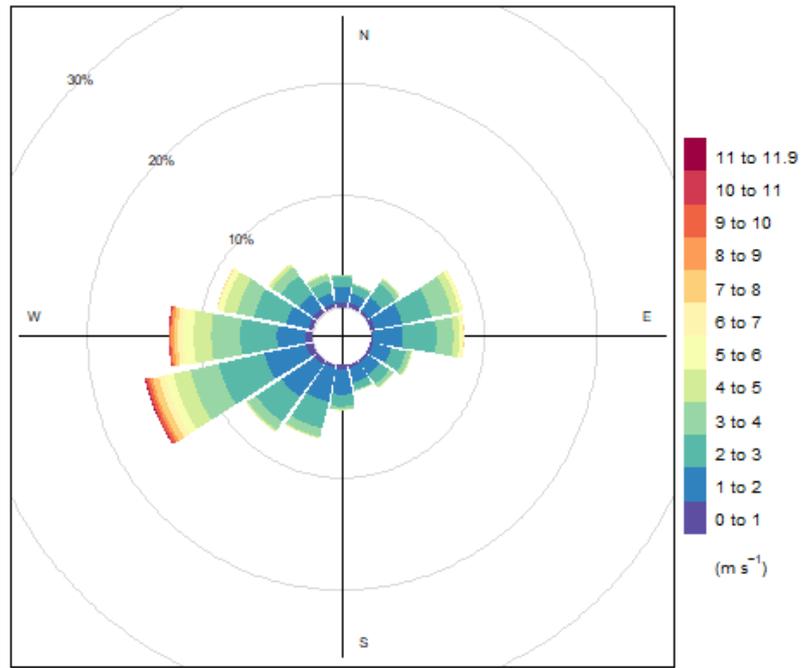


Abbildung A 14: Windrose München Stadt, umfasst alle gemittelten Stundendaten des Deutschen Wetterdienstes aus dem Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

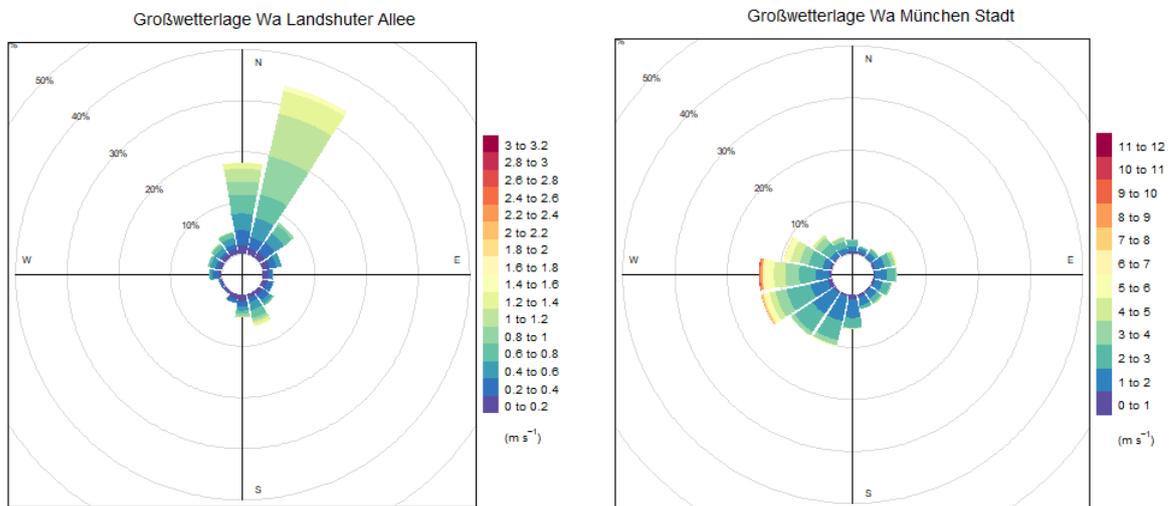


Abbildung A 15: Gegenüberstellung der Parameter Windrichtung und Windgeschwindigkeit ausschließlich bei Großwetterlage Wa („Westlage, überwiegend antizyklonal“) für die Standorte LÜB-Station Landshuter Allee (links) und DWD-Messstation München Stadt (rechts) im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

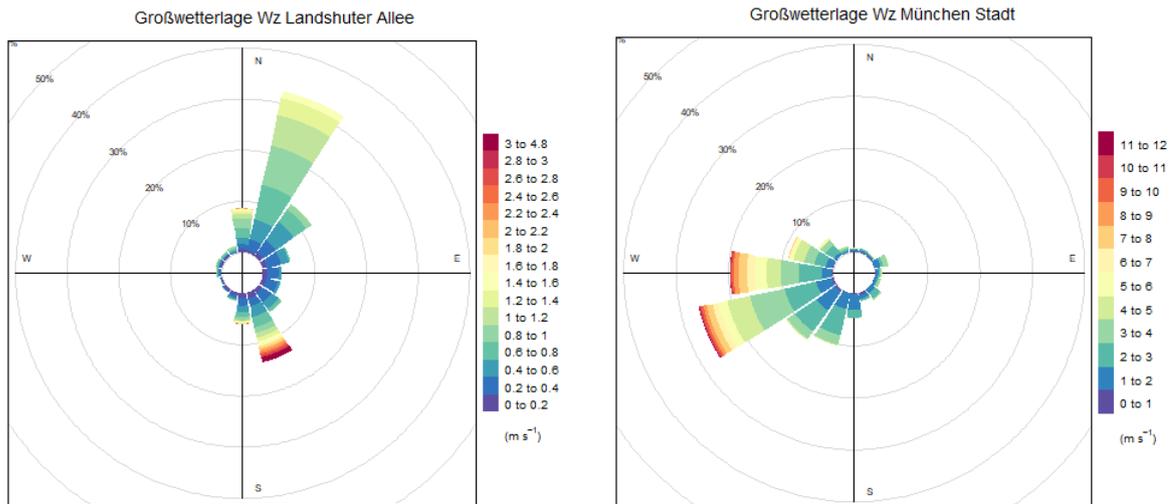


Abbildung A 16: Gegenüberstellung der Parameter Windrichtung und Windgeschwindigkeit ausschließlich bei Großwetterlage Wz („Westlage, überwiegend zyklonal“) für die Standorte LÜB-Station Landshuter Allee (links) und DWD-Messstation München Stadt (rechts) im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

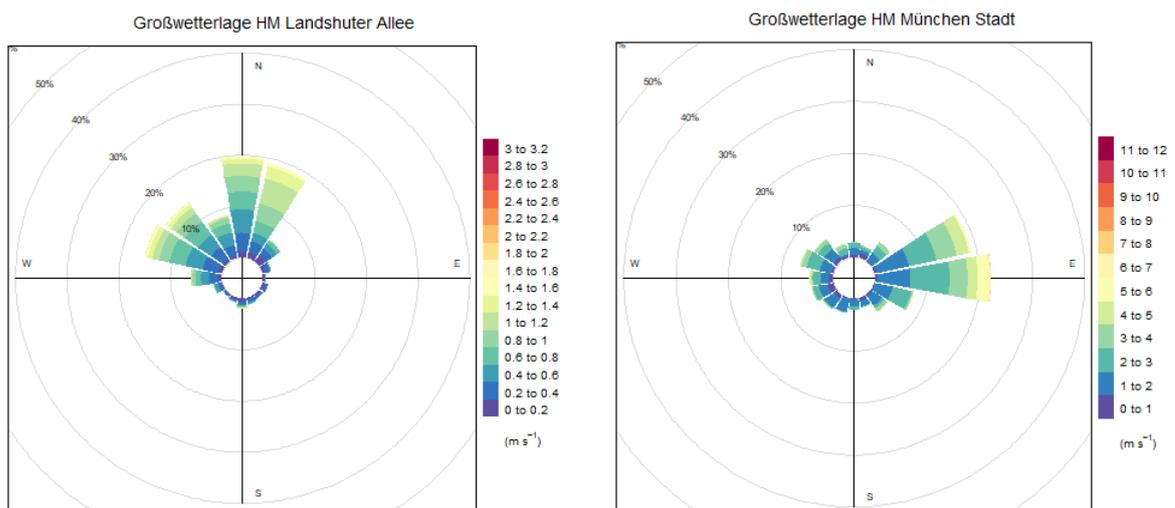


Abbildung A 17: Gegenüberstellung der Parameter Windrichtung und Windgeschwindigkeit ausschließlich bei Großwetterlage HM („Hoch Mitteleuropa“) für die Standorte LÜB-Station Landshuter Allee (links) und DWD-Messstation München Stadt (rechts) im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

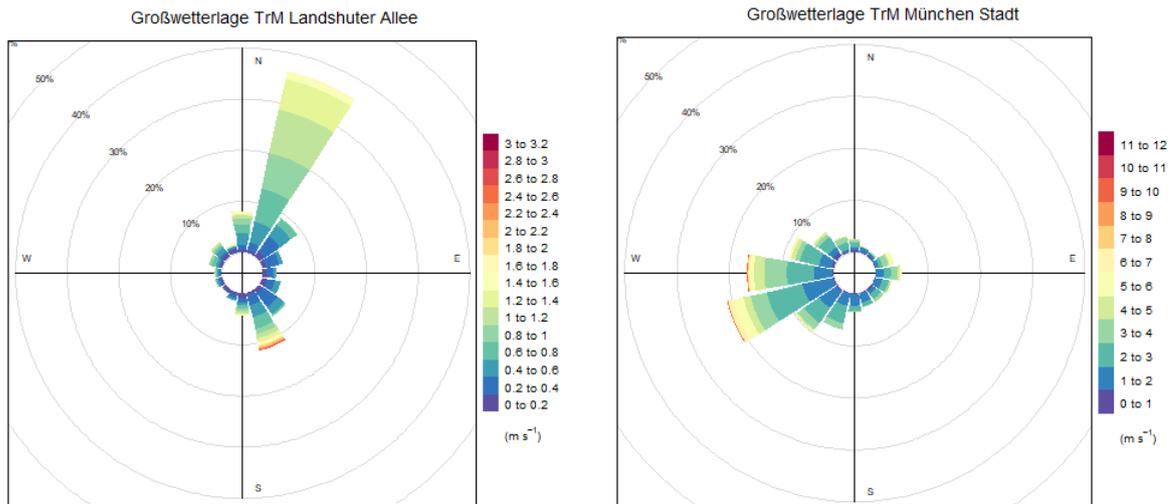


Abbildung A 18: Gegenüberstellung der Parameter Windrichtung und Windgeschwindigkeit ausschließlich bei Großwetterlage TrM („Trog Mitteleuropa“) für die Standorte LÜB-Station Landshuter Allee (links) und DWD-Messtation München Stadt (rechts) im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

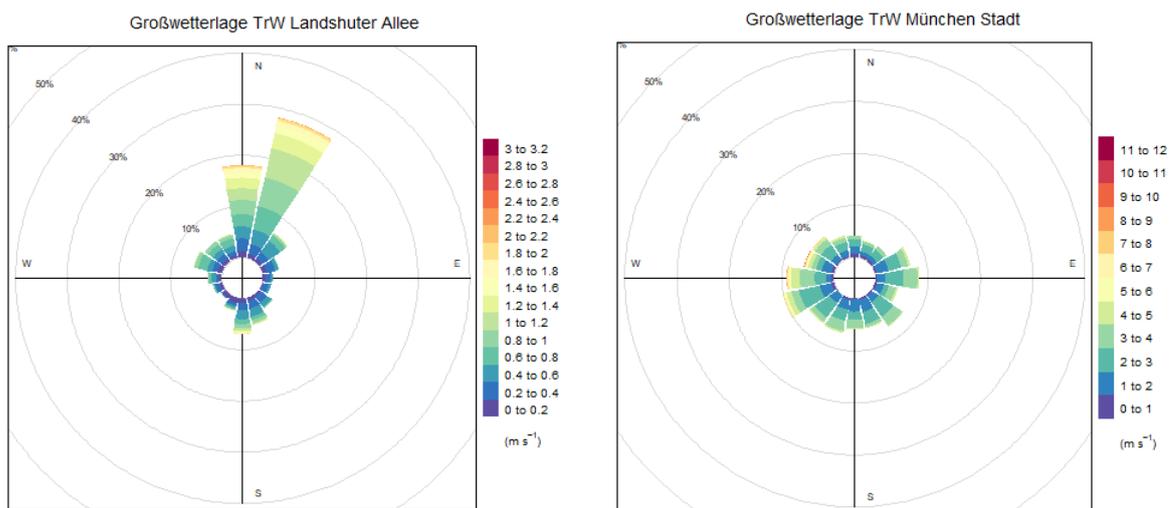


Abbildung A 19: Gegenüberstellung der Parameter Windrichtung und Windgeschwindigkeit ausschließlich bei Großwetterlage TrW („Trog Westeuropa“) für die Standorte LÜB-Station Landshuter Allee (links) und DWD-Messtation München Stadt (rechts) im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

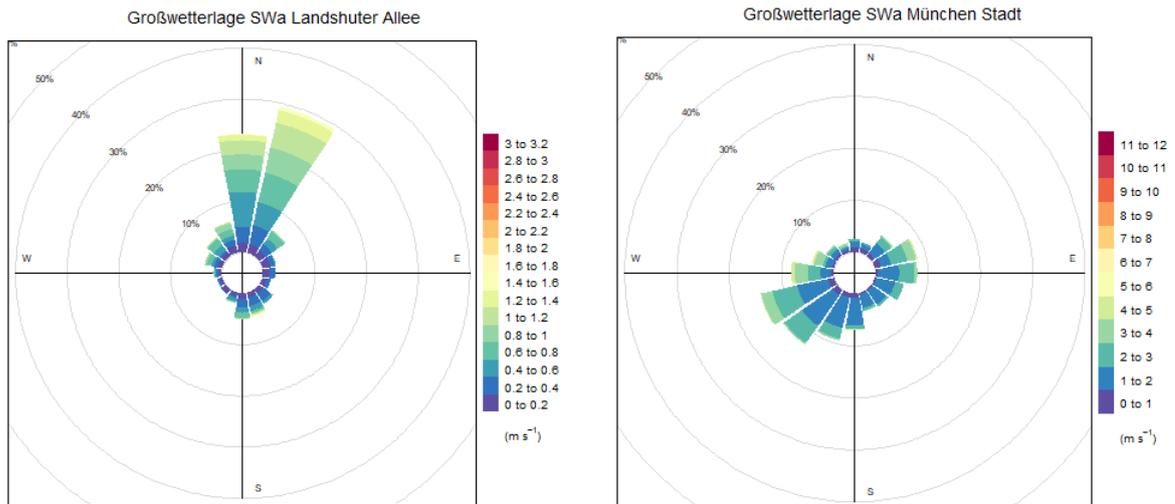


Abbildung A 20: Gegenüberstellung der Parameter Windrichtung und Windgeschwindigkeit ausschließlich bei Großwetterlage SWa („Südwestlage, überwiegend antizyklonal“) für die Standorte LÜB-Station Landshuter Allee (links) und DWD-Messstation München Stadt (rechts) im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

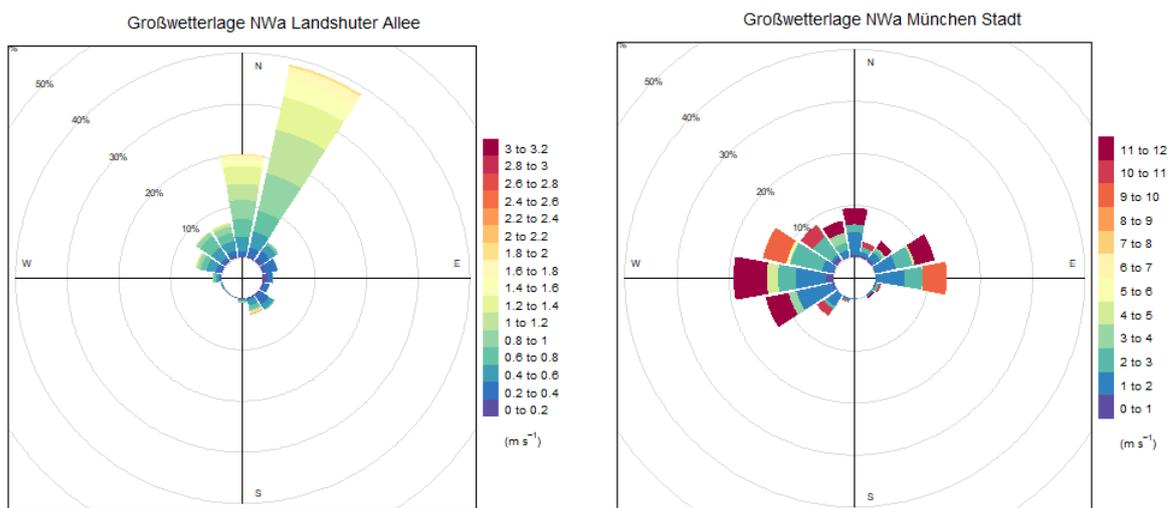


Abbildung A 21: Gegenüberstellung der Parameter Windrichtung und Windgeschwindigkeit ausschließlich bei Großwetterlage Nwa („Nordwestlage, überwiegend antizyklonal“) für die Standorte LÜB-Station Landshuter Allee (links) und DWD-Messstation München Stadt (rechts) im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

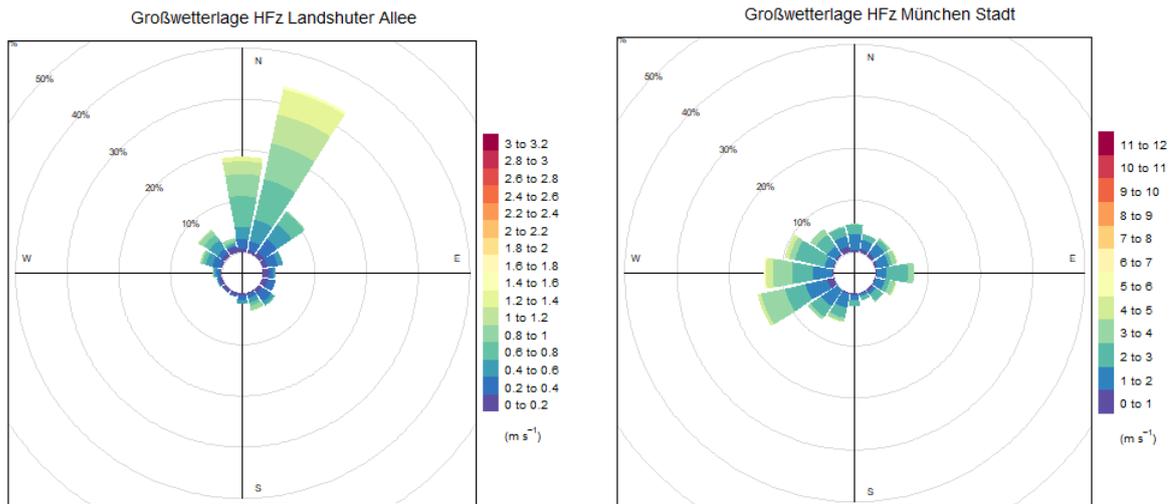


Abbildung A 22: Gegenüberstellung der Parameter Windrichtung und Windgeschwindigkeit ausschließlich bei Großwetterlage HFz („Hoch Fennoskandien, Mitteleuropa überwiegend zyklonal“) für die Standorte LÜB-Station Landshuter Allee (links) und DWD-Messtation München Stadt (rechts) im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

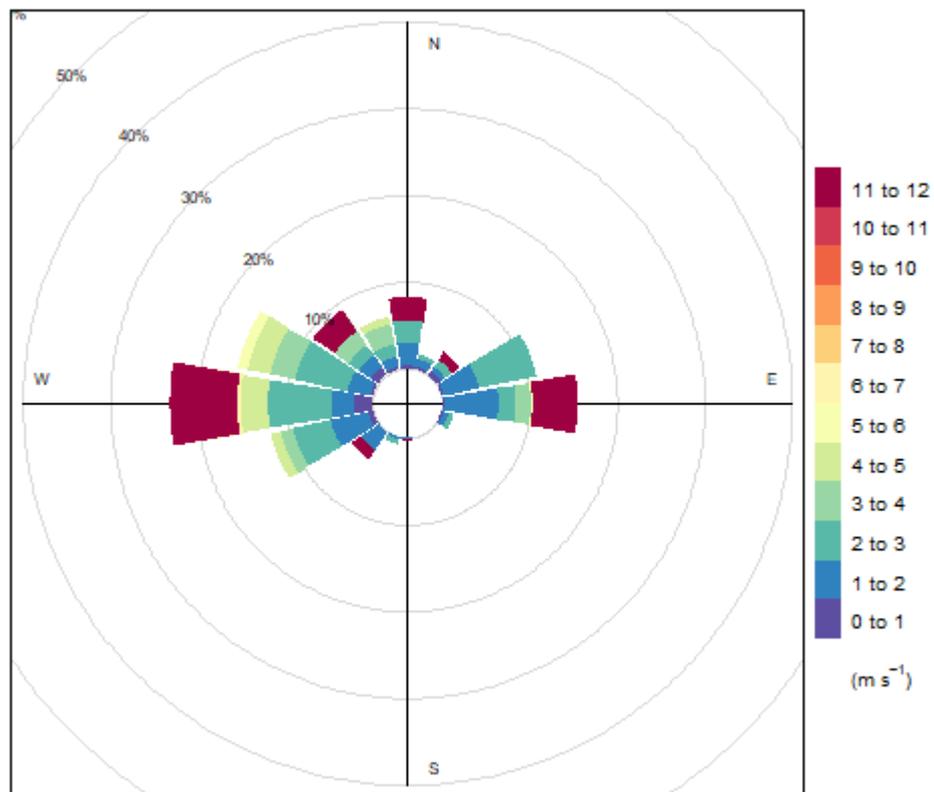


Abbildung A 23: Wetterrose der Großwetterlage NwA (Nordwestlage, überwiegend antizyklonal) für stationäre Verhältnisse an der DWD-Messtation München Stadt im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

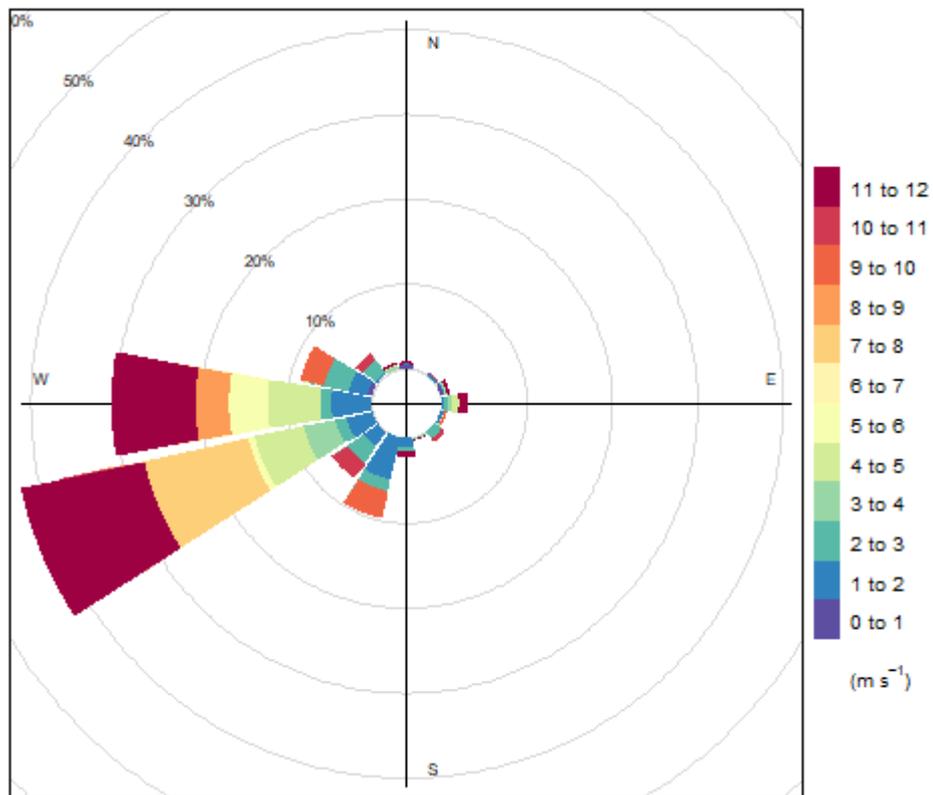


Abbildung A 24: Wetterrose der Großwetterlage NWz (Nordwestlage, überwiegend zyklonal) an der DWD-Messstation München Stadt im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

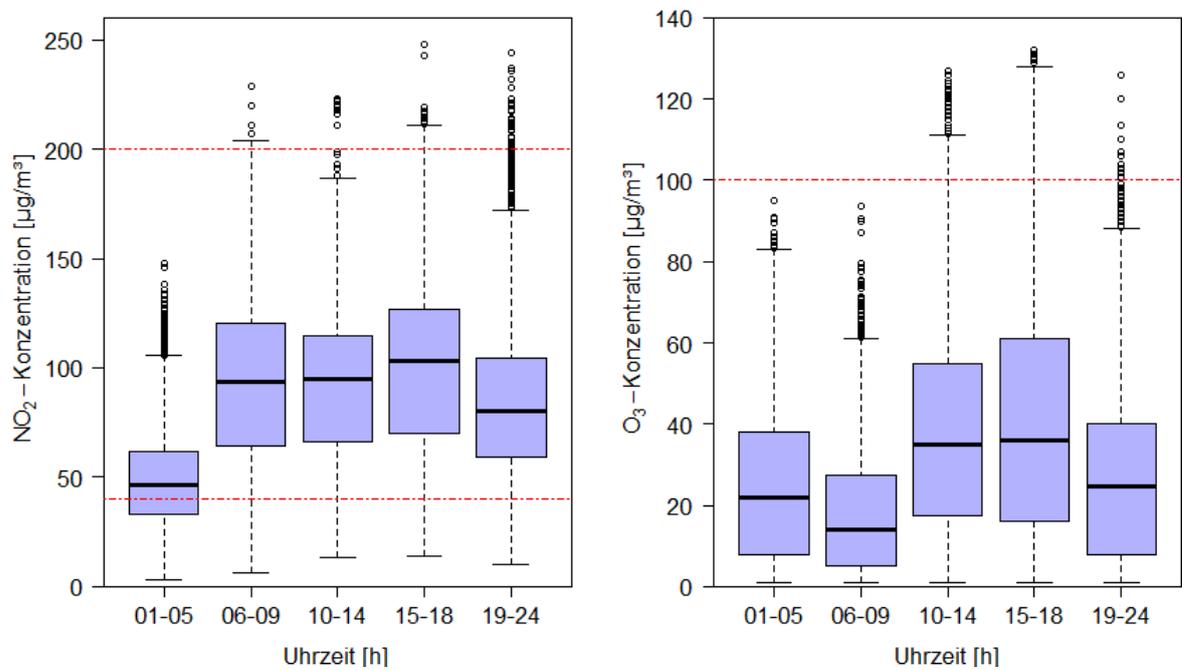


Abbildung A 25: Statistische Darstellung der Stickstoffdioxidkonzentration an der LÜB-Station Landshuter Allee (links) und der Ozonkonzentration an der LÜB-Station Stachus (rechts) zu verschiedenen Tageszeiträumen mit Minimum, 25%-Quartil, Median, 75%-Quartil, Maximalwert ohne Ausreißer und Ausreißer im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

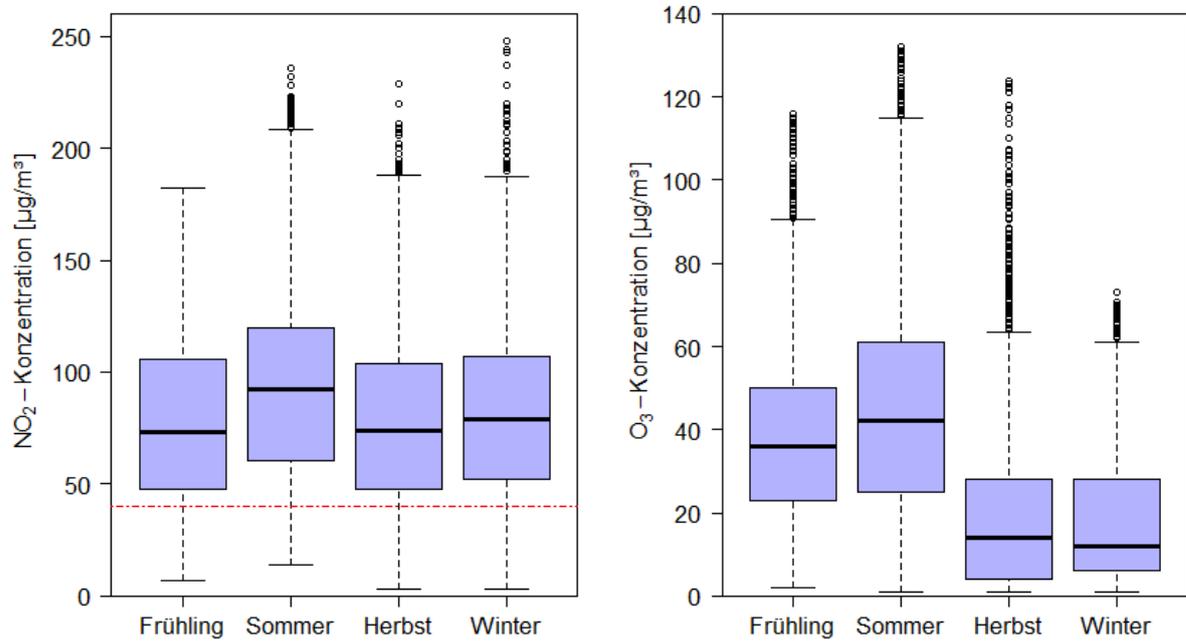


Abbildung A 26: Statistische Darstellung der Stickstoffdioxidkonzentration an der LÜB-Station Landshuter Allee (links) und der Ozonkonzentration an der LÜB-Station Stachus (rechts) in Abhängigkeit der Jahreszeiten mit Minimum, 25%-Quartil, Median, 75%-Quartil, Maximalwert ohne Ausreißer und Ausreißer im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

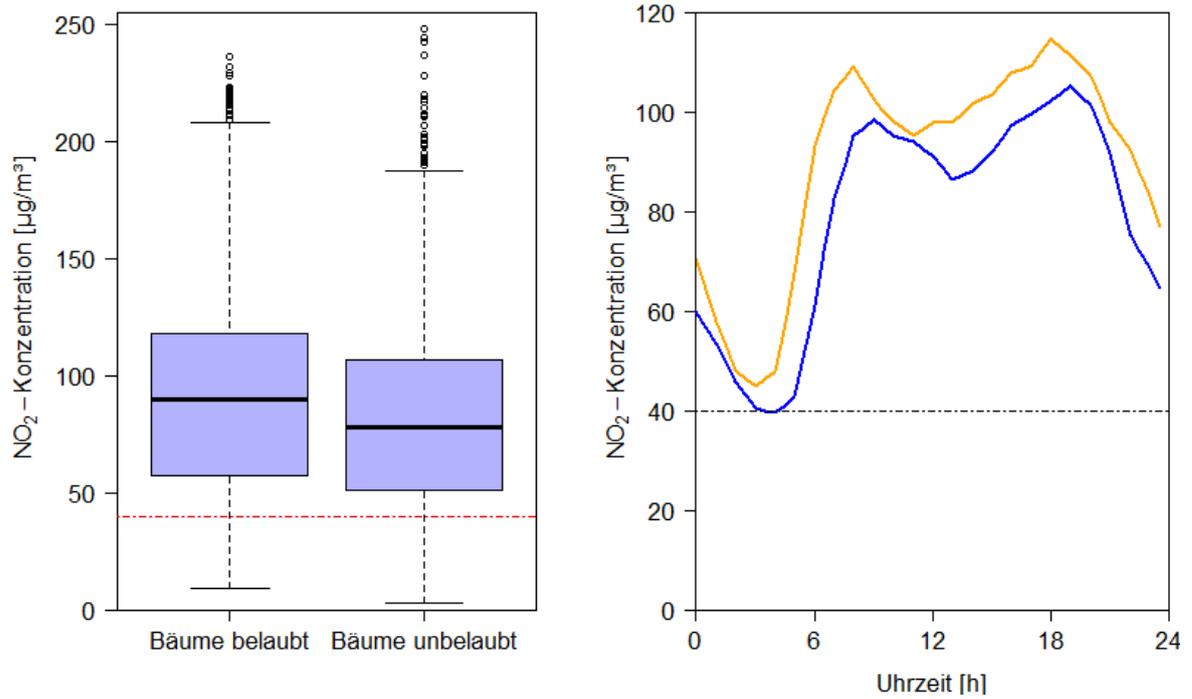


Abbildung A 27: Statistische Darstellung der Stickstoffdioxidkonzentration in Abhängigkeit der Belaubung der Bäume mit Minimum, 25%-Quartil, Median, 75%-Quartil, Maximalwert ohne Ausreißer und Ausreißer (links) und Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen in Abhängigkeit der Belaubung der Bäume (unbelaubt: blau, belaubt: gelb) (rechts) an der LÜB-Station Landshuter Allee im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

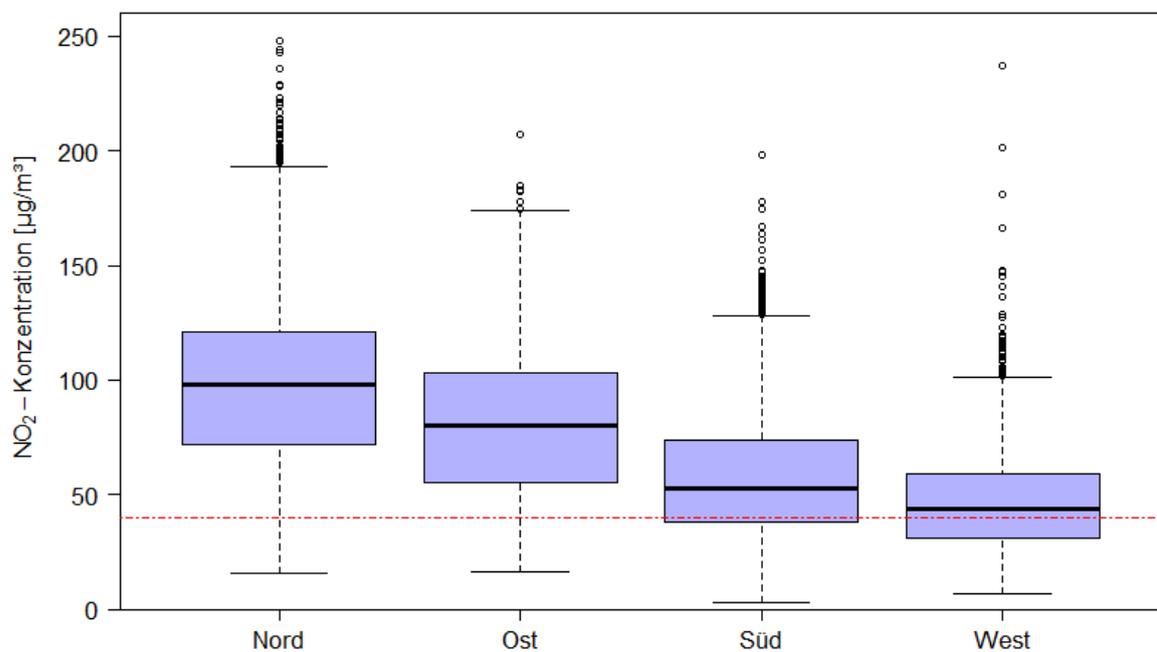


Abbildung A 29: Statistische Darstellung der Stickstoffdioxidkonzentration an der LÜB-Station Landshuter Allee in Abhängigkeit der Windrichtung mit Minimum, 25%-Quartil, Median, 75%-Quartil, Maximalwert ohne Ausreißer und Ausreißer im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

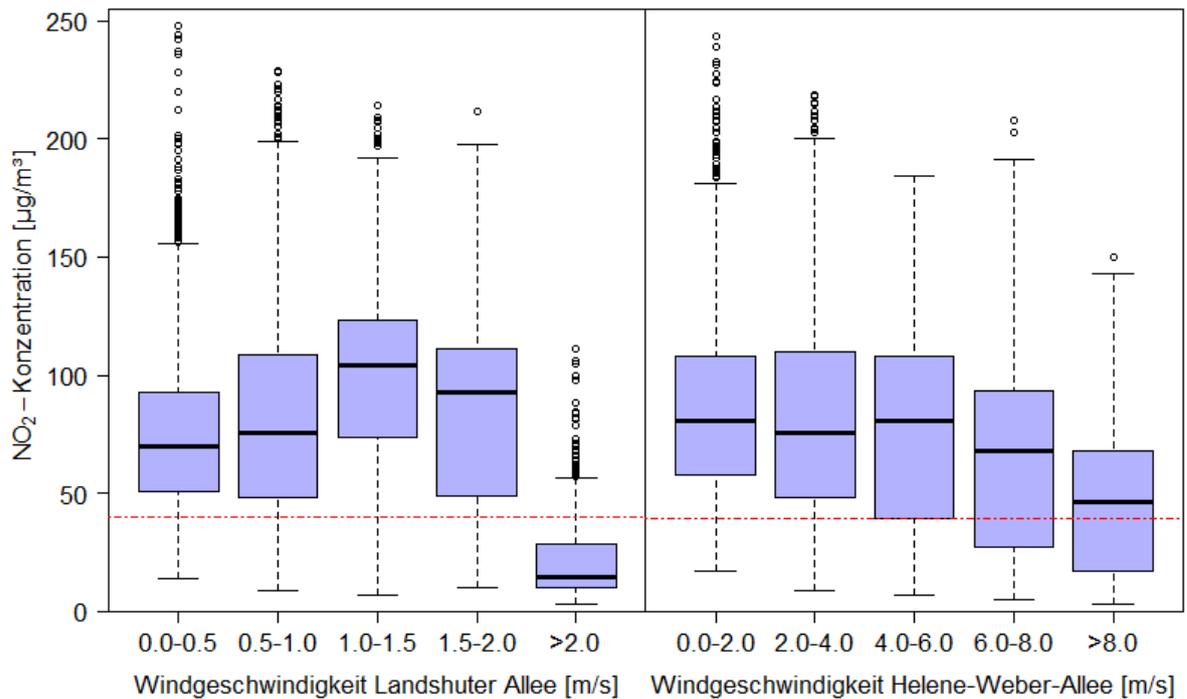


Abbildung A 30: Statistische Darstellung der Stickstoffdioxidkonzentration an der LÜB-Station Landshuter Allee in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit in der Landshuter Allee (links) und an der DWD-Messtation München Stadt (rechts) mit Minimum, 25%-Quartil, Median, 75%-Quartil, Maximalwert ohne Ausreißer und Ausreißer im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

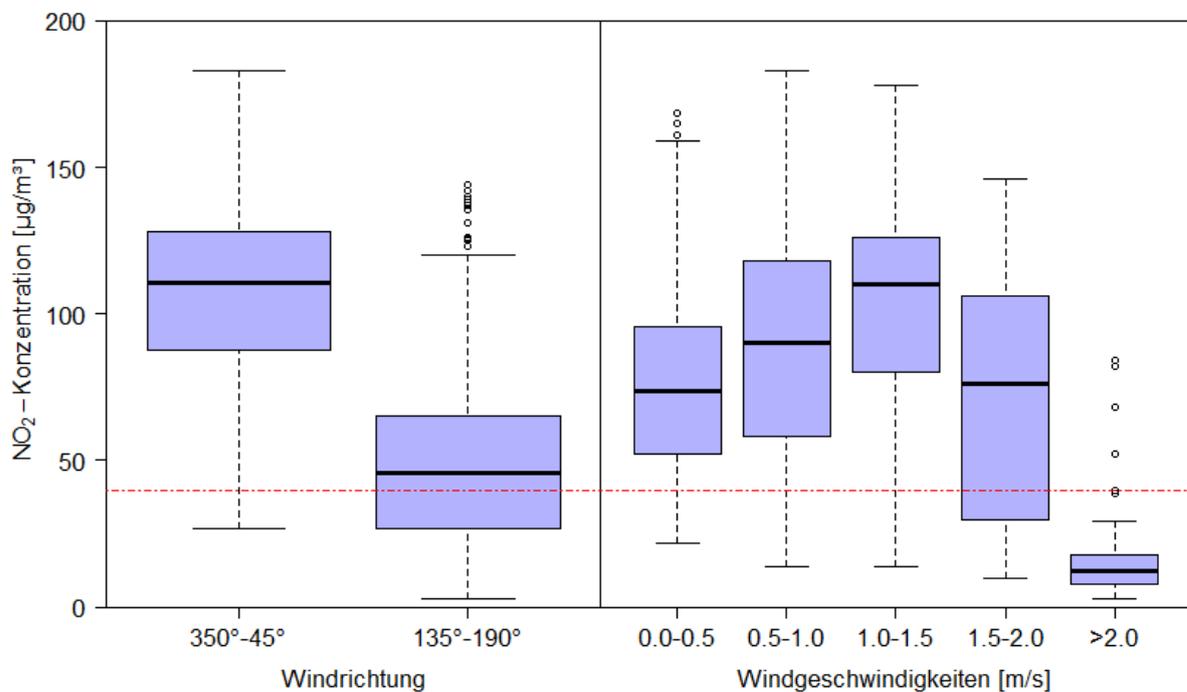


Abbildung A 31: Statistische Darstellung der Stickstoffdioxidkonzentration an der LÜB-Station Landshuter Allee ausschließlich für die Großwetterlage Wz (Westlage, überwiegend zyklonal) in Abhängigkeit der Windrichtung und Windgeschwindigkeit mit Minimum, 25%-Quartil, Median, 75%-Quartil, Maximalwert ohne Ausreißer und Ausreißer im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

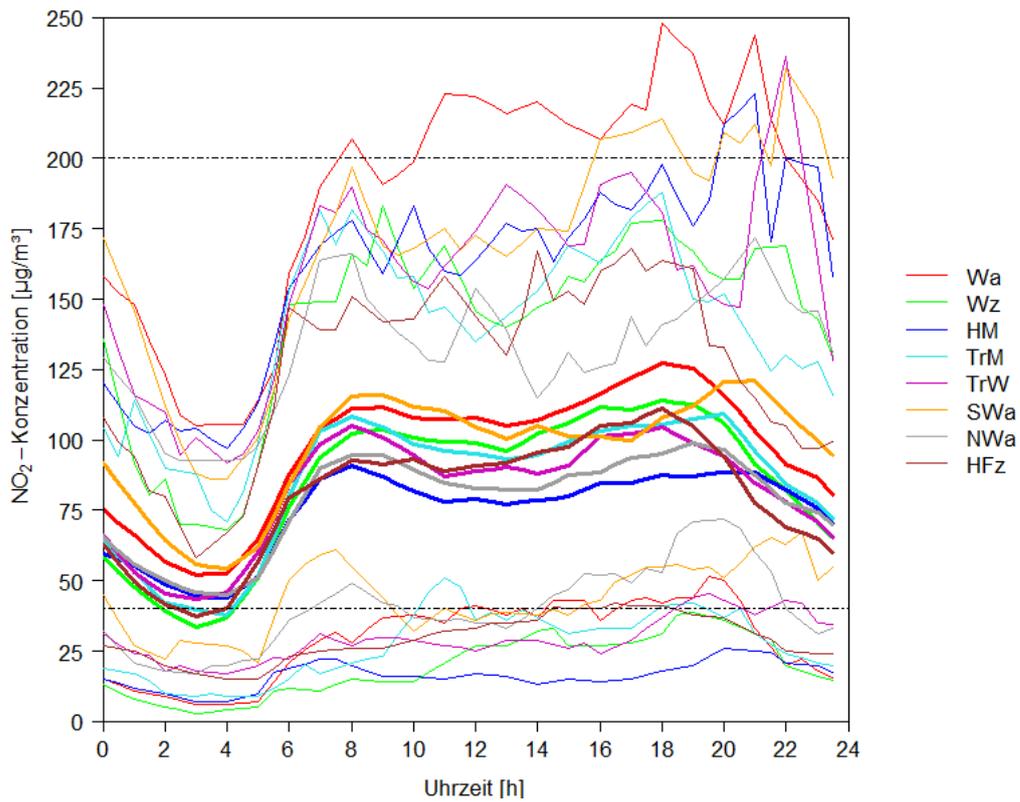


Abbildung A 32: Minimaler, Mittlerer und Maximaler Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen an der LÜB-Station Landshuter Allee auf Basis der Daten des LfU in Abhängigkeit von der herrschenden Großwetterlage auf Basis der Daten des DWD im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

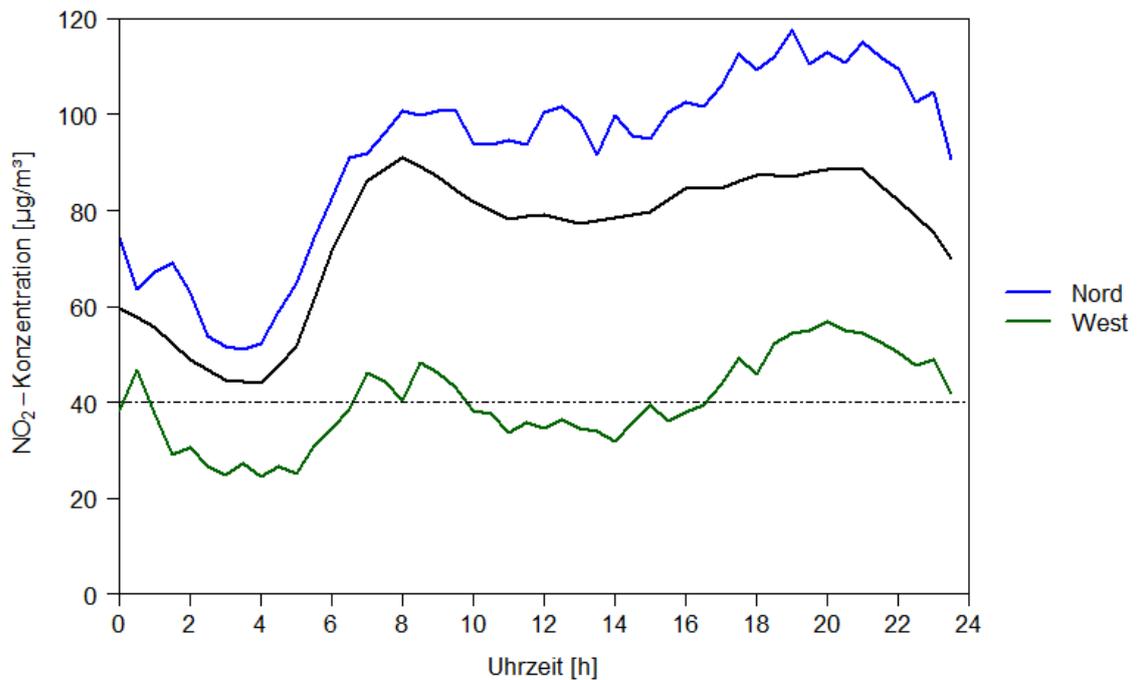


Abbildung A 33: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen an der LÜB-Station Landshuter Allee ausschließlich für Großwetterlage HM (Hoch über Mitteleuropa) in Abhängigkeit von der Windrichtung auf Basis der Daten des LfU im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

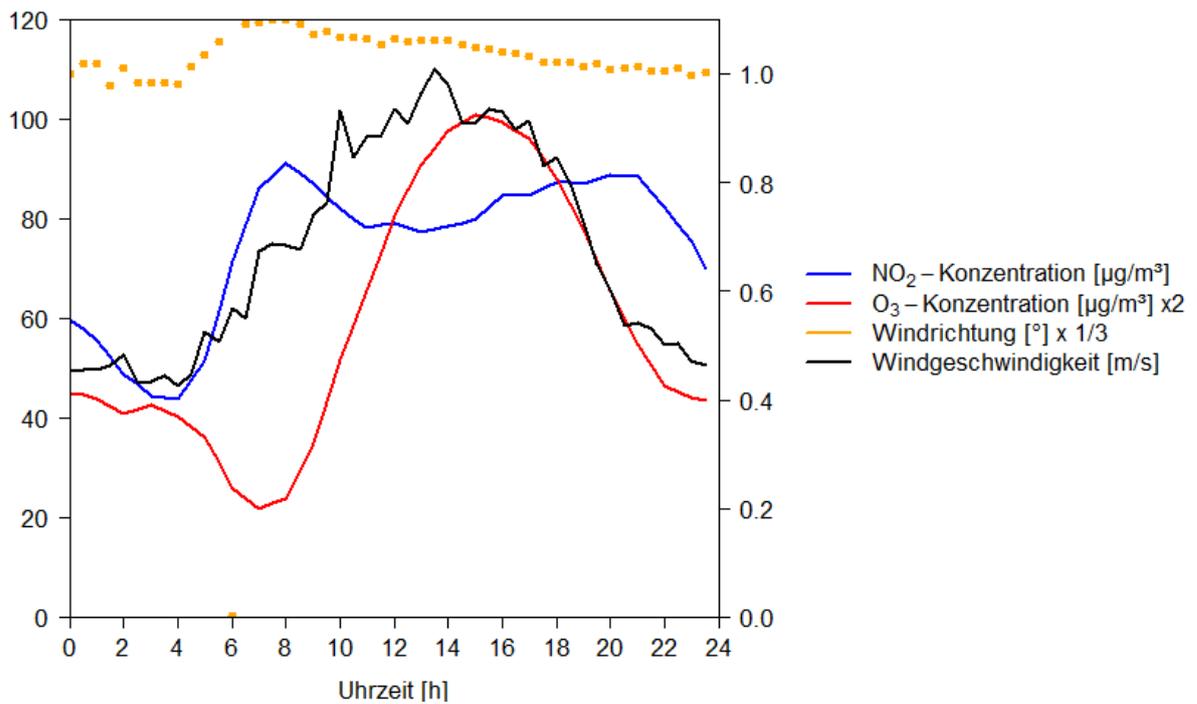


Abbildung A 34: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentration, der Ozonkonzentration, der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit in der Landshuter Allee ausschließlich für die Großwetterlage HM (Hoch über Mitteleuropa) im Messzeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

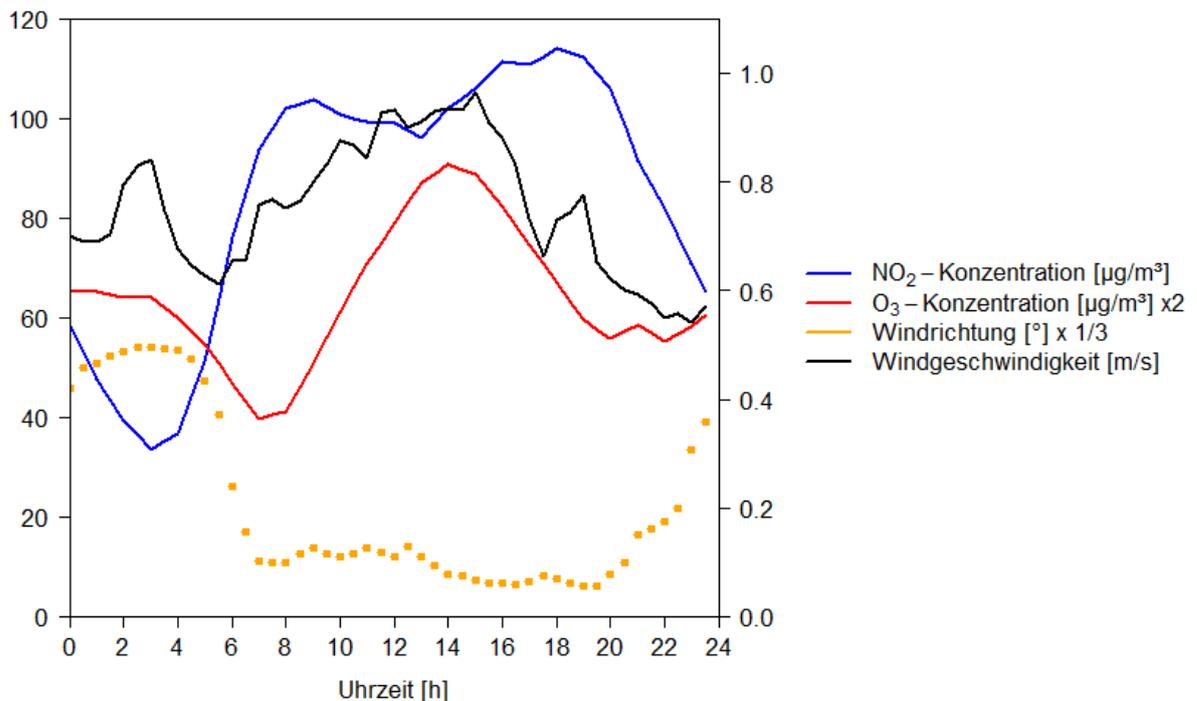


Abbildung A 35: Mittlerer Tagesgang der Stickstoffdioxidkonzentration, der Ozonkonzentration, der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit in der Landshuter Allee ausschließlich für die Großwetterlage Wz (Westlage, überwiegend zyklonal) im Messzeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

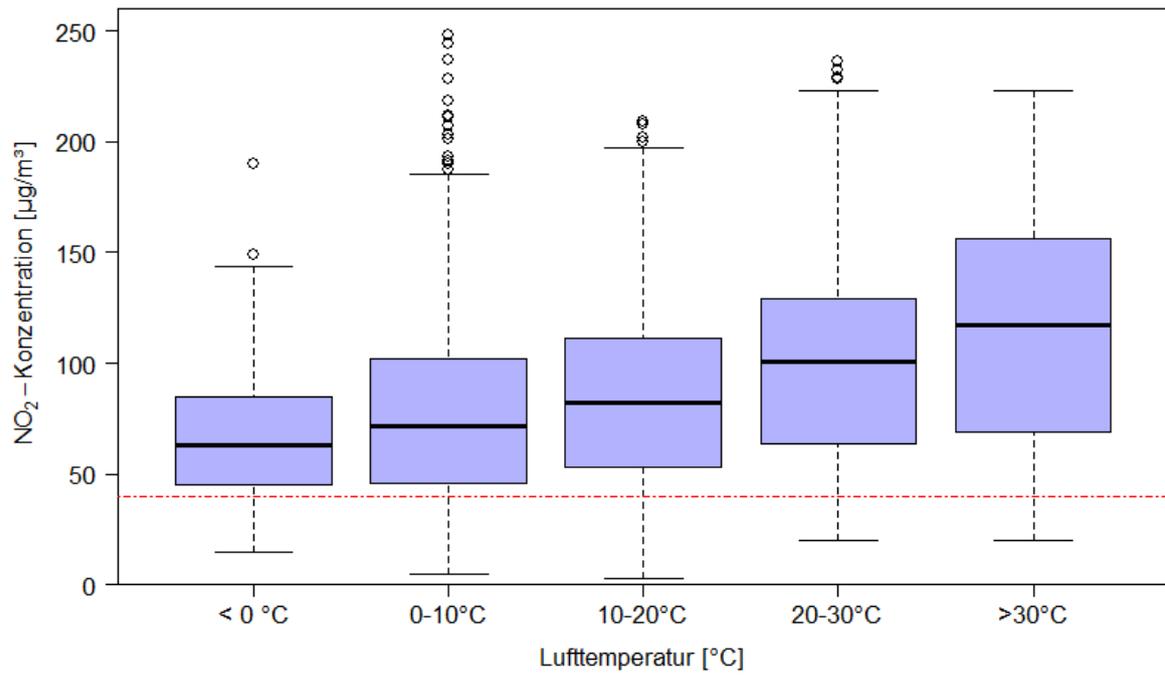


Abbildung A 36: Statistische Darstellung der Stickstoffdioxidkonzentration an der LÜB-Station Landshuter Allee in Abhängigkeit der Lufttemperatur mit Minimum, 25%-Quartil, Median, 75%-Quartil, Maximalwert ohne Ausreißer und Ausreißer im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

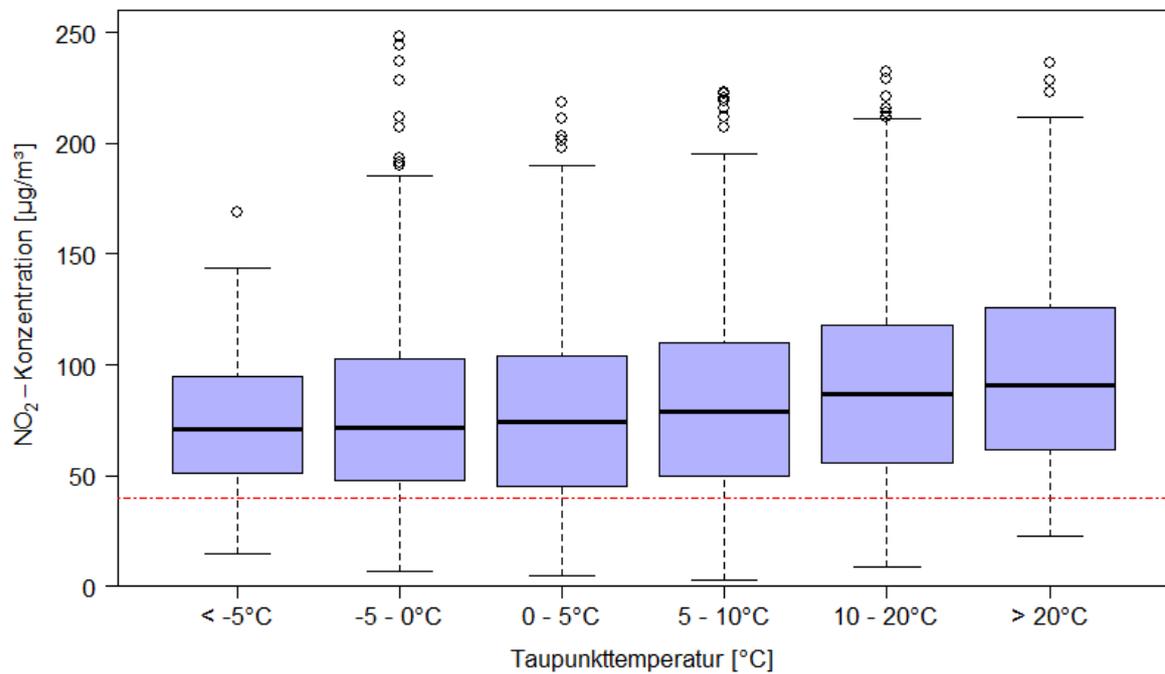


Abbildung A 37: Statistische Darstellung der Stickstoffdioxidkonzentration an der LÜB-Station Landshuter Allee in Abhängigkeit der Taupunkttemperatur mit Minimum, 25%-Quartil, Median, 75%-Quartil, Maximalwert ohne Ausreißer und Ausreißer im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

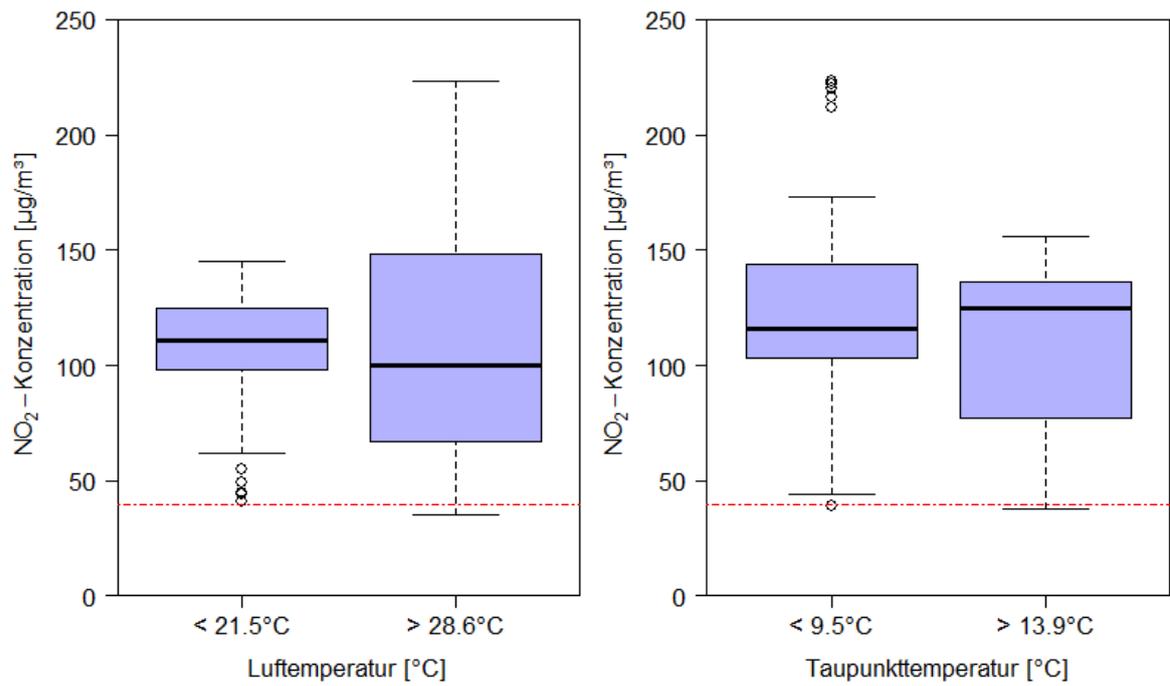


Abbildung A 38: Statistische Darstellung der Stickstoffdioxidkonzentration an der LÜB-Station Landshuter Allee ausschließlich für die Großwetterlage Wa (Westlage, überwiegend antizyklonal) an einem Sommernachmittag in Abhängigkeit der Lufttemperatur (links) und der Taupunkttemperatur (rechts) mit Minimum, 25%-Quartil, Median, 75%-Quartil, Maximalwert ohne Ausreißer und Ausreißer im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

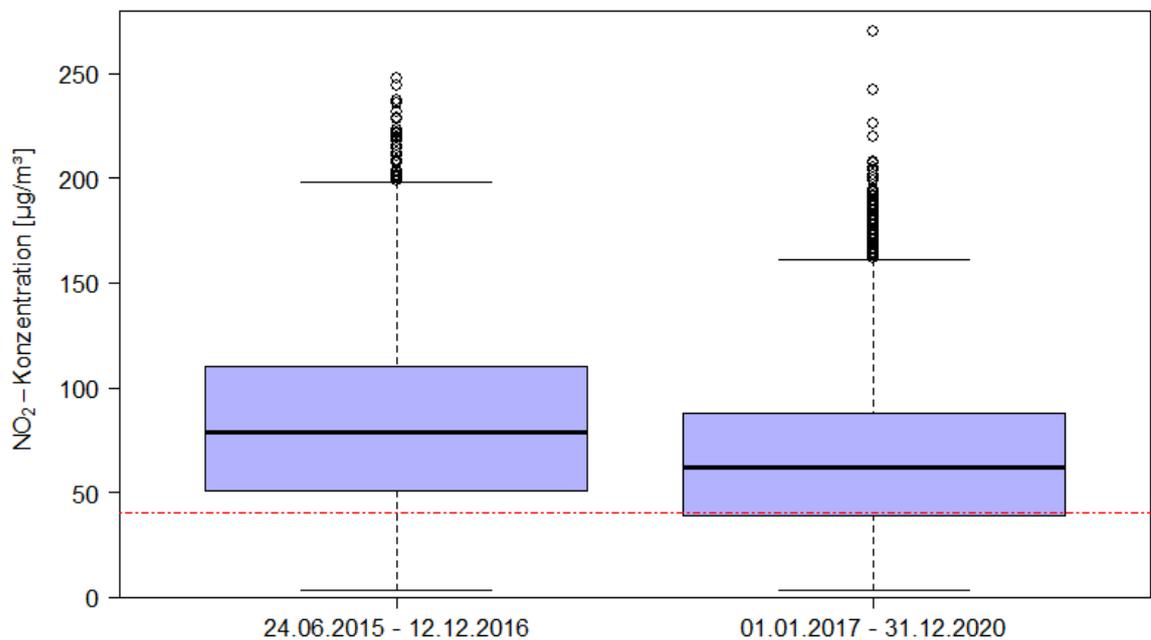


Abbildung A 39: Statistische Darstellung der Stickstoffdioxidkonzentration an der LÜB-Station Landshuter mit Minimum, 25%-Quartil, Median, 75%-Quartil, Maximalwert ohne Ausreißer und Ausreißer im Vergleich der Zeiträume 24.06.2015 – 12.12.2016 und 01.01.2017 – 31.12.2020.

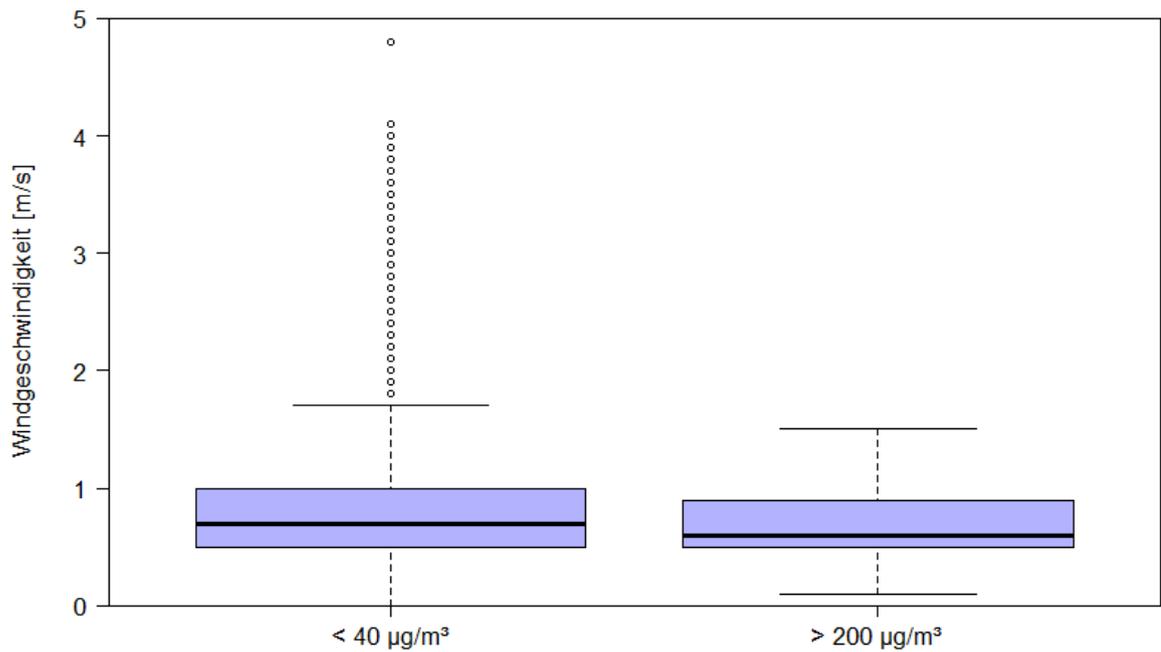


Abbildung A 40: Statistische Darstellung der Windgeschwindigkeit an der LÜB-Station Landshuter Allee als Korrelation mit den gemessenen Stickstoffdioxidkonzentrationen mit Minimum, 25%-Quartil, Median, 75%-Quartil, Maximalwert ohne Ausreißer und Ausreißer im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

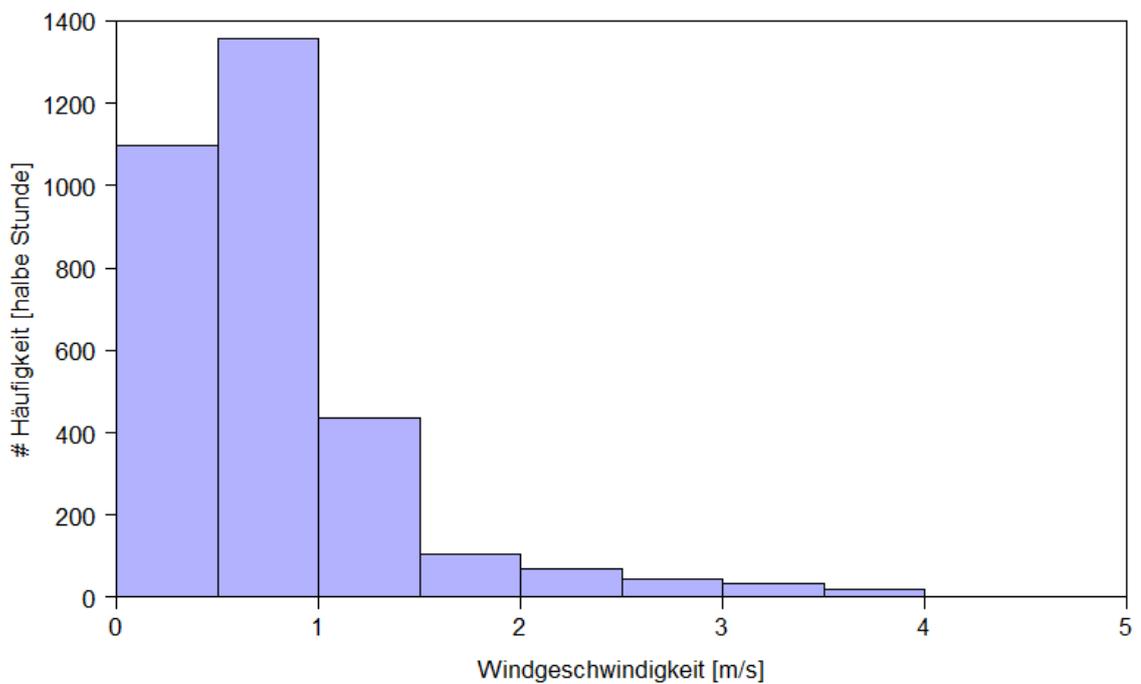


Abbildung A 41: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der LÜB-Station Landshuter Allee in Korrelation mit Stickstoffdioxidkonzentrationen < 40 µg m⁻³ im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

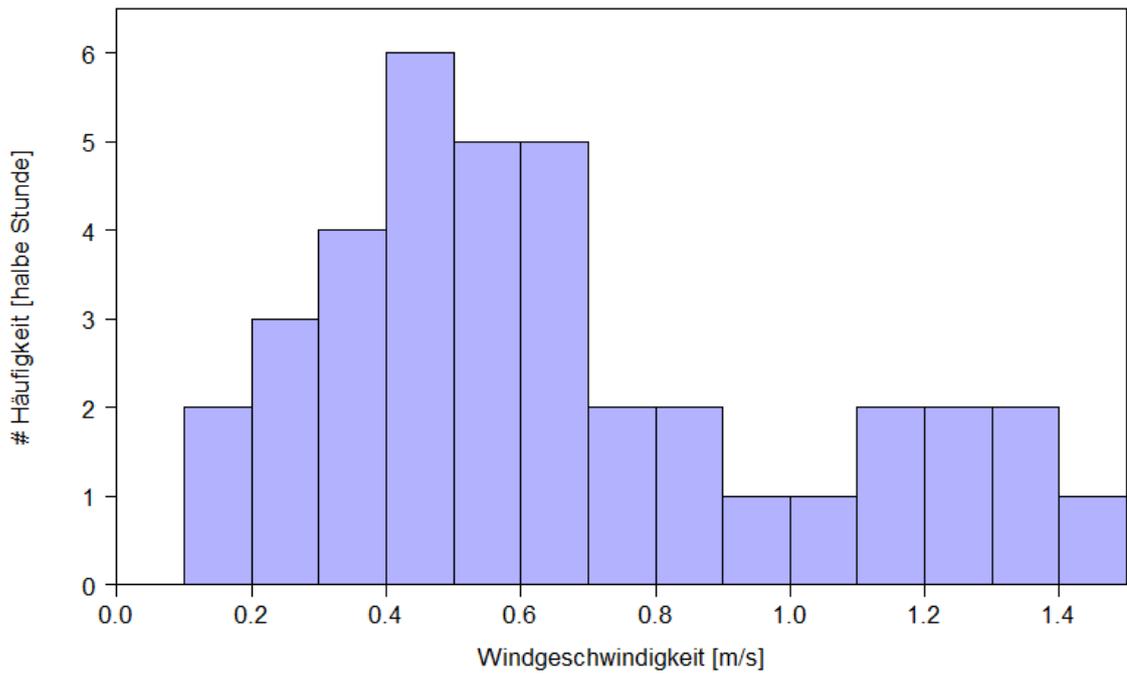


Abbildung A 42: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der LÜB-Station Landshuter Allee in Korrelation mit Stickstoffdioxidkonzentrationen $> 200 \mu\text{g m}^{-3}$ im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

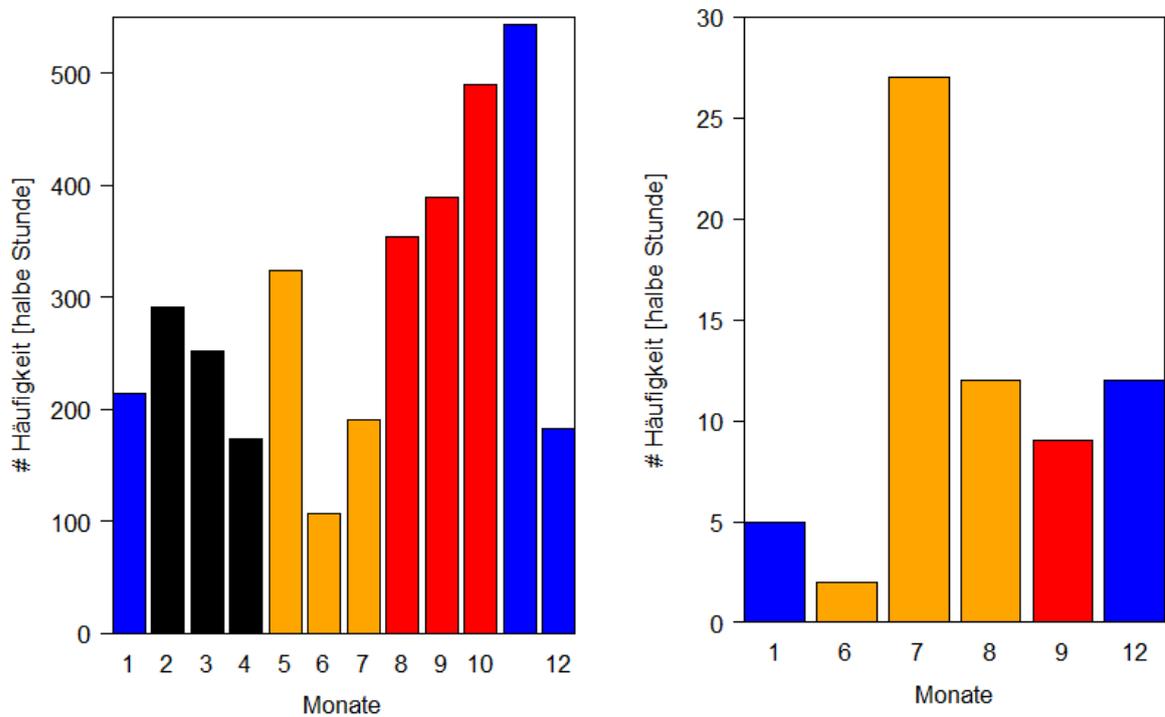


Abbildung A 43: Häufigkeitsverteilung der Monate in Korrelation mit Stickstoffdioxidkonzentrationen $< 40 \mu\text{g m}^{-3}$ (links) und $> 200 \mu\text{g m}^{-3}$ (rechts) an der LÜB-Station Landshuter Allee im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

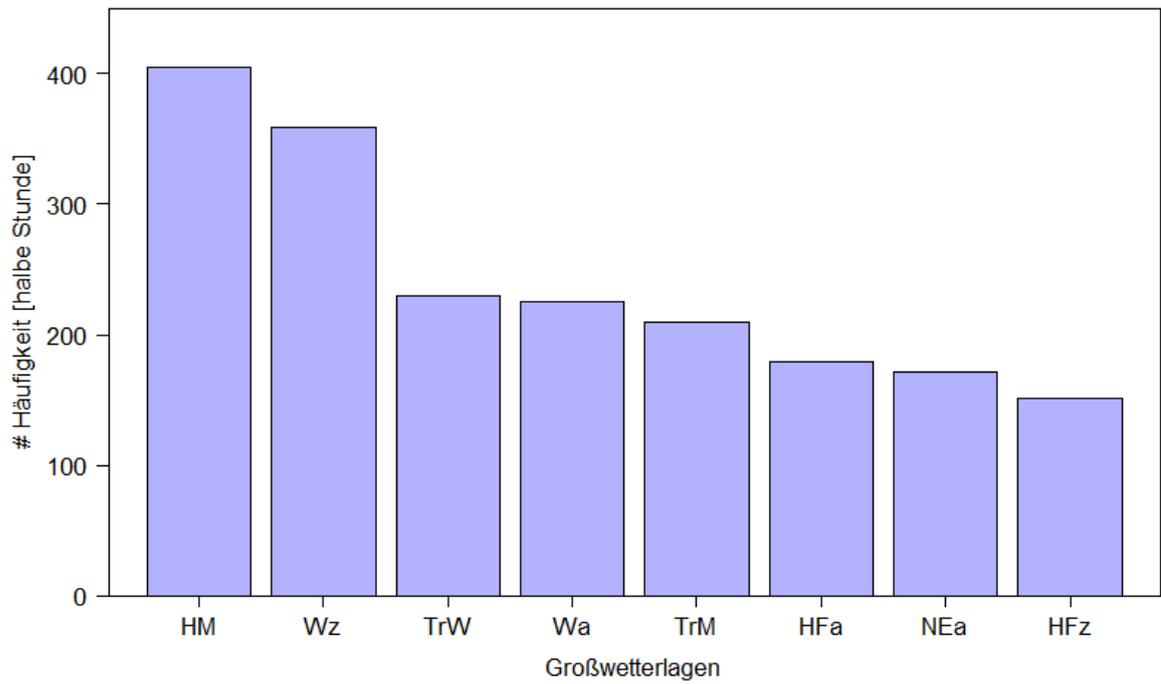


Abbildung A 44: Häufigkeitsverteilung der herrschenden Großwetterlagen in Korrelation mit Stickstoffdioxidkonzentrationen $< 40 \mu\text{g m}^{-3}$ an der LÜB-Station Landshuter Allee im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

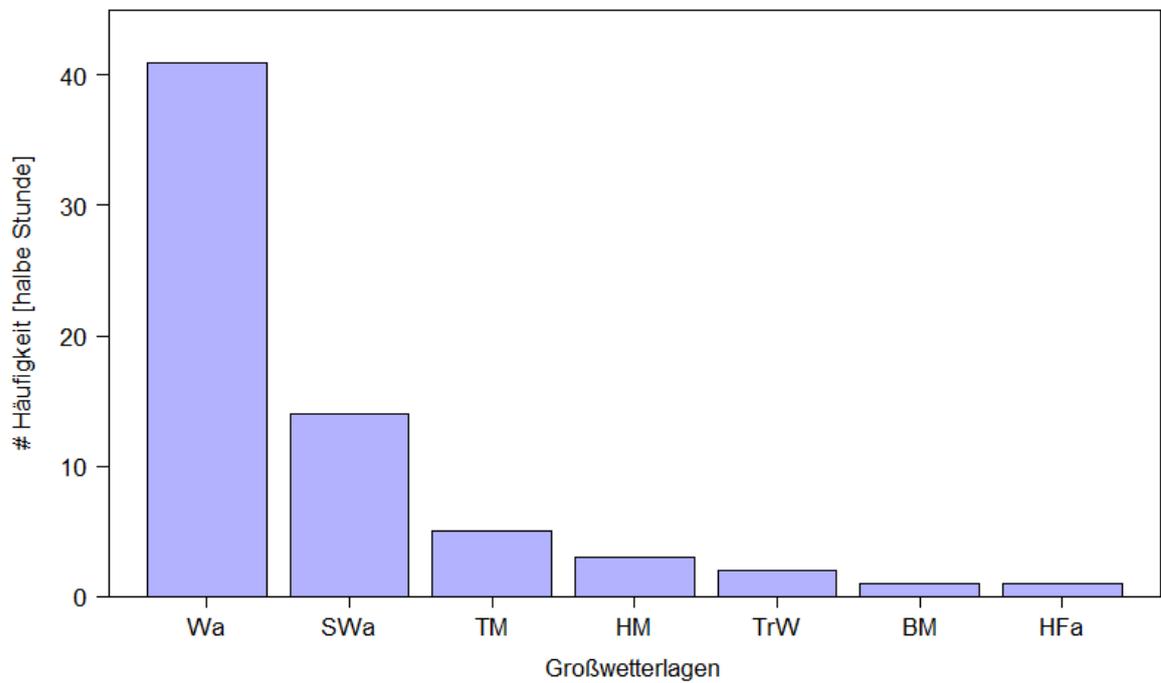


Abbildung A 45: Häufigkeitsverteilung der herrschenden Großwetterlagen in Korrelation mit Stickstoffdioxidkonzentrationen $> 200 \mu\text{g m}^{-3}$ an der LÜB-Station Landshuter Allee im Zeitraum 24.06.2015 – 12.12.2016.

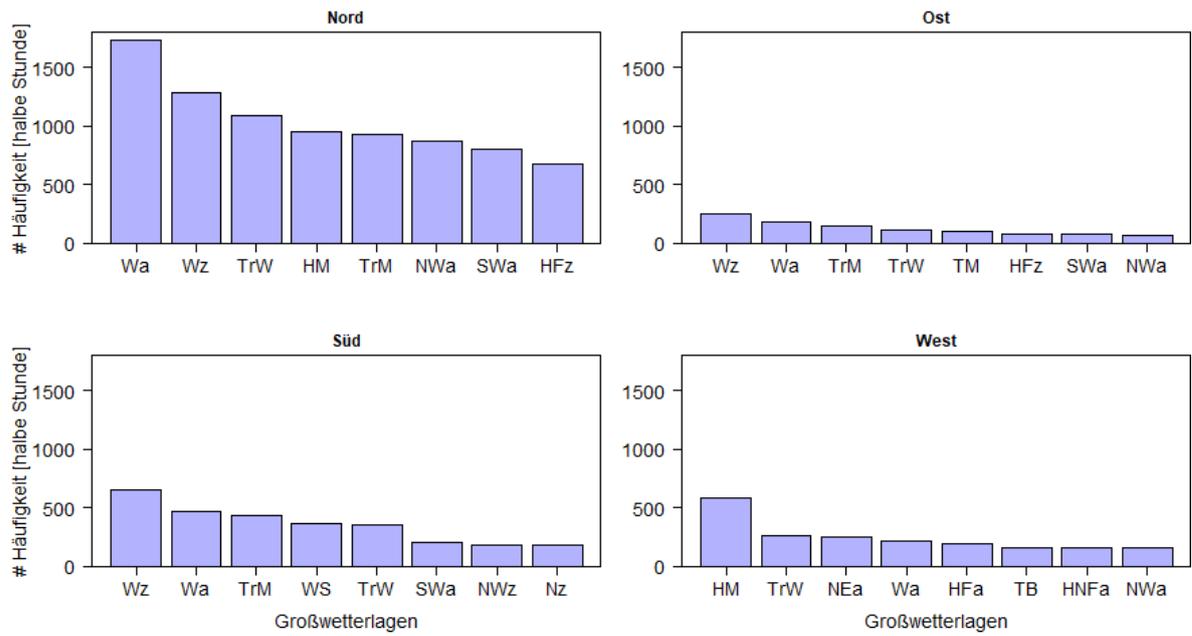


Abbildung A 46: Absolute Korrelation der herrschenden Großwetterlagen mit den erfassten Windrichtungen an der LÜB-Station Landshuter Allee im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

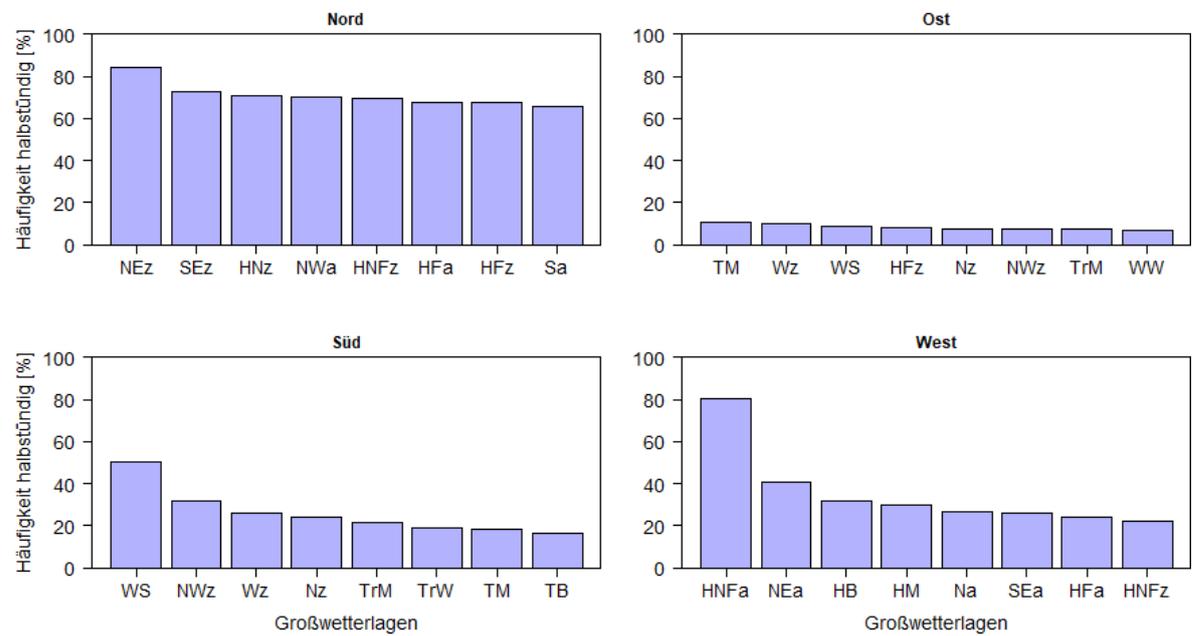


Abbildung A 47: Relatives Vorkommen einer Windrichtung an der LÜB-Station Landshuter Allee bei einer herrschenden Großwetterlage im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

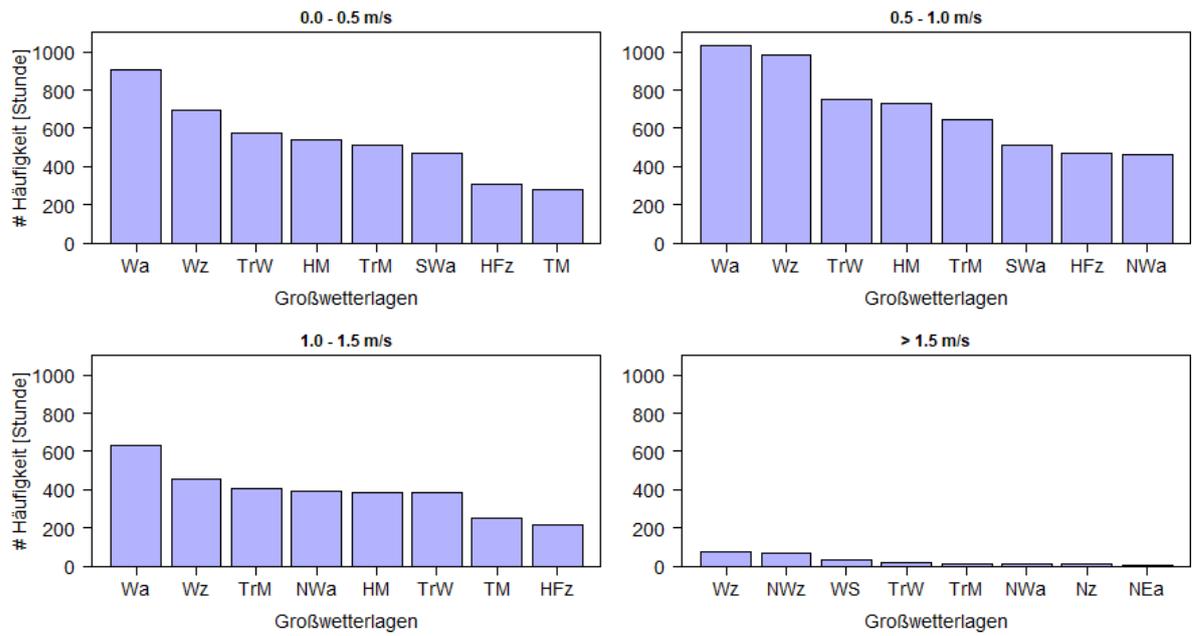


Abbildung A 48: Absolute Korrelation der herrschenden Großwetterlagen mit den erfassten Windgeschwindigkeiten an der LÜB-Station Landshuter Allee im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

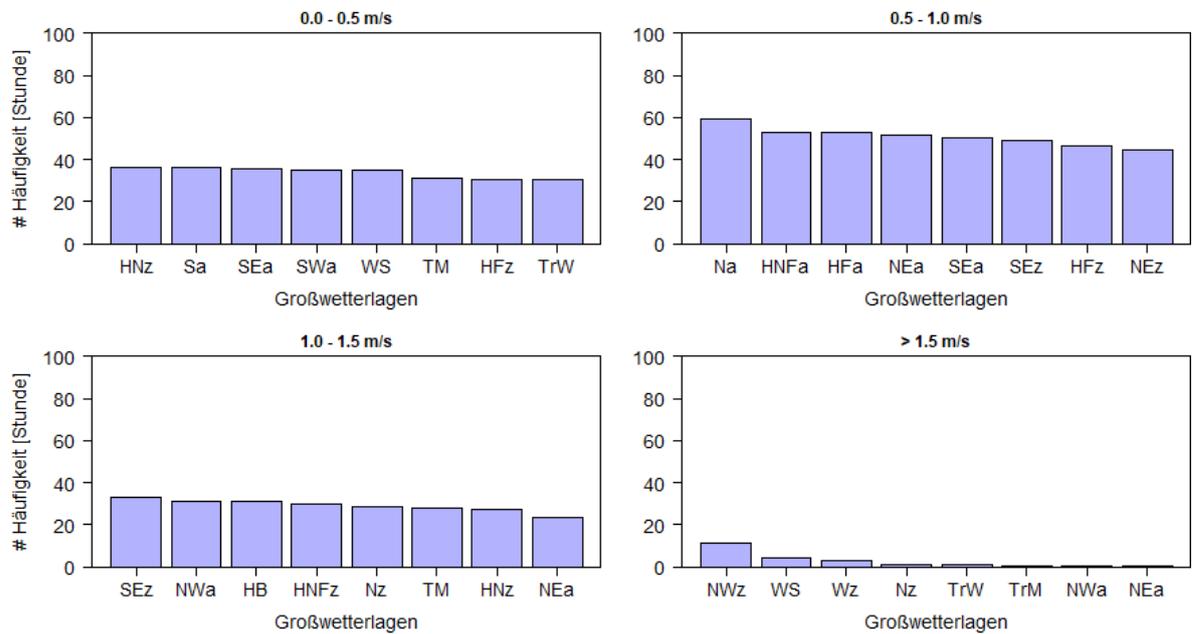


Abbildung A 49: Relatives Vorkommen von Windgeschwindigkeiten an der LÜB-Station Landshuter Allee bei einer herrschenden Großwetterlage im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

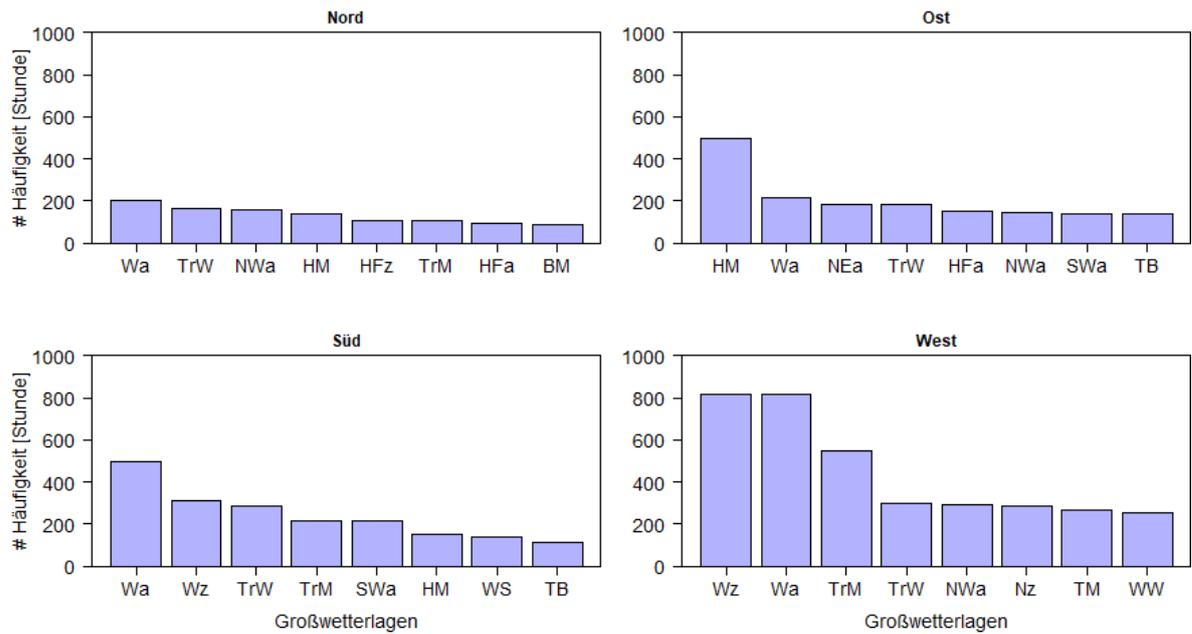


Abbildung A 50: Absolute Korrelation der herrschenden Großwetterlagen mit den erfassten Windrichtungen an der DWD-Messstation München Stadt im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

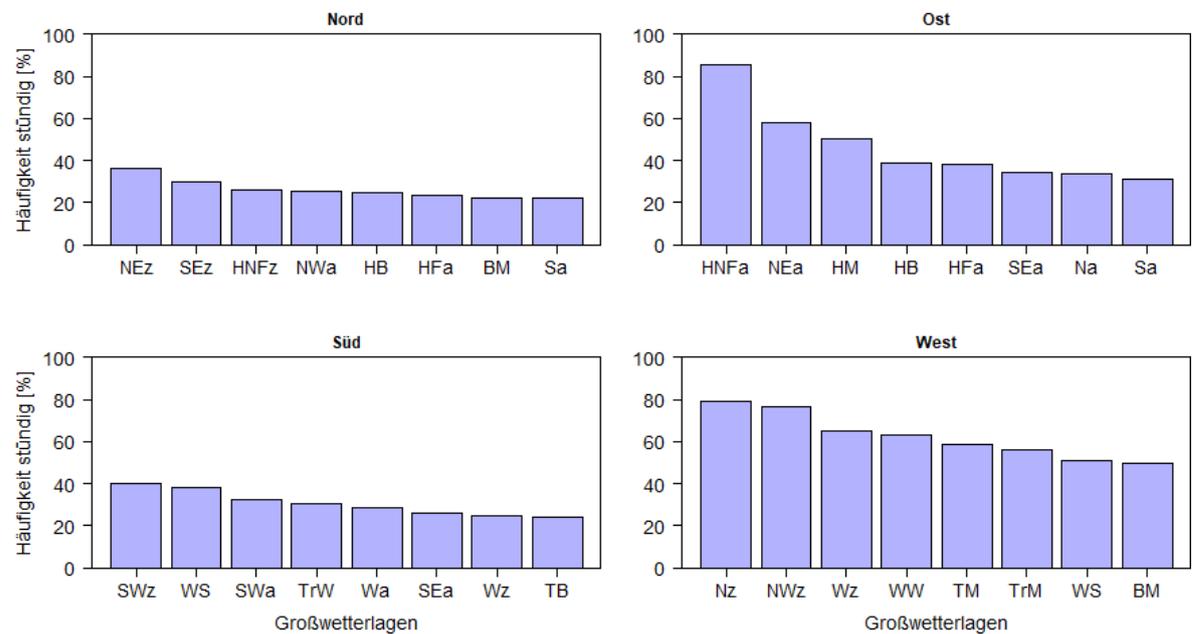


Abbildung A 51: Relatives Vorkommen einer Windrichtung an der DWD-Messstation München Stadt bei einer herrschenden Großwetterlage im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

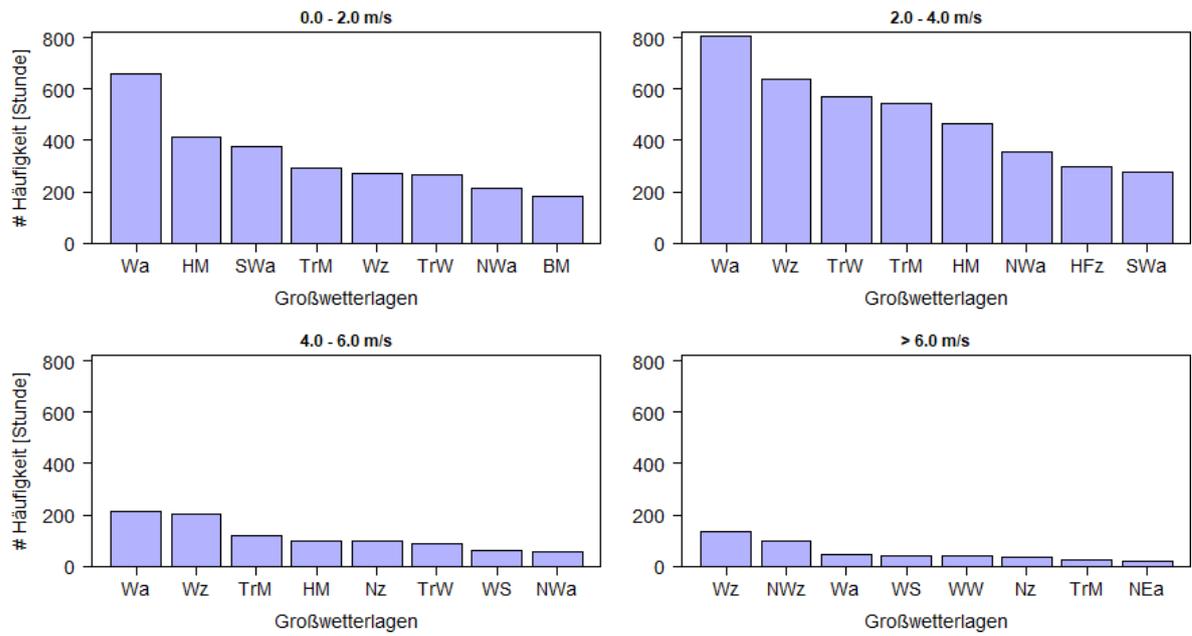


Abbildung A 52: Absolute Korrelation der herrschenden Großwetterlagen mit den erfassten Windgeschwindigkeiten an der DWD-Messstation München Stadt im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.

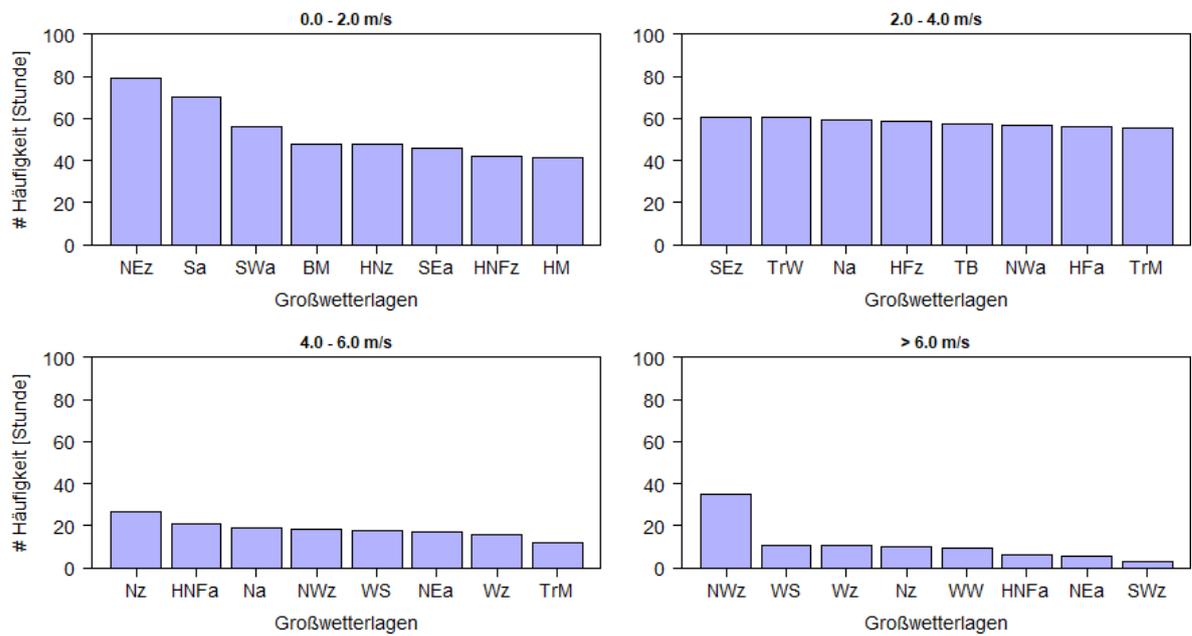


Abbildung A 53: Relatives Vorkommen von Windgeschwindigkeiten an der DWD-Messstation München Stadt bei einer herrschenden Großwetterlage im Zeitraum 24.06.2015 - 12.12.2016.