

**Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

bast

Luftqualität an der BAB A4 im Jahr 2018



Luftqualität an der BAB A4 im Jahr 2018

Sergej Metzger, Rickmar Seldschopf, Bentje Frerkes

Bundesanstalt für Straßenwesen

Abkürzungen

BAB	Bundesautobahn
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr (Kfz/24h)
KFZ	Kraftfahrzeug
Lkw-Anteil	Schwerverkehr-Anteil
N	Stickstoff
NO	Stickstoffoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxide
Nsch	Niederschlagsmenge in mm (l/m ²)
O	Sauerstoff
O ₃	Ozon
p	Luftdruck in hPa
PM _x	Partikel
PM _{2,5}	Partikel mit aerodynamischen Durchmesser kleiner 2,5 µm
PM ₁₀	Partikel mit aerodynamischen Durchmesser kleiner 10 µm
rh	Relative Luftfeuchte in %
SMGW	Stundenmittelgrenzwert der 39. BImSchV
strg	Globalstrahlung in W/m ²
T	Lufttemperatur in °C
TMGW	Tagesmittelgrenzwert der 39. BImSchV
wd	Wind direction (Windrichtung) in °
wv	Wind velocity (Windgeschwindigkeit) in m/s

Definitionen

Aerodynamischer Durchmesser	Durchmesser einer Referenzkugel mit der Dichte 1 g cm ⁻³ , die die gleiche Sinkgeschwindigkeit wie das Aerosol besitzt.	Messstelle	Ansaugstelle/Messfühler für eine Schadstoffkomponente (NO _x , O ₃ , PM _x) oder für meteorologische Parameter in einer bestimmten Entfernung zur Fahrbahn.
Anthropogene Quelle	Ort der Freisetzung von Emissionen anthropogenen Ursprungs in die Atmosphäre. Anthropogene Emissionsquellen sind u.a. Verkehr, Industrie und Landwirtschaft.	Messquerschnitt	Gesamtheit aller Stationen zur Messwertaufnahme an einem Autobahnabschnitt. 2018 wurde ein Messquerschnitt an der BAB A4 betrieben.
Emission	Freisetzung von festen, flüssigen oder gasförmigen Luftschadstoffen in die Atmosphäre. Die freigesetzten Luftschadstoffe können natürlichen oder anthropogenen Ursprungs sein.	Natürliche Quelle	Ort der Freisetzung von Emissionen natürlichen Ursprungs in die Atmosphäre. Natürliche Emissionsquellen sind bspw. Waldbrände, Vulkanausbrüche, Sandstürme oder auch biogene Aerosole wie Pollen oder Meersalz.
Immission	Einwirkung der freigesetzten Luftschadstoffe auf Umwelt und Mensch.	International gültige Referenzperiode	Seitens WMO (Weltorganisation für Meteorologie) gilt derzeit der Zeitraum zwischen 1961 bis 1990 als international gültige klimatologische Referenzperiode. Eine Mittelung der klimatologischen Parameter über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren ist notwendig, um eine ausreichende Genauigkeit der statistischen Kenngrößen zu erlangen.
Jahresmittelwert	Mittelwert der über ein Kalenderjahr aufgenommenen Konzentrationswerte der Luftschadstoffbelastung.		
Kondensationskern	Kleine Partikel (Aerosole), an denen bei Wasserdampfsättigung überschüssiger Wasserdampf kondensieren kann.		
Messstation	Raum, in dem die Messgeräte zur Aufnahme der Luftschadstoffkonzentrationen oder der meteorologischen Parameter untergebracht sind. Am Messquerschnitt der BAB A4 waren im Jahr 2018 eine Messstation in einem Abstand von 15 m vom Fahrbahnrand sowie 2 meteorologische Stationen auf dem Gelände der BAST (eine auf dem Dach und eine auf der rückwärtigen Freifläche des BAST-Geländes) in Betrieb.	Stundenmittelwert	Mittelwert der über eine Stunde aufgenommenen Konzentrationswerte der Luftschadstoffbelastung.
		Tagesganglinie	Kurve aller zu einer jeweiligen Tageszeit über ein Kalenderjahr gemittelten Messwerte des dargestellten Parameters
		Tagesmittelwert	Mittelwert der über einen betrachteten Tag aufgenommenen Konzentrationswerte der Luftschadstoffbelastung.

Inhalt

1	Luftqualität an BAB	6
1.1	Ziel.....	6
1.2	Rechtlicher Hintergrund.....	6
1.3	Betrachtete Schadstoffe	7
2	Allgemeine Angaben zu den Messungen ...	8
2.1	Messstandorte	8
2.2	Messparameter.....	11
2.3	Messverfahren	11
2.4	DTV und Lkw-Anteil 2018.....	12
3	Datenqualität	14
3.1	Anforderungen der 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und der EU-Richtlinie 2008/50/EG	14
4	Messergebnisse	14
4.1	Stickstoffmonoxid NO und Stickstoff-dioxid NO ₂	14
4.2	Ozon O ₃	15
4.3	Partikel PM _x	15
5	Beurteilung der Luftqualität an BAB im Jahr 2018	16
5.1	Meteorologie.....	16
5.2	Saisonale Entwicklung der Luftschadstoffe	17
5.3	Zeitliche Entwicklung der Luftqualität	23
	Literaturverzeichnis	24

1 Luftqualität an BAB

1.1 Ziel

Luftschadstoffmessungen im gesamten Bundesgebiet zeigen, dass die in der „Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa“ [1] festgelegten und durch die „39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen - 39. BImSchV)“ [2] in deutsches Recht umgesetzten Immissionsgrenzwerte insbesondere für Stickstoffdioxid NO_2 auch im Jahr 2018 wieder an einigen Verkehrsmessstationen überschritten wurden [3]. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) betreibt eine Messstation an einem hochfrequentierten Autobahnquerschnitt an der BAB A4 und beobachtet an diesem Standort die zeitliche Entwicklung von Stickstoffdioxid, von Partikeln PM_x und von Ozon. In diesem Bericht werden die an der BABA A4 im Kalenderjahr 2018 aufgenommenen Messdaten dargestellt und analysiert.

1.2 Rechtlicher Hintergrund

Im April 2008 wurde von der EU die neue Luftqualitäts-Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa beschlossen, die die Luftqualitätsrahmenrichtlinie von 1996 [4] sowie ihre erste bis dritte Tochterrichtlinien aus den Jahren 1999 [5], 2000 [6] und 2002 [7] zusammenfasst und mit überarbeiteten sowie neuen Regelungen an ihre Stelle tritt. Im August 2010 erfolgte mit Einführung der 39. BImSchV die Umsetzung der EU-Richtlinie 2008/50/EG in nationales Recht.

Die in der 39. BImSchV genannten Anforderungen für die Luftschadstoffe Stickstoffdioxid NO_2 , Feinstaub PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ und Ozon O_3 sind in der Tabelle 1 und der

Tabelle 2 zusammengefasst. Für Stickstoffdioxid NO_2 gilt demnach ein Jahresmittelgrenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sowie ein Stundenmittelgrenzwert von

$200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Letzterer darf an höchstens 18 Stunden pro Kalenderjahr überschritten werden.

Bei Partikeln PM_{10} gilt ein Jahresmittelgrenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Der Tagesmittelgrenzwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für PM_{10} darf an höchstens 35 Tagen pro Kalenderjahr überschritten werden.

Für Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser $< 2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) gilt derzeit noch ein Jahresmittelgrenzwert von $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ab 2020 soll dieser auf $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ herabgesenkt werden.

Tabelle 1: Grenzwerte der 39. BImSchV für die Luftschadstoffe NO_2 , PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$

	Stunde	200	18
	Kalenderjahr	40	–
	Tag	50	35
	Kalenderjahr	40	–
	Kalenderjahr	25	–
	Kalenderjahr	ab 2020: 20	–

Tabelle 2: Ziel- und Schwellenwerte der 39. BImSchV für O_3

	höchster 8-h-Mittelwert pro Tag*	120	25, gemittelt über 3 Jahre
	höchster 8-h-Mittelwert pro Tag*	120	–
	Stunde	180	–
	Stunde in drei hintereinander folgenden Stunden	240	–

*Der höchste 8-Stunden-Mittelwert der Konzentration eines Tages wird ermittelt, indem die gleitenden 8-Stunden-Mittelwerte untersucht werden, welche aus 1-Stunden-

Mittelwerten berechnet und stündlich aktualisiert werden. Jeder auf diese Weise errechnete 8-Stunden-Mittelwert gilt für den Tag, an dem dieser Zeitraum endet, d. h. der erste Berechnungszeitraum für jeden einzelnen Tag umfasst die Zeitspanne von 17:00 Uhr des vergangenen Tages bis 1:00 Uhr des betroffenen Tages, während für den letzten Berechnungszeitraum jeweils die Stunden von 16:00 Uhr bis 24:00 Uhr des betroffenen Tages zugrunde gelegt werden.

Für Ozon O_3 wurden Ziel- und Schwellenwerte in der 39.BImSchV zum Schutz der menschlichen Gesundheit definiert. Bei Überschreitung der Informationsschwelle (Stundenmittelwert von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) wird die Bevölkerung über die Medien über die hohen Ozonwerte informiert und es werden Verhaltensempfehlungen für empfindliche Bevölkerungsgruppen bekanntgegeben. Wird die Alarmschwelle (Stundenmittelwert von $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an drei aufeinander folgenden Stunden) überschritten, so wird aufgrund des bestehenden Gesundheitsrisikos die Gesamtbevölkerung (nicht nur empfindliche Bevölkerungsgruppen) über entsprechende Verhaltensempfehlungen informiert.

1.3 Betrachtete Schadstoffe

Stickstoffoxid

Als Stickstoffoxide (NO_x) werden all diejenigen chemischen Verbindungen bezeichnet, die sich aus Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) zusammensetzen. Somit zählen auch Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) zu den Stickstoffoxiden.

Stickstoffoxide entstehen überwiegend bei Verbrennungsprozessen beispielsweise in Verbrennungsmotoren von Kraftfahrzeugen oder in Feuerungsanlagen.

Stickstoffoxid-Expositionen können beim Menschen u.a. Atemwegsreizungen bis hin zu Herzkreislauf-Problemen hervorrufen. Negative Einflüsse von Stickstoffoxiden lassen sich auch auf die Umwelt beobachten. Pflanzenschäden, Überdüngung oder Versauerung von Böden können die Folge sein [8] [9].

Partikel

Partikel PM_x werden nach der Größe ihres aerodynamischen Durchmessers in verschiedene Größenkategorien eingeteilt. Mit der Bezeichnung Partikel PM_{10} ($\text{PM}_{2,5}$) werden somit alle Partikel zusammengefasst, die einen aerodynamischen Durchmesser kleiner als 10 (2,5) μm besitzen. Partikel entstehen unter anderem bei Verbrennungsprozessen (Industrie, Verkehr, Hausbrand), bei landwirtschaftlichen Aktivitäten oder auch bei Abrieb und Aufwirbelung durch den Kfz-Verkehr. Neben diesen sogenannten *primären* Partikeln, die von der Quelle aus direkt in die Atmosphäre emittiert werden, können Partikel auch erst *sekundär* in Verbindung mit Vorläuferstoffen wie beispielsweise Stickstoffoxid in der Atmosphäre gebildet werden.

Neben anthropogen gebildeten Partikeln können Partikel auch einen natürlichen Ursprung (Vulkanausbruch, Waldbrand, Meer, Viren, Sporen, etc.) haben [10].

Die zeitliche Verweildauer der Partikel in der Atmosphäre sowie die räumliche Entfernung zur Partikelquelle sind v.a. von der Größe, Form und chemischen Eigenschaft der Partikel sowie den meteorologischen Bedingungen abhängig.

Die Lungengängigkeit von Feinstaub-Partikeln PM_{10} hängt von der Größe sowie der geometrischen Form ab. Kleinere Partikel können tiefer in die Lunge eindringen und dort je nach chemischer Zusammensetzung gesundheitsschädliche Wirkungen hervorrufen.

Ozon

Das Maximum der Ozonkonzentration befindet sich in der Stratosphäre in etwa 25 km Höhe. Dieses sogenannte stratosphärische Ozon absorbiert kurzwellige ultraviolette Sonnenstrahlung mit Wellenlängen kleiner $0,3 \mu\text{m}$ und ist unschädlich.

Bodennahes Ozon hingegen kann bereits in geringen Konzentrationen gesundheitsschädlich sein und beispielsweise zu Atemwegsbeschwerden

führen. Zur Ozon-Bildung kommt es v.a. an Tagen mit intensiver Sonneneinstrahlung, wenn gleichzeitig hohe Stickstoffoxid-, Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoff-Konzentrationen vorhanden sind. Diese sogenannten Vorläuferstoffe von Ozon entstammen überwiegend anthropogenen Quellen wie dem Straßenverkehr oder Feuerungsanlagen. Hohe NO-Konzentrationen in städtischen Gebieten sorgen dafür, dass durch chemische Reaktionen Ozon abgebaut wird. Damit einhergehend ist die Ozon-Konzentration in ländlichen Gebieten in den strahlungsintensiven Sommermonaten auch meist höher als im Innenstadtbereich.

Gesundheitliche Folgen hoher Ozon-Exposition können neben Atemwegsbeschwerden auch Entzündungen im Bereich des Lungengewebes sein, welche beispielsweise durch tiefe Inhalation bei sportlichen Leistungen hervorgerufen werden können [9].

2 Allgemeine Angaben zu den Messungen

2.1 Messstandorte

Die Bundesanstalt für Straßenwesen unterhält zurzeit an einem Standort einen Messquerschnitt zur Untersuchung der Luftqualität an Bundesautobahnen. Dieser befindet sich an der Bundesautobahn A4 zwischen der Autobahnabfahrt 19 - Bergisch Gladbach-Bensberg und der Abfahrt 20 – Bergisch Gladbach-Moitzfeld. Der Messquerschnitt an der von West nach Ost verlaufenden Bundesautobahn A4 befindet sich bei Streckenkilometer 92,7. Nördlich der Autobahntrasse liegt eine mäßig befahrene Gemeindestraße sowie das Gebäude der Bundesanstalt für Straßenwesen; südlich schließt sich das Waldgebiet Königsforst an. Im Jahr 1997 wurde auf der Trassennordseite der BAB A4 eine etwa 5 m hohe Lärmschutzwand errichtet.

Die ersten Stickstoffoxid- und Ozon-Messungen wurden an diesem Messquerschnitt im Jahr 1987

durchgeführt. Die NO-, NO₂- und O₃-Messungen wurden ab 1987 kontinuierlich bis zum Jahr 2015 fortgeführt. Ab 2001 lieferten zusätzliche Partikel-Messgeräte Daten über die Partikelfraktion PM₁₀. Zwischen 2015 und 2017 fand eine umfangreiche Umgestaltung und Erneuerung des Messquerschnittes an der BAB A4 statt.

Am 28.06.2017 wurde die Messstation an der BAB A4 in Fahrtrichtung Olpe (im Folgenden mit „A4_OI_2“ gekennzeichnet) wieder in Betrieb genommen. Die Messung der Luftschadstoffe im Bereich der Messstation A4_OI_2 wird seitdem durch die Messung von meteorologischen Parametern auf dem Gelände der Bundesanstalt für Straßenwesen ergänzt. Die Meteorologie-Messstationen auf dem Dach und auf der rückwärtigen Freifläche der BAST liefern seit dem 17.01.2018 entsprechende Daten.

Schematische Darstellungen des Messquerschnittes sowie Fotos des Standortes sind in der Abbildung 1 bis Abbildung 6 dargestellt.

Seit dem 30.11.2018 ist ein weiterer Messcontainer an der BAB A4 („A4_OI_1“) in Betrieb. Der Messcontainer ist direkt neben der Schutzplanke des Seitenstreifens in Fahrtrichtung Olpe oberhalb der Messstation A4_OI_2 lokalisiert. Die Ergebnisse der neuen Messstation sowie nähere Erläuterungen zu der Ausgestaltung des neuen Messcontainers werden in dem nächsten Auswertebereich für das Jahr 2019 Berücksichtigung finden.

Im Herbst des Jahres 2019 wurden zudem zwei weitere Messcontainer der BAST an der Bundesautobahn A555 zwischen Wesseling und Bornheim installiert („A555_We_1 und A555_Bo_1“). Der neue Messquerschnitt ist größtenteils von landwirtschaftlichen Nutzflächen umgeben. An der BAB A555 wurden bis 2015 bereits NO-, NO₂-, O₃- und Partikelmessungen bei Streckenkilometer 13,53 durchgeführt. Der neue Messquerschnitt wird sich bei Streckenkilometer 12,415 befinden. Die Verlegung des Messquerschnittes resultierte aus der Reaktivierung des Parkplatzes auf Höhe der TÜV Rheinland Akademie in Fahrtrichtung

Bornheim. Die Messergebnisse der beiden neuen Auswertebericht für das Jahr 2020 integriert. Messcontainer an der BAB A555 werden in dem

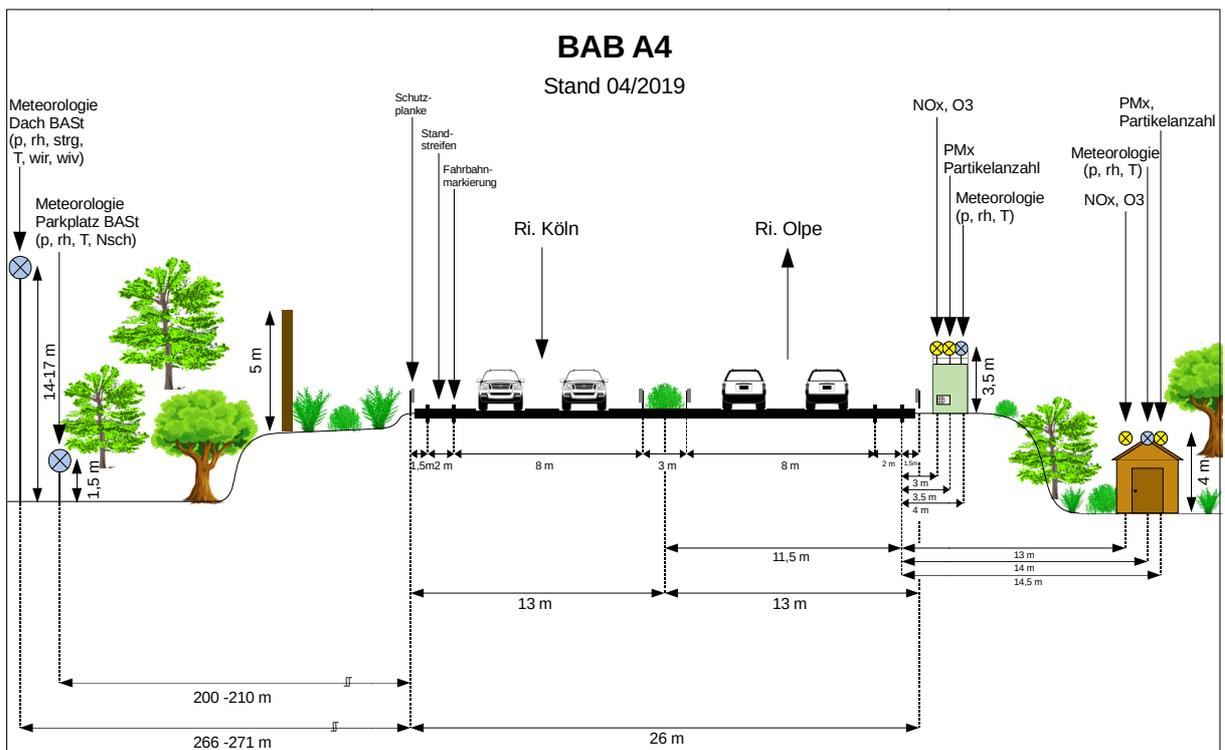
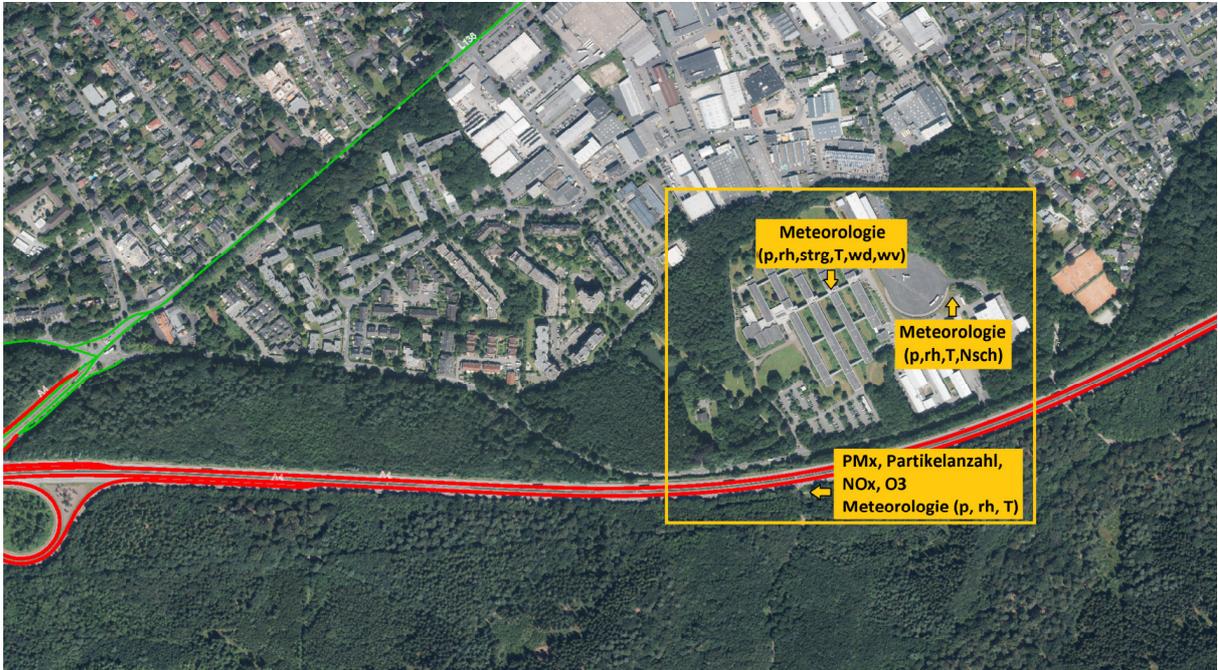


Abbildung 2: Schematische Darstellung des an der Bundesautobahn A4 sowie auf dem Gelände der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) gelegenen Messquerschnittes.



Abbildung 3: Messquerschnitt „A4_Ol_2“ der BAB A4 in Fahrtrichtung Olpe – Außenansicht der Messhütte. Messparameter: NO_x , PM_x , Partikelanzahl, O_3 .



Abbildung 4: Messquerschnitt „A4_Ol_2“ der BAB A4 in Fahrtrichtung Olpe – Innenansicht der Messhütte. Messparameter: NO_x , PM_x , Partikelanzahl, O_3 .



Abbildung 5: Meteorologie-Messtation auf dem Dach der BAST. Messparameter: p, rh, Strg, T, wd und vv.



Abbildung 6: Meteorologie-Messtation auf dem rückwärtigen BAST-Parkplatz. Messparameter: p, rh, T, Nsch. Dargestellt ist hier die Nsch-Messung.

2.2 Messparameter

An dem Messquerschnitt „A4_OI_2“ an der BAB A4 werden die Schadstoffgruppen Stickoxide NO_x , Ozon O_3 und Partikel (Feinstaub PM_x) gemessen, datentechnisch erfasst und ausgewertet (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4).

Auf dem Dach der BAST werden neben dem Luftdruck (p), der Temperatur (T) und der relativen Feuchte (rh) auch noch die meteorologischen Parameter Windgeschwindigkeit (wv), Windrichtung (wd) und Globalstrahlung (strg) in 17 m Höhe (siehe Abbildung 5) gemessen.

Auf der rückwärtigen Freifläche des BAST-Gebäudes wird zusätzlich zu dem Luftdruck, der Temperatur und der relativen Feuchte die Niederschlagsmenge (Nsch) in 1,5 m Höhe erfasst (siehe Abbildung 6).

2.3 Messverfahren

NO_x -Analysegerät

Die Bestimmung der Konzentration von NO_x erfolgt mit dem Gerät T200 Nitrogen Oxide Analyzer nach dem Chemilumineszenz-Prinzip.

Zu dem NO_x -haltigen Probegas wird Ozon hinzugefügt. Bei der chemischen Reaktion von NO und O_3 entsteht neben Sauerstoff auch Stickstoffdioxid. Ca. 20 % des entstandenen NO_2 befindet sich nach der Reaktion in einem angeregten Zustand und kehrt durch Abgabe eines Lichtquantums mit Wellenlängen zwischen 600 und 3000 nm (Maximum bei etwa 1200 nm) wieder in den Grundzustand zurück. Gemessen wird im NO_x -Analysegerät die NO - und NO_x -Konzentration. Die NO_2 -Konzentration ergibt sich aus der Differenz zwischen der NO_x - und der NO -Konzentration [11].

O_3 -Analysegerät

Für die Bestimmung der Ozon-Konzentration in der Umgebungsluft nutzt das Gerät T400 Photometric Ozone Analyzer die Minderung von UV-Strahlung durch das wirkungsvolle Absorpti-

onsvermögen von O_3 bei einer Wellenlänge von 254 nm.

Mittels Quecksilberdampfampe wird ein UV-Lichtstrahl entsprechender Wellenlänge erzeugt und durch den ozonhaltigen Probegasstrom in einem Absorptionsröhrchen geleitet. Nach Durchgang durch den 42 cm langen Absorptionspfad wird der UV-Lichtstrahl von einer Vakuumdiode gemessen. Je höher die O_3 -Konzentration im Probegasstrom ist, desto geringer fällt die gemessene Strahlungsintensität aus.

Das O_3 -Analysegerät misst zusätzlich die Strahlungsintensität ohne Berücksichtigung der O_3 -Konzentration, sowie die Proben temperatur und den Probedruck.

In Kombination mit der Länge des Absorptionpfades im Absorptionsröhrchen sowie dem Absorptionskoeffizienten kann die O_3 -Konzentration im Probegas gemäß Lambert-Beer'schen Gesetz berechnet werden [12].

PM_x -Analysegerät

Die Partikelmessung wird mit Hilfe eines optischen Aerosolspektrometers (Fidas 200 E) durchgeführt. Mittels Streulichtanalyse kann die Partikelgröße einzelner Partikel bestimmt werden.

Die Partikel werden hierbei „durch ein optisch abgegrenztes Messvolumen“ geführt, „dass mit einer polychromatischen Lichtquelle homogen ausgeleuchtet“ wird [13]. Jedes Partikel führt zu einem Streulichtimpuls. Anhand der Amplitude des Streulichtimpulses können Informationen über die Größe jedes einzelnen Partikels gewonnen werden. Die Partikelanzahl lässt sich aus der Signallänge des Streulichtimpulses bestimmen.

Neben Partikeln der Größenfraktion PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ werden mit dem verwendeten PM_x -Analysegerät auch die Größenfraktionen PM_1 und PM_4 sowie die Gesamtmassen- und die Partikelanzahlkonzentration gemessen.

2.4 DTV und Lkw-Anteil 2018

Der Messquerschnitt an der Bundesautobahn A4 weist für das Bezugsjahr 2018 im Bereich der automatischen Zählstelle 5008 5015 Bensberg Frankenforst einen durchschnittlichen Verkehr von 75.860 Kfz/24h mit einem Schwerververkehrsanteil von 8,1 % auf.

Gegenüber dem Bezugsjahr 2017 wurde bei dem Schwerververkehrsanteil eine Zunahme um 3,0 % und beim Gesamtverkehr eine geringfügige Zunahme um 1,2 % registriert.

Wie in der Abbildung 7 dargestellt, ist der durchschnittliche tägliche Verkehr zwischen 2015 und 2018 um 3,6 % und der Schwerververkehrsanteil um 6,5 % gestiegen.

In Abbildung 8 sind zusätzlich die wochentagabhängigen Tagesganglinien des Gesamtverkehrs für das Jahr 2018 im Bereich der Zählstelle 5008 5015 Bensberg Frankenforst dargestellt.

An den Wochentagen Montag bis Donnerstag sowie Freitag werden zur Morgen- und Nachmittagspitze deutlich höhere DTV-Werte erreicht als samstags und sonntags. Zudem ist der Berufsverkehrspendler bedingte typische Verlauf der Tagesganglinie mit stärker ausgeprägter Morgenspitze in Fahrtrichtung Köln und stärker ausgeprägter Nachmittagspitze in Fahrtrichtung Olpe gut zu erkennen.

Während die Morgenspitze in Fahrtrichtung Köln montags bis freitags zwischen 6 und 10 Uhr beobachtet werden kann (siehe mittlere Grafik in Abbildung 8), tritt die Nachmittagspitze in Fahrtrichtung Olpe montags bis donnerstags zwischen 15 und 20 Uhr und freitags zwischen 13 und 20 Uhr auf (siehe untere Grafik in Abbildung 8).

Samstags und sonntags liegen zwischen 11 und 19 Uhr in beide Fahrrichtungen nahezu konstante DTV-Werte vor.

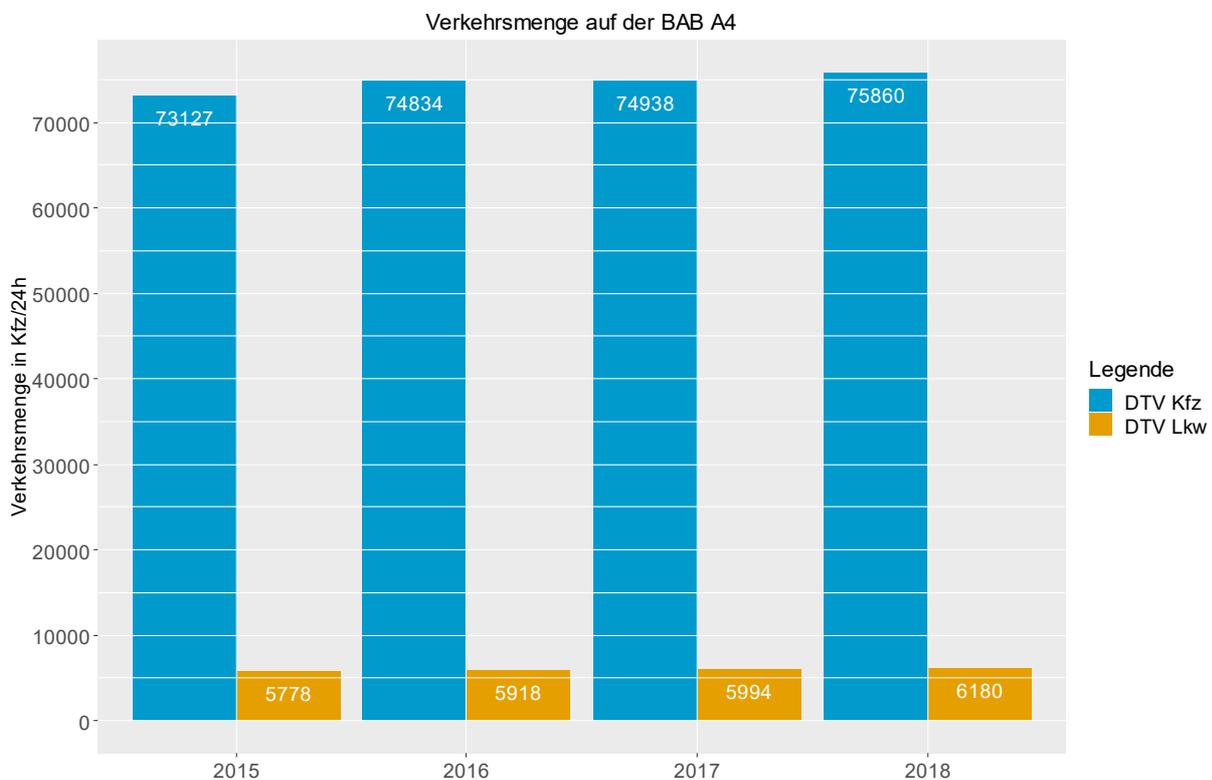


Abbildung 7: Verkehrsmenge auf der Bundesautobahn A4 im Bereich der automatischen Zählstelle 5008 5015 Bensberg Frankenforst zwischen 2015 und 2018

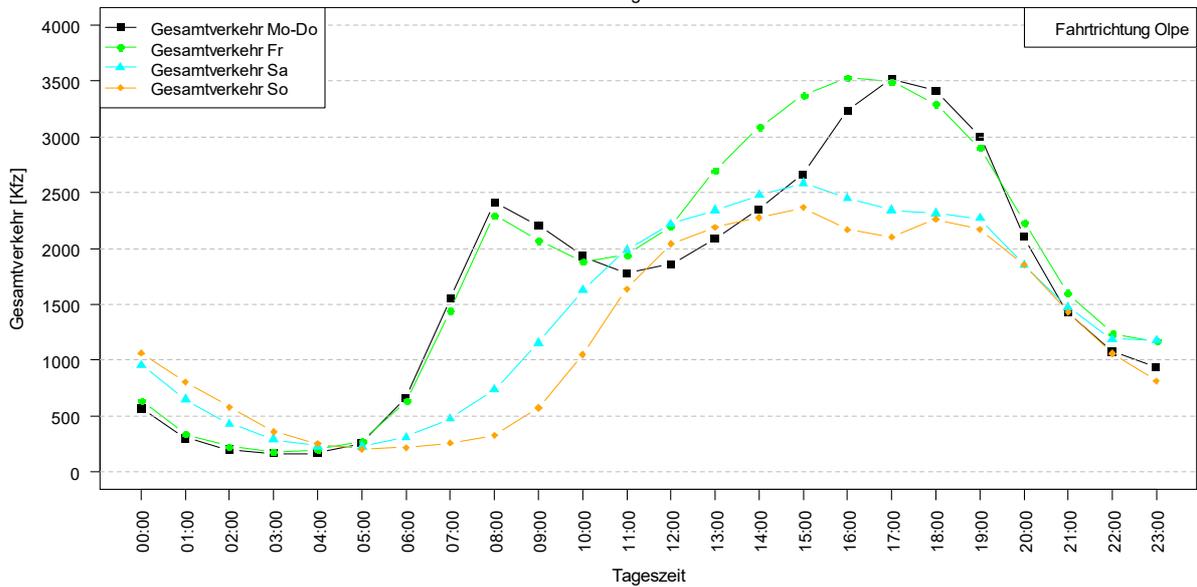
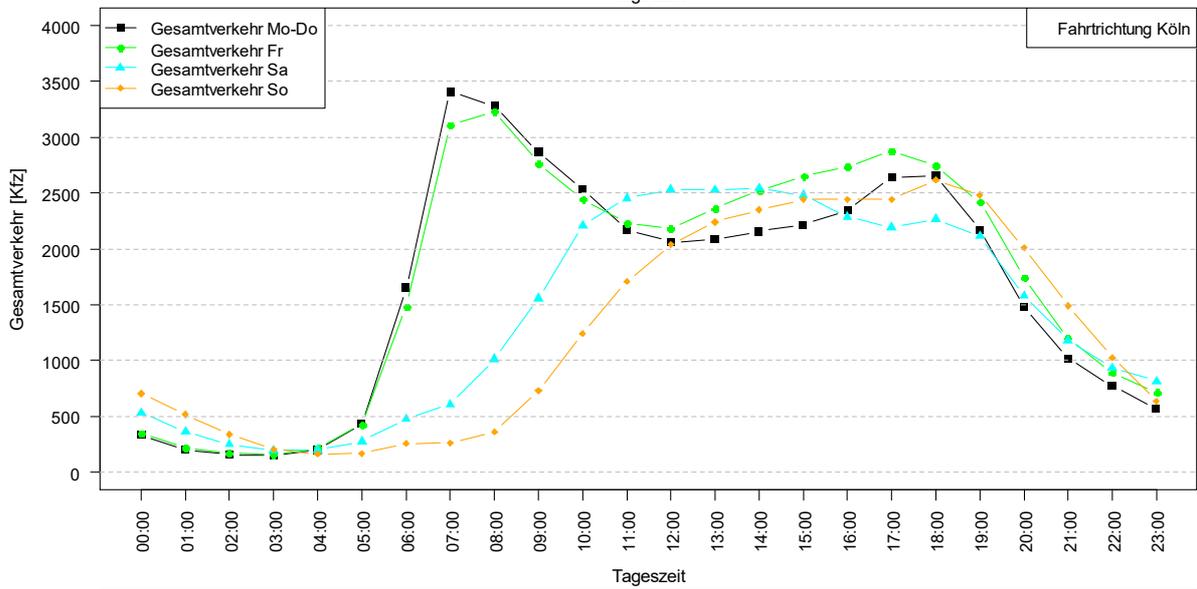
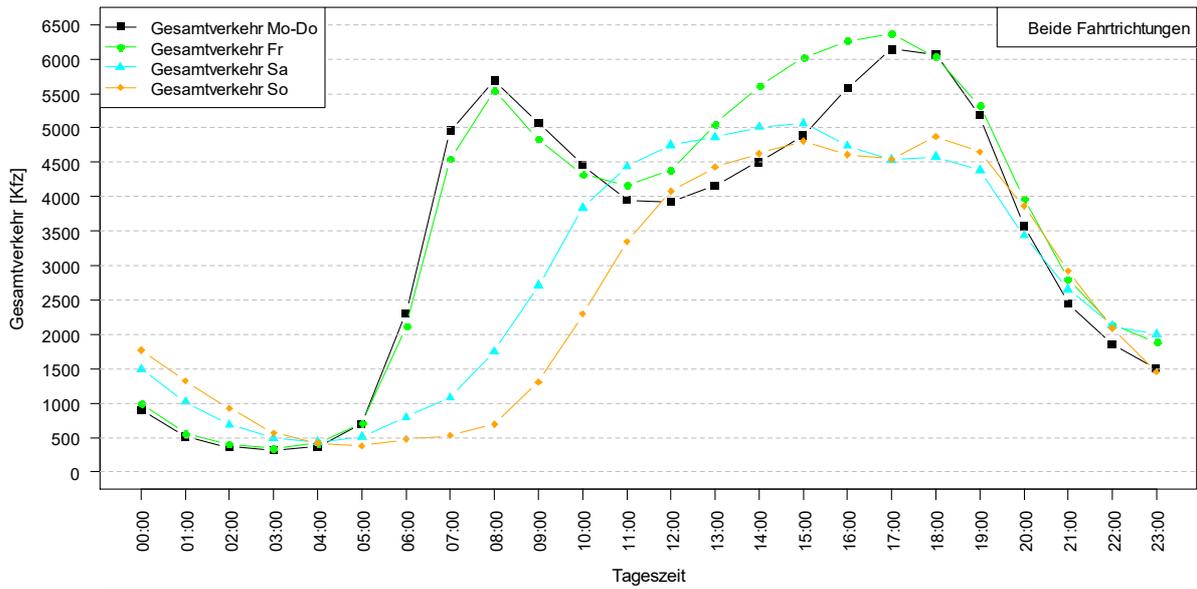


Abbildung 8: Wochentagabhängige Tagesganglinien des Gesamtverkehrs im Bereich der automatischen Zählstelle 5008 5015 Bensberg Frankenforst der BAB A4 für das Jahr 2018.

3 Datenqualität

3.1 Anforderungen der 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und der EU-Richtlinie 2008/50/EG

Datenqualitätsziele gemäß Anlage 1 der 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes:

Die Datenqualitätsziele für die Luftqualitätsbeurteilung legen eine Mindestdatenerfassung fest. Für die bei den Messungen der Bundesanstalt für Straßenwesen betrachteten Schadstoffe liegt die vorgegebene Mindestdatenerfassung bei:

Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide	90 %
Partikel (PM ₁₀ /PM _{2,5})	90 %
Ozon	90 % im Sommer 75 % im Winter

Lokale Standortkriterien für Probenahmestellen gemäß Anlage 3 und 8 der 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes:

In den Richtlinien und der 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes sind Anforderungen an die Probenahmestellen und deren Umgebungsbedingungen aufgeführt. Insbesondere wird für Probenahmestellen für den Verkehr gefordert, dass sie

- in Bezug auf alle Schadstoffe mindestens 25 m von verkehrsreichen Kreuzungen und höchstens 10 m vom Fahrbahnrand entfernt sind.
- Der Ort der Probenahme ist so zu wählen, dass die Luftproben soweit möglich für die Luftqualität eines Straßenabschnitts von nicht weniger als 100 m repräsentativ sind.

- Für die Ozonmessung wird ein Abstand zur Straße von mehr als 10 m gewählt.

Diese Anforderungen werden für die Messstelle der Bundesanstalt für Straßenwesen an dem Standort **Bundesautobahn A4** Ri. Olpe für Ozon erfüllt.

Bei den Probenahmen von NO_x und PM_x wird der Abstand von höchstens 10 m zum Fahrbahnrand am Standort „A4_OI_2“ nicht eingehalten. Durch die Wiederinbetriebnahme des Messcontainers in 5 m Abstand zum Fahrbahnrand („A4_OI_1“) wird auch diese Anforderung für die NO_x- und PM_x-Messungen ab 2019 erfüllt.

4 Messergebnisse

4.1 Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO₂

In der Tabelle 3 sind die Messergebnisse des Messquerschnitts an der BAB A4 in Fahrtrichtung Olpe für das Jahr 2018 im Hinblick auf die gasförmigen Komponenten Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO₂ aufgeführt.

Tabelle 3: Messergebnisse des Messquerschnittes an der Bundesautobahn A4 in Fahrtrichtung Olpe (15 m Abstand zum Fahrbahnrand) im Hinblick auf NO und NO₂

Stickstoffmonoxid NO	
Datenerfassung in %	95,2
Jahresmittelwert in µg/m ³	13,0
Max. Stundenmittelwert in µg/m ³	172,3
Stickstoffdioxid NO ₂	
Datenerfassung in %	95,2
Jahresmittelwert in µg/m ³	28,9
Max. Stundenmittelwert in µg/m ³	138,8
Anzahl der Tage mit Überschreitung des SMGW	-

Wie die Messergebnisse zeigen, lag für Stickstoffdioxid im Jahr 2018 ein Jahresmittelwert von $28,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in 15 m Abstand zum Fahrbahnrand vor. Der höchste Stundenmittelwert lag im Jahr 2018 für Stickstoffdioxid bei $138,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ein Vergleich mit dem Immissionsgrenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. dem Kurzzeitkriterium der 39. BImSchV (maximal an 18 Stunden eines Kalenderjahres NO_2 -Konzentrationen $>200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) wird aufgrund des zu großen Abstandes der NO_x -Probenahme zum Fahrbahnrand nicht vorgenommen.

4.2 Ozon O_3

In der Tabelle 4 sind die Messergebnisse des Messquerschnittes an der BAB A4 in Fahrtrichtung Olpe für das Jahr 2018 im Hinblick auf die gasförmige Komponente Ozon O_3 dargestellt.

Tabelle 4: Messergebnisse des Messquerschnittes an der Bundesautobahn A4 in Fahrtrichtung Olpe (15 m Abstand zum Fahrbahnrand) im Hinblick auf O_3

Datenerfassung in %	96,3
Jahresmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	36,0
Max. 1h-Mittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	171,3
Max. 8h-Mittelwert pro Tag in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	131,4
Anzahl der Tage mit Überschreitung des Zielwertes von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	7

Der Zielwert zum Schutz der menschlichen Gesundheit von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ darf gemäß 39. BImSchV an maximal 25 Tagen im Kalenderjahr, gemittelt über drei Jahre, überschritten werden. Die erforderliche Mittelung über drei Jahre kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht vorgenommen werden, da aufgrund der Umgestaltung des Messquerschnittes an der BAB A4 für die Kalenderjahre 2016 und 2017 keine bzw. nur unvollständige Messwerte vorliegen.

Bei alleiniger Betrachtung des Jahres 2018 wurde der Zielwert von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ jedoch mit einem ma-

ximalen 8h-Mittelwert von $131,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an sieben der zulässigen 25 Tage um maximal $11,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschritten.

Im Hinblick auf die Informationsschwelle von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lag im Jahr 2018 mit einem maximalen 1h-Mittelwert von $171,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ keine Überschreitung vor.

4.3 Partikel PM_x

In der Tabelle 5 sind die Messergebnisse des Messquerschnittes an der BAB A4 in Fahrtrichtung Olpe für das Jahr 2018 im Hinblick auf Partikel der Fraktionen $\text{PM}_{2,5}$ und PM_{10} dargestellt.

Tabelle 5: Messergebnisse des Messquerschnittes an der Bundesautobahn A4 in Fahrtrichtung Olpe (16,5 m Abstand zum Fahrbahnrand) im Hinblick auf Partikel $\text{PM}_{2,5}$ und PM_{10}

Partikel $\text{PM}_{2,5}$	
Datenerfassung in %	98,6
Jahresmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10,0
Max. Tagesmittelwert (TMW) in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	53,8
Partikel PM_{10}	
Datenerfassung in %	98,6
Jahresmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	14,3
Max. Tagesmittelwert (TMW) in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	55,9
Anzahl der Tage mit Überschreitung des TMGW	1

Für Partikel PM_{10} lagen im Jahr 2018 ein Jahresmittelwert von $14,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sowie ein maximaler Tagesmittelwert von $55,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Bereich des Messstandortes „A4_OI_2“ an der BAB A4 vor.

Ein Vergleich mit dem Immissionsgrenzwert für PM_{10} sowie dem Kurzzeitkriterium der 39. BImSchV (maximal an 35 Tagen innerhalb eines Kalenderjahres Tagesmittelwerte $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) wird aufgrund des zu großen Abstandes der Partikel-Probenahme zum Fahrbahnrand nicht vorgenommen.

Der Jahresmittelwert für Partikel $PM_{2,5}$ lag im Jahr 2018 bei $10,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in 16,5 m Abstand zum Fahrbandrand.

5 Beurteilung der Luftqualität an BAB im Jahr 2018

5.1 Meteorologie

Das Jahr 2018 wird vom Deutschen Wetterdienst als „das wärmste und sonnigste Jahr seit Beginn regelmäßiger Aufzeichnungen“ bezeichnet [14].

Auch im Bereich der Messstation an der BAB A4 lag die mittlere Lufttemperatur im Jahr 2018 mit $11,5 \text{ °C}$ um $0,5 \text{ °C}$ oberhalb des im Jahr 2018 seitens des DWD ermittelten Durchschnittwertes und damit insgesamt um $2,5 \text{ °C}$ oberhalb des vieljährigen Mittelwertes der international gültigen Referenzperiode von 1961 bis 1990 für Nordrhein-Westfalen. Die höchste Lufttemperatur mit einem Wert von $38,1 \text{ °C}$ wurde am Nachmittag des 07. August 2018 gemessen. Am Morgen des 27.02.2018 lag die niedrigste Lufttemperatur des Jahres bei $-10,4 \text{ °C}$.

Gemäß DWD [14] zählt das Jahr 2018 zudem zu „den niederschlagärmsten Jahren seit Beginn regelmäßiger Messungen 1881“. Bei einem mittleren Jahresniederschlag von $577 \text{ l}/\text{m}^2$ wurden an dem Messquerschnitt an der BAB A4 nur 95 % des 2018 vorliegenden Durchschnittwertes für Nordrhein-Westfalen ($605 \text{ l}/\text{m}^2$) und nur 66 % des vieljährigen Mittelwertes der international gültigen Referenzperiode für Nordrhein-Westfalen ($875 \text{ l}/\text{m}^2$) erreicht.

Im Jahr 2018 lag die vorherrschende Windrichtung im Bereich des Messquerschnittes an der BAB A4 zwischen 100 und 140 ° (siehe Abb. 8). Diese eher unübliche bodennahe SO-Strömung wird vor allem bei schwachen Winden durch die orographischen Gegebenheiten der Kölner Bucht hervorgerufen und ist typisch für den Bereich östlich der Ville [15]. Kanalisationseffekte sorgen zu diesen Zeit-

räumen dafür, dass der bodennahe Wind nicht, wie im flachen Gelände ohne orographische Hindernisse üblich, aus Südwest weht, sondern dem von SSO nach NNW ausgerichteten Verlauf des Rheins folgt [15].

Die Windrose in Abbildung 9 weist daher in den Bereichen $280-310 \text{ °}$ auch ein weiteres, jedoch nicht so stark ausgeprägtes Maximum in der Häufigkeit der vorherrschenden Windrichtung auf.

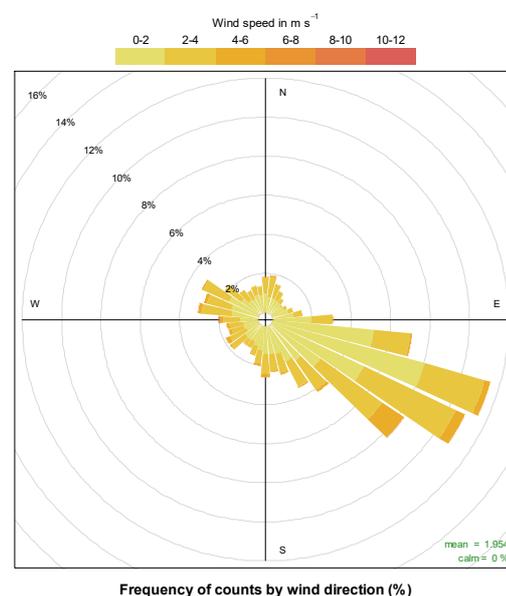


Abbildung 9: Windrose mit Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten an der Messstation auf dem Dach der BAST für das Jahr 2018

Die mittlere Windgeschwindigkeit lag im Jahr 2018 bei rund 2 m/s . Das Sturmtief „Friederike“ sorgte am 18.01.2018 für die höchste Windgeschwindigkeit von $10,4 \text{ m/s}$.

Da die Luftqualität im Bereich der Autobahn nicht nur von den lokalen Verkehrsemissionen, sondern u.a. auch von den vorliegenden meteorologischen Bedingungen abhängig ist, können jahreszeitliche Schwankungen der Luftschadstoffe beobachtet werden.

Im nachfolgenden Kapitel 5.2 wird daher die saisonale Entwicklung der Luftschadstoffe NO_2 , O_3 und PM_{10} betrachtet und erläutert.

5.2 Saisonale Entwicklung der Luftschadstoffe

In Abbildung 10 ist die saisonale Entwicklung der mittleren Stickstoffdioxid-Konzentration in Abhängigkeit von der Windrichtung sowie der Windgeschwindigkeit in Form sogenannter Polarplots dargestellt.

Bei der Erstellung der Polarplots wurde die betrachtete Zeitreihe zuerst in einzelne Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsintervalle eingeteilt und im Anschluss daran die mittlere Konzentration pro Intervall berechnet.

Im Jahresverlauf liegen die höchsten NO_2 -Konzentrationen bei Wind aus West bis Nordost

und Windgeschwindigkeiten zwischen 1 und 6 m/s vor.

Grund hierfür könnte die Lage des Messquerschnitts südlich der von West nach Nordost verlaufenden BAB A4 sein. Während daher bei Wind aus Nordost bis West überwiegend Hintergrundkonzentrationen von NO_2 gemessen werden (im Jahr 2018 zu 65 % der Zeit der Fall), kann bei Wind aus West bis Nordost der Einfluss des lokalen Straßenverkehrs auf der BAB A4 sowie eventuell auch der Einfluss des nördlich des BAST-Geländes vorhandenen Industriegebietes beobachtet werden (im Jahr 2018 zu 30 % der Zeit der Fall). Die restlichen 5 % der Zeit handelt es sich um Fehlwerte von NO_2 .

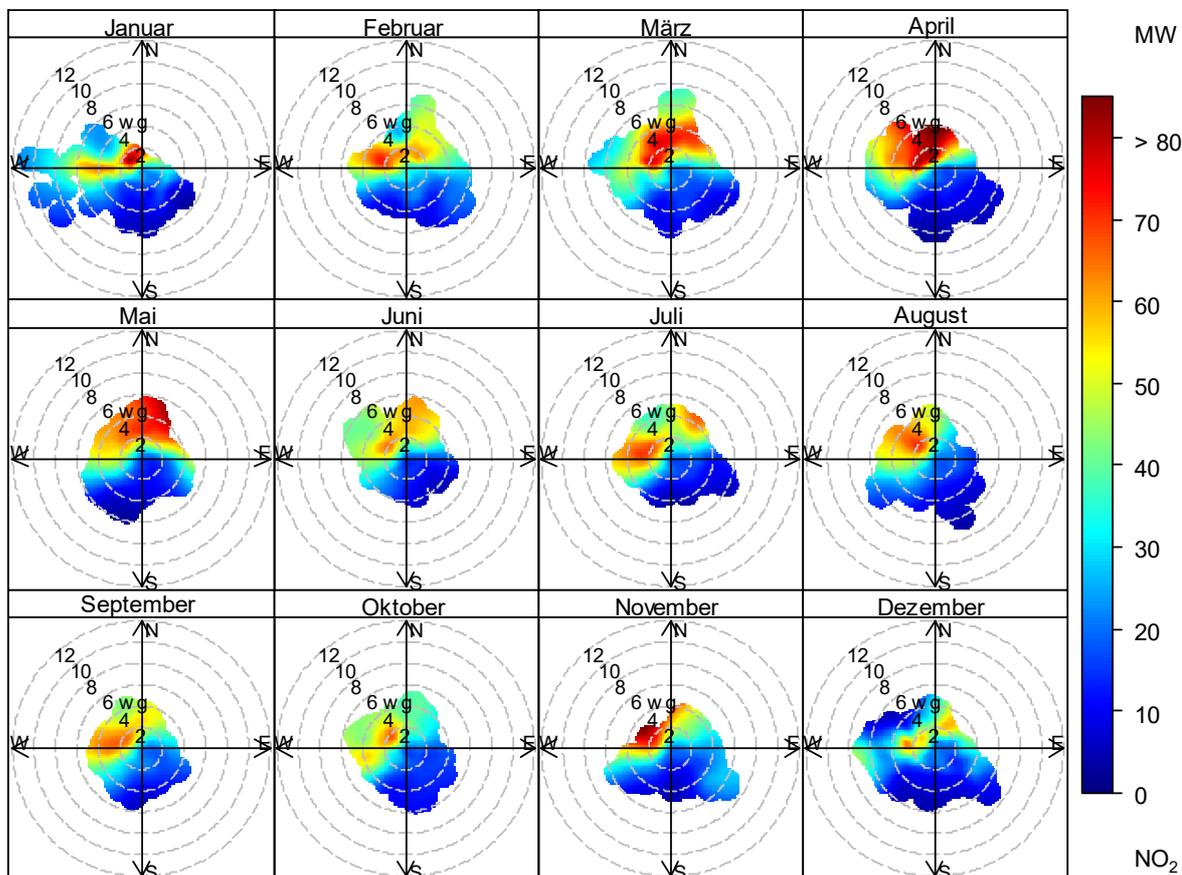


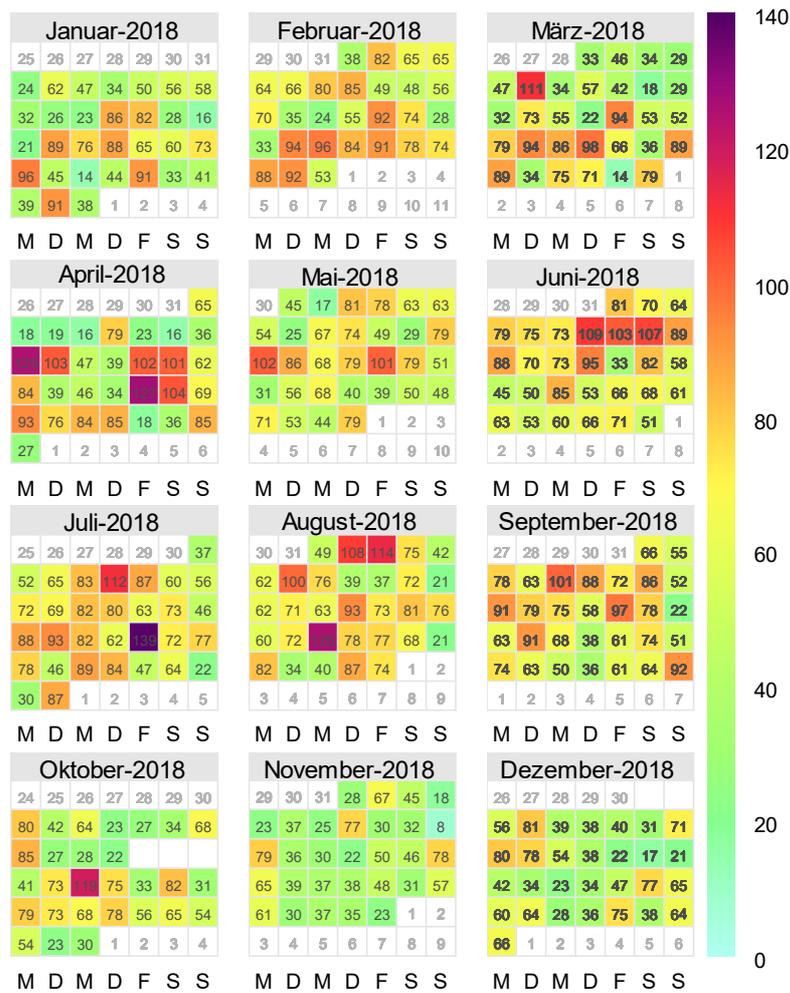
Abbildung 10: Monatliche Polarplots mit Darstellung der mittleren Stickstoffdioxid-Konzentration in Abhängigkeit von der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit für das Jahr 2018 (erstellt mit R-Package: openair).

Auf Grundlage des Kalenderplots in Abbildung 11 mit Darstellung des jeweils höchsten täglichen Stundenmittelwertes von NO₂ wird deutlich, dass in saisonaler Hinsicht die höchsten NO₂-Konzentrationen in den Sommermonaten vorliegen. Zurückzuführen ist dies auf photochemische Prozesse, die durch intensive Sonneneinstrahlung in den Sommermonaten eine vermehrte Bildung von NO₂ hervorrufen. Der Kalenderplot zeigt, dass im Jahr 2018 auch in den Frühlingsmonaten bereits hohe Konzentrationen von NO₂ vorhanden waren. Hier wird deutlich, dass die photochemischen Prozesse vor allem auch durch meteorologische Parameter wie beispielsweise Windrichtung, Windgeschwindigkeit oder Globalstrahlung beein-

flusst werden. Im Bereich der Messstation an der BAB A4 lag der höchste NO₂-Stundenmittelwert von 138,8 µg/m³ am Spätnachmittag des 20.07.2018 bei geringer Bedeckung sowie schwachem Wind mit 1.97 m/s aus Nordwest (305 °) vor.

Es zeigt sich somit, dass im Bereich der Messstation an der BAB A4 die höchsten NO₂-Konzentrationen meist an trockenen Tagen mit geringer Bedeckung und hoher Sonneneinstrahlung, Wind aus Nordwest, niedrigen Windgeschwindigkeiten und gleichzeitig hohen Verkehrsmengen erreicht werden können (nicht explizit dargestellt; die Tagesganglinie des Gesamtverkehrs kann Abbildung 8 entnommen werden).

Darstellung der höchsten SMW von NO₂



Die in Abbildung 12 dargestellten Polarplots zeigen die mittlere Ozon-Konzentration im Verlauf des Jahres 2018. Gut zu erkennen sind die unterschiedlich hohen Konzentrationen im Vergleich der Sommer- und Wintermonate. Bereits in den Frühlingsmonaten April und Mai konnten im Jahr 2018 hohe O_3 -Konzentrationen mit maximalen 1h-Mittelwerten von bis zu $137,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ beobachtet werden.

Auffällig ist, dass vor allem in den Sommermonaten auch bei Wind aus ESE bis SW hohe O_3 -Konzentrationen gemessen wurden. Möglicherweise lässt sich hieraus der Einfluss des südlich der Messstation gelegenen Königsforstes (Wald-

gebiet) auf die photochemischen Prozesse erkennen. Geringere NO -Konzentrationen im Wald im Vergleich zu den höheren NO -Konzentrationen entlang der BAB A4 könnten zu einem verringerten und langsameren Abbau der O_3 -Konzentrationen geführt haben. Weiterhin besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Höhe der Ozonkonzentration und der Sonnenscheindauer sowie -intensität.

Hohe Ozonkonzentrationen lagen im Jahr 2018 vorwiegend bei stabilen Hochdruckwetterlagen mit viel Sonneneinstrahlung, hohen Lufttemperaturen und wenig Niederschlag in den Monaten Juli und August vor. Der höchste O_3 -1h-Mittelwert von

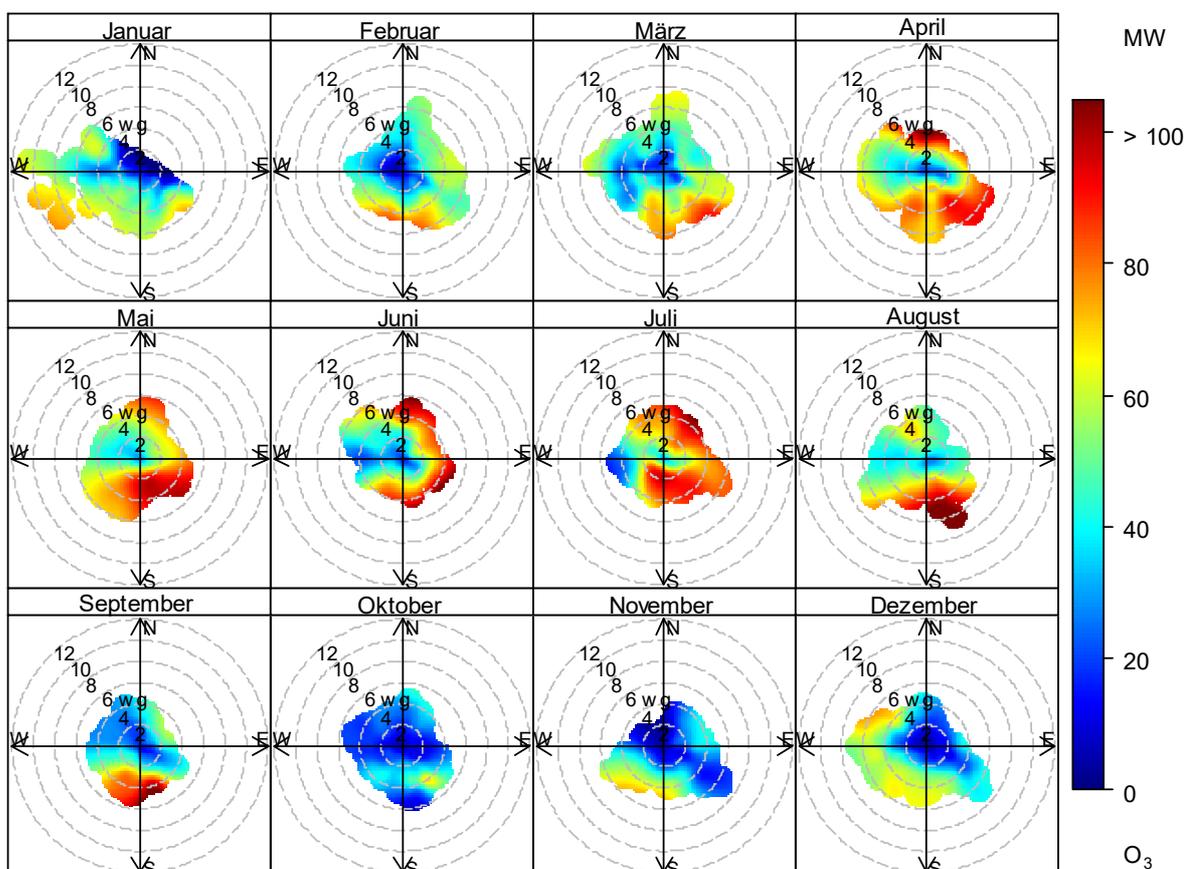


Abbildung 12: Monatliche Polarplots mit Darstellung der mittleren Ozon-Konzentration in Abhängigkeit von der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit für das Jahr 2018 (erstellt mit R-Package: openair).

171,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ wurde im Juli gemessen. Überschreitungen des gleitenden 8-SMW gab es im Juli bzw. August 2018 an 7 Tagen.

Die Tage, an denen der gleitende 8-SMW von 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ überschritten wurde, sind in der Abbildung 13 ab rötlicher Einfärbung zu erkennen. Der höchste 8-SMW von 131,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lag hiernach am 03.08.2018 unter Hochdruckeinfluss mit einer Sonnenscheindauer von ca. 13,5 Stunden und einer Lufttemperatur von bis zu 34 °C vor.

In der Abbildung 14 ist der jahreszeitliche Verlauf der mittleren Partikel PM_{10} -Konzentration dargestellt. Die niedrigen Feinstaub-Konzentrationen im Bereich des Messquerschnittes im Januar 2018 sind auf die vergleichsweise milden Temperaturen

in Kombination mit viel Niederschlag zurückzuführen.

Nach dem milden und feuchten Januar 2018, sank die Temperatur gegen Ende Februar bei nordöstlicher Anströmung auf -10,4 °C. Anfang März blieb der Hochdruckeinfluss weiterhin bestehen. Die austauscharme Inversionswetterlage führte zwischen dem 28.02.2018 und dem 03.03.2018 zu einer Anreicherung der Luftschadstoffe. Als Folge hiervon wurde am 03.03.2018 der höchste PM_{10} -Tagesmittelwert von 55,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ registriert.

In den Polarplots wird keine direkte Abhängigkeit hoher PM_{10} -Konzentrationen von der Windrichtung bzw. der Windgeschwindigkeit deutlich.

Darstellung des höchsten täglichen 8-SMW von O_3

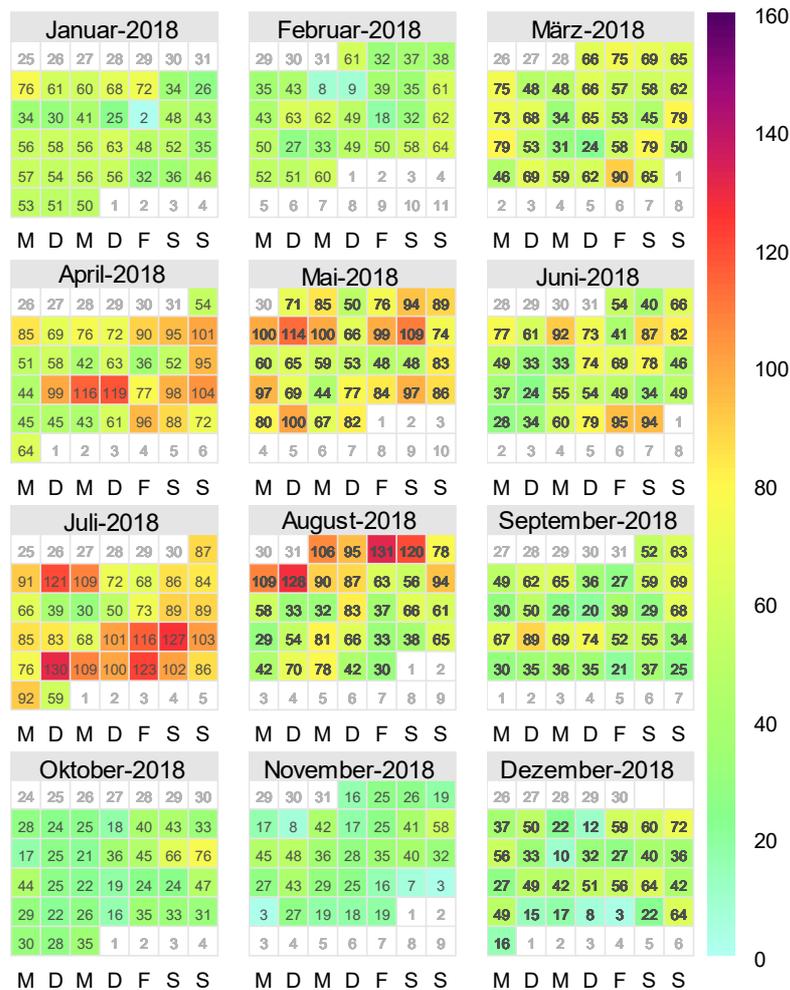


Abbildung 13: Kalenderplots mit Darstellung des höchsten, täglichen 8-Stundenmittelwertes von Ozon für das Jahr 2018 (erstellt mit R-Package: openair).

In der Abbildung 15 sind die PM_{10} -Tagesmittelwerte in Form von Kalenderplots dargestellt. Die Monate April bis September waren größtenteils geprägt von außergewöhnlich hohen Lufttemperaturen, großer Trockenheit und viel Sonnenschein. Der fehlende Niederschlag machte sich im Jahr 2018 auch in den höheren PM_{10} -Konzentrationen im Vergleich zu den PM_{10} -Konzentrationen der niederschlagsreicheren Monate Januar und Dezember bemerkbar.

Am 09.04.2018 wurden an der Messstation zum Tageszeitraum PM_{10} -Konzentrationen von bis zu $63,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $PM_{2,5}$ -Konzentrationen von bis zu $36,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Halbstunden-Mittelwerte regis-

triert. Ersichtlich wird dies in der Abbildung 16, in der die zeitliche Entwicklung der PM_x -Konzentrationen auf Basis von Halbstunden-Mittelwerten dargestellt ist. Grund für diese erhöhten Konzentrationen am 09.04.2018 war Staub aus der Sahara, der über Algerien und Tunesien durch kräftige Winde aufgewirbelt und mit der durch ein Tiefdruckgebiet hervorgerufenen Süd- bis Südwestlichen Höhenströmung bis nach Deutschland transportiert werden konnte. Die zusätzlichen Staubpartikeln dienten zudem als Kondensationskerne und führten in großen Teilen Deutschlands zur Bildung einer Cirrocumuli-Wolkschicht (siehe Abbildung 17) und daher zu

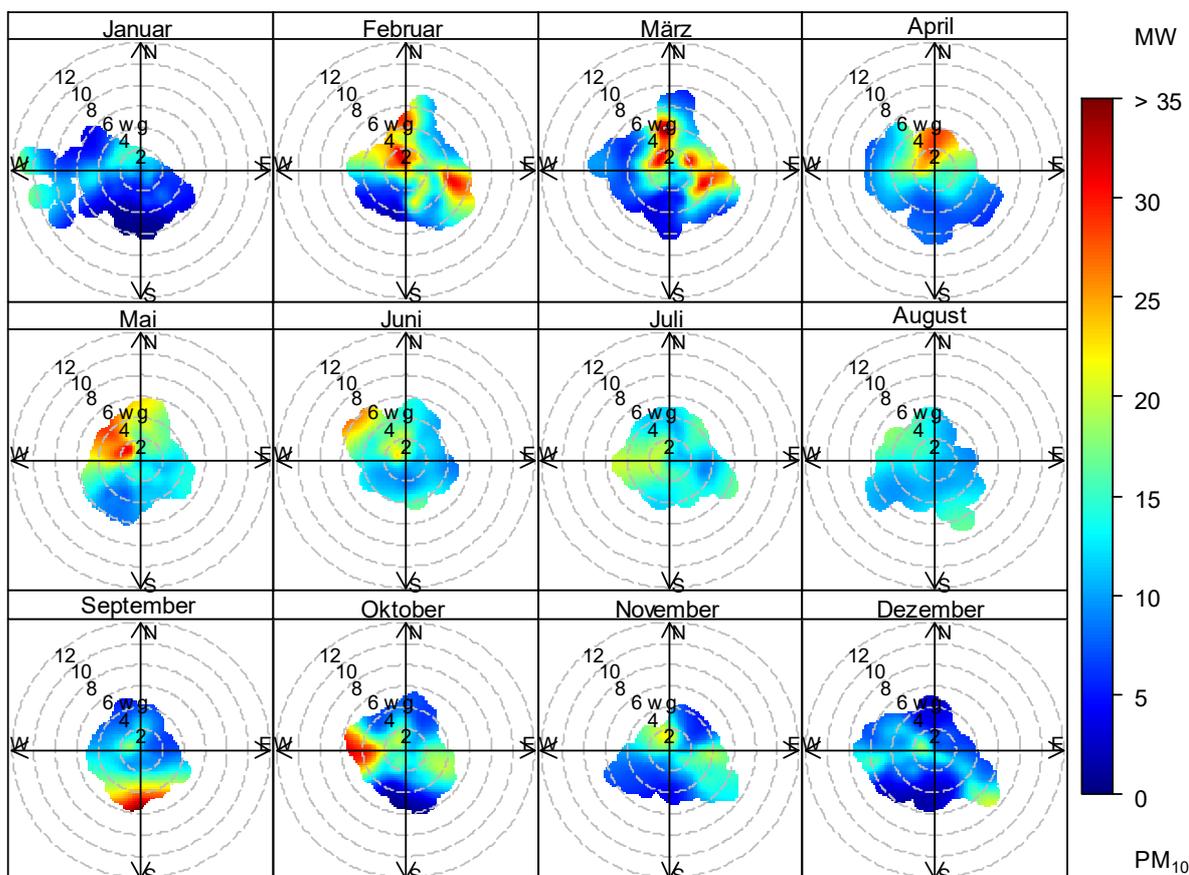


Abbildung 14: Monatliche Polarplots mit Darstellung der mittleren Partikel PM_{10} -Konzentration in Abhängigkeit von der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit für das Jahr 2018 (erstellt mit R-Package: openair).

Darstellung des TMW von PM₁₀

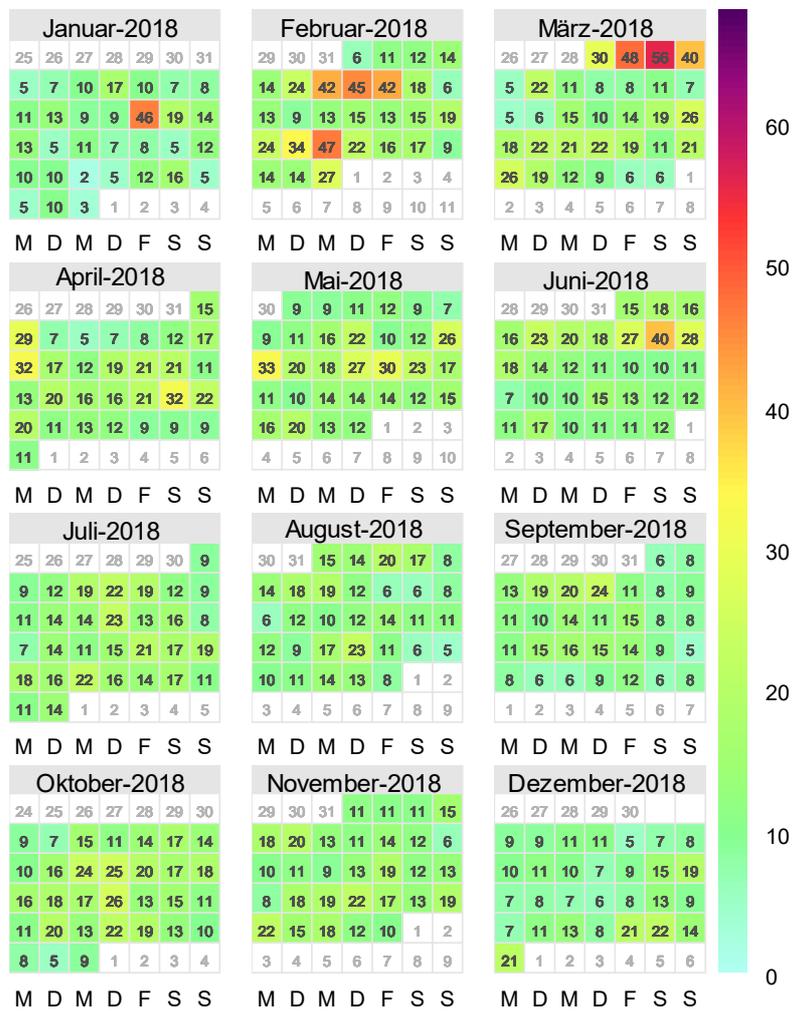


Abbildung 15: Kalenderplots mit Darstellung des Tagesmittelwertes von Partikeln PM₁₀ für das Jahr 2018(erstellt mit R-Package: openair).

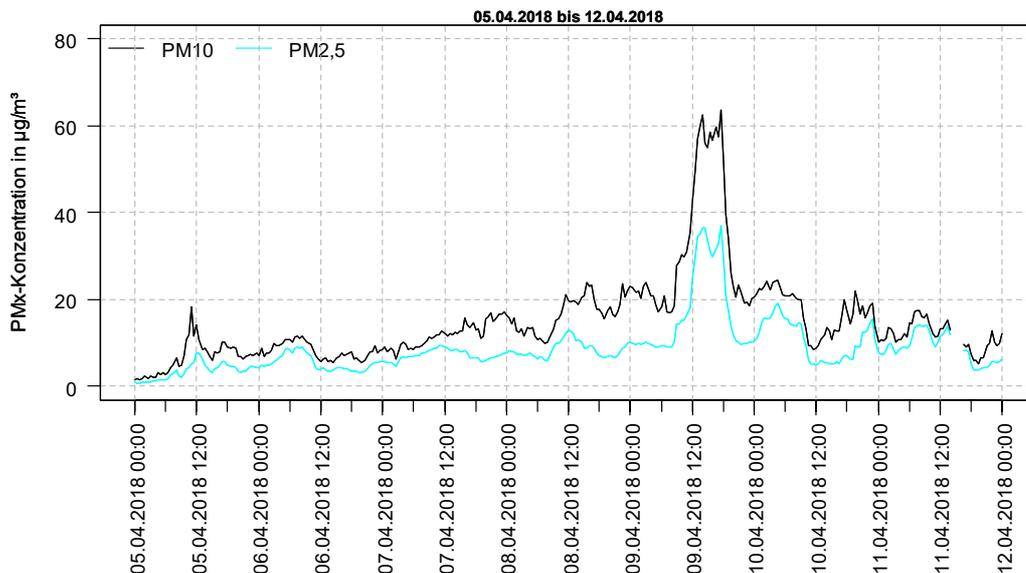


Abbildung 16: Halbstunden-Mittelwerte der PM₁₀ und PM_{2,5}-Konzentration an dem Messquerschnitt an der BAB A4 vom 05.04.2018 bis 12.04.2018 mit Darstellung der Auswirkungen des Saharastaubs am 09.04.2018.

einer verringerten Sonneneinstrahlung.

Hohe PM_{10} - und $PM_{2,5}$ -Konzentrationen wurden ebenfalls durch den anthropogen erzeugten Feinstaub des Silvesterfeuerwerks zum Jahreswechsel 2018/2019 verursacht. Die in der Abbildung 18 dargestellte zeitliche Entwicklung der PM_{10} - und $PM_{2,5}$ -Konzentrationen zeigt daher zwischen 0 und 3 Uhr einen deutlichen Peak mit Höchstwerten von bis zu $134 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Halbstunden-Mittel.

5.3 Zeitliche Entwicklung der Luftqualität

Aufgrund der Umgestaltung des Messquerschnittes an der BAB A4 konnten seit 2015 keine Messdaten erfasst werden. Ein Vergleich der Messdaten zwischen den einzelnen Jahren wird daher erst in den kommenden Berichten über die Luftqualität im Bereich der Bundesautobahn Berücksichtigung finden.

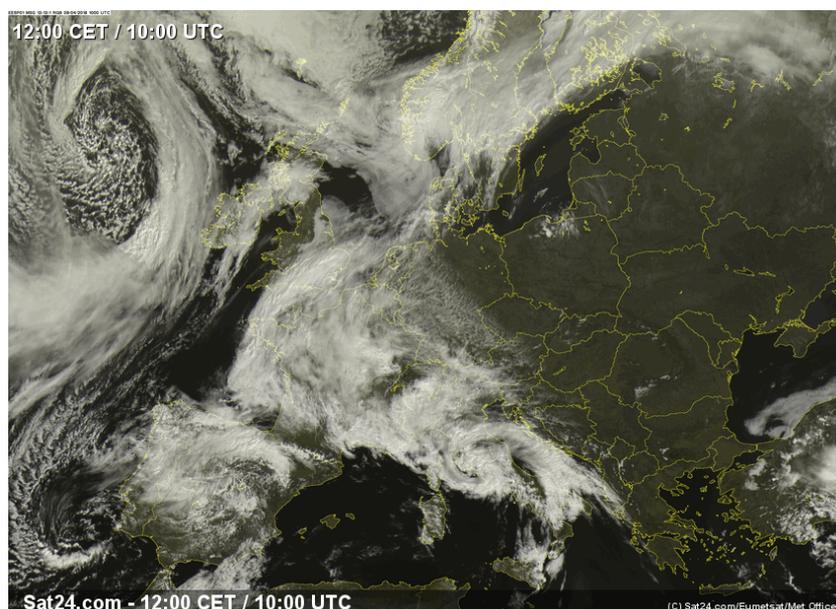


Abbildung 17: Satellitenbild EUROPA vom 09.04.2018 mit Darstellung der durch den Saharastaub hervorgerufenen Wolkenschicht über Deutschland (Quelle: <http://www2.sat24.com>)

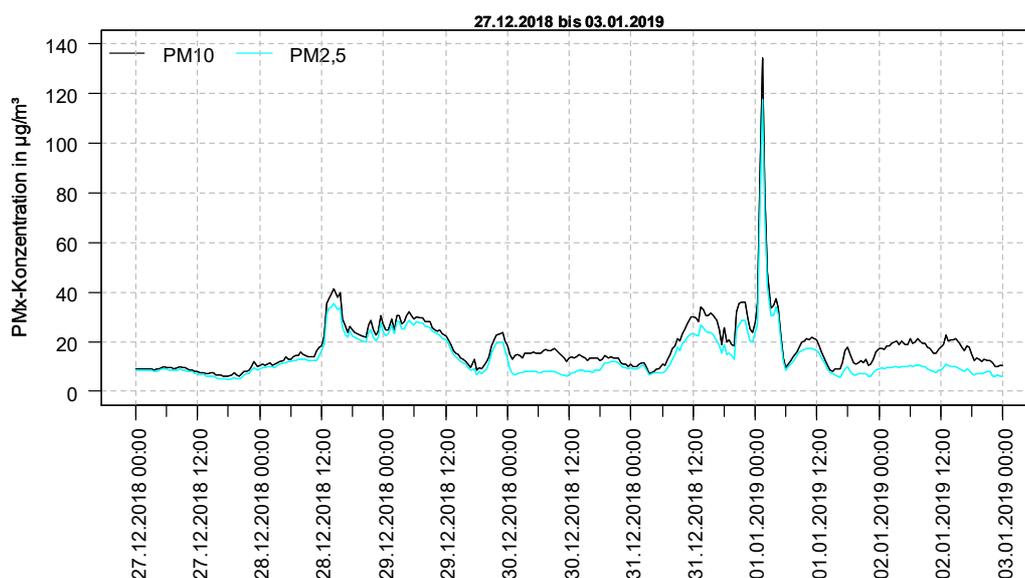


Abbildung 18: Halbstunden-Mittelwerte der PM_{10} und $PM_{2,5}$ -Konzentration an der BAB A4 vom 27.12.2018 bis 03.01.2019 mit Darstellung der Auswirkungen des Silvesterfeuerwerks am 01.01.2019.

Literaturverzeichnis

- [1] EG-Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa, Amtsblatt der europäischen Gemeinschaft Nr. L 152 vom 11. Juni 2008, 2008.
- [2] Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen - 39.BImSchV), Bundesgesetzblatt vom 2. August 2010, BGBl, Jahrgang 2010, Teil I. Nr. 40, 2010.
- [3] Umweltbundesamt, „Daten zur Luftqualität 2018: 57 Städte über dem NO₂-Grenzwert,“ <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/daten-zur-luftqualitaet-2018-57-staedte-ueber-dem>, 2019.
- [4] EG-Richtlinie 1996/62/EG über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität, Amtsblatt der europäischen Gemeinschaft Nr. L 296 vom 21.11.1996, Seite 55, 1996.
- [5] EG-Richtlinie 1999/30/EG über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft (1. Tochtterrichtlinie), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft Nr. L 163 vom 29.06.1999, Änderung 2001/744/EG vom 17.10.2001, 1999.
- [6] EG-Richtlinie 2000/69/EG über Grenzwerte für Benzol und Kohlenmonoxid (2. Tochtterrichtlinie), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft Nr. L 313 vom 13.12.2000, Seite 12, 2000.
- [7] EG-Richtlinie 2002/3/EG über den Ozongehalt in der Luft (3. Tochtterrichtlinie), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft Nr. L 67 vom 09.03.2002, Seite 14, 2002.
- [8] Umweltbundesamt. Stickstoffoxide, „<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/stickstoffoxide>,“ [Online].
- [9] LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, „Luftqualität in Baden-Württemberg - Auswertung der Jahresdaten für 2017,“ p. 114, März 2019.
- [10] Umweltbundesamt. Feinstaub, „<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub>,“ [Online].
- [11] A. P. I. Teledyne, „Operation Manual Model T200 Nitrogen Oxide Analyzer,“ 13 Februar 2012.
- [12] A. P. I. Teledyne, „Operation Manual Model T400 Photometric Ozone Analyzer,“ 18 März 2014.
- [13] PALAS, „Bedienungsanleitung Feinstaubmonitorsystem Fidas: Fidas 100, Fidas 200/200 S/200 E,“ 22 11 2016.
- [14] DWD, „Pressemitteilung: Deutschlandwetter im Jahr 2018. 2018 – ein außergewöhnliches Wetterjahr mit vielen Rekorden,“ 28 12 2018.
- [15] DWD, „Regionale Flugklimatologie (RFK) für die Allgemeine Luftfahrt in der Bundesrepublik Deutschland,“ Deutscher Wetterdienst, Abteilung Flugmeteorologie, Offenbach am Main, 2008.