

An aerial photograph of a multi-lane road in Stuttgart, Germany. The road has white lane markings and arrows. Several cars are visible, including a white car in the foreground and a dark car in the middle ground. On the right side of the road, there are several tall, grey filter columns. The background shows green trees and a building with a red roof under a blue sky with white clouds.

Wirksamkeit von Filtersäulen im Bereich Stuttgart „Am Neckartor“ Abschlussbericht

Dr. Thilo Müller
Dr. Tobias Warth

Mai 2020

MANN+
HUMMEL

MANN+HUMMEL GmbH
Schwieberdinger Str. 126
71636 Ludwigsburg
Germany
Tel. +49 7141 98-0
Fax +49 7141 98-2545
info@mann-hummel.com
www.mann-hummel.com

Dieser Abschlussbericht entstand im Rahmen eines Pilotprojekts der Firma MANN+HUMMEL.

Projektzeitraum: Mai 2018 – Juni 2020

Das Projekt wurde gefördert vom Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg und unterstützt von der Landeshauptstadt Stuttgart.



Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR VERKEHR

STUTTGART



Inhalt

1	Einführung.....	4
1.1	Ausgangspunkt.....	4
2	Projektphasen und Ziele des Filteranlagenbetriebs.....	6
2.1	Phase I: Senkung der Feinstaubbelastung (PM10).....	7
2.2	Phase II: Funktionserweiterung der Anlagen (NO ₂ -Reduktion).....	9
2.3	Phase III: Finale Ausbaustufe der Anlagenkapazität mit Fokus NO ₂	10
3	Technische Beschreibung der Anlagen.....	12
3.1	Filter Cube – Generation 1 (Fokus: Feinstaubminderung).....	12
3.2	Filter Cube – Generation 2 (Feinstaub – und NO ₂ -Minderung).....	13
4	Prognose der Schadstoffreduzierung.....	16
4.1	Betrachtung der Minderungswirkung über Massenbilanzen.....	16
4.2	Das Modellsystem MISKAM.....	18
4.3	MISKAM-Simulationen zur Bestimmung der PM10-Reduzierung.....	18
4.4	MISKAM-Simulationen zur Bestimmung der NO ₂ -Reduzierung.....	20
5	Versuchsmethodik und Messgeräte.....	23
5.1	Schaltversuche.....	24
5.2	Messgeräte und Datenquellen.....	29
5.3	Ergänzende Vor-Ort-Versuche.....	30
6	Ergebnisse und Bewertung.....	32
6.1	Dauerschaltversuche.....	32
6.2	Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen am Neckartor.....	38
6.3	In-situ Versuche.....	42
6.4	Bewertung von Regelungskonzepten auf Basis der Schaltversuche.....	43
7	Zusammenfassung.....	47
8	Danksagungen.....	48
9	Quellen.....	48
10	Anhang - Statistische Parameter für die Schaltversuche.....	50

1 Einführung

1.1 Ausgangspunkt

Die Luftqualität hat sich in den letzten Jahren kontinuierlich verbessert, jedoch werden die Grenzwerte in vielen Städten noch immer nicht eingehalten. Die meisten Überschreitungen liegen aktuell in zu hohen NO_2 -Werten begründet. Zu Projektbeginn Anfang 2018 lag jedoch auch die Anzahl von Feinstaub-Überschreitungstagen (Tagesmittelwert $\text{PM}_{10} > 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) insbesondere am Stuttgarter Neckartor noch oberhalb des Grenzwertes von 35 im Jahr.

Die lokal herrschende Schadstoffbelastung besteht zu einem bedeutenden Teil aus einer regionalen Hintergrundbelastung. Gründe hierfür sind Umwelteinflüsse wie Wetterbedingungen, Eintragungen durch die Energiewirtschaft aber auch die Landwirtschaft. Hinzu kommt die urbane Hintergrundbelastung durch städtische Quellen wie Baustellen, Haushalte und Kleinverbraucher. Neben den Hintergrundbelastungen treten lokal Zusatzbelastungen auf. Häufig sind diese durch hohes Verkehrsaufkommen begründet. Insbesondere in Kombination mit einem schlechten Luftaustausch kann es dadurch zu sogenannten Hotspots mit besonders hoch belasteter Luft kommen (siehe hierzu Abbildung 1.1). Als solcher Hotspot ist auch der Bereich „Am Neckartor“ in Stuttgart zu betrachten.



Abbildung 1.1 - Schematische Darstellung der Hintergrund- und Zusatzbelastung (Lenschow et al., 2001; LUBW 2015)

Ein Vergleich der Messstelle am Neckartor mit der urbanen Hintergrundmessstelle Bad Cannstatt verdeutlicht die Bedeutung des verkehrsinduzierten Immissionsanteils. Abbildung 1.2 zeigt die lokale Überhöhung des Hotspots im Vergleich zum urbanen Hintergrund für PM_{10} und NO_2 . Den verkehrsinduzierten Schadstoffanteil kennzeichnet in dieser Darstellung der grüne Bereich.

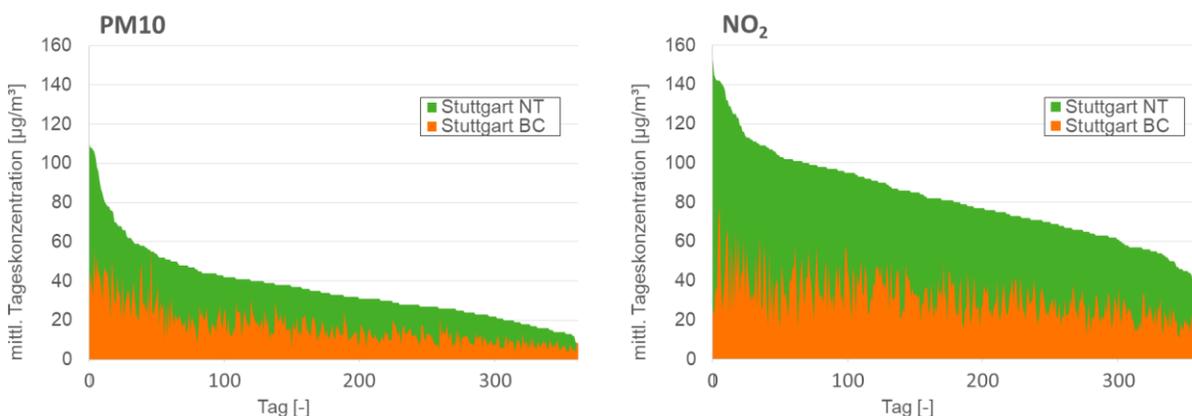


Abbildung 1.2 - Veranschaulichung der verkehrsbedingten Immissionsanteile durch den Vergleich der Messstellen „am Neckartor“ (NT) und „Bad Cannstatt“ (BC); Tagesmittelwerte sortiert nach Höhe des Messwerts (Links: PM_{10} , Messwerte 2016; rechts: NO_2 , Messwerte 2017). Datenquelle: LUBW

Eine detailliertere Unterteilung der Verursacher der Schadstoffbelastung am Neckartor zeigen die Darstellungen in Abbildung 1.3 aus den Luftreinhalteplänen für Stuttgart (LRP Stuttgart, 2018 und 2019).

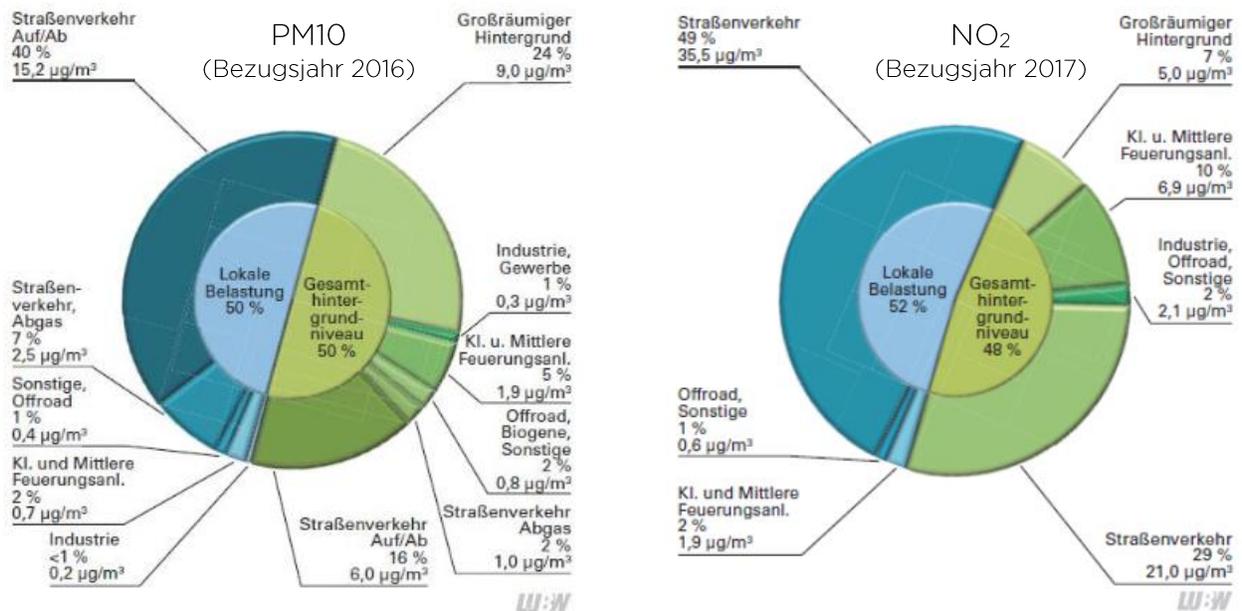


Abbildung 1.3 - Beiträge der verschiedenen Quellen, die zur Gesamtbelastung am Neckartor beitragen aus dem Luftreinhalteplan für die Stadt Stuttgart (LRP Stuttgart, 2018 und 2019). Links: PM10 für das Bezugsjahr 2016, rechts NO₂ für das Bezugsjahr 2017

Ausgehend von der allgemeinen Problematik zu hoher Schadstoffkonzentrationen an innerstädtischen Hauptverkehrsachsen mit ungünstigen Luftaustauschbedingungen hat MANN+HUMMEL Technologien und Produkte zur Filtration von Feinstaub sowie im zweiten Schritt auch zur Minderung der Stickstoffdioxid-Konzentrationen entwickelt.

2 Projektphasen und Ziele des Filteranlagenbetriebs

Im Rahmen eines Pilotprojekts von MANN+HUMMEL, gefördert vom Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg und unterstützt von der Landeshauptstadt Stuttgart sollten Filtersäulen zur Feinstaub- und NO₂-Minderung am Stuttgarter Neckartor aufgestellt werden. Ziel war es, die lokale Überhöhung der Schadstoffkonzentration an diesem Hotspot zu verringern und die Wirksamkeit der Maßnahme allgemein nachzuweisen.

Der Projektverlauf lässt sich in drei Phasen einteilen, deren Zielsetzungen sich voneinander unterscheiden. Der zeitliche Ablauf der Bau- und Versuchsmaßnahmen der einzelnen Phasen sind in Abbildungen 2.1 und 2.2 zusammengefasst. Während der Planung des Projektes Anfang 2018 lag der Fokus zunächst auf der Minderung der Feinstaubbelastung am Stuttgarter Neckartor. Die daraufhin entwickelten Filtersäulen wurden ab November 2018 installiert und in Betrieb genommen (Phase I). Die volle Anlagenkapazität war ab 18.12.2018 verfügbar. Über den Jahreswechsel bis in den Januar hinein lag die Feinstaubbelastung aufgrund extrem regnerischer Wetterbedingungen derart niedrig, dass keine Wirkungsuntersuchungen möglich waren. Geeignete Bedingungen lagen erst ab Mitte Januar vor, sodass mit Messungen begonnen werden konnte.



Abbildung 2.1 – Ablauf der Projektphase I

Durch das Inkrafttreten des Fahrverbots für Euro IV-Diesel-Fahrzeuge im Stuttgarter Stadtgebiet (1.1.2019) verschob sich der öffentliche Fokus auf die NO₂-Konzentration am Stuttgarter Neckartor. Nachdem die Wirksamkeit der reinen Feinstaubfilteranlagen bereits im ersten Quartal 2019 hinreichend nachgewiesen werden konnte (siehe hierzu Abschnitt 6.1.1), wurde die Umrüstung der Filteranlagen auf speziell dafür entwickelte Aktivkohle-Kombi-Filterelemente beschlossen.

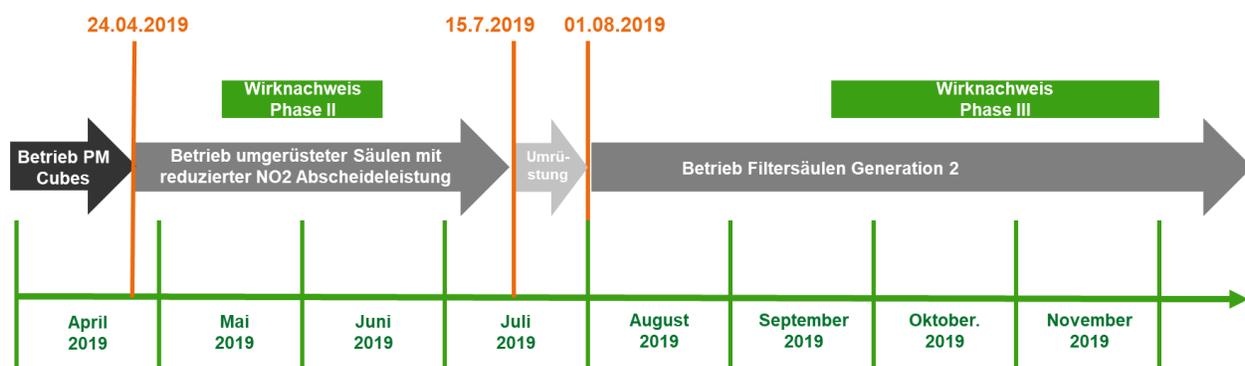


Abbildung 2.2 – Ablauf der Projektphasen II und III

Im Vorfeld der Umrüstung durchgeführte Modellrechnungen zeigten die Notwendigkeit auf, zur Erreichung der gewünschten NO₂-Minderung die Förderleistung der Anlagen zu erhöhen und die Filterelemente größer zu dimensionieren (vgl. Abschnitt 4.1.2). Als Konsequenz mussten die Filteranlagen selbst und deren Standorte für die Optimierung der NO₂-Reduktion vollständig überarbeitet werden. Bevor jedoch diese umfangreichen baulichen Tätigkeiten umgesetzt wurden, erfolgte im April 2019 zunächst übergangsweise die Umrüstung der bestehenden

Filteranlagen auf das neue Kombi-Filtermedium (Phase II), um die grundsätzliche Machbarkeit einer NO_2 -Minderung mit dieser zuvor noch nicht im Freiluftbereich angewandten Technologie experimentell zu überprüfen. Parallel wurde von MANN+HUMMEL die Weiterentwicklung entsprechend leistungstärkerer Filtersäulen gestartet. Nach positivem Abschluss dieser Versuchsaktivitäten (s. Abschnitt 6.1.2) wurde die zweite Generation der Filtersäulen mit gesteigerter Filtrationsleistung im August 2019 installiert (Phase III) und Wirkungsuntersuchungen durchgeführt (Abschnitt 6.1.3).

In den folgenden Abschnitten 2.1 bis 2.3 werden die drei Projektphasen, sowie der Fokus und die Zielsetzung der Wirkungsuntersuchungen beschrieben. Auf die technischen Daten der Generationen 1 und 2 wird in Abschnitt 3 eingegangen.

2.1 Phase I: Senkung der Feinstaubbelastung (PM10)

Vor der baulichen Umsetzung wurde das Minderungspotential durch ein unabhängiges Simulationsbüro (Ingenieurbüro Rau, Heilbronn) untersucht und eine zielführende Anlagenanordnung zur Optimierung des Leistungsniveaus ermittelt. Dabei wurden Stadttopographie, Meteorologie, Hintergrundbelastung, lokale Quellen (insb. Verkehr) sowie die installierte Filterleistung berücksichtigt. Abschnitt 4.3 zeigt die in diesen Simulationen prognostizierten Minderungspotenziale für Feinstaub (PM10) unter ortstypischen meteorologischen Bedingungen. Ziel der ersten Projektphase war es, die vorab mittels Simulationen prognostizierte Minderungswirkung bezogen auf Partikel der Größe PM10 von 10-15% an der Messstation „Am Neckartor“ (vgl. Abschnitt 4.3.3) messtechnisch nachzuweisen. Neben der prozentualen Minderungswirkung galt es auch zu bestätigen, dass durch die Installation der Feinstaubfilteranlagen dazu beigetragen wird, die Zahl der Feinstaub-Überschreitungstage (Tage mit mittleren PM10-Konzentrationen $>50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) unter die gesetzlich zulässige Anzahl von 35 Tagen pro Jahr zu senken. Dieser Wirknachweis erfolgte auf Basis einer erarbeiteten Versuchsmethodik, die im Detail in Abschnitt 5.1 beschrieben wird.

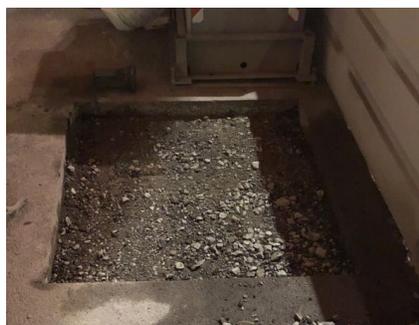
2.1.1 Bautechnische Realisierung

Die bautechnische Realisierung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Stadt Stuttgart, dem Verkehrsministerium Baden-Württemberg und dem Tiefbauamt der Stadt Stuttgart. In die Standortauswahl der Filter Cubes flossen neben den Erkenntnissen aus den Simulationen auch die notwendigen baurechtlichen und (Verkehrs-)Sicherheitstechnischen Vorgaben ein.

Für die Aufstellung eines Filter Cube im öffentlich zugänglichen Raum ist die Errichtung eines Tragefundaments erforderlich. Das Fundament wurde zuvor von einem Tragwerksplaner berechnet und ausgelegt. Es kommen sowohl Aufsetzfundamente wie auch versenkte Fundamente zum Einsatz. Abbildung 2.3 zeigt die unterschiedlichen Randbedingungen und Umsetzung für die sichere Installation der Fundamente.



Gepflasterter Gehweg



Asphaltierter Gehweg



Unbefestigter Untergrund

Abbildung 2.3 - Randbedingungen der Fundamentsetzung



Abbildung 2.4 - Einbringung der Fundamente



Abbildung 2.5 - Sicht auf den westlichen Teil des Pilotprojektes nach Aufstellung der Filter Cubes (Generation 1)

2.1.2 Anlagenanordnung am Neckartor

Gemäß der durch Simulationsergebnisse unterstützten Auslegung wurden im November 2018 insgesamt 17 Filter Cube III an dem betreffenden Straßenabschnitt installiert. Abbildung 2.5 zeigt den Bereich vor dem Stuttgarter Amtsgericht mit Blickrichtung stadteinwärts nach der Installation. Abbildung 2.6 bietet eine Gesamtübersicht über die im Pilotprojekt in Phase I umgesetzten Standorte der 17 Filter Cubes.



Abbildung 2.6 – Anordnung der Filter Cubes der Generation 1 im Rahmen der Projektphase I und II

2.2 Phase II: Funktionserweiterung der Anlagen (NO₂-Reduktion)

Die Weiterentwicklung des Funktionsumfangs der Filter Cubes wurde in zwei Stufen realisiert. In Projektphase II konnten erste Prototypen speziell entwickelter Kombi-Filtermedien eingesetzt werden, um zusätzlich die NO₂-Konzentration am Stuttgarter Neckartor zu senken. Der Austausch der Filterelemente und die damit verbundene Funktionserweiterung erfolgte im April 2019. Um die Minderungswirkung bereits in Phase II zu maximieren wurden die Leistungsreserven der Filter Cubes der Generation 1 ausgenutzt. Der Volumenstrom konnte so um 26% erhöht werden. Die finale Leistungserweiterung folgte später mit dem Einsatz der Generation 2 in Phase III. Die Wirkungsuntersuchung in Phase II zielte darauf ab, eine erste messtechnisch bestätigte Wirksamkeit abseits theoretischer Betrachtungen zur NO₂-Reduktion im Feld aufzuzeigen (Abschnitt 6.1.2).

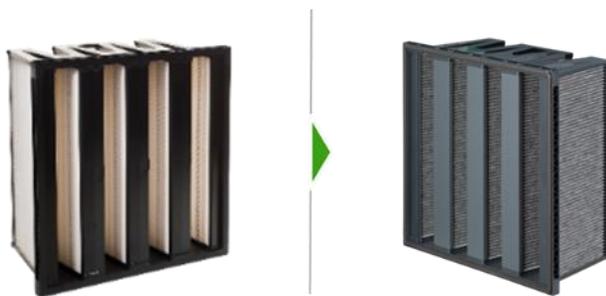


Abbildung 2.7 – Umrüstung der Filter Cubes mit Kombi-Filterelementen (links)

2.3 Phase III: Finale Ausbaustufe der Anlagenkapazität mit Fokus NO₂

In der letzten Phase des Pilotprojektes wurden die bestehenden Filter Cubes der Generation 1 gegen die leistungsstärkere Generation 2 ausgetauscht. Zusätzlich wurden sechs weitere Filter Cubes aufgestellt. Diese sind in Abbildung 2.8 farblich hervorgehoben.



Abbildung 2.8 – Anordnung der Filter Cubes der Generation 2 im Rahmen der Projektphase III (grün: neue Standorte)



Abbildung 2.9 – Sicht auf den östlichen Teil des Pilotprojektes nach Aufstellung der Filter Cubes (Generation 2)

Die finale Ausbaustufe der Installation umfasste damit 22 Filter Cube III und einen Filter Cube II. Der gesteigerte Luftdurchsatz war nötig, um gemäß der Auslegung die erforderliche Schadstoffminderung zu erreichen. Ziel dieser Phase war es, die in der simulationsbasierten Prognose (vgl. Abschnitt 4.4) bestimmte Minderungswirkung von 8.5% im Bereich der LUBW-Messstation und >10% im gebäudenahen Bereich nachzuweisen.

Die bautechnische Erweiterung gegenüber Phase I erfolgte erneut in enger Zusammenarbeit mit der Stadt Stuttgart, dem Verkehrsministerium Baden-Württemberg und dem Tiefbauamt der Stadt Stuttgart. In die Standortauswahl der sechs zusätzlichen Filter Cubes flossen auch hier neben den Erkenntnissen aus den Simulationen die notwendigen baurechtlichen und (Verkehrs-)Sicherheitstechnischen Vorgaben ein. Die Standorte der Phasen I und II blieben erhalten und die bestehenden Fundamente wurden weiter verwendet. Für die sechs zusätzlichen Filter Cubes wurden entsprechend neue Fundamente erstellt sowie die gesamte elektrische Infrastruktur auf die leistungsfähigeren Filter Cubes angepasst (400 VAC statt 230 VAC in Phase I, siehe dazu auch die Leistungsdaten in Abschnitt 3).

3 Technische Beschreibung der Anlagen

Abbildung 3.1 zeigt den modularen Aufbau der Anlagen vom Typ Filter Cube. Jede würfelförmige Einheit „Cube“ besitzt die gleiche Funktion, sodass je nach erforderlicher Leistung, aber auch abhängig von den räumlichen Gegebenheiten, die unterschiedlichen Varianten eingesetzt werden können. Die verschmutzte Außenluft wird mit Hilfe eines Gebläses durch eine Filtereinheit gesaugt und dabei von Partikeln und, je nach Ausführung des Filterelementes, von gasförmigen Schadstoffen gereinigt. Die Ausblasseite befindet sich gegenüber der Ansaugseite. Die Säule ist bevorzugt so zu positionieren, dass die Ansaugseite der verunreinigten Umgebung (Straße) zugewandt ist.

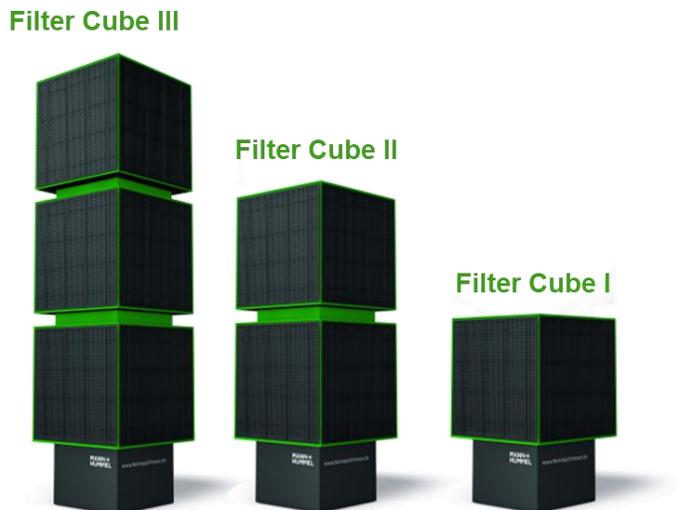


Abbildung 3.1 – Modulares Design der Filter Cubes

3.1 Filter Cube – Generation 1 (Fokus: Feinstaubminderung)

Wie bereits in Abschnitt 2 näher beschrieben wurde, kommen in Phase I des Pilotprojektes 17 Filter Cube III zum Einsatz. Die Standorte im Projekt veranschaulicht Abbildung 2.6.

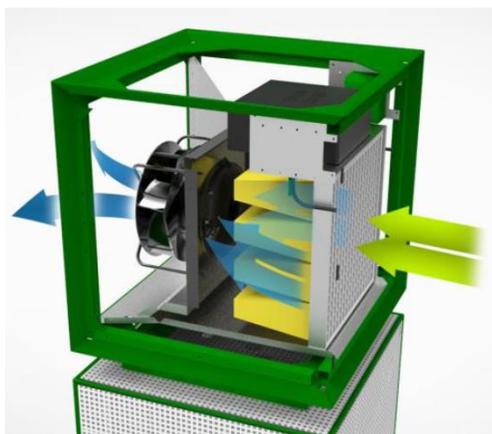


Abbildung 3.2 – Aufbau und Funktion eines Cubes der Generation 1

Im Sockel befindet sich die Leistungselektronik, die für den Betrieb der Anlage notwendig ist. Die Steuerungseinheit befindet sich im mittleren der drei Cubes. Die Anlage verfügt über eine Cloud-Anbindung und kann so über interne wie auch externe Sensoren und Steuergrößen bedarfsgerecht betrieben werden. Somit kann ein

möglichst energieeffizienter Betrieb erreicht werden. Die Daten aller Anlagen werden über die Cloud-Anbindung protokolliert, weiterverarbeitet und ausgewertet.

MANN+HUMMEL verfügt über das technische Wissen, Filtermedien und Elemente simulationsgestützt zur höchsten Leistungsfähigkeit hin zu entwickeln und diese dann für den konkreten Anwendungsfall einzusetzen. Die Filterelemente sind so ausgelegt, dass eine maximale Staubabscheidung und Staubkapazität bei möglichst geringer Druckdifferenz erreicht wird und somit ein sehr niedriger Energieeinsatz über die gesamte Dauer eines Serviceintervalls ermöglicht wird. Die Filterelemente müssen in der Regel zweimal im Jahr getauscht werden. Bei besonders hohen mittleren Partikelbelastungen ($\gg 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sollte das Intervall verkürzt werden. In Phase II des Pilotprojektes wurde das reine Partikelfiltermedium in dem verwendeten Filterelement durch ein Aktivkohle-Kombi-Filtermedium ersetzt (vgl. Abbildung 2.7).

Die Leistungsdaten des Filter Cube der Generation 1 zeigt Tabelle 3.1, weitere technische Daten sind Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Tabelle 3.1 – Leistungsdaten Filter Cube Generation 1

Luftvolumenstrom (Betriebspunkt)	3400 m ³ /h
Nennspannung Gebläse	230 VAC
Elektrische Leistung (Betriebspunkt/Max.)	ca. 300/500 W
Gewicht Cube	ca. 300 kg
Gewicht einer Säule (Filter Cube III)	ca. 1.000 kg

Tabelle 3.2 – Weitere Technischen Daten zum Feinstaubfilterelement

Einsatzgrenzen	
Dauer-Betriebstemperaturen	<75°C
Empfohlene / maximale Enddruckdifferenz	450 Pa / 800 Pa
Zulässige relative Luftfeuchte	< 100%
Filtermaterial	
Glasfaser	
Abscheideleistung gemäß ISO 16890	
ePM ₁₀	>87%
ePM _{2,5}	>62%

3.2 Filter Cube – Generation 2 (Feinstaub – und NO₂-Minderung)

Durch die Weiterentwicklung der Systeme kann mit der Generation 2 der Filter Cubes neben Feinstaub auch NO₂ aus der Umgebung abgeschieden werden. Diese Generation kommt ab Phase III des Projektes zum Einsatz. Konstruktive Weiterentwicklungen innerhalb der Cubes ermöglichen die Erhöhung des Betriebsvolumenstroms eines Cubes von 3400 m³/h auf 4833 m³/h. Zugleich lässt sich mit den Änderungen eine ausreichende Standzeit der Kombi-Filterelemente gewährleisten. Darüber hinaus werden dank des Verzichts auf einen Kunststoffrahmen (durch eine integrierte Aufnahme der Filterpanels direkt im Cube) wertvolle Ressourcen geschont (Abbildung 3.3). Die Modularität der Filter Cubes bleibt dabei weiter erhalten. Neben der Leistungselektronik befindet sich nun jedoch auch die Steuerungseinheit im Sockel, da der komplette Bauraum innerhalb eines Cubes für die Filtration eingesetzt wird.



Abbildung 3.3 - Verwendung von mehreren Filter Panels je Cube ohne Kunststoffrahmen (links) zur Ressourcenschonung (ab Generation 2); Service-Zugang (rechts)



Abbildung 3.5 - Aufbau und Funktion der Filter Cubes (Generation 2)

Die Funktion der NO_2 -Abscheidung übernimmt bei dem speziell für diese Anwendung entwickelten und in Deutschland produzierten Filtermedium eine Aktivkohleschicht. Die Auswahl der idealen Aktivkohle, die Auslegung der Schichtdicke sowie der Filtrationslage zur Abscheidung der Feinstaubpartikel sind Kernkompetenzen von MANN+HUMMEL. Das sogenannte Kombi-Filtermedium ist in der Lage, sowohl die Feinstaub- als auch die NO_2 -Konzentration unter Außenluftbedingungen entscheidend zu verringern und dabei eine maximale Standzeit zu ermöglichen. In Abbildung 3.6 ist der Aufbau des solchen Filtermediums schematisch dargestellt.

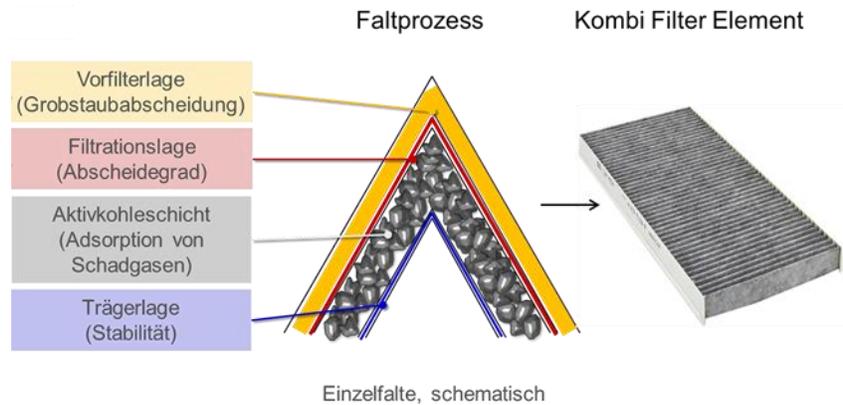


Abbildung 3.6 – Filtermedien-Struktur von Aktivkohlemedien

Die Leistungsdaten des Filter Cube der Generation 2 zeigt Tabelle 3.3, weitere technische Daten sind Tabelle 3.4 zu entnehmen.

Tabelle 1.3 – Leistungsdaten Filter Cube Generation 1

Luftvolumenstrom (Betriebspunkt)	4833 m ³ /h
Nennspannung Gebläse	400 VAC
Elektrische Leistung (Betriebspunkt/Max.)	ca. 500/950 W
Gewicht Cube	ca. 300 kg
Gewicht einer Säule (Filter Cube III)	ca. 1.000 kg

Tabelle 3.4 – Weitere Technischen Daten zum Kombi-Filterelement

Einsatzgrenzen	
Dauer-Betriebstemperaturen	-40°C bis +80 °C
Empfohlene / maximale Enddruckdifferenz	+50 Pa / +200 Pa
Zulässige relative Luftfeuchte	empfohlen 65% LF; max. 95% LF
Abscheideleistung	
NO ₂	80% (mittlere Abscheidung gem. Auslegung)
PM ₁₀	80%
PM _{2,5}	50%

Es wird davon ausgegangen, dass die Kombi-Filterelemente während des Pilotprojekts etwa alle 30 Tage getauscht werden müssen, um eine mittlere NO₂-Abscheideeffizienz von 80% zu erreichen. Im Neuzustand liegt der Wert bei >90% und nimmt mit zunehmender Beladung ab. Für die Auslegung sowie die Simulationen wurden 80% mittlere Abscheideeffizienz zugrunde gelegt.

Meteorologische Daten, sowie Daten zur Luftqualität können u.a. zur Regelung und bedarfsgerechten Steuerung des Systems herangezogen werden. Hierdurch kann der Energiebedarf minimiert werden. Siehe hierzu auch Abschnitt 6.4. Die Daten aller Säulen werden über eine Cloud-Anbindung weiterverarbeitet, gespeichert und ausgewertet.

4 Prognose der Schadstoffreduzierung

In einem ersten Schritt wurden zunächst grundsätzliche Überlegungen zum Wirkungspotential von Filteranlagen im offenen Straßenraum angestellt. Ziel war es hier, eine erste Größenordnung des Minderungspotentials und eine Grundausslegung des Projektes abzuschätzen (Abschnitt 4.1). Über weiterführende Simulationen sollte diese Vorhersage verfeinert werden. Die simulativen Vorhersagen galt es dann messtechnisch zu bestätigen (Kapitel 6).

MANN+HUMMEL hat eine umfassende Kompetenz auf dem Gebiet der computergestützten Strömungs- und Partikelsimulation. Die Erfahrungen wurden auch im Bereich der Entwicklung der Filter Cubes sowie der Auslegung für das Pilotprojekt genutzt. Die hierüber gewonnenen Produkt- und Auslegungsdaten wurden an ein unabhängiges Gutachterbüro – das Ingenieurbüro Rau (Heilbronn) – gegeben, mit dem Ziel, das Potential der Filter Cubes zur Reduzierung der Schadstoffbelastung am Neckartor zu ermitteln. Das Ingenieurbüro Rau unterstützt in seiner gutachterlichen Tätigkeit seit ca. 30 Jahren Behörden, Gerichte und Firmen bei Fragen zur Luftreinhaltung und des Stadtklimas. Besondere Erfahrungen bestehen in der numerischen und physikalischen mikroskaligen Modellierung. Im Rahmen der numerischen Modellierung kommt unter anderem das Modell „MISKAM“ (prognostisches mikroskaliges Strömungs- und Ausbreitungsmodell) zum Einsatz.

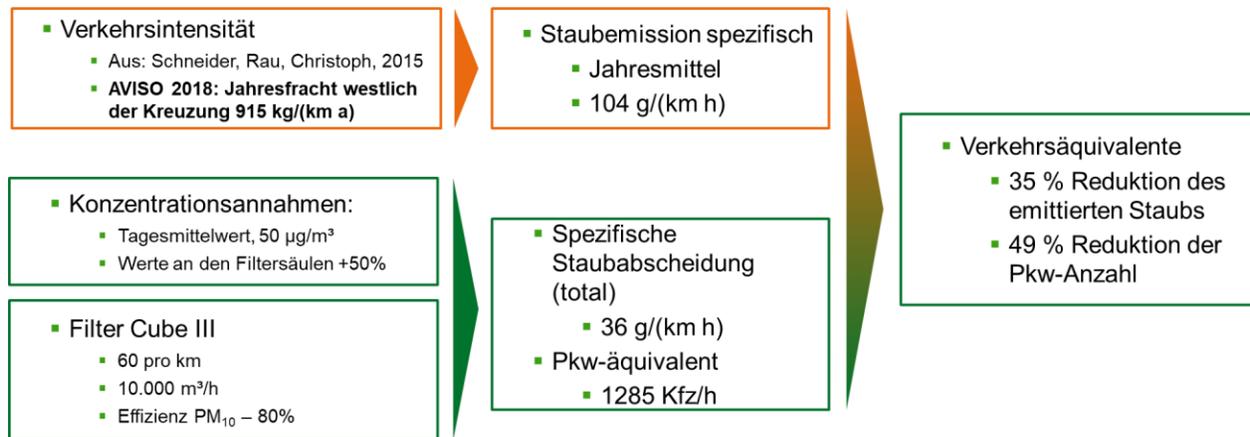
Grundlage der Emissionsberechnung ist das „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs - HBEFA“ in der Version 3.3 (HBEFA, 2017). Die dort bereitgestellten Emissionsfaktoren geben an, welche Schadstoffmengen pro Fahrzeug und zurückgelegter Wegstrecke freigesetzt werden. Im vorliegenden Fall wurden die Emissionsfaktoren für die Fahrzeugkategorien Pkw, leichte Nfz und schwere Nfz herangezogen. Bei der Emissionsbestimmung werden zusätzlich die Vorgaben der VDI-Richtlinie 3782, Blatt 7 (Kfz-Emissionsbestimmung) berücksichtigt. Die Emissionsfaktoren für NO_x und NO₂ sind ausschließlich „motorbedingt“.

4.1 Betrachtung der Minderungswirkung über Massenbilanzen

Eine vergleichsweise schnelle Möglichkeit, die Wirksamkeit der Filter Cubes abzuschätzen ist eine bilanzielle Betrachtung der Belastungssituation durch eine Berücksichtigung der Quellen und Senken im Bilanzgebiet, hier also der Bereich des Straßenabschnitts „Am Neckartor“ im Bereich der LUBW-Messstelle. Im Folgenden wird zunächst die Bilanz für die Phase I (PM₁₀-Minderung) und anschließend für die Phase III (NO₂-Minderung) betrachtet.

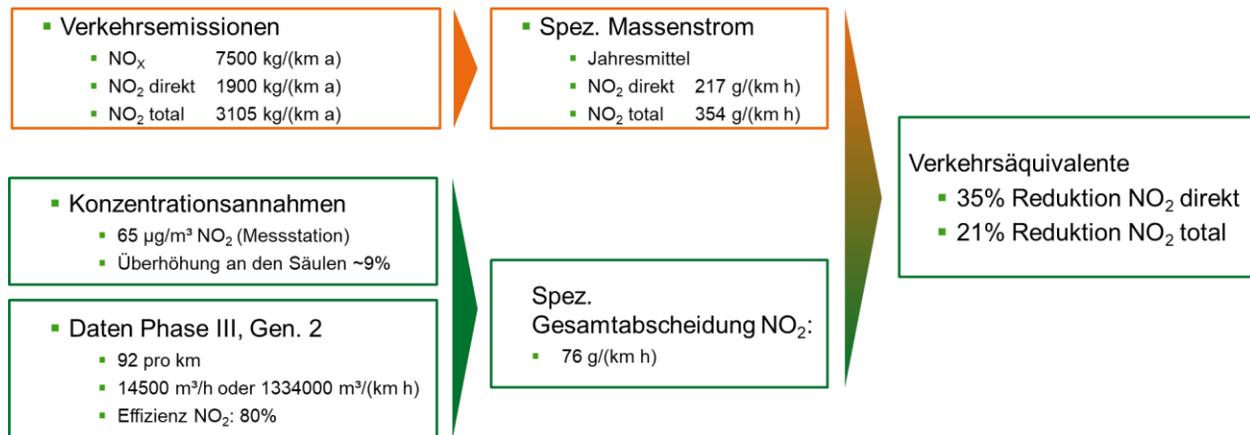
4.1.1 PM₁₀-Minderung für Phase I

Für die Abschätzung der PM₁₀-Minderungswirkung wird zunächst die Quelle, also der verkehrsbedingte Anteil der PM₁₀-Konzentration ermittelt. Aus den Verkehrsdaten sowie den Emissionsfaktoren für die einzelnen Fahrzeugklassen (HBEFA, 2017) ergibt sich für den Straßenabschnitt des Pilotprojekts ein Wert von 104 g/(km h). Dem gegenüber stehen die Filtersäulen als PM₁₀-Senke. Zur Ermittlung der durch die Filter Cubes abgeschiedenen Masse wird in dieser Betrachtung der zulässige Grenzwert für PM₁₀ von 50 µg/m³ (Tagesmittel an der Position der Messstation) angenommen. Aufgrund der Nähe der Filter Cubes zur Quelle (Straße) wird für die PM₁₀-Rohgaskonzentration ein um den Faktor 1.5 erhöhter Wert angenommen. Die Simulationsergebnisse (vgl. Abschnitt 4.3) bestätigen diese Annahme. Bei einer Anzahl an Filter Cubes von 60 je Kilometer (entspricht etwa der Umsetzung im Projekt von 17 Filtersäulen in Phase I) und einer Abscheideeffizienz von 80% bei einem Durchsatz von 10.000 m³/h je Filter Cube III ergibt sich eine Minderung der verkehrsbedingten Feinstaubemission von ca. 35%. Überträgt man die Feinstaubmenge rein auf Pkw-Emissionen entspricht die Minderung 49% der Pkw.

Abbildung 4.1 – Schematische Darstellung der Bilanzbetrachtung für PM₁₀ am Neckartor

4.1.2 NO₂-Minderung für Phase III

Ähnlich wie bei der Bilanzierung der PM₁₀-Minderung lässt sich die Abschätzung auch für die NO₂-Reduktion durchführen. Aufgrund der komplexen chemischen Prozesse in der Atmosphärenchemie, insbesondere durch die Gleichgewichtsreaktion von Stickstoffmonoxid (NO) mit Ozon (O₃) zu NO₂, ist die Betrachtung hier jedoch aufwändiger. Es muss somit zwischen direkter Fahrzeugemission, also der direkt am Auspuffrohr emittierten NO₂-Masse, und der durch die Umwandlungsprozesse im Straßenraum vorliegenden verkehrsbedingten Zusatzbelastung (NO₂ total) unterschieden werden. Unter der Annahme der Verkehrsdaten von 2019 ergeben sich über die Emissionsfaktoren für NO_x, NO₂ und NO (HBEFA, 2017) die Quellwerte für die Bilanzierung. Dem gegenüber steht die Senke für NO₂ durch die Filter Cubes. Mit einer Erhöhung der Säulenzahl am Neckartor von 17 auf 23 (entspricht etwa 92 Säulen je Kilometer), einer Erhöhung des Volumenstroms auf 14.500 m³/h sowie einer Abscheideleistung von 80% ergibt sich eine Reduktion der NO₂-Belastung bezogen auf die Verkehrsquelle von 35% (direkt) bzw. 21% (total).

Abbildung 4.2 – Schematische Darstellung der Bilanzbetrachtung für NO₂

In dieser Bilanzierung wird die mittlere Konzentration an den Säulen verwendet, wie sie sich aus der Simulation ergeben. Diese unterscheidet sich deutlich weniger von der Konzentration an der Messstelle (+9%) als dies bei der PM₁₀-Konzentration der Fall war. Die Ursache liegt in den unterschiedlichen Ausbreitungsvorgängen sowie den zusätzlichen Säulenstandorten begründet. Die verkehrsäquivalente Reduktion wird umso höher, je größer die Konzentration an den Säulen ist, je näher also die Filtersäulen an der Zusatzquelle „Verkehr“ positioniert werden können.

4.2 Das Modellsystem MISKAM

MISKAM wurde an der Universität Mainz entwickelt und wird sowohl zu Forschungszwecken als auch im Rahmen gutachtlicher Tätigkeit eingesetzt (Eichhorn J., 1989, 2011). MISKAM beruht auf den grundlegenden strömungsmechanischen Grundgleichungen. Das Windgeschwindigkeitsfeld wird durch die numerische Lösung der Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und Energie berechnet. Als Turbulenzmodell wird ein Standard- k,ϵ -Modell eingesetzt. Einzelne Gebäude und Hindernisse können somit explizit in ihrer Form aufgelöst werden. Das Modellsystem MISKAM umfasst ein Windfeldmodell für die kleinräumige Prognose der Windverteilung sowie ein Eulerisches Ausbreitungsmodell zur Berechnung von Schadstoffkonzentrationen in der Umgebung von Einzelgebäuden sowie in Straßen bis hin zu Stadtteilen. MISKAM ist ein Episodenmodell. Es berechnet stationäre dreidimensionale Strömungs- und Ausbreitungsfelder, wie sie sich im dynamischen Gleichgewicht unter den baulichen (Rauigkeits- und Bebauungsstruktur) und meteorologischen Randbedingungen (Anströmprofil) einstellen. In stationäre Berechnungen unter Berücksichtigung zeitabhängiger Randbedingungen wie z.B. Energieflüsse am Boden bzw. an Gebäudehüllen und damit die Simulation thermisch bedingter Windsysteme ohne jeden dynamischen Antrieb sind somit nicht möglich.

Vergleiche mit Messergebnissen aus Windkanälen zeigen, dass die Um- und Überströmung von Gebäuden und Gebäudekomplexen, die Ausbildung von Rückströmzonen sowie der Frontwirbelbereich mit MISKAM realistisch abgebildet werden können (Rau (2000), Röckle et al.(1995)). Daher ist der Einsatz des Modellsystems für gutachterliche Zwecke seit vielen Jahren Stand der Technik.

4.3 MISKAM-Simulationen zur Bestimmung der PM10-Reduzierung

Um die Minderungswirkung der Filter Cubes berechnen zu können ist es zunächst erforderlich, die im Untersuchungsgebiet vorliegende Schadstoffbelastung realistisch im Modell darzustellen. Die Berechnungen mit MISKAM liefern als Ergebnis die durch die Emissionen der Straßen im Untersuchungsgebiet verursachten Immissionszusatzbelastungen. Die Immissionsgesamtbelastung ergibt sich durch Überlagerung der berechneten Zusatzbelastung mit der Hintergrundbelastung. Die Hintergrundbelastung ergibt sich aus den übrigen lokalen (städtischen) und regionalen Emissionsquellen und dem großräumigen Schadstofftransport.

Diese Gesamtschadstoffbelastung im Gebiet ohne Beeinflussung durch die Filter Cubes bildet den sogenannten Nullfall. Zur Bestimmung dieses Nullfalles wurden die im Folgenden dargestellten Randbedingungen und Modellannahmen getroffen.

4.3.1 Modell-Randbedingungen

Als repräsentative, häufig auftretende und für hohe PM10-Belastungen kritische Windsituation (schwach, austauscharm) wurde die straßenparallele Anströmung (222° , südwestliche Windrichtung; 1 m/s 10 m über Grund) für eine simulative Betrachtung gewählt. Als Basisfall für die verkehrsinduzierte PM10-Quelle dienten die durchschnittlichen täglichen Verkehrszahlen des Jahres 2018 (DTV, fahrspurfein aufgelöst). Die Hintergrundbelastung wurde derart gewählt, dass an der Messstation gerade der Grenzwert für die tagesmittlere Belastung ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) erreicht wird und ergab sich so zu $39.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.3.2 Modellumsetzung und -grenzen

Für die Modellumsetzung müssen einige vereinfachende Annahmen getroffen werden. Daher stellt diese Modellierung eine Näherung dar. Seitens der Meteorologie und Schadstoffbelastung variieren Windrichtung und -geschwindigkeit über den Tag. Die Hintergrundbelastung wie auch die Zusatzbelastung durch den Verkehr variieren ebenfalls über den Tag. Auch auf der technischen Seite sind Modellannahmen erforderlich. So kann in MISKAM die halbseitige Ansaugung der Filteranlagen sowie das gerichtete Einblasen des gereinigten Luftstroms in den Straßenraum bezüglich seiner Dynamik nicht exakt wiedergegeben werden, wie dies über eine klassische CFD Simulation möglich wäre. Die Dynamik und eine entsprechende „Wurfweite“ der gereinigten Straßenluft kann somit nicht abgebildet werden. Ersatzweise wird daher im Modell in die ausströmseitigen Rechenzellen eine Quelle mit gereinigter Luft gesetzt. Der Betrag der Quelle und die daraus resultierende Einmischung gereinigter

Luft entspricht dem Auslegungs-Volumenstrom des Filter Cubes der entsprechenden Generation. Die weitere Ausbreitung der sauberen Luft ist darüber hinaus rein meteorologisch bedingt. Die windbedingte Anströmung der Filter Cubes stellt eine klassische (rechteckige) Zylinderumströmung dar. Je nach Windrichtung und -stärke bilden sich Überdruck und Unterdruckzonen aus, die prinzipiell Auswirkungen auf den geförderten Volumenstrom und damit Wirksamkeit haben können. Der Einfluss wird real jedoch als gering bewertet und der Volumenstrom konstant angenommen. Zudem haben die Fahrzeuge im Straßenraum eine Auswirkung auf Winddruck und Turbulenz (und damit auf die Ausbreitung der gereinigten Luft), dies kann modelltechnisch allerdings nicht detailliert abgebildet werden.

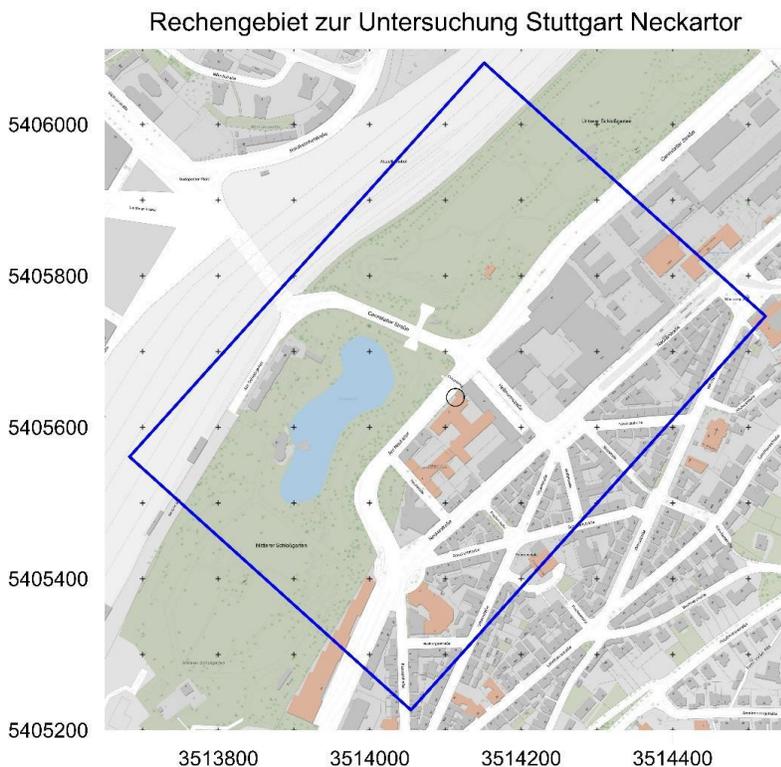


Abbildung 4.3 - Darstellung des Modellgebietes für die Simulation

Abbildung 4.3 zeigt die Größe ($630 \times 530 \text{ m}^2$) des Simulationsgebietes. Dieses basiert auf Katasterplänen und 3D-Gebäudemodellen. Dies sind dreidimensionale digitale Modelle von Gebäuden, die gemeinsam mit einem digitalen Geländemodell zur Beschreibung der Erdoberfläche dienen. Als Level of Detail (LoD) werden verschiedene Detailstufen bei der Darstellung bezeichnet. Für die Simulationen wurde der Detaillierungsgrad LoD1 verwendet. Im relevanten Kerngebiet wird für das Strömungsberechnungsgitter eine Auflösung von $1 \times 1 \text{ m}^2$ in der Fläche und 0.4 bis 3.2 m in der Vertikalen verwendet.

4.3.3 Simulationsbasierte Minderungswirkung für PM10

Die 17 Filter Cubes in der Projektphase I hatten eine Absaugleistung von je $10.000 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer Höhe von 3.6 m. Die Standfläche beträgt mit $1.0 \times 1.0 \text{ m}^2$ genau der Auflösung einer Rechenzelle. In der Simulation wurde der Abscheidegrad für vereinfacht PM10 zu 100% angenommen. Die Filterelemente haben gemäß ISO 16890 einen Abscheidegrad von $>87\%$, wobei dieser Wert durch die Beladung weiter ansteigt. Grundsätzlich lässt sich mit den Filter Cubes gemäß der im Pilotprojekt in Phase I umgesetzten Anordnung und Leistungsfähigkeit die Schadstoffbelastung PM10 im Nahbereich der Säulen senken. Stärkere Schadstoffabsenkungen vor den Gebäuden werden durch eine entsprechend höhere Säulendichte erreicht. Bei ungeeigneter Positionierung kann aufgrund gegenseitiger Beeinflussung die Wirkung der einzelnen Säulen geringer ausfallen als in dieser Abschätzung.

4.4.1 Meteorologie

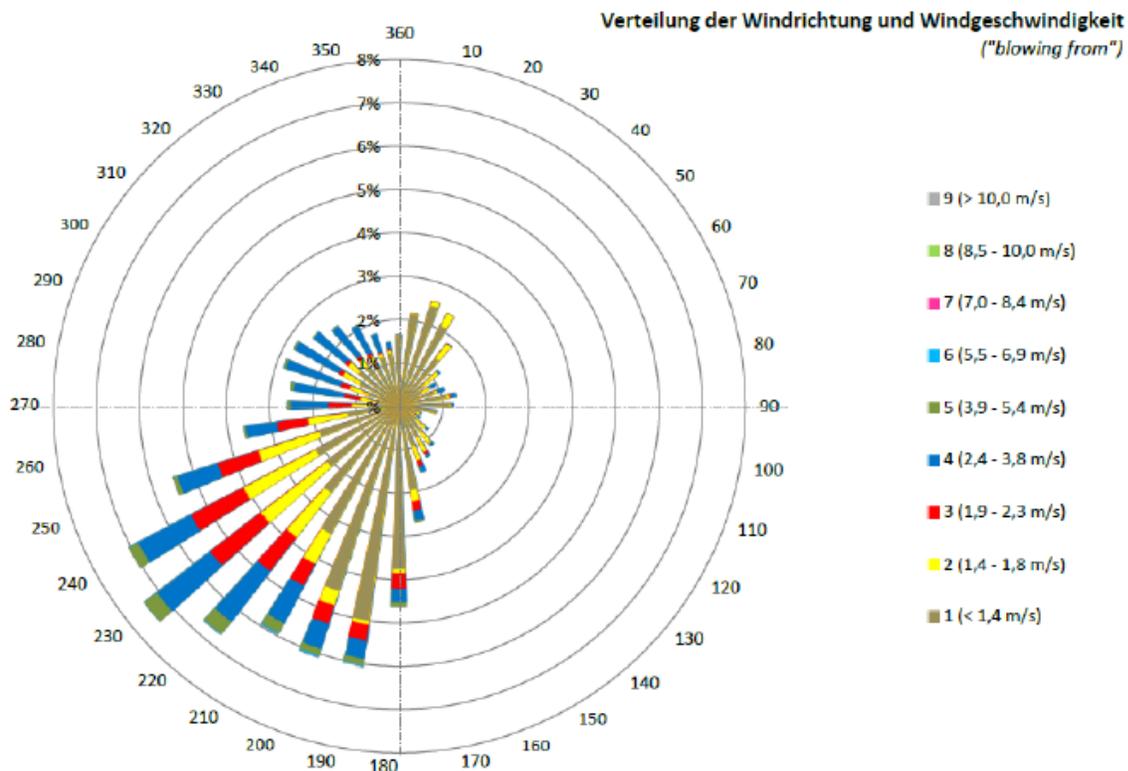
Für die Bestimmung statistischer Kenngrößen für die zu untersuchenden Luftschadstoffe NO_x und NO_2 werden für das Untersuchungsgebiet repräsentative meteorologische Daten benötigt, die entweder in Form einer Ausbreitungsklassenstatistik oder Ausbreitungsklassenzeitreihe vorliegen. Für die Untersuchung innerhalb innerstädtischer Bebauung ist es Standard, mit einer 2-dimensionalen Windverteilung (Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitshäufigkeit) und neutraler Schichtung zu arbeiten, da die Gebäudeturbulenz kleinräumig thermische Effekte dominiert.

Die Jahresmittelwerte werden durch Gewichtung der für jede Anströmrichtung und Windgeschwindigkeitsklasse bestimmten Immissionskonzentrationsfelder gemäß der prozentualen Häufigkeit der entsprechenden Ausbreitungssituation bestimmt. Letztere sind in der Windstatistik durch Angabe der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit enthalten.

Als repräsentativ für das Untersuchungsgebiet werden die synthetischen Winddaten der Fa. metSoft eingestuft. Bei den synthetischen Winddaten handelt es sich um berechnete Ausbreitungsklassenstatistiken, die in einem Raster von $500 \times 500 \text{ m}^2$ für ganz Deutschland vorliegen und von der Arbeitsgemeinschaft IB Rau / METCON erstellt wurden. In Abbildung 4.5 ist die Windrose für die Bezugsjahre 2001 - 2010 dargestellt. Die Windrosenverteilung zeigt die Häufigkeit der Windrichtungen in 10° -Schritten sowie die Geschwindigkeitsklassen nach TA Luft. Das Windrichtungsmaximum liegt bei Winden aus Westsüdwest. Die jahresmittlere Windgeschwindigkeit liegt bei 1.0 m/s in 10m über Grund.

4.4.2 Bestimmung der Gesamtbelastung für NO_2

Für die Hintergrundbelastung wurde die zum Untersuchungszeitpunkt verfügbare Prognose für das Jahr 2019 herangezogen (Schneider et al. 2018). Dieser lag im Bereich des Neckartors für NO_2 bei $31.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, für NO bei $15.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei einem Ozonwert von $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Zusatzbelastung durch den Verkehr in dem betrachteten Abschnitt von ca. 300 m Länge wurde mit einer mittleren Emissionsrate von 258 g/h für NO_x und 66 g/h direkter NO_2 -Emission angesetzt (Schneider et al. 2018). An der LUBW-Messstation ergibt sich mit diesen Werten in der Simulation eine Konzentration von $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Version: **SYNTHETISCH_2.05bc0** JAHR [Bezug: **01.01.2001-31.12.2010**]

Koordinaten: **3_GK DHDN/PD RW 3514504 HW 5405494**

Abbildung 4.5 - Windstatistik, über Dach-Niveau (Quelle: SynAKS der Fa. MetSoft für den Standort Neckartor)

4.4.3 Jahresmittelwerte

Mit den charakteristischen Werten für die Hintergrundbelastung wurden durch Überlagerung mit den berechneten Zusatzbelastungswerten die statistischen Kenngrößen (Jahresmittelwerte für NO_2) berechnet. Bei der Überlagerung der Hintergrundbelastungswerte mit den Zusatzbelastungswerten muss bei Stickoxiden die NO - NO_2 -Konversion berücksichtigt werden. Die chemische Umwandlung von NO_x nach NO_2 ist äußerst komplex und von einer Reihe von Parametern wie z.B. UV-Strahlung, Ozonwert, Temperatur abhängig. Für die vorliegende Untersuchung wird nach Stand der Technik für die Umwandlung der empirische Modellansatz nach Düring (Düring et al., 2011) angewandt, der den NO - NO_2 -Umwandlungsgrad als Funktion der NO_x -Gesamtimmission und der O_3 -Hintergrundkonzentration beschreibt. Hierzu wurden die oben genannten Hintergrundwerte für NO_2 , NO und O_3 herangezogen.

4.4.4 Umsetzung der Filtersäulen im Modell

Das mikroskalige prognostische Modell MISKAM kann den komplexen Mechanismus der einseitigen Ansaugung belasteter Luft und das Ausblasen gereinigter Luft auf der gegenüberliegenden Seite der Filtersäule bezüglich seiner Dynamik nicht korrekt wiedergeben. Ebenso kann die Abscheidung von NO_2 in der Filtersäule nicht nachgebildet werden. Aus diesem Grund wurde ein Ersatzsystem definiert, das im Folgenden beschrieben wird.

Die Filtersäulen saugen mit dem vorgegebenen Volumenstrom die NO_2 -Schadstoffkonzentration an, die im Bereich der Ansaugöffnung für eine bestimmte meteorologische Situation in Höhe des jeweiligen Filter Cubes vorliegt. Die NO_2 -Konzentration ergibt sich aus der durch den Verkehr direkt freigesetzten NO_2 -Emission sowie der NO_2 -Hintergrundkonzentration, die zu einem bestimmten Zeitpunkt in erster Näherung als konstanter Wert im Straßenraum definiert wird. Dieser NO_2 -Massenstrom wird zu 80% gereinigt und auf der Abströmseite wieder

freigesetzt. Diese Senke wird als Pseudo-Quelle ins Modell integriert und mit dem im Straßenraum vorherrschenden lokal variierenden Konzentrationsfeld durch Differenzbildung überlagert. Als Ergebnis erhält man somit gegenüber der Ausgangssituation ein räumlich modifiziertes NO₂-Feld. Anschließend wird unter Berücksichtigung des empirischen Ansatzes von Düring die räumliche NO₂-Gesamtbelastung für das Jahresmittel bestimmt. Für die Ozonkonzentration sowie die Hintergrundbelastung werden dabei jahresmittlere Werte angesetzt.

4.4.5 Simulationsbasierte Minderungswirkung für NO₂

Mit stationären NO₂-Säulen ist es möglich, im Nahbereich das Immissionsniveau zu senken (s. Abbildung 4.6). Für den untersuchten Fall auf Basis der meteorologischen Daten eines repräsentativen Jahres sowie bei mittleren Emissionsverhältnissen und einer jahresmittleren NO₂-Hintergrundbelastung bzw. O₃-Konzentration kann die Immissionskonzentration (NO₂-Gesamtbelastung) im Bereich der Messstelle auf 1,5 m ü.G. lokal um bis zu 8,5% gesenkt werden. Räumlich ausgedehnte Minderungen im gebäudenahen Bereich werden durch eine entsprechende Säulendichte erreicht. So liegen die Minderungswerte im westlichen und besonders schützenswerten gebäudenahen Bereich bei 10-15% und im Nahfeld der Säulen bis 30%.

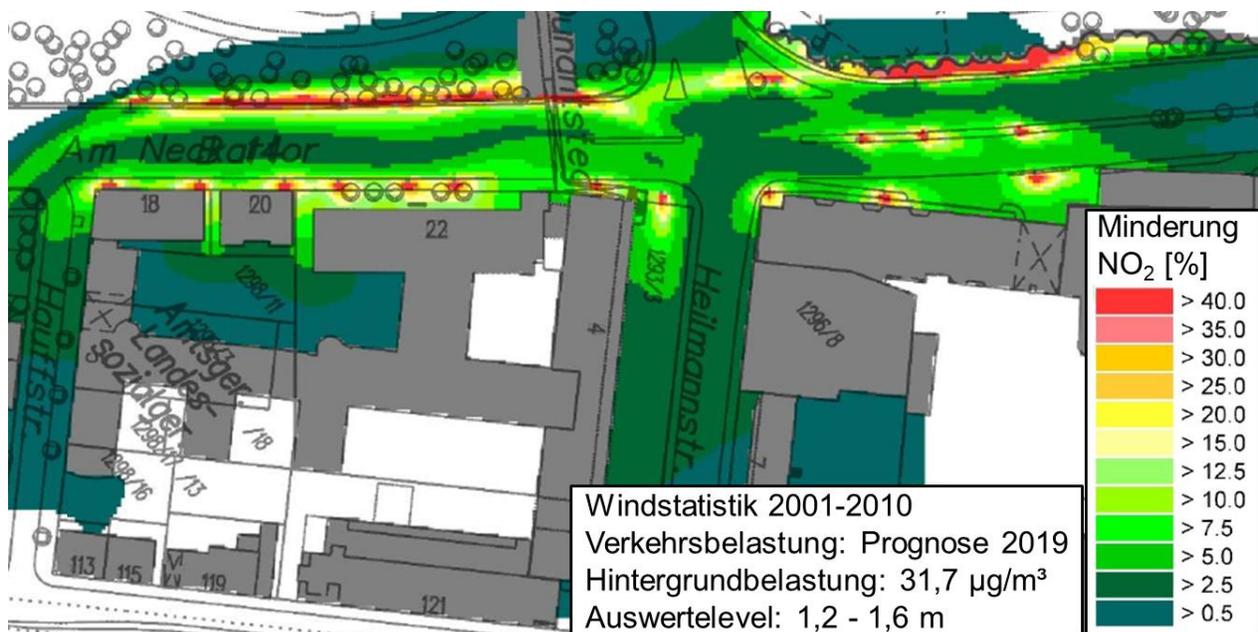


Abbildung 4.6 – Minderungswirkung für eine Anordnung von 23 Filter Cubes mit einem Volumenstrom von 14.500 m³/h je Filter Cube III. Die tatsächlichen Standorte der Säulen wurden im östlichen Bereich der Kreuzung nochmals optimiert, vgl. Abbildung 2.9

Die mittlere NO₂-Abscheideleistung aller 23 Filter Cubes zusammen liegt in der Simulation bei 18,8 g/h. Die mittlere Emissionsrate durch den Verkehr in dem betrachteten Abschnitt von ungefähr 300 m Länge beträgt 258 g/h für NO_x und ca. 66 g/h für die NO₂-Direktemission. Die Filteranlagen sollten demnach 28,5% der Direktemissionen kompensieren. Aufgrund der bereits beschriebenen Modellannahmen stellen die Ergebnisse eine Näherung dar. Für dieses erste Pilotprojekt bedarf die simulative Prognose deshalb einer experimentellen Überprüfung.

5 Versuchsmethodik und Messgeräte

Das gemeinsame Ziel aller im Folgenden geschilderten Maßnahmen ist es, die Änderung der Umgebungskonzentration für PM₁₀ und NO₂ durch den Einsatz der Filtersäulen am Neckartor zu beschreiben. Dabei kommt der Frage der statistischen Belastbarkeit der erzielten Ergebnisse besonderes Augenmerk zu. Das übliche Vorgehen

bei der Bewertung der Wirksamkeit von Luftreinhalungsmaßnahmen ist, nach Maßnahmenbeginn über möglichst lange Zeiträume Messdaten der Schadstoffkonzentration zu erheben und diese dann entweder mit Referenzzeiträumen am selben Standort oder mit gleichzeitig erhobenen Daten an Referenzstandorten zu vergleichen. Im Fall der Filteranlagen am Stuttgarter Neckartor sind insbesondere die historischen Vergleiche nur von geringer Aussagekraft, weil sowohl während des Versuchszeitraums als auch in den Vorjahreszeiträumen etliche Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität implementiert oder erprobt wurden (Tabelle 5.1). Wie in Abschnitt 6.2 gezeigt wird, ist zwar eine deutliche Reduzierung der Schadstoffkonzentrationen im Kalenderjahr 2019 zu erkennen. Den Anteil der Filteranlagen quantitativ zu erfassen ist mittels bloßem Quervergleich allerdings nicht möglich. Deshalb wurde im Rahmen einer Masterarbeit (Yildiz, 2019) gemeinsam mit dem Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik am Karlsruher Institut für Technologie ein Messprogramm entwickelt, um die Reinigungswirkung der Filtersäulen belastbar nachweisen zu können. Die dabei erarbeiteten Versuchsansätze nutzen insbesondere die digitale Vernetzung der Filtersäulen, welche eine zentrale, ferngesteuerte An- oder Abschaltung binnen kurzer Zeit ermöglicht.

5.1 Schaltversuche

Die am Neckartor aufgestellten Filtersäulen verfügen über eine Fernwartungsfunktion, mit der die Säulen zentral an- und abgestellt werden können. Diese diente ursprünglich der Wartung oder der Steuerung der Anlagen in Sondersituationen. Für den Funktionsnachweis lässt sich das auf einfache Art nutzen. Durch einen periodischen Wechsel des Betriebszustands bei gleichzeitiger Dauermessung der Schadstoffkonzentrationen lassen sich Mittelwerte für den Betriebszustand „AN“ und den Betriebszustand „AUS“ aggregieren. Um mittels derartiger Schaltversuche quantitativ belastbare und aussagekräftige Daten für den AN- und AUS-Zustand zu erhalten, müssen einige qualitätsbestimmende Kriterien erfüllt und Störeinflüsse berücksichtigt werden. Diesen Aspekten widmen sich die folgenden Abschnitte. Zusammenfassend lässt sich aussagen, dass wegen der einseitig negativen Störeinflüsse die Schadstoffkonzentrationsminderungen im Schaltversuch gegenüber einem hypothetischen Dauerbetrieb immer einen Worst Case darstellen.

Tabelle 5.1 – Chronologischer Verlauf luftqualitätsverbessernder Maßnahmen am Neckartor mit Relevanz für die aktuelle Untersuchung

Projekt	Zeitraum
Mooswand (Uni Stuttgart, Züblin)	03/2017-04/2018
Feinstaubreduzierung durch Einsatz von Straßenkehrmaschinen (Dekra, im Auftrag der Stadt Stuttgart)	seit 10/2017
Temporeduzierung auf 40 km/h (Bosch)	seit 6.9.2018
Einführung der Buslinie X1	seit 15.10.2018
Euro4-Diesel-Einfahrverbot für Stuttgart	seit 1.1.2019
Euro4-Diesel-Fahrverbot für Stadtbewohner	seit 1.4.2019
Einführung von Busspuren für Linie X1 im Bereich Neckartor	seit 07/2019
Veränderung der Fahrbahnbelages am Neckartor auf „CleanAir“-Asphalt	seit KW16/2019
Streckenbezogenes Fahrverbot für Euro5-Dieselfahrzeuge (seit 1.1.2020)	seit 1.1.2020

5.1.1 Gesamtumfang

Gemäß der Zielsetzungen aus Kapitel 4 ist es die Aufgabe der Filteranlagen, an der LUBW-Messstelle die Schadstoffkonzentrationen von PM10 um 10%-15% (Phase I) und von NO₂ um 8.5% (Phase III) zu reduzieren. Bezogen auf die späteren Jahresmittelwerte von 2019 sind dies 2.8 µg/m³-4.2 µg/m³ PM10, beziehungsweise 5.3 µg/m³ NO₂ (Phase III). Diese vergleichsweise geringen Änderungen der Gesamtkonzentration im Versuch nachzuweisen stellt eine Herausforderung dar. Das liegt vor allem daran, dass die Schadstoffkonzentrationen durch den Einfluss

etlicher Faktoren (u.a. Verkehrsfluss, Windrichtung und -stärke, Niederschlag, Straßenbeschaffenheit, Sonneneinstrahlung) starken Schwankungen unterworfen sind, was sich in sehr hohen Standardabweichungen äußert (Tabelle 5.2). Je länger die Versuchsdauer, desto geringer wird die Messunsicherheit und damit die Übereinstimmung zwischen dem Mittelwert der Messwerte und der tatsächlichen mittleren Konzentrationen im AN- und AUS-Zustand. Der Zusammenhang zwischen der erzielbaren Genauigkeit der Ergebnisse und der Versuchsdauer kann mittels eines t-Tests nach Welch (Welch, 1947) für die Differenz Δc der Mittelwerte $\overline{c_{AN}}$ und $\overline{c_{AUS}}$ im AN- und AUS-Zustand abgeschätzt werden. Für den Standardfehler SE zu Δc gilt unter der Annahme, dass die Mittelwerte normalverteilt sind:

$$\Delta c = \overline{c_{AUS}} - \overline{c_{AN}}$$

$$SE_{\Delta c} = \sqrt{\frac{s_{AN}^2}{n_{AN}} + \frac{s_{AUS}^2}{n_{AUS}}}$$

Darin sind s_{AN} und s_{AUS} die Standardabweichungen sowie n_{AN} und n_{AUS} die Anzahl der Messintervalle im AN- und AUS-Zustand. Das 95%-Konfidenzintervall für die Konzentrationsänderung Δc entspricht bei den vorliegenden Werten von n und Halbstundenmittelwerten meist $\Delta c \pm 1.96 SE$. Unter den Annahmen einer näherungsweise Gleichverteilung der Stunden und einer Reduzierung der Standardabweichung um 10% im AN-Zustand folgen die in Tabelle 5.2 gelisteten Konfidenzintervalle. Bei PM10 kann nach knapp vier Monaten eine Genauigkeit von $\pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ des erhaltenen Mittelwerts erreicht werden, bei NO_2 ist dies erst nach mehr als einem halben Jahr der Fall.

Die Werte aus Tabelle 5.2 können zudem zum grundsätzlichen Nachweis der Wirkung der Säulen auf die Umgebungskonzentration herangezogen werden. Das (zweiseitige) Konfidenzintervall für 95% entspricht jenem für ein einseitiges Konfidenzintervall bei einem Signifikanzniveau von 97.5%. Liegt nach 30 Tagen beispielsweise eine PM10-Reduzierung von mehr als $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vor, ist dies mit einer Signifikanz von 97,5% der Nachweis dafür, dass der PM10-Wert durch die Filtersäulen gesenkt wird. Beim häufig genutzten Signifikanzniveau von 95% sind die Konfidenzintervalle etwa 16% kleiner. Im Beispiel des PM10-Messwerts nach 30 Tagen wären das 95%-Konfidenzintervall $\pm 1.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabelle 5.2 – Statistische Kenngrößen der 30-min-Mittelwerte der Messstation „Am Neckartor“ der LUBW über das Kalenderjahr 2019. Konfidenzintervalle berechnet unter Annahme einer Normalverteilung der Mittelwerte

Schadstoff	Jahres-Mittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Standardabweichung [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	95%-Konfidenzintervalle für Δc (beidseitig)			
			10 Tage [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	30 Tage [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	100 Tage [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 Jahr [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM10	24.5	20.4	± 3.5	± 2.0	± 1.1	± 0.6
PM2.5	11.4	16.6	± 1.8	± 1.0	± 0.6	± 0.3
NO2	53.0	26.0	± 4.4	± 2.6	± 1.4	± 0.7

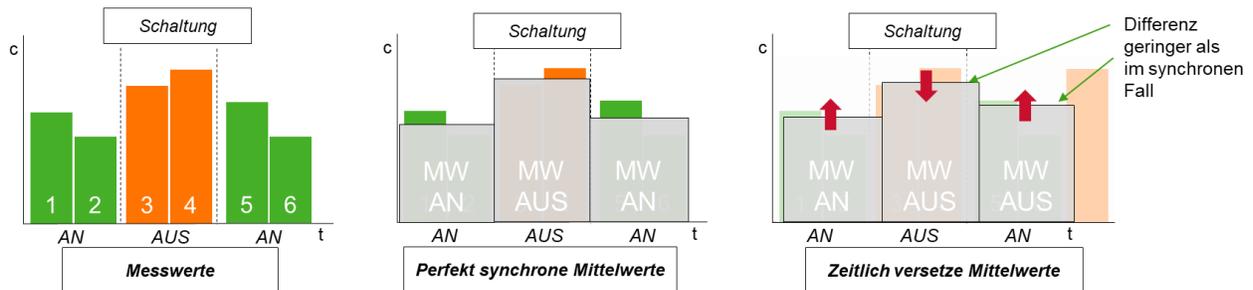


Abbildung 5.1 - Wirkung eines Zeitversatzes zwischen Schaltpunkten und Messdaten am Beispiel von halbstündigen Messdaten bei einstündigem Schaltintervall

In der ersten Projektphase erfolgte die Schaltung der Anlagen noch manuell, weswegen die Mehrheit der Versuchsdaten zwischen 6 und 22 Uhr erhoben wurde. In der zweiten Phase wurde der Funktionsumfang der Filtersäulen durch ein Firmwareupdate erweitert, der einen zeitplangesteuerten Versuchsbetrieb über 24 Stunden am Tag ermöglichte. Diese Funktionalität wurde auch bei den Filtersäulen der zweiten Generation (Phase III) beibehalten. Während der Versuchszeitraum in Phase I und II jeweils etwa 30 Tage umfasste, wurde die Dauer des Versuchs in Phase III deutlich erhöht. Somit wurde mit jeder Phase die Aussagekraft der Schaltversuche erhöht.

5.1.2 Synchronizität zwischen Versuchsdaten und Schaltdaten

Ein weiterer Faktor, der sich negativ auf das Versuchsergebnis für die Schadstoffminderung auswirkt, sind Zeitverschiebungen zwischen den Schaltpunkten und den erhobenen Daten. Diese können in geringem Umfang durch Zeitversatz zwischen den verschiedenen Datenerfassungssystemen und der Anlagensteuerung auftreten. Stärker ins Gewicht fallen Verzögerungen bei der Umsetzung der Schaltbefehle über das Mobilfunknetz. Insbesondere in Phase I, in der die Schaltung manuell durchgeführt wurde, konnten Verzögerungen von bis zu drei Minuten auftreten. Die Auswirkung der Zeitverzögerung wird in Abbildung 5.1 veranschaulicht. Werden im AN-Zustand die (höheren) Werte des AUS-Zustandes erfasst und andersherum, verringert sich die Differenz zwischen den Mittelwerten der beiden Datensätze und damit die berechnete Konzentrationsminderung. Unter Annahme einer grundsätzlichen Wirkung der Anlagen (AUS-Konzentration im Mittel höher als AN-Konzentration) wirkt sich dieses Problem negativ auf das Versuchsergebnis aus.

5.1.3 Geeignete Dauer der Schaltintervalle

Bei der Wahl des Schaltintervalls muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen Argumenten, die für lange und kurze Intervalle sprechen. Einerseits begünstigen kurze Intervalle, dass die beiden Datensätze für AN- und AUS-Zustand bei vergleichbaren Randbedingungen erhoben werden und dadurch die ortstypische Konzentrationsverläufe keinen zu großen Einfluss auf das Messergebnis haben. Sind die Messintervalle sehr lang, verändern sich zwischen benachbarten Intervallen die Umgebungsbedingungen möglicherweise so stark, dass diese Änderung den Effekt der Filtersäulen übersteigt. Es kommt zu einer Verzerrung der erhobenen Messergebnisse. Bis sich solche Einzelereignisse aus dem Gesamtergebnis herausmitteln, müssen sehr viele Messtage absolviert werden. Abbildung 5.2 zeigt, dass starke tageszeitliche Konzentrationsschwankungen am Neckartor die Regel sind, durch den ausgeprägten Einfluss des Verkehrs. Kurze Schaltintervalle sind insbesondere bei kurzen Versuchsdauern wichtig, weil dabei nicht garantiert werden kann, dass stark verzerrende Einzelereignisse in beiden Datensätzen in vergleichbarer Häufigkeit auftreten. Bei Vor-Ort-Versuchen kann der Verzerrung nur entgegengetreten werden, indem immer ein Referenzmesspunkt außerhalb des Wirkungsbereichs der Filteranlagen mitgeführt wird. Durch Bezug der Messdaten auf die Referenzkonzentrationen lassen sich dann kurzfristige Veränderungen der Umgebungskonzentration kompensieren (vgl. Abschnitt 6.3.2).

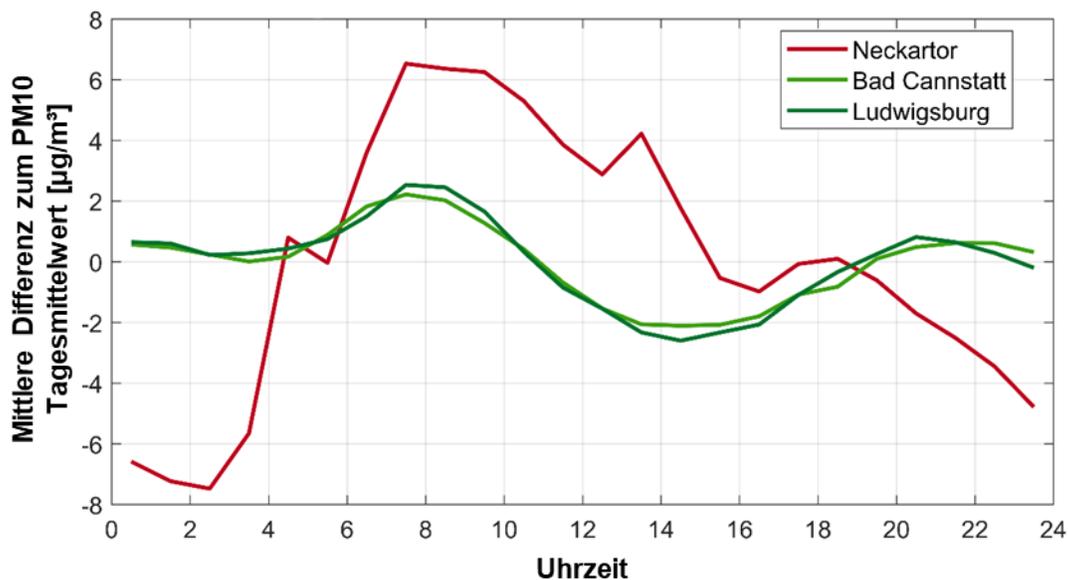


Abbildung 5.2 – Tagesgang der PM10-Konzentration am Neckartor, Bad Cannstatt und Ludwigsburg, ermittelt aus der mittleren Differenz der Messdaten zum jeweiligen Tagesmittelwert

Lange Schaltintervalle ermöglichen andererseits genauere Messergebnisse. Zum einen verlieren Kurzzeiteffekte an Bedeutung, wie beispielsweise die Ampelphasen der Kreuzung B14/Heilmannstraße/Cannstatter Straße. Daraus folgt eine geringere Varianz der Messergebnisse. Zum anderen sind die erhobenen Messwerte genauer, vor allem für PM10. Die verwendeten Streulicht-Messgeräte bestimmen die PM-Ausgabewerte auf Basis von Partikelgrößenverteilungen. Bei niedrigen Feinstaubkonzentrationen ist dabei die Anzahl der massereichen Teilchen der groben Staubfraktionen so gering, dass erst nach langer Messdauer eine belastbare Partikelgrößenverteilung vorliegt und damit ein genauer Messwert für PM10. Die von MANN+HUMMEL und der LUBW eingesetzten Palas Fidas 200-Messgeräte sind im zertifizierten Betriebsmodus aus diesem Grund auf 15-Minuten-Mittelwerte vorkonfiguriert. Verteilungen zur PM2.5-Ermittlung sind tendenziell schneller belastbar, weil in den hierfür berücksichtigten Größenklassen unter typischen europäischen Bedingungen höhere Anzahlen von Partikeln vorliegen. Dies gilt auch für die Anzahlkonzentration der Partikel. Deswegen wird bei den kurzen Vor-Ort-Versuchen hauptsächlich anhand der Partikelanzahl argumentiert (vgl. Abschnitte 5.3.2 und 6.3.2).

Ein weiteres Argument für lange Schaltintervalle leitet sich aus dem Bestreben ab, mit dem Schaltversuch das spätere Verhalten im Dauerbetrieb bestmöglich abzubilden. Voraussetzung dafür ist, dass sich während des Schaltversuchs im AN-Zustand vergleichbare Konzentrationen wie im Dauerbetrieb einstellen und im AUS-Zustand wie bei langanhaltendem Anlagenstillstand. Diese Voraussetzung ist aufgrund der trägen Reaktion der Umgebungskonzentrationen nicht erfüllbar. Nach dem Anschalten durchmischt sich die von den Filtersäulen erzeugte saubere Luft mit der Umgebungsluft und lässt deren Schadstoffkonzentration nach und nach absinken. Nach der Abschaltung durchmischt sich die zunächst saubere Luft mit stärker belasteter Luft, insbesondere von der Straße ausgehend. Dieser Prozess findet zum Teil passiv über Diffusion statt, wird jedoch erheblich beschleunigt, wenn Wind oder Turbulenzen des Straßenverkehrs die Durchmischung verstärken. An den Messpunkten, die in größtmöglichem Abstand von den Säulen platziert sind, machen sich die Konzentrationsänderungen nach dem Schalten erst verzögert bemerkbar. Besonders extrem äußert sich die Verzögerung beim Abschalten, weil die Strömung der Säulen selbst als Unterstützung für den Luftaustausch wegfällt. Bei Windstille und geringem Verkehrsaufkommen steigt die Konzentration dann mangels lokaler Schadstoffquellen nur sehr langsam an. Die später vorgelegten Ergebnisse des Schaltversuchs zu Phase III belegen dieses Verhalten eindrücklich, vor allem für die leicht windgeschützt liegende Messstation der LUBW (vgl. Abschnitt 6.1.3). Mathematisch wirkt sich das Einschalt- und Abklingverhalten selektiv negativ auf das Ergebnis des Schaltversuchs aus, weil die Messdaten im AN-Zustand höher und im AUS-Zustand niedriger liegen als bei einem angenommenen Dauerbetriebszustand.

Die berechnete Konzentrationsdifferenz zwischen An und Aus fällt deshalb im Schaltversuch geringer aus als im Dauerbetrieb. In austauschbaren Situationen muss sogar davon ausgegangen werden, dass durch Ausbleiben des Konzentrationsanstiegs im Aus-Zustand das Gesamtschadstoffniveau während des Schaltversuchs immer weiter absinkt, ähnlich wie es bei einem Dauerbetrieb der Fall ist. Dieses Verhalten kann mittels der verfügbaren Daten nicht quantifiziert werden.

Für die Dauerschaltversuche wurde unter Berücksichtigung dieser Argumente ein Schaltintervall von einer Stunde gewählt. Damit fallen zwei Messpunkte der halbstündig erhobenen Daten der LUBW-Messstation pro Intervall an. Dies ermöglicht bei hoher Versuchslänge (Phase III) die erste halbe Stunde nach dem Umschalten zu vernachlässigen, um damit die Einschalt- und Abklingeffekte der Umgebungskonzentration besser auszublenden. Für Vor-Ort-Versuche wurden kürzere Zeitintervalle von 20-30 Minuten gewählt. Wegen der starken Streuung der erhaltenen PM10-Werte wurde dann auf die schneller ermittelbare Partikelanzahlkonzentration als Hauptindikator zurückgegriffen.

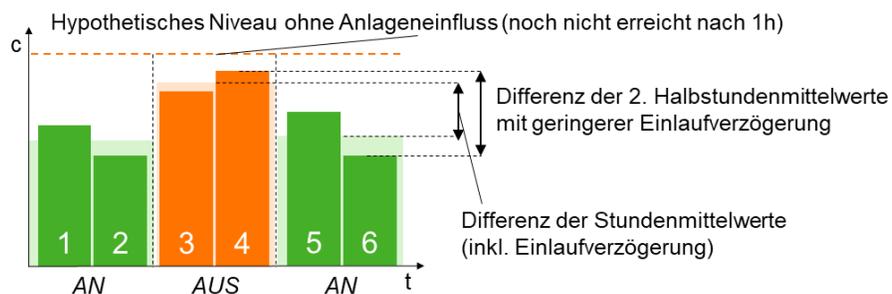


Abbildung 5.2 – Vereinfachte Darstellung der Wirkung von Einlauf- und Abklingeffekten während des Schaltversuchs am Beispiel von halbstündigen Messdaten bei einstäündigem Schaltintervall

5.1.4 Vergleichbarkeit der Stichproben – Geeigneter Schaltzeitplan

Die starke Abhängigkeit der Schadstoffkonzentrationen vom Verkehrsfluss am Neckartor führt zu wiederkehrenden Mustern im Verlauf der Schadstoffkonzentrationen. Dazu zählen der Tagesgang (Abbildung 5.1) und die Absenkung des Niveaus am Wochenende sowie an Feiertagen und Brückentagen. Um in den Datensätzen für den AN- und AUS-Zustand Verzerrungen zu vermeiden, wurde das Schaltschema täglich verschoben.

5.1.5 Handhabung von Betriebsunterbrechungen und Niederschlag

Während des Betriebes der Filteranlagen kann es zu kurzzeitigen Unterbrechungen kommen. Mehrheitlich gehen diese auf die sensorgestützte Regenschutzregelung der Anlagen zurück. Diese hat die Aufgabe, die einzelnen Anlagen bei starkem Niederschlag vor Wasser- oder Schneeeintrag zu schützen. Weitere Pausen ergeben sich durch Anlagenwartung und Filterwechsel. Betriebsunterbrechungen in AN-Phasen führen zu einem Rückgang der gefilterten Luftmenge und verschlechtern damit das Ergebnis des Schaltversuchs. Da es bei entsprechend starkem Niederschlag auch zum partiellen Abregnen der Feinstaubpartikel kommt, sind Starkregenphasen zumindest für kurze Versuche problematisch. Die damit einhergehenden Konzentrations sprünge sind Einzelereignisse, die die Ergebnisse des Schaltversuchs in beide Richtungen verfälschen können, wenn sie nicht in beiden Datensätzen gleichverteilt auftreten. Beim umfangreichsten Versuch in Phase III wirkte sich der Verwurf von Regenintervallen nicht signifikant auf das Versuchsergebnis aus. In der Auswertung der Phase I und II wurden von regenbedingten Abschaltungen betroffene 30-Minuten-Zeitfenster hingegen verworfen. Davon betroffen waren 14% der Versuchsdauer. Überdies wurden in Phase I Datenblöcke nach Regenunterbrechungen nur verwertet, wenn sie sowohl AN- als auch AUS-Intervalle enthielten. Bei den 24-Stunden-Versuchen der Phase II und III war dies nicht notwendig, da isolierte Stundenblöcke deutlich seltener auftraten.

5.2 Messgeräte und Datenquellen

Für die vorliegenden Untersuchungen dienten die Messdaten der öffentlichen Messstelle am Neckartor für PM10, PM2.5 und NO₂ als wichtigste Referenz. Diese wurden in Form von vorläufigen 30-Minuten-Mittelwerten über die gesamte Versuchsdauer durch die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) bereitgestellt. Zusätzlich wurden die Wetterdaten der Stationen Bad Cannstatt und Bernhausen sowie quartalsweise erhobene Daten für NO₂-Passivsammler der LUBW genutzt. Ergänzend zu diesen öffentlichen Messdaten wurde in Phase III durch MANN+HUMMEL ein Messnetz aus Immissionsmessgeräten am Neckartor aufgebaut. Dieses diente der Ausdehnung des Überwachungsbereiches während der Schaltversuche und damit dem Nachweis der Wirkung der Anlagen in der Fläche. Abbildung 5.3 zeigt die Anbringungsorte der Sensoren auf der Westseite. Ein weiterer Messpunkt wurde auf der Ostseite vor dem Gebäude der Schwabengarage installiert. Neben dem nach EN 16450 zertifizierten Palas Fidas 200s bestand das Messnetz aus Sensoren der Dr. Födisch Umweltmesstechnik AG, die ebenfalls geeignet sind für den Dauereinsatz im Außenbereich. Bei den verwendeten NO₂-Sensoren vom Typ GSA19 handelte es sich um Prototypen, die aufgrund des Messprinzips eine Querempfindlichkeit gegenüber Ozon aufweisen. Letzteres wird von den verwendeten Aktivkohlefiltern ebenfalls sehr effizient abgeschieden. Um aus der Querempfindlichkeit resultierende Messfehler zu vermeiden, sollten zur Bestimmung der NO₂-Reduzierung bevorzugt Daten aus Zeitfenstern herangezogen werden, in denen das Verhältnis der Ozonkonzentration zur NO₂-Konzentration sehr gering ist.

Bei den Vor-Ort-Versuchen wurden hochwertige mobile Partikelzählgeräte vom Typ Palas Fidas Frog eingesetzt, die allerdings nicht über geheizte Messstrecken verfügen. Um das Risiko von Zählfehlern durch kondensierte Wassertropfen zu reduzieren, wurden alle Messungen mit diesen Messgeräten bei Temperaturen deutlich über dem Taupunkt durchgeführt.

Tabelle 5.3 – Eingesetzte Messgeräte für Messkampagnen und Dauerüberwachung

Gerät	Hersteller	Messgrößen	Messprinzip	Phase	Einsatz
Fidas 200s mit Wetterstation WS600	Palas	PM10, PM2.5, PN Wind, Niederschlag	OPC	I & III	Mobil (I) Dauer (III)
Fidas Frog	Palas	PM10, PM2.5, PN	OPC	I	Mobil
ICAD Analyzer	Airyx	NO ₂ , NO	ICAD	II & III	Speziell
FDS15	Dr. Födisch	PM10	OPC	III	Dauer
FDS18	Dr. Födisch	PM2.5	OPC	III	Dauer
GSA19	Dr. Födisch	NO ₂	EC	III	Dauer



Abbildung 5.3 – Messpunkte des von MANN+HUMMEL errichteten Messnetzes auf der Westseite

5.3 Ergänzende Vor-Ort-Versuche

5.3.1 Direkte Vermessung der NO₂-Adsorption der Einzelanlagen

In den Phasen II und III wurde jeweils in einem Filter Cube an der südwestlichen Ecke der Kreuzung Heilmannstraße/B14 ein NO₂-Messgerät verbaut (Abbildung 5.3). Für vier (Phase II), respektive sechs Wochen (Phase III) wurde mit dem Airyx ICAD Analyzer im Wechsel die NO₂-Konzentration von Rohluft- und Reinluftseite gemessen und daraus die Adsorptionseffizienz berechnet. Die Probenahme erfolgte mittels Schläuchen aus dem Strömungskanal unmittelbar vor und nach dem Filterelement.

Eine vergleichbare Vermessung des Feinstaubabscheidegrades innerhalb der Säulen wurde als nicht zielführend eingestuft. Hierfür ausschlaggebend war insbesondere die Anforderung an die Probenahme in Form einer isokinetischen Absaugung bei hoher Strömungsgeschwindigkeit. Wegen der erwarteten niedrigen Reinluftkonzentrationen (im Bereich der unteren Messgrenze der Messgeräte) wurde zudem von einer geringen erzielbaren Genauigkeit ausgegangen. Deshalb sei für einen grundsätzlichen Funktionsnachweis der Einzelsäulen auf die im Folgeabschnitt aufgeführten PM-Messkampagnen verwiesen.



Abbildung 5.3 – In-situ Messung der NO₂-Adsorptionseffizienz. Messgerät Airyx ICAD verbaut in einer Filtersäule (Phase III)

5.3.2 Messkampagnen zur Feinstaubfiltration (Phase I)

Zu Betriebsbeginn der Phase I (Feinstaubfiltration) standen außer der LUBW-Messstation keine dauerhaften Spot-Messdaten am Neckartor zur Verfügung. Deshalb wurden im Rahmen einer Masterarbeit ergänzende Vor-

Ort-Versuche durchgeführt, mit deren Hilfe sich grundlegende Fragestellungen klären ließen. Eine ausführliche Beschreibung dieser Versuche findet sich in Yildiz (2019). Weil diese vergleichsweise kurzen Versuche zwar ein anschauliches Bild über die Wirkung der Anlagen vermitteln, gleichzeitig aber keine quantitativ belastbaren Ergebnisse für die PM10-Reduzierung liefern (vgl. 5.1.1), wird im Ergebniskapitel 6.3.2 lediglich ein Versuch exemplarisch vorgestellt.

Eine weitere Gruppe an Vorversuchen diente der Umfelderkundung und umfasste Messungen zur räumlichen Verteilung der Feinstaubkonzentration sowie deren zeitlichen Verlauf. Ziele waren die Charakterisierung des lokalen Aerosols, die Bestimmung geeigneter Messintervalle für den Schaltversuch sowie die Identifikation von ortstypischen Einfluss- und Störgrößen. Eine zweite Gruppe von Versuchen bestand aus Schaltversuchen vor Ort, mit deren Hilfe die ortsabhängige Wirkung der Filtersäulen auf die Umgebungskonzentration aufgezeigt werden sollte, insbesondere im Bereich der Bebauung auf der West- und Ost-Seite. Jeder Schaltversuch wurde mit Abgleichmessungen zwischen den verwendeten Messgeräten an einem zentralen Messpunkt begonnen. Anschließend wurden die Messgeräte an die Bestimmungsorte verbracht und Schaltversuche mit Intervallen von 20 bis 30 Minuten durchgeführt. Abschließend wurden die Geräte nochmals abgeglichen.

6 Ergebnisse und Bewertung

6.1 Dauerschaltversuche

Für jede Projektphase wurden Schaltversuche durchgeführt, mit deren Hilfe eine Verringerung der Schadstoffkonzentrationen durch die Filteranlagen nachgewiesen werden sollte. Gemäß der methodischen Diskussion in Kapitel 5 sind die später im Dauerbetrieb erzielten relativen Schadstoffminderungen höher als die Ergebnisse der Dauerschaltversuche.

6.1.1 Phase I – Reine Feinstaubfiltration

Zwischen dem 19.1.2019 und dem 28.2.2019 wurden tageweise Schaltversuche mit den reinen Feinstaubfiltern durchgeführt. Dabei wurden die Anlagen manuell im Stundentakt an- und ausgeschaltet. Tabelle 6.1 zeigt die integrale Bilanz des Schaltversuchs. Als einziger Dauermesspunkt stand im Untersuchungszeitraum der Phase I die Messstation der LUBW zur Verfügung. Gemäß der Zielvorgaben aus Abschnitt 4.3.3 sollte mit den Feinstaubfiltern an potenziellen Überschreitungstagen (Tagesmittelwert $\geq 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) die PM10-Konzentration um ca. 10%-15% reduziert werden. Die Einschränkung auf Überschreitungstage reduziert jedoch die Versuchsdauer und damit die erzielbare Genauigkeit des Versuchs. Analog zu den Auswertungen der Phase II und III finden deshalb alle Messpunkte Eingang in die Bilanz, die in niederschlagsfreien Versuchszeiträumen erhoben wurden.

Der Mittelwert der gemessenen PM10-Konzentration bei angeschalteten Filteranlagen lag um $6.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niedriger als bei ausgeschalteten Anlagen. Dies entspricht einer Reduzierung um 10.4%¹, welche gut mit der simulativen Prognose übereinstimmt. Die Reduzierung für die PM2.5-Fraktion fällt erwartungsgemäß niedriger aus, weil die Abscheidegrade der Filter für diese Feinfraktion geringer sind (vgl. 3.1). Statistisch lassen sich die Ergebnisse mittels eines Welch'schen t-Tests (Welch, 1947) für die Differenz der Mittelwerte für den AN- und AUS-Zustand bewerten. Der grundsätzliche Nachweis der PM10-Minderung durch die Filteranlagen erfolgt mittels eines einseitigen t-Tests anhand der Hypothese „Mittelwert AN < Mittelwert AUS“. Das Konfidenzniveau für die Akzeptanz dieser Hypothese liegt bei 99.5%. Auf die NO₂-Konzentration wirkt sich die Maßnahme in Phase I hingegen nicht aus.

Tabelle 6.1 – Ergebnisse des Schaltversuchs für Phase I. Integrale Bilanz für alle 30-min-Mittelwerte

Phase I - Gesamtbilanz	Schadstoff		
	PM10	PM2.5	NO ₂
Mittelwert AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	54.4	21.7	82.2
Mittelwert AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	60.7	22.8	82.3
Differenz [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	6.3	1.2	0.1
Prozentuale Minderung	10.4%	5.1%	0.1%
Anzahl Intervalle AN	482	482	447
Anzahl Intervalle AUS	450	451	422
Standardabweichung AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	32.2	10.2	26.7
Standardabweichung AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	38.0	10.8	27.8
Standardfehler [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	2.3	0.7	1.9
Konfidenzintervall 95% [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	± 4.5	± 1.4	± 3.6
Konfidenzniveau für Nachweis (eins.)	99.5%	96%	-

¹ In einem ersten Zwischenbericht wurde eine PM10-Minderung von 10.9% für die Phase I kommuniziert. Die Differenz ergibt sich aus der Schließung von Datenlücken, insbesondere für den 25.01.19 sowie einer einheitlichen Datenauswertung für alle Versuchsphasen.

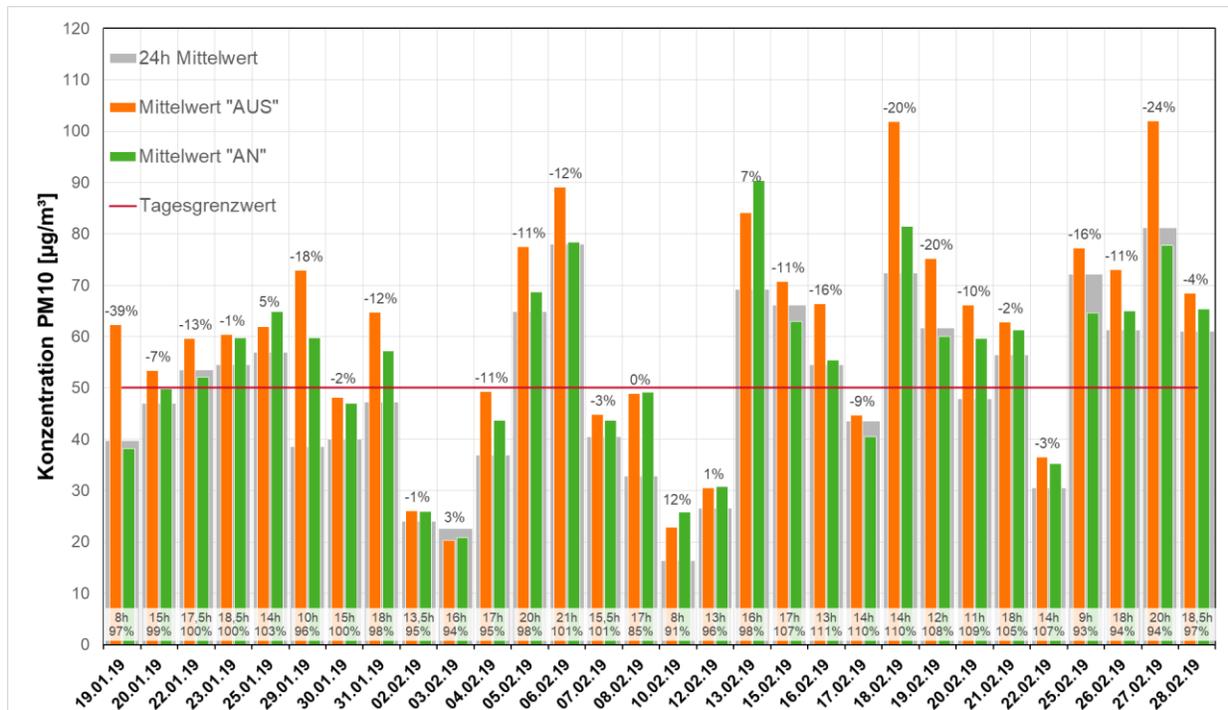


Abbildung 6.1 – Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration (kontinuierliche Messung) im AN- und AUS-Zustand der Filteranlagen

Abbildung 6.1 zeigt die Tagesmittelwerte der PM10-Konzentration an den Versuchstagen. Die dargestellten Ergebnisse veranschaulichen die Schwierigkeit, aus kurzen Experimenten aussagefähige Messwerte abzuleiten. An der überwiegenden Mehrzahl der Tage ist eine Verbesserung der Luftqualität sichtbar. An einzelnen Tagen ist die Konzentration im AUS-Zustand allerdings höher als im AN-Zustand. Auch das Ausmaß der Minderung variiert. Dies geht auf die ortstypische Varianz der PM10-Konzentration zurück, die vor allem durch den Verkehr und das Wetter verursacht werden. Insbesondere der Wind spielt dabei eine große Rolle. In austauscharmen Situationen lassen sich hohe Reduzierungen erreichen. Bei hohen Windgeschwindigkeiten hingegen kommt es zu einem verstärkten Abtransport der gereinigten Luft und damit tendenziell zu einer Verringerung der Unterschiede zwischen AN- und AUS-Zustand (siehe z.B. 03.02. und 10.02., die windstärksten Tage im Untersuchungszeitraum).

6.1.2 Phase II – Machbarkeit NO₂-Minderung

Der Dauerschaltversuch zur Phase II hatte zum Ziel, die Wirkung von Aktivkohle-Kombifilterelementen im Freiluftbereich grundsätzlich zu untersuchen. Die Untersuchung diente insbesondere als Entscheidungsgrundlage für die technischen Aufrüstungsmaßnahmen in Phase III (s. 2.3). Dafür wurden Aktivkohle-Kombifilterelemente mit gleicher Bauform wie in Phase I eingesetzt und der Volumenstrom der Anlagen erhöht. Der Dauerschaltversuch für Phase II fand vom 18.05. bis 17.06.2019 statt. Durch Überarbeitung der Anlagenregelungssoftware konnte das Versuchsprogramm vollautomatisch durchgeführt werden, was den Umfang der Messpunkte und die Genauigkeit der Schaltzeitpunkte gegenüber Phase I deutlich erhöhte. Tabelle 6.2 zeigt die Gesamtbilanz des Versuchs. Über den gesamten Zeitraum lagen die Konzentrationen im AN-Zustand 6% niedriger als im AUS-Zustand. Mit einem Konfidenzniveau von über 99,5% lässt sich die Aussage treffen, dass durch den Einsatz der Aktivkohlefilter die NO₂-Konzentration gesenkt wird. Die Machbarkeit einer NO₂-Minderung durch die Filteranlagen ist damit bestätigt. Aufgrund der sehr niedrigen Absolutwerte für die Feinstaubfraktionen sind deren absolute Änderungen zwischen AN- und AUS-Zustand gering. Weil jedoch gleichzeitig auch der Standardfehler niedrig ist, ergibt sich für den Nachweis der Minderung von PM10 dennoch ein Konfidenzniveau von 90%. Neben dem NO₂ wird in den Filtern auch Ozon abgeschieden, was sich in einer Minderung der Ozonkonzentration von 4,7% äußert.

Tabelle 6.2 - Ergebnisse des Schaltversuchs für Phase II. Integrale Bilanz der 30-min-Mittelwerte der LUBW-Messtation

Phase II - Gesamtbilanz	Schadstoff			
	NO ₂	PM10	PM2.5	O ₃
Mittelwert AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	50.7	19.8	8.6	35.1
Mittelwert AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	54.0	20.7	9.0	36.8
Differenz [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	3.2	0.9	0.4	1.7
Prozentuale Minderung	6.0%	4.2%	4.2%	4.7%
Anzahl Intervalle AN	640	644	644	628
Anzahl Intervalle AUS	653	660	660	643
Standardabweichung AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	21.0	12.2	4.2	25.0
Standardabweichung AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	22.3	12.1	4.7	26.1
Standardfehler [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	1.2	0.7	0.2	1.4
Konfidenzintervall 95% [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	± 2.4	± 1.3	± 0.5	± 2.8
Konfidenzniveau für Nachweis (eins.)	99.6%	90%	94%	89%

6.1.3 Phase III – NO₂-Abscheidung

Für die finale Ausbaustufe der Filteranlagen wurde vom 20.09. bis 30.11.2019 ein durchgehender Schaltversuch mit stündlichem Betriebszustandswechsel durchgeführt, dessen Gesamtbilanz in Tabelle 6.3 aufgeführt ist. Diese weist eine Minderung der NO₂-Konzentration in Höhe von 7.5% aus. Die PM10-Werte reduzieren sich um 6.2%. Auffällig ist auch die hohe Ozonreduktion von 9.8%. In den AN-Phasen des Schaltversuchs lag die mittlere NO₂-Konzentration bei 45.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und damit nur 13% über dem Grenzwert. Die Gesamtbilanz des Schaltversuchs bildet allerdings die in einem späteren Dauerbetrieb erwarteten Ergebnisse nicht genau ab. Dies wird im Folgenden erläutert.

Tabelle 6.3 - Ergebnisse des Schaltversuchs für Phase III. Integrale Bilanz der 30-min-Mittelwerte der LUBW-Messtation

Phase III - Gesamtbilanz	Schadstoff			
	NO ₂	PM10	PM2.5	O ₃
Mittelwert AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	45.2	20.5	9.8	12.7
Mittelwert AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	48.9	21.9	10.4	14.1
Differenz [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	3.7	1.4	0.6	1.4
Prozentuale Minderung	7.5%	6.2%	5.7%	9.8%
Anzahl Intervalle AN	1630	1622	1624	1534
Anzahl Intervalle AUS	1647	1614	1614	1595
Standardabweichung AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	18.6	13.8	7.0	13.4
Standardabweichung AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	20.7	14.8	7.4	14.9
Standardfehler [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	0.7	0.5	0.3	0.5
Konfidenzintervall 95% [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	1.3	1.0	0.5	1.0
Konfidenzniveau für Nachweis (eins.)	>99.99%	99.7%	99.0%	99.7%

Tabelle 6.4 - Ergebnisse des Schaltversuchs für Phase III. Separate Bilanz der 30-min-Mittelwerte der LUBW-Messstation zur Veranschaulichung der Einschalt- und Abklingeffekte nach dem Schalten

Phase III – 30-min-Intervalle nach Schalten	1. Halbe Stunde				2. Halbe Stunde			
	NO ₂	PM10	PM2.5	O ₃	NO ₂	PM10	PM2.5	O ₃
Mittelwert AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	46.3	20.8	9.9	12.5	45.6	20.8	9.8	12.5
Mittelwert AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	49.4	22.0	10.3	13.8	50.0	22.3	10.5	14.1
Differenz [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	3.1	1.2	0.5	1.3	4.5	1.5	0.7	1.6
Prozentuale Minderung	6.3%	5.4%	4.6%	9.4%	8.9%	6.7%	6.8%	11.2%
Anzahl Intervalle AN	773	774	774	715	789	774	774	762
Anzahl Intervalle AUS	791	777	777	767	791	775	775	764
Standardabw. AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	18.6	14.0	7.0	13.5	18.5	13.9	6.9	12.9
Standardabw. AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	20.5	14.8	7.3	14.5	20.6	15.0	7.4	14.9
Standardfehler [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	1.0	0.7	0.4	0.7	1.0	0.7	0.4	0.7
Konfidenzintervall 95% [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	± 1.9	± 1.4	± 0.7	± 1.4	± 1.9	± 1.4	± 0.7	± 1.4
Konfidenzniveau für Nachweis	>99.9 %	94.7%	90.7%	96.3%	>99.9 %	97.9%	97.4%	98.7%

Ein grundlegendes Problem des Schaltversuchs besteht darin, dass die Schadstoffkonzentrationen an den Messpunkten nach An- oder Abschalten der Anlagen nicht augenblicklich sinken oder zeigen, sondern dies erst verzögert eintritt. Die Messung der öffentlichen 30-Minuten-Mittelwerte beginnt aber bereits mit dem Schaltzeitpunkt. Weil so die Übergangszeit mitgemessen wird, fallen die Minderungen geringer aus, als wenn die Übergangszeit ausgespart würde (vgl. 5.1.4). Der Abstand der Messpunkte von den Anlagen und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schadstoffe bestimmen dabei, wie stark die Verzögerung ins Gewicht fällt. Im AN-Zustand unterstützt die Strömung der Anlagen die Verteilung der Schadstoffe, vor allem in den räumlich beengten Bereichen auf der Westseite. Im AUS-Zustand findet eine Konzentrationserhöhung am Messpunkt nur statt, wenn von außerhalb des Bilanzgebietes oder durch den Verkehr Schadstoffe eingetragen werden. Eine Lösung dieser Situation ergibt sich aus dem Gesamtumfang des Versuchs. Dieser ermöglicht es, aussagekräftige Ergebnisse für Teilmengen der Versuchsdaten zu erzielen. So können die Auswirkungen ausgesuchter Einflussgrößen auf das Versuchsergebnis untersucht werden (s. 6.5), darunter auch die Einlauf- und Abschalteneffekte. Hierfür können die erste und zweite halbe Stunde nach dem Schalten separat bilanziert werden. Die beschriebenen Übergangseffekte sind in Tabelle 6.4 in allen Datenreihen erkennbar. Von der ersten zur zweiten halben Stunde sinken oder stagnieren die Schadstoffkonzentrationen im AN-Zustand, während sie sich im AUS-Zustand erhöhen. Bilanziert man lediglich das zweite Halbstundenintervall, werden die Einlauf- und Abklingverzögerungen zumindest größtenteils ausgespart. Die resultierenden Schadstoffminderungen liegen dann mit 8.9% für NO₂ und 6.7% für PM10 höher als in der Gesamtbilanz. Da davon auszugehen ist, dass die Versuchsrandbedingungen für die zweite halbe Stunde einem späteren Dauerbetrieb ähnlicher sind als die für das gesamte Schaltintervall, sind diese Teilergebnisse als Gesamtergebnis des Schaltversuchs in Phase III anzusehen.

Weitere Daten liegen für das von MANN+HUMMEL aufgebaute Messnetz am Neckartor vor. Dieses wurde im Laufe der Phase III in zwei Stufen ausgebaut, um die räumliche Wirkung der Anlagen auch abseits der LUBW-Messstation überprüfen zu können. Dabei wurden die Sensoren mittig zwischen den Anlagen positioniert (vgl. Abbildung 6.2), um Nahfeldeffekte der Säulen zu vermeiden. Die dort gemessenen Schadstoffminderungen bilden deshalb tendenziell den Worst-Case für die Raumwirkung in den Gehwegbereichen ab. Aufgrund der Ozon-Querempfindlichkeit der genutzten NO₂-Sensoren wurden zur Berechnung der NO₂-Minderung nur Zeitfenster berücksichtigt, in denen das molare Verhältnis von O₃ zu NO₂ geringer war als 1:10. Wegen der zu NO₂ vergleichbaren Wirkung der Anlagen auf die Ozonkonzentration fallen die gemessenen NO₂-Minderungen sonst im Mittel ein bis zwei Prozentpunkte höher aus.

Tabelle 6.5 – Vollständige Messergebnisse des MANN+HUMMEL Messnetzes am Neckartor

	Messpunkt	Messstation LUBW (West)				Amtsgericht (West)		Wohnhäuser (West)	
		Födisch GSA19		Födisch FDS18		Födisch GSA19	Födisch FDS18	Födisch GSA19	Födisch FDS18
	Datenquelle	ab 31.10.19				ab 31.10.19		ab 31.10.19	
	Messzeitraum	ab 31.10.19				ab 31.10.19		ab 31.10.19	
	Messgröße	NO ₂ *		PM _{2.5}		NO ₂ *	PM _{2.5}	NO ₂ *	PM _{2.5}
Gesamt-bilanz	Mittelwert AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	50.5	49.3	9.3	10.1	45.6	10.2	43.2	9.7
	Mittelwert AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	54.4	52.5	9.9	10.6	51.3	11.4	46.9	10.3
	Differenz [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	3.9	3.3	0.6	0.5	5.7	1.1	3.7	0.7
	Minderung	7.2%	6.3%	6.3%	4.8%	11.2%	10.0%	7.8%	6.3%
Nur 1. halbe Stunde	Mittelwert AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	51.5	50.7	9.3	10.1	47.0	10.3	46.8	9.6
	Mittelwert AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	54.7	53.2	10.0	10.8	51.8	11.4	49.1	10.2
	Differenz [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	3.2	2.5	0.7	0.7	4.9	1.1	2.3	0.6
	Minderung	5.8%	4.7%	7.0%	6.2%	9.4%	9.6%	4.8%	5.9%
Nur 2. halbe Stunde	Mittelwert AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	50.0	48.5	9.3	10.2	45.1	10.2	40.6	9.7
	Mittelwert AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	54.9	52.7	9.9	10.7	51.8	11.5	45.7	10.4
	Differenz [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	4.9	4.2	0.6	0.5	6.7	1.2	5.1	0.7
	Minderung	8.9%	8.0%	6.3%	4.7%	12.9%	10.9%	11.2%	7.0%

	Messpunkt	Parkseite West				Schwabengarage (Ost)		
		Födisch GSA19	Födisch FDS18	Palas Fidas 200s	Födisch FDS18	Födisch GSA19	Födisch FDS18	
	Datenquelle	ab 04.11.19		ab 22.09.19		ab 04.11.19		
	Messzeitraum	ab 04.11.19		ab 22.09.19		ab 04.11.19		
	Messgröße	NO ₂ *	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{2.5}	NO ₂ *	PM _{2.5}
Gesamt-bilanz	Mittelwert AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	41.6	12.0	21.8	8.9	10.7	43.3	13.9
	Mittelwert AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	49.9	14.0	27.9	10.9	13.3	46.2	14.1
	Differenz [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	8.4	2.0	6.1	2.0	2.6	2.8	0.3
	Minderung	16.8%	14.3%	22.0%	18.2%	19.7%	6.2%	1.8%
Nur 1. halbe Stunde	Mittelwert AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	42.8	12.0	22.0	9.0	10.7	45.3	14.3
	Mittelwert AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	50.4	14.0	28.4	10.9	13.3	46.2	14.1
	Differenz [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	7.6	2.0	6.4	2.0	2.6	1.0	-0.2
	Minderung	15.0%	14.0%	22.6%	18.0%	19.6%	2.1%	-1.6%
Nur 2. halbe Stunde	Mittelwert AN [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	40.9	11.9	22.4	9.0	10.7	42.2	13.4
	Mittelwert AUS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	50.7	14.1	28.3	11.0	13.4	47.1	14.3
	Differenz [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	9.8	2.2	5.9	2.0	2.7	4.9	0.9
	Minderung	19.4%	15.8%	20.8%	18.0%	20.2%	10.3%	6.5%

*Wegen Querempfindlichkeit zu Ozon nur Intervalle berücksichtigt, an denen das molare Konzentrationsverhältnis Ozon/NO₂ < 10% war.

Die mittleren NO₂-Konzentrationen im AUS-Zustand schwanken um lediglich -6% bis +11% um den Wert der LUBW-Messstation. Die Schadstoffbelastung ist damit recht homogen verteilt über den Messbereich. Beim PM_{2.5} gestaltet sich die Situation ähnlich. Auf der Nord- und Ostseite sind die PM_{2.5}-Werte tendenziell etwas höher als im Bereich des Amtsgerichts. Wegen des hohen apparatetechnischen Aufwands liegt nur ein weiterer PM₁₀-Messpunkt vor. Dieser zeigt deutlich erhöhte PM₁₀-Werte gegenüber der Messstation, die mutmaßlich auf die direkte Positionierung am Straßenrand zurückgehen.

Abbildung 6.2 zeigt eine graphische Zusammenfassung der Ergebnisse für den Datensatz der zweiten Halbstundenintervalle. Werte der Gesamtbilanz sowie der ersten und zweiten halben Stunde finden sich in Tabelle 6.5. Entsprechend der simulativen Vorhersage aus 4.4.5 werden an der LUBW-Messstation relativ geringe Minderungen erzielt, was der Anlagenanordnung zuzuschreiben ist. Die Messstation liegt im Bereich der größten Lücke im Anlagenfeld. Trotz des kürzeren Messzeitraums lieferten die an der LUBW-Messstation montierten Referenzsensoren vergleichbare prozentuale Minderungen für NO₂ und PM_{2.5} wie die LUBW-Messstation. Etwas höhere

Reduzierungen ergaben sich auf der Südwestseite vor dem Amtsgericht und den Wohnhäusern sowie auf der Südostseite im Bereich vor der Schwabengarage. Am Messpunkt auf der nordwestlichen Parkseite verzeichneten alle Sensoren deutlich höhere Minderungen als im restlichen Untersuchungsgebiet. An dieser Stelle hatten bereits die Simulationsrechnungen eine verbesserte Wirkung vorhergesagt, die phänomenologisch auf den beengten Raum zwischen Straße und Park zurückzuführen ist (vgl. 4.4.5). Die Filteranlagen erzeugen dort vor allem in straßenparallelen Strömungssituationen ausgeprägte Zonen sauberer Luft, in denen sich die Reingluftfahnen mehrerer Säulen überlagern. Für die überwiegende Mehrheit der Messgrößen kann der grundsätzliche Nachweis einer Wirkung der Filteranlagen mit einem Konfidenzniveau von 95% und höher erbracht werden. Die entsprechenden statistischen Parameter für alle Messpositionen finden sich in Tabelle 10.2 und 10.3 im Anhang.

An den straßennahen Messpunkten kommt es zu einem verstärkten Stoffaustausch mit der Straße, beispielsweise durch fahrzeuginduzierte Turbulenzen. Gleichzeitig sind die Messpunkte dort jeweils zwischen zwei Filteranlagen gelegen. Dies führt zu einem besseren Luft- und Schadstoffaustausch als an der LUBW-Messstation oder vor der Schwabengarage. Die bessere Durchmischung führt zu einer Reduzierung der An- und Abschaltverzögerung und äußert sich in geringeren Unterschieden zwischen dem ersten und zweiten Halbstundenintervall nach dem Schaltvorgang. Am Messpunkt vor der Schwabengarage, wo ein sehr großer Straßenabstand und eine erhöhte Distanz zu den nächstgelegenen Säulen vorliegen, zeigen sich hingegen relevante Verzögerungseffekte, die für einen sehr eingeschränkten Luftaustausch sprechen. Im zweiten Halbstundenintervall verfünffachte sich dort die NO_2 -Minderung. Die $\text{PM}_{2.5}$ -Minderung steigerte sich ebenfalls massiv. Dies verdeutlicht nochmals die Notwendigkeit, die Daten des ersten Halbstundenintervalls bei der quantitativen Bewertung der Anlagengesamtleistung zu verwerfen.

Die an den Messpunkten beobachteten Schadstoffminderungen durch den Anlagenbetrieb bestätigen die Vorhersagen einer örtlich variablen Wirkung der Anlagen aus den Simulationen (vgl. Abbildung 6.3). Da die Säulenpositionen der Simulation bautechnisch nur auf der Südwestseite 1:1 realisiert werden konnten, sind quantitative Vergleiche zwischen Versuch und Simulation nur dort möglich. Die Referenzwerte für die Nordost- und Südwestseite sind mit höherer quantitativer Unsicherheit belegt und deshalb als rein indikativ zu werten.



Abbildung 6.2 – Minderungswirkung an den verschiedenen Messpunkten für die 2. halbe Stunde jedes Schaltintervalls. Lila: LUBW; Gelb: Palas Fidas 200s; Blau: Födisch FDS18/GSA19

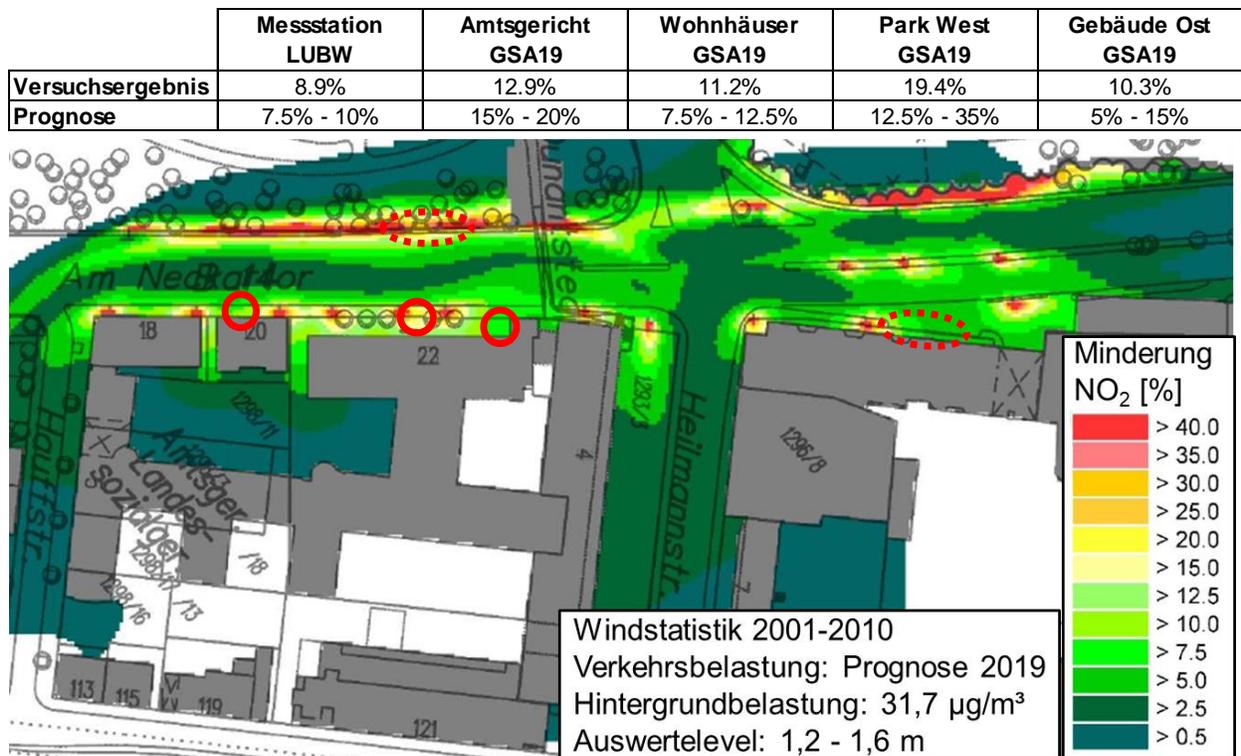


Abbildung 6.3 – Vergleich zwischen simulativer Prognose und Messergebnissen der Phase III

In Anbetracht der Modellannahmen für die Simulation (Abschnitt 4.4) und der abweichenden Auswertehöhe besteht zwischen Simulations- und Versuchsergebnissen eine sehr gute Übereinstimmung. Die resultierende NO₂-Minderung von 8.9% an der LUBW-Messtation deckt sich hervorragend mit dem prognostizierten Wert von 8.5%. Auch an den weiteren MANN+HUMMEL Messpunkten auf der Südwestseite besteht eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment. Trotz der mangelnden Referenzwerte im restlichen Bereich sind die Verhältnisse der Minderungswirkung an den verschiedenen Messpunkten stimmig. Es kann darum von einer Eignung der angewandten Simulationsmethodik zur Prognose der Feldwirkung der Anlagen ausgegangen werden. Die simulativ vorhergesagten 10% bis 15% NO₂-Minderung im Gehwegbereich und 30% im Nahfeld der Filtersäulen sind folglich plausibel.

6.2 Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen am Neckartor

Abbildung 6.4 zeigt die Langzeitentwicklung der NO₂-Konzentration am Neckartor und an den weiteren kontinuierlichen Messpunkten der LUBW in Stuttgart. Diese zeigt eine fortgesetzt positive Entwicklung über die letzten vier Jahre, insbesondere an den Verkehrshotspots Neckartor und Hohenheimer Straße. Dennoch lagen die Jahresmittelwerte dort bislang über dem Immissionsgrenzwert von 40 µg/m³ der 39. BImSchV. Einen ebenfalls positiven Trend weisen die Konzentrationen der Feinstaubfraktionen PM₁₀ und PM_{2.5} auf (vgl. Tabelle 6.6 und Abbildung 6.5). Der Jahresgrenzwert für PM₁₀ wird seit 2011 eingehalten, die Anzahl der Überschreitungstage unterschritt 2019 zum zweiten Mal in Folge die zulässigen 35 Ereignisse. Dabei stellt sich die Frage, wie viele Überschreitungstage im Jahr 2019 durch Einsatz der Filtersäulen vermieden werden konnten. Wegen der sehr hohen Schwankungsbreite der PM₁₀-Schadstoffminderung (vgl. Abbildung 6.1) kann für einzelne Tage keine eindeutige Aussage getroffen werden, ob diese ohne die Filteranlagen über dem Grenzwert gelegen hätten.

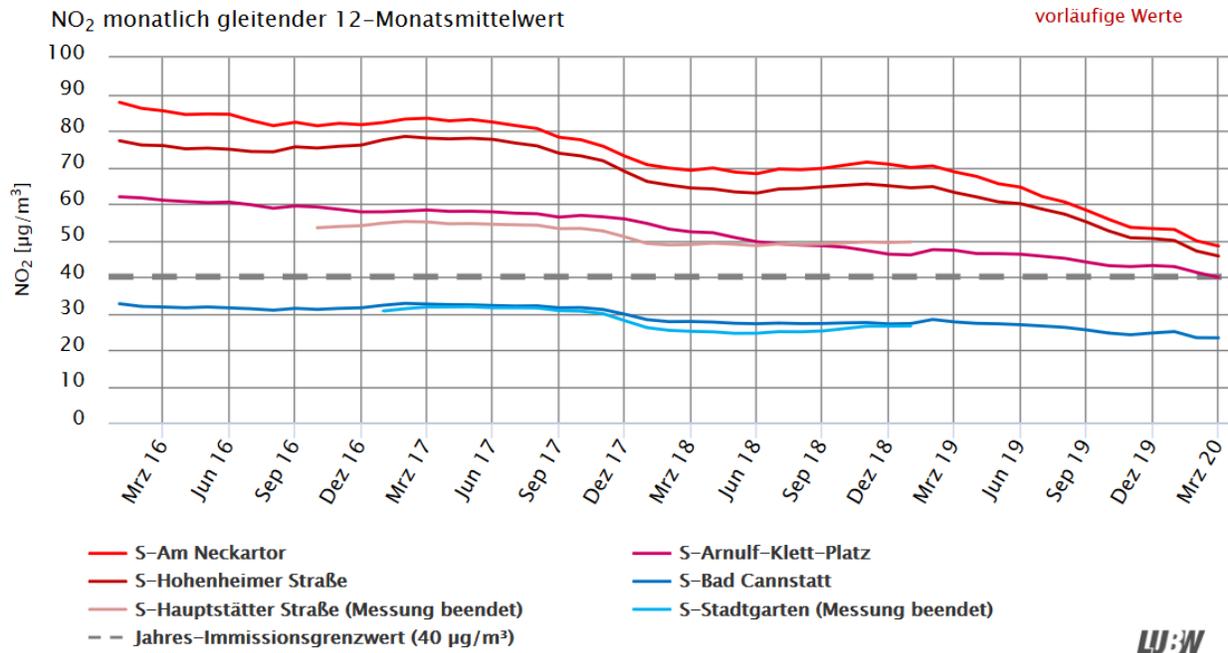


Abbildung 6.4 - Langzeit-Quervergleich der Stuttgarter LUBW-Messstationen für NO₂. Quelle: LUBW 2020a

Tabelle 6.6 - Vergleich der aktuellen Schadstoffkonzentrationen mit Vorjahren und Vorjahresquartalen. Quellen: LUBW (2020b), LUBW (2020c). Quartalswerte Q1/2020 bei Veröffentlichung verfügbar bis einschließlich 24.3.

	2019	2018	2017	2020 Q1	2019 Q1	2018 Q1	2017 Q1
PM10 Mittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	28	29	35	21	32	34	54
PM10 Überschreitungstage	27 (25)	21 (20)	45 (41)	7	19	16	35
PM2.5 Mittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	13	14	16	9	15	16	27
NO ₂ Mittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	53	71	73	40	59	67	83

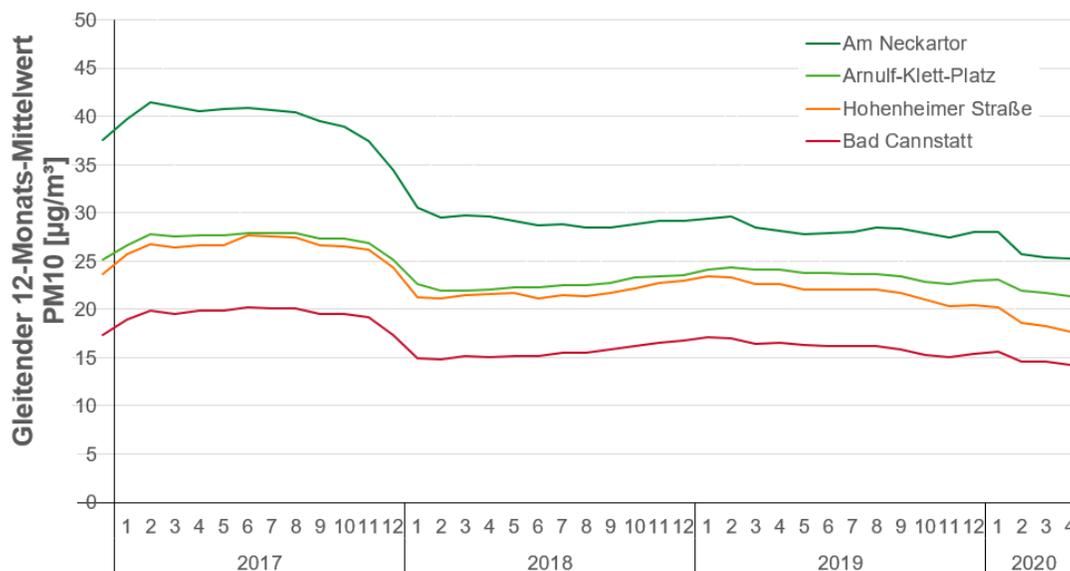


Abbildung 6.5 - Langzeit-Quervergleich der Stuttgarter LUBW-Messstationen für PM10. Quelle: LUBW 2020a, Stand: 24.3.20

Insofern bleibt lediglich die Möglichkeit einer Schätzung. Hierfür werden speziell die Tage mit PM10-Mittelwerten von $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ betrachtet. Im Jahr 2019 gab es 14 solche Tage. Rechnet man den jeweiligen Tagesmittelwert mit der mittleren prozentualen Schadstoffsenkung aus der entsprechenden Phase sowie Gewichtung von 100% für Vollbetrieb und 50% für den Schaltversuch hoch, liegen sechs dieser Tage über dem Grenzwert. Unter Berücksichtigung vorliegender Daten aus dem Schaltversuch zu den Tagen und der Höhe des hochgerechneten Wertes lässt sich schließlich eine Abschätzung treffen. So wurde am 20.1.19 die Überschreitung mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit durch den Betrieb der Filter Cubes verhindert. Am 22.3 und 16.12. war dies mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenso der Fall. An zwei weiteren Tagen sind die Ergebnisse knapper. Am 28.2. und 26.6. liegt die Unterschreitung tendenziell nicht an den Anlagen. Deshalb wird ein Umfang von 3-5 vermiedenen Überschreitungstagen geschätzt. Anstatt der 27 Überschreitungstage hätte es in 2019 also etwa 30-32 Überschreitungstage gegeben. Dabei sind noch keine Tage eingeschlossen, an denen überproportional starke PM10-Senkungen zu Tagesmittelwerten unter $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ geführt haben könnten.

Die Mittelwerte für das 1. Quartal 2020 in Tabelle 6.6 zeigen, dass sich die positive Entwicklung über den Verlauf des Projekts fortgesetzt hat. Die Quartalsmittelwerte für NO_2 , PM10 und PM2.5 liegen auf dem niedrigsten jemals gemessenen Niveau. Der NO_2 -Mittelwert liegt bei $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Gegenüber dem Vorjahresquartal gingen die NO_2 - und PM10-Werte um etwa ein Drittel zurück. Die bislang erst 7 kumulierten PM10-Überschreitungstage stimmen zudem optimistisch, dass dieses Kriterium im Jahr 2020 zum dritten Mal in Folge erfüllt werden kann. Obwohl die Messstation am Neckartor weiterhin die höchsten Messwerte der kontinuierlichen Messstellen im Stuttgarter Stadtgebiet aufweist, schwindet der Abstand der Konzentrationen von PM10 und insbesondere NO_2 gegenüber den Messstellen Arnulf-Klett-Platz und Bad Cannstatt allmählich.

Neben den kontinuierlichen Spot-Messungen führte die LUBW in 2019 im Stuttgarter Stadtgebiet breitangelegte Messungen mit NO_2 -Passivsammlern durch (LUBW, 2020d). Deren Daten werden quartalsweise erhoben. Ergänzend zum Standort Neckartor wurden in den ersten Oktoberwochen 2019 an der Hohenheimer Straße und an der Pragstraße Filteranlagen von MANN+HUMMEL mit Aktivkohle-Kombifiltern zur NO_2 -Abscheidung installiert. Diese laufen seither im Dauerbetrieb. Die Schaltversuche der Phase III am Neckartor begannen am 20.9.19, also kurz vor dem Quartalswechsel. In Bezug auf die Messung mit den Passivsammlern kann der Schaltversuch vereinfacht als eine Form des Dauerbetriebs mit 50% der Anlagenleistung aufgefasst werden. An allen Anlagenstandorten sollten sich die Filter also auf die Werte des 4. Quartals auswirken. Tabelle 6.7 führt die LUBW-Messdaten im Quartalsvergleich für alle Standorte auf, an denen Daten aus den Quartalen 3 und 4 vorliegen. Der Vergleich der Messwerte zeigt, dass es an 10 von 10 Messpunkten im Bereich der Filteranlagen zu einem Rückgang der NO_2 -Konzentrationen im 4. Quartal kommt. Der Rückgang beträgt im Mittel $4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respektive 10%. An 37 der 39 verbleibenden Messpunkte ohne Filtersäulen kommt es hingegen zu Anstiegen der NO_2 -Konzentrationen, im Mittel um $6.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, beziehungsweise 28%. Dies gilt auch für den nicht mit Filteranlagen ausgerüsteten Verkehrs-Hotspot am Arnulf-Klett-Platz. Die Konzentration im Bereich der Anlagen geht demnach trotz gegenläufigem Trend im städtischen Hintergrund zurück. Abgesehen von der Inbetriebnahme der Filteranlagen ist den Autoren keine Emissionsminderungsmaßnahme bekannt, die im 4. Quartal 2019 in Stuttgart neu eingeführt wurde (vgl. Tabelle 5.1). Somit ist davon auszugehen, dass diese Verbesserungen zumindest anteilig auf die Filteranlagen zurückzuführen sind.

Tabelle 6.7 - NO₂ - Messergebnisse von LUBW-Messstationen und Passivsammlern in Stuttgart im 3. und 4. Quartal 2019. Quelle: LUBW, partiell veröffentlicht in LUBW (2020e)

Messstelle	NO ₂ -Messzeitraum- mittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		Differenz		Mess- verfahren	Kategorie
	2. Quartal	3.Quartal	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	[%]		
Stuttgart Am Kochenhof 5	21	29	8	38%	passiv	KOA
Stuttgart Am Kräherwald 91	18	28	10	56%	passiv	KOA
Stuttgart Am Neckartor	53	48	-5	-9%	kont.	Spot
Stuttgart Am Neckartor 18	48	42	-6	-13%	passiv	Spot Profil
Stuttgart Am Neckartor 20	44	41	-3	-7%	passiv	Spot Profil
Stuttgart Am Neckartor 22 am Baum	46	41	-5	-11%	passiv	Spot Profil
Stuttgart Am Neckartor 22 am Haus	44	38	-6	-14%	passiv	Spot Profil
Stuttgart Am Neckartor 22 auf Station (4 m)	50	49	-1	-2%	passiv	KOA
Stuttgart Arnulf-Klett-Platz	39	43	4	10%	kont.	LMN Verkehr
Stuttgart-Bad Cannstatt	19	28	9	47%	kont.	LMN städt. HG
Stuttgart Elbestraße 123	16	23	7	44%	passiv	KOA
Stuttgart Epplestraße 75	15	24	9	60%	passiv	KOA
Stuttgart Fellbacher Straße/Kilianstraße 28	14	23	9	64%	passiv	KOA
Stuttgart Freihofstraße 42	21	28	7	33%	passiv	KOA
Stuttgart Hallschlag 35	22	31	9	41%	passiv	KOA
Stuttgart Hauptstraße 69	23	29	6	26%	passiv	KOA
Stuttgart Hauptstraße 76	23	27	4	17%	passiv	KOA
Stuttgart Hedelfinger Straße 6	23	30	7	30%	passiv	KOA
Stuttgart Heilbronnerstraße 97	33	36	3	9%	passiv	KOA
Stuttgart Hohenheimer Straße	49	43	-6	-12%	kont.	Spot
Stuttgart Hohenheimer Straße 72	57	51	-6	-11%	passiv	KOA
Stuttgart Immenhofer Straße 42	26	26	0	0%	passiv	KOA
Stuttgart Imweg 47	21	30	9	43%	passiv	KOA
Stuttgart Kappelbergstraße 66	15	26	11	73%	passiv	KOA
Stuttgart Kirchheimer Straße 80	18	27	9	50%	passiv	KOA
Stuttgart Ludwigsburger Straße 115	25	31	6	24%	passiv	KOA
Stuttgart Ludwigsburger Straße 131	28	33	5	18%	passiv	KOA
Stuttgart Neckarstraße 94/96	32	38	6	19%	passiv	KOA
Stuttgart Neue Weinsteige 6A	28	33	5	18%	passiv	KOA
Stuttgart Olgastraße 121	23	30	7	30%	passiv	KOA
Stuttgart Pragstraße 88	50	47	-3	-6%	passiv	KOA
Stuttgart Pragstraße 90/92	59	51	-8	-14%	passiv	Sonder
Stuttgart Rohrackerstraße 22	27	30	3	11%	passiv	KOA
Stuttgart Römerstraße 20	20	27	7	35%	passiv	KOA
Stuttgart Rotebühlstraße 155	25	29	4	16%	passiv	KOA
Stuttgart Scharnhäuser Straße 18	18	25	7	39%	passiv	KOA
Stuttgart Schemppstraße 15 A/B	16	24	8	50%	passiv	KOA
Stuttgart Schwabstraße 8	24	29	5	21%	passiv	KOA
Stuttgart Schwieberdinger Straße 25	20	29	9	45%	passiv	KOA
Stuttgart Schubartstraße 20	20	30	10	50%	passiv	Spot HG
Stuttgart Solitudestraße 212	17	24	7	41%	passiv	KOA
Stuttgart Talstraße 41	49	47	-2	-4%	passiv	Sonder
Stuttgart Vaihinger Landstraße 111	11	20	9	82%	passiv	KOA
Stuttgart Vaihinger Straße 94a	26	27	1	4%	passiv	Sonder
Stuttgart Wagenburgstraße 78	30	38	8	27%	passiv	KOA
Stuttgart Wagrainstraße 73 A/B	18	24	6	33%	passiv	KOA
Stuttgart Waiblinger Straße	32	38	6	19%	passiv	Spot
Stuttgart Welfenstraße 63	21	26	5	24%	passiv	KOA
Stuttgart Wiener Straße 71	18	27	9	50%	passiv	KOA

kont.: kontinuierliche Messung; passiv: passive Messung; KOA: ergänzende Messungen im Auftrag des Koalitionsausschusses; LMN städt. HG: Luftmessnetz städtischer Hintergrund; LMN Verkehr: Luftmessnetz verkehrsnaher Standort; Sonder: Sondermessung verkehrsnaher Standort; Spot: Spotmessung verkehrsnaher Standort; Spot Profil: Spotmessung Profilmesspunkt; Spot HG: Spotmessung Hintergrundmesspunkt.

6.3 In-situ Versuche

Die Vor-Ort-Versuche dienen der Überprüfung und Visualisierung der auslegungsgemäßen Filterfunktion unter realen Einsatzbedingungen sowie der Ableitung sinnvoller Versuchsparameter. Ersteres ist insbesondere für eine Überprüfung der Eingangsparameter der MISKAM-Simulationen notwendig.

6.3.1 Vermessung des NO₂-Abscheidegrades mittels ICAD-Messungen

Die mittels der MISKAM-Simulationen prognostizierte Minderungswirkung der Anlagen beruht auf der Annahme, dass die Filter über ihre Lebensdauer gemittelt 80% des angesaugten NO₂ abscheiden. Ausgehend von Werten weit über 90% sinken die NO₂-Abscheidegrade der eingesetzten Aktivkohlefilterelemente mit zunehmender Betriebszeit ab. Um den Mittelwert von 80% zu halten, müssen die Filter regelmäßig gewechselt werden. Die Vorhersage des Wechselintervalls wiederum bedarf einer technischen Bauteilauslegung, die auf Labordaten und Felderprobungsergebnissen beruht. Unter den Randbedingungen der Simulation wurden für die Aktivkohlefilter der Filter Cube Generation 1 (Phase II) 14 Tage und für Generation 2 (Phase III) 30 Tage Standzeit vorhergesagt. Zur Überprüfung dieser Angaben wurde mit dem Airyx ICAD Analyzer der NO₂-Abscheidegrad der Filterelemente in den Filter Cubes direkt bestimmt. Dafür wurde das Messgerät in einer Säule an der Ecke Heilmannstraße/B14 verbaut (vgl. 5.3.1) und die Roh- und Reingaskonzentrationen kontinuierlich gemessen.

Die Ergebnisse bestätigen die ursprüngliche Standzeitvorhersage gemäß der Bauteilauslegung auch unter den realen Randbedingungen im Feldversuch. Die im Versuch ermittelten Abscheidegradverläufe für die beiden Filtertypen ergaben Standard-Wechselintervalle von 11 Tagen für die Elemente des Filter Cube Generation 1 und 32 Tagen für die der Filter Cube Generation 2. Trotz des höheren Volumenstroms der 2. Filter Cube Generation ist die Standzeit der optimierten Filterelemente etwa dreimal so hoch wie in der konventionellen Bauform der Generation 1.

6.3.2 Vor-Ort-Messungen zur Visualisierung des Anlageneffekts auf die Feinstaub-Umgebungskonzentration

In Phase I wurden Vor-Ort-Messkampagnen mit mobilen Feinstaubmessgeräten vorgenommen. Hierfür wurden jeweils Schaltversuche über einige Stunden durchgeführt. Zwar lassen sich bei Schaltversuchen mit derart beschränktem Umfang keine quantitativ belastbaren Ergebnisse erzielen (vgl. 5.1.1), zur Visualisierung der Flächenwirkung der Anlagen sind sie allerdings sehr gut geeignet. Damit innerhalb jeder Versuchsreihe mehrere AN- und AUS-Zustände abgedeckt werden konnten, musste das Schaltintervall auf 20-30 Minuten verkürzt werden. Da in so kurzen Zeitintervallen aggregierte PM10-Werte deutlich höhere relative Standardabweichungen aufweisen als die Partikelanzahlkonzentrationen (s. Abschnitt 5.1.3), werden die Messdaten anhand dieser Größe dargestellt. Die abgebildeten Konzentrationssprünge zwischen AN- und AUS-Zustand fallen dann deutlich geringer aus als für PM10, weil die Filter für die feinen Fraktionen niedrigere Abscheidegrade aufweisen.

Exemplarisch soll hier ein Versuch vom 18.1.2019 aufgeführt werden. Dieser und weitere Versuche finden sich in Yildiz (2019). Die Simulationen aus Abschnitt 4.3 sagten steile Gradienten für die Feinstaubminderung entlang der Bebauung auf der Westseite voraus. Mit dem in Abbildung 6.6 dargestellten Versuch sollte der Verlauf der Schadstoffminderung zwischen der LUBW-Messstation und dem nächstgelegenen Filter Cube an mehreren Stützpunkten aufgezeigt werden. Als Referenzpunkt wurde ein Messgerät außerhalb des unmittelbaren Wirkbereichs der Anlagen positioniert, um die mit dem Tagesgang verbundenen Konzentrationsänderungen zwischen den Schaltphasen ausgleichen zu können.

In den Messdaten in Abbildung 6.4 ist der Verlauf der Schaltzustände deutlich sichtbar. Während der AN-Phasen sinken die Konzentrationen und steigen in den AUS-Phasen wieder an. Unmittelbar hinter dem Filter Cube erfolgt eine Schwankung der Anzahlkonzentration um 25%-30%. Sechs Meter entfernt sind es etwa 10%, acht Meter entfernt nur noch 5%. Die konzentrationsenkende Wirkung sinkt also erwartungsgemäß mit zunehmendem Abstand zu den Säulen. Der an der LUBW-Messstation zu erwartende Effekt ist demnach geringer als in anderen Bereichen der Installation, in denen eine höhere Dichte an Filtersäulen vorliegt.

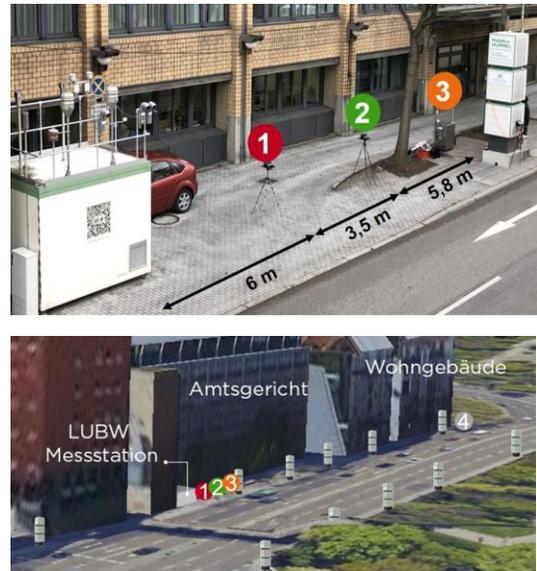
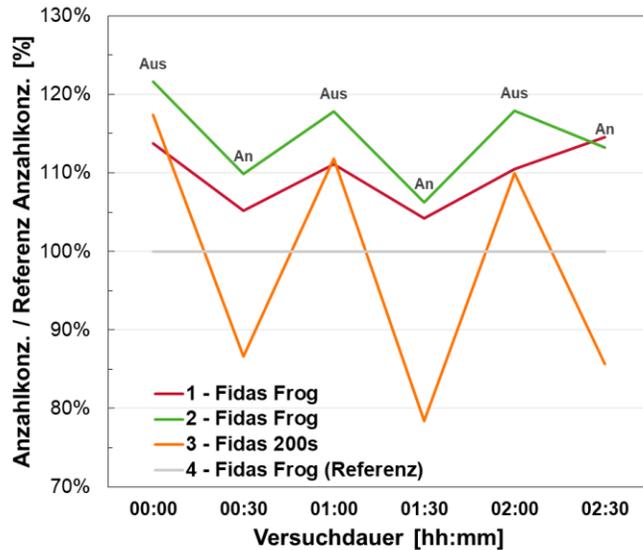


Abbildung 6.6 - Verlauf der relativen Anzahlkonzentration an mehreren Messpunkten entlang der Bebauung auf der Westseite, 18.01.2019.

6.4 Bewertung von Regelungskonzepten auf Basis der Schaltversuche

Durch angepasste Regelungskonzepte lassen sich standortabhängige Potenziale zur Senkung des Stromverbrauchs der Anlagen nutzen. Hierfür muss zunächst analysiert werden, unter welchen Bedingungen die Anlagen geringe Schadstoffminderungen erbringen. Der große Umfang des Schaltversuchs der Phase III erlaubte es, die Wirkung der Filteranlagen unter verschiedenen Randbedingungen gezielt zu untersuchen. Dies geschieht durch Unterteilung des Datensatzes nach verschiedenen Parametern. Dabei ist es notwendig, dass die Untergruppen jeweils ausreichend groß genug sind, um aussagekräftige Mittelwerte zu liefern. Ist dies erfüllt, kann bewertet werden, welchen Einfluss die einzelnen Datengruppen auf das Gesamtergebnis haben und ob dies in angemessener Relation zur eingesparten Strommenge steht. Voraussetzung für die Umsetzung einer entsprechenden Regelstrategie ist die Verfügbarkeit von Live-Messdaten, anhand derer die Regelung stattfinden kann.

6.4.1 NO₂-Konzentration als Regelgröße

Ein möglicher Regelparameter für die Anlagen ist die NO₂-Konzentration. Je niedriger die Rohgaskonzentration, desto geringere Absolutmengen an NO₂ binden die Filter pro Zeiteinheit. Betriebsstunden mit sehr niedriger Konzentration tragen deshalb unterproportional zur gefilterten Gesamtmenge bei. Es lässt sich ein Schwellwert für die NO₂-Konzentration als Regelgröße einführen, unterhalb welchem die Anlagen abgeschaltet werden. Zur Bewertung des Einflusses einer solchen schwellwertgebundenen Abschaltung aus dem Schaltversuch wurden zunächst Blöcke benachbarter AUS- und AN-Intervalle gebildet. Dann wurde der Datensatz anhand der Konzentration im AUS-Zustand aufgespalten. Anschließend erfolgte die Berechnung der absoluten Konzentrationsänderung und des Anteils an der Gesamtleistung, der in den Zeitintervallen unterhalb des Schwellwertes erbracht wurde.

Tabelle 6.8 zeigt für vier Schwellwerte der NO₂-Konzentration an der LUBW-Messstation den zu erwartenden Rückgang der Schadstoffminderung an den verschiedenen Messpunkten. Die angegebenen Prozentwerte beziehen sich auf den Rückgang der in 6.1.3 aufgeführten Minderungswirkungen (z.B. 11% von 8.9% bei NO₂ und einem Schwellwert von 30 µg/m³). Der Anteil der Zeitfenster unter dem Schwellwert entspricht wiederum näherungsweise dem Anteil des durch Abschaltung einsparbaren Stroms. Je geringer das Verhältnis aus Leistungsrückgang und einsparbarer Betriebszeit, desto sinnvoller ist die Regelung.

Je höher der Schwellwert liegt, desto größer ist die Datenmenge im Datenblock unter dem Schwellwert. Bei den MANN+HUMMEL Sensoren liegen in einigen Fällen so geringe Datenumfänge vor, dass die Werte wegen der geringen zu erwartenden Genauigkeit ausgeklammert wurden. Bis zu einem Schwellwert von 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ liegt der zu erwartende Leistungsrückgang für alle Schadstoffe im niedrigen bis mittleren einstelligen Prozentbereich. Beim NO_2 liegen besonders günstige Verhältnisse vor, weil das Verhältnis aus Leistungsrückgang zum Anteil der Betriebsunterbrechungen besonders klein ist. Bei Schwellwerten von 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und höher wird dieses Verhältnis tendenziell ungünstiger. An der LUBW-Messstation sind die potenziellen Leistungseinbußen geringer als an den Messpunkten von MANN+HUMMEL. Ursächlich dafür ist, dass der Datensatz für die Messstation exakt am Schwellwert aufgetrennt wird, während die Daten für die zeitgleich erhobenen Daten an den restlichen Messpunkten noch den ortstypischen hohen Schwankungen unterworfen sind. Ein angemessener Schwellwert für eine Anlagenregelung anhand der NO_2 -Konzentration der LUBW-Messstation scheint im Bereich um 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ zu liegen. Bei höheren Schwellwerten würde sich die Einbeziehung weiterer Sensordaten empfehlen, um Situationen auszuschließen, in denen an der Messstelle deutlich niedrigere Konzentrationen vorliegen als im Umfeld.

Tabelle 6.8 Abhängigkeit der Leistungsminderung von der Schaltschwelle bei Nutzung der NO_2 -Werte der LUBW-Messstation als Referenz. Eingeklammerte Werte beruhen auf sehr geringen Datenmengen.

Schwellwert NO_2 @ LUBW [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		Erwarteter Rückgang der Schadstoffminderung			
		20	25	30	35
Zeitfenster unter dem Schwellwert		6%	10%	18%	26%
Messstation / LUBW	NO_2	1%	2%	11%	11%
Amtsgericht / GSA19		(6%)	(11%)	13%	26%
Wohnhäuser / GSA19		(8%)	(13%)	6%	23%
Park West / GSA19		(7%)	(6%)	11%	18%
Schwabengarage / GSA19		(10%)	(12%)	19%	31%
Messstation / LUBW	PM10	3%	7%	14%	18%
Park West / FIDAS 200s		1%	3%	11%	17%
Messstation / LUBW	PM2.5	3%	6%	24%	15%
Amtsgericht / FDS18		(0%)	(-1%)	27%	21%
Wohnhäuser / FDS18		(1%)	(-1%)	30%	18%
Park West / FIDAS 200s		1%	4%	16%	19%
Park West / FDS18		(0%)	(3%)	13%	16%
Park West / FDS18		(2%)	(-3%)	21%	15%
Schwabengarage / FDS18		(10%)	(-10%)	42%	29%

6.4.2 Windstärke als Regelgröße

Für die Bewertung des Windeinflusses auf die Versuchsergebnisse liegen zwei Datenquellen vor. Zum einen wurde mit der Wetterstation WS600 über das Palas Fidas 200 am Messpunkt Parkseite West die Windrichtung und Windgeschwindigkeit in unmittelbarer Straßennähe auf 1.5 m Höhe gemessen. Zum anderen können die Wettermessdaten der LUBW-Station Bernhausen herangezogen werden, die als Indikatoren für die Großwetterlage im Neckartal genutzt werden können.

Die Windgeschwindigkeiten der Vor-Ort-Messung sind niedriger als die Bernhausener Werte. Der Median der Halbstundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit im Untersuchungszeitraum lag an der WS600 bei 0.4 m/s, in Bernhausen hingegen bei 1.1 m/s. Auch die Windrichtung unterscheidet sich. Die Hauptwindrichtung am WS600 war in 92% der Intervalle Ost-/Nordost und damit fahrbahnparallel. Die lokalen Strömungsverhältnisse im Bereich der Anlagen sind demnach maßgeblich durch den Verkehr beeinflusst. Die in Bernhausen überwiegenden West- und Südwestwinde kommen in den Daten des WS600 selten vor und dann nur bei hohen bis sehr hohen Windgeschwindigkeiten von über 1 m/s.

Tabelle 6.9 zeigt die Gesamtbilanz des Schaltversuchs für Datensätze, die am Median der Windgeschwindigkeit getrennt wurden. Dabei ist zunächst zu erkennen, dass die prozentualen Minderungen der Schadstoffkonzentrationen bei hoher Windgeschwindigkeit niedriger ausfallen als bei niedriger Windgeschwindigkeit. Das führt zu der Hypothese, dass sich eine vorteilhafte Anlagenregelung mit der Windgeschwindigkeit als Regelgröße implementieren lässt. Hierfür sind allerdings die Differenzen zwischen den Mittelwerten im AN- und AUS-Zustand ausschlaggebend, die nicht in allen windstillen Szenarien größer ausfallen. Am WS600 tritt bei den Konzentrationen von NO_2 und PM_{10} sogar der umgekehrte Fall auf. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass die Windgeschwindigkeit dort mit der Verkehrsdichte korreliert. Hohe Windgeschwindigkeit impliziert also starken Verkehr und deshalb starken Schadstoffeintrag. Die Nutzung eines Windgeschwindigkeitssensors in Straßennähe wird deshalb für die Anlagenregelung am Neckartor als ungeeignet eingestuft. Weil die Aufteilung nach der Bernhausener Windgeschwindigkeit hingegen die erwarteten niedrigen Konzentrationen für hohe Windgeschwindigkeiten liefert (s. Tabelle 6.9 unten), wurde die Aufspaltung mit dem 90%-Perzentil der dortigen Windgeschwindigkeit (3.2 m/s) als Schwellwert wiederholt. Dies entspricht einer Anlagenabschaltung im obersten Zehntel der windstärksten Zeitfenster. Der Verwurf dieser Zeitfenster führte letztlich zu einer Rückgang der Anlagenleistung um mehr als 10%. Eine Regelung anhand der existierenden Wetterstationen ist deshalb kontraproduktiv. Weil die NO_2 -Konzentration negativ mit der Windgeschwindigkeit korreliert ist, sind Starkwindszenarien bei einer Regelung über die NO_2 -Konzentration implizit mit abgedeckt. Darum ist die NO_2 -Konzentration als Leitindikator besser geeignet als die Windstärke.

Tabelle 6.9 Aufteilung der Schaltversuchsdaten nach der Windstärke.
 Oben: Messdaten oberhalb und unterhalb des Medians der WS600
 Unten: Messdaten der LUBW-Messstation Bernhausen

		Messung vor Ort							
		Windgeschwindigkeit > 0.4 m/s				Windgeschwindigkeit < 0.4 m/s			
		Mittelwert AN [µg/m³]	Mittelwert AUS [µg/m³]	Differenz [µg/m³]	Min- derung	Mittelwert AN [µg/m³]	Mittelwert AUS [µg/m³]	Differenz [µg/m³]	Min- derung
Messstation / LUBW	NO ₂	47.9	50.4	2.5	5.0%	43.0	47.4	4.4	9.4%
Alle Messpunkte / M+H		50.1	55.2	5.0	9.0%	39.5	44.5	5.0	11.1%
Messstation / LUBW	PM10	23.0	23.7	0.8	3.3%	18.4	19.8	1.4	7.3%
Park West / FIDAS 200s		29.7	35.0	5.3	15.2%	14.7	19.8	5.1	25.6%
Messstation / LUBW	PM2.5	9.5	9.9	0.3	3.3%	10.0	10.9	1.0	8.9%
Alle Messpunkte / M+H		11.2	12.4	1.2	8.8%	10.5	11.8	1.3	11.0%

		Bernhausen (LUBW)							
		Windgeschwindigkeit > 1.1 m/s				Windgeschwindigkeit < 1.1 m/s			
		Mittelwert AN [µg/m³]	Mittelwert AUS [µg/m³]	Differenz [µg/m³]	Min- derung	Mittelwert AN [µg/m³]	Mittelwert AUS [µg/m³]	Differenz [µg/m³]	Min- derung
Messstation / LUBW	NO ₂	43.2	47.1	3.9	8.2%	47.4	51.0	3.6	7.1%
Alle Messpunkte / M+H		49.2	54.1	4.9	9.0%	40.1	45.2	5.1	11.1%
Messstation / LUBW	PM10	16.6	17.7	1.1	6.0%	25.0	26.9	1.9	7.0%
Park West / FIDAS 200s		20.7	25.3	4.6	18.2%	23.3	31.5	8.2	26.1%
Messstation / LUBW	PM2.5	6.9	7.3	0.4	6.1%	12.8	13.7	0.9	6.5%
Alle Messpunkte / M+H		9.7	10.6	0.9	8.4%	12.3	14.3	1.9	12.8%

6.4.3 Wirkung der Anlagen nach Tageszeit

Analog zu den vorangegangenen Betrachtungen kann auch bewertet werden, zu welchen Tageszeiten die Anlagen am Neckartor unterproportionale Leistungsanteile erbringen. Hierfür müssen Zeitblöcke von mindestens drei Stunden Länge erhalten bleiben, damit die resultierenden Mittelwerte Aussagekraft genießen. Der Beitrag aller möglichen dreistündigen und vierstündigen Zeitfenster zur Gesamtleistung der Filteranlagen wurde berechnet. Unter den dreistündigen Zeitfenstern steuerte der Block von 1 Uhr bis 4 Uhr Ortszeit mit 3.1% für NO₂ und 6.6% für PM10 am wenigsten zum Gesamtergebnis bei. Dem gegenüber steht eine Einsparung bei der Betriebszeit von 12.5%. Unter den vierstündigen Zeitfenstern war es der Block von 1 Uhr bis 5 Uhr Ortszeit, mit 7.4% des NO₂ und 9.2% des PM10 (Betriebszeiteinsparung 16.7%). Die Nachtabschaltung der Säulen ist deshalb am Neckartor ein effizientes Mittel zur Energieoptimierung und in der Wirkung vergleichbar zu einer Anlagenregelung über NO₂.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen eines Pilotprojekts von MANN+HUMMEL, gefördert vom Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg und unterstützt von der Landeshauptstadt Stuttgart, ging im Dezember 2018 am Stuttgarter Verkehrs-Hotspot „Am Neckartor“ die erste großflächig angelegte Installation von Filtersäulen des Typs „Filter Cube“ in Betrieb. Anschließend wurden über das Jahr 2019 drei Hardwarekonfigurationen erprobt. Ausgehend von 17 Filteranlagen mit reinen Feinstaubfiltern zur PM10-Senkung (Phase I) erfolgte zunächst eine Umrüstung auf Aktivkohle-Kombifilterelemente zur Erprobung des grundsätzlichen Minderungspotentials von NO₂ durch derartige Filter (Phase II) und schließlich der Ausbau des Projekts auf 23 leistungsstärkere Filtersäulen mit optimierten NO₂-Filterelementen (Phase III).

Durch Dauerversuche mit einem Gesamtumfang von 144 Messtagen konnten die gesetzten Ziele aller drei Phasen für die Schadstoffminderung von NO₂ und PM10 bestätigt werden. Die Versuchsmethodik beruhte auf einer Dauermessung der Schadstoffkonzentrationen bei periodischem Wechsel des Betriebszustandes. Als Ergebnis lagen Mittelwerte der Schadstoffkonzentrationen im AN- und AUS-Zustand der Anlagen vor. Der Nachweis der Minderungswirkung für den maßgeblichen Schadstoff (Phase I: PM10, Phase II & III: NO₂) erfolgte jeweils mit hoher statistischer Signifikanz von 99.5% und höher.

Im Versuchszeitraum der Dauerversuche wurden an der offiziellen Messstation der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) „Am Neckartor“ folgende Reduzierungen festgestellt:

- Phase I: PM10-Reduzierung um 10.4%
- Phase II: NO₂-Reduzierung um 6.0%
- Phase III: NO₂-Reduzierung um 8.9%, PM10-Reduzierung um 6.7%

Darüber hinaus wurden im Lauf der Versuchsphase III die öffentlichen Messdaten durch ein von MANN+HUMMEL errichtetes Messnetz ergänzt, mit dem die Wirkung der Filtersäulen auf NO₂- und Feinstaubkonzentrationen an weiteren Punkten im Messbereich untersucht wurde. Dabei ergaben sich NO₂-Reduzierungen von 8.0% bis 19.4% (6 Messpunkte), PM10-Minderungen von 20.8% (1 Messpunkt) und PM2.5-Minderungen von 4.7% bis 20.2% (7 Messpunkte).

Den Versuchen in Phase I und III gingen Voruntersuchungen durch MISKAM-Simulationen durch ein unabhängiges Gutachterbüro (Ingenieurbüro Rau, Heilbronn) voraus, die im schützenswerten gebäudenahen Bereich Minderungswirkungen von 10-30% in Aussicht stellten. Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse an den Messpunkten mit den numerischen Prognosen. Demzufolge ist unter den getroffenen Modellannahmen von einer Eignung der Simulationsmethode zur Vorhersage der Wirkung von Filteranlagen im Freiluftbereich auszugehen. Dies ist insbesondere für Aussagen über die Flächenwirkung der Anlagen von Relevanz, weil selbst Dauereperimente nur räumlich begrenzte Aussagen über Konzentrationsminderungen erlauben. Die Simulation kann hier die fehlende Flächeninformation liefern.

Neben den Schaltversuchen liefern auch Daten von NO₂-Passivsammlern der LUBW im Stuttgarter Stadtgebiet starke Indizien für eine Wirkung der Filteranlagen. Die MANN+HUMMEL Filteranlagen am Neckartor, der Hohenheimer Straße und der Pragstraße gingen zwischen Mitte September und Mitte Oktober 2019 in Betrieb. An 10 von 10 Messpunkten im Einflussbereich von Filteranlagen reduzierte sich daraufhin die NO₂-Konzentration vom 3. auf das 4. Quartal, im Mittel um 10% (-4.8 µg/m³). Dies steht in auffälligem Kontrast zum Trend im restlichen Stadtgebiet, wo 37 von 39 Messpunkten steigende Werte verzeichneten (Mittelwert +28% bzw. +6.8 µg/m³).

8 Danksagungen

Die MANN+HUMMEL GmbH dankt dem Verkehrsministerium Baden-Württemberg für die Förderung des Projekts. Zudem danken die Autoren Herrn Dr. Rayk Rinke vom Amt für Umweltschutz Stuttgart und Prof. Dr. Achim Dittler vom Karlsruher Institut für Technologie für die fachlichen Konsultationen sowie der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg für die Bereitstellung der Messdaten.

9 Quellen

Bachmann, J., Kana, C., Klein, S. (2018). „*Straßenreinigung Feinstaub*“ - *Reinigungsversuch zur Feinstaubbekämpfung in Stuttgart rund um dem Bereich „Am Neckartor“*, Stadt Stuttgart : Projekt- und Auswertungsbericht.

Düring, I.; Bächlin, W.; Ketzler, M.; Baum, A.; Friedrich, U.; Wurzler, S. (2011) „*A new simplified NO/NO₂ conversion model under consideration of direct NO₂-emissions*“, Stuttgart: Meteorologische Zeitschrift, Vol. 20, No. 1, 067-073 © by Gebrüder Borntraeger 2011 (published online).

Eichhorn, J. (1989), „*Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen, mikroskaligen Stadtklimamodells*.“ Diss. Meteorol. Inst. Univ. Mainz, Mainz.

Eichhorn, J. (2011), „*MISKAM Handbuch zu Version 6*“, Wackernheim: giese-eichhorn umweltmeteorologische software, 2011.

INFRAS AG, (2017), *HBEFA 3.3 „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs - Version 3.3“*; U. Dessau, Hrsg., Bern/Schweiz, 2017.

Lenschow et al. (2001), „*Some ideas about the sources of PM₁₀*“, Atmospheric Environment 35 Supplement No. 1 (2001) S23–S33

LUBW, (2015), „*Modellierung verkehrsbedingter Immissionen – Anforderungen an die Eingangsdaten – Grundlage HBEFA 3.1, - Aktualisiert auf HBEFA 3.2*“

LUBW, (2020a), Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. „Daten und Kartendienst der LUBW“. Abgerufen am 26.04.2020 von <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/>.

LUBW, (2020b), Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. „Entwicklung der Immissionsbelastung anhand gleitender 12-Monatsmittelwerte“. Abgerufen am 01.04.2020 von <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/luft/gleitende-12-monats-mittelwerte>.

LUBW, (2020c), Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. „Jahreswerte für Baden-Württemberg“. Abgerufen am 01.04.2020 von <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/luft/jahreswerte>.

LUBW, (2020d), Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. „Ergänzende NO₂-Messungen im Stadtgebiet Stuttgart im Auftrag des Koalitionsausschusses“. Abgerufen am 26.04.2020 von <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/luft/erganzende-messungen-in-stuttgart>.

LUBW, (2020e), Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. „Grenzwertüberschreitungen“. Abgerufen am 26.04.2020 von <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/luft/grenzwertueberschreitungen>.

LRP Stuttgart, (2018), Regierungspräsidium Stuttgart, Referat 54.1. „Luftreinhalteplan für den Regierungsbezirk Stuttgart, Teilplan Landeshauptstadt Stuttgart - 3. Fortschreibung des Luftreinhalteplanes zur Minderung der PM10- und NO₂-Belastungen“. Abgerufen am 28.04.2020 von https://rp.baden-wuerttemberg.de/rps/Abt5/Ref541/Luftreinhalteplan/541_s_luft_stutt_LRP_3_FS_2018.pdf

LRP Stuttgart, (2019), Regierungspräsidium Stuttgart, Referat 54.1. „Luftreinhalteplan für den Regierungsbezirk Stuttgart, Teilplan Landeshauptstadt Stuttgart - 4. Fortschreibung des Luftreinhalteplanes zur Minderung der PM10- und NO₂-Belastungen“. Abgerufen am 28.04.2020 von https://rp.baden-wuerttemberg.de/rps/Abt5/Ref541/Luftreinhalteplan/541_s_stutt_LRP_4_FS_2019.pdf

Rau, M. (2000), „Vergleich berechneter (MISKAM) und gemessener (Windkanal) Wind- und Konzentrationsfelder für ein U-Gebäude“, Projekt im Auftrag des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen; unveröffentlicht.

Röckle, R.; Richter, C.-J. (1995), „Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen - Modellrechnungen -“, Abschlussbericht PEF 92/007/02, Forschungszentrum Karlsruhe. (<http://bwplus.fzk.de>).

Schneider, Rau, Christoph, (2018), „Ergänzung zum Gesamtwirkungsgutachten zur immissionsseitigen Wirkungsermittlung der Maßnahmen der 3. Fortschreibung des Luftreinhalteplans Stuttgart, weitere Berechnungen, Verkehrsbeschränkungen Variante 1 – 4“ Kurzbericht im Auftrag des Regierungspräsidiums Stuttgart

Welch, B.L., (1947). „The generalization of “Student’s” problem when several different population variances are involved“. *Biometrika*, 34, 1/2, pp. 28–35.

Yildiz, T. (2019). „Experimentelle Studie zur Wirksamkeit von Anlagen zur Abscheidung von Feinstaub aus der Umgebungsluft“, Masterarbeit, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, KIT.

10 Anhang - Statistische Parameter für die Schaltversuche

Tabelle 10.1 - Kenngrößen des Welch-Tests auf die Differenz der Mittelwerte für die Schaltversuche, basierend auf den Ergebnissen für die LUBW-Messstation.

Freiheitsgrade (Welch-Satterthwaite)	Schadstoff			
	NO2	PM10	PM2.5	O3
Phase 1	859	883	916	-
Phase 2	1289	1301	1295	1269
Phase 3	3245	3216	3225	3113
Phase 3. 1. halbe h	1554	1545	1547	1480
Phase 3. 2. halbe h	1560	1538	1541	1496

t-Werte	Schadstoff			
	NO2	PM10	PM2.5	O3
Phase 1	0.05	2.72	1.70	-
Phase 2	2.67	1.30	1.53	1.20
Phase 3	5.33	2.70	2.34	2.72
Phase 3. 1. halbe h	3.13	1.61	1.32	1.79
Phase 3. 2. halbe h	4.52	2.03	1.95	2.22

p-Werte (einseitig)	Schadstoff			
	NO2	PM10	PM2.5	O3
Phase 1	48%	0.3%	4.5%	-
Phase 2	0.4%	9.7%	6.3%	11.4%
Phase 3	0.000005%	0.3%	1.0%	0.3%
Phase 3. 1. halbe h	0.09%	5.3%	9.3%	3.7%
Phase 3. 2. halbe h	0.0003%	2.1%	2.6%	1.3%

p-Werte (zweiseitig)	Schadstoff			
	NO2	PM10	PM2.5	O3
Phase 1	95.7%	0.7%	9.0%	-
Phase 2	0.8%	19.3%	12.7%	22.9%
Phase 3	0.00001%	0.7%	2.0%	0.7%
Phase 3. 1. halbe h	0.2%	10.7%	18.6%	7.4%
Phase 3. 2. halbe h	0.0007%	4.3%	5.1%	2.7%

Tabelle 10.2 – Parameter des Welch-Tests auf die Differenz der Mittelwerte für die Schaltversuche, Gesamtbilanz für alle Datenquellen.

Messposition	Messzeitraum	Datenquelle	Messgröße	Messergebnis Gesamtbilanz				Welch-Test							
				Mittelwert AN [µg/m³]	Mittelwert AUS [µg/m³]	Differenz [µg/m³]	Minderung	Standard-abw. AN [µg/m³]	Standard-abw. AUS [µg/m³]	n AN	n AUS	Standardfehler [µg/m³]	t	Freiheitsgrade	1-p (einseitig)
Messstation LUBW	ab 22.09.19	LUBW	NO2	45.2	48.9	3.7	7.5%	18.6	20.7	1632	1647	0.7	5.36	3246	>99,99%
			PM10	20.6	21.9	1.3	5.9%	14.0	14.8	1624	1614	0.51	2.6	3223	99,5%
			PM2.5	9.8	10.4	0.6	5.7%	7.0	7.4	1624	1614	0.25	2.3	3226	99,0%
Messstation LUBW	ab 31.10.19	Födösch GSA19	O3	12.7	14.1	1.4	9.8%	13.4	14.9	1594	1595	0.51	2.7	3113	99,7%
			NO2*	50.5	54.4	3.9	7.2%	19.6	22.6	223	237	1.97	2.0	455	97,6%
			PM2.5	49.3	52.5	3.3	6.3%	18.6	19.8	223	237	1.79	1.8	458	96,7%
Amtsgericht	ab 31.10.19	Födösch FDS18	PM2.5	9.3	9.9	0.6	6.3%	5.9	6.1	532	533	0.37	1.7	1062	95,6%
			NO2*	10.1	10.6	0.5	4.8%	6.3	6.5	531	532	0.39	1.3	1060	90,2%
			PM2.5	45.6	51.3	5.7	11.2%	16.1	17.5	354	376	1.24	4.6	728	>99,99%
Wohnhäuser West	ab 31.10.19	Födösch FDS18	PM2.5	10.2	11.4	1.1	10.0%	6.2	7.1	697	697	0.36	3.2	1371	99,9%
			NO2*	43.2	46.9	3.7	7.8%	15.8	17.0	353	375	1.22	3.0	726	99,9%
			PM2.5	9.7	10.3	0.7	6.3%	6.1	6.7	691	693	0.34	1.9	1372	97,1%
Parkseite West	ab 04.11.19	Födösch GSA19	NO2*	41.6	49.9	8.4	16.8%	14.0	15.1	326	346	1.12	7.5	670	>99,99%
			PM2.5	12.0	14.0	2.0	14.3%	6.3	7.9	609	611	0.41	4.9	1163	>99,99%
			PM10	21.8	27.9	6.1	22.0%	19.5	24.8	1654	1654	0.78	7.9	3131	>99,99%
Schwabengarage	ab 22.09.19	Palas Fidas 200s	PM2.5	8.9	10.9	2.0	18.2%	6.3	7.7	1586	1599	0.25	7.9	3076	>99,99%
			PM2.5	10.7	13.3	2.6	19.7%	7.0	8.5	1637	1635	0.27	9.6	3153	>99,99%
			NO2*	43.3	46.2	2.8	6.2%	15.5	17.2	339	359	1.24	2.3	694	98,9%
Schwabengarage	ab 04.11.19	Födösch FDS18	PM2.5	13.9	14.1	0.3	1.8%	9.5	8.3	614	614	0.51	0.5	1204	68,9%

Tabelle 10.3 – Parameter des Welch-Tests auf die Differenz der Mittelwerte für die Schaltversuche, getrennte Bilanz für die ersten und zweiten Halbstundenintervalle für alle Datenquellen.

Messposition	Messergebnis nur 1. halbe Stunde					Welch-Test										
	Messzeitraum	Datenquelle	Messgröße	Mittelwert AN [µg/m³]	Mittelwert AUS [µg/m³]	Differenz [µg/m³]	Minderung	Standard-abw. AN [µg/m³]	Standard-abw. AUS [µg/m³]	n AN	n AUS	Standard-fehler [µg/m³]	t	Freiheitsgrade	1-p (einseitig)	
Messstation LUBW	ab 22.09.19	LUBW	NO2	46.3	49.4	3.1	6.2%	18.6	20.5	773	790	1.0	3.12	1552	99.9%	
			PM10	20.8	22.0	1.2	5.4%	14.0	14.8	771	775	0.73	1.6	1540	94.6%	
	ab 31.10.19	Födösch GSA19	PM2.5	9.9	10.3	0.5	4.6%	7.0	7.3	740	748	0.37	1.3	1488	90.2%	
			O3	12.5	13.8	1.3	9.4%	13.5	14.5	689	734	0.74	1.8	1421	96.0%	
			NO2*	51.5	54.7	3.2	5.8%	18.9	22.0	109	113	2.75	1.2	217	87.5%	
Amtsgericht	ab 31.10.19	Födösch FDS18	PM2.5	9.3	10.0	0.7	7.0%	5.8	6.3	257	256	0.53	1.3	508	90.4%	
			PM2.5	10.1	10.8	0.7	6.2%	6.2	6.6	256	255	0.57	1.2	507	88.0%	
	ab 31.10.19	Födösch GSA19	NO2*	47.0	51.8	4.9	9.4%	15.6	17.8	169	180	1.79	2.7	345	99.7%	
			PM2.5	10.3	11.4	1.1	9.6%	6.3	7.0	335	334	0.52	2.1	658	96.2%	
			NO2*	46.8	49.1	2.3	4.8%	15.4	17.1	169	179	1.74	1.3	345	91.0%	
Parkseite West	ab 04.11.19	Födösch FDS18	PM2.5	9.6	10.2	0.6	5.9%	6.1	6.6	334	334	0.50	1.2	662	88.9%	
			NO2*	42.8	50.4	7.6	15.0%	14.0	15.1	157	165	1.62	4.7	320	>99.99%	
	ab 22.09.19	Palas Fidas 200s	PM2.5	12.0	14.0	2.0	14.0%	6.5	7.9	294	292	0.60	3.3	563	98.9%	
			PM10	22.0	28.4	6.4	22.6%	19.6	24.8	788	793	1.12	5.7	1503	>99.99%	
			PM2.5	9.0	10.9	2.0	18.0%	6.3	7.7	757	774	0.36	5.5	1488	>99.99%	
Schwabengarage	ab 04.11.19	Födösch FDS18	PM2.5	10.7	13.3	2.6	19.6%	6.7	8.5	783	787	0.39	6.8	1494	>99.99%	
			NO2*	45.3	46.2	1.0	2.1%	16.2	16.6	162	172	1.80	0.5	332	70.3%	
Messstation LUBW	ab 22.09.19	LUBW	NO2	45.5	50.0	4.4	8.9%	18.5	20.6	788	790	1.0	4.51	1558	>99.99%	
			PM10	20.8	22.3	1.5	6.8%	13.9	15.0	770	774	0.74	2.1	1534	98.1%	
	ab 31.10.19	Födösch GSA19	PM2.5	9.8	10.5	0.7	6.8%	6.9	7.4	741	749	0.37	1.9	1484	97.3%	
			O3	12.5	14.0	1.6	11.2%	12.9	14.9	730	732	0.73	2.2	1433	98.5%	
			NO2*	50.0	54.9	4.9	8.9%	20.2	23.3	111	119	2.87	1.7	227	95.5%	
	Amtsgericht	ab 31.10.19	Födösch FDS18	PM2.5	48.5	52.7	4.2	8.0%	18.6	19.4	111	119	2.51	1.7	228	95.3%
				PM2.5	10.2	10.7	0.5	4.7%	6.4	6.4	255	256	0.57	0.9	509	81.3%
		ab 31.10.19	Födösch GSA19	NO2*	45.1	51.8	6.7	12.9%	16.3	17.2	177	185	1.76	3.8	360	>99.99%
				PM2.5	10.2	11.5	1.2	10.9%	6.2	7.1	334	336	0.52	2.4	656	99.2%
				NO2*	40.6	45.7	5.1	11.2%	15.3	16.8	176	185	1.89	3.0	358	98.9%
Parkseite West	ab 04.11.19	Födösch FDS18	PM2.5	9.7	10.4	0.7	7.0%	6.0	6.8	331	334	0.50	1.5	656	92.8%	
			NO2*	40.9	50.7	9.8	19.4%	13.9	14.7	163	171	1.57	6.3	332	>99.99%	
	ab 22.09.19	Palas Fidas 200s	PM2.5	11.9	14.1	2.2	15.8%	6.1	7.9	291	296	0.58	3.8	554	>99.99%	
			PM10	22.4	28.3	5.9	20.8%	19.9	25.1	792	795	1.14	5.2	1508	>99.99%	
			PM2.5	9.0	11.0	2.0	18.0%	6.4	7.7	760	771	0.36	5.5	1485	>99.99%	
Schwabengarage	ab 04.11.19	Födösch FDS18	NO2*	10.7	13.4	2.7	20.3%	6.8	8.5	781	782	0.39	7.0	1489	>99.99%	
			NO2*	42.2	47.1	4.9	10.3%	14.6	17.6	169	177	1.73	2.8	337	99.7%	
Schwabengarage	ab 04.11.19	Födösch FDS18	PM2.5	13.4	14.3	0.9	6.5%	7.7	8.6	295	295	0.67	1.4	582	91.6%	