Räumliche und zeitliche Variabilität der NO_2– und Feinstaubkonzentrationen entlang einer verkehrsreichen Bundesstraße in Stuttgart

A. Samad, U. Vogt

ZUSAMMENFASSUNG Das Ziel der vorgestellten Studie bestand darin, Konzentrationen von Stickstoffdioxid (NO_2), Partikeln (PM10 und PM2,5) und Black Carbon (BC) entlang eines ausgewählten Abschnittes der stark befahrenen Bundesstraße B14 zu untersuchen, die durch das Stadtgebiet von Stuttgart verläuft. Dafür wurde die Verteilung verschiedener luftverunreinigender Komponenten sowohl zeitlich als auch räumlich hochaufgelöst erfasst. Sie wurden in einer ersten Messkampagne von April bis Juni 2014, in einer zweiten Messkampagne von Mitte März bis Ende April 2015 und in einer dritten Messkampagne im Februar 2017 mithilfe mobiler Messungen entlang einer festen, für Radfahrer zugänglichen Messroute gemessen. Ergänzt wurden die mobilen Messungen durch NO_2– und NO_X-Passivsammlermessungen an ausgewählten Messstandorten. Die NO_2– und Feinstaub-Konzentrationen werden stark von den Emissionen des Straßenverkehrs beeinflusst. Die Abnahme der Schadstoffkonzentrationen mit zunehmendem Abstand zur Bundesstraße konnte durch Vergleichsmessungen in einem Park quantifiziert werden. Es wurden zusätzlich Vertikalprofile für Stickstoffoxide (NO_X, NO, NO_2) sowohl kontinuierlich mit Chemilumineszenz-Messgeräten als auch mit Passivsammlern in verschieden Höhen gemessen, um die Abnahme der NO_2-Konzentration mit der Höhe zu untersuchen.

Spatial and temporal variability of NO_2 and particulate matter concentrations along a busy federal highway in Stuttgart

ABSTRACT The aim of the presented study was to investigate concentrations of NO_2, particulate matter (PM10 and PM2.5) and black carbon (BC) along a selected section of the busy B14 federal highway that runs through the urban area of Stuttgart. For this purpose, the distribution of various air pollutants was recorded with a high resolution both in terms of time and space. They were measured in a first measurement campaign from April to June 2014, in a second measurement campaign from mid-March to the end of April 2015 and in a third measurement campaign in February 2017 with the help of mobile measurements along a fixed measurement route accessible to cyclists. The mobile measurements were supplemented by NO_2 and NO_X passive sampler measurements at selected measurement locations. The NO_2 and particulate matter concentrations were strongly influenced by road traffic emissions. The decrease in pollutant concentrations with increasing distance from the busy main road could be quantified by comparative measurements in a park. In addition, vertical profiles for nitrogen oxides (NO_X, NO, NO_2) were measured both continuously with a chemiluminescence measuring devices and with passive samplers at different heights in order to investigate the decrease in NO_2 concentration with height.

1 Einleitung

In Baden-Württemberg (BW) ist die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) für Betrieb und Wartung des Immissionsmessnetzes zuständig. Im Jahre 2016 wurden dort an acht Verkehrsmessstationen, an 24 Stationen im städtischen Hintergrund und an zwei Stationen im ländlichen Hintergrund relevante Luftschadstoffe gemessen [1]. Zusätzlich zu den dauerhaft vorhandenen Messstationen gibt es für ausgesuchte Standorte sogenannte Spotmessstationen. Ihr Zweck ist die Erfassung der Luftverunreinigungen an Belastungsschwerpunkten. Oftmals sind dies städtische Standorte mit hohem Verkehrsaufkommen. In Stuttgart gibt es neben weiteren Messstandorten derzeit zwei Spotmessstationen, wobei eine davon die Messstation „Stuttgart – Am Neckartor“, zentrumsnah an der stark befahrenen Bundesstraße B14 steht. Diese Messstation rückte schon des Öfteren in den Fokus von Fachleuten für Umweltfragen und der Öffentlichkeit, da sie in BW und ganz Deutschland regelmäßig die höchsten Stickstoffdioxid- (NO_2-) und Feinstaub-Immissionsbelastungen (Particulate Matter, PM10) zu verzeichnen hat [1].

In der 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetze (BImSchV) sind folgende Grenzwerte für NO_2 festgelegt: Der Kurzzeitgrenzwert von NO_2 (Stundenmittelwert) darf den Wert von 200 µg/m³ im Jahr nicht öfter als 18-mal überschreiten. Als Langzeitgrenzwert ist das arithmetische Jahresmittel der Konzentration von 40 µg/m³ angegeben [2]. Wie in **Bild 1** zu sehen ist, betrug der NO_2-Jahresmittelwert an der LUBW-Messstation in den Jahren 2005 bis 2019 regelmäßig zwischen 53 und 121 µg/m³, also bis zu einem Faktor 3 über dem erlaubten Grenzwert. Seit 2010 ist eine deutlich abnehmende Tendenz des Jahresmittelwerts festzustellen, wenngleich der Grenzwert immer noch überschritten ist [3].

Des Weiteren sind in der 39. BImSchV auch Grenzwerte für PM10 und PM2,5 festgesetzt. Der über ein Kalenderjahr gemittelte Immissionsgrenzwert von PM10 liegt bei 40 µg/m³. Der im Jahr 2015 eingeführte PM2,5-Grenzwert liegt bei 25 µg/m³. Der über einen Tag gemittelte Wert für PM10 von 50 µg/m³ darf maximal an 35 Tagen in einem Kalenderjahr überschritten werden. Liegen mehr Überschreitungen vor, so gilt der Grenzwert als überschritten [2]. Nach Einführung der PM10-Grenzwerte in 2005 kam es an der Messstation „Stuttgart – Am Neckartor“

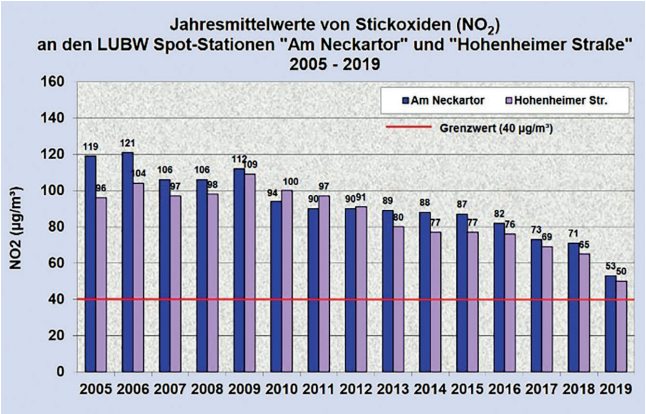

Bild 1 Jahresmittelwerte der NO_2-Konzentration an den LUBW-Messstationen „Stuttgart - Am Neckartor" und „Stuttgart - Hohenheimer Straße" in Stuttgart von 2005 bis 2019. *Grafik: [3]*

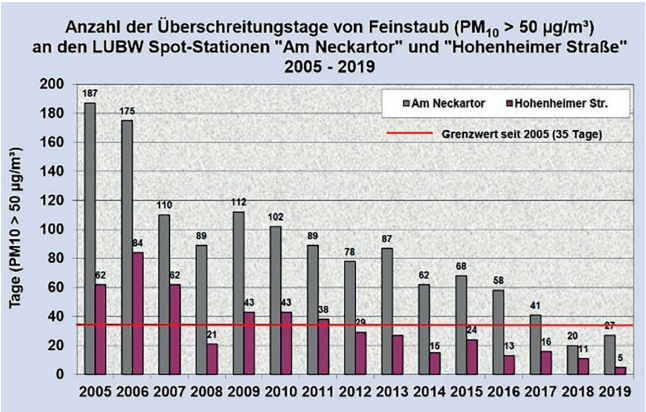

Bild 2 Anzahl der Tage mit Überschreitung des PM10-Tageswertes von 50 µg/m³ an den LUBW-Messstationen „Stuttgart - Am Neckartor" und „Stuttgart - Hohenheimer Straße" von 2004 bis 2019. *Grafik: [3]*

noch regelmäßig zu Überschreitungen des Jahresgrenzwertes. In den letzten Jahren wurde dieser aber eingehalten. Allerdings wurde der Tagesgrenzwert von 50 µg/m³ noch regelmäßig teilweise stark überschritten, wobei auch hier ein Rückgang der Überschreitungen zu verzeichnen ist.

Die Grenzwertüberschreitungen der PM10-Konzentrationen an zwei Stuttgarter Spotmessstationen, „Stuttgart – Am Neckartor" und „Stuttgart – Hohenheimer Str.", für die Jahre 2005 bis 2019 sind in **Bild 2** dargestellt. Noch 2005 wurde der Tagesgrenzwert von PM10, der bei 50 µg/m³ liegt, an jedem zweiten Tag (187-mal) überschritten. Es ist aber auch eine deutlich abnehmende Tendenz der Überschreitungen zu beobachten, wobei 2018 die Anzahl der Tage mit Überschreitung des Wertes von 50 µg/m³ erstmals unter 35 lag und somit der Grenzwertwert eingehalten werden konnte [3].

Ergebnisse der LUBW über die verursachenden Emissionsquellen für NO_2 und PM10 für den Messstandort „Stuttgart – Am Neckartor" sind in **Bild 3** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass 52 % der NO_2-Immissionsbelastung dem lokalen Straßenverkehr zuzuordnen ist. Die gesamte lokale Belastung (Verkehr sowie kleine und mittlere Feuerungsanlagen) fällt im Vergleich zu anderen Standorten im Stuttgarter Stadtgebiet mit 56 % sehr hoch aus [4].

Wie dem Diagramm auf der rechten Seite von Bild 3 zu entnehmen ist, werden am Messstandort 47 % des PM10-Anteils durch den lokalen Straßenverkehr (Abgase, Abrieb und Wiederaufwirbelung) verursacht, ca. 2 % durch kleine und mittlere Feuerungsanlagen und nur weniger als 1 % durch Industrie und Gewerbe. Die restlichen 50 % sind dem Gesamthintergrundniveau (urbaner und großräumiger Hintergrund) zuzuordnen, wobei auch hier noch Anteile vom Straßenverkehr verursacht werden [4].

Die Bundesstraße B14, die direkt an der Spotmessstation vorbeiführt, ist eine wichtige Verkehrsader im Raum Stuttgart. Sie besteht im Bereich der Messstation aus sechs Fahrspuren, drei in jeder Richtung. Neuerdings wurde eine Fahrspur stadtauswärts - die der Messstation nächstgelegene - in eine Busspur umgewandelt. Dadurch wird der Abstand des fließenden Verkehrs zur Messstation vergrößert, gleichzeitig werden aber aufgrund der reduzierten Anzahl von Fahrspuren bei gleichbleibender Fahrzeugzahl mehr Staus erwartet. An manchen Abschnitten besitzt die Straße im weiteren Verlauf bis zu fünf Fahrspuren in jeder Fahrtrichtung. Täglich passieren laut einer Verkehrserhebung der LUBW von 2012 durchschnittlich mehr als 70 000 Kraftfahrzeuge die Messstation. Der LKW-Anteil beträgt dabei etwa 3 %. Am Wochenende verringert sich die durchschnittliche tägliche Verkehrsbelastung um bis zu 33 %. Der Anteil der schweren Nutzfahrzeuge geht sogar um 86 % zurück [5].

Mobile Messtechnik wurde bisher schon auf verschiedenen Plattformen eingesetzt. Bei einer Studie in Los Angeles wurde ein Messwagen als mobile Plattform verwendet und die Ergebnisse wurden mit denen von Passivsammlern verglichen [6]. Fahrräder können auch als Messplattformen für mobile Messungen verwendet werden. Ihre Nutzung hat im Vergleich mit Fußgängern den Vorteil, dass eine größere Strecke abgedeckt werden kann. Zudem ist es möglich, die Messungen auf Hauptstraßen sowie auf Gehwegen und in Parks durchzuführen, die ein Messwagen nicht befahren darf [7]. Im Jahr 2011 wurden in Leipzig mobile Messungen an einer Strecke mit Parkflächen, Verkehrskreuzungen und Gehwegen entlang einer Straße sowie in einer Fußgängerzone durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass der Verkehr die Hauptquelle der PM-Belastung in der Region war. Ab einer Entfernung von 20 bis 30 m von der Hauptstraße wurden deutliche Konzentrationsreduzierungen beobachtet, und in Fußgängerzonen und Parks wurden relativ niedrige Konzentrationen gemessen [8]. Das Karlsruher Institut für Meteorologie und Klimaforschung entwickelte eine mobile Messplattform namens „AERO-TRAM", ein Messsystem, das auf dem Dach einer Straßenbahn aufgebaut wurde. In dieser Studie wurden zwei Routen gewählt, sowohl durch die Stadt als auch in ein angrenzendes Gebiet. Die Ergebnisse zeigten, dass die NO_X-Konzentrationen mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum um 70 % sanken. Die PM-Konzentrationen dagegen lagen im ländlichen Raum im Vergleich zur Stadt Karlsruhe um bis zu 50 % niedriger [9]. Eine ähnliche Studie hat im Jahr 2013 Computer Engineering and Networks Laboratory in der Schweiz durchgeführt, bei der Konzentrationen Ultrafeiner Partikel (UFP-Konzentrationen) mithilfe von öffentlichen Verkehrsmitteln als Messplattformen über mehr als ein Jahr gemessen wurden [10].

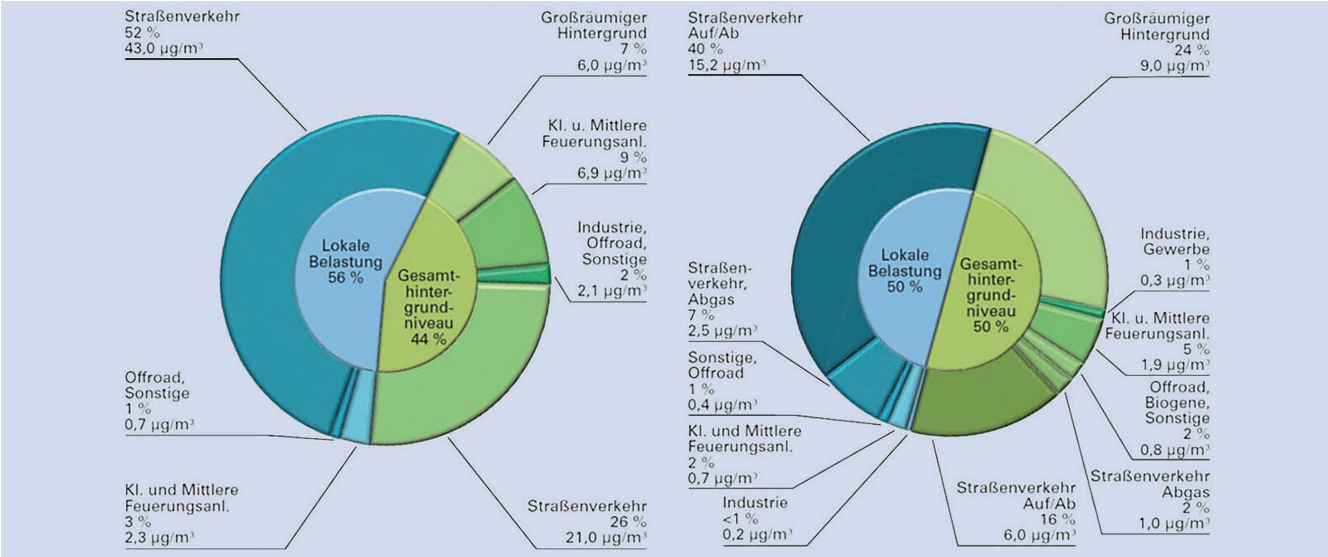

Bild 3 Quellzuordnung der Verursacher der NO_2– (links) und PM10-Konzentrationen (rechts) an der LUBW-Messstation „Stuttgart - Am Neckartor" für das Jahr 2016. *Grafik: [4].*

2 Angewandte Methodik

Die durchgeführten Messungen setzen sich wie folgt zusammen:

- Luftqualitätsuntersuchung entlang einer stark befahrenen Bundesstraße im Stadtgebiet von Stuttgart (Abschnitt 2.1)
- Intensive Untersuchung in der Umgebung eines Hotspots mit Vertikal- und Horizontalprofilen (Abschnitt 2.2)
- Luftqualitätsuntersuchung in der Stadt Stuttgart (Abschnitt 2.3)

Die Messzeiträume der durchgeführten mobilen Immissionsmessungen erstreckten sich über zwei Monate vom 16. April bis 16. Juni 2014, über sechs Wochen vom 13. März bis Ende April 2015 und ca. zwei Wochen vom 8. bis 19. Juli 2017. Mobile Messungen kommen zur Anwendung, um die räumliche und zeitliche Verteilung der Luftverunreinigungen in einem größeren Gebiet zu bestimmen. Sie können immer nur für einen begrenzten Zeitraum durchgeführt werden. Ob die Ergebnisse der räumlichen Verteilung auch für einen längeren Zeitraum repräsentativ sind, kann anhand der mobilen Messungen alleine nicht festgestellt werden. Deshalb wurden sie mit Passivsammlermessungen kombiniert. Diese wurden an mehreren Standorten entlang der Messroute über mehrere Wochen durchgeführt. Zusätzlich erfolgten stationäre Messungen, um die Luftqualität an einem bestimmten Messpunkt kontinuierlich zu untersuchen.

2.1 Luftqualitätsuntersuchung entlang einer stark befahrenen Bundesstraße im Stadtgebiet von Stuttgart

Das Ziel dieser ersten Studie bestand darin, mit mobilen Messungen eine Strecke der B14 von ca. 4 km Länge, die durch das Zentrum von Stuttgart verläuft und in **Bild 4** dargestellt ist, auf Luftverunreinigungen (NO_2, NO_x-, PM10 und PM2,5) zu untersuchen und mit den Daten der in Stuttgart vorhandenen Messstationen, besonders mit der Spotmessstation „Stuttgart – Am Neckartor", zu vergleichen. Dabei sollte herausgefunden werden, ob es entlang des Messgebietes Bereiche gibt, die vergleichbar mit der Immissionsbelastung an diesem Standort sind.

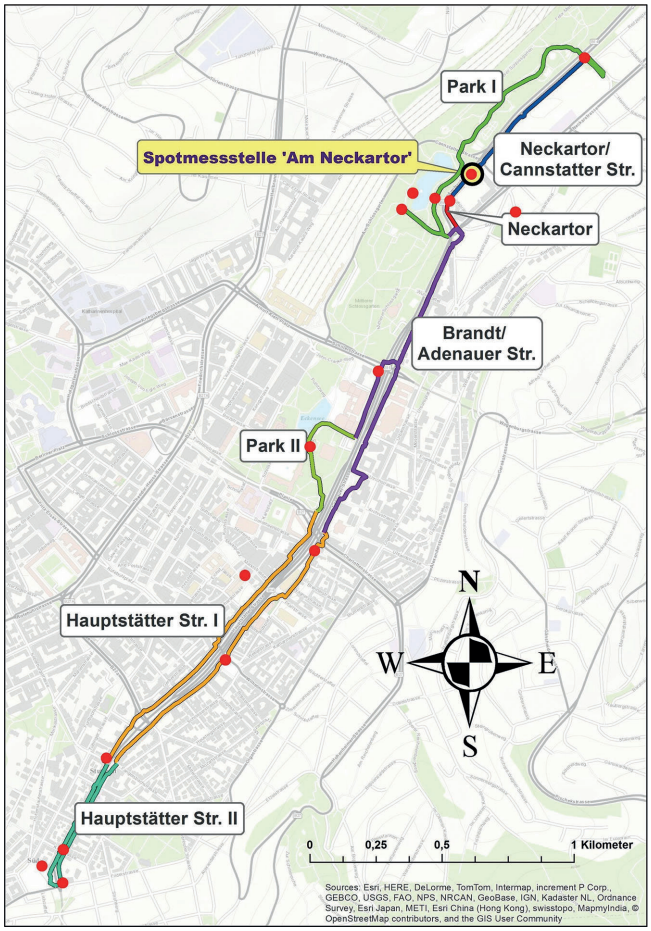

Bild 4 Messstrecke entlang der B14, auf Geh- bzw. Radwegen vom im Nordosten gelegenen Heinrich-Baumann-Steg bis zum im Südwesten gelegenen Marienplatz; Einteilung der gesamten Messstrecke in Teilstrecken. *Grafik: Autoren*

Tabelle 1 Auflistung der verwendeten Messgeräte für die mobilen Messungen.

Komponente	Gerätebezeichnung	Messprinzip	Messbereich	Zeitliche Auflösung
Particulate Matter (PM) im Größenbereich von 0,3 - 20 µm	OPC Partikelzähler - Grimm 1.108	Streulichtfotometer	0,1 - 100 000 µg/m³	6 Sekunden
NO_2	LMA3 - Scintrex	Flüssig-Chemilumineszenz (Luminol)	0 - 200 ppb	1 Sekunde
Positionssignal	eTrex - Gamin	GPS-Empfänger	-	1 Sekunde

Bild 5 Mobiles Messfahrzeug. *Foto: Autoren*

2.1.1 Aufbau des mobilen Messfahrzeuges und Messroute

In **Tabelle 1** sind die Messgeräte aufgelistet, die für die mobilen Messungen in den Jahren 2014 und 2015 zum Einsatz kamen. Die verwendeten Geräte wurden speziell für den mobilen Einsatz konzipiert, weshalb diese, verglichen mit stationären Messgeräten, ein relativ geringes Gewicht aufweisen und mit Akkus betrieben werden können. Das NO_2-Messgerät LMA-3 der Fa. Scintrex wiegt ca. 4 kg und der optische Partikelzähler der Fa. Grimm 2,5 kg. Zudem sind diese sehr unempfindlich gegenüber äußeren Einwirkungen wie Erschütterungen und größeren Temperaturänderungen. In der Tabelle sind neben der genauen Gerätebezeichnung noch jeweils das Messprinzip, der Messbereich und die zeitliche Auflösung der Messgeräte aufgeführt.

Als mobiles Messfahrzeug wurde ein Fahrrad verwendet, das in **Bild 5** dargestellt ist. Das Feinstaubmessgerät ist mit seinen Maßen von 24 cm x 24 cm x 6 cm und einem Gewicht von 2,4 kg relativ klein und leicht. Da es zudem einen auswechselbaren Akku und eine interne Datenerfassung enthält, konnte es ohne großen Aufwand in einem vor dem Lenkrad befindlichen Fahrradkorb montiert werden. Für die NO_2-Messung wurde dagegen mehr Platz benötigt, da zusätzlich zum Messgerät noch eine externe Energieversorgung und eine externe Datenerfassung erforderlich waren. All diese Komponenten wurden mit einer Messbox auf dem Gepäckträger des Fahrrades montiert.

In Bild 4 ist die gesamte Messstrecke entlang der B14 abgebildet. Sie besitzt eine Länge von 3,8 km und erstreckt sich vom im Nordosten gelegenen Heinrich-Baumann-Steg bis zum im Südwesten gelegenen Marienplatz. Die Messungen wurden bewusst mit einem Fahrrad als Messfahrzeug durchgeführt und nicht mit einem Kraftfahrzeug, da die Messungen im gleichen Abstand zur Straße durchgeführt werden sollten wie die der Spotmessstation, also ca. 3 m. Die Gesamtstrecke wurde in einzelne Streckenabschnitte unterteilt, für die ähnliche Konzentrationsniveaus erwartet und festgestellt wurden. Die Standorte für die Passivsammlermessungen sind mit roten Punkten dargestellt.

Der erste relativ kurze Streckenabschnitt „Neckartor“ wurde ausgewählt, da sich der Gehweg hinter Büschen und Bäumen befindet, wo wesentlich geringere Konzentrationen gemessen wurden als am angrenzenden Abschnitt „Neckartor-Cannstatter Str.“. Entlang des zweiten Abschnittes befindet sich die LUBW-Messstation „Stuttgart – Am Neckartor“. Dieser Abschnitt liegt direkt neben der Bundesstraße und wird durch keine Vegetation verdeckt. Der dritte Abschnitt „Park I“ befindet sich im unteren Schlossgarten von Stuttgart, wo untersucht werden sollte, wie stark sich die Verkehrsemissionen auf den Park auswirken. Der vierte Abschnitt „Brandt/Adenauer Str.“ verläuft weitestgehend entlang der Straße. Lediglich ein kurzes Stück setzt sich leicht von der Straße ab. Der fünfte Abschnitt „Park II“ befindet sich im oberen Schlossgarten. In Abschnitt sechs und sieben „Hauptstätter Str. I“ und „Hauptstätter Str. II“ wurde die Messung bis auf eine kleine Ausnahme durchgehend an der Straße durchgeführt. Die Messstrecke entlang der „Hauptstätter Str. I“ führt teilweise unter Häuservorsprüngen durch und Teile sind durch einen kleinen Grünstreifen von den Fahrbahnen der Straße getrennt. Die „Hauptstätter Str. II“ wird von einer beidseitigen Häuserschlucht dominiert, die sich erst am Wendepunkt in Höhe des Marienplatzes auflöst.

2.1.2 Ergebnisse und Bewertung der mobilen Messungen

Im Folgenden werden beispielhaft Ergebnisse der Messfahrten vom 22. Mai 2014 dargestellt. Die Vormittagsmessungen dauerten etwa fünf Stunden von 7:17 Uhr bis 12:19 Uhr (vier Messfahrten). Die Nachmittagsmessungen betrugen ca. zwei Stunden und dauerten von 16:28 bis 18:26 Uhr (zwei Messfahrten). In **Bild 6** ist für den 22. Mai 2014 der NO_2-Immissionsverlauf der Einzelwerte der Vormittagsmessungen über vier Messfahrten abgebildet. Eine Messfahrt bestand grundsätzlich aus einer Hin- und einer Rückfahrt, d. h. die Messstrecke wurde zweimal durchfahren. In Bild 6 wurden zusätzlich zum Konzentrationsverlauf der mobilen Messungen die Stundenmittelwerte der stationären LUBW-Messstation „Stuttgart - Bad Cannstatt“ eingezeichnet, die die städtischen Hintergrundkonzentrationen repräsentiert. Die einzelnen Messfahrten wurden in den Diagrammen farblich hinterlegt. Anhand des Diagramms wird ersichtlich, dass der Konzentrationsverlauf einer sehr starken zeitlichen Variation unterworfen ist. Es wurden teilweise sehr hohe Spitzenkonzentrationen von annähernd 250 µg/m³ NO_2 gemessen. Die Werte gingen aber auch auf das Niveau der städtischen Hintergrundkonzentration zurück. Die Differenz zwischen der roten und der schwarzen Linie kann als momentaner Beitrag der lokalen Quelle Straßenverkehr auf der B14 interpretiert werden. Anhand dieser Ergeb-

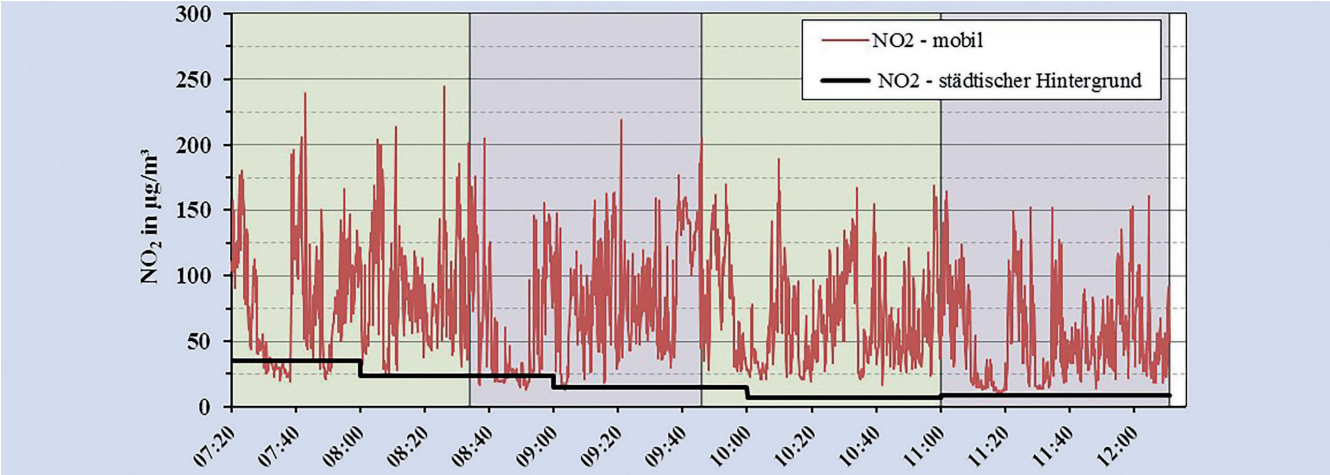

Bild 6 Zeitlicher Verlauf der NO_2-Messung über vier Messfahrten am Vormittag des 22. Mai 2014. *Grafik: Autoren*

nisse wird deutlich, was schon in Bild 3 dargestellt wurde: Der Anteil des lokalen Verkehrs in unmittelbarer Nähe der B14 besitzt einen großen Anteil an der gesamten NO_2-Belastung. Anhand des zeitlichen Verlaufs ist eine räumliche Interpretation der Einzelwerte schwierig bzw. unmöglich. Deshalb werden im Folgenden bei der genaueren Analyse von Teilabschnitten Karten hinterlegt, die eine räumliche Zuordnung ermöglichen. In diesen werden die einzelnen Messwerte als Punkte dargestellt, gefärbt entsprechend der Höhe der Immissionskonzentration. Für jede Messfahrt wurde dabei eine Karte erstellt.

Nachfolgend werden die Besonderheiten einzelner kurzer Streckenabschnitte entlang der Messstrecke aufgezeigt. In **Bild** 7 ist die erste Messfahrt der Vormittagsmessung eines ersten Abschnittes zu sehen. Der gemittelte NO_2-Messwert der Spotmessstelle von 132 µg/m³ stimmte sehr gut mit den im selben Zeitraum mobil gemessenen NO_2-Konzentration überein. Entlang der Cannstatter Straße wurden noch höhere Immissionen oberhalb von 150 µg/m³ gemessen. Im hinteren Teil dieser Straße (Richtung Nordosten) war eine sinkende Tendenz zu erkennen, die im späteren Verlauf der Messung noch stärker auftrat, bedingt durch die zurücktretende Randbebauung. In dem mit einem schwarzen Kreis gekennzeichneten Bereich in Bild 7 befindet sich eine Fußgänger-/Fahrradbrücke (Heinrich-Baumann-Steg), die in den angrenzenden Schlosspark führt. Abseits der Straße zeigten sich schon in geringer Entfernung deutlich niedrigere Konzentrationen von 50 bis 90 µg/m³. Bei Überquerung der Brücke wurde eine kurze Konzentrationsspitze von 110 µg/m³ gemessen.

Im Parkbereich wurden überwiegend niedrige NO_2-Konzentrationen im Bereich von 11 bis 50 µg/m³ gemessen. Nur vereinzelt traten höhere Werte auf. Der Konzentrationsabfall abseits der Straße war über die ersten Meter sehr stark, stagnierte dann aber mit zunehmender Distanz auf einem niedrigen Niveau. Auf der „Brandt/Adenauer Straße“ (siehe Pfeil 1) wurden zunehmend hohe Konzentrationen zwischen 110 und über 150 µg/m³ gemessen.

In **Bild 8** ist der zweite Abschnitt der ersten Messfahrt am 22. Mai 2014 zu sehen. Die NO_2-Messwerte entlang der Straße bewegten sich generell auf einem recht hohen Konzentrationsniveau von ca. 90 bis 200 µg/m³. Der Pfeil 5 zeigt auf einen Bereich, der sich direkt neben der B14 befindet. Dort wurden NO_2-Immissionskonzentrationen zwischen 110 und 150 µg/m³ gemessen. Auffällig ist der blau gefärbte Bereich darüber in nord-

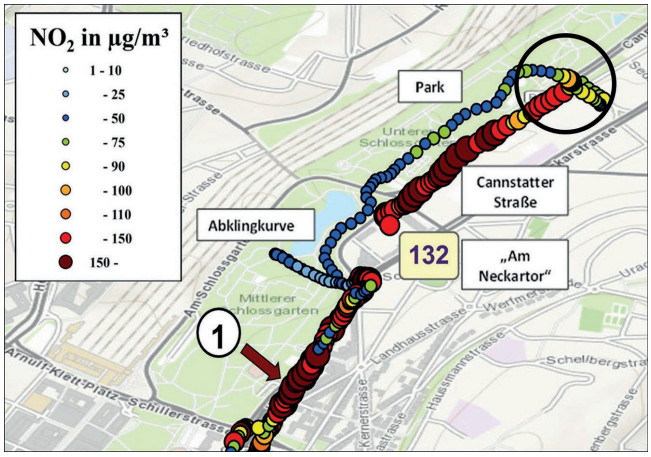

Bild 7 Abschnitt I der Einzelwertdarstellung der NO_2-Immissionen, 1. Messfahrt von 07:19 bis 08:33 Uhr am 22. Mai 2014. *Grafik: Autoren*

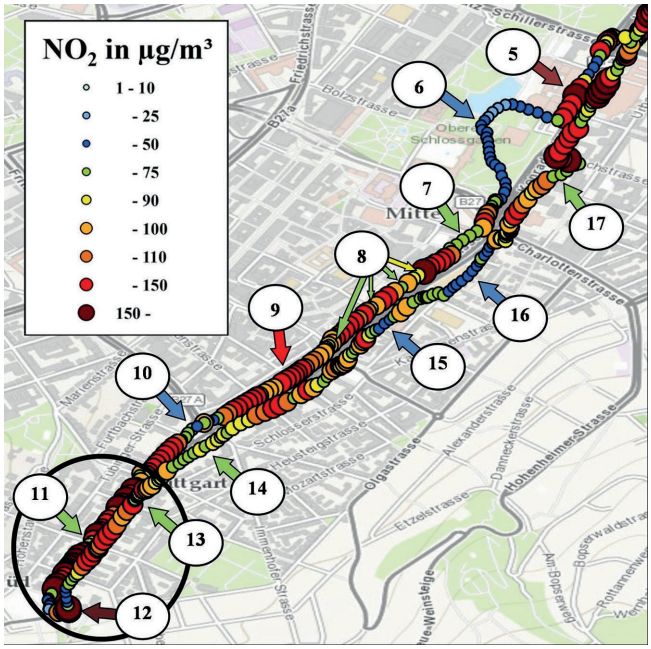

Bild 8 Abschnitt II der Einzelwertdarstellung der NO_2-Immissionen, 1. Messfahrt am 22.05.2014 von 07:19 bis 08:33 Uhr. *Grafik: Autoren*

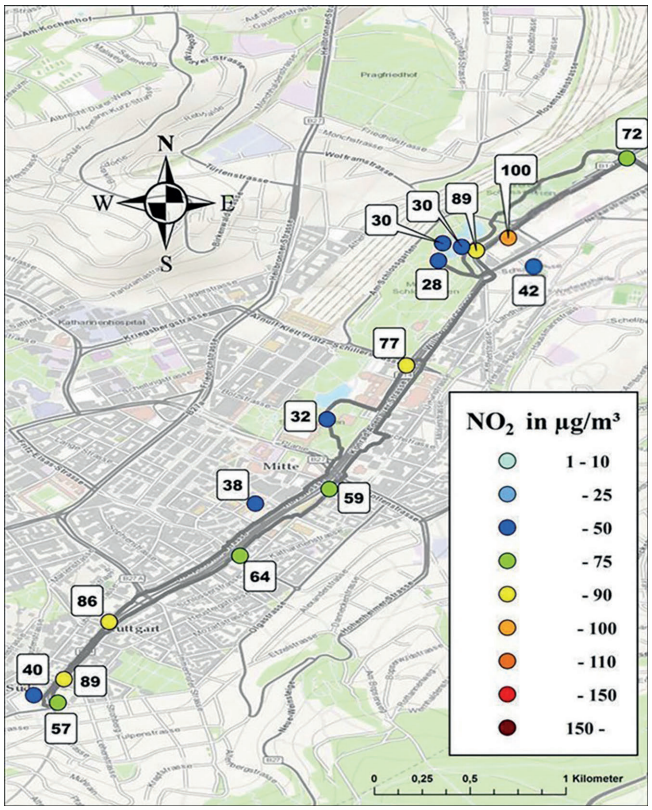

Bild 9 Ergebnisse von NO_2-Passivsammlermessungen, die vom 10. April bis 21. Juli 2014 an ausgewählten Punkten entlang der B14 durchgeführt wurden. *Grafik: Autoren*

östlicher Richtung, der Konzentrationen von 25 bis 50 µg/m³ aufwies. Dieser große Unterschied könnte dadurch entstanden sein, dass sich an dieser Stelle eine Einfahrt in der ansonsten dichten beidseitigen Randbebauung befindet, durch die der Luftaustausch gefördert wird und sich die vom Verkehr freigesetzten Emissionen schneller verdünnen und abtransportiert werden. Dieses Phänomen konnte in mehr oder weniger ausgeprägter Form in allen anderen Messfahrten an dieser Stelle beobachtet werden.

Beim nächsten Bereich handelt es sich um den „Oberen Schlossgarten" (siehe Pfeil 6). Es ist gut zu erkennen, dass sich die NO_2-Immissionen über die gesamte Strecke im Park unterhalb von 50 µg/m³ und teilweise sogar unterhalb von 25 µg/m³ bewegten. Im anschließenden Bereich (siehe Pfeil 7) wurde in einem Abstand von ca. 2 bis 3 m zur Straße gemessen. Zudem wurde an dieser Stelle ein Gebäude abgerissen, weshalb sich dort zum Zeitpunkt der Messung eine große freie Fläche befand. Diese beiden Gründe könnten erklären, wieso die NO_2-Konzentration an dieser Stelle über alle Messfahrten hinweg rapide sank. In der dargestellten Messfahrt wurde dort eine Konzentration von ca. 55 µg/m³ gemessen, wobei in den Bereichen davor und danach knapp 100 µg/m³ gemessen wurden. Pfeil 8 kennzeichnet gleich mehrere Bereiche. Bei diesen handelt es sich um vier Seitenstraßen, die im rechten Winkel auf die B14 stoßen und in denen ein Absinken der NO_2-Konzentration beobachtet wurde. Da an diesen Stellen die ansonsten durchgängige Häuserfront durchbrochen war, kam es zu einem besseren Luftaustausch und somit zum Absinken der Konzentrationen. Im nächsten Bereich (Pfeil 9) wurde durchgehend mit sehr geringem Abstand zur Straße gemessen. Dies macht sich auch in der Höhe der Immissionen bemerkbar. Diese bewegten sich auf einem relativ hohen Niveau von 90 bis 130 µg/m³. Gleich anschließend auf der Straßenkreuzung (siehe Pfeil 10) wurde ein Absinken der Konzentration auf 25 bis 75 µg/m³ gemessen. Dies wiederholte sich über alle Messfahrten hinweg und kann wiederum durch die bessere Belüftung in diesem Bereich erklärt werden. Im nächsten Bereich (siehe schwarzer Kreis) werden beide Straßenseiten gleichzeitig betrachtet, da die Immissionskonzentrationen aufgrund der engen Häuserschlucht beidseitig sehr hoch zwischen 100 und 200 µg/m³ lagen.

Erst am Wendepunkt der Strecke, wo die Häuserschlucht durch den sehr weitläufigen, großen Marienplatz durchbrochen wird, sanken die Konzentrationen auf 10 bis 50 µg/m³ NO_2 ab. Die im Bereich von Pfeil 12 sehr hohen NO_2-Konzentrationen von um die 150 µg/m³ dürften dadurch zu erklären sein, dass sich das Messfahrrad aufgrund der Wartezeit an der Ampel für kurze Zeit zwischen zwei zweispurigen Straßen befand und es deshalb höheren Belastungen ausgesetzt war. Die nächsten beiden Pfeile heben zwei Bereiche entlang der Häuserschlucht hervor, in denen aufgrund einer Kreuzung (siehe Pfeil 11) und aufgrund eines durch den Abriss eines Gebäudes bedingten temporären freien Platzes (siehe Pfeil 13) und der damit einhergehenden besseren Durchlüftungsverhältnisse die Konzentrationen auf ca. 50 µg/m³ sanken. Die Gebäude entlang des nächsten Bereiches (Pfeil 14) besitzen einen 3 bis 4 m breiten Grünstreifen und somit wurde in einigen Metern Abstand von der Straße gemessen. Dies könnte die Ursache dafür sein, dass sich die Konzentrationen in diesem Bereich über alle Messfahrten hinweg auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau von 50 bis 75 µg/m³ hielten, obwohl sich direkt daneben eine vierspurige Straße befindet. Pfeil 15 markiert einen Bereich, der sich aufgrund eines Grünstreifens mit einem Abstand von ca. 3 m zur Straße befindet. Die NO_2-Konzentration war dort mit 35 bis maximal 67 µg/m³ vergleichsweise niedrig. Auf der gegenüberliegenden Straßenseite wurden z. B. Konzentrationen zwischen 90 und 150 µg/m³ gemessen. Im Bereich von Pfeil 16 musste auf eine Seitenstraße ausgewichen werden, da sich direkt an der Straße ein Parkhaus befand, das nur auf der Rückseite mit dem Fahrrad umfahren werden konnte. Dies zog eine starke Konzentrationssenkung auf 25 bis 50 µg/m³ nach sich. Direkt gegenüber auf der anderen Straßenseite wurden Konzentrationen von 100 bis 150 µg/m³ gemessen. Pfeil 17 markiert einen kleinen von der Straße abgesetzten Parkbereich. In diesem wurden generell relativ niedrige Konzentrationen gemessen. Die Abhängigkeit der NO_2-Konzentration von der Verkehrssituation bzw. den räumlichen Gegebenheiten konnte gut dargestellt werden.

2.1.3 Passivsammlermessungen

Neben den Messfahrten wurde ein zusätzliches Messprogramm aufgesetzt, um die mobilen Messungen über einen längeren Zeitraum mit Ergebnissen stationärer Messungen zu untermauern. Hierfür wurden über einen Zeitraum von drei Monaten, vom 10. April bis 21. Juli 2014, an insgesamt 16 Standorten entlang der Messroute der mobilen Messungen und an einigen Hintergrundmessstandorten Messungen mit NO_2-Passivsammlern (Fa. Passam) durchgeführt, die für jeweils zwei Wochen exponiert und anschließend im Labor analysiert und ausgewertet wurden [11]. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in **Bild 9** dargestellt.

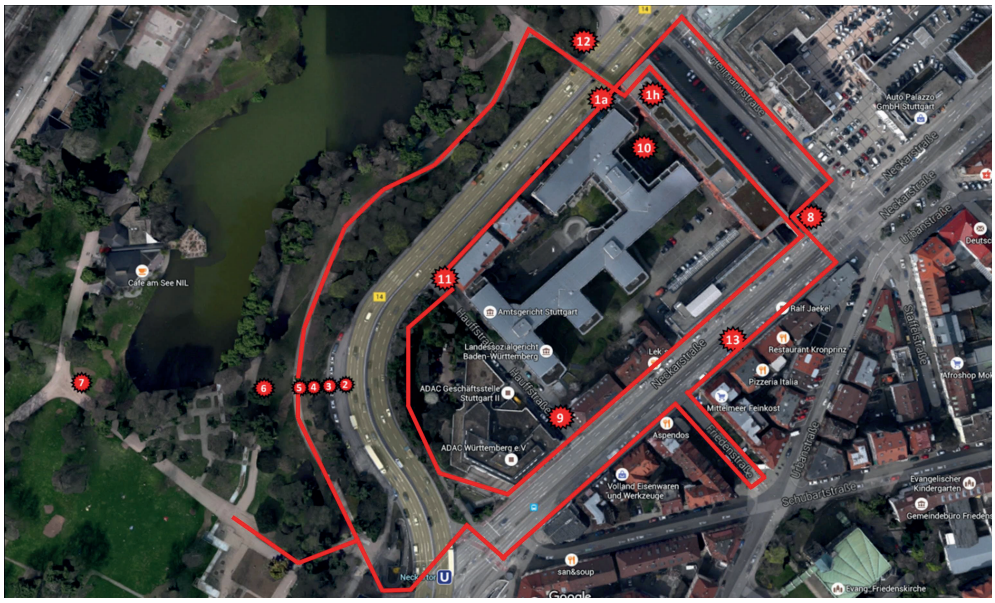

Bild 10 Messgebiet Am Neckartor, Stuttgart. *Foto: Autoren*

Die Passivsammlermessungen haben gezeigt, dass die höchsten NO_2-Konzentrationen wiederum an der LUBW-Messstation mit einem Mittelwert von 100 µg/m³ auftraten. An den Messpunkten, die direkt an der B14 lagen, wurden Konzentrationen zwischen 57 und 89 µg/m³ gemessen. Die Abhängigkeit der Konzentrationen von den Ausbreitungsbedingungen am jeweiligen Messpunkt konnte deutlich durch die mobilen (und stationären) Messungen aufgezeigt werden. Lag der Messort an einer Straßenkreuzung, die besser belüftet wurde oder an einem Ort, an dem die nächsten Gebäude in einiger Entfernung lagen, waren die Messwerte niedriger. Die beiden Messpunkte in der engen Straßenschlucht der Hauptstätter Straße wiesen Konzentrationen von 86 und 89 µg/m³ auf. Sie liegen somit auch auf einem sehr hohen Niveau, aber doch niedriger als an der Messstation. An Messorten in einiger Entfernung von der B14 lagen die Konzentrationen zwischen 28 und 40 µg/m³, also um den Faktor 2 bis 4 niedriger als direkt an der Bundesstraße. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die durch die mobilen Messungen gewonnenen Erkenntnisse durch die Passivsammlermessungen bestätigt werden konnten.

2.2 Intensive Untersuchung in der Umgebung eines Hotspots mit Vertikal- und Horizontalprofilen

Aus der ersten Messkampagne ergab sich die Erkenntnis, dass im Bereich der Spotmessstation stets die höchsten NO_2-Konzentrationen gemessen wurden. Daraufhin wurde das nahe Umfeld dieser Messstation in der zweiten Messkampagne näher untersucht, um die Ursachen hierfür zu erforschen.

2.2.1 Mobile Messungen

Die im Folgenden dargestellten Messungen wurden vom 13. März bis Ende April 2015 durchgeführt. Das Untersuchungsgebiet ist in **Bild 10** dargestellt, in der die Fahrradroute für mobile Messungen mit einer roten Linie und die Standorte der Passivsammlermessungen mit roten Kreisen markiert sind. Die mobilen Messungen wurden unter Verwendung der in Bild 5 dargestellten und in Tabelle 1 beschriebenen Messgeräte durchgeführt. Die Messungen in 2015 wurden analog zu den Messungen in 2014 durchgeführt, mit dem Unterschied, dass das Fahrrad aufgrund der kurzen und teilweise schwierig zu befahrenden Strecke geschoben wurde.

Mithilfe der mobilen Messungen wurden die NO_2-, PM10-, PM2,5– und PM1,0-Konzentrationen rund um die LUBW-Messstation, die Neckarstraße und im angrenzenden Mittleren Schlossgarten gemessen, um eine detaillierte räumliche Verteilung der Luftverunreinigungen zu erhalten. Im Bereich der LUBW-Messstation wurden die Messungen auf beiden Seiten der B14 durchgeführt. Die NO_2-Konzentrationen wurden unter Verwendung eines LMA3 (Chemilumineszenzinstrument der Fa. Scintrex) gemessen. Zur Messung von PM10, PM2,5 und PM1,0 wurde ein Aerosolspektrometer (Fa. Grimm, Modell 1.108) verwendet. Ein GPS-Gerät bestimmte die entsprechende Position, um die Konzentrationen dem jeweiligen Ort zuordnen zu können. Die Messungen wurden an sieben verschiedenen Tagen im Zeitraum vom 8. bis 23. April 2015 und jeden Tag zu unterschiedlichen Zeiträumen durchgeführt, um alle möglichen Situationen bezogen auf die Stabilität der Atmosphäre, auf Staus oder die Emissionen während des Tages abzudecken. Insgesamt wurden in diesem Zeitraum 31 Runden absolviert.

Die gewonnenen Daten wurden mithilfe der ArcGIS-Software ausgewertet. Für jede einzelne Runde wurde ein Diagramm erstellt, um die räumliche Verteilung der NO_2-, PM10-, PM2,5– und PM1,0-Konzentrationen auf der jeweiligen Route darzustellen. Der Mittelwert der einzelnen Runden wurde berechnet, um das individuelle Tagesverhalten zu erhalten, und zum Schluss wurde auch der Mittelwert über alle Messrunden berechnet. Für die räumliche Analyse wurde die Messstrecke in 20-m-Abschnitte eingeteilt und der Mittelwert für die Konzentration in diesem Abschnitt gebildet und dargestellt. **Bild 11**(a) zeigt die Auswertung mit ArcGIS für den NO_2-Mittelwert der Gesamtmessdauer. Dort ist zu erkennen, dass die Konzentrationen entlang der mit Nummer 1 gekennzeichneten B14, an der auch die LUBW-Messstation liegt, hoch waren (im Bereich von 100 bis 150 µg/m³). Der mit Nummer 2 gekennzeichnete Bereich in den Parkanlagen des Mittleren Schlossgartens weist sehr viel niedrigere Konzentrationen (25 bis 75 µg/m³) auf. Der mit Nummer 3 bezeichnete Bereich stellt die Heilmannstraße da, die in geringem Abstand zur LUBW-Messstation die Cannstatter Straße (B14) kreuzt. Die

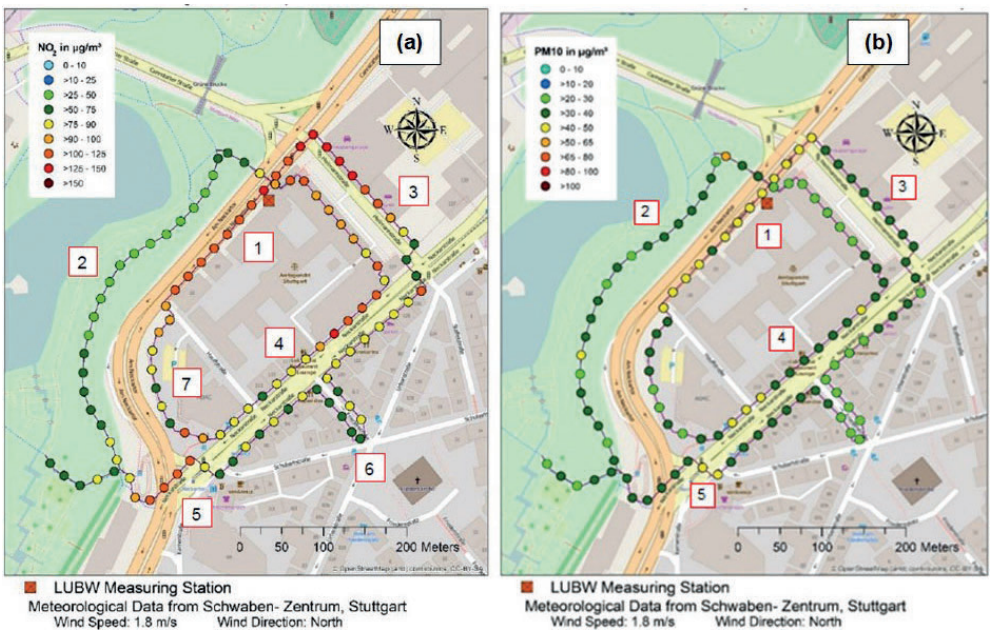

Bild 11 Räumliche- (a) NO_2– und (b) PM10-Verteilung für den Messzeitraum 8. bis 23. April 2015 (N = 31 Messfahrten).
Grafik: Autoren

NO_2-Konzentrationen in der Heilmannstraße weisen einen starken Gradienten auf, mit sehr hohen Konzentrationen im Kreuzungsbereich mit der Cannstatter Straße (> 125 µg/m³) und geringeren Konzentrationen zwischen 50 und 90 µg/m³ im Kreuzungsbereich zur Neckarstraße. Der mit Nummer 4 gekennzeichnete Bereich in der Neckarstraße wies NO_2-Konzentrationen von 75 bis 100 µg/m³ auf, was höher als die Konzentration im Park ist, aber niedriger als die Konzentrationen in den anderen Bereichen. Am Knotenpunkt der Neckarstraße und der B14 stiegen die Konzentrationen noch einmal kurz an, als die B14 auf dem Fußgängerüberweg überquert wurde, in Bild 11(a) mit der Nummer 5 gekennzeichnet. Mit dem Übergang in den Park konnte eine sofortige starke Konzentrationsabnahme festgestellt werden. Die NO_2-Konzentration auf der kleinen Straße entlang der Neckarstraße, in Bild 11(a) mit der Nummer 6 gekennzeichnet, betrug weniger als 75 µg/m³. Mit zunehmender Entfernung von der Kreuzung Neckarstraße/Am Neckartor konnte eine Abnahme der NO_2-Konzentration beobachtet werden. Von der Neckarstraße kommend und in Richtung der B14 abbiegend, nahm die NO_2-Konzentration im Bereich Nummer 7 auf Werte von 75 bis 50 µg/m³ leicht ab. Gründe für die niedrigeren NO_2-Konzentrationen in diesem Bereich lagen vermutlich in der besseren Durchlüftung, da die nächsten Gebäude in diesem Bereich mehr Abstand zur Straße hatten als in anderen Bereichen im Verlauf der B14, und in der Tatsache, dass zwischen Gehweg und Fahrbahn ein Grünstreifen von mehreren Metern lag, so dass die Messungen in einigen Metern Abstand von der Straße und nicht direkt am Straßenrad durchgeführt wurden.

Bild 11(b) zeigt die durchschnittlichen PM10-Konzentrationen, gemittelt über die gesamte Messperiode. Es ist zu sehen, dass der Trend von PM10-Konzentrationen dem der NO_2-Konzentrationen ähnelt. In den Bereichen abseits der stark befahrenen Straßen und in den Parkflächen waren die gemessenen PM10-Konzentrationen deutlich niedriger im Vergleich zu den Konzentrationen, die an den Straßen gemessen wurden. Die höchste PM10-Konzentration im Bereich von 40 bis 50 µg/m³ wurde an der B14 mit der Nummer 1 in Bild 11(b) gemessen. Die niedrigste PM10-Konzentration im Bereich von 20 bis 30 µg/m³ wurde im Mittleren Schlossgarten (Nummer 2) gemessen. Die PM10-Konzentrationen im Bereich der Heilmannstraße (Nummer 3) lagen zwischen 30 und 40 µg/m³. Niedrigere PM10-Konzentrationen von durchschnittlich etwa 40 µg/m³ wurden in der Neckarstraße, im Bereich der mit der Nummer 4 markiert wurde, gemessen. Hohe PM10-Konzentrationen von etwa 50 µg/m³ wurden an der Kreuzung der Neckarstraße und der B14 gemessen, der in Bild 11(b) mit der Nummer 5 markiert wurde. Die PM2,5– und PM1,0-Konzentrationen schwankten nur in einem kleinen Konzentrationsbereich. Die Messergebnisse für PM2,5 und PM1,0 waren nicht so eindeutig wie für NO_2 oder PM10, aber im Bereich der B14 konnten immer noch deutlich erhöhte Konzentrationen beobachtet werden.

2.2.2 Stationäre Messungen

Für weitere Untersuchungen kam stationäre Messtechnik zum Einsatz, um einerseits die zeitliche Variation der gemessenen Konzentrationen, andererseits aber auch die NO_x- und NO_2-Vertikalverteilung zu erhalten.

Durchführung der stationären Messungen

Stationäre Messungen wurden an der B14 durchgeführt. Drei NO-NO_2-NO_X-Messgeräte (MLU200a) wurden im Zimmer eines Studentenwohnheims an der Kreuzung der Straßen Am Neckartor und Heilmannstraße installiert, das sich in der unmittelbaren Umgebung der LUBW-Messstation befindet. Mit den Chemilumineszenz-Messgeräten wurde die Umgebungsluft aus drei unterschiedlichen Höhen angesaugt – erstes (8,2 m), drittes (15,4 m) und fünftes (22,6 m) Stockwerk. Mit diesen Geräten wurde NO und NO_X kontinuierlich gemessen. Die Messungen wurden über einen Zeitraum von sechs Wochen durchgeführt. Das Bild 16 (später im Beitrag abgebildet) zeigt das Gebäude und die Positionen der Ansaugung. Das Fenster an Position 1e ist der Raum, in dem die Messausrüstung der stationären Messungen untergebracht war. Messpunkte 1c, 1e und 1g befanden sich im ersten, dritten und fünften Stock. Dieses Vorgehen ermöglichte die Erstellung von Vertikalprofilen der Stickstoffoxidkonzentrationen sowohl als Mittelwert über den gesamten Messzeitraum, aber auch in hoher zeitlicher Auflösung.

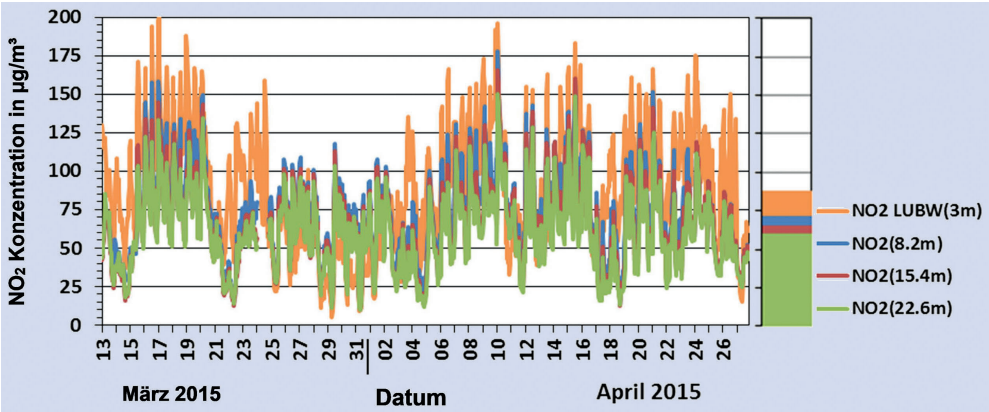

Bild 12 NO_2-Konzentrationen in verschiedenen Höhen des Gebäudes an der Ecke Heilmannstraße und Am Neckartor für den Messzeitraum 13. März bis 29. April 2015. *Grafik: Autoren*

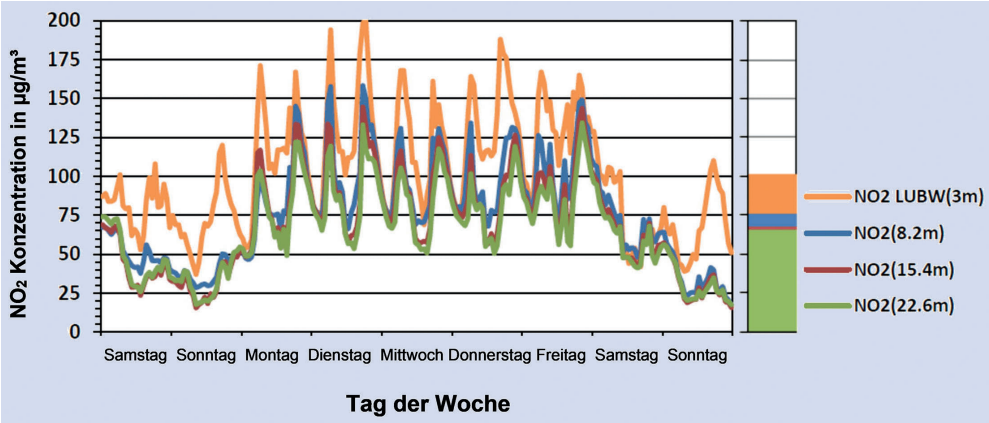

Bild 13 Wochengang der NO_2-Konzentrationen in verschiedenen Höhen des Gebäudes an der Ecke Heilmannstraße und Am Neckartor für den Messzeitraum 14. bis 22. März 2015. *Grafik: Autoren*

Ergebnisse und Bewertung der stationären Messungen

Die NO_2-Konzentrationen, die mit Hilfe der drei NO_X-Messgeräte in unterschiedlichen Höhen über den gesamten Messzeitraum gemessen wurden, sind in **Bild 12** dargestellt. Hinzu kommen die Werte der LUBW-Messstation, die sich in 3 m Höhe befindet.

In Bild 12 ist die NO_2-Konzentration über die Zeit (gesamte Messperiode) aufgetragen. Das Balkendiagramm auf der rechten Seite der Grafik zeigt zusammen mit dem anderen Diagramm den Durchschnitt der NO_2-Konzentration während der gesamten Messperiode in dieser bestimmten Höhe. Der Mittelwert der NO_2-Konzentration betrug während der gesamten Messdauer in 3 m Höhe 87,7 µg/m³, in 8,2 m Höhe 71,4 µg/m³, in 15,4 m Höhe 65,1 µg/m³ und in 22,6 m Höhe 60,7 µg/m³.

Dabei lassen sich zwei wesentliche Erkenntnisse aus der Langzeitbetrachtung ableiten. Zum einen wird die deutliche Abnahme der NO_2-Konzentrationen mit zunehmender Höhe deutlich. Die NO_2-Konzentrationen, die direkt an der Quelle - d. h. an der LUBW-Messstation - in einer Höhe von 3 m über dem Boden gemessen wurden, waren immer die höchsten, die in 22,6 m Höhe am niedrigsten. Dies ist einerseits anhand der Kurven für die einzelnen Höhen in Bild 12 ersichtlich, aber auch am Balkendiagramm, das die Mittelwerte in den einzelnen Höhen darstellt. Des Weiteren kann ein deutlicher Konzentrationsunterschied zwischen Wochentagen und Wochenenden (**Bild 13**) festgestellt und quantifiziert werden. Die NO_2-Konzentrationen waren unter der Woche, während der Perioden mit höherem Verkehrsaufkommen, deutlich höher. Im Gegensatz dazu war die NO_2-Konzentration am Wochenende bemerkenswert niedrig. Auch die zeitliche Variation der NO_2-Werte innerhalb eines Werktages lässt sich gut erkennen. Zu den Stoßzeiten, d. h. morgens und nachmittags zu den Berufsverkehrszeiten, sind Immissionspeaks von NO_2 zu erkennen. Der Trend für die Konzentration von NO und NO_x (hier nicht dargestellt) ist der NO_2-Konzentration ähnlich.

2.2.3 Passivsammlermessungen

Durchführung der Passivsammlermessungen

Es wurden sowohl für NO_2 als auch NO_X Passivsammler an 20 verschiedenen Standorten (Nr. 1a-1h, 2-13) um die B14 angebracht (Bild 10). Das Bild 16 zeigt die Positionen, an denen die Passivsammler an einem Gebäude an der Kreuzung Cannstatter Straße/Heilmannstraße montiert wurden. In jedem Stockwerk wurden Passivsammler angebracht. Im Bild sind die Positionen 1b-1g zu sehen. Die Passivsammler wurden nach zwei Wochen ausgetauscht und der Mittelwert über diesen Zeitraum wurde berechnet. Dies wurde zweimal wiederholt, so dass letztlich Daten über einen Zeitraum von sechs Wochen vorlagen. Die Standorte wurden ausgewählt, um sowohl die vertikale als auch die horizontale Verteilung der Schadstoffe zu untersuchen. Des Weiteren diente die Standortwahl der Untersuchung von Orten mit unterschiedlicher Verkehrsbelastung. Zudem wurden NO_X- und NO_2-Vertikalprofile an einem Standort aufgenommen und schließlich wurden für QA-Zwecke Vergleichsmessungen zu den kontinuierlichen Messungen mit den unterschiedlichen Messgeräten durchgeführt.

Ergebnisse und Bewertung der Passivsammlermessungen

Die Ergebnisse der Passivsammlermessungen sind in den Bildern 14 bis 16 dargestellt. In **Bild 14** ist zu erkennen, dass die

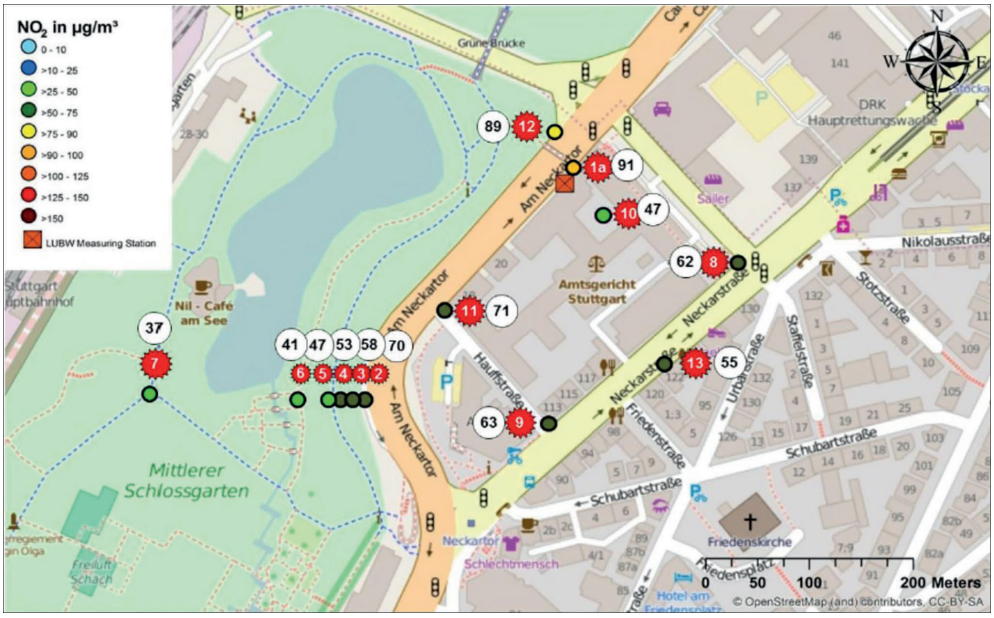

Bild 14 Ergebnisse von NO_2-Passivsammlermessungen, die vom 13. März bis 24. April 2015 an ausgewählten Punkten im Umfeld der Bundesstraße B14 durchgeführt wurden. *Grafik: Autoren*

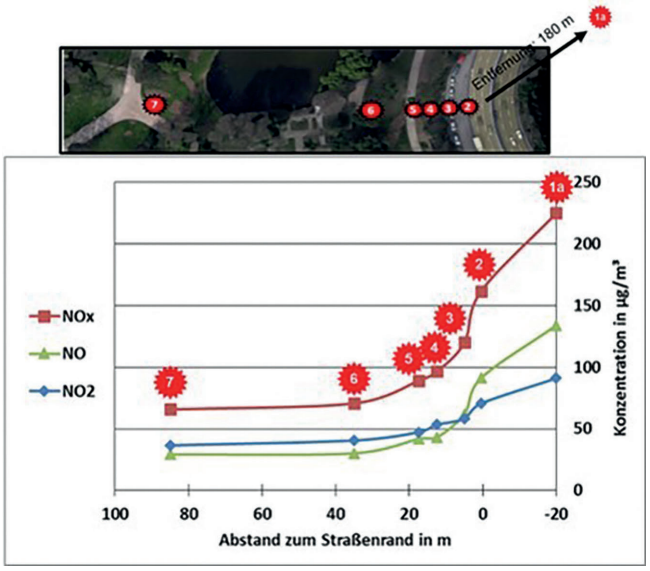

Bild 15 Ergebnisse von NO_X-, NO- und NO_2-Passivsammlermessungen, die vom 13. März bis 24. April 2015 an ausgewählten Punkten im Umfeld der Bundesstraße B14 durchgeführt wurden. *Grafik: Autoren*

höchsten NO_2-Konzentrationen im betrachteten Zeitraum an der LUBW-Messstation und der B14 auftraten. Die niedrigsten NO_2-Konzentrationen wurden im Park gemessen. Eine starke Abnahme der NO_2-Konzentrationen mit zunehmendem Abstand von der Straße konnte im Park (mittlerer Schlossgarten) festgestellt werden (siehe **Bild 15**). Auch die NO_2-Konzentration innerhalb eines Innenhofs, der zwar eine Verbindung zur B14 hatte, aber rundherum von Gebäuden abgeschirmt war (Nr. 10 in Bild 14) war mit 47 µg/m³ sehr viel niedriger als die gemessene NO_2-Konzentration von 91 µg/m³ direkt an der Bundesstraße. Die NO_2-Konzentrationen entlang der Nebenstraße (Neckarstraße) waren im Vergleich zu den NO_2-Konzentrationen an der Bundesstraße niedriger und lagen im Durchschnitt der betrachteten sechs Wochen zwischen 55 und 63 µg/m³. Punkt 1a und Punkt 11 waren zwei Standorte direkt am Straßenrand mit ähnlichen Abständen. Punkt 1a lag vor einer geschlossenen Häuserfront, Punkt 11 an einer Ecke desselben Gebäudekomplexes. Punkt 11 grenzte an ein Gelände ohne Bebauung, nur mit locker gepflanzten Büschen. Insgesamt herrschte an Punkt 11 eine wesentlich bessere Durchlüftung als an Punkt 1a, die sich in wesentlich niedrigeren Konzentrationen von 71 µg/m³ an Punkt 11 im Vergleich zu 91 µg/m³ an Punkt 1a niederschlug.

Die Messungen wurden über einen Zeitraum von sechs Wochen, vom 13. März bis 24. April 2015, durchgeführt. Der Expositionszeitraum der einzelnen Passivsammler betrug zwei Wochen. Unter anderem wurden mehrere Passivsammler auf einem Transekt vom Rande der B14 bis in den sich anschließenden Schlossgarten positioniert (Nr. 2 bis 7 in Bild 10). Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Bild 15 dargestellt, zusammen mit den Konzentrationen, die auf der gegenüberliegenden Straßenseite an der ca. 180 m entfernt liegenden LUBW-Messstation gemessen wurden (Nr. 1a). Zu sehen sind die NO_X-, NO- und NO_2-Konzentrationen. Vom Messpunkt 1a bis zum Messpunkt 7 ist eine starke Abnahme der Konzentrationen zu verzeichnen. Der Messpunkt 1a (LUBW-Messstation „Stuttgart - Am Neckartor“) liegt direkt an der Fassade einer Häuserfront mit fünfstöckigen Gebäuden. Messpunkt 2 liegt direkt am Rande der B14, die weiteren Punkte 3 bis 7 im angrenzenden Schlossgarten mit zunehmender Entfernung von der Bundesstraße. Obwohl Punkt 1a und Punkt 2 in etwa den gleichen Abstand zum Straßenrand besitzen, wurden an Punkt 2 deutlich niedrigere Konzentrationen gemessen. Die Belüftungssituation an Punkt 2 ist sehr viel besser als an Punkt 1a. Mit zunehmendem Abstand von der Straße nahmen die Konzentrationen signifikant ab. In weniger als 40 m vom Straßenrand nahmen die Konzentrationen auf ca. 30 % bei NO, 40 % bei NO_X und 60 % bei NO_2 ab, verglichen mit den Konzentrationen am Straßenrand, die an Punkt 2 gemessen wurden.

Die starke Abnahme mit dem Abstand zur Straße, wie in Bild 15 zu sehen, wurde auch in vertikaler Richtung festgestellt. An einem Gebäude der Häuserfront, an der sich auch die LUBW-Messstation befindet, wurden Passivsammler an jedem Stockwerk des fünfstöckigen Gebäudes (Punkt 1c bis 1g), auf dem Dach des

Gebäudes (Punkt 1h) und auch am Straßenrand in ca. 3 m Höhe (Punkt 1b) angebracht. Zudem wurden Passivsammler an der Messstation in unmittelbarer Nähe der Gasansaugung des kontinuierlich betriebenen Messgerätes der LUBW exponiert (Punkt 1a). Die Ergebnisse der sechswöchigen Messungen sind in **Bild 16** zusammengefasst. Wie zu sehen, traten die höchsten Konzentrationen an der Messstation (Punkt 1a) auf. Vom Punkt 1a zum Punkt 1b konnte eine sehr deutliche Abnahme verzeichnet werden, obwohl sowohl die Höhe beider Messpunkte als auch der Abstand zum Straßenrand nahezu identisch waren. Punkt 1b befand sich an der Kreuzung der Cannstatter Straße/Heilmannstraße wodurch der Standort sehr viel besser belüftet ist als der Standort 1a der Messstation, die sich unmittelbar an der Fassade vor der Häuserfront befindet, sodass es zu der deutlichen Abnahme der Konzentrationen von Punkt 1a zu Punkt 1b kam. Mit zunehmender Höhe nahmen die Konzentrationen aller gemessenen Stickstoffoxid-Verbindungen ab. Vergleicht man die Konzentrationen an der LUBW-Messstation (Punkt 1a) mit den Ergebnissen, die über Dach gemessen wurden (Punkt 1h), nahmen die NO_x-Konzentrationen um 70 %, die NO-Konzentrationen um 80 % und die NO_2-Konzentrationen um 50 % ab.

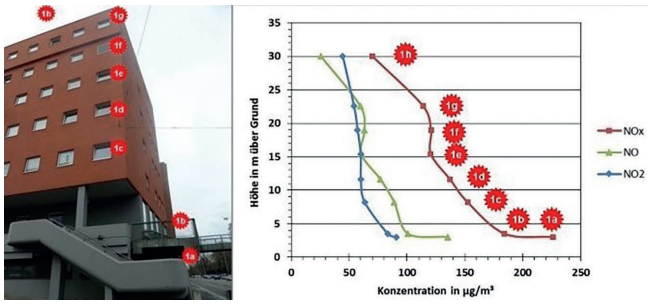

Bild 16 Ergebnisse von NO_X-, NO- und NO_2-Passivsammlermessungen, die vom 13. März bis 24. April 2015 an der Häuserfront eines Gebäudes in unmittelbarer Nähe zur LUBW-Messstation „Stuttgart - Am Neckartor" durchgeführt wurden. *Grafik: Autoren*

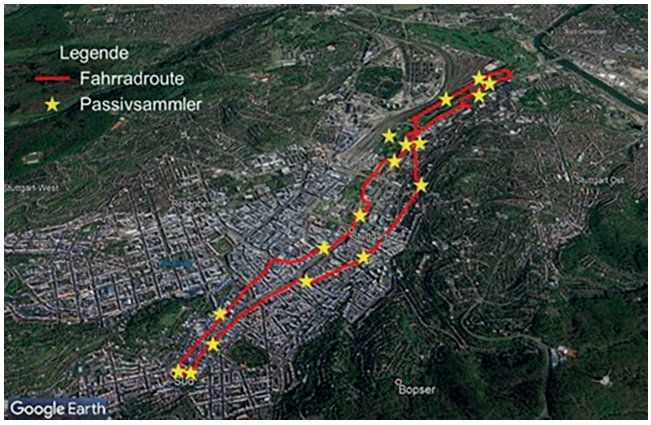

Bild 17 Die Fahrradroute der mobilen Messungen und die Standorte der Passivsammler für die dritte Messkampagne. *Foto: Autoren*

2.3 Luftqualitätsuntersuchung in der Stadt Stuttgart

Im Jahr 2017 wurden erneut mobile Messungen und Passivsammlermessungen entlang der B14 und anderen Straßen und im angrenzenden Schlosspark durchgeführt. Mit diesen Messungen sollten neue Erkenntnisse gewonnen werden, da zwischenzeitlich unterschiedliche Maßnahmen von der Stadt Stuttgart und der Landesregierung ergriffen worden waren, um die permanenten Grenzwertüberschreitungen zu reduzieren. Es gab ein ganzes Bündel an Reduktionsmaßnahmen, beginnend mit Verkehrsregelungen, die zu flüssigerem Verkehr im Bereich der Spotmessstationen führen sollen oder photokatalytische Oberflächen (Anstriche und Asphalt) zur NO_2-Reduzierung. Für diese Messkampagne kamen ein anderes Messfahrrad und eine andere Messtechnik für NO_2 zum Einsatz. Weitere Informationen über die Messtechnik sind in einer Publikation der Autoren beschrieben [12].

2.3.1 Mobile Messungen

Die dritte Messkampagne fand zwischen dem 5. Juli 2017 und dem 19. August 2017 mit insgesamt acht Messtagen statt. Es wurden Fahrradmessungen und Passivsammlermessungen durchgeführt. In **Bild 17** sind die Standorte der Passivsammler (gelbe Sterne) und die Fahrradroute (rote Linie) für diese Messkampagne dargestellt.

In **Bild 18** ist die räumliche Verteilung der NO_2-Konzentration während der dritten Messkampagne gezeigt, die vom 5. bis 19. Juli 2017 stattfand. Es handelt sich um Mittelwerte, die sich aus 48 einzelnen Messfahrten ergaben. Die Strecke führte einerseits entlang der B14, andererseits aber auch entlang von Seitenstraßen und durch Parkanlagen. Generell waren die NO_2-Konzentrationen in die Nähe von vielbefahrenen Hauptstraßen höher als in den Seitenstraßen oder in den Parks. Allerdings beeinflussten auch Emissionen von Baustellen bzw. eines Festivals mit Grill- und anderen Aktivitäten die Messergebnisse.

Die Beschreibung der Messergebnisse in Bild 18 beginnt bei Punkt 1, am Marienplatz, ein offener Platz mit einer großen Freifläche, an drei Seiten umgeben von Straßen; die Südostseite des Platzes begrenzt die B14, die dort in den Heslacher Tunnel mündet. Rund um diesen Platz werden permanent Luftverunreinigungen, hauptsächlich durch den Verkehr freigesetzt. Aufgrund der Größe des Platzes und des dadurch vorhandenen großen Luftvolumens, sind die dort gemessenen Konzentrationen von 45 bis 50 µg/m³ im Mittel über den betrachteten Zeitraum geringer, verglichen mit den angrenzenden engen Straßenschluchten mit viel Verkehr, z. B. auf der Hauptstätter Straße (Punkt 14), wo Konzentrationen von 60 bis 70 µg/m³ gemessen wurden. Die Route führte über die Tübinger Straße (Punkt 2 bis 4), eine Parallelstraße zur B14/Hauptstätter Straße, die seit 2016 zur Fahrradstraße umgestaltet wurde und nur noch von Fahrradfahrern in beiden Richtungen durchgängig befahren werden kann. Für Autofahrer endet die Straße als Sackgasse und wird seither von deutlich weniger Autos befahren als früher. Die Konzentrationen lagen in weiten Bereichen der Straße mit 40 bis 45 µg/m³ deutlich niedriger als auf der Hauptstätter Straße (Punkt 14) mit 60 bis 70 µg/m³. Es konnten aber auch auf der verkehrsberuhigten Tübinger Straße höhere Konzentrationen gemessen werden, z. B. an Punkt 3, wo sich eine Straßenkreuzung mit einer Ampel befindet, an der es zu Querverkehr kommt und dadurch vermehrt zu Anfahrvorgängen von Fahrzeugen mit erhöhten Emissionen; oder an Punkt 4, wo die Fahrradstraße zu Ende ist und vermehrt Autoverkehr zu einer Erhöhung der gemessenen Konzentrationen führte. An Punkte 5 und 6 führte die Messroute zurück an die B14, mit erhöhten NO_2-Konzentrationen zwischen 60 und 70 µg/m³. An Punkt 7 führte die Fahrradroute wieder weg von der B14, hinein in den Schlossgarten, vorbei am Eckensee, der Oper und dem Theater von Stuttgart. Diese Parkgegend wies bei früheren Befahrungen stets niedrige Konzentrationen auf. Im dar-

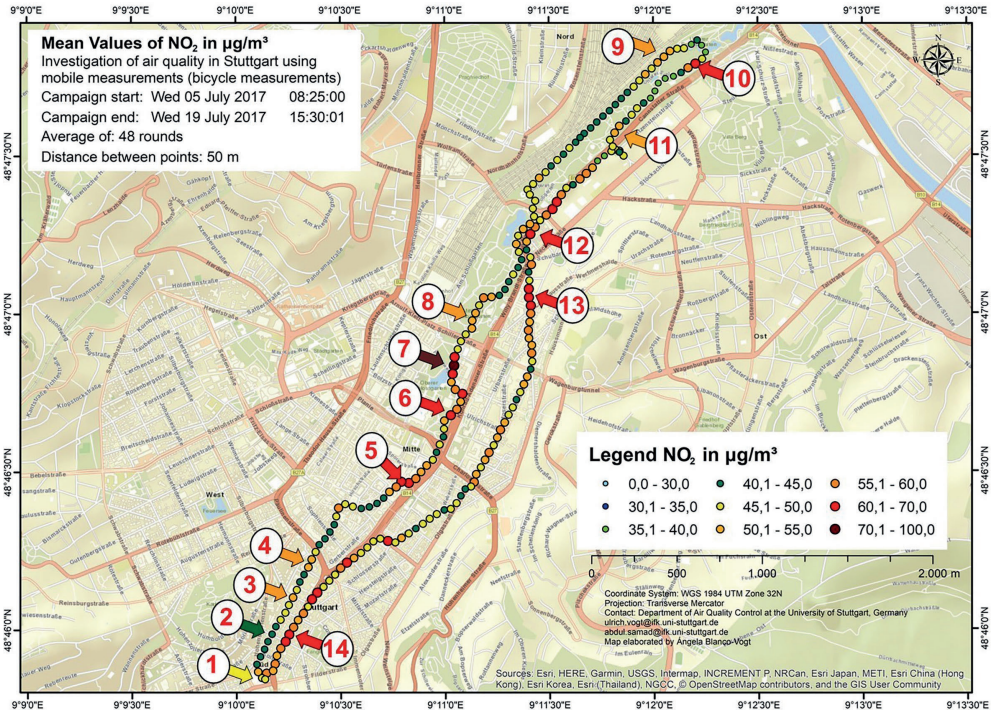

Bild 18 Räumliche Verteilung von NO_2 während der dritten Messkampagne vom 5. bis 19. Juli 2017 (N = 48 Messfahrten).
Grafik: Autoren

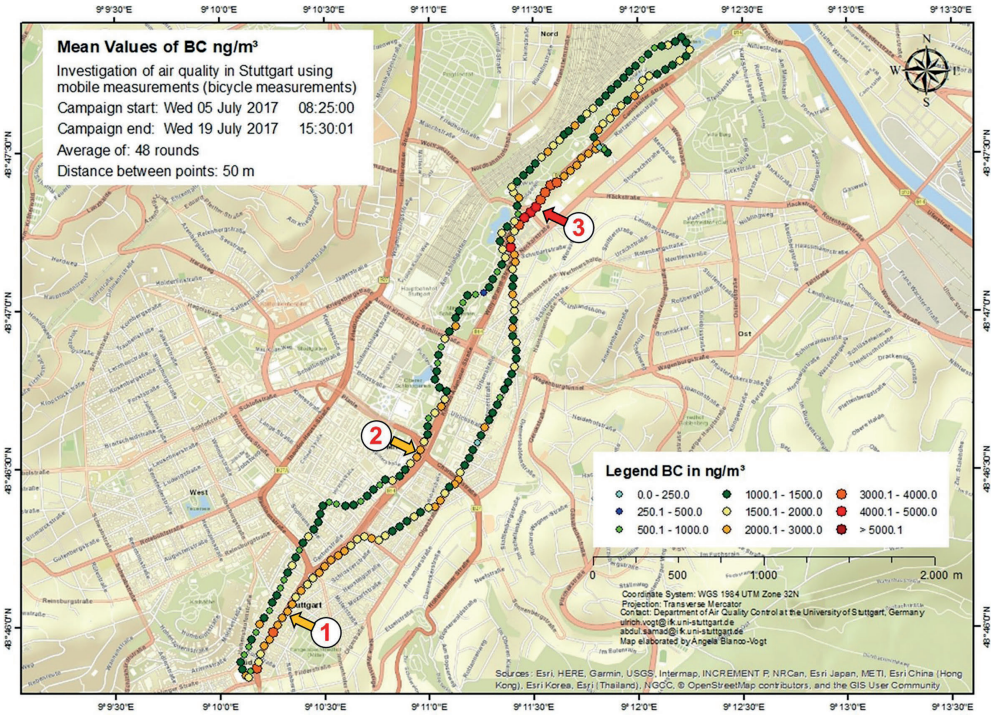

Bild 19 Räumliche Verteilung von BC (Black Carbon) während der dritten Messkampagne vom 5. bis 19. Juli 2017 (N = 48 Messfahrten).
Grafik: Autoren

gestellten Messzeitraum fand hier an mehreren Tagen ein Kinder- und Jugendfestival mit ausgedehnten Grill- und anderen Aktivitäten statt, die zu erhöhten Konzentrationen in diesem Bereich geführt haben. In der Umgebung von Punkt 8 führte die Route durch die Baustelle des neuen Stuttgarter Bahnhofs, an der es ebenfalls zu erhöhten Konzentrationen kam. Die Punkte 9 und 10 befanden sich ebenfalls an zwei Baustellen und wiesen erhöhte Werte auf, verglichen mit den angrenzenden Parkarealen. Im Bereich von Punkt 11 befindet sich eine große Grillstelle mit vielen einzelnen Grills. Bei schönem Wetter, das in der dargestellten Messperiode vorherrschte, finden dort stets ausgedehnte Grillaktivitäten statt, die in diesem Bereich des Schlossparks zu erhöhten Konzentrationen führen. Punkt 12 markiert die bekannte LUBW-Messstation, die hohe Konzentrationen aufwies. Punkt 13 befindet sich an einer Seitenstraße, der Kernerstraße mit Straßenschluchtcharakter. Diese Straße führt bergauf zum Kerner Platz, an dem sich mehrere Ministerien befinden. Über diese Straße führt ein Großteil des Zubringerverkehrs zu den Landesministerien und verursacht erhöhte Konzentrationen von 60 bis 70 µg/m³.

In **Bild 19** ist die räumliche Verteilung der Black Carbon (BC)-Konzentrationen in ng/m³ dargestellt. Die Konzentrationen sind an den beiden Straßenabschnitten der B14 im Bereich Hauptstätter Straße (Punkt 1 und 2) und Cannstatter Straße (Punkt 3), an der auch die Messstation „Stuttgart - Am Neckartor" liegt, mit 1 500 bis 5 000 ng/m³ sehr viel höher als in den angrenzenden Seitenstraßen, wie auf der verkehrsberuhigten Fahrradstraße in der Tübinger Straße oder im Vergleich zu den Werten in den Parkanlagen, die viel niedriger waren - meist bei 500 bis 2 000 ng/m³ - und nur an wenigen Punkten im Bereich von 2 000 bis maximal 3 000 ng/m³ lagen.

2.3.2 Passivsammlermessungen

Die Ergebnisse der NO_2-Passivsammler (**Bild 20**), die entlang der Fahrradroute für den gesamten Zeitraum der dritten Messkampagne ausgebracht wurden, bestätigen die Ergebnisse der mobilen Messungen. Die Konzentrationen im Park waren niedriger als die Konzentrationen an der Straße. Die maximalen Konzentrationen wurden mit 55 µg/m³ ein weiteres Mal an der Messstation beobachtet. Ebenfalls hoch lagen sie mit 48 µg/m³ im weiteren Verlauf der B14 in nordöstlicher Richtung in der dargestellten Karte. Im Bereich der engen Straßenschlucht der Hauptstätter Straße lagen die Konzentrationen mit 42 bzw. 52 µg/m³ auch auf hohem Niveau (südwestliche Ecke auf der Karte in Bild 21). Auf dem angrenzenden Marienplatz, der sehr weitläufig und somit gut durchlüftet ist, nur an seinen Rändern von der B14 tangiert wird und von weniger stark befahrenen Straßen umgeben ist, wurden mit 23 µg/m³ wesentlich geringere Konzentrationen als in der Straßenschlucht der Hauptstätter Straße gemessen.

In **Bild 21** sind Ergebnisse von NO_2-Passivsammlermessungen dargestellt, die im Rahmen eines Messprogramms vom 22. Januar 2017 bis 10. Juni 2018 durchgeführt wurden. Das Untersuchungsgebiet befand sich an einem sechsspurigen Streckenabschnitt der B14 in ca. 800 m Entfernung zur LUBW-Messstation nordöstlicher in Richtung Bad Cannstatt. Die B14 trägt in diesem Streckenabschnitt den Namen Cannstatter Straße. An die sechs Fahrspuren, die in diesem Bereich von ca. 100 000 Fahrzeugen pro Tag befahren werden, schließt sich in nordwestlicher Richtung ein ca. 3 bis 6 m breiter Grünstreifen an. Daran schließt sich eine ca. 4 m hohe Lärmschutzwand aus Beton an (Foto in Bild 21 (b)), die den angrenzenden Schlosspark gegen die Bundesstraße abgrenzt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden sieben Messpunkte in 25 bis 75 m Distanz voneinander unmittelbar am Fahrbahnrand zwischen Fahrbahn und Lärmschutzwand positioniert. Weitere Messpunkte befanden sich hinter der Lärmschutzwand im angrenzenden Schlosspark in einer Entfernung zur Lärmschutzwand von 10, 20 und 30 m.

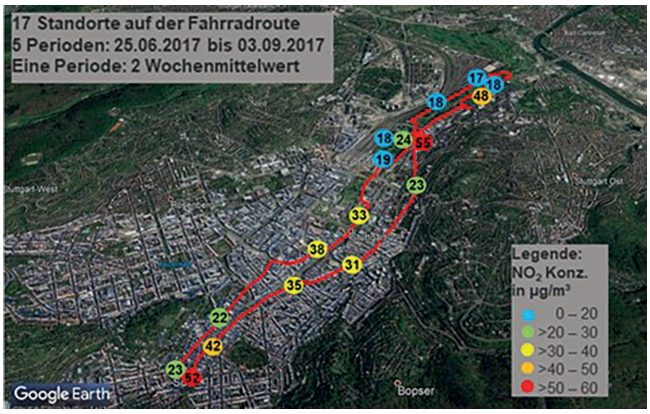

Bild 20 Ergebnisse der NO_2-Passivsammlermessungen für die dritte Messkampagne (25. Juni 2017 bis 3. September 2017). *Foto: Autoren*

Die Mittelwerte der gemessenen NO_2-Konzentrationen in µg/m³ über den genannten Zeitraum sind den Kreisen in Bild 21 zu entnehmen. Die NO_2-Konzentrationen am Fahrbahnrand lagen an fast allen Messpunkten in 1,5 m Höhe ähnlich hoch, zwischen 62 und 65 µg/m³. Im Vergleich dazu wurde im gleichen Zeitraum an der LUBW-Messstation eine etwas höhere NO_2-Konzentration von 71 µg/m³ (Passivsammler) bzw. 72 µg/m³ (kontinuierlich) gemessen. An zwei Messpunkten wurden Vertikalprofile in 0,75 m, 1,5 m und 2,25 m Höhe durchgeführt. Es ergab sich ein leichter Gradient in den gemessenen NO_2-Konzentrationen von 3 bis 4 µg/m³ mit abnehmenden Konzentrationen mit zunehmender Höhe. Dies trotz der geringen Höhenun-

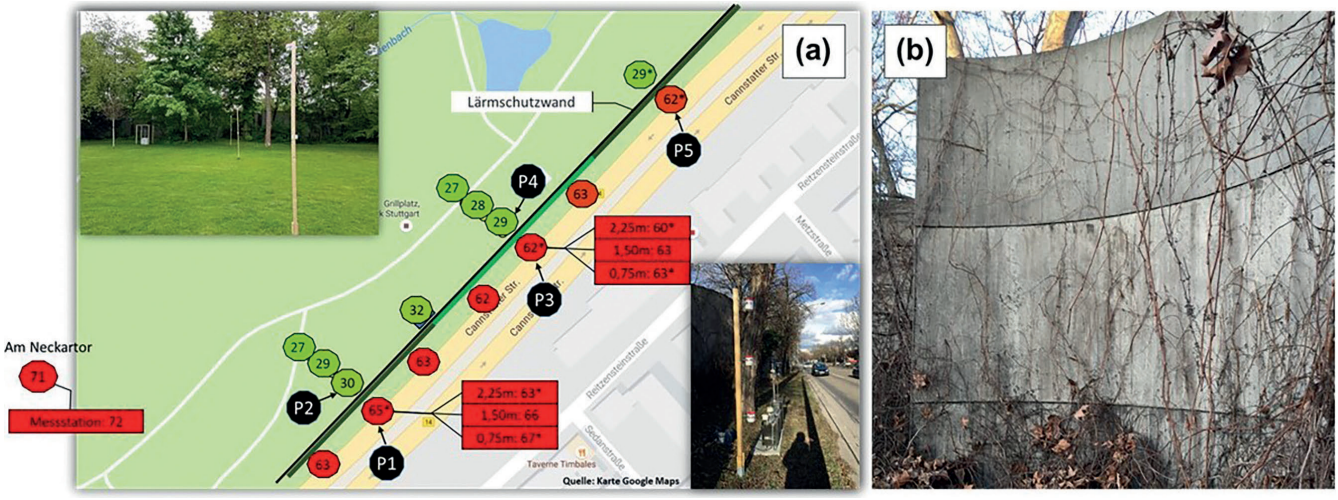

Bild 21 (a) Mittelwert der NO_2-Messungen (Zahlenwerte in µg/m³), die mithilfe von Passivsammlern an allen Messpunkten im unmittelbaren Umfeld der Lärmschutzwand an der B14 (zwischen Fahrbahnrand und Lärmschutzwand bzw. zwischen Lärmschutzwand und Park) und an der LUBW-Messstation „Stuttgart - Am Neckartor" im Zeitraum vom 22. Januar 2017 bis 10. Juni 2018 (n = 36 Messperioden von jeweils zwei Wochen) erfolgten. Mit * gekennzeichnete Werte stammen aus 17 Messperioden von jeweils zwei Wochen Dauer vom 22. Januar bis 17. September 2017. *Foto: Google Maps*
(b) Foto der ca. 4 m hohen Lärmschutzwand, die den Schlosspark von den Fahrbahnen der Bundesstraße B14 trennt. *Foto: Autoren*

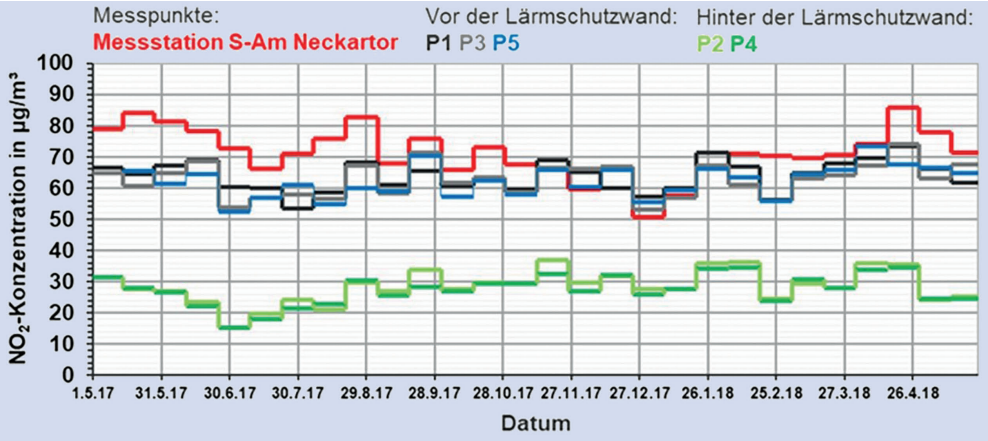

Bild 22 Zeitreihen (Zweiwochenmittelwert) der NO_2-Passivsammlermessungen an fünf Standorten P1 bis P5 im unmittelbaren Umfeld der Lärmschutzwand und an der Messstation „Stuttgart - Am Neckartor" im Zeitraum vom 1. Mai 2017 bis 27. Mai 2018.
Grafik: Autoren

terschiede der drei Messpunkte und der Tatsache, dass, angetrieben durch die fahrzeuginduzierte Turbulenz der ständig passierenden Fahrzeuge, vermutlich eine gute Durchmischung der Luftmassen im Straßenraum vorlag. Die NO_2-Werte hinter der Lärmschutzwand waren mit Konzentrationen von 29 bis 32 µg/m³ nur etwa halb so hoch wie am Straßenrand. Außerdem war ein leichter Gradient mit abnehmenden Konzentrationen von 2 bis 3 µg/m³ mit zunehmendem Abstand zur Straße zu verzeichnen. Die Lärmschutzwand stellt offensichtlich eine Barriere für die im Straßenraum freigesetzten Luftverunreinigungen dar. Es kommt zu deren Anreicherung und sie verweilen länger im Straßenraum, als dies ohne Lärmschutzwand der Fall wäre. Ohne Lärmschutzwand wäre eine gleichmäßige Abnahme mit zunehmendem Abstand zur Straße zu erwarten, mit etwas geringeren Konzentrationen am Straßenrand aufgrund des besseren Abtransportes der Luftverunreinigungen ohne die Lärmschutzwand.

In **Bild 22** sind die Zeitreihen der NO_2-Passivsammlermessungen als Zweiwochenmittelwerte an fünf der insgesamt 15 Messpunkte im unmittelbaren Umfeld der Lärmschutzwand an der B14 (Cannstatter Straße) und die zeitgleich gemessenen NO_2-Konzentrationen an der LUBW-Messstation vom 1. Mai 2017 bis 27. Mai 2018 dargestellt. Die Messpunkte P1, P3, P5 und die Messstation, die in unmittelbarer Nähe zum Straßenrand platziert sind, weisen ungefähr doppelt so hohe Werte auf wie die beiden Messpunkte P2 und P4. Die Messstation lag bis auf drei Messperioden stets ca. 10 bis 20 µg/m³ über den Konzentrationen an den Messpunkten P1, P3 und P5, obwohl das Verkehrsaufkommen vor der Messstation um ca. 20 % niedriger liegt. Der Abstand aller vier Messpunkte vom Straßenrand war ungefähr gleich groß, so dass die erhöhten Konzentrationen nicht auf den Abstand zum Straßenrand zurückzuführen sind. Möglicherweise spielen besondere lokale Strömungsverhältnisse an der Messstation eine Rolle, da sie sich auf der gegenüberliegenden Straßenseite befindet und eine dort vorhandene Häuserfront mit mehreren Stockwerken an diesem Standort eventuell zu einer stärkeren Akkumulation der Luftverunreinigungen führt als an den Standorten an der Lärmschutzwand. Unter Umständen spielt es auch eine Rolle, dass sich aufgrund einer nahen Straßenkreuzung mit Ampelanlage vor der Messstation der Verkehr häufig staut und es somit vermehrt zu Stop-and-go-Verkehr mit erhöhten Emissionen kommt, verglichen mit den Messpunkten P1, P3 und P5. Erwähnenswert ist auch die Tatsache, dass an allen in Bild 22 dargestellten Standorten kein ausgeprägter Jahresgang erkennbar ist.

3 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Auswertung der mobilen Messungen hat ergeben, dass die Belastung mit Luftverunreinigungen in Quellnähe sehr starken zeitlichen und räumlichen Schwankungen unterworfen ist. An Orten mit guter Belüftung konnte eine deutliche Abnahme der Konzentrationen festgestellt werden. Auch der Abstand zur Hauptquelle für die lokalen Luftverunreinigungen, die stark befahrene Bundesstraße B14, spielt eine große Rolle bei der Bewertung der Ergebnisse. Der Vergleich der Mittelwerte der einzelnen Teilstrecken zeigt, dass die Immissionen von Feinstaub, NO_2 und BC entlang der Teilstrecke Neckartor/Cannstatter Straße, an der sich auch die LUBW-Messstation „Stuttgart – Am Neckartor" befindet, im Mittel in allen Messungen am höchsten waren. Andere Teilstrecken, wie die „Brandt/Adenauer Straße" oder „Hauptstätter Straße", wiesen ebenfalls hohe Immissionskonzentrationen auf, erreichten aber nie das Konzentrationsniveau der Teilstrecke „Neckartor/Cannstatter Straße". Dies ist umso beachtlicher, da im Bereich der Hauptstätter Straße eine beidseitige Randbebauung vorhanden ist, wogegen im Bereich der Messstation nur einseitige Randbebauung vorherrscht. Die Frage, warum die höchsten Konzentrationen trotzdem im Bereich der Messstation gemessen wurden, konnte anhand der Messergebnisse nicht endgültig beantwortet werden. Eventuell herrschen in diesem Bereich besondere Strömungsverhältnisse, die zu dieser Situation führen. Weiterführende Messungen, die im Jahr 2015 durchgeführt wurden und sich auf den unmittelbaren Bereich des Neckartors konzentrierten, konnten ebenfalls keine Antwort diese Frage geben. Allerdings konnte mithilfe dieser Messungen festgestellt werden, dass die Stickstoffoxidkonzentrationen sehr stark mit dem Abstand zur B14 abnehmen. Auch ein starker vertikaler Gradient konnte festgestellt werden.

Die Luftqualität in Stuttgart hat sich in den letzten Jahren deutlich verbessert, dennoch wird der NO_2-Grenzwert überschritten. Der PM10-Grenzwert (Tageswert von 50 µg/m³ darf 35 Mal im Jahr überschritten werden) wird mittlerweile an allen Stuttgarter Messstationen bzw. an fast allen Messstationen in Deutschland eingehalten. Jedoch liegen die PM10-Konzentrationen deutlich über den Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation WHO, nach denen der Tageswert von 50 µg/m³ nicht öfter als dreimal im Jahr überschritten werden sollte. Aufgrund dessen und der Tatsache, dass die Konzentrationen von Luftverunreinigungen in den Städten im Allgemeinen auf einem sehr viel höheren Konzentrationsniveau liegen als in den meisten ländlichen

Gegenden, sollten weiterhin Bestrebungen zur Verbesserung der Luftqualität in Städten unternommen werden. Eine andere wichtige luftverunreinigende Komponente, die während dieser Messkampagnen nicht gemessen wurde, sind ultrafeine Partikel. Künftig sollten diese in die mobile Messplattform für weitere Untersuchungen der Luftqualität aufgenommen werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass mobile Messungen sehr gut geeignet sind, um ein größeres Untersuchungsgebiet zu beschreiben und dabei innerstädtische Hotspots von Luftschadstoffen messtechnisch aufzudecken. Die aufgenommenen Messdaten können darüber hinaus noch als wichtige Zusatzparameter für Modellierungen an komplexen Strukturen dienen. ■

DANKSAGUNG

Die Autoren danken *Andreas Metzger, Kaan Karacasulu, Janani Venkatraman Jagatha* und *Tobias Dominiczak* für ihre Unterstützung bei der Durchführung der Messungen und *Ángela Blanco-Vogt* bei der Darstellung der Messergebnisse in Karten unter Zuhilfenahme von ArcGIS-Software.

Literatur

[1] Stadtklima Stuttgart (2019a): Air quality monitoring stations in Stuttgart. Hrsg.: Amt für Umweltschutz der Stadt Stuttgart. www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?luft_messdaten_stationenins tuttgart

[2] 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen - 39. BImSchV) vom 2. August 2010.

[3] Stadtklima Stuttgart (2019b): NO2 and PM10 exceedances on LUBW hot spot monitoring stations Am Neckartor. Hrsg.: Amt für Umweltschutz der Stadt Stuttgart. www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?luft_messdaten_ueberschrei tungen_weitere_grafiken

[4] Luftreinhaltepläne für Baden-Württbemberg - Grundlagenband 2016. Hrsg.: Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe 2016. *Hangartner, M.; Pfeffer, U.*: Review of the application of diffusive samplers in the European Union for the monitoring of nitrogen dioxide in ambient air. European Commission Joint Research Centre (27-41).

[5] Luftreinhalteplan für den Regierungsbezirk Stuttgart - Teilplan Landeshauptstadt Stuttgart der PM10- und NO_2-Belastungen. 3. Fortschreibung des Luftreinhalteplanes zur Minderung der PM10- und NO_2-Belastungen. Regierungspräsidium Stuttgart, 2018. https://rp.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/RP-Internet/Stuttgart/Abteilung_5/Referat_54.1/_DocumentLibraries/Luftreinhalteplan/Stuttgart/541_s_luft_stutt_LRP_3_FS_2018.pdf

[6] *Tessum, M. W.; Larson, T.; Gould, T. R.; Simpson, C. D.; Yost, M. G.; Vedal, S.*: Mobile and Fixed-Site Measurements To Identify Spatial Distributions of Traffic-Related Pollution Sources in Los Angeles. Environmental science & technology 52 (2018) Nr. 5, S. 2844-2853.

[7] *Elen, B.; Peters, J.; van Poppel, M.; Bleux, N.; Theunis, J.; Reggente, M.* et al.: The Aeroflex: a bicycle for mobile air quality measurements. Sensors (Basel, Switzerland) 13 (2012) 1, pp. 221-240.

[8] *Birmili, W.; Rehn, J.; Vogel, A.; Boehlke, C.; Weber, K.; Rasch, F.*: Microscale variability of urban particle number and mass concentrations in Leipzig, Germany. metz 22 (2013) Nr. 2, S. 155-165.

[9] *Hagemann, R.; Corsmeier, U.; Kottmeier, C.; Rinke, R.; Wieser, A.; Vogel, B.*: Spatial variability of particle number concentrations and NOx in the Karlsruhe (Germany) area obtained with the mobile laboratory 'AERO-TRAM'. Atmospheric Environment 94 (2014), S. 341-352.

[10] *Hasenfratz, D.; Saukh, O.; Walser, C.; Hueglin, C.; Fierz, M.; Arn, T.* et al.: Deriving high-resolution urban air pollution maps using mobile sensor nodes. Pervasive and Mobile Computing 16 (2015), S. 268-285.

[11] *Hangartner, M.; Pfeffer, U.*: Review of the application of diffusive samplers in the European Union for the monitoring of nitrogen dioxide in ambient air. European Commission Joint Research Centre 27-41, 2009.

[12] *Samad, A.; Vogt, U.*: Investigation of urban air quality by performing mobile measurements using a bicycle (MOBAIR). Urban Climate 33 (2020). doi.org10.1016/j.uclim.2020.100650

Abdul Samad, M.Sc.
Foto: Autor

Dr.-Ing. Ulrich Vogt

Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik, Abteilung Rauchgasreinigung und Luftreinhaltung, Stuttgart.
Foto: Autor

© VDI Fachmedien GmbH & Co. KG, Düsseldorf 2021